

Document public

ETUDE DU FONCTIONNEMENT ET DE LA VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT DE L'ITON -

Etat des connaissances, analyse des données et premiers résultats

Rapport final

BRGM/ RP-65618-FR
Décembre 2016

Document public

ETUDE DU FONCTIONNEMENT ET DE LA VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT DE L'ITON -

Etat des connaissances, analyse des données et premiers résultats

Rapport final

BRGM/ RP-65618-FR
Décembre 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Service public du BRGM 13RSE1406

P.-Y. David, B. Meire, L. Cary, J.-B. Charlier, B. Ladouche, M. Lemesnil
Avec la collaboration de
M. Richard, L. Yecora Zorzano

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Marc Parmentier	Nom : Didier Pennequin
Fonction : Hydrogéologue	Fonction : Directeur Régional
Date : 16/12/2016	Date : 21/12/2016
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : rivière Iton, bassin versant de l'Iton, Rouloir, Lemme, Lème, sec-Iton, crue, étiage, nitrate, relation nappe-rivière, karst, Haute-Normandie, Normandie, Eure, Orne, Gardenia, Tempo.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

David P.-Y., Meire B., Cary L., Charlier J.-B., Ladouche B., Lemesnil M., Richard M. , Yecora Zorzano L., (2016) – Etude du fonctionnement et de la vulnérabilité du bassin versant de l'Iton - Etat des connaissances, analyse des données et premiers résultats. Rapport final. BRGM/ RP-65618-FR, 401 p., 246 ill., 22 tabl., 12 ann.

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le bassin versant de l'Iton (1 200 km²) est particulièrement soumis aux risques de sécheresse, d'inondation et de dégradation de la qualité des eaux. Il fait l'objet d'un SAGE[1] approuvé depuis le 12 mars 2012 qui couvre 134 communes réparties dans les départements de l'Eure et de l'Orne, qui vise notamment à mettre en œuvre une gestion équilibrée des milieux naturels au même titre et au même niveau que les usages, pour garantir un développement durable.

En 2011, une **situation d'étiage** précoce a été constatée sur l'ensemble du cours de l'Iton, conduisant à l'entrée en vigueur, dès le mois de mai, d'un arrêté préfectoral prescrivant des mesures de surveillance, de limitations ou d'interdictions provisoires de certains usages de l'eau. L'été et l'automne 2012 ont également représenté des périodes de basses eaux dans le bassin.

Concernant les **risques d'inondations**, plusieurs crues récentes ont été enregistrées en 2001, 1999, 1995 et 1966 ; les plus fortes crues étant plus anciennes (1881, 1866 et 1841). L'Iton fait d'ailleurs l'objet d'un PPRI[2]. Toutefois, le bassin de l'Iton ne dispose pas d'indicateurs prévisionnels de crue.

La présence de drains karstiques met par ailleurs en relation directe les écoulements de surface avec la nappe de la craie et lui confère une grande vulnérabilité vis-à-vis des pollutions superficielles (turbidité, pollution bactériologique, nitrates, produits phytosanitaires, etc.).

Cette vulnérabilité liée aux régimes et modes d'écoulements sur le bassin (sans doute différents en périodes d'inondation et sécheresse), à la fois face aux évènements climatiques et aux activités humaines présentes et passées (industrielles et agricoles), a entrainé des évolutions importantes des niveaux et une dégradation progressive de la qualité des eaux, qui conjuguée à l'impact écologique sur les eaux superficielles, rend nécessaire une gestion plus durable, plus adaptée et concertée de la ressource, en ligne avec les préceptes de la DCE[3].

C'est dans ce contexte que la DREAL de Haute-Normandie, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, la DDTM et le Conseil Général de l'Eure ont sollicité le BRGM pour définir une étude visant, dans un premier temps, à établir un état des lieux du fonctionnement du bassin de l'Iton et à proposer, dans leurs grandes lignes, des premières règles de gestion de la ressource en eau sur ce bassin, en termes quantitatifs et qualitatifs, sur la base des données disponibles. Une étape ultérieure consisterait ensuite, au vue des résultats de cet état des lieux, à approfondir la connaissance dans des secteurs à enjeux et à poursuivre la réflexion sur la mise en place d'un outil d'aide à décision visant, le cas échéant, à mieux préciser les règles de gestion de la ressource en eau. Cet outil pourrait prendre la forme d'un modèle de gestion du système aquifère de l'Iton (nappe + rivières).

Le présent rapport, correspond aux travaux réalisés dans le cadre de cette première phase d'état des lieux des connaissances et a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

Cette étude a permis dans un premier temps de rassembler, d'analyser et de faire la synthèse des données existantes et disponibles pour le bassin versant souterrain de l'Iton.

[1] SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau

[2] PPRI : Plan de Prévention des Risques d'Inondation

[3] DCE : La Directive Cadre européenne sur l'Eau

Un certain nombre d'avancées significatives ont pu être réalisées au niveau de la connaissance des caractéristiques et du fonctionnement du bassin de l'Iton, mais beaucoup de zones d'ombre demeurent encore.

Plus spécifiquement, une synthèse géologique a été réalisée afin de compiler les données existantes concernant les différentes formations géologiques en présence, les structures tectoniques (failles, anticlinales,…) et la karstification. Concernant les failles, cette synthèse a mis en évidence que beaucoup de failles sont supposées mais que peu ont été reconnues à l'affleurement et représentées par les géologues sur les cartes géologiques au 1/50 000. Des investigations complémentaires seraient nécessaires pour aller plus loin (cf. §16 Recommandations). Dans le cadre de cette étude quelques nouvelles structures ont pu être mises en évidence par corrélations géologiques. Cette étude a par ailleurs synthétisé de nombreux phénomènes karstiques en surface et en souterrain sur le bassin versant.

La synthèse hydrogéologique a permis de décrire les différentes nappes d'eaux souterraines présentes sur le bassin versant. L'aquifère de la craie constitue le principal aquifère du secteur ; une synthèse et une analyse statistique de ses paramètres hydrodynamiques ont été établies. L'analyse des variogrammes des piézomètres suivis en continu a ensuite mis en évidence la variabilité des comportements hydrodynamiques de cet aquifère au sein de la zone d'étude. Cette synthèse a par ailleurs montré que peu d'informations existent concernant la datation des eaux souterraines sur ce bassin versant. Un travail de synthèse a enfin été réalisé sur les sources. Celles-ci ont été classées en quatre groupes géographiques (1- amont du bassin ; 2- secteur de Gaudreville / La-bonneville ; 3- sources du rouloir ; 4- secteur de Brosville / Hondouville). La connaissance du fonctionnement de ces différentes sources est très lacunaire. Certaines de ces sources sont les résurgences de systèmes karstiques. Toutefois aucune de ces sources ne fait l'objet d'un suivi des débits en continu, ce qui limite la connaissance du fonctionnement de ces systèmes karstiques. On peut noter en particulier : les sources du rouloir, les résurgences du système karstique du sec-iton (sources de la fosse aux dames et de la forge), les résurgences du système karstique à Brosville et enfin la résurgence du système karstique développé sous le Roumois dont la source d'Hondouville (débit moyen de 1m^3/s environ) serait l'un des exutoires. Ce dernier système karstique est très peu connu. Des traçages seraient nécessaires pour mieux le définir.

Le bassin versant souterrain de l'Iton demeure encore mal défini dans plusieurs secteurs, notamment lié à des imprécisions au niveau des cartes piézométriques existantes (établies à une échelle régionale) et à des connexions karstiques interbassins à confirmer.

La synthèse hydrologique a établi le fonctionnement hydraulique des différents tronçons de l'Iton et de son affluent Leme/Rouloir sur la base des données disponibles. Les spécificités des cours d'eau de ce bassin versant ont été synthétisées et notamment un focus a été mené sur le fonctionnement du bras forcé de Verneuil qui dérive une partie du débit de l'Iton vers l'Avre. Le fonctionnement de ce bras forcé est très mal connu car il n'existe pas, à l'heure actuelle, de suivi en continu de son débit. Toutefois, pour les besoins de l'étude, et sur la base de la connaissance existante et de certaines hypothèses, une chronique de débit de ce bras forcé a été reconstituée. Les données de jaugeages ponctuelles existantes sur l'Iton ainsi que les chroniques de débits suivis en continus ont été exploitées. Les analyses statistiques de ces dernières ont mis en évidence un régime différent de l'Iton à l'amont et à l'aval du bassin versant.

Un travail préliminaire de qualification et de quantification des échanges nappe/rivière a ensuite été mené en se basant sur différentes approches (comparaison des altitudes de la rivière et de la nappe, exploitation des données débitmétriques existantes, étude de la répartition des écoulements en basses eaux). Les relations nappe/rivières ont été sectorisées et

quantifiées. Deux secteurs d'apports de débits par les eaux souterrains à l'Iton ont été mis en évidence (secteur de La Bonneville-sur-Iton et secteur de Brosville/Hondouville). Ces deux secteurs contribueraient en moyenne à près de 80% du débit de l'Iton à l'exutoire (à titre de comparaison, le rouloir contribuerait à hauteur de 20% en moyenne). Ces chiffres sont toutefois à prendre avec beaucoup de précautions car ils sont issus de données non synchrones entre les 2 secteurs et valables uniquement en période d'étiage, ils permettent toutefois de fixer les ordres de grandeurs dans l'attente de disposer de campagnes de mesures adaptées. Ils seraient à confirmer par la réalisation de plusieurs campagnes de jaugeages différentiels et synchrones à l'échelle du bassin versant.

Une attention a été portée en particulier sur le fonctionnement de l'Iton dans le secteur du Sec-Iton. Les débits perdus au niveau du Sec-Iton ont été estimés puis comparés aux débits restitués par les sources de la forge et de la fosse aux dames. Aucune campagne de mesure ne permet actuellement de réaliser une estimation fiable des débits perdus au niveau du sec-Iton. Le capacité maximale d'engouffrement du karst du Sec-Iton n'est actuellement pas connue, mais serait probablement supérieure à 1500 l/s sur l'ensemble du secteur du Sec-Iton compris entre Condé-sur-Iton et les Haisettes. Sur 4 campagnes de jaugeage exploitables, la part du débit perdu dans le Sec-Iton puis restitué représenterait entre 17% et 32% du débit de l'Iton à Bérengeville. La contribution la plus importante au débit proviendrait en fait d'un apport de débit par la nappe (entre 38% et 63%) supplémentaire au débit de restitution des pertes du sec-Iton. Le rouloir quant à lui contribuerait à hauteur de 11% à 33%. Tous ces chiffres sont également à prendre avec beaucoup de précaution et nécessitent d'être confirmés par des campagnes de mesures synchrones.

Le bassin versant de l'Iton a par ailleurs été modélisé à l'aide du logiciel GARDENIA (modèle globale) pour tenter d'effectuer un premier bilan au niveau des échanges nappe – rivière (Iton). Ce modèle traitant des relations pluie-débit-piézométrie a permis en particulier (1) d'estimer la part du débit lent (correspondant à l'alimentation par la nappe) dans le débit total de l'Iton et sa variation temporelle et (2) d'estimer les débits de fuite (débit souterrain sortant du bassin versant), notamment du fait de la présence de transferts karstiques. Les résultats de la simulation sous GARDENIA sur la période 1997-2013, montrent une contribution moyenne de 89% des écoulements lents (souterrains) au débit de l'Iton. De mai à septembre, le débit de l'Iton serait essentiellement assuré par les écoulements souterrains : de 96 à 99 % en moyenne. L'analyse statistique montre que les écarts interannuels sont les plus faibles pour cette période : quelles que soient les précipitations, la part du ruissellement reste, en effet, très faible (absence de pluies efficaces). En période de recharge hivernale (d'octobre à avril), la contribution des écoulements souterrains au débit de l'Iton est logiquement plus faible, mais reste largement prépondérante : de 70 à 95 % en moyenne. Les écarts interannuels sont, en revanche, plus importants : la part du ruissellement est, en effet, fortement dépendante des précipitations hivernales. Des ruissellements significatifs ne sont observés que lors des hivers exceptionnellement pluvieux, avec en général plusieurs mois très humides consécutifs. A titre indicatif, les ruissellements et résurgences karstiques auraient contribué à plus de 70% au débit de l'Iton lors des mois d'hivers suivants : janvier et février 95 ; déc. 1999 ; dec. et janv. 2000, mars 2001 et dec. 2012.

Un schéma de fonctionnement basé sur le bilan moyen (1997-2013) a été établi et montre que, sur les 616 mm entrés dans le bassin versant de l'Iton :

- 73% (450 mm) reparte dans l'air par évapotranspiration,

- 9,7% (60 mm) sortent du bassin par des écoulements souterrains ou du fait des prélèvements anthropiques,
- 0,6% (4mm) sont stockés dans l'aquifère,
- 16,6% (102 mm) sortent du bassin par des écoulements de surface (débit de l'Iton)

Un important travail d'inventaire des points de prélèvements et des volumes prélevés ainsi que des rejets a également été mené dans le cadre de cette étude. Ces prélèvements ont été distingués selon les trois principaux types d'usage : l'alimentation en eau potable (AEP), les utilisations pour l'agriculture et l'élevage et les utilisations pour l'industrie. On constate que l'AEP représente 75 % des volumes totaux prélevés (moyenne de 14 Mm^3 par an sur la période 1994 – 2013) suivi des prélèvements industriels 22% (4,2 Mm^3 / an en moyenne) et enfin, les prélèvements agricoles pour l'irrigation et l'élevage sont estimés à 0.6 Mm^3 /an en moyenne (soit 3 % des prélèvements totaux). Les prélèvements agricoles étant concentrés sur certains mois de l'année, ils peuvent représenter une part plus importante (jusqu'à 24%) sur des bilans réalisés à l'échelle mensuelle. Les grandes tendances qui ressortent quant à l'évolution des volumes d'eau prélevés sur la période 1994-2013 sont les suivantes :

- Forte variabilité des volumes prélevés pour l'agriculture, due aux variations climatiques et notamment pluviométriques entre les années, et au sein de chaque année ;
- Baisse de la production d'eau potable, qui passe de plus de 1,5 Mm^3/mois en 1995 à moins de 1 Mm^3/mois en 2013, soit une baisse de plus de 30 % en 18 ans ;
- Diminution des prélèvements industriels, qui passent d'environ 0.5 Mm^3/mois sur la période 1997-2001, à moins de 0.25 Mm^3/mois depuis 2010 du fait de la désindustrialisation de la vallée ;

Des bilans quantitatifs préliminaires ont ensuite pu être établis pour des cycles hydrologiques de hautes-eaux et de basses eaux. Ces bilans se fondent sur les flux d'eau calculés (entrées/sorties). Pour l'année humide étudiée (2000/2001), le bilan est excédentaire à l'échelle de la zone d'étude. Les sorties du système sont inférieures aux entrées de 18%. Sur l'ensemble de la zone d'étude, en période de hautes eaux, les prélèvements ne représentent qu'une faible part des sorties du système. Les prélèvements bruts et nets correspondent respectivement à 3.7% et 1.2% de la pluie efficace. L'année sèche étudiée (2011/2012) montre que le bilan est déficitaire à l'échelle de la zone d'étude. Les sorties du système sont supérieures aux entrées de 38%. Le piézomètre de Nogent-le-Sec présente une baisse de ses niveaux sur la période octobre 2011 – septembre 2012, indiquant un déstockage de l'aquifère sur cette période. La pression des prélèvements est plus forte en période de basses eaux. Les prélèvements bruts et nets représentent respectivement 13.1% et 4.6% de la pluie efficace à l'échelle du bassin versant. Ils atteignent respectivement 19.4% et 6.8% de la pluie efficace à l'aval du bassin versant.

Le fonctionnement du bassin de l'Iton lors des périodes d'étiage a ensuite été étudié. Une analyse de la vulnérabilité de la rivière a été menée, et les constats d'assecs du rouloir et de l'Iton ont été synthétisés et cartographiés. Une recherche d'indicateurs d'alerte a été menée et deux indicateurs sont d'ores-et-déjà proposés : (1) Indicateurs piézométriques d'alerte au printemps, (2) Indicateurs piézométriques de garantie de débit minimal. Par ailleurs la mise en place d'un modèle de prévision a été testée de manière préliminaire avec le logiciel TEMPO (traitement du signal). Il semble qu'un modèle de prévision des niveaux de nappes et de débits utilisant en entrée un générateur de données de pluie et d'ETP soit envisageable pour simuler en fin de période de recharge les prévisions de débits et niveaux piézométriques probables pour l'étiage à venir. Cette démarche devra être approfondie pour une mise en application opérationnelle.

Le fonctionnement du bassin de l'Iton lors des épisodes de crues a ensuite été étudié. Une recherche de premiers indicateurs a été menée. En comparant les deux relations Débit-Débit et Hauteur-Hauteur, un effet seuil dans la réponse hydrologique semble intervenir lorsque le niveau piézométrique dépasse un certain seuil sur les piézomètres de Coulonges et Graveron. Les crues exceptionnelles suggèrent en effet une amplification des crues en aval du Sec-Iton lorsque le karst est saturé. En parallèle de la présente étude, le BRGM a réalisé en 2015, une étude de la contribution des eaux souterraines aux crues des bassins de l'Iton et de l'Orbiquet, pour le compte du SCHAPI (cf. Charlier et al. 2015). Les conclusions de cette étude montrent que le laminage de la crue entre Bourth et Normanville est dû à la conjonction de 2 phénomènes : un de nature hydraulique du fait de la diffusivité de l'onde de crue, et un second lié au rôle du karst sur la ré-infiltration des écoulements au niveau des pertes du Sec-Iton. On observe globalement un rapport qui augmente de 1 à 2 à 1 à 3 entre, respectivement, le laminage dû aux pertes, et celui dû à la propagation de l'onde de crue. La plus grande proportion de laminage dû à l'hydraulique est probablement engendrée par le plafonnement des pertes autour de 7 m^3/s (au-delà d'un débit de crue maximal de 12 m^3/s). S'y ajoutent les apports des aquifères (débit de base) qui tamponnent cet écrêtement. Le résultat le moins attendu de cette modélisation est l'absence de lien avec le niveau de remplissage initial du karst. Ainsi, le débit de pertes semble être principalement contrôlé par le débit de crue sans qu'un effet de seuil lié au karst ne soit observé.

En définitive, le piézomètre de Coulonges est potentiellement un indicateur du niveau de saturation du bassin (relation forte avec le débit de base) sans pour autant être un indicateur du laminage des crues sur le tronçon Bourth-Normanville qui intègre tout un ensemble de pertes (Sec-Iton, Lême) et d'apports (Rouloir, émergences, etc.).

L'augmentation de la réponse hydrologique à Normanville sur la relation Débit-Débit qui met en évidence une influence du niveau de remplissage du karst, n'est a priori pas liée à une baisse du taux de pertes (et donc au rôle écrêteur du karst), mais plutôt liée aux déclenchements d'apports ne se produisant qu'en crue exceptionnelle. Ces derniers pourraient provenir de la mise en eau du Rouloir qui se produit dans ce type de condition extrême et/ou des contributions plus intenses des émergences de Conches-en-Ouche et de Glisolles.

Ce travail montre que, bien que le karst joue un rôle écrêteur sur le laminage des crues, l'atténuation des pics de crue entre Bourth et Normanville est majoritairement liée à une question hydraulique, plutôt qu'à une perte effective de débit. Cette forte diffusion de l'onde de crue peut être liée à la morphologie méandriforme du réseau hydrographique au niveau du tronçon Damville-Glisolles, ainsi qu'aux nombreuses zones de débordement et stockage temporaire.

Enfin, un important travail d'analyse de la qualité des eaux du bassin versant de l'Iton a été menée sur la base des données disponibles sur ADES et celles transmises par l'AESN. Après une caractérisation hydrogéochimique du bassin versant (volet1) et une analyse des pressions (volet 2) une analyse plus détaillée a été menée concernant la question des nitrates (volet 3).

Les eaux de surface et souterraines du bassin versant de l'Iton sont typiques de l'aquifère de la craie. Les eaux de la nappe de la craie et des eaux de surface ont des compositions très proches suggérant des relations importantes entre elles. En conséquence, la nappe est très vulnérable aux pollutions de surface, en particulier à celles causées par l'activité agricole. Les eaux souterraines sont plus concentrées que les eaux de surface, en particulier en nitrates et pesticides et sont devenues, en raison de la grande vulnérabilité aux pollutions de surface, liée au contexte géologique karstique, un réservoir de polluants. L'alimentation de l'Iton par les eaux souterraines, en particulier en étiage, entraine la pollution des eaux de surface par les eaux

souterraines. Il est notable que les tendances en nitrates dans l'Iton sont à la hausse à l'amont de Normanville et en baisse à l'aval. Des investigations complémentaires seraient nécessaires pour mieux comprendre ce phénomène.

Les fortes teneurs en pesticides dans les eaux de surface sont généralement mesurées en période d'étiage en lien avec l'alimentation prédominante par la nappe, tandis que les faibles teneurs sont associées à des périodes de forts débits de l'Iton sous l'effet de la dilution.

Le processus d'autoépuration par dénitrification pourrait être un facteur expliquant les faibles teneurs en nitrates dans les eaux souterraines dans certains secteurs à l'amont du bassin versant de l'Iton.

Le dernier paragraphe du rapport établit les recommandations d'acquisition de données complémentaires qui seraient nécessaires pour améliorer la connaissance du fonctionnement de ce bassin versant.

Sommaire

1. Introduction 27

2. Présentation générale et détermination de la zone d'étude 29

2.1. CADRE GEOGRAPHIQUE 29

2.2. DELIMITATION DU BASSIN VERSANT SOUTERAIN ET DE LA ZONE D'ETUDE 30

2.3. ALTITUDE TOPOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE 40

2.4. RUISSELLEMENT (IDPR) 41

2.5. LES ZONES HUMIDES 42

3. Données climatiques 45

3.1. VARIABILITE DES PRECIPITATIONS 45

3.2. SPATIALISATION DE LA PLUIE EFFICACE ET DE L'INFILTRATION A L'ECHELLE DU BASSIN DE L'ITON 46

3.2.1. Spatialisation de la pluie 46

3.2.2. Spatialisation de la réserve utile du sol (RU) 47

3.2.3. Spatialisation de l'infiltration 48

3.3. RESULTATS : CARTE SPATIALISEE DE LA PLUIE EFFICACE ET DE L'INFILTRATION 50

3.4. ESTIMATION DE L'INCERTITUDE DE LA PLUIE EFFICACE ET DE L'INFILTRATION CALCULEE 52

4. Synthèse géologique 57

4.1. CADRE GEOLOGIQUE 57

4.2. DESCRIPTION DES FORMATIONS DU SUBSTRATUM 60

4.2.1. Oxfordien supérieur – calcaires à astartes (j_7) 61

4.2.2. Les Sables Ferrugineux de l'Aptien (n_6) 61

4.2.3. Albien (n_7) 61

4.2.4. Les craies du Cénomanien (c_1) 62

4.2.5. Les Sables du Perche du Cénomanien supérieur (c_1P) 62

4.2.6. Les craies du Turonien (c_2) 63

4.2.7. Les craies sénoniennes : Coniacien (c_3), Santonien (c_4) et Campanien (c_5) 63

4.2.8. Yprésien supérieur – Sables de Cuise (e_4) 64

4.2.9. Rupélien - Sables du Stampien (g_1) 64

4.2.10. Pliocène – Sables de Lozère (p) 64

4.3. DESCRIPTION DES FORMATIONS SUPERFICIELLES 65
4.3.1. Les formations résiduelles à silex (RS) et les biefs et limons à silex (B-LPS) 65
4.3.2. Les limons des plateaux (LP) 68
4.3.3. Les colluvions et les formations de pente (C) 69
4.3.4. Le complexe alluvionnaire (Fx-y-z) 69

4.4. SYNTHESE GEODYNAMIQUE 70
4.4.1. Trias et Jurassique 70
4.4.2. Crétacé : l'arrivée de la « mer de la Craie » 70
4.4.3. Tertiaire : une succession de transgressions et de régressions 71
4.4.4. Quaternaire 72

4.5. SYNTHESE STRUCTURALE ET TECTONIQUE 72
4.5.1. Les structures plicatives : axes anticlinaux, synclinaux, flexures et bombements . 74
4.5.2. Les structures cassantes (failles) 75
4.5.3. Le « paléo-Iton » 80
4.5.4. Rôle hydrogéologique des failles 80

4.6. EXPLOITATION ET CORRELATIONS DES DONNEES GEOLOGIQUES A L'ECHELLE DE LA ZONE D'ETUDE 81
4.6.1. Les structures tectoniques hypothétiques mises en évidence par les corrélations géologiques 81
4.6.2. Anomalie piézométrique de Damville 84

5. Fracturation et susceptibilité des formations crayeuses à la karstification 87

5.1. LE PHENOMENE DE KARSTIFICATION 87

5.2. FRACTURATION DES FORMATIONS CRAYEUSES 88

5.3. SUSCEPTIBILITE DES FACIES CRAYEUX A LA KARSTIFICATION 89

5.4. LE « SEC-ITON » 94
5.4.1. Présentation du secteur 94
5.4.2. Observations de l'exo-karst du Sec-Iton (les bétoires) 99
5.4.3. Observations de l'endo-karst du Sec-Iton 101
5.4.4. Hypothèses expliquant les phénomènes de karstification du Sec-Iton 105

6. Synthèse hydrogéologique 107

6.1. AQUIFERES EN PRESENCE 107
6.1.1. Nappe perchée dans les limons et les argiles à silex 107
6.1.2. Nappe tertiaire au Nord-Est d'Evreux 109
6.1.3. Nappes des sables du perche 111
6.1.4. Nappe des alluvions 113
6.1.5. Nappe de la craie 113
6.1.6. Nappe albo-aptienne 116

6.2. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES 118

6.3. PIEZOMETRIE 120
6.3.1. Fluctuation du bassin versant hydrogéologique de l'Iton 120
6.3.2. Fluctuations de la nappe de la craie 121

6.4. DATATION DES EAUX SOUTERRAINES 124

6.5. LES SOURCES ET RESURGENCES 127

7. Synthèse hydrologique 133

7.1. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DE L'ITON 134
7.1.1. L'Iton amont 135
7.1.2. Le Sec-Iton 136
7.1.3. L'Iton de Gaudreville-la-Rivière à l'amont d'Evreux 136
7.1.4. L'Iton entre l'amont d'Evreux et Tourneville 136
7.1.5. L'Iton aval 137

7.2. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU LEME/ROULOIR 137
7.2.1. Le Lemme amont 139
7.2.2. Section pérenne du Lême 139
7.2.3. Le Lême aval 139
7.2.4. Le Rouloir 140

7.3. ANTHROPISATION DE L'ITON ET DU ROULOIR 142
7.3.1. Référencement des ouvrages hydrauliques 142
7.3.2. Les augets du sec-Iton 143
7.3.3. Canalisation de l'Iton en amont de Normanville 145
7.3.4. Les bras forcés de l'Iton 145

7.4. PROFILS HYDROLOGIQUES DE L'ITON ET DU ROULOIR 152
7.4.1. Campagne de E. Ferray de 1882 152
7.4.2. Campagnes du BRGM de 1968 et 1970 153
7.4.3. Jaugeages ponctuels 158
7.4.4. Les constats d'assecs sur l'Iton et le Rouloir 161

7.5. ETUDES STATISTIQUES DES DEBITS AUX STATIONS DE CRULAI (ITON AMONT) ET DE NORMANVILLE (ITON AVAL) 163
7.5.1. Analyse des chroniques de débits 165
7.5.2. Analyse des régimes hydrologiques (Illustration 109 c. et d.) 165
7.5.3. Analyse des boites à moustaches 166
7.5.4. Analyse des CWT 166
7.5.5. Synthèse 167

8. Qualification et quantification des échanges nappe/rivière 169

8.1. QUALIFICATION DES ECHANGES NAPPE/RIVIERE PAR COMPARAISON DE LA LIGNE D'EAU ET DES NIVEAUX DE LA NAPPE....169
8.1.1. Secteur du Sec-Iton....169
8.1.2. Secteur de l'Iton aval....171

8.2. QUANTIFICATION DES RELATIONS NAPPE/RIVIERE PAR ANALYSE DES RESULTATS DES CAMPAGNES DE JAUGEAGE....174

8.3. QUANTIFICATION DES ECHANGES NAPPE/RIVIERE PAR ANALYSE DE LA REPARTITION DES ECOULEMENTS EN BASSES EAUX....181
8.3.1. Objectif et méthode....181
8.3.2. Résultats et interprétation....182

8.4. QUANTIFICATION DU FONCTIONNEMENT DU SEC-ITON....187
8.4.1. Quantification des pertes du Sec-Iton....187
8.4.2. Quantification des résurgences karstiques situées à l'aval du Sec-Iton....190

9. Estimation de la contribution de la nappe au débit de l'Iton et des débits de fuite par modélisation GARDENIA....193

9.1. MODELE PLUIE-DEBIT-PIEZOMETRIE AVEC LE CODE GARDENIA....193
9.1.1. Principe....193
9.1.2. Structure du modèle....193
9.1.3. Stratégie de calibration....195

9.2. APPLICATION D'UN MODELE PLUIE-DEBIT-PIEZOMETRIE A LA STATION DE NORMANVILLE....196
9.2.1. Objectif....196
9.2.2. Données et paramétrisation....196
9.2.3. Résultats du Modèle Pluie-Débit-Piézométrie (Normanville - Moisville) entre 1997 et 2013....197
9.2.4. Synthèse des résultats....198

9.3. APPLICATION D'UN MODELE PLUIE-DEBIT-PIEZOMETRIE A LA STATION DE BOURTH....204

10. Les prélèvements et rejets en nappe et en rivière....207

10.1. DEMARCHE SUIVIE POUR LE RECUEIL DES DONNEES DE PRELEVEMENTS207

10.2. PRELEVEMENTS AGRICOLES....207
10.2.1. Inventaire des prélèvements agricoles....207
10.2.2. Mensualisation des données....208

10.3. PRELEVEMENTS INDUSTRIELS....211
10.3.1. Inventaire des prélèvements industriels....211

10.4. PRELEVEMENTS AEP....211
10.4.1. Inventaire des prélèvements AEP....211

10.4.2. Mensualisation des données 212

10.5. SYNTHESE DES DONNEES DE PRELEVEMENT 212

10.6. LES REJETS 214
10.6.1. Les rejets des stations d'épuration 214

11. Bilans des flux dans le bassin de l'Iton 221

11.1. DETERMINATION DES ANNEES DE REFERENCE POUR L'ETABLISSEMENT DES BILANS QUANTITATIFS 221

11.2. ENTREES DU SYSTEME 225

11.3. SORTIES DU SYSTEME 226

11.4. BILANS 228
11.4.1. Année humide (cycle 2000/2001) 228
11.4.2. Année sèche (cycle 2011/2012) 230

12. Fonctionnement du bassin de l'Iton lors des évènements extrêmes : cas des étiages233

12.1. VULNERABILITE DE LA RIVIERE AUX ETIAGES 233
12.1.1. Analyse des dépassements des seuils sécheresse 233

12.2. RECHERCHE D'INDICATEURS D'ALERTE 238
12.2.1. Indicateurs piézométriques d'alerte au printemps 238
12.2.2. Indicateurs piézométriques de garantie de débit minimal 240

12.3. VERS LA MISE EN PLACE DE MODELES DE PREVISION : MODELE TEMPO DE PREVISION DES NIVEAUX DE NAPPES ET DE DEBITS 245
12.3.1. Présentation de la méthode 245
12.3.2. Prévision des niveaux de nappes et des débits 250

13. Fonctionnement du bassin de l'Iton lors des évènements extrêmes : cas des crues255

13.1. RAPPEL DES PRINCIPALES CRUES HISTORIQUES 255
13.1.1. Crues estivales de l'Iton 255
13.1.2. Crues hivernales de l'Iton 257
13.1.3. Crues du Rouloir 261

13.2. RECHERCHE DE PREMIERS INDICATEURS D'ALERTE 261
13.2.1. Relations Débit vs. Piézométrie à Normanville (source BRGM/RP-65570-FR)261
13.2.2. Relations Débit-Débit et Hauteur-Hauteur en fonction du niveau de saturation du karst (source BRGM/RP-65570-FR) 263
13.2.3. Relation engouffrement sec-Iton / niveau piezo 268

13.3. MODELISATION DE LA CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES AUX CRUES DE L'ITON (SOURCE BRGM/RP-65570-FR) 269
13.3.1. Présentation et principes 269

13.3.2. Résultats : échanges surface / souterrain sur le tronçon Bourth-Normanville lors des crues 269

14. Volet Qualité 275

14.1. VOLET 1: CARACTERISATION HYDROGEOCHIMIQUE 275
14.1.1. Publications récentes sur la chimie des eaux souterraines en Haute-Normandie 275
14.1.2. Les faciès majeurs des eaux du bassin versant de l'Iton 276
14.1.3. Evolution de la composition des eaux de surface en fonction du débit 283
14.1.4. Conditions d'oxydo-réduction 286

14.2. VOLET 2 : PRESSIONS EXERCEES SUR LE TERRITOIRE ETUDIE 287
14.2.1. Occupation du sol 287
14.2.2. Agriculture 289
14.2.3. Impacts du drainage agricole sur la ressource en eau 291
14.2.4. Industrie 294

14.3. VOLET 3 : ASPECT QUALITE DES EAUX – BILAN NITRATES 296
14.3.1. Le bore comme traceur de mélanges avec les eaux usées 296
14.3.2. Les nitrates dans les eaux souterraines 297
14.3.3. Qualité amont-aval des eaux de surface 301
14.3.4. Dénitrification 302
14.3.5. Variations des teneurs en nitrates en fonction du contexte géomorphologique et des niveaux de nappe 304
14.3.6. Tendance des teneurs en nitrates dans les eaux de surface 305
14.3.7. Etude des sources de nitrates à Chaise-Dieu du Theil 310
14.3.8. Micropolluants des eaux de surface 314
14.3.9. Point d'eau particulier 317

15. Conclusions 319

16. Recommandations 325

17. Bibliographie 329

Liste des illustrations

Illustration 1 : Situation de la zone d'étude....29

Illustration 2 : Population des communes (en nombre d'habitants) de la zone d'étude....30

Illustration 3 : Liste et cartographie des extensions des 7 cartes piézométriques disponibles pour le bassin de l'Iton....31

Illustration 4 : (a) à gauche, bassins versants souterrains tracés à partir des différentes cartes piézométriques disponibles ; (b) à droite, zone d'étude retenue....32

Illustration 5 : Piézomètres ayant fait l'objet d'un suivi en continu de septembre 2013 à août 2015 pour étudier la pérennité de la crête piézométrique séparant le Bassin de l'Iton et de l'Avre....33

Illustration 6 : 2 Coupes piézométriques réalisées entre l'Avre et l'Iton à partir de 11 piézomètres suivis en continu de septembre 2013 à août 2015....34

Illustration 7 : Incertitude du bassin versant hydrogéologique de l'Iton sur sa limite Nord Est....35

Illustration 8 : Incertitude du bassin versant hydrogéologique de l'Iton sur sa limite Nord Ouest....36

Illustration 9 : Carte piézométrique du secteur de Soligny-la-trappe (61) - Syndicat Départemental de l'Eau du CG61....37

Illustration 10 : Traçages positifs recensés dans la base régionale de Haute-Normandie (David P-Y., 2009)....38

Illustration 11 : Traçage réalisé par Hydroexpert en avril 1998 depuis la bétoire de la Piquetière (B7125) – connexion avec le bassin de la Risle....39

Illustration 12 : Altitudes et pentes des terrains du bassin versant de l'Iton....40

Illustration 13 : IDPR du bassin versant de l'Iton....42

Illustration 14 : Localisation des territoires classés "zone humide" – voir typologie en Tableau 1....43

Illustration 15 : Moyenne trentenaire (1982-2012) de la pluviométrie annuelle selon la grille AURELHY établie par Météo France....45

Illustration 16 : Réserve utile des sols à l'échelle du bassin versant de l'Iton (source : base de données des sols de France INRA pour la délimitation ; carte pédologique de Haute-Normandie pour les valeurs de RU)....48

Illustration 17 : Correspondance utilisée entre la valeur de l'IDPR et le coefficient de ruissellement retenu (Pinson S. et al., 2010)....49

Illustration 18 : Carte des coefficients d'infiltration à l'échelle de la zone d'étude (déterminés à partir de l'IDPR)....49

Illustration 19 : Résultats de la spatialisation de la pluie efficace - pluies efficaces annuelles moyennes (mm/an) sur la zone d'étude (moyenne interannuelle réalisée sur la période 1994-2014)....51

Illustration 20 : Résultats de la spatialisation de l'infiltration - Infiltration annuelle moyenne (mm/an) sur la zone d'étude (moyenne interannuelle réalisée sur la période 1994-2014)....51

Illustration 21 : Schéma de principe d'un bilan hydrique du sol....53

Illustration 22 : Comparaison des pluies efficaces annuelles déterminées selon plusieurs méthodes (comparaison par l'outil BRGM « ESPERE »)....54

Illustration 23 : Comparaison des recharges annuelles déterminées selon plusieurs méthodes (comparaison par l'outil BRGM « ESPERE »)....55

Illustration 24 : Comparaison de la recharge estimée par la méthode semi-spatialisée couplée à l'IDPR (dite « semi-spatialisée ») aux valeurs de recharge estimées par les autres méthodes (représentation en

boite à moustache dont le rectangle encadre 75% des valeurs et le tiré noir dans le rectangle représente la médiane) 56

Illustration 25 : Localisation du secteur d'étude sur la carte géologique de la France au 1/1.000.000 (©BRGM) (j_3 : Jurassique supérieur, c_1 : Crétacé inférieur, c_2 : Crétacé supérieur, e : Eocène, g : Oligocène, p : Pliocène)..... 57

Illustration 26 : Situation de la zone d'étude sur un écorché des formations mésozoïques (Quesnel, 1997)58

Illustration 27 : Carte géologique simplifiée du bassin versant de l'Iton..... 59

Illustration 28 : Découpage lithostratigraphique du Crétacé de Haute-Normandie (d'après Juignet, 1974 et Lasseur, 2008). L'ensemble Crétacé repose sur les formations du Jurassique supérieur 60

Illustration 29 : Répartition schématique des formations superficielles sur substratum crayeux de l'Ouest du Bassin de Paris (Quesnel et al., 1996) 65

Illustration 30 : Carte des épaisseurs des Formations résiduelles à silex (d'après Quesnel, 1997) et localisation du secteur d'étude 66

Illustration 31 : Situation de la zone d'étude sur la carte de répartion des différentes familles de RS (d'après Laignel, 1997) 67

Illustration 32 : Zoom sur le cône alluvial intérieur (les alluvions sont présentées en bleu) de Breteuil-sur-Iton (source : carte géologique harmonisée du département de l'Eure, BRGM) 70

Illustration 33 : Localisation et légende de la coupe géologique SO-NE, présentée à l'Illustration 34, issue du modèle géologique de l'Avre (David et al., 2015)..... 72

Illustration 34 : Coupe SO-NE dans le bassin versant de l'Iton montrant un pendage vers le NE (coupe issue du modèle géologique de l'Avre, David et al., 2015) 73

Illustration 35 : Cartographie des structures tectoniques plicatives qui affectent le secteur d'étude (complitation de sources diverses, voir texte) 74

Illustration 36 : Cartographie des structures cassantes recensées..... 76

Illustration 37 : Localisation des coupes géologiques mettant en évidence le rejet et les contacts des principales failles de la zone d'étude..... 77

Illustration 38 : Tracé du paléo-Iton, par le Buisson Garambourg et le Val David (d'après Dewolf et al., 1976) (localisation du Val David en Annexe 3) 80

Illustration 39 : Localisation topographique de la coupe A-B, dans le prolongement Est de la faille d'Aulnay/Iton et de la coupe C-D, dans le prolongement Ouest 82

Illustration 40 : Corrélation des logs géologiques de la coupe A-B qui met en évidence une structure plicative de type synclinal dans le prolongement Est de la faille d'Aulnay-sur-Iton 82

Illustration 41 : Corrélation des logs géologiques de la coupe C-D qui met en évidence une anomalie dans le prolongement Ouest de la faille d'Aulnay-sur-Iton..... 83

Illustration 42 : Localisation topographique de la coupe A-B, au niveau de la faille supposée Iton-Rouloir84

Illustration 43 : Corrélation des logs géologiques de la coupe E-F qui met en évidence un important décalage des assises crayeuses à proximité de la faille supposée Iton-Rouloir 84

Illustration 44 : Plan de localisation du dôme piézométrique au sud-est de Damville et l'anomalie piézométrique de Saint-André-de-l'Eure (chute rapide du niveau piézométrique à l'Est de ce dôme)..... 85

Illustration 45 : Corrélation entre la piézomètrie (moyennes eaux, carte piézomètrique du département de l'Eure, 2010) et le modèle géologique de l'Avre au niveau du dôme piézométrique de Damville et de l'anomalie piézométrique de Saint-André-de-l'Eure 86

Illustration 46 : Localisation de l'anomalie piézométrique sur la carte des accidents tectoniques supposés par Kuntz dans la notice de la carte géologique de Saint-André-de-l'Eure..... 86

Illustration 47 : Organisation spatiale d'un réseau karstique de concentration dans la craie (Calba et al., 1979)..... 87

Illustration 48 : Représentation schématique de l'étagement des conduits karstiques liés d'une part au niveau de base (surface piézométrique) et d'autre part à la fracturation du massif (fissures de détente, tectonique) 88

Illustration 49 : Développement d'un conduit karstique sub-horizontal (calé sur la stratification) au niveau d'un banc de silex imperméable sur la falaise de craie santonienne au sud de Dieppe (cerclé en rouge). Notons également le développement d'un réseau karstique appuyé sur la faille normale (cerclé en vert) 90

Illustration 50 : Corrélation entre la présence de bétoires et l'âge du substratum crayeux (écorché des formations du substratum d'après Quesnel, 1997) – Attention le recensement des bétoires dans le département de l'Orne est très partiel. 92

Illustration 51 : Corrélation entre la présence d'anomalies en forage et l'âge du substratum crayeux (écorché des formations du substratum d'après Quesnel, 1997) 93

Illustration 52 : Localisation d'ouvrages de la BSS ayant rencontré des vides souterrains 93

Illustration 53 : Topographie du réseau karstique (niveau supérieur) de Brosville – Bulletin de spéléologie de dieppe n°2 (Bulletin de spéléologie de Dieppe, 1983) et Rodet 1991 (Rodet, 1991) 94

Illustration 54 : Carte de densité des phénomènes de karstification observés en surface (exo-karsts) 95

Illustration 55 : Coupe géologique du Sec-Iton, de Damville à Glisolle (source : modèle géologique de l'Avre, David et al., 2015) 97

Illustration 56 : Les grandes fosses de la forêt d'Evreux sur le plateau (Rodet, 1991) 99

Illustration 57 : Bétoires et traçages positifs du secteur du Sec-Iton (Extrait de l'inventaire régional Bétoires/Traçages) – les points verts sur la carte représentent des forages/puits qui ont fait l'objet d'un suivi lors d'un traçage 100

Illustration 58 : Perte du rebrac visitée par le comité de spéléologie de Dieppe - Bulletin de spéléologie de Dieppe n°2 (Bulletin de spéléologie de Dieppe, 1983) 101

Illustration 59 : Endo-karst du Sec-Iton reconnu par observation réalisée par descente des puits des Boscherons et de Gaudreville (d'après Ferray, document de la BSS) 102

Illustration 60 : Plan des ponts & chaussées du 26/01/1889 transmis au BRGM par l'association équilibre Iton en 2013 103

Illustration 61 : Plan des Ponts & Chaussées du 26/01/1889 géoréférencé et vectorisé par le BRGM en 2014 104

Illustration 62 : Modèle conceptuel d'évolution de la perméabilité des formations superficielles en fonction de la profondeur ; le modèle proposé est fondé sur des mesures de perméabilité réalisées au laboratoire en fonction de quelques valeurs de pression ; en rouge, passage de la base des limons aux argiles à silex (Dupont et al. 2009) 108

Illustration 63 : Comparaison des cartographies 3D des mesures de PS, réalisées au printemps (a) et en été (b) (Thèse de A. Jardani – 2007 dans Dupont et al. 2009) 108

Illustration 64 : Comparaison des chroniques de piézométrie de l'aquifère superficiel (en rouge) et de piézométrie de l'aquifère de la craie (en bleu) (Dupont et al. 2009) 109

Illustration 65 : Suivi piézométrique de la nappe de la craie sur les puits de Chaignes (01515X2015) et de la nappe tertiaire sur le puits de Douains (les 2 puits sont situés à 3km l'un de l'autre). 110

Illustration 66 : Extension et épaisseurs (en m) des sables du perche d'après le modèle géologique de l'Avre (David et al. 2015) 111

Illustration 67 : Carte piézométrique de 1994 de l'aquifère du cénomanien crayeux et des sables du perche . L'encadré violet situe l'emprise de la carte de l'Illustration 68 112

Illustration 68 : Carte piézométrique du secteur de Soligny-la-trappe (61) - Syndicat Départemental de l'Eau du CG61 – la localisation de cette carte est précisée par le cadre violet dans l'Illustration 67 112

Illustration 69 : Carte piézométrique locale de la nappe du turo-cénomanien à l'amont du BV de l'Iton entre Crulai et Chandai (Geol-Log Conseil, 1999) 115

Illustration 70 : Carte piézométrique de la nappe de l'Albien pour la Haute-Normandie (Atlas des eaux souterraines de la France (BRGM, 1970-1972)) (la rivière Iton est mentionnée sur cette carte et permet de situer la zone d'étude) 117

Illustration 71 : Débits spécifiques mesurés autour de la zone d'étude et étages crayeux associés 118

Illustration 72 : Transmissivités mesurées autour de la zone d'étude et étages crayeux associés 119

Illustration 73 : Comparaison des débits spécifiques (m3/h/m) et des transmissivités (m²/s) des différents aquifères – (SdP signifieSables du Perche) 119

Illustration 74 : Bassin versant hydrogéologique de l'Iton en hautes eaux (2001) (a) 121

Illustration 75 : Comparaison de quelques chroniques piézométriques du bassin de l'Iton entre 1997 et 2015 (à gauche) avec un zoom en 2000-2001 (à droite) ; la piézométrie est exprimée en profondeur par rapport au sol, et en niveau d'eau normalisé pour comparer les dynamiques entre elles (Charlier et al., 2015) – (Le piézomètre de Normanville mentionné sur ce graphique est le 01502X0089) 122

Illustration 76 : Comportement hydrodynamique de l'aquifère de la craie dans le bassin de l'Iton (dpt 27 et 61) - (Le piézomètre de Normanville mentionné sur ce graphique est le 01501X0002) 123

Illustration 77 : Représentativité de l' « âge » de l'eau et du temps moyen de résidence (Arnaud et Baran, BRGM, 2009) 125

Illustration 78 : Constitution des groupes d'âge apparent suivant le modèle d'écoulement utilisé pour la datation (Lopez et al., BRGM 2012) 126

Illustration 79 : Datation des eaux souterraines (données brutes extraites de l'étude (Lopez et al., BRGM 2012)) 126

Illustration 80 : Sources du bassin versant de l'Iton (données du SIGES Seine-Normandie - http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article116) 128

Illustration 81 : Débits (l/s) des 5 sources situées dans la vallée de l'Iton entre Aulnay/Iton et Arnières/Iton (jaugeages réalisés entre 1967 et 1971) 129

Illustration 82 : Débits mesurés aux différentes sources du groupe n°4 dans la vallée de l'Iton (De La Queriere et Pascaud, 1969) 130

Illustration 83 : Carte localisant la zone à investiguer (par traçages notamment) pour connaitre le bassin d'alimentation de la source d'Hondouville (01501X0006/S) 131

Illustration 84 : Débits mesurés aux différentes sources du groupe n°4 dans la vallée de l'Eure (De La Queriere et Pascaud, 1969) 132

Illustration 85 : Localisation des cours d'eau du bassin versant de l'Iton et des stations de jaugeage ... 133

Illustration 86 : Localisation des principaux cours d'eau de la zone d'étude 133

Illustration 87 : Gands tronçons hydrauliques de l'Iton et orientations du cours d'eau (découpage approximatif basé sur la présence de sources ou de bétoires, un découpage plus fin du fonctionnement de l'Iton est présenté au §8 en se basant sur des données de débits du cours d'eau) 135

Illustration 88 : Carte des 4 tronçons hydraulique du Lême/Rouloir, écoulements de surface observés en décembre 2003 – Modifié de Aqua-Sol Projets, janvier 2004 138

Illustration 89 : Fin de la section perenne du Lême d'apres la carte IGN au 25000ieme 139

Illustration 90 : Localisation de la zone d'assec du Rouloir en novembre 2007 (Arnaud L. 2008, rapport BRGM/RP-56189-FR) 141

Illustration 91 : Carte des ouvrages hydrauliques sur l'Iton et ses affluents 143

Illustration 92 : Section de l'Iton aménagé par un auget pour contourner une bétoire située en amont de Gaudreville-la-Rivière (Photo 10) 144

Illustration 93 : Vue sur la bétoire contournée par l'auget (Photo 11) 144

Illustration 94 : Ouvrage répartiteur du Becquet (vue vers l'amont) 145

Illustration 95 : Localisation des bras forcés de Breteuil et de Verneuil.....146

Illustration 96 : Corrélation des débits de l'Iton à la station de Bourth et au bras forcé en amont de Verneuil-sur-Avre.....147

Illustration 97 : Débits journaliers de l'Iton à Bourth et débits estimés du bras forcé en amont de Verneuil148

Illustration 98 : Répartition des débits entre les différents bras de l'Iton, depuis le Becquet jusqu'au Sec-Iton, mesures prises le 26 juin 2009 en situation d'étiage – Source : CE3E, 2010.....149

Illustration 99 : Schéma simplifié des ouvrages mettant en communication les différents bras de l'Iton à l'aval du Bequet (ouv1 = ouvrage répartiteur du Becquet ; ouv3 = vanne du Moulin à Poudre ; ouv2 = déversoir ; ouv4 = prise d'eau du fossé rouge ; cercle rose = ponts) SETEGUE, 2006).....150

Illustration 100 : Résultats du modèle SETEGUE sur le fonctionnement hydraulique des bras forcés de l'Iton (SETEGUE, 2006) 151

Illustration 101 : Profil de débit de l'Iton, d'après Ferray (1882) (Ferray, 1882).....152

Illustration 102 : Résultats des trois campagnes de jaugeages de mai 1968 , octobre 1968 et octobre 1970 pour le secteur du Sec-Iton (BRGM, 1971).....155

Illustration 103 : Résultats des trois campagnes de jaugeages de mai 1968 , octobre 1968 et octobre 1970 comparées aux résultats de la campgne de Ferray de 1882 155

Illustration 104 : Localisation des points de jaugeage (du kilomètre 70 au kilomètre 100 de l'Illustration 102) des trois campagnes de jaugeages de mai 1968 , octobre 1968 et octobre 1970 pour le secteur du Sec-Iton (BRGM, 1971) 156

Illustration 105 : Localisation des points de jaugeage ponctuels réalisés depuis 1965 (DIREN, DREAL, BRGM) (les stations permanentes représentées par un tiangle rouge, sont celles encore en activité en 2016).....159

Illustration 106 : Mesures de débit le long de l'Iton - Source : campagnes de jaugeage DIREN Haute-Normandie 159

Illustration 107 : Valeurs moyennes de débit spécifique sur les points de mesure - Données : Campagnes DIREN Haute-Normandie 2002 et 2003.....160

Illustration 108 : Localisation des différents assecs observés dans le passé sur le Rouloir et l'Iton 162

Illustration 109 : Analyse statistique des débits de l'Iton aux stations de Crulai et Normanville 164

Illustration 110 : Profils d'altitude de la vallée de l'Iton et de la nappe (source : Artis et al., BRGM 1971)170

Illustration 111 : Profil nappe/rivière schématique de l'Iton entre la Bonneville-sur-Iton et Amfreville-sur-Iton (source : Le Mesnil M. et al. 2016) 171

Illustration 112 : Cartographie des relations nappe/rivière dans le secteur de l'Iton aval (résultats valables pour la situation hydrologique de l'année 2004) (source : Le Mesnil M. et al. 2016).....173

Illustration 113 : Pertes et gains de débit le long de l'Iton – Campagne de jaugeage BRGM de mai 1968174

Illustration 114 : Pertes et gains de débit le long de l'Iton – Campagne de jaugeage BRGM d'octobre 1968.....175

Illustration 115 : Pertes et gains de débit le long de l'Iton – Campagne de jaugeage BRGM d'octobre 1970.....175

Illustration 116 : Quantification des principales zones d'apports de la nappe et des apports du Rouloir à l'Iton 179

Illustration 117 : Signification de la pente g des profils hydrologiques (Corbonnois et al. 1999, modifié dans le cadre de la présente étude) 182

Illustration 118 : Profils hydrologiques de l'Iton obtenus pour 6 campagnes de mesure à l'étiage (a) données de débits utilisées sans correction ; (b) données de débits corrigées : pour les points de mesure situés à l'aval du bras forcés de verneuil, le débit perdu par le bras forcé de l'Iton a été aujouté aux débits

mesurés afin de mettre en évidence sur ce graphique les échanges nappes/rivières - (Les tronçons numérotés de 1 à 8 dans définis dans le tableau de l'Illustration 120) 184

Illustration 119 : Profils hydrologiques du Rouloir obtenus pour 6 campagnes de mesure à l'étiage..... 185

Illustration 120 : Valeur moyenne du paramètre g et classe associée obtenue par moyenne des résultats des différentes campagnes de mesure pour chaque tronçon - le détail des résultats, campagne par campagne, est présenté en Annexe 4 ce qui permet de voir la variabilité temporelle du coefficient g calculé..... 185

Illustration 121 : Carte des différents tronçons homogènes de l'Iton mis en évidence par la classe associée ; la valeur du coeficient g (résultats des différentes campagnes de mesure pour chaque tronçon interprétés selon la méthode développée par Corbonnois et al. en 1999 – le détail des résultats campagne par campagne est présentée en Annexe 4.) La définition des classes A à E est présentée à l'Illustration 117..... 186

Illustration 122 : Débits engouffrés au niveau du Sec-Iton sur la période 2005-2013 188

Illustration 123 : Pertes du Sec-Iton amont en fonction du débit à Condé-sur-Iton..... 189

Illustration 124 : Proportion du débit infiltré dans le Sec-Iton amont sur le débit total de la rivière à Condé-sur-Iton (moyennes interanuelles) 190

Illustration 125 : Schéma de principe de répartition des débits entre l'amont et l'aval du Sec-Iton, et proportions des débits associés 192

Illustration 126 : Structure du modèle GARDENIA utilisé pour simuler le débit en rivière ainsi que le niveau piézométrique de la nappe drainée (Thiéry, 2014) 194

Illustration 127 : Paramétrisation du modèle GARDENIA utilisé pour simuler le débit et la piézométrie de l'Iton 197

Illustration 128 : Résultats de la simulation des débits à Normanville et des niveaux d'eau à Moisville . 198

Illustration 129 : Résultats de la simulation des débits souterrains sortant du bassin de l'Iton 199

Illustration 130 : Contributions simulées des écoulements souterrains lents et écoulements rapides au débit de l'Iton (1997-2013)..... 201

Illustration 131 : Contributions simulées mensuelles moyennes, min et max des écoulements souterrains lents au débit de l'Iton (1997-2013) 202

Illustration 132 : Eléments du bilan hydrologique du bassin de l'Iton (1997-2013) d'après les résultats de la modélisation globale GARDENIA pluie-débit-niveaux..... 203

Illustration 133 : Paramétrisation du modèle GARDENIA utilisé pour simuler le débit de l'Iton à Bourth et la piézométrie à L'Aigle..... 205

Illustration 134 : Résultats de la simulation des débits à Bourth et des niveaux piézométriques à l'Aigle206

Illustration 135 : Volumes annuels des prélèvements agricoles..... 207

Illustration 136 : Cartographie des réserves utiles dans la zone d'étude 209

Illustration 137 : Coefficient de répartition des données annuelles pour une réserve utile de 75 mm..... 209

Illustration 138 : Coefficient de répartition des données annuelles pour une réserve utile de 210 mm... 210

Illustration 139 : Répartition mensuelle des prélèvements pour l'agriculture 210

Illustration 140 : Volumes annuels des prélèvements d'eau industriels 211

Illustration 141 : Volumes annuels des prélèvements AEP 212

Illustration 142 : Répartition des prélèvements en eaux de surface et eaux souterraines selon les usages (moyenne réalisée sur la période 1994-2013)..... 213

Illustration 143 : Localisation des ouvrages de prélèvements recensés par type d'usage 213

Illustration 144 : Bilan des prélèvements par usage au pas mensuel pour la période 1994-2013..... 214

Illustration 145 : Localisation et capacité en équivalent habitant (EH) des stations d'épuration présentes sur la zone d'étude. 215

Illustration 146 : Corrélation entre la population raccordée et les volumes annuels moyens rejetés (m^3)219

Illustration 147 : Définition des 2 secteurs sur lesquels seront effectués les bilans 221

Illustration 148 : Corrélation entre les pluies efficaces et les pluies d'été (juin, juillet, août) pour la zone A amont (Bourth)....222

Illustration 149 : Corrélation entre les pluies efficaces et les pluies d'été (juin, juillet, août) pour la zone B aval (Normanville)....223

Illustration 150 : Pluies efficaces moyennes de la zone A Amont (Bourth) (en jaune les pluies efficaces faibles, en vert les pluies efficaces proches de la moyenne et en bleu les pluies efficaces très supérieures à la moyenne)....224

Illustration 151 : Pluies efficaces moyennes de la zone B Aval (Normanville) (en jaune les pluies efficaces faibles, en vert les pluies efficaces proches de la moyenne et en bleu les pluies efficaces très supérieures à la moyenne)....225

Illustration 152 : Pluie efficace annuelle par secteur....225

Illustration 153 : Bilan des flux en m^3/an dans les différents secteurs de la zone d'étude en année moyenne (cycle hydrologique 2000/2001) 228

Illustration 154 : Part des prélèvements dans les sorties du système pour le cycle 2000-2001....229

Illustration 155 : Variations du piézomètre de Coulonges....229

Illustration 156 : Bilan des flux dans les différents secteurs de la zone d'étude en année moyenne (cycle hydrologique 2011/2012)....230

Illustration 157 : Variations du piézomètre 01794X0035 (Nogent-le-Sec) 231

Illustration 158 : Part des prélèvements dans les sorties du système pour le cycle 2011-2012....231

Illustration 159 : Valeurs des seuils de débit de l'Iton à Bourth et Normanville (Article 7 de l'arrêté n° 2012 094-0001) 233

Illustration 160 : Nombre de jours par an de dépassement des seuils de débits (seuils actuellement établis par arrêté préfectoral) 235

Illustration 161 : Corrélation entre les volumes annuels de pluie efficace dans le bassin versant hydrogéologique de l'Iton et le nombre de jours de dépassement du seuil de vigilance à la station de Normanville....236

Illustration 162 : Corrélation entre la moyenne mobile sur 2 ans des volumes annuels de pluie efficace dans le bassin versant hydrogéologique de la station de Normanville et le nombre de jours de dépassement du seuil de vigilance à la station de Normanville....237

Illustration 163 : Corrélation entre le niveau piézométrique à Graveron (01493X0001) et le nombre de jours de dépassement du seuil de vigilance à la station de Normanville....237

Illustration 164 : Evolution mensuelle et annuelle piézométrie-débit du bassin versant de l'Iton (Kharroubi O., 2013)....238

Illustration 165 - Relations entre le niveau piézométrique moyen mensuel et le débit journalier minimal annuel définis pour des débits caractéristiques et au cours du temps (source : rapport BRGM/RP-59136-FR)....239

Illustration 166 - Relations entre le niveau piézométrique moyen mensuel de Coulonges et le débit journalier minimal annuel de Normanville définis pour des débits caractéristiques et au cours du temps240

Illustration 167 : Côtes piézométriques garantissant un débit égal ou supérieur au débit des différents seuils de l'Iton à Normanville et Bourth 241

Illustration 168 : Corrélation entre le débit journalier de l'Iton à Normanville et les niveaux piézométriques à Moisville, Nogent-le-sec et Graveron 243

Illustration 169 : Corrélation entre le débit décadaire de l'Iton à Normanville et les niveaux piézométriques à Moisville, Nogent-le-sec et Graveron 243

Illustration 170 : Corrélation entre le débit journalier et décadaire de l'Iton à Bourth et les niveaux piézométriques à l'Aigle 243

Illustration 171 : Exemple d'hydrosystème modélisable par TEMPO 245

Illustration 172 : Les modèles construits avec TEMPO sont du type « boîte noire » 246

Illustration 173 : Schéma du modèle retenu, composé de méthodes de transfert en grappe pour simuler les débits à Bourth, à Normanville et la piézométrie à Coulonges 247

Illustration 174 : Calage du modèle pour le débit à Bourth et Normanville et le niveau piézométrique à Coulonges 249

Illustration 175 : Eexemple de calculs de débits à partir de scénarios climatiques entre 2008 et 2018 .. 250

Illustration 176 : Exemple de calculs de niveaux à partir de scénarios climatiques 251

Illustration 177 : Courbe de fréquence cumulée 251

Illustration 178 : Exemple de prévision fournie par TEMPO 252

Illustration 179 : Prévision des niveaux piézométriques journaliers à partir du 28/02/2014 au piézomètre de Coulonges 253

Illustration 180 : Prévision des débits journaliers à partir du 28/02/2014 à la station de Bourth 253

Illustration 181 : Prévision des débits journaliers à partir du 28/02/2014 à la station de Normanville 253

Illustration 182 : Pluies, débits journaliers enregistrés à l'amont et à l'aval du Sec-Iton lors de la crue de juillet 1975 (a) (source ANTEA, 2005) et piézométrie dans le secteur du Sec-Iton (Sylvain les moulins) à la même période (b) 256

Illustration 183 : Pluies à Soligny et Evreux en déc. 1999 et janv. 2000 (a) ; débits journaliers enregistrés à l'amont (stations de Bourth et Crulai) et à l'aval (station de Normanville) et niveaux piézométriques dans le sec-Iton (piézomètre de Coulonges) lors du passage de la crue de déc. 1999 et janv. 2000 (b) 258

Illustration 184 : Pluies et débits journaliers enregistrés à l'amont et à l'aval du bassin versant lors de la crue de mars 2001 260

Illustration 185 : Schéma de fonctionnement de l'éventuel rôle tampon joué par les pertes du sec-iton lors de la transmisssion des crues de l'amont vers l'aval du bassin 260

Illustration 186 : Séparation de l'hydrogramme à Bourth (à gauche) et à Normanville (à droite) par la méthode BFI ; exemple du cycle hydrologique 2000-2001 262

Illustration 187 : Débit de base de l'Iton à Normanville vs. indicateurs de saturation du bassin (HU2 et piézomètres du bassin) 263

Illustration 188 : Débits de pointe de crue à Normanville vs. Débits de pointe de crue à Bourth en fonction du niveau initial du piézomètre Coulonges 264

Illustration 189 : Relation Hauteur-Hauteur entre les stations de Damville et Bonneville-sur-Iton établie par le SPC SACN 265

Illustration 190 : Relation Hauteur-Hauteur entre les stations de Damville et Bonneville-sur-Iton en fonction de l'état de saturation du sol (HU2) 265

Illustration 191 : Relation Hauteur-Hauteur entre les stations de Damville et Bonneville-sur-Iton en fonction de l'état de remplissage du karst au piézomètre Coulonges (en haut) et au piézomètre Graveron (en bas) 267

Illustration 192 : Relation entre le débit d'engouffrement estimé entre Condé-sur-Iton et Manthelon et le niveau piézométrique à Coulonges. Remarque : une augmentation de débit a parfois été mesurée entre ces deux points de mesure, ces valeurs n'ont pas été prises en compte et apparaissent sur le graphique comme égales à zéro 268

Illustration 193 : Echanges latéraux lors de la crue du 06/01/2001 (Qcrue = Qtotal – Qbase-avant-crue)270

Illustration 194 : Echanges latéraux lors de la crue de décembre 1999 271

Illustration 195 : Echanges latéraux lors de la crue de mars 2001 272

Illustration 196 : Débit de perte maximale vs. Débit de pointe de crue à Bourth en fonction du niveau initial du piézomètre Coulonges.....273

Illustration 197 : Débits de perte maximale vs. Débit de pointe de crue à Bourth en fonction du niveau initial du piézomètre Coulonges 274

Illustration 198 : Carte de situation du bassin versant de l'Iton indiquant les points d'eau souterraines (ADES et CG) et de surface (AESN) utilisés pour l'étude.....275

Illustration 199 : Diagramme de Piper des eaux de surface de l'Iton et du Rouloir, d'après les données de l'AESN sur la période 2001-2013 et des eaux souterraines de 1992 à 2013, d'après les données ADES extraites sur le bassin versant de l'Iton (les losanges représentent les suivis eaux souterraines et les ronds les suivis eaux de surface) 277

Illustration 200 : Diagrammes binaires des éléments présents dans les eaux de surface du bassin versant de l'Iton et d'autres bassins voisins : Seine et Yonne (Roy et al., 1999) et Somme (Négrel and Petelet-Giraud, 2005), et eaux souterraines du bassin versant de l'Iton (ADES), représentées pour faciliter la comparaison avec la figure suivante 278

Illustration 201 : Diagrammes binaires des éléments présents dans les eaux souterraines du bassin versant de l'Iton (ADES).....279

Illustration 202 : Teneurs en chlorures dans les eaux souterraines d'amont en aval dans le bassin versant de l'Iton (les points sont localisés sur cette figure en fonction de l' abscisse X (en mètres) de leur coordonnées géographiques (en lambert 93), ce qui, étant donné l'orientation du bassin versant, permet de les classer gloablement dans un sens amont/aval) 281

Illustration 203 : Moyenne des teneurs en Cl (en mg/L) pour les basses eaux saisonnières (2005-2012) et pluriannuelles dans les eaux de l'Iton (données AESN) 282

Illustration 204 : Concentrations des éléments dissous majeurs en fonction du débit de l'Iton à Bourth (proche de Chaise-Dieu-du-Theil) et Normanville pour la période 2000-2013 284

Illustration 205 : Concentrations des éléments dissous N, P et K, et sulfates en fonction du débit de l'Iton à Bourth (proche de Chaise-Dieu-du-Theil) et Normanville pour la période 2000-2013.....285

Illustration 206 : Concentrations des métaux traces dissous Cu, Ni, As, et pesticides DEA, isoproturon, AMPA et glyphosate en fonction du débit de l'Iton à Bourth (proche de Chaise-Dieu-du Theil) et Normanville pour la période 2000-2013. 286

Illustration 207 : Potentiel d'oxydo-réduction versus pH dans les eaux souterraines du bassin versant de l'Iton (données ADES pour le bassin versant).....287

Illustration 208 : Occupation du sol de la zone d'étude (données : Corine Land Cover).....288

Illustration 209 : Cartographie des groupes de cultures pratiquées dans la zone d'étude par îlots PAC (données du Registre Parcellaire Graphique 2013).....290

Illustration 210 : Groupes de cultures pratiquées sur le bassin versant de l'Iton et surfaces associées (données RPG 2013).....291

Illustration 211 : Parcelles agricoles drainées et réseaux de collecte publics des eaux drainées.....292

Illustration 212 : Exemple d'un réseau collecteur public de drainage agricole se rejetant dans une bétoire : les bétoires du parfond (B5780) sur la commune de THOMER-LA-SOGNE et du failly (B5781) 293

Illustration 213 : Localisation des principaux sites industriels (BASIAS, BASOL, ICPE) (attention, concernant les ICPE, la carte ne fait apparaitre que celles du département de l'Eure) 294

Illustration 214 : Teneurs en bore et en chlorures dans les eaux souterraines du bassin versant de l'Iton. Il n'existe pas de suivi en Cl dans les eaux de surface. Seules les données postérieures à 2007 sont reportées.....296

Illustration 215 : Localisation des stations d'épuration (STEP) et concentrations maximales en Bore mesurées dans les eaux souterraines. Les données en Bore dans les eaux de surface n'étaient pas disponibles dans les données fournies par l'AESN. 297

Illustration 216 : Carte des teneurs maximales en nitrates dans les eaux souterraines et les eaux de surface du bassin versant de l'Iton et de ses voisins, ainsi que de l'utilisation des sols. 299

Illustration 217 : Transect amont-aval des gammes de variation a) des teneurs en nitrates et b) du rapport NO_3/Cl dans les eaux souterraines et eaux de surface (les points sont localisés sur cette figure en fonction de l' abscisse X (en mètres) de leur coordonées géographiques (en lampbert 93), ce qui permet de les classer gloablement dans un sens amont/aval). 300

Illustration 218 : Evolution des teneurs en oxygène dissous et en nitrates dans les eaux de surface du bassin versant de l'Iton en 2013 302

Illustration 219 : Teneurs en nitrates en fonction des teneurs en oxygène dissous dans les eaux souterraines du bassin versant de l'Iton 303

Illustration 220 : Chronique des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines en vallée (Damville, Sylvains-les-Moulins) et sous les plateaux (Grossoeuvre et les Baux-Sainte-croix) couplée à la piézométrie de nappe enregistrée à Cierrey et à Coulonges et zoom sur les années 2011-2015. 305

Illustration 221 : Evolution des teneurs en nitrates dans l'Iton à Condé-sur-Iton, tendances associées et débit associé (station de Bourth en amont). 305

Illustration 222 : Evolution des teneurs en nitrates dans le Rouloir à Conches en Ouches et tendances associées, et évolution piézométrique (Sainte-Marguerite-de-l'Autel). 307

Illustration 223 : Evolution des teneurs en nitrates dans l'Iton à Bourth et débit à Chaise-Dieu-du-Theil pour la période 1999-2015. 308

Illustration 224 : Evolution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines et dans le Rouloir (données de l'AESN) et de la piézométrie à Graveron pour la période 1987-2015. 309

Illustration 225 : Débit de l'Iton et teneurs en nitrates à la station de Normanville (données AESN). 309

Illustration 226 : Débit de l'Iton et teneurs en nitrates à la station d'Acquigny (données AESN). 310

Illustration 227 : a) Variations des teneurs en nitrates à L'Iton à Chaise-Dieu-du-Theil, dans les eaux souterraines proches (points ADES) et à la source de Chaise-Dieu-du-Theil (02151X0023) et b) zoom sur les teneurs à la source. 312

Illustration 228 : Réseau de drainage à proximité de Chaise-Dieu-du-Theil 313

Illustration 229 : Teneurs en pesticides en fonction du débit dans les eaux de l'Iton 315

Illustration 230 : Evolution des teneurs en DEA et AMPA à Chaise-Dieu-du-Theil et du débit de l'Iton à Bourth en fonction du temps 315

Illustration 231 : Evolution des teneurs en AMPA et DEA à Acquigny et du débit de l'Iton à Normanville en fonction du temps 316

Illustration 232 : Chroniques des teneurs en atrazine et DEA dans les eaux souterraines du bassin versant de l'Iton 316

Illustration 233 : Les sources de la fosse aux dames à la Bonneville-sur-Iton (BRGM, 31/07/2013) 323

Illustration 234 : Exemple de Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : représention de la loi de probabilité marginale (loi empirique) et des lois Log-Normale et Gumbel de la chronique de pluie de l'impluvium karstique des Cent Fonts. 380

Illustration 235 : Exemple de Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : histogramme de la distribution mensuelle de la pluie déduit des observations et de la simulation. 380

Illustration 236 : Exemple du Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : corrélogramme de la pluie déduit des observations et des simulations. 381

Illustration 237 : Exemple du Générateur de pluie du modèle Cent Fonts: représentation des moments en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations. 381

Illustration 238 : Exemple du Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence de pluie (au pas de temps journalier) ayant les caractéristiques de la série observée : Exemple du run 3.....383

Illustration 239 : Exemple du Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation de l'ETP journalière (Données Météo France, station Montpellier Fréjorgues), de l'ETP moyenne mensuelle, de l'écart-type et du bruit (fonction aléatoire). 385

Illustration 240 : Exemple du Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : corrélogramme de l'ETP déduit des observations et des simulations et corrélogramme croisé ETP – Pluie déduit des observations et des simulations.....386

Illustration 241 : Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : écart-type mensuel du buit de l'ETP déduit des observations et des simulations. 386

Illustration 242 : Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation des moment en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations. 387

Illustration 243 : Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation de la loi de probabilité marginale (loi empirique) et de la loi Normale.....387

Illustration 244 : Générateur d'ETP et de pluie du modèle Cent Fonts : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence d'ETP et de pluie (au pas de temps journalier) ayant les caractéristiques des séries observées : Exemple du run 3 389

Illustration 245 : Schématisation des processus latéraux dominants lors des crues selon différents états hydriques initiaux sur un tronçon entre deux stations hydrométriques amont I (inflows) et aval O (outflows).(d'après Charlier et al. 2013) 394

Illustration 246 : Propagation de l'onde de crue entre I (inflows) et O (outflows) avec apports ou pertes répartis de manière uniforme sur la longueur du cours d'eau (d'après Moussa, 1996).....395

Liste des tableaux

Tableau 1 : Typologie des zones à dominante humide (données AESN) 42

Tableau 2 : Zones humides présentes sur la zone d'étude et superficies associées (données AESN).....43

Tableau 3 : Détermination de 4 zones climatiques avec 1 station météorologique de référence affectée à chaque zone 47

Tableau 4 : Moyenne, médiane et écart type des chroniques pluviomètriques (mm) des stations d'Huest, d'Ormes, de Beaulieu et de Saint-Martin-du-Vieux-Bellême (chroniques de 1994 à 2014 au pas de temps annuel, exepté Bellême de 1997 à 2014).....47

Tableau 5 : Caractéristiques des différentes familles de RS (d'après Laignel, 1997) 68

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des informations concernant les principales structures cassantes connues sur le secteur d'étude 76

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des étages géologiques vis-à-vis de la fracturation et de la karstogenèse (sources diverses).....90

Tableau 8 : Caractéristiques des stations hydrométriques de l'Iton et du Rouloir Source : Banque hydro (www.hydro.eaufrance.fr) 133

Tableau 9 : Ouvrages hydrauliques sur l'Iton et ses affluents 142

Tableau 10 : Débits spécifiques le long de l'Iton - Données : campagnes de jaugeage DIREN Haute-Normandie 160

Tableau 11 : Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin versant de l'Iton 166

Tableau 12 : Débits de crue caractéristiques (source Banque HYDRO) 166

Tableau 13 : Données piézométriques et de ligne d'eau dans le secteur aval de l'Iton (campagne de mesure réalisée par le BRGM en 2014 dans le cadre de l'étude Le Mesnil M. et al. 2016) 172

Tableau 14 : Estimation de l'apport de la nappe aux débits de l'Iton entre Gaudreville et Bérengeville (La colonne (f) correspond au calcul des apports totaux de nappe dans le secteur de la Bonneville-Bérengeville ; la colonne (g) en revanche correspond au calcul des apports totaux de nappe dans le secteur de la Bonneville-Bérengeville auxquels on retranche la restitution des débits karstiques estimée en premiere approximation comme étant égal au débit des pertes amont (collonne c)) 191

Tableau 15 : Stations d'épuration de la zone d'étude, capacités associées et volumes rejetés..... 217

Tableau 16 : Volumes des prélèvements AEP et rejet de STEP pour l'année 2013 219

Tableau 17 : Débits enregistrés lors des deux principales crues estivales (juillet 1975 et mai 2000) 255

Tableau 18 : Débits de crue enregistrés lors des crues hivernales de l'Iton..... 257

Tableau 19 : Occupation du sol et surfaces associées 289

Tableau 20 : Moyennes des concentrations dans le Rouloir à Conches-en-Ouches et dans l'Iton en amont de la confluence sur la période 2003-2013. 306

Tableau 21 : Calcul des flux de nitrates dans l'Iton sur la période 21-22/08/2000 311

Tableau 22 : Calcul des flux de nitrates dans l'Iton sur la Période 12/08/2003 311

Liste des annexes

Annexe 1 - Tableau récapitulatif des piézomètres suivis en continu dans la zone d'étude 335

Annexe 2 - Graphique et tableaux des anciennes données de jaugeage disponibles en bibliographie .. 339

Annexe 3 - Carte des localités..... 345

Annexe 4 - Coefficients g des profils hydrologiques de l'Iton et du Rouloir 349

Annexe 5 - Coefficients culturaux utilisés pour le calcul de l'ETM 353

Annexe 6 - Pluie efficace mensuelle calculée pour chaque zone bilan pour les 2 cycles hydrologiques étudiés 357

Annexe 7 - Bétoires sources et traçages positifs dans la zone d'étude 361

Annexe 8 - Observation d'assecs sur le Rouloir et l'Iton source : réseaux ONDE (2012-2015) et ROCA (2005-2011) 365

Annexe 9 - Les fonctions de transfert sous TEMPO 369

Annexe 10 - Principe et fonctionnement des générateurs de pluie et d'ETP du logiciel TEMPO 377

Annexe 11 - Présentation du principe du modèle inverse pour estimer les échanges latéraux lors des crues sur un tronçon 391

Annexe 12 - Emprise du modèle géologique de l'Avre 397

1. Introduction

Le bassin versant de l'Iton (1 200 km²) est particulièrement soumis aux risques de sécheresse, d'inondation et de dégradation de la qualité des eaux. Il fait l'objet d'un SAGE[4] approuvé depuis le 12 mars 2012 qui couvre 134 communes réparties dans les départements de l'Eure et de l'Orne, qui vise notamment à mettre en œuvre une gestion équilibrée des milieux naturels au même titre et au même niveau que les usages, pour garantir un développement durable.

En 2011, une **situation d'étiage** précoce a été constatée sur l'ensemble du cours de l'Iton, conduisant à l'entrée en vigueur, dès le mois de mai, d'un arrêté préfectoral prescrivant des mesures de surveillance, de limitations ou d'interdictions provisoires de certains usages de l'eau. L'été et l'automne 2012 ont également représenté des périodes de basses eaux dans le bassin.

Concernant les **risques d'inondations**, plusieurs crues récentes ont été enregistrées en 2001, 1999, 1995 et 1966 ; les plus fortes crues étant plus anciennes (1881, 1866 et 1841). L'Iton fait d'ailleurs l'objet d'un PPRI[5]. Toutefois, le bassin de l'Iton ne dispose pas d'indicateurs prévisionnels de crue.

La présence de drains karstiques met par ailleurs en relation directe les écoulements de surface avec la nappe de la craie et lui confère une grande vulnérabilité vis-à-vis des pollutions superficielles (turbidité, pollution bactériologique, nitrates, produits phytosanitaires, etc.).

Cette vulnérabilité liée aux régimes et modes d'écoulements sur le bassin (sans doute différents en périodes d'inondation et sécheresse), à la fois face aux évènements climatiques et aux activités humaines présentes et passées (industrielles et agricoles), a entrainé des évolutions importantes des niveaux et une dégradation progressive de la qualité des eaux, qui conjuguée à l'impact écologique sur les eaux superficielles, rend nécessaire une gestion plus durable, plus adaptée et concertée de la ressource, en ligne avec les préceptes de la DCE[6].

C'est dans ce contexte que la DREAL de Haute-Normandie, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, la DDTM et le Conseil Général de l'Eure ont sollicité le BRGM pour définir une étude visant, dans un premier temps, à établir un état des lieux du fonctionnement du bassin de l'Iton et à proposer, dans leurs grandes lignes, des premières règles de gestion de la ressource en eau sur ce bassin, en termes quantitatifs et qualitatifs, sur la base des données disponibles. Une étape ultérieure consisterait ensuite, au vue des résultats de cet état des lieux, à approfondir la connaissance dans des secteurs à enjeux et à poursuivre la réflexion sur la mise en place d'un outil d'aide à décision visant, le cas échéant, à mieux préciser les règles de gestion de la ressource en eau. Cet outil pourrait prendre la forme d'un modèle de gestion du système aquifère de l'Iton (nappe + rivières).

Le présent rapport, décrit les travaux réalisés dans le cadre de cette première phase d'état des lieux des connaissances.

[4] SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau

[5] PPRI : Plan de Prévention des Risques d'Inondation

[6] DCE : La Directive Cadre européenne sur l'Eau

2. Présentation générale et détermination de la zone d'étude

2.1. CADRE GEOGRAPHIQUE

Située dans le bassin Seine-Normandie, la zone d'étude d'une superficie de 1590 Km² (dont l'emprise est définie au § 2.2), s'étend sur deux départements : l'Orne (188Km² soit 11.8% de sa surface totale), et l'Eure (1402Km² soit 88.2% de sa surface totale) de Normandie.

La zone étudiée comprend 211 communes pour une population d'environ 180 000 habitants. Cependant, la population à l'intérieur du bassin versant topographique de l'Iton est inférieure, estimée à 157 000.

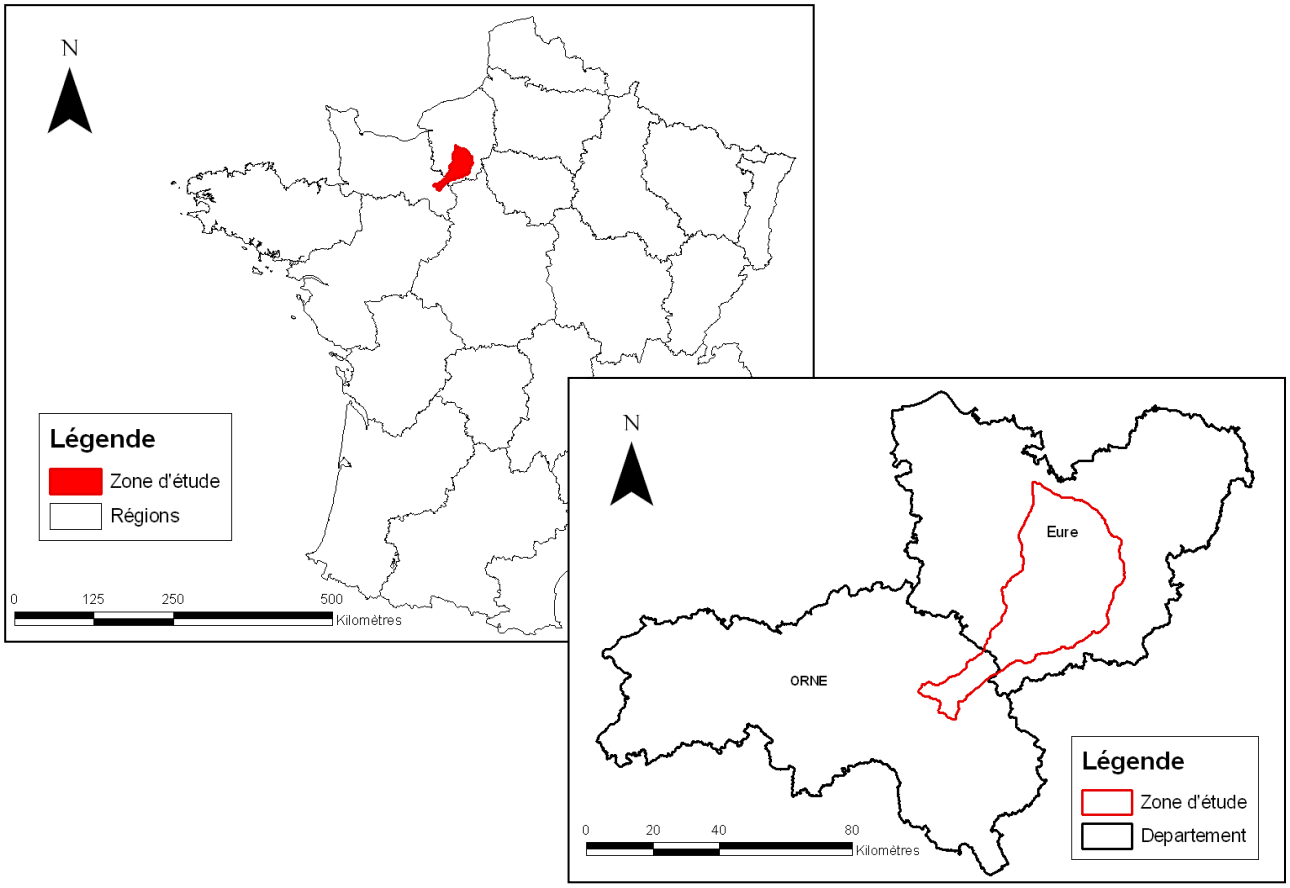


Illustration 1 : Situation de la zone d'étude

Une carte des localités, lieux-dits et cours d'eau évoqués dans ce rapport est présentée en Annexe 3.

La population au sein de la zone d'étude est très inégalement répartie. La densité de population est plus forte dans la partie en aval du bassin, notamment dans l'agglomération ébroïcienne, où vit près de la moitié de la population de la zone d'étude (SAGE Iton, 2005). L'amont est plus rural ; aucune ville ne dépasse les 3 500 habitants. Les principales communes sont les suivantes : Conches-en-Ouches, Damville, Breteuil et Le Neubourg (cf. Annexe 3). L'agriculture occupe près de 67% de la surface de la zone d'étude.

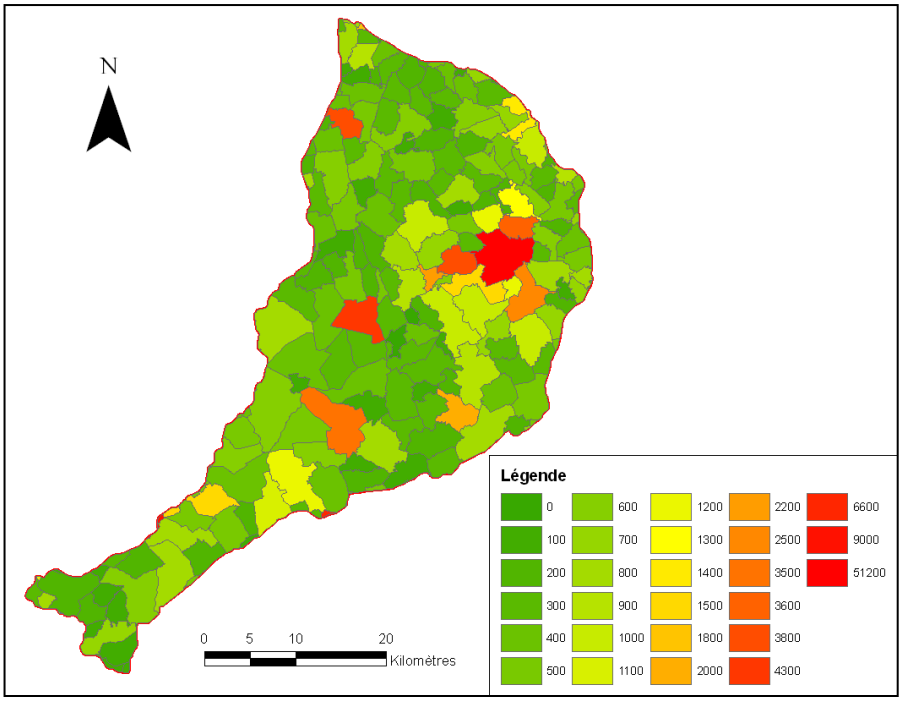


Illustration 2 : Population des communes (en nombre d'habitants) de la zone d'étude

2.2. DELIMITATION DU BASSIN VERSANT SOUTERAIN ET DE LA ZONE D'ETUDE

Pour le bassin versant de l'Iton et ce, quel que soit le régime hydrogéologique considéré (basses, moyennes ou hautes eaux), le bassin versant souterrain ne se superpose pas au bassin versant topographique. L'emprise de la zone d'étude retenue correspond au maximum d'extension des bassins versants hydrographiques (topographiques) et hydrogéologiques. D'autres critères de délimitation tels que ceux fournis par la nature karstique des formations (connexions hydrogéologiques transbassins) ont été pris en compte.

La délimitation du bassin hydrogéologique s'est appuyée sur l'ensemble des cartes piézométriques existantes, présentées à l'Illustration 3. Les bassins versants hydrogéologiques ont été tracés pour l'ensemble des cartes piézométriques listées ci-dessous. L'extension maximale de tous ces tracés a été retenue pour former la zone d'étude afin d'intégrer l'hydrosystème dans son ensemble (Illustration 3 et Illustration 4).

N°	Source	Secteur concerné	Situation hydrologique	Date des campagnes piézométriques
1	Carte hydrogéologique de Haute-Normandie, BRGM, 2010	Haute Normandie	Hautes-eaux	2001
2			Moyennes-eaux	Moyenne 2001-2006
3			Basses-eaux	2006
4	Atlas hydrogéologique de l'Eure, BRGM, 2004	Eure (Secteur amont de l'Iton)	Hautes-eaux	2001
5			Moyennes-eaux	Niveaux statiques BSS
6			Basses-eaux	Traitement des battements de nappe
7	Carte hydrogéologique du département de l'Eure, BRGM, 1989	Eure	Moyennes-eaux	Niveaux statistiques BSS

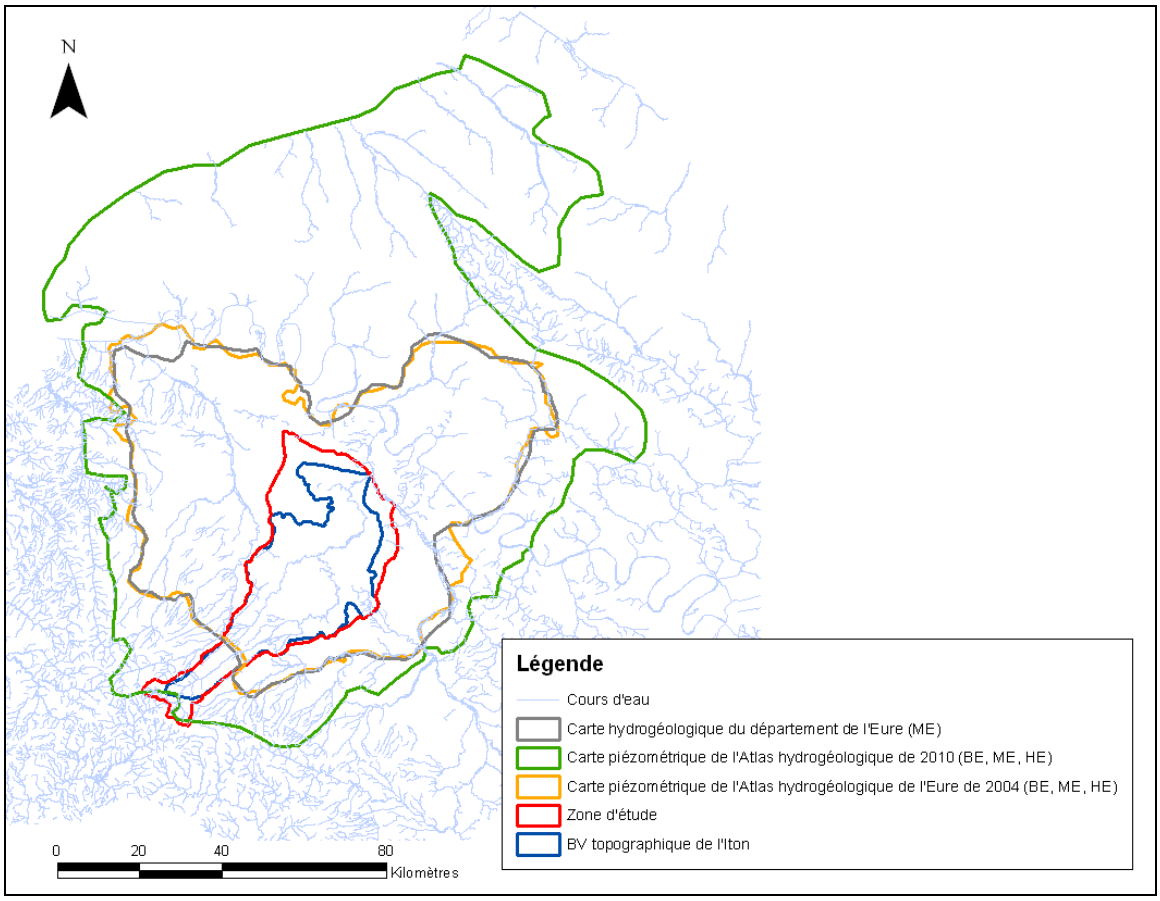


Illustration 3 : Liste et cartographie des extensions des 7 cartes piézométriques disponibles pour le bassin de l'Iton

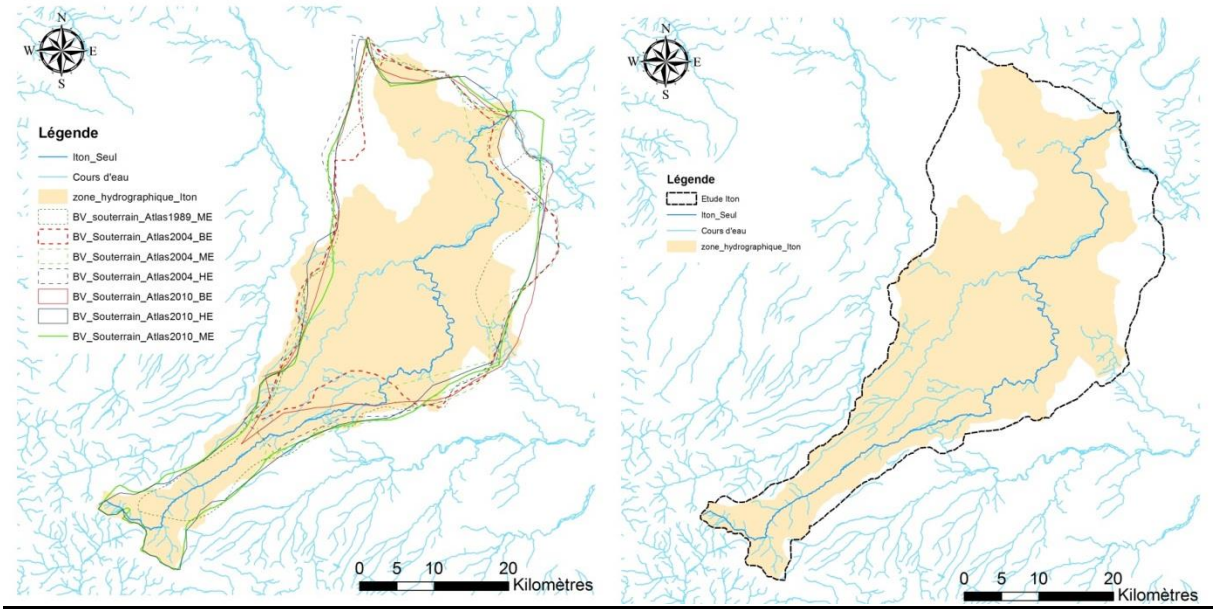


Illustration 4 : (a) à gauche, bassins versants souterrains tracés à partir des différentes cartes piézométriques disponibles ; (b) à droite, zone d'étude retenue

L'Illustration 4 montre que dans certains secteurs, la position de la limite du bassin versant hydrogéologique peut être très variable d'une carte à l'autre. Cette différence peut être liée au contexte hydrogéologique de réalisation de chaque carte (hautes ou basses eaux) mais peut très certainement être aussi liée à l'incertitude de ces cartes qui sont réalisées à une échelle départementale, voir pour certaines à une échelle suprarégionale avec une densité de points de mesure faible.

Limite Sud-Est :

Cette limite a été réalisée principalement à partir des cartes piézométriques et topographiques. Ce tracé correspond in fine aux crêtes piézométriques les plus à l'Est ainsi qu'à la limite orientale du bassin versant topographique. Les piézométries hautes-eaux (campagne de terrain de 2001) et moyennes-eaux (moyenne des hautes-eaux et basses-eaux) montrent qu'une crête piézométrique sépare les bassins de l'Iton et de l'Avre. En revanche en situation de basses-eaux cette crête semble s'effacer (le bassin hydrogéologique de l'Iton amont serait capté par celui de l'Avre).

Dix piézomètres ont été équipés spécifiquement par le BRGM de septembre 2013 à août 2015 afin de lever cette incertitude. Les données de ce suivi sont présentées à l'Illustration 5 et Illustration 6.

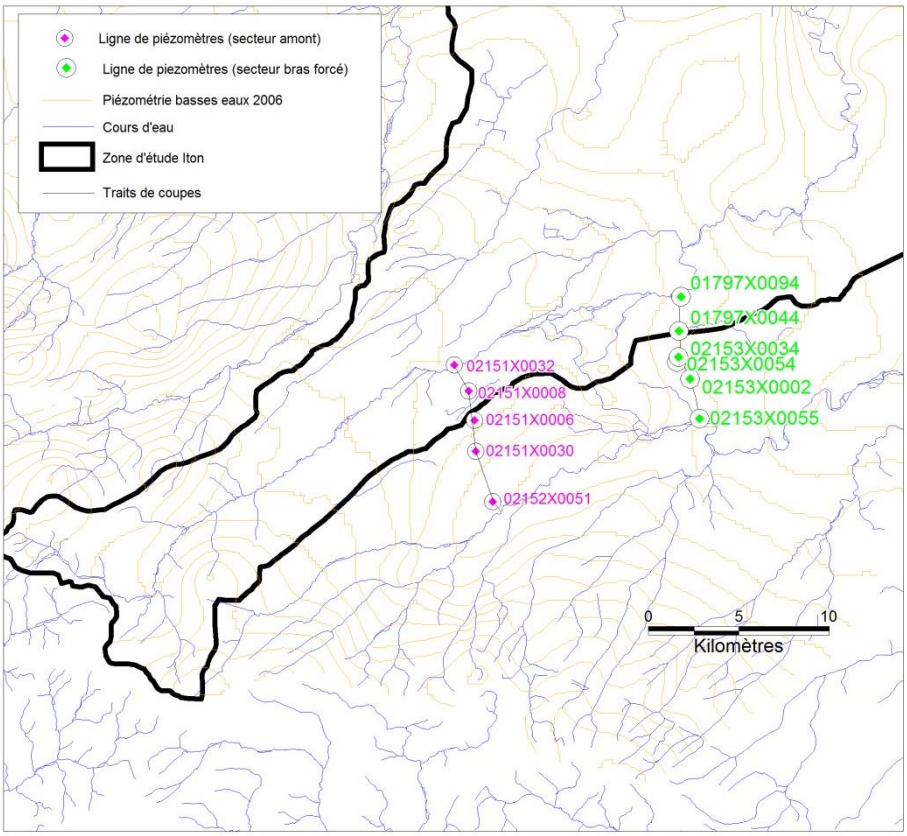
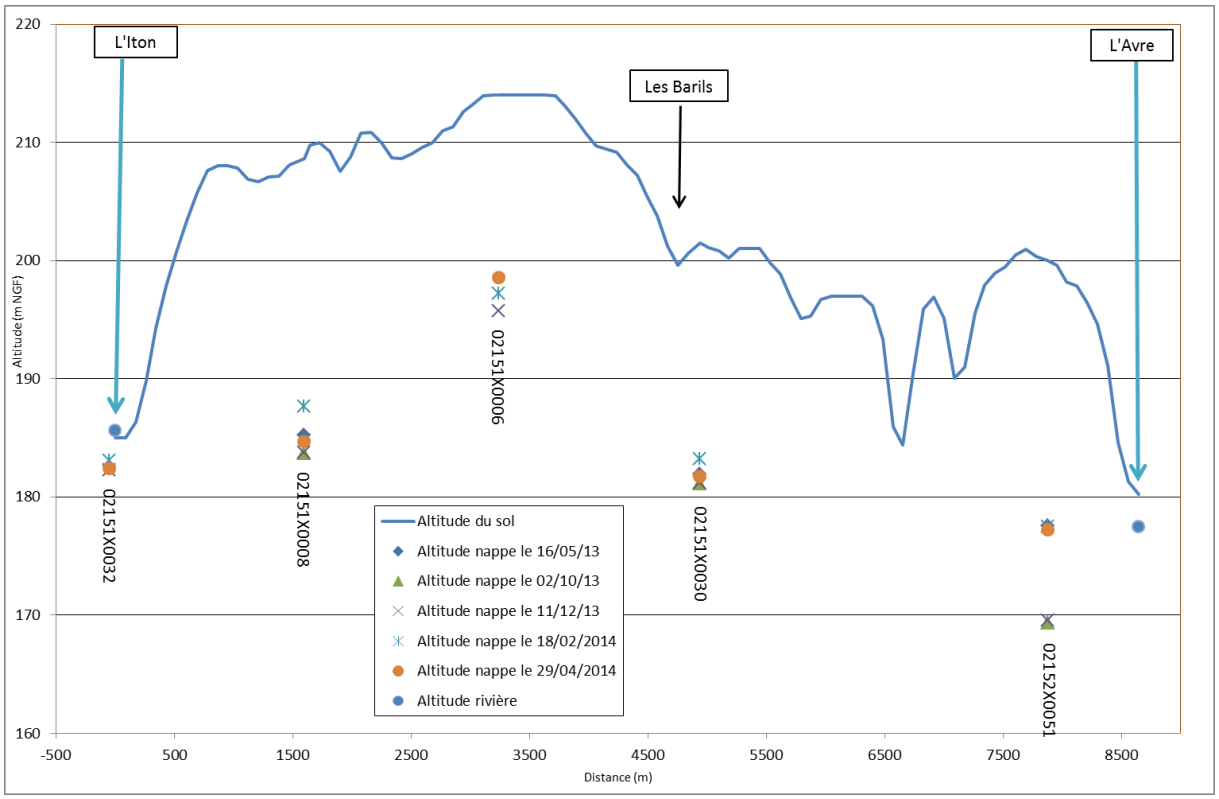


Illustration 5 : Piézomètres ayant fait l'objet d'un suivi en continu de septembre 2013 à août 2015 pour étudier la pérennité de la crête piézométrique séparant le Bassin de l'Iton et de l'Avre



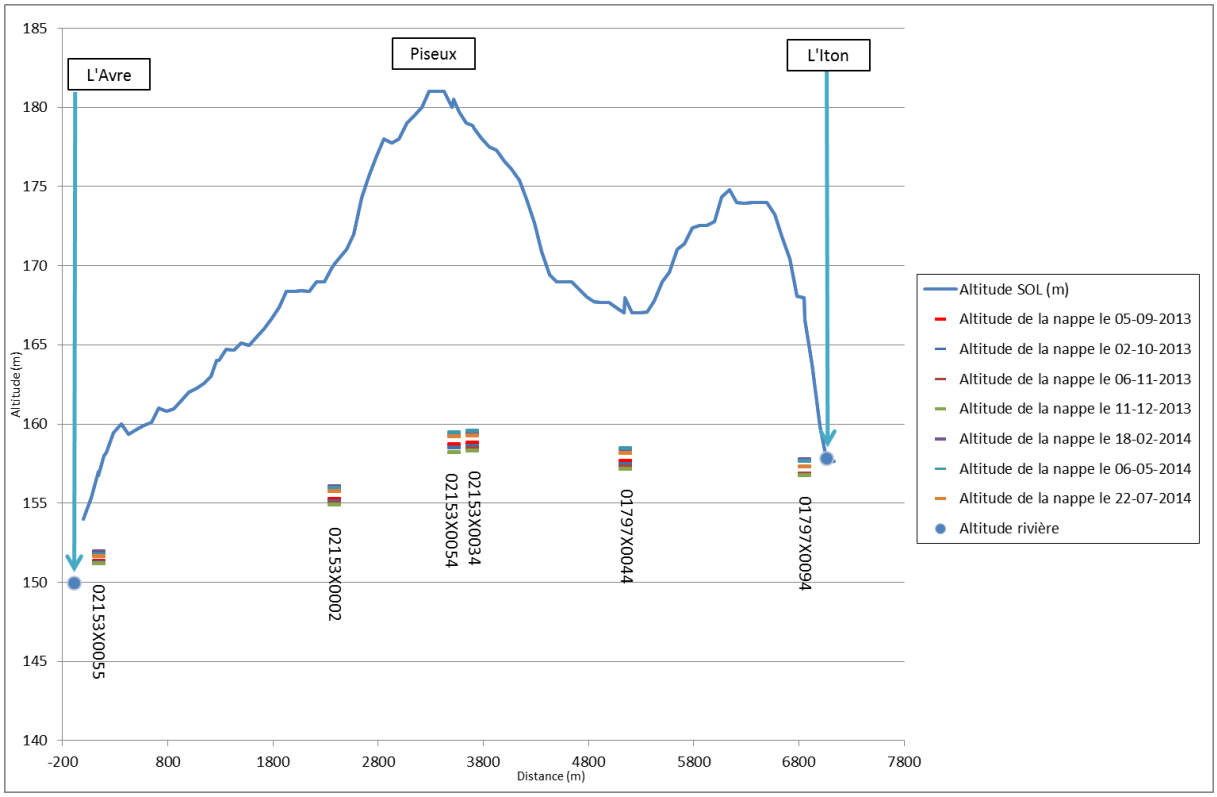


Illustration 6 : 2 Coupes piézométriques réalisées entre l'Avre et l'Iton à partir de 11 piézomètres suivis en continu de septembre 2013 à août 2015

Il apparait que dans le secteur des Barrils (Illustration 5 et Illustration 6) la crête piézométrique est bien marquée contrairement au secteur de Piseux (entre Verneuil et Breteuil) où la crête piézométrique est très peu marquée. Dans ce dernier secteur, l'écart de hauteur entre la crête piézométrique et le niveau de la nappe au droit de l'Iton est inférieur à 2 m (Illustration 6). Il n'est donc pas exclu qu'en période de vidange prononcée de l'aquifère, la crête piézométrique s'efface et que les écoulements s'inversent (drainage du bassin souterrain de l'Iton par le bassin souterrain de l'Avre).

Limite Nord-Est :

La zone d'étude a été étendue vers le Nord-Est, au-delà de la crête piézométrique afin d'intégrer la totalité des écoulements en direction de l'Eure. En effet, les traçages (T251, T332 et T197 – cf. inventaire régional des traçages consultable sur le SIGES Seine-Normandie) mettent en évidence des circulations karstiques entre l'aval d'Evreux (injection en rivière et dans un forage du centre d'enfouissement technique (CET) du Boulay Morin) et les sources de Cailly-sur-Eure.

Des écarts importants (de plus de 5 km) sont observés entre la position de la limite du bassin versant hydrogéologique obtenue avec les différentes cartes piézométriques disponibles (cf. Illustration 7). Ces écarts peuvent être liés à l'imprécision de ces cartes.

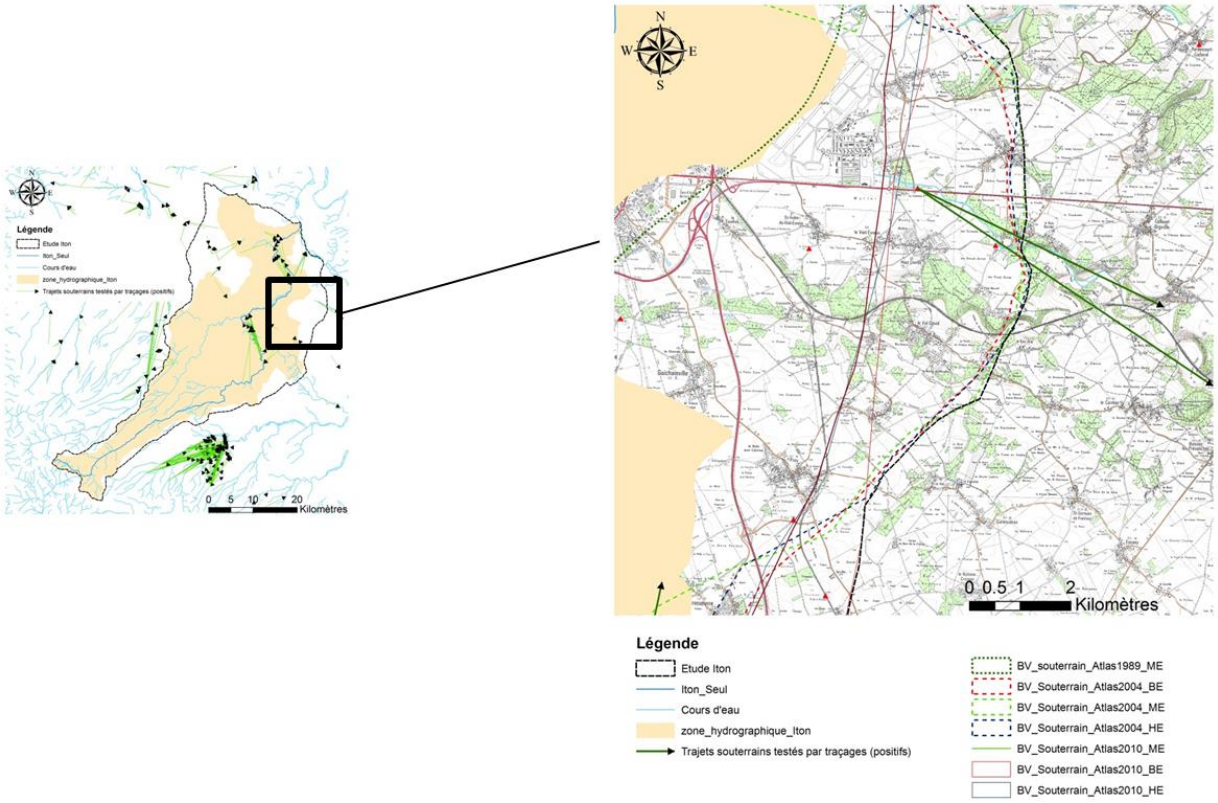


Illustration 7 : Incertitude du bassin versant hydrogéologique de l'Iton sur sa limite Nord Est

Limite Ouest :

A l'ouest du bassin de l'Iton, se trouve le bassin de la Risle. La limite retenue ici correspond principalement à la limite topographique, plus occidentale que les limites des bassins hydrogéologiques. Au nord-ouest en revanche, la limite est formée par l'extension maximale des bassins hydrogéologiques (piézométrie hautes-eaux). Des écarts importants sont observés entre la position de la limite du bassin versant hydrogéologique obtenue avec les différentes cartes piézométriques disponibles (cf. Illustration 8). Ces écarts peuvent être liés à l'imprécision de ces cartes.

Un doute existe concernant cette limite, lié à de probables connexions karstiques avec le bassin de la Risle (cf. § suivant « Relations trans-bassins »).

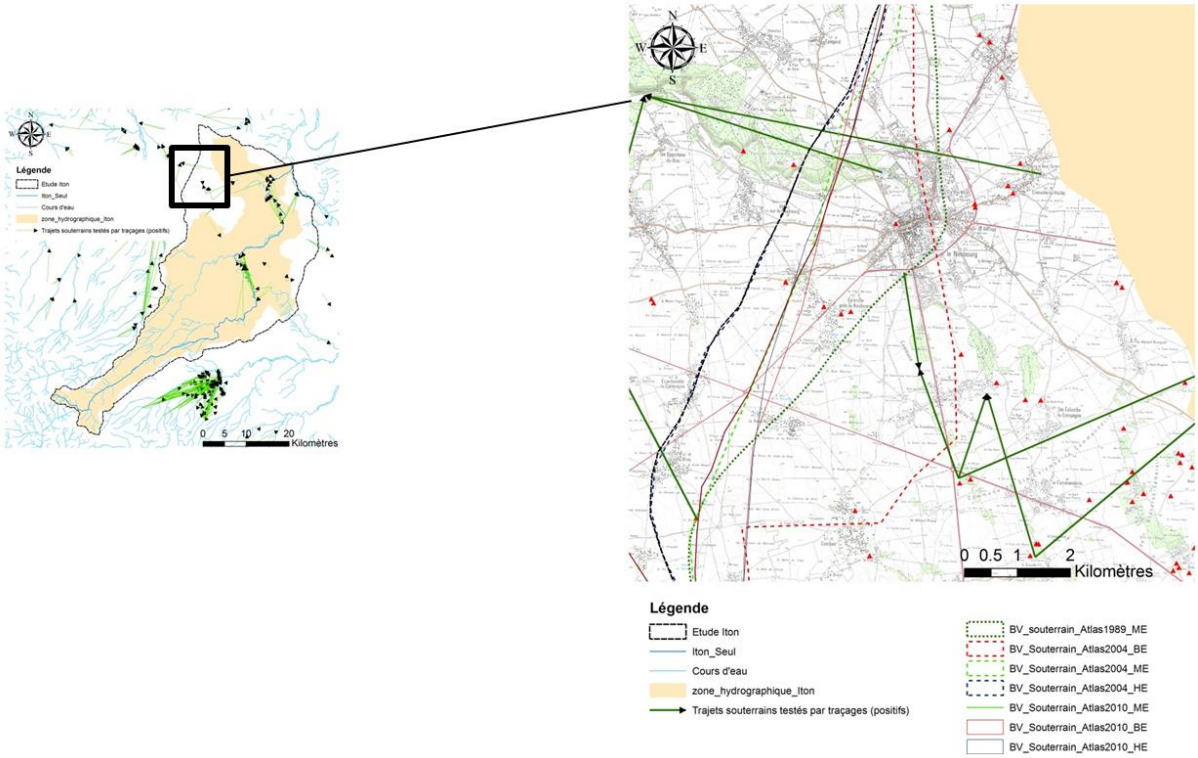


Illustration 8 : Incertitude du bassin versant hydrogéologique de l'Iton sur sa limite Nord Ouest

Limite Sud-Ouest :

Cette limite correspond à la tête du bassin de l'Iton et s'appuie sur la crête topographique du sous-secteur BD Carthage « L'Eure du confluent de la Vesgre (exclu) au confluent de la Seine » H43. Cette limite topographique du bassin se superpose à une crête piézométrique mise en évidence dans l'aquifère des sables du perche grâce à une carte piézométrique locale établie dans le secteur de Soligny-la-Trappe par le Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne (SDE 61) (Illustration 9).

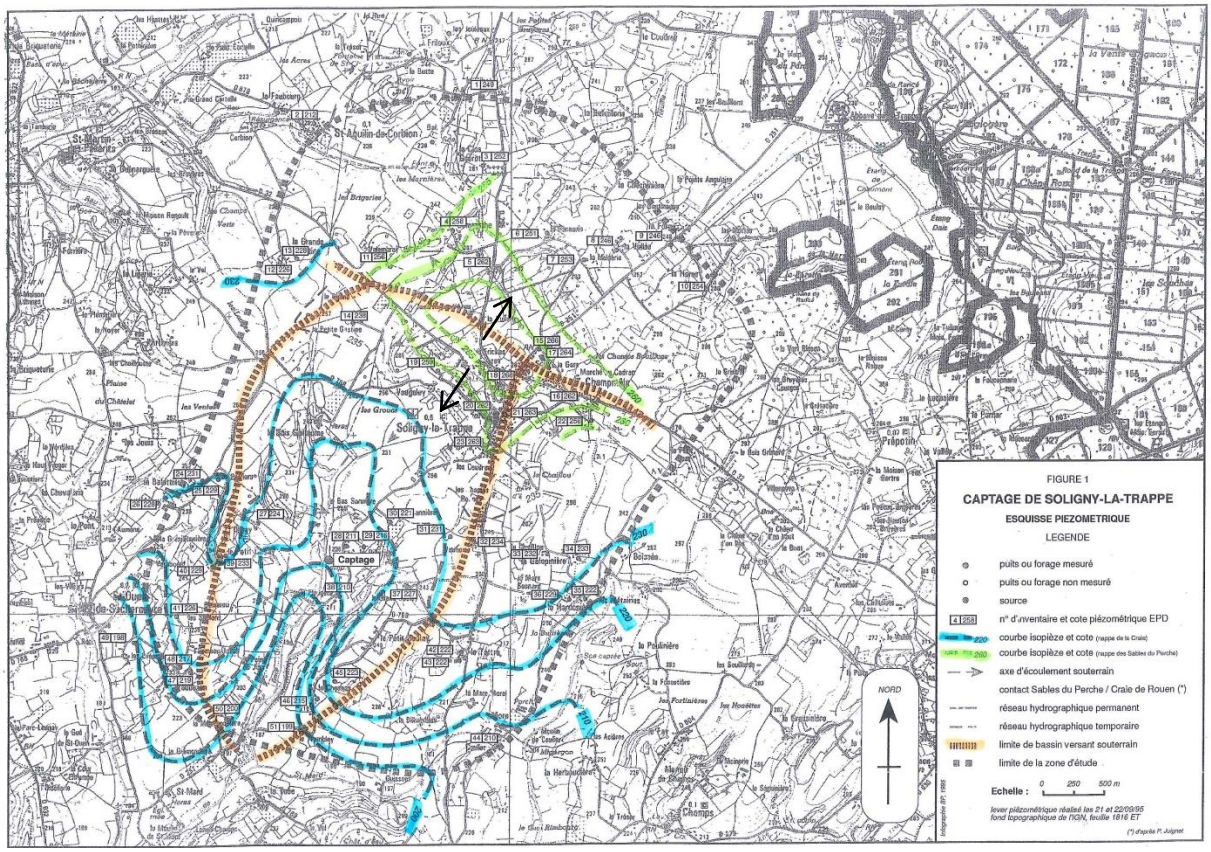


Illustration 9 : Carte piézométrique du secteur de Soligny-la-trappe (61) - Syndicat Départemental de l'Eau du CG61

Relations trans-bassins :

Les résultats des traçages hydrogéologiques (Illustration 10) montrent que les limites des bassins hydrogéologiques ne peuvent pas être déterminées uniquement à la lecture de la piézométrie.

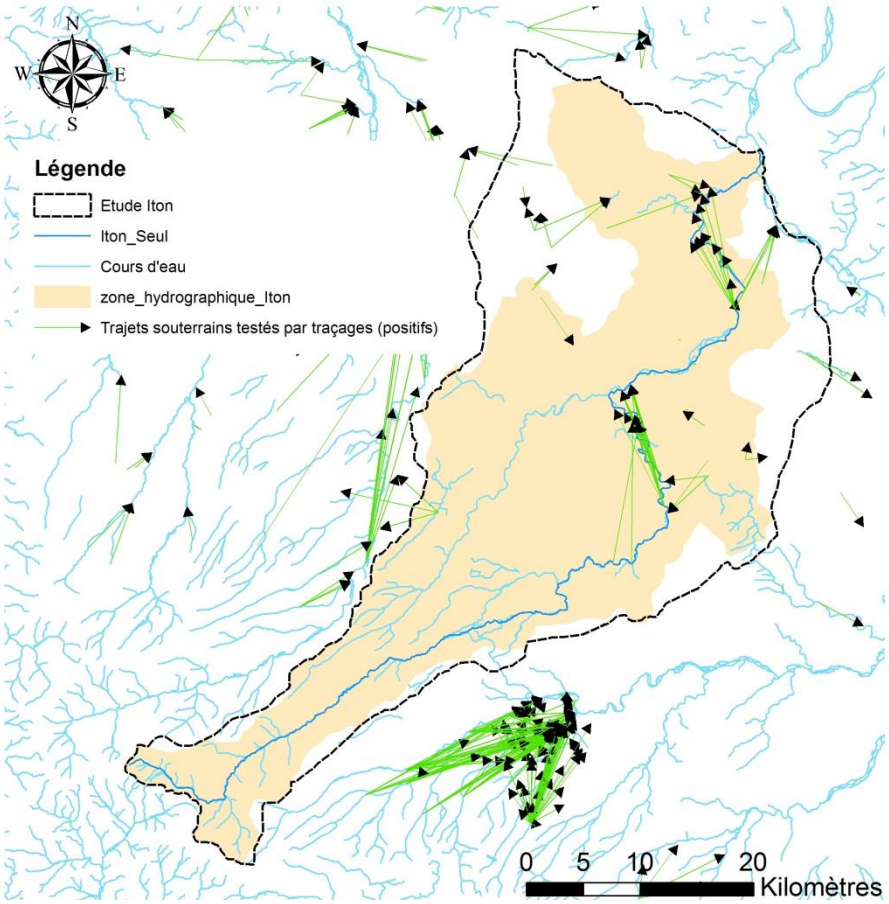


Illustration 10 : Traçages positifs recensés dans la base régionale de Haute-Normandie (David P-Y., 2009)

Par exemple, comme évoqué précédemment, les résultats des traçages réalisés à l'aval d'Evreux ont amené à étendre la zone d'étude jusqu'à la rivière Eure dans ce secteur, des traçages ayant mis en évidence des connexions entre des pertes dans le bassin de l'Iton et les sources de Cailly-sur-Eure.

Un second exemple concerne la limite Sud-Ouest du bassin. Un traçage a été réalisé par Hydroexpert en avril 1998 depuis la bétoire de la Piquetière (B7125) aux Baux-de-Breteuil située dans le sous-bassin topographique du Fidelaire (appartenant au BV de l'Iton) (Illustration 11). La restitution a été suivie sur 3 captages AEP situés dans le bassin de la Risle. Le bureau d'études a conclu à un traçage positif pour les 3 points de suivi. Le rapport ne précise pas si des mesures spectrofluorimétriques ont été réalisées en complément des mesures fluorimétriques du laboratoire pour s'assurer que la fluorescence mesurée était bien liée au traceur recherché et non pas à une matière organique naturelle. En effet les concentrations mesurées sur les trois points de suivi sont du même ordre (entre 0,15 et 0,25 mg/l aux pics). Or, d'un point de vue hydraulique, les connections paraissent impossibles entre la bétoire et le captage de Bois Normands-Près-Lyre au vu des résultats de la campagne piézométrique d'avril 2014 qui indiquent un niveau piézométrique au captage AEP de 10 mètres supérieur à celui mesuré au droit de la bétoire B7125. Au vu de ces éléments, les résultats paraissent douteux et n'ont pas été pris en compte pour étendre le BV de l'Iton jusqu'en rive gauche de la vallée de la Risle. Il serait nécessaire de réaliser un traçage de confirmation pour lever le doute.

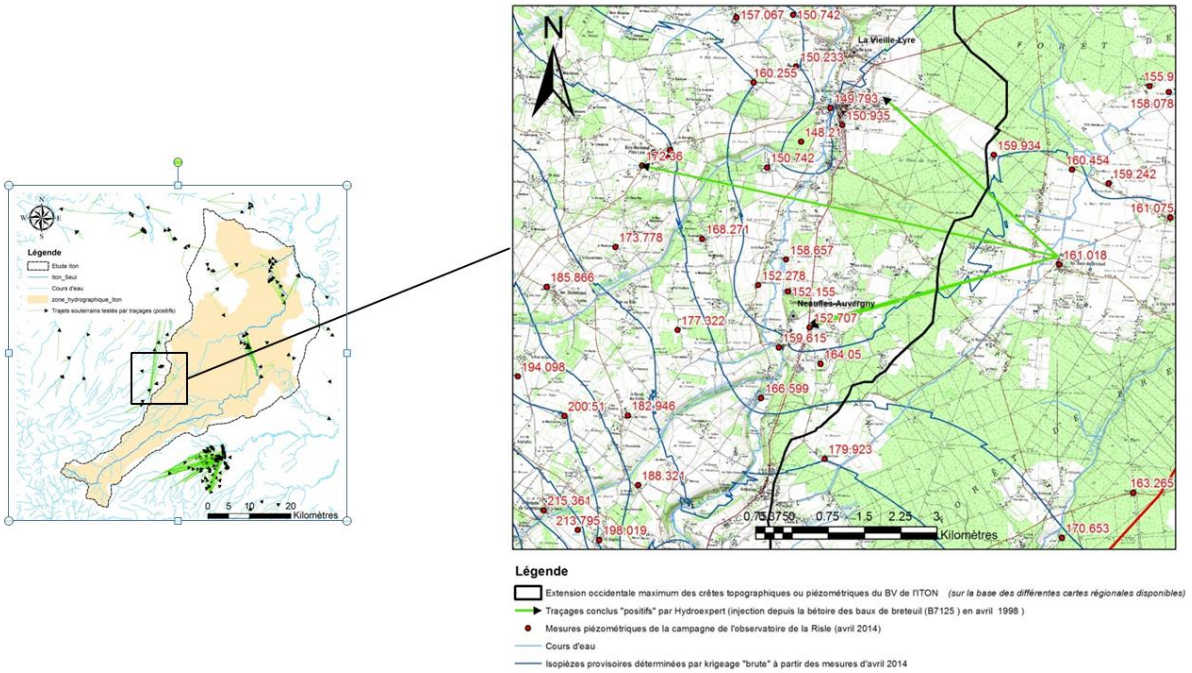


Illustration 11 : Traçage réalisé par Hydroexpert en avril 1998 depuis la bétoire de la Piquetière (B7125) – connexion avec le bassin de la Risle

2.3. ALTITUDE TOPOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

L'Illustration 12 présente la topographie du secteur d'étude (Modèle Numérique de Terrain avec une maille carrée de 25m). Le bassin versant de l'Iton est composé de secteurs de plateaux (Roumois, plaine du Neubourg, plaine de Saint-André et pays d'Ouche), séparés par les entailles des cours d'eau pérennes de l'Iton et de la vallée sèche ou humide du Lème/Rouloir, son principal affluent.

Les altitudes varient de 275 m NGF au sud, dans les collines du Perche, à 18m NGF à son extrémité aval. Le Pays d'Ouche se distingue par son altitude plus élevée (plus de 200 m NGF). Cette carte topographique fait apparaître un gradient d'altitude de l'amont vers l'aval ainsi que l'existence de vallées assez fortement encaissées à partir de Damville. Les vallées à l'aval sont entourées de fortes pentes pouvant aller jusqu'à 56% (Illustration 12).

On constate sur l'Illustration 12, que le profil de la vallée de l'Iton varie d'amont en aval. En effet, la vallée de l'Iton est bien plus encaissée en aval qu'en amont. Les pentes entourant la vallée de l'Iton aval, sont bien plus élevées (de l'ordre de 20%) qu'en amont où la vallée enregistre des pentes maximales de 9 %. Le changement de pente est relativement brutal et correspond au passage du cours d'eau à Condé-sur-Iton.

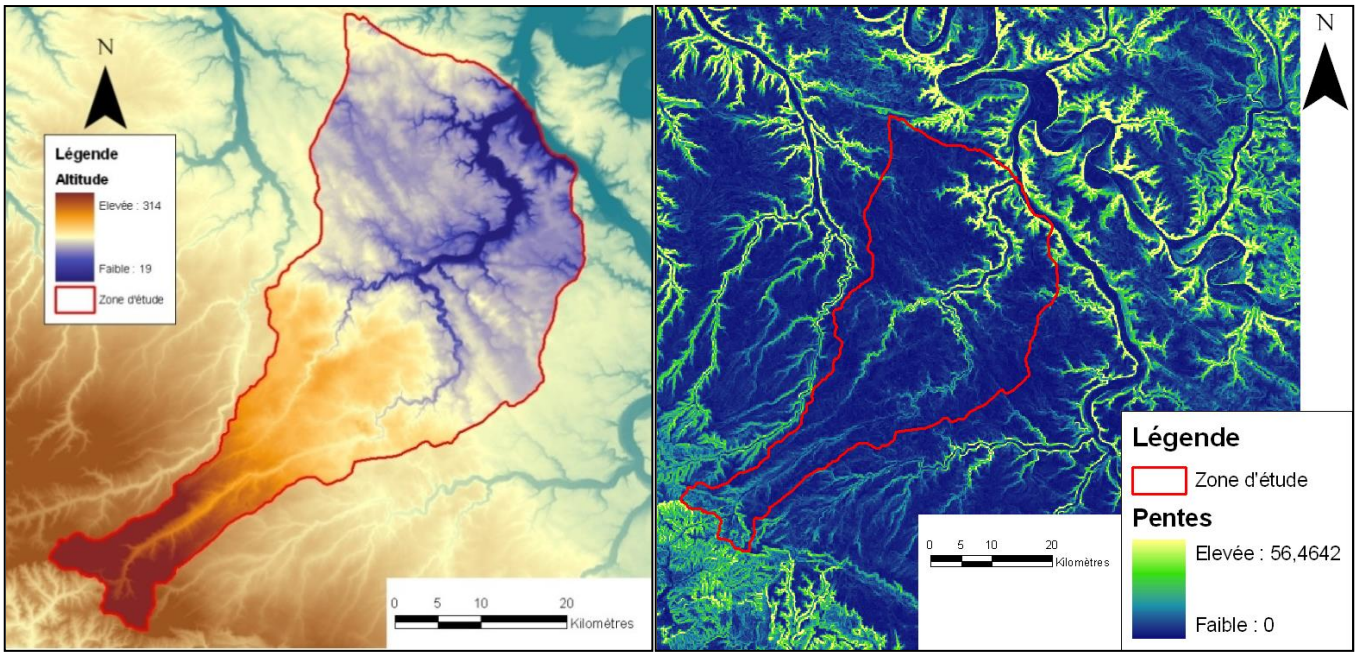


Illustration 12 : Altitudes et pentes des terrains du bassin versant de l'Iton

2.4. RUISSELLEMENT (IDPR)

L'IDPR (Indice de développement et de persistance des réseaux) est un indicateur spatial créé par le BRGM pour réaliser des cartes nationales ou régionales de vulnérabilité intrinsèque des nappes aux pollutions diffuses (Mardhel et al. 2005). Il traduit l'aptitude des formations du sous-sol à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface. Il se fonde sur l'analyse du modèle numérique de terrain et des réseaux hydrographiques naturels, conditionnés par la géologie. Cette notion d'infiltration est utilisée pour de nombreuses applications dans le domaine de l'hydrogéologie et l'IDPR peut se substituer à de nombreux critères usuellement employés.

Une valeur faible indique la prédominance de l'infiltration, tandis qu'une valeur forte signe un ruissellement important. Sur la zone d'étude cet indice fait apparaître la prévalence de l'infiltration sur les plateaux situés dans la moitié aval du Bassin versant (Illustration 13). En revanche la partie amont du bassin, située dans la moitié méridionale de la zone d'étude, est plus ruisselante. Ces hétérogénéités peuvent être, au moins en partie, expliquées par la différence de perméabilité des formations. En effet, les formations du Cénomanien en amont semblent moins perméables que les craies turoniennes et sénoniennes.

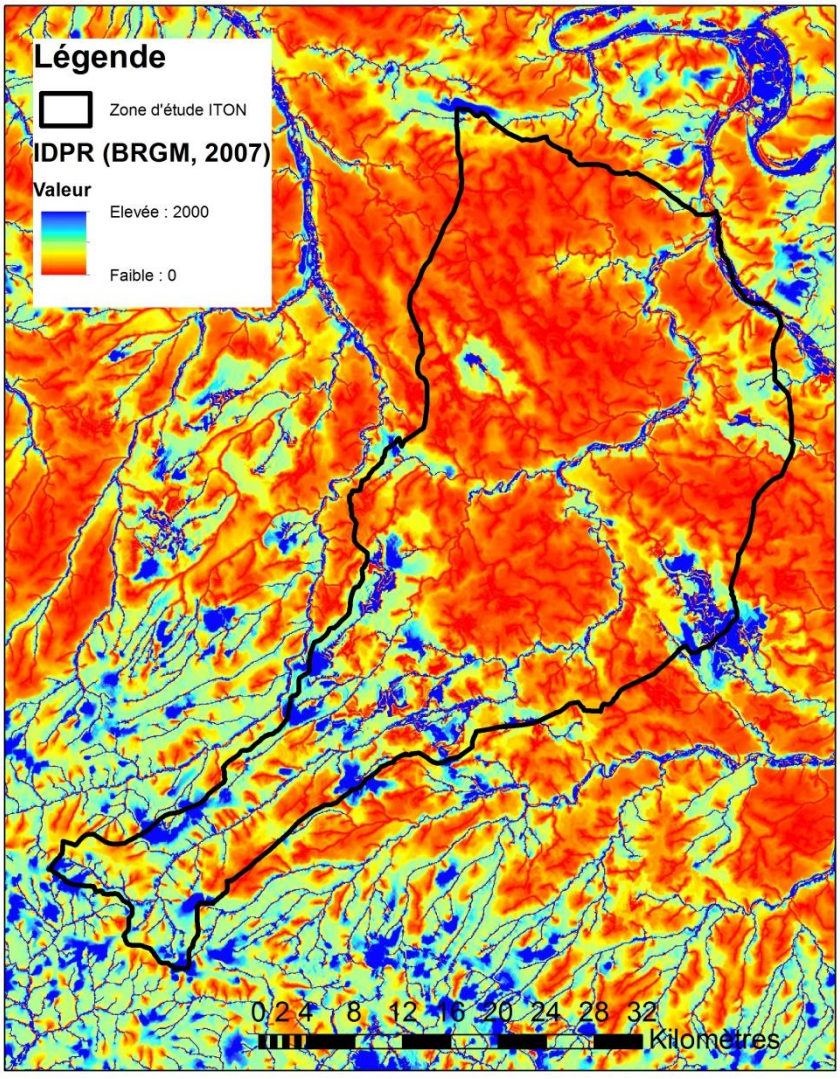


Illustration 13 : IDPR du bassin versant de l'Iton

2.5. LES ZONES HUMIDES

Le terme de « zone humide » recouvre une grande variété de situations et de caractéristiques du milieu. La loi sur l'eau de 1992 précise que « ce sont des terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre, de façon permanente ou temporaire ; la végétation quand elle existe, y est dominée par des végétaux hygrophiles pendant au moins une partie de l'année ».

Sur le bassin de l'Iton, ces zones couvrent une superficie de près de 5000 hectares[7], soit presque 3% de la superficie totale de la zone d'étude. Elles sont réparties en 8 types distincts (Tableau 1) dont 7 sont représentés dans la zone d'étude. Les superficies associées à chaque type de zone humide sont présentées dans le Tableau 2.

Les deux types de zone humide prédominants sont les prairies humides et les formations forestières humides et/ou marécageuses, qui représentent respectivement 48% et 31% de la surface totale des zones humides.

Type 1 : Eaux de surface (stagnantes et courantes)	**1.1** Eaux courantes **1.2** Annexes hydrauliques (Bras-morts, noues) **1.3** Plans d'eau (Gravières, étangs naturels et artificiels, bassins)
Type 2 : Formations forestières humides et/ou marécageuses	**2.1** Boisements à forte naturalité **2.2** Boisements artificiels –plantations (peupliers, résineux, autres)
Type 3 : Prairies humides	
Type 4 : Tourbières, landes, roselières et mégaphorbiaies	**4.1** Tourbières et bas-marais **4.2** Landes humides **4.3** Roselières **4.4** Mégaphorbiaies (zones à hautes herbes hygrophiles) **4.5** Sous-type non cartographiable
Type 5 : Zones humides littorales	**5.1** Pannes dunaires **5.2** Slikke, vasières **5.3** Schorre, prés salés **5.4** Sous-type non cartographiable
Type 6 : Terres arables	
Type 7 : Zones urbaines et autres territoires artificialisés	**7.1** Zones bâties **7.2** Autres : zones artificialisées non connectées à 7.1 (ex : déchetterie, parking, etc…)
Type 8 : Mosaïques d'entités humides de moins de 1ha	Association spatiale d'éléments non individualisables à l'échelle de cartographie (1 :50.000) et appartenant à deux ou plusieurs types

Tableau 1 : Typologie des zones à dominante humide (données AESN)

Typologie *(définies dans le tableau précédent)*	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 6	Type 7	Type 8
% occupation du bassin	0.2	0.9	1.4	0.0	0.2	0.1	0.1
% de la surface totale des zones	7,4	31,1	48,2	0,1	5,1	4,4	3,7

[7] Données de l'AESN téléchargées depuis le SIGES SN : http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article76

humides							

Tableau 2 : Zones humides présentes sur la zone d'étude et superficies associées (données AESN)

L'Illustration 14 représente la localisation des zones humides dans la zone d'étude. Les terrains concernés appartiennent en grande majorité aux vallées de l'Iton et du Lème/Rouloir, ainsi qu'à la vallée de l'Eure, partiellement incluse dans l'extrémité Nord-Est de la zone d'étude. Depuis sa source jusqu'à l'amont d'Evreux, la vallée de l'Iton comporte des zones humides sur toute la longueur de son cours excepté entre Evreux et Normanville. Les autres principales zones humides se trouvent dans la vallée du Rouloir et de l'Eure, ainsi que dans des vallées sèches et humides qui se connectent à la vallée de l'Iton au niveau de Houetteville.

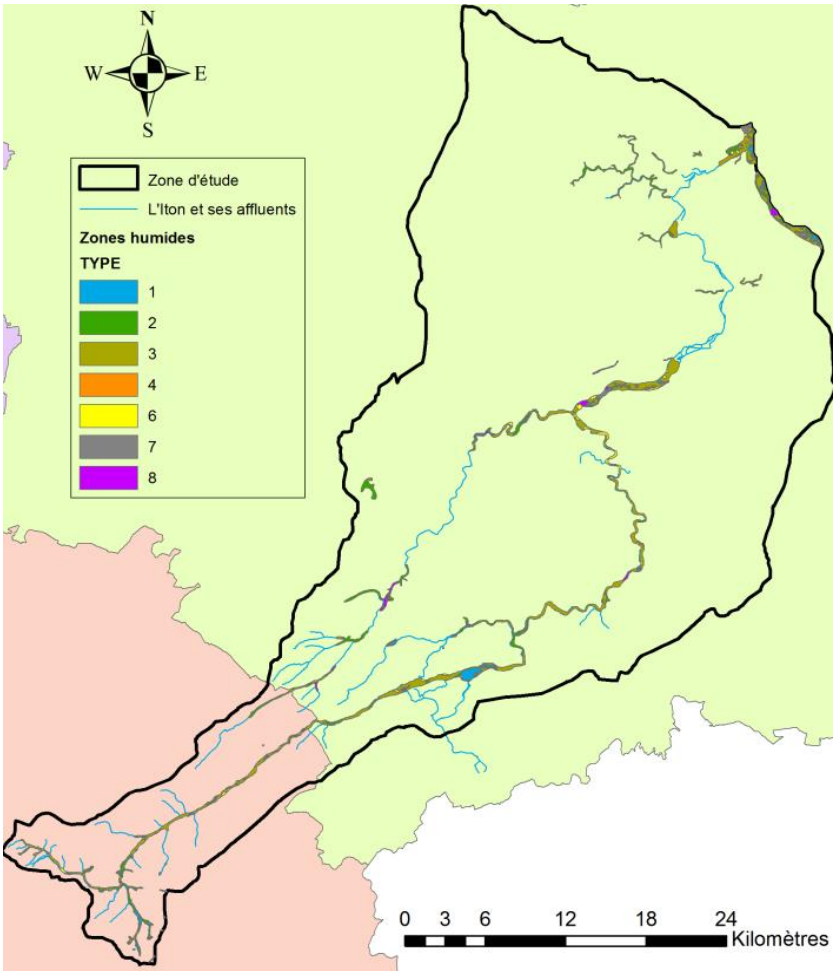


Illustration 14 : Localisation des territoires classés "zone humide" – voir typologie en Tableau 1

3. Données climatiques

3.1. VARIABILITE DES PRECIPITATIONS

L'« Analyse Utilisant le RElief pour L'HYdrométéorologie » (AURELHY) est une méthode commercialisée par Météo-France et élaborée dans les années 1980 (Benichou et Le Breton, 1987). Le calcul de la valeur climatique est effectué à partir des postes de mesures du réseau de Météo-France et de techniques statistiques qui utilisent des données topographiques permettant de caractériser les paysages environnant chaque point de calcul. Il en résulte une grille de maille 1 km fournissant en chaque point, des moyennes trentenaires de données essentiellement pluviométriques et thermiques (températures moyennes, maximales et minimales). Le modèle AURELHY, s'il ne permet pas la caractérisation d'événements à un pas de temps fin (annuel, décadaire ou journalier), est un bon indicateur du mésoclimat régional.

Cette grille, présentée en Illustration 15 (pluviométrie annuelle moyenne 1982-2012), fait apparaître une variabilité importante de la pluviométrie à l'échelle du bassin versant de l'Iton : la pluviométrie augmente depuis le plateau de Saint-André (565 mm) vers le nord-ouest et le sud-ouest du bassin versant, pour atteindre près de 875 mm.

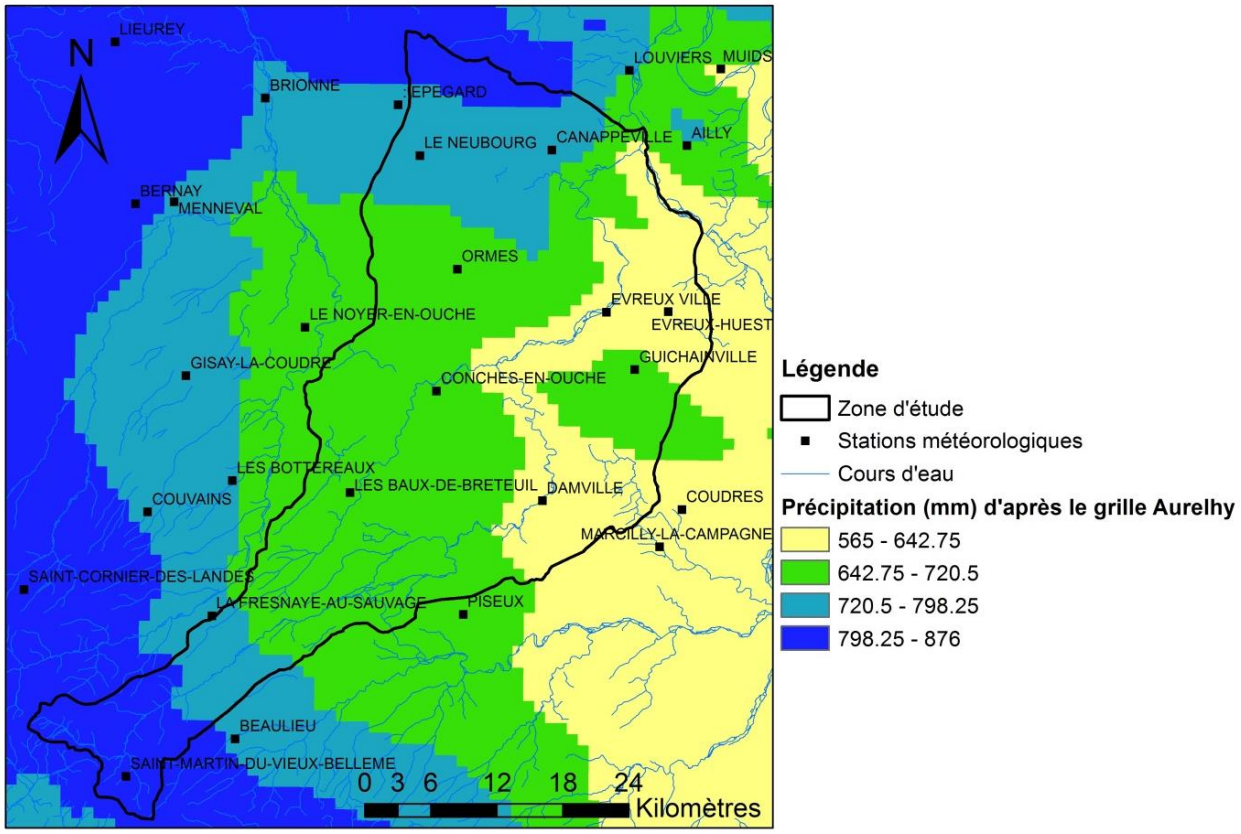


Illustration 15 : Moyenne trentenaire (1982-2012) de la pluviométrie annuelle selon la grille AURELHY établie par Météo France

3.2. SPATIALISATION DE LA PLUIE EFFICACE ET DE L'INFILTRATION A L'ECHELLE DU BASSIN DE L'ITON

Afin de réaliser le calcul le plus précis possible de la recharge de l'aquifère, le bassin de l'Iton a été découpé en zones météorologiques et pédologiques (selon la réserve utile des sols) homogènes. Le calcul de la pluie efficace et de l'infiltration a ainsi pu être réalisé pour chaque zone homogène, au pas de temps journalier, de janvier 1994 à juin 2015. La pluie efficace est calculée par un bilan hydrique classique faisant intervenir la pluie, l'ETP, l'ETR et la capacité de rétention en eau du sol (appelée aussi "réserve utile"). L'infiltration vers la nappe (la recharge) est la part de la pluie efficace restant après déduction du ruissellement.

Ce calcul spatialisé de la pluie efficace et des infiltrations a nécessité préalablement de spatialiser les paramètres nécessaires au calcul, à savoir la pluviométrie et la réserve utile du sol (RU). La méthode retenue pour la spatialisation de ces 2 paramètres est décrite dans les paragraphes suivants.

L'évapo-transpiration-potentielle (ETP) étant relativement homogène sur l'ensemble du bassin versant, la station d'Huest-Evreux a été retenue comme représentative pour la totalité de la zone d'étude.

Les formules de calcul de l'ETR et de la pluie efficace sont présentées ainsi que les résultats en termes d'infiltration et de pluie efficace sont présentés au paragraphe au § 3.3.

3.2.1. Spatialisation de la pluie

Même si le réseau Météo-France couvre d'une façon satisfaisante la majorité du territoire national, il ne permet pas d'appréhender la variabilité spatiale des conditions climatiques à l'échelle locale et encore moins de la cartographier. Dans la majorité des études, les données météorologiques proviennent des postes de mesure les plus proches du site d'étude, et sont transposées sans aucune transformation. Ainsi, la variabilité locale liée à la topographie ou à la latitude est rarement prise en compte.

L'utilisation des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), parfois couplée à des outils statistiques ou géostatistiques, permet le calcul de données climatiques spatialisées, qui ont pour avantage de fournir une information en tout point du territoire étudié. Les données climatiques obtenues se présentent généralement sous la forme d'un maillage régulier, chaque cellule possédant une valeur caractérisant la variable.

Pour les besoins de cette étude, nous avons utilisé les données de la grille AURELHY.

Méthodologie retenue :

La variabilité spatiale des pluies au sein du bassin de l'Iton a été étudiée à partir de la grille des moyennes trentenaire de la grille AURELHY. Quatre zones climatiques ont ainsi été déterminées (cf. Tableau 3 et Tableau 4). Pour chacune de ces 4 zones, une station météorologique représentative a été retenue : Huest, Ormes, Beaulieu et Saint-Martin-du-Vieux-Bellême (Illustration 16). Les chroniques pluviométriques de ces 4 stations ont ensuite été achetées auprès de Météo France.

Zones climatiques	Moyenne trentenaire (1980-2010) des précipitations	Station météorologie retenue	Code Météo-France de la station
ZONE 1	565-642.75 mm	Evreux - Huest	27347001
ZONE 2	642.75-720.5 mm	Ormes	27446001
ZONE 3	720.5-798.25 mm	Beaulieu	61034001
ZONE 4	798.25-876 mm	Saint-Martin-du-Vieux-Bellême	61423001

Tableau 3 : Détermination de 4 zones climatiques avec 1 station météorologique de référence affectée à chaque zone

	Huest	Ormes	Beaulieu	Saint-Martin-du-Vieux-Bellême
Minimum	398.4	463.2	576.2	461.4
Maximum	795.6	887	1096.7	1049.2
Moyenne	615.6	698	853.7	819.7
Médiane	603.8	676.9	855.7	830.9
Ecart-type	98	101.8	148.3	146.8

Tableau 4 : Moyenne, médiane et écart type des chroniques pluviomètriques (mm) des stations d'Huest, d'Ormes, de Beaulieu et de Saint-Martin-du-Vieux-Bellême (chroniques de 1994 à 2014 au pas de temps annuel, exepté Bellême de 1997 à 2014)

3.2.2. Spatialisation de la réserve utile du sol (RU)

Concernant la spatialisation de la réserve utile à l'échelle du bassin versant de l'Iton, le BRGM a commandé auprès de l'unité INFOSOL de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) d'Orléans, la base de données géographique des sols de France à l'échelle 1/1.000.000ème version 1.1 du 21/12/1998. A chacune des unités de sol délimitées par cette base de données nationale des sols, ont été affectées les valeurs de RU mentionnées dans la carte pédologique de Haute-Normandie au 1/250 000ème (SERDA, 1988) [8]. La carte des RU retenue pour le calcul de la pluie efficace est présentée à l'Illustration 16.

Les valeurs de RU varient entre 210 mm dans le tiers nord du bassin et 75 mm dans les deux tiers sud, avec des valeurs intermédiaires entre 100 et 130 mm dans la vallée de l'Iton.

[8] La carte pédologique de Haute-Normandie au 1/250 000ème est une carte au format papier qui ne couvre que la partie Euroise du bassin de l'Iton. Afin d'obtenir les délimitations géographiques des RU par zone à l'échelle de tout le bassin de l'Iton, les délimitations de l'unité INFOSOL de l'INRA ont été utilisées.

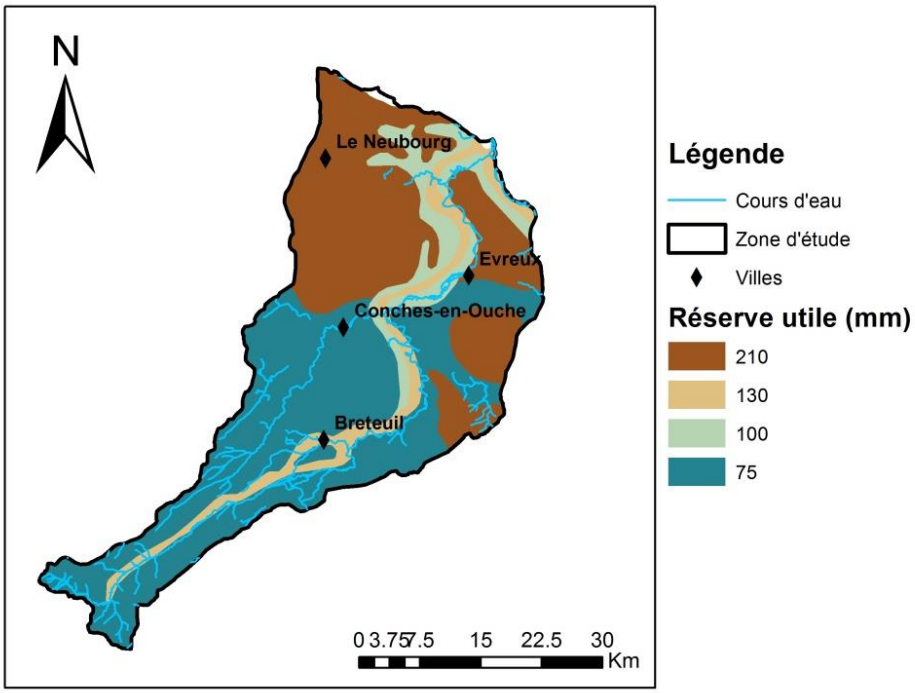


Illustration 16 : Réserve utile des sols à l'échelle du bassin versant de l'Iton (source : base de données des sols de France INRA pour la délimitation ; carte pédologique de Haute-Normandie pour les valeurs de RU)

3.2.3. Spatialisation de l'infiltration

Développé par le BRGM, l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux hydrographiques (IDPR) vise à qualifier le caractère plus ou moins infiltrant des formations géologiques présentes à l'affleurement. Une cartographie nationale a été réalisée avec des classes de valeurs représentées par une gamme de couleurs : une valeur faible (rouge sombre) correspond à une prédominance de l'infiltration tandis qu'une valeur forte (vert foncé ou bleu selon la figure) indique que le ruissellement prédomine.

Sur la zone d'étude (Illustration 13), cet indice fait apparaître la prévalence de l'infiltration sur les plateaux au centre et à l'aval du bassin. Le tiers amont du bassin versant de l'Iton est quant à lui plus ruisselant.

Une carte des coefficients d'infiltration a été établie en utilisant la grille d'IDPR et en établissant une correspondance entre la valeur de l'IDPR et la proportion de la pluie efficace prise en compte pour l'estimation de l'infiltration (Pinson S. et al 2010) (Illustration 17 et Illustration 18). L'IDPR moyen de la zone d'étude est de 490, ce qui correspondrait à un ruissellement de 25 % et à une infiltration de 75 % de la pluie efficace.

Valeur de l'IDPR	Signification	Proportion de la pluie efficace prise en compte pour l'estimation de l'infiltration	Proportion de la pluie efficace prise en compte pour l'estimation du ruissellement
0 – 200	Infiltration très majoritaire	95 %	5 %
200 - 400		85 %	15 %
400 - 600	Infiltration Moyenne	75 %	25 %
600 -800		65 %	35%
800 -1000		55 %	45 %
1000 – 1200		45 %	55 %
1200 - 1400		35 %	65 %
1400 - 1600	Ruissellement moyen	25 %	75 %
1600- 1800		15 %	85 %
1800 -2000	Ruissellement majoritaire	5 %	95

Illustration 17 : Correspondance utilisée entre la valeur de l'IDPR et le coefficient de ruissellement retenu (Pinson S. et al., 2010)

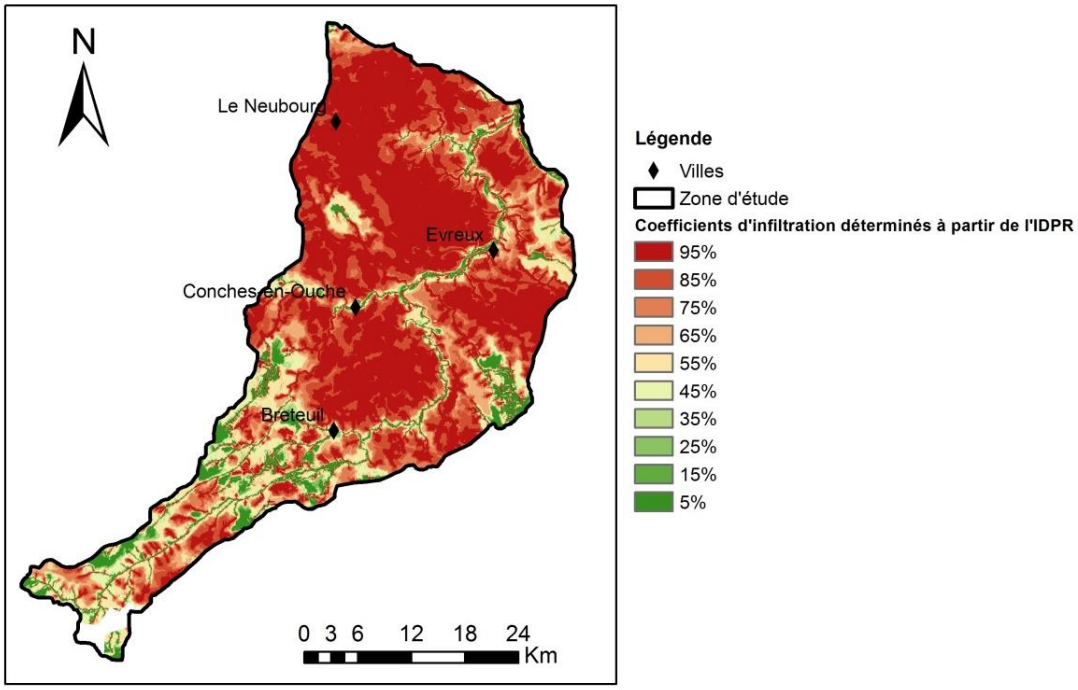


Illustration 18 : Carte des coefficients d'infiltration à l'échelle de la zone d'étude (déterminés à partir de l'IDPR)

3.3. RESULTATS : CARTE SPATIALISEE DE LA PLUIE EFFICACE ET DE L'INFILTRATION

La pluie efficace dépendant des précipitations et de la réserve utile des sols, celle-ci a été calculée pour chaque zone homogène (zone homogène du couple pluie / réserve utile), au pas de temps journalier de janvier 1994 à mai 2015.

Calcul de la pluie efficace

Afin de calculer la pluie efficace, un bilan hydrique est réalisé en tenant compte de l'ETP, des précipitations mesurées à la station météorologique représentative de chaque zone météo, et de la réserve utile (RU).

Pour chaque pas de temps journalier j, la pluie efficace a été calculée ainsi :

- **L'évapotranspiration réele ETR_j** = valeur minimum entre (RU_{j-1} + $Pluie_j$) et ETP_j
  La valeur d'ETP calculée par Météo France à Huest-Evreux a été utilisée pour l'ensemble de la zone d'étude

- **Réserve utile RU_j**
  Si $RU_{j-1} + Pluie_j - ETR_j > RU\ max$ alors $RU_j = RU\ max$
  Si $RU_{j-1} + Pluie_j - ETR_j < 0$ alors $RU_j = 0$
  Si $0 < RU_{j-1} + Pluie_j - ETR_j < RU\ max$ alors $RU_j = RU_{j-1} + Pluie_j - ETR_j$
  La réserve utile a été considérée comme maximum la veille de la première réserve utile calculée (initialisation du calcul au 1er janvier 1994)

- **Pluie efficace $Peff_j$**
  Si $Pluie_j + RU_{j-1} - RU_j - ETR_j < 0$ alors $Peff_j = 0$
  Si $Pluie_j + RU_{j-1} - RU_j - ETR_j > 0$ alors $Peff_j = Pluie_j + RU_{j-1} - RU_j - ETR_j$

Les pluies efficaces obtenues au pas de temps journalier ont ensuite été sommées au pas de temps mensuel et annuel. L'Illustration 19 présente la spatialisation de la pluie efficace obtenue. Les pluies efficaces déterminées ont ensuite été multipliées par les coefficients d'infiltration afin d'obtenir une carte spatialisée de l'infiltration annuelle moyenne (Illustration 20).

La plaine de Saint-André, à l'est de la vallée de l'Iton aval, ainsi qu'une partie du plateau du Neubourg sont caractérisées par des valeurs annuelles moyennes d'infiltration relativement faibles (de 0 à 150 mm/an). Les plus fortes valeurs d'infiltration (de 200 à 300 mm par an) correspondent à la tête de bassin (partie ornaise de la zone d'étude), ainsi qu'à quelques vallées sèches, connectées en rive gauche de la vallée de l'Iton avant sa confluence avec l'Eure. Le reste du bassin (entre Breteuil-sur-Iton et Conches-en-Ouche) présente des valeurs d'infiltration intermédiaires, comprises entre 150 et 200 mm/an.

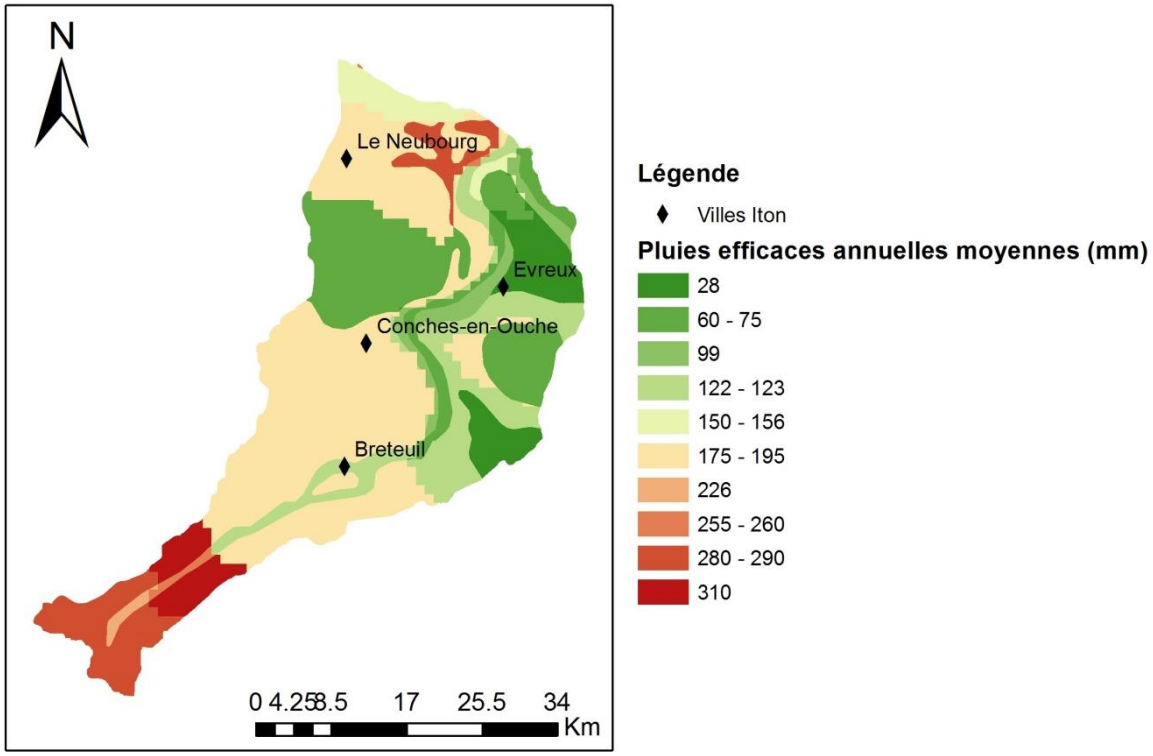


Illustration 19 : Résultats de la spatialisation de la pluie efficace - pluies efficaces annuelles moyennes (mm/an) sur la zone d'étude (moyenne interannuelle réalisée sur la période 1994-2014)

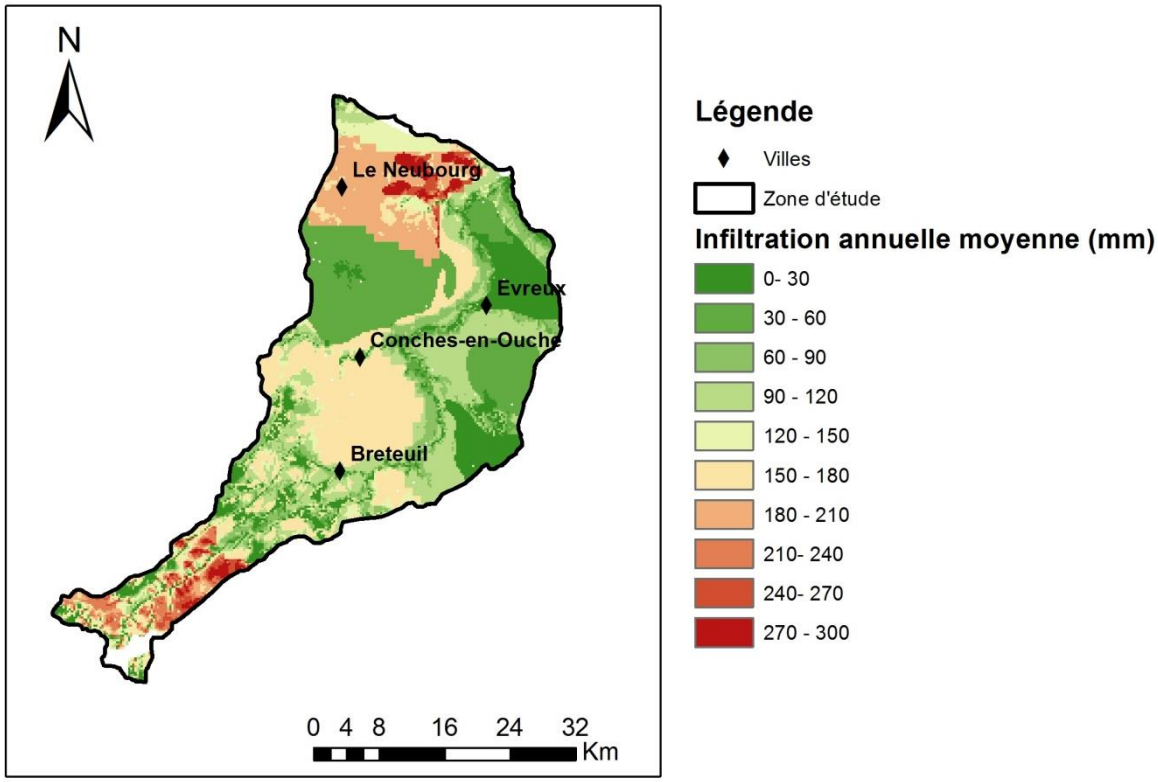


Illustration 20 : Résultats de la spatialisation de l'infiltration - Infiltration annuelle moyenne (mm/an) sur la zone d'étude (moyenne interannuelle réalisée sur la période 1994-2014)

3.4. ESTIMATION DE L'INCERTITUDE DE LA PLUIE EFFICACE ET DE L'INFILTRATION CALCULEE

La caractérisation de la recharge est un problème complexe dépendant de nombreux facteurs tels que la météorologie, le type et l'épaisseur de la réserve utile des sols, la couverture végétale, les caractéristiques géomorphologiques (pente, rugosité,…) et des propriétés hydrodynamiques des formations du sous-sol. Pour obtenir une vision cohérente des flux de recharge, assortie d'une illustration de l'incertitude associée au choix des méthodes utilisées pour la calculer, il est nécessaire d'utiliser le plus grand nombre possible de méthodes et de comparer leurs performances.

L'outil ESPERE (EStimation de la Pluie Efficace et de la REcharge) développé par le BRGM en 2015 a été utilisé (Cabellero et al., 2015).

A partir d'un jeu de données fourni au pas de temps journalier, ESPERE calcule la pluie efficace et/ou la recharge sur le bassin d'alimentation selon différentes méthodes. Les méthodes sélectionnées pour la présente étude sont les suivantes :

- Méthode empirique de Turc, résultant de l'observation de données (précipitations, températures, débits à l'exutoire) de 254 bassins de caractéristiques hydro-climatiques assez variables (situés en Europe, Afrique, Amérique et Java) ;

- Méthodes de bilans hydriques (cf. Illustration 21) basées sur les données climatiques (précipitations, ETP, température) :
  - La méthode de Thornthwaite propose un bilan hydrique journalier intégrant la température et la latitude pour estimer l'ETP (cf. méthode utilisée au § 3.3)
  - Les méthodes de Dingman sont basées sur des bilans hydriques du sol avec prise en compte de la neige et vidange exponentielle de la réserve utile. Ces méthodes diffèrent par leur estimation de l'ETP, effectuée avec la longueur du jour et la tension de vapeur saturante (Dingman-Hamon), ou bien en combinant un bilan énergétique et un transfert de masse (Dingman-Penman-Monteith) ;

  Les données de pluie, température, neige, ETP de SAFRAN[9] (Météo France) ont été utilisées pour les méthodes dites « bilan hydriques » et « empiriques ». Une valeur de RUmax de 130mm a été retenue comme moyenne pour le bassin de l'Iton.

- Méthode « Water Table Fluctuation » exploitant les chroniques piézométriques : calcul de la recharge annuelle avec l'hypothèse de base que la recharge (en mm) est égale à l'élévation du niveau piézométrique multipliée par la porosité efficace (équivalent au coefficient d'emmagasinement) ;
  Les données du piézomètre de Moisville avec un coefficient d'emmagasinement de 1% ont été utilisées.

[9] Les données SAFRAN sont des données horaires couvrant la France à une résolution de 8 km sur une projection Lambert-II étendue. Elles sont produites par MétéoFrance (Centre National de Recherches Météorologiques, CNRM). Une description du système SAFRAN appliqué à la France entière est décrite dans Le Moigne (2002).

- Méthodes de filtre des chroniques de débit de rivières basées sur l'indice de débit de base ou BFI (rapport de la somme des débits de base journaliers sur la somme des débits journaliers), les filtres diffèrent par leur méthode d'estimation des débits de base :
    - Procédure de calcul du débit de base développée par l'Institut d'Hydrologie de Wallingford (voir par exemple Gustard et al., 1992 dans Cabellero et al., 2015) ;
    - Débits de base obtenus par le filtre de (Chapman TG, Maxwell AI, 1996 dans Cabellero et al., 2015) ;
    - Débits de base obtenus par le filtre de (Eckhardt K., 2005 dans Cabellero et al., 2015).

  Les données de débits mesurées par la DREAL à la station de Normanville ont été utilisées pour ces méthodes filtres.

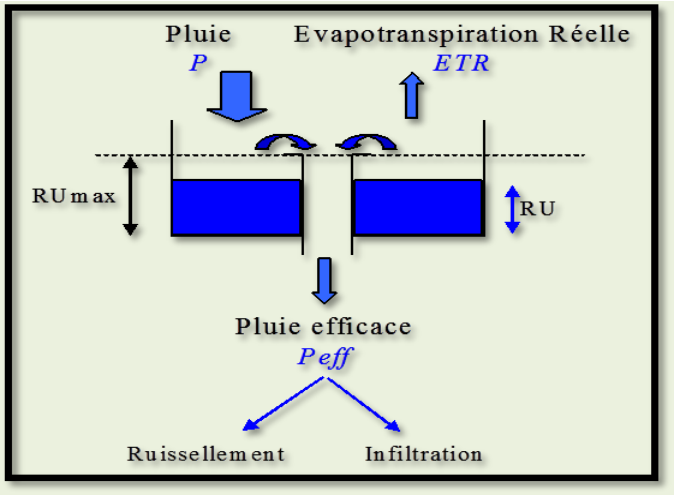


Illustration 21 : Schéma de principe d'un bilan hydrique du sol

Les pluies efficaces et infiltrations estimées par ces différentes méthodes ont été comparées à celles calculées par la méthode « semi-spatialisée » détaillée au § 3.3 ainsi qu'à celles calculées par les modèles TEMPO et GARDENIA mis en place dans le cadre de la présente étude (cf. § 12.3 et § 9.1).

La pluie efficace calculée selon la méthode « semi-spatialisée » (cf. §3.3) semble assez proche des résultats obtenus par le modèle TEMPO. Les méthodes empiriques ou de bilan donnent quant à elles des valeurs de pluie efficace beaucoup plus importantes (Illustration 22). Les grandes tendances interannuelles semblent être similaires selon tous les modèles, bien que la méthode empirique de Turc soit toujours celle qui fournit les plus fortes valeurs de pluie efficace. Ces valeurs sont cohérentes avec les chroniques de pluviométrie, qui indiquent des années relativement sèches depuis 2003, avec une légère augmentation des précipitations depuis 2012.

Concernant l'estimation de la recharge, des méthodes supplémentaires permettent de l'estimer (méthode des filtres et méthode WTF) (Illustration 23). Les hauteurs d'eau obtenues via les méthodes de Turc et celles de Thornthwaite et Dingman (basées sur des bilans hydriques du sol), sont les valeurs obtenues les plus fortes. A l'inverse, celles obtenues à partir des méthodes utilisant les débits des cours d'eau ou les piézomètres sont les valeurs les plus faibles (valeurs du modèle Gardenia excepté). La faiblesse de ces valeurs est probablement liée au fonctionnement du bassin de l'Iton : une grande partie des précipitations qui tombent sur l'impluvium du BV, n'arrive pas au débitmètre de Normanville pour des raisons qui seront

évoquées dans la suite de ce rapport. Les méthodes d'estimation de la recharge utilisant le débit du cours d'eau ont donc tendance ici à sous-estimer la valeur de la recharge.

L'Illustration 24 montre que la recharge estimée par la méthode semi-spatialisée (détaillée au § 3.3) couplée à l'IDRP se situe proche de la médiane et moyenne des estimations faites par l'ensemble des méthodes testées.

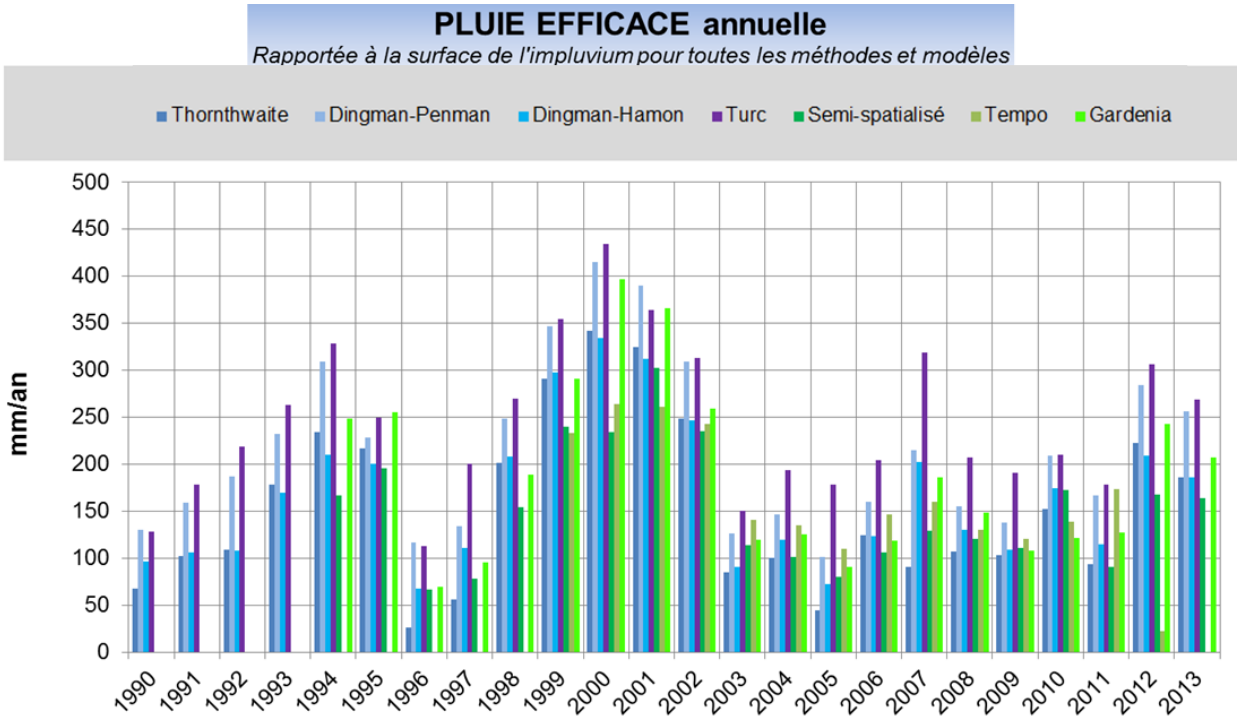


Illustration 22 : Comparaison des pluies efficaces annuelles déterminées selon plusieurs méthodes (comparaison par l'outil BRGM « ESPERE »)

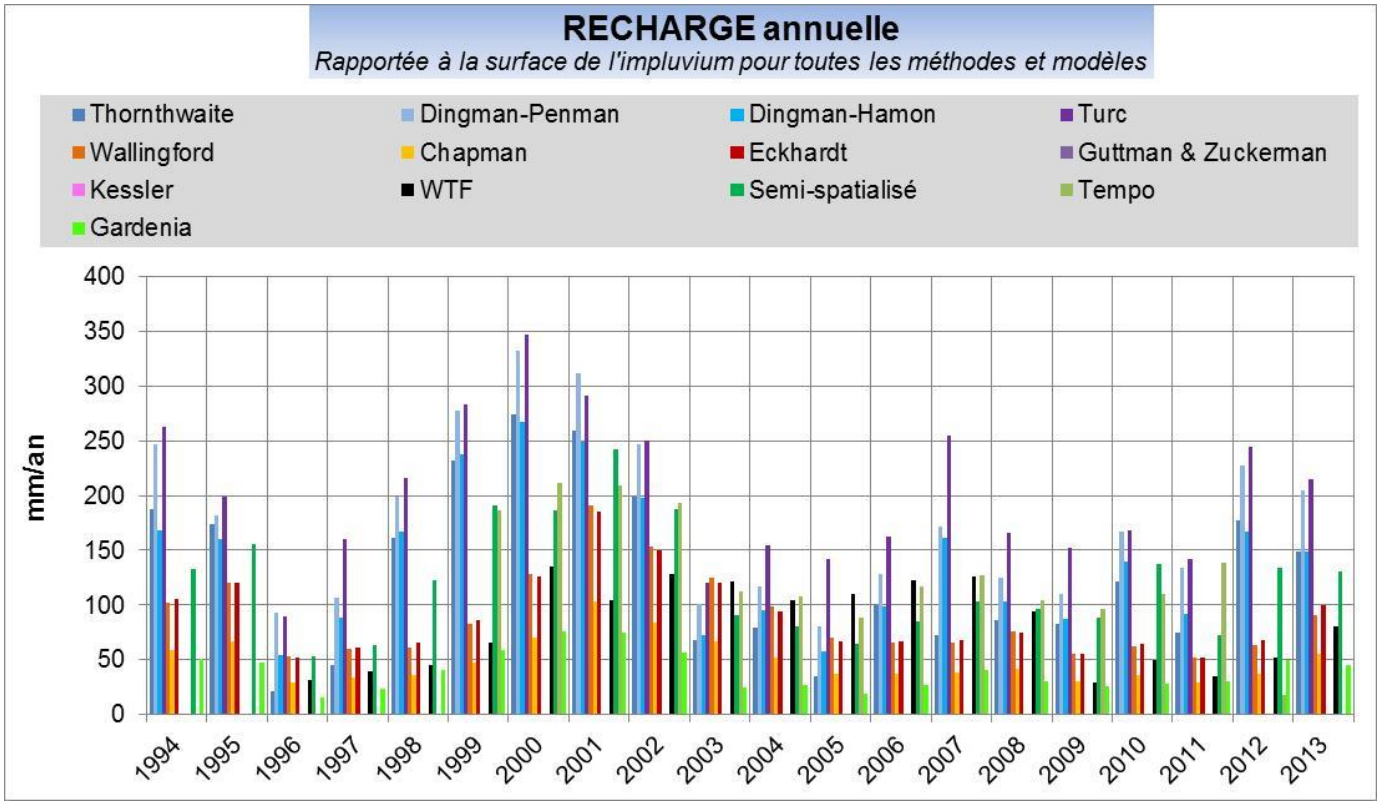


Illustration 23 : Comparaison des recharges annuelles déterminées selon plusieurs méthodes (comparaison par l'outil BRGM « ESPERE »)

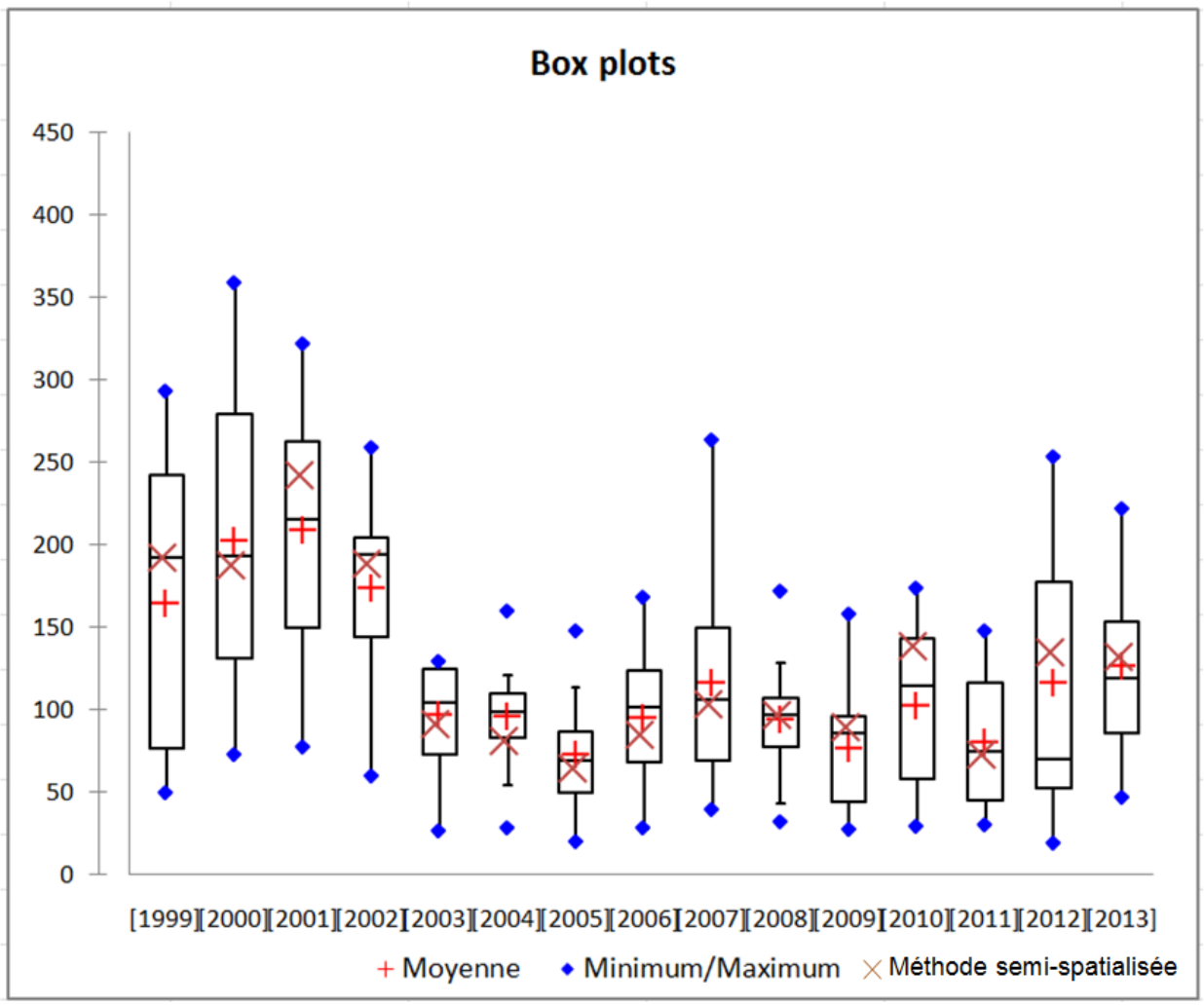


Illustration 24 : Comparaison de la recharge estimée par la méthode semi-spatialisée couplée à l'IDPR (dite « semi-spatialisée ») aux valeurs de recharge estimées par les autres méthodes (représentation en boite à moustache dont le rectangle encadre 75% des valeurs et le tiré noir dans le rectangle représente la médiane)

4. Synthèse géologique

La synthèse géologique s'est articulée en deux grandes étapes, successives et complémentaires :

- Une recherche bibliographique qui vise à réunir le maximum d'informations sur la géologie de la zone d'étude, et d'en réaliser une synthèse ;

- La réalisation de compléments destinés à mieux comprendre les données obtenues, en proposant des corrélations de logs géologiques à l'échelle de la zone d'étude.

4.1. CADRE GEOLOGIQUE

D'après la carte géologique au 1/1.000.000 du BRGM (Illustration 25), le bassin versant de l'Iton s'est principalement développé au sein de la puissante série crayeuse du Crétacé supérieur (Cénomanien – Turonien – Coniacien – Santonien et Campanien), traditionnellement découpée en trois groupes : une craie glauconieuse jusqu'au Cénomanien moyen, une craie argileuse jusqu'au Turonien moyen et une craie blanche qui perdure jusqu'à la fin du Crétacé supérieur (Lasseur, 2008). A l'extrémité sud-ouest de la zone d'étude, les terrains du Cénomanien supérieur sont exceptionnellement caractérisés par les faciès sableux des Sables du Perche, formation détritique dans laquelle l'Iton prend sa source.

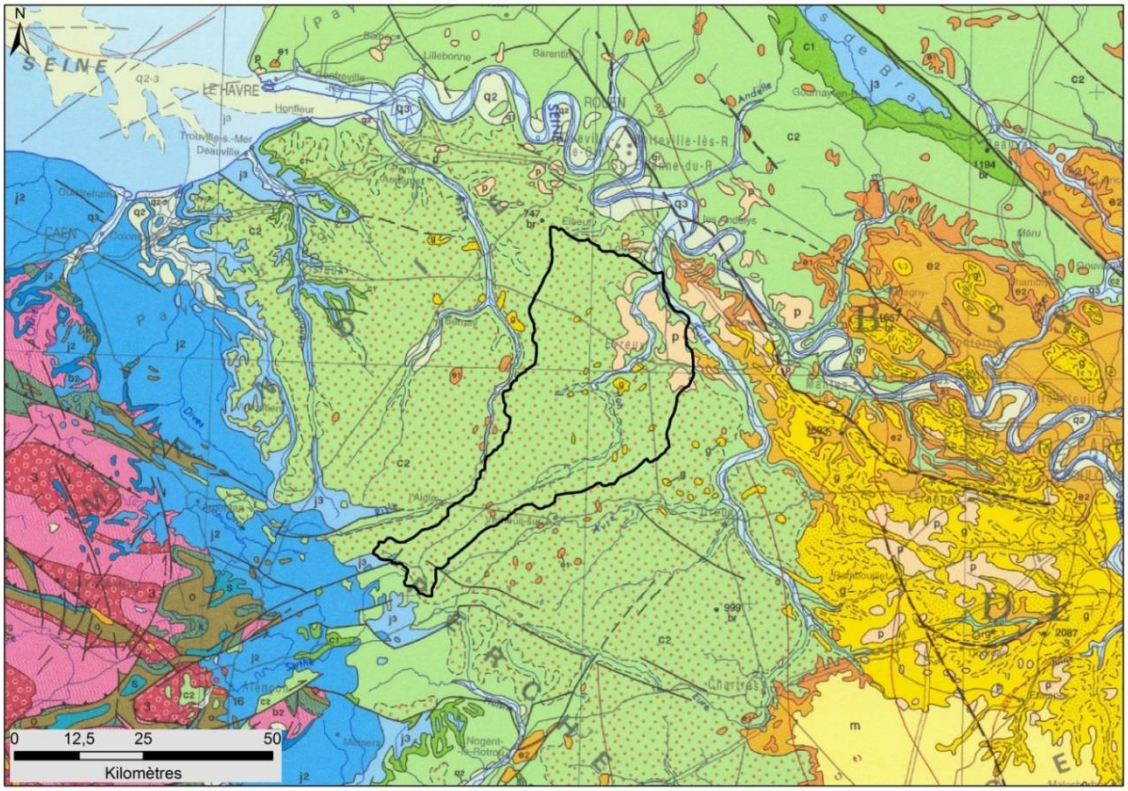


Illustration 25 : Localisation du secteur d'étude sur la carte géologique de la France au 1/1.000.000 (©BRGM) (j_3 : Jurassique supérieur, c_1 : Crétacé inférieur, c_2 : Crétacé supérieur, e : Eocène, g : Oligocène, p : Pliocène)

Les affleurements de Crétacé supérieur sont relativement peu nombreux, et se localisent essentiellement au niveau des ruptures de pentes formées au gré du creusement des vallées. Sur les plateaux, les formations crayeuses sont masquées par une couche plus ou moins épaisse de formations superficielles, notamment par les Formations résiduelles à silex et les Limons des Plateaux, qui forment l'essentiel du sous-sol immédiat. En fond de vallée, le substratum crayeux est recouvert par les complexes alluvionnaires.

Cette série crayeuse repose sur les formations sablo-argileuses du Crétacé inférieur (essentiellement l'Albien), caractérisées par deux faciès typiques (par ordre stratigraphique) : l'Argile de Gault et la Gaize, qui représentent des marqueurs stratigraphiques importants, ainsi que le mur de la puissance nappe de la Craie.

Ces terrains crétacés reposent en discordance sur les terrains carbonatés du Jurassique supérieur, par l'intermédiaire d'une surface d'érosion.

Les plateaux sont également recouverts par quelques placages tertiaires, datés de l'Yprésien, du Lutétien, du Stampien et du Pliocène/Pléistocène inférieur, parfois sur des superficies et des épaisseurs non-négligeables (nord-est du secteur d'étude), ou parfois très localement. Dans ce cas, ces formations sont parfois considérées comme des formations superficielles sous le terme « résidus de dépôts tertiaires » (Quesnel et al, 1996).

Le bassin versant de l'Iton se trouve à cheval sur les cartes géologiques harmonisées de deux départements (Eure et Orne). Dans le cadre de cette étude, une carte géologique harmonisée à l'échelle du bassin versant a été réalisée (cf. Illustration 27).

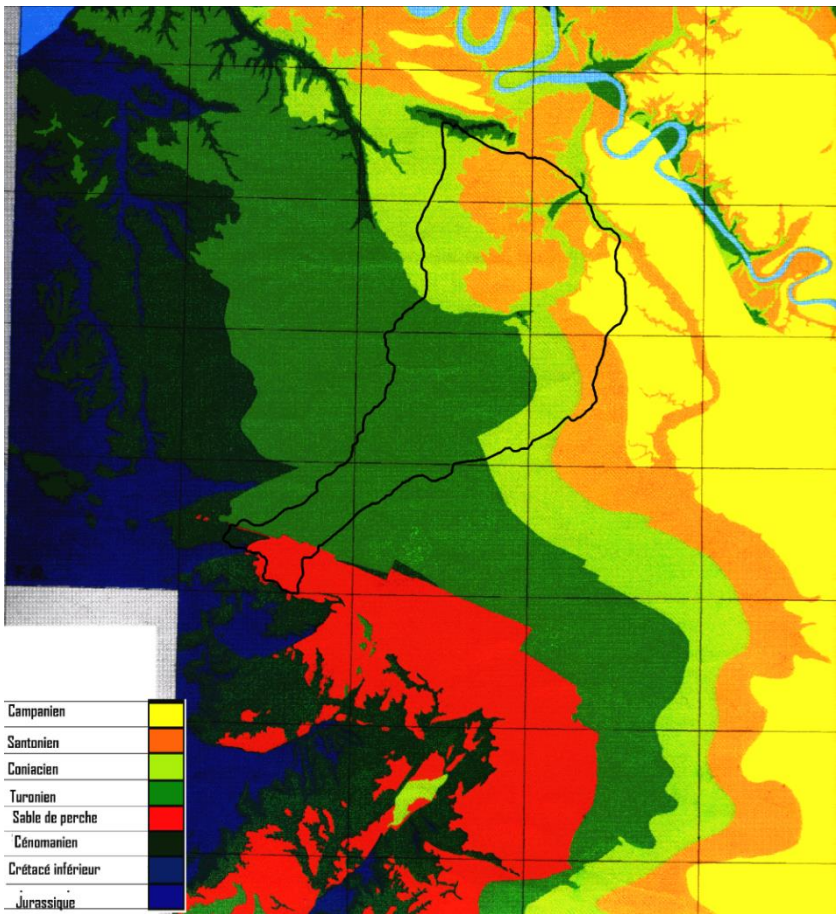


Illustration 26 : Situation de la zone d'étude sur un écorché des formations mésozoïques (Quesnel, 1997)

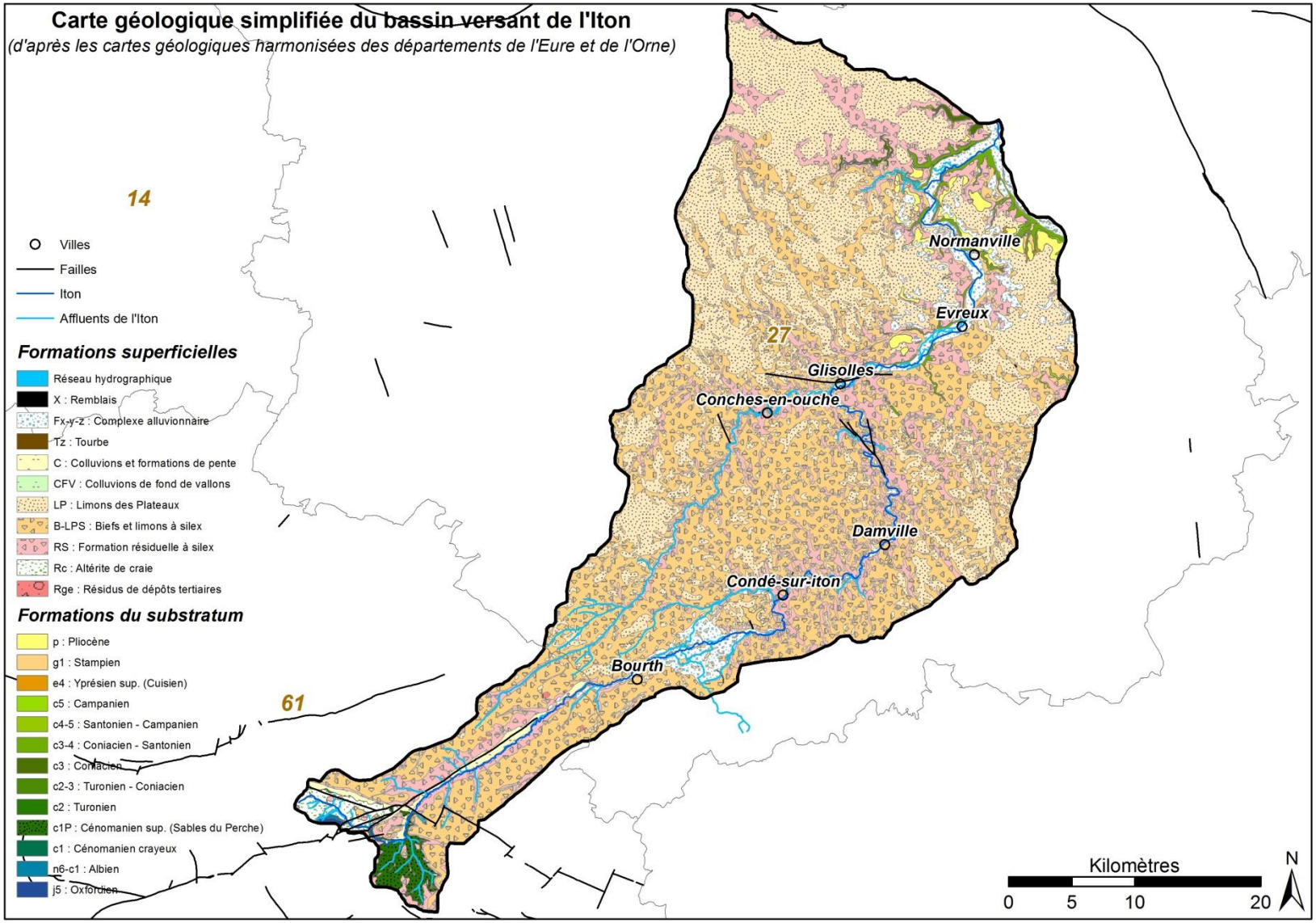


Illustration 27 : Carte géologique simplifiée du bassin versant de l'Iton

4.2. DESCRIPTION DES FORMATIONS DU SUBSTRATUM

Les faciès lithologiques suivants sont décrits d'après leur âge géologique, par ordre stratigraphique. Ces faciès, ainsi que leurs épaisseurs, peuvent varier en fonction de leur localisation dans la zone d'étude, ce qui traduit l'hétérogénéité des processus sédimentaires à l'origine des dépôts actuellement observés à l'affleurement ou en sondage. L'illustration ci-dessous situe l'âge et le faciès des différentes formations géologiques rencontrées dans la zone d'étude.

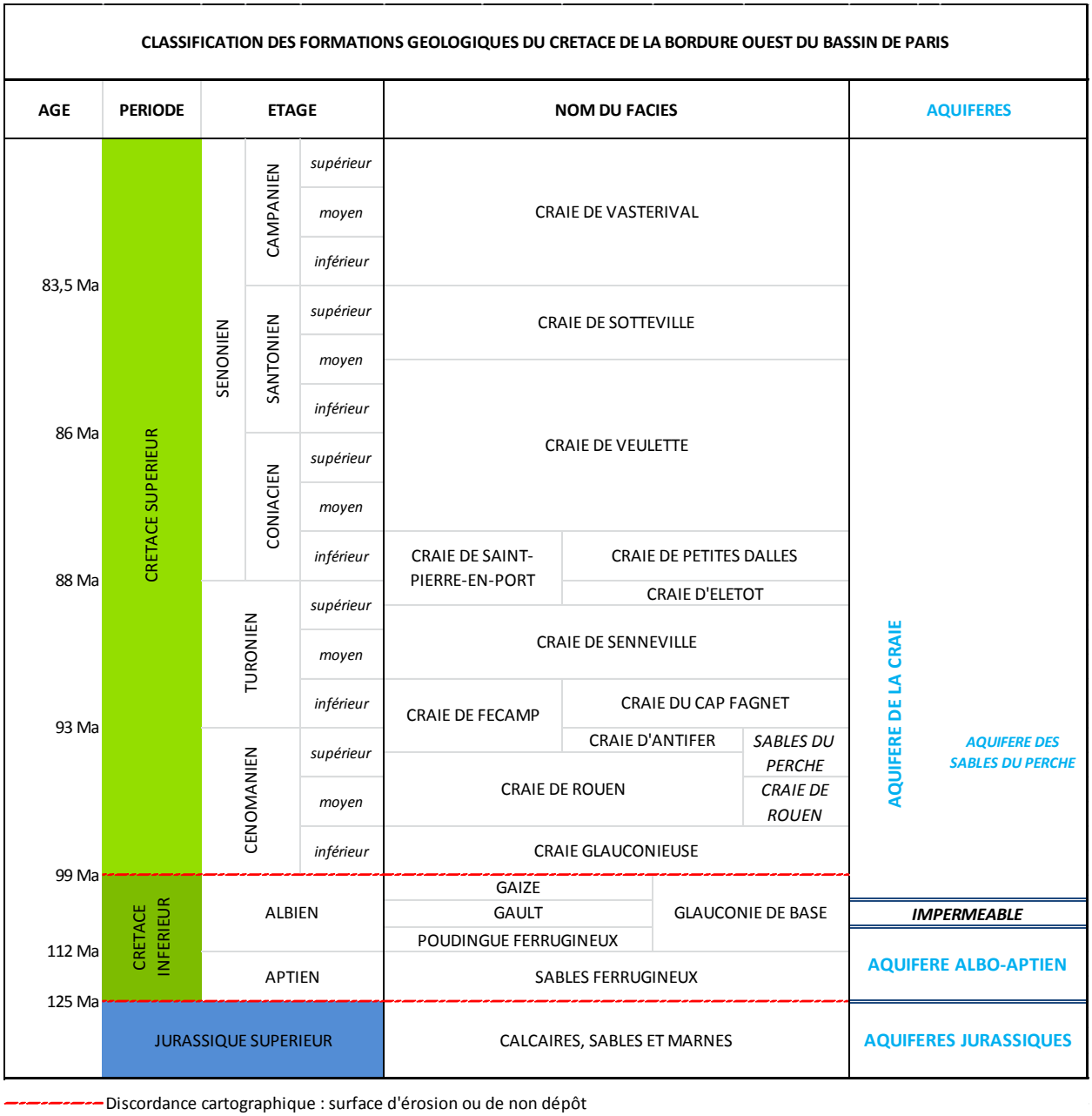


Illustration 28 : Découpage lithostratigraphique du Crétacé de Haute-Normandie (d'après Juignet, 1974 et Lasseur, 2008). L'ensemble Crétacé repose sur les formations du Jurassique supérieur

Pour la description des formations du substratum, nous nous pencherons essentiellement sur ces formations crétacées, car elles présentent un fort intérêt hydrogéologique. En effet, deux nappes peuvent y être individualisées : la nappe de la Craie, principalement hébergée par les assises crayeuses du Crétacé supérieur, et la nappe albo-aptienne hébergée principalement par les formations sableuses aptiennes. Ces deux aquifères sont séparés par les argiles du Gault, formation imperméable qui constitue le toit de la nappe albo-aptienne, captive, et le mur de la nappe de la Craie. A cela s'ajoute la nappe des Sables du Perche, hébergée par la formation du même nom et localisée à l'extrémité sud de la zone d'étude, en amont de la faille de Senonches qui limite leur extension vers le nord. Concernant le Jurassique, seules les formations affleurentes seront décrites.

Notons que les descriptions suivantes se réfèrent au découpage biostratigraphique classiquement usité par les géologues lors du levé des cartes géologiques. Ce découpage s'appuie donc sur des données de faunes ou de microfaunes fossiles, très utiles pour dater les formations (et ainsi les situer sur l'échelle stratigraphique) mais qui présente peu d'intérêt pour les problématiques hydrogéologiques, qui dépendent plus du « faciès » que de l'âge de la formation.

4.2.1. Oxfordien supérieur – calcaires à astartes (j_7)

Cette formation n'affleure que très localement à l'extrémité sud-ouest du secteur d'étude, où elle marque la fin des dépôts marins carbonatés du Jurassique supérieur, tronqués par la transgression albienne (*Ménillet et al.,* 1998). Plus au nord, les formations oxfordiennes sont recouvertes par les terrains du Kimméridgien, puis du Tithonien, non visibles à l'affleurement mais connus par sondage.

A l'affleurement, le calcaire à astartes consiste en un calcaire fin sublithographique, très dur, de couleur gris à beige, renfermant de nombreuses intercalations de marnes grises (*Ménillet et al.,* 1998).

4.2.2. Les Sables Ferrugineux de l'Aptien (n_6)

Dans le bassin versant de l'Iton, ces formations ne sont connues que par sondage. Elles correspondent aux premiers dépôts mis en place lors de la transgression crétacée, et reposent en discordance sur les formations jurassiques sous-jacentes. Le faciès caractéristique des sables ferrugineux consiste en des sables plus ou moins argileux, glauconieux, micacés, à liserés ferrugineux ou ligniteux, surmontés parfois d'un faciès très argileux. D'un point de vue granulométrique, ces sables sont généralement fins et bien classés avec intercalation de niveaux grossiers (parfois graveleux), mal classés.

4.2.3. Albien (n_7)

Dans le sud du bassin versant, lorsque l'Aptien n'est pas présent, les faciès albiens reposent en discordance sur les formations jurassiques, par l'intermédiaire d'une surface d'érosion. L'Albien n'est représenté à l'affleurement qu'à l'extrémité sud-ouest du secteur d'étude. Toutefois, dans le reste du bassin versant de l'Iton, ces formations sont bien connues par sondage, car elles représentent un grand intérêt géologique (marqueur stratigraphique) et hydrogéologique (mur de la puissante nappe de la Craie). Classiquement, l'Albien est représenté par trois faciès, le *Poudingue Ferrugineux* à la base, *l'Argile du Gault* dans sa partie moyenne, et la *Gaize* dans la partie supérieure :

- *Gaize* : faciès de marne silteuse à niveaux glauconieux ;

- *Argiles du Gault* : ce faciès consiste en une argile noire ou verdâtre, parfois sableuse, plastique et très riche en grains de glauconie, comportant un horizon basal de remaniement à graviers ;

- *Poudingue Ferrugineux* : niveau lenticulaire de graviers et galets hétérogènes intercalés dans une matrice argilo-silteuse ou sablo-argileuse, parfois très glauconieuse.

Dans la partie sud de la zone d'étude, cet ensemble est condensé sous le faciès de la *Glauconie de Base*, qui consiste en une formation de bordure, plus détritique, constituée à sa base de glauconitite, sous-jacente à un sable glauconieux carbonaté.

Dans l'emprise de la zone d'étude, les faciès crayeux reposent donc partout sur une semelle de formations albiennes *a priori* imperméable.

4.2.4. Les craies du Cénomanien (c_1)

Les craies cénomaniennes reposent sur les formations albiennes par l'intermédiaire d'une surface d'érosion régionale, et marquent le début de la longue période de la sédimentation crayeuse. Le Cénomanien est généralement complet, protégé de l'érosion par les craies turoniennes sus-jacentes. Toutefois, les affleurements sont peu nombreux et n'apparaissent que très localement sur les versants de la vallée de l'Iton.

Classiquement, le Cénomanien est découpé en deux faciès :

- La *craie glauconieuse* à la base, qui consiste en des gaizes (spongolithes : roche formée par des éponges fossilisées) ou des craies silteuses, riches en glauconie, notamment à la base, et généralement remaniée ;

- La *craie de Rouen* au sommet, représentée par des craies blanches à crème, parfois beige ou grises, à fréquents lits de silex et rares horizons noduleux et glauconieux.

L'épaisseur des craies cénomaniennes est estimée à une cinquantaine de mètres.

Le passage Cénomanien – Turonien serait parfois marqué par un lit argileux (argile grise) de 1 à 4 m d'épaisseur, reconnu sur les forages 02144X0042 (1 m), 02144X0043 (1 m), 02144X0045 (4 m) et 02144X0046 (1 m) aux Aspres (carte en annexe 3). Sur ces forages, la nappe cénomanienne a été observée artésienne (+ 0,5 m/sol) et les rapports d'essais de pompage de 1995 et 2000 réalisés sur ces forages indiquent une réaction de type nappe captive. D'après la notice de la carte géologique de l'Aigle (*Ménillet et al.,* 1998), ce lit argileux isolerait la nappe turonienne de la nappe cénomanienne, ce qui induirait une meilleure qualité pour les eaux cénomaniennes, notamment pour la teneur en nitrates.

4.2.5. Les Sables du Perche du Cénomanien supérieur (c_1P)

Les sables du Perche sont des formations marines détritiques intercalées entre les craies cénomaniennes et les craies turoniennes. Cette formation, dans laquelle l'Iton prend sa source, n'est observable qu'à l'extrémité sud-ouest du secteur d'étude.

A l'affleurement, ce sont des sables siliceux hétérométriques, plus ou moins argileux, blancs à ocre clair, avec une organisation décimétrique tabulaire avec parfois des stratifications obliques. On y retrouve parfois quelques intercalations argileuses et des lentilles de grès ferrugineux

(*Ménillet et al.,* 1998). D'une épaisseur de 15 à 30 m, ils sont altérés en surface sur quelques mètres, montrant un sol brun et pouvant être recouverts d'une faible épaisseur de formations superficielles de versant. Les travaux de P. Juignet, effectués à l'aide d'analyses granulométriques et morphoscopiques, précisent que ces sables étaient soumis à l'action de courants de marée assez rapides qui affectaient le bassin durant le Cénomanien, dans un environnement probablement estuarien.

4.2.6. Les craies du Turonien (c_2)

Dans la zone d'étude, le Turonien est entièrement représenté sous un faciès crayeux. Vers l'aval, la série est complète, protégée de l'érosion par les formations crayeuses sus-jacentes du Sénonien (Coniacien – Santonien – Campanien).

Les craies turoniennes sont séparées des craies cénomaniennes par un niveau induré (hardground) voire un passage argileux (§ 4.2.4). Elles affleurent peu dans la zone d'étude : les affleurements se localisent dans la partie aval de la vallée de l'Iton.

Globalement, les craies turoniennes sont décrites dans la littérature sous le terme de *craies marneuses ou craies argileuses à rares silex*. Toutefois, trois faciès successifs peuvent être observés, attribués successivement au Turonien inférieur, moyen et supérieur :

- ***Turonien inférieur*** : craie marneuse homogène, grisâtre, tendre, qui se présente en gros bancs d'épaisseur métrique, généralement dépourvue de silex ;
- ***Turonien moyen*** : craie blanche, tendre, en gros bancs et à rares silex, se terminant par deux hardgrounds noduleux ;
- ***Turonien supérieur*** : craie assez grossière, coquillère, à lits de silex noirs. Cette craie traduit une séquence légèrement régressive. Au sommet, les craies sont parfois dolomitisées, et présentent des niveaux indurés noduleux.

L'épaisseur du Turonien varie du sud-ouest au nord-est, en passant de 20 à 30 m sur la carte géologique de l'Aigle (*Ménillet et al.,* 1998), de 40 à 50 m sur la carte de Beaumont-le-Roger (*Kuntz*, 1981) et de 60 à 80 m sur les cartes géologiques d'Elbeuf (*Bassompierre*, 1972) et de Les Andelys (*Bassompierre*, 1967).

4.2.7. Les craies sénoniennes : Coniacien (c_3), Santonien (c_4) et Campanien (c_5)

La série crayeuse du sénonien est très souvent tronquée par les altérations et les érosions post-crétacées. Ces faciès sont présents uniquement dans la partie nord de la zone d'étude : la série la plus complète étant située à l'est d'Evreux, où les formations campaniennes ont été conservées sous les plaquages tertiaires. Au sud-ouest d'Evreux, les Formations Résiduelles à silex entament déjà les formations turoniennes.

A l'instar des autres formations crayeuses, les craies sénoniennes sont majoritairement recouvertes par les formations superficielles, et les affleurements sont peu nombreux. Ils se localisent au niveau des ruptures de pentes situées sur les versants de la partie aval de la vallée de l'Iton.

- ***Coniacien*** : les craies coniaciennes sont des craies dolomitiques, dures, blanchâtre à jaunâtre, qui se présentent en bancs épais, séparées par des lits de silex. L'épaisseur

du Coniacien varie de 30 à 40 m sur la feuille de Beaumont-le-Roger à 50 m sur la feuille de Les Andelys.

- ***Santonien*** : les craies santoniennes sont blanches, fines à grossières, parfois traçantes, granuleuses, et riches en bryozoaires. Les lits de silex, noirs, sont nombreux. L'épaisseur du Santonien, souvent résiduelle sous les argiles à silex, est estimée entre 40 et 50 m sur la feuille de Beaumont-le-Roger ;

- ***Campanien*** : peu représentées, uniquement lorsqu'elles sont conservées sous les formations tertiaires, les craies campaniennes sont tendres et fines, de couleur blanc-crème, traçante, à rares silex noirs et parfois riches en bryozoaires, ce qui témoigne d'un caractère régressif (*Kuntz*, 1982). Dans la zone d'étude, l'épaisseur du Campanien, majoritairement résiduelle, est estimée à une trentaine de mètres.

Compte tenu de la similarité de leurs faciès, les craies sénoniennes sont souvent désignées sous le terme de C*raie blanche à silex*.

4.2.8. Yprésien supérieur – Sables de Cuise (e_4)

Très peu représentés dans le secteur d'étude, les faciès sableux des Sables de Cuise, datés de l'Yprésien supérieur (Cuisien), affleurent sous forme de plaquage, situés à l'est d'Evreux, où ils marquent la limite d'extension occidentale de cette formation dans l'Ouest du Bassin de Paris, au sud de la vallée de la Seine (*Pomerol et al.,* 1977). Certains affleurements ont fait l'objet d'une exploitation sous forme de sablière.

Ce sont des sables fins, blancs jaunâtres, devenant plus argileux au sommet, et à intercalation de petits galets arrondis (*Pomerol et al.,* 1977).

Ce sont les premiers dépôts d'âge Tertiaire connus dans la zone d'étude.

4.2.9. Rupélien - Sables du Stampien (g_1)

Ils ne sont présents que très localement de part et d'autre de la vallée de l'Iton, où ils remplissent des vides d'origine karstiques, jalonnant un axe approximativement méridien à l'Est d'Evreux.

Ce sont des sables fins et friables, micacés, blancs à beige lorsqu'ils ne sont pas altérés (*Kuntz,* 1981). La matrice est parfois légèrement argileuse, surtout dans la partie inférieure.

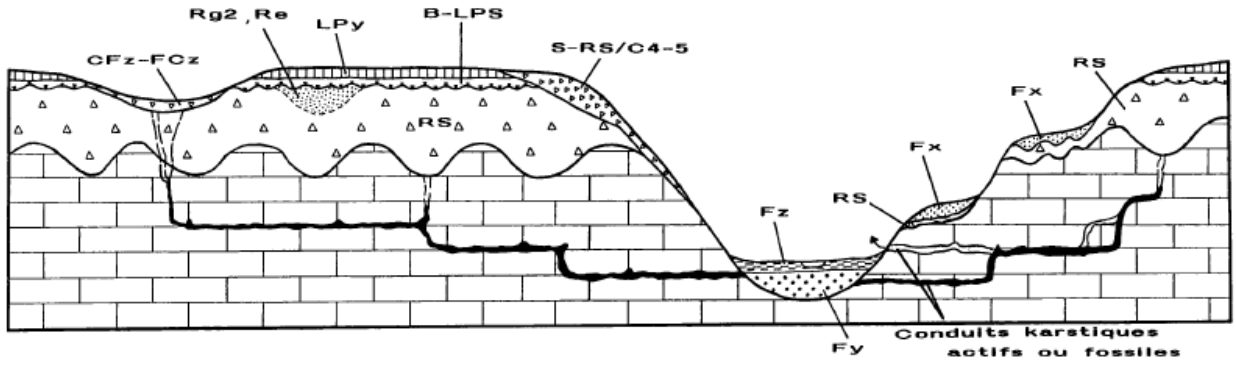
4.2.10. Pliocène – Sables de Lozère (p)

Ce faciès est assez rare dans la zone d'étude. Cependant quelques dépôts relativement continus ont été préservés au nord et au nord-est d'Evreux.

Cette formation forme des placages de quelques mètres ou remplit des dépressions et poches karstiques, parfois sur 20 mètres d'épaisseur. Ce sont des sables hétérométriques, fins à grossiers, à quartz anguleux (faciès *gros sel*) emballés dans une matrice argileuse ferrugineuse kaolinique ou smectitique. Ils sont le plus souvent remaniés en couches discontinues : lentilles de sables plus ou moins grossières, couches argileuses versicolores. Ils peuvent renfermer des fragments granitiques signant leurs origines du Massif Central (*Pomerol et al.,* 1977).

4.3. DESCRIPTION DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Les formations superficielles sont les formations les plus représentées dans la zone d'étude. Elles recouvrent l'ensemble des plateaux crayeux du secteur, les affleurements de craie n'étant localisés qu'au niveau des fortes pentes et des abrupts, situés sur les versants des vallées.



LP_y	:	Loess	$S\text{-}RS/C_{4\text{-}5}$	:	Formation à silex solifluée sur craie sénonienne
F_z	:	Alluvions fines holocènes	B-LPS	:	Limon à silex
F_y	:	Alluvions grossières weichseliennes	RS	:	Formation résiduelle à silex
F_x	:	Alluvions anciennes périglaciaires pléistocènes	R_t ou R_{g2}	:	Sables cénozoïques en poches résiduelles
$CF_z\text{-}FC_z$	:	Colluvions-alluvions des vallées sèches			

Illustration 29 : Répartition schématique des formations superficielles sur substratum crayeux de l'Ouest du Bassin de Paris (Quesnel et al., 1996)

4.3.1. Les formations résiduelles à silex (RS) et les biefs et limons à silex (B-LPS)

Les formations résiduelles à silex ou résidus à silex (RS) recouvrent l'ensemble des plateaux crayeux de la zone d'étude. Elles résultent de l'altération des différents niveaux crayeux du Crétacé supérieur et se sont formées après l'émersion fini-crétacée, au cours du Cénozoïque. Ce sont des formations globalement sub-autochtones, formées sur place aux dépens de substratum crayeux et sans l'intervention d'agents de transport. Ils sont parfois entrecoupés de poches de sables tertiaires. Ces sables tertiaires peuvent contaminer les RS (contamination postérieure aux dépôts des sables tertiaires) (*Laignel,* 1993).

Les RS de plateau sont constitués de silex emballés dans une matrice argileuse, pouvant être sablo-argileuse à proximité des poches de sables ou silto-argileuse au sommet des profils recouverts de limons lœssiques (LP). L'épaisseur varie de quelques mètres à quelques décamètres : la moyenne étant d'environ 15 m.

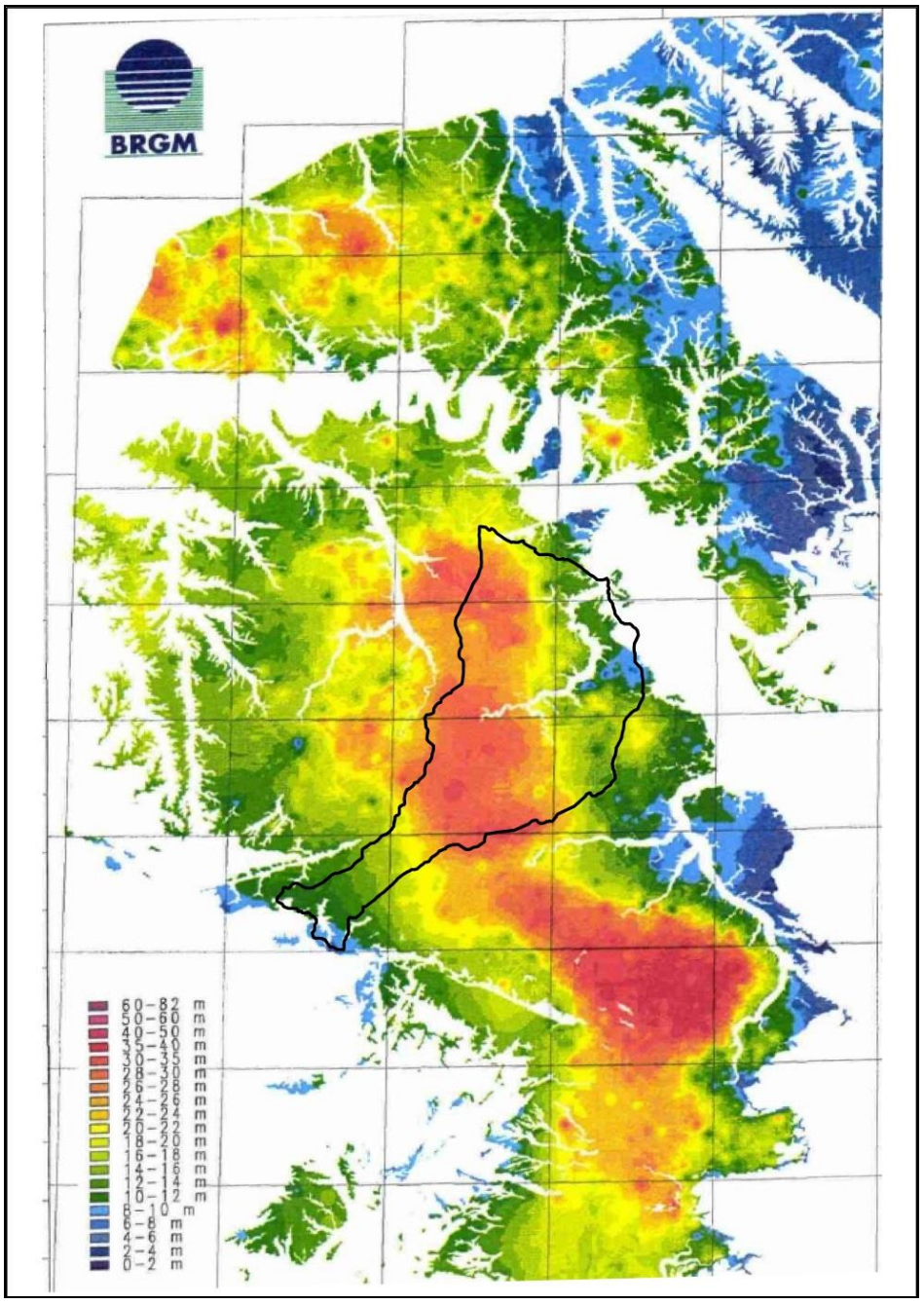


Illustration 30 : Carte des épaisseurs des Formations résiduelles à silex (d'après Quesnel, 1997) et localisation du secteur d'étude

Les travaux de Laignel ont permis d'aboutir à une typologie des RS de plateau ainsi qu'à leur répartition géographique. La zone d'étude présente donc 4 types de RS, énumérés d'amont en aval : le faciès Thymerais, le faciès Drouais, le faciès Lozère et le faciès Terrasse de la Seine et de l'Eure.

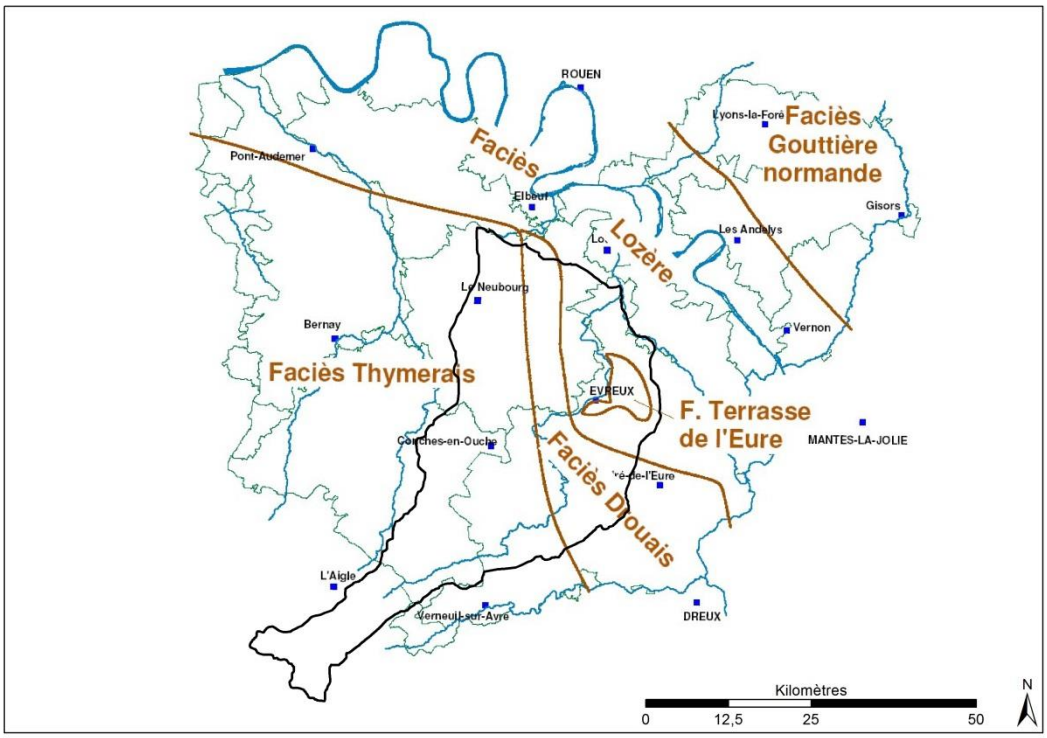


Illustration 31 : Situation de la zone d'étude sur la carte de répartion des différentes familles de RS (d'après Laignel, 1997)

- Le *faciès Thymerais* affecte les craies d'âge Cénomanien à Santonien. Son épaisseur maximale est de 20 mètres dans une bande méridienne allant de Verneuil-sur-Avre au Neubourg. Il est caractérisé par un profil vertical relativement constant régionalement. A la base de cette séquence, on retrouve un faciès à matrice argileuse, majoritairement kaolinique. Sombre, brun à gris-noir ou parfois verdâtre à la base, le faciès s'éclaircit pour devenir marbré à rougeâtre au sommet. La proportion de silex augmente avec la profondeur, en surface elle est de 39-53% pour atteindre 90 % en-dessous de 15 m de profondeur. Ces silex sont majoritairement bruns, ocre et miel ;

- Le *faciès Drouais* s'est développé aux dépends de la craie, dans une zone à couverture de Sable de Fontainebleau (Stampien) quasi-certaine. Il est post-Oligocène inférieur et probablement Plio-Quaternaire. Son épaisseur moyenne est de 5m, mais peut atteindre 10 à 15m dans les remplissages de poches karstiques. La matrice est argileuse, généralement brun-rouge, à smectite et interstratifiée. Il contient en moyenne 50% de silex peu ou pas altérés, gris à noir ;

- Le *faciès Lozère* correspond à des altérites développées aux dépends des craies turoniennes et campaniennes. Il occupe une large bande NW-SE encadrant la vallée de la Seine. Ces argiles se sont développées en liaison avec des phénomènes karstiques à partir du Pliocène supérieur. Sa puissance est généralement voisine des 10m dans le Roumois mais diminue vers l'Est pour atteindre 5 m au nord de Neubourg ;

- Le *faciès Terrasse de la Seine et de l'Eure* est le faciès le plus récent, et n'est préservé que très localement sous les alluvions des hautes terrasses alluviales de la Seine et de

l'Eure. Son épaisseur est généralement faible (0.5 à 5m). La matrice est argilo-silteuse ocre-rouge à brune, la proportion de silex ne dépasse cependant pas les 60%.

Faciès	***Teneur en silex (en %)***	***Epaisseur (en m)***	***Matrice***	***Cortège argileux***	***Dépôts tertiaires associés***
Seine et Eure	44 à 47	5 à 15	brun-rouge	Kaolinite (55 à 65%) > Smectite	Sables Pliocène (Lozère et St Eustache)
Drouais	50	2 à 5	brun rouge à ocre	Smectite (50 à 60%)	Sables Oligocène (Fontainebleau)
Eure	60	10 à 40	brun rouge à beige	Kaolinite (40 à 90%)	Silcrètes et dépôts continentaux
Thymerais	39 à 90	10 à 40	brun rouge à beige	Kaolinite (95 à 100%)	Silcrètes et dépôts continentaux

Tableau 5 : Caractéristiques des différentes familles de RS (d'après Laignel, 1997)

D'un point de vue hydrogéologique, ces formations peuvent être le siège d'une nappe de stagnation temporaire dans les horizons sableux, notamment au sein des poches sableuses tertiaires. Les formations résiduelles à silex ont parfois été remaniées en bordure de plateau : ces formations à silex remaniés, plus riches en silex, sont appelées *Bief à silex.*

Les *biefs à silex* sont des matériaux très hétérogènes présentant une matrice composée d'argile, de limon et de sable, dans des proportions variables. Les biefs à silex présentent des taux de silex > 65 %. Les silex sont fragmentés et emballés dans une matrice argilo-sableuse.

Les *limons à silex* peuvent être regroupés avec les biefs à silex dans la mesure où il s'agit d'une formation remaniée, riche en silex fragmentés, emballée dans une matrice limoneuse. Cette formation est située en bordure de plateau et parfois en pente, sur des superficies qui peuvent être relativement étendues.

4.3.2. Les limons des plateaux (LP)

Le *complexe des limons des plateaux* recouvre une grande partie des plateaux situés dans la zone d'étude, mais devient plus réduit dans le Pays d'Ouche (*Kuntz,* 1981). Il forme de bonnes terres arables, ce qui explique les grandes cultures caractéristiques des plateaux normands, tandis que les forêts occupent principalement les résidus à silex. Ces formations, décarbonatées, nécessitent d'être amandées pour produire.

Il s'agit d'une formation allochtone éolienne, déposée par les vents catabatiques en contexte périglaciaire lors des périodes froides du Quaternaire. Cette formation se caractérise par un faciès limoneux relativement homogène, pouvant devenir plus argileux en certains horizons (lœss-lehms) ou sableux. La teneur en argile varie de 40 % dans les lœss-lehms (limons anciens), à 20-30 % dans les autres horizons. La puissance de cette formation varie du bord des plateaux vers le centre, où elle peut atteindre une dizaine de mètres. Lorsque les limons sont peu épais, ils sont enrichis en silex plus ou moins gélifractés, en partie remontés par les labours.

4.3.3. Les colluvions et les formations de pente (C)

Les colluvions sont constitués de matériaux remaniés par le ruissellement, la solifluxion et accumulés sur les versants ou dans les fonds de vallons durant le Quaternaire. Ces formations très hétérogènes remanient les formations du tertiaire, les limons des plateaux, les limons à silex et les biefs à silex, les formations résiduelles à silex, les faciès crayeux du Crétacé et parfois d'anciennes terrasses alluviales. Ce remaniement induit de très grandes variations de faciès, aussi bien latérales que verticales.

Elles sont bien représentées sur les versants de l'Iton, et dans le fond de vallons secs. Leur épaisseur est très variable : elle peut varier de un à quelques mètres et peut atteindre parfois plus de 10 mètres dans les remplissages de vallons secs (*Kuntz*, 1981).

4.3.4. Le complexe alluvionnaire (Fx-y-z)

Les formations alluvionnaires tapissent le fond des vallées de l'Iton et de ses affluents, où elles abritent parfois des ressources en eau exploitables. Les alluvions peuvent être regroupées en deux entités (dans l'ordre stratigraphique) :

- Les *alluvions sablo-graveleuse (Fx-y)* : il s'agit des alluvions anciennes, essentiellement composées de cailloutis grossiers accompagnés parfois d'une matrice argilo-sableuse.

- *Les alluvions fines (Fz)* : ce sont les alluvions récentes, qui tapissent le fond des vallées actuelles et qui correspondent à l'extension des plus grandes crues (*Sangnier*, 1968). Il s'agit d'alluvions limoneuses, sableuses voire tourbeuses, qui recouvrent les alluvions plus anciennes de fond de vallée, composées d'éléments plus grossiers. Dans la vallée de l'Iton, la puissance de ces alluvions atteint rarement 1 m (*Kuntz*, 1982).

L'épaisseur du complexe alluvionnaire est variable, comme en témoigne la série de 11 sondages effectués en 1971 dans la vallée du sec Iton, en amont d'Evreux (*Artis, Martin et Roux*, 1971), dans lesquels les alluvions ont été rencontrés sur 4 m à Gaudreville-la-Rivière (S10), 12 m à Glisolles (S12) et sur plus de 15 m à Villalet (S3).

Enfin, l'une des particularités de la vallée de l'Iton est la présence au sud de Breteuil-sur-Iton, d'un cône alluvial deltaïque intérieur (complexe alluvionnaire de Francheville – la Guéroulde) (Illustration 32), composé d'alluvions anciennes grossières, dont l'origine est sans doute à rechercher dans un rejeu tectonique quaternaire d'une fracture orientée NO-SE, et dont le soulèvement du bloc oriental aurait entravé l'écoulement des alluvions de l'Iton (*Kuntz*, 1982). Ce complexe se situe entre 5 et 10 m au-dessus de la vallée actuelle.

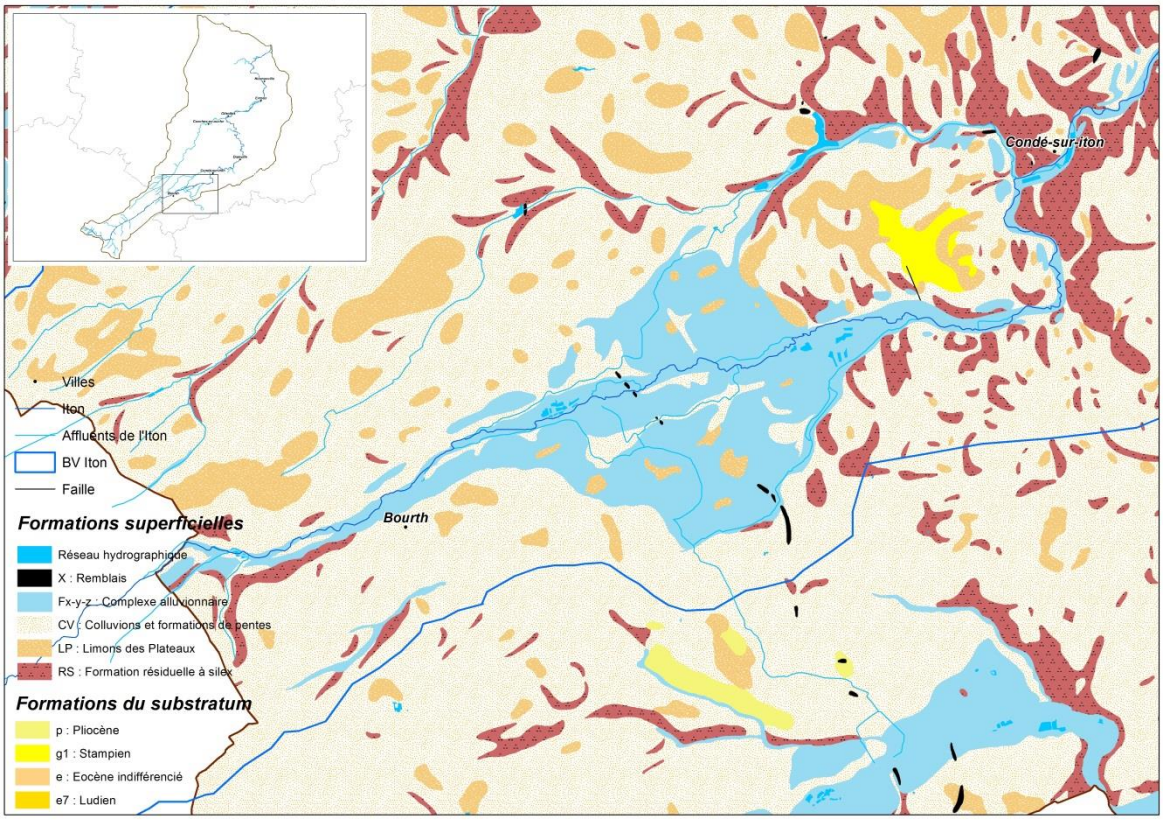


Illustration 32 : Zoom sur le cône alluvial intérieur (les alluvions sont présentées en bleu) de Breteuil-sur-Iton (source : carte géologique harmonisée du département de l'Eure, BRGM)

4.4. SYNTHESE GEODYNAMIQUE

L'histoire géologique de la zone d'étude s'inscrit dans celle du Bassin de Paris, large cuvette sédimentaire reposant sur un socle magmatique et métamorphique Paléozoïque, dont l'histoire commence il y a environ 250 millions d'années, au Trias.

4.4.1. Trias et Jurassique

A cette époque, la chaîne hercynienne, presque totalement pénéplannée, est parcourue par un réseau fluviatile qui transporte les matériaux issus du démantèlement des reliefs, et qui se déposent alors dans un paysage « appalachien » en une succession de couches de grès et d'argiles.

La sédimentation jurassique débute vraisemblablement au Lias moyen (Pliensbachien), par le dépôt d'argiles bariolées, témoins d'une mer épicontinentale peu profonde. Cette sédimentation marine se poursuit tout au long du Jurassique, jusqu'au Tithonien, par une succession de dépôts essentiellement argileux, par quelques niveaux calcaires et par de rares niveaux sableux ou gréseux. Cette séquence est suivie par une émersion généralisée, qui marque la fin des dépôts marins jurassiques, et qui perdurera jusqu'à la fin du Crétacé inférieur.

4.4.2. Crétacé : l'arrivée de la « mer de la Craie »

La région émerge à la fin du Jurassique et sur une grande partie du Crétacé inférieur, au cours duquel les terrains sont soumis à l'érosion continentale. Le climat est chaud, humide et les

reliefs armoricains proches subissent une importante altération pédologique pendant que décalcification et silicification affectent les quelques formations carbonatées jurassiques. La base du Crétacé est encore mal connue dans la région. La reprise de la sédimentation se produit vraisemblablement au cours de l'Albien, période qui marque à nouveau l'ouverture d'une mer épicontinentale, dans laquelle se déposeront les faciès continentaux des Sables Verts (*wealdien*), puis les formations terrigènes plus argileuses de l'*Argile du Gault* et de la *Gaize*, équivalents latéraux de la *Glauconie de Base*. La fin de l'Albien marque le passage vers la transgression du Crétacé supérieur, caractérisée par des dépôts crayeux, mis en place au sein de la « mer de la Craie », mer épicontinentale ouverte sur le jeune océan Atlantique et sur la Thétys.

Au Cénomanien inférieur, la sédimentation s'effectue dans un environnement légèrement plus profond qu'à l'Albien. C'est à cette période que sont enregistrés les premiers dépôts crayeux, encore riches en éléments détritiques, caractérisés par les faciès de *craie glauconieuse*, puis par la C*raie de Rouen*. Dans la zone d'étude, le Cénomanien supérieur est marqué par un épisode détritique remarquable, probablement estuarien, qui met en place le prisme sédimentaire des « Sables du Perche ».

Au Turonien, la sédimentation crayeuse devient plus argileuse, ce qui traduit un approfondissement de la « mer de la Craie », qui pouvait atteindre 100 à 200 m au droit de la zone d'étude.

Au Sénonien (Coniacien – Santonien – Campanien), la mer dépose une craie blanche, dure, riche en silex. Quelques niveaux de bancs dolomitiques et de calcaires indurés traduisent, à la fin du Santonien, des zones de dépôts peu profonds.

Enfin, à la fin du Campanien la « mer de la Craie » se retire, la région émerge, n'enregistrant pas de sédimentation lors du Maastrichtien (Crétacé terminal).

4.4.3. Tertiaire : une succession de transgressions et de régressions

Au Paléocène, la bordure occidentale du bassin de Paris est préservée des grands cycles de transgression/régression épicontinentaux. Le Paléocène est donc une période d'émersion continentale, à l'image du Maastrichtien. Les formations crayeuses, à l'air libre, sont fortement affectées par les processus météoriques : les phénomènes d'altération et de karstification s'amorcent.

Au cours de l'Yprésien, une nouvelle transgression permet la reprise de la sédimentation, au cours de laquelle sont déposés les faciès sableux des Sables de Cuise, conservés à l'Est d'Evreux. La fin de l'Yprésien est marquée par un soulèvement général lié à un évènement tectonique, ce qui provoque l'émersion de la région. Cette émersion va induire une altération des formations crayeuses crétacées et la grésification partielle des faciès cuisiens.

Le Lutétien, étage bien connu dans le Bassin de Paris, est marqué dans la région par plusieurs incursions marines, qui déposent successivement les calcaires fossilifères du Lutétien moyen, puis les calcaires lagunaires ou laguno-lacustres du Lutétien supérieur. S'ensuit une émersion fini-lutétienne, marquée par des silicifications, et impliquant l'érosion des terrains déposés lors du Tertiaire. Cette émersion perdure jusqu'au Stampien (Oligocène inférieur). Une nouvelle intrusion marine va alors se mettre en place déposant des sables fins à grossiers (*Sables de Fontainebleau*) sur l'ensemble de la zone d'étude.

Enfin, au Pliocène se déposent les *Sables de Lozère*, qui consistent en des sables grossiers, à faciès « gros sel », originaires du Massif Central.

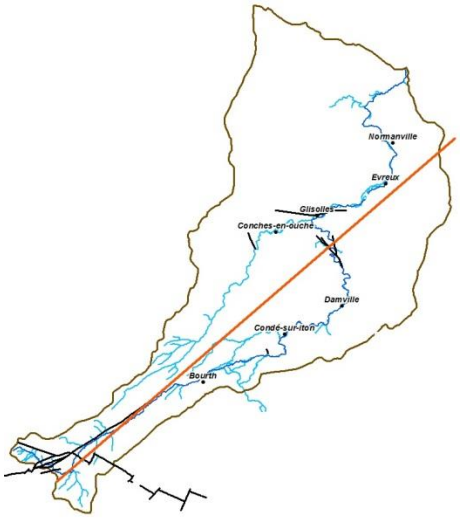
4.4.4. Quaternaire

Au Pléistocène inférieur, en réponse à des rejeux tectoniques, la région se soulève lentement de plus de 100 m. C'est dans ce contexte que débute l'incision de la vallée de l'Iton et le dépôt des premières terrasses fluviatiles. Le rejeu des failles entraine également des surrections localisées, qui entravent le cours naturel de l'Iton, en provoquant parfois un surcreusement. D'autre part, ces surrections favorisent l'abaissement progressif du niveau de base de la nappe aquifère, et par conséquence, la réactivation des conduits karstiques dans la craie (Kuntz, 1982), qui se prolongent alors progressivement dans la couverture sédimentaire tertiaire et quaternaire pour former des bétoires.

Enfin, lors des périodes froides du Quaternaire, les vents dominants d'Ouest et de Sud-Ouest d'origine catabatique, déposent les faciès limoneux des Limons des Plateaux qui forment les meilleures terres arables de la région.

4.5. SYNTHESE STRUCTURALE ET TECTONIQUE

A l'échelle du Bassin de Paris, l'organisation structurale consiste en un monoclinal à faible pendage (4 ‰), orienté vers le Nord-Est (centre du Bassin de Paris). Au sein de la série crayeuse, il y a donc un passage progressif des formations plus anciennes (cénomaniennes) aux formations plus récentes (campaniennes) du Sud-Ouest au Nord-Est, bien illustré sur l'écorché géologique présenté sur l'Illustration 26 et sur la coupe présentée aux Illustration 33 et Illustration 34. Cette organisation structurale à pendage vers l'Est s'accompagne d'une augmentation des épaisseurs des formations, également vers l'Est, qui s'explique par une subsidence plus importante dans le centre du Bassin de Paris que sur ses bordures.



Formation	Description	Formations géologiques incluses
ALLU	Alluvions	Alluvions
ARGS	Argiles à silex	Formations résiduelles à silex
SENO	Sénonien	Craies du Sénonien et du Turonien moyen et supérieur
CENS	Cénomanien supérieur	Craies du Turonien inférieur et du Cénomanien moyen et supérieur
PERC	Sables du Perche	Sables du Perche
CENI	Cénomanien inférieur	Craies sableuses et marneuses du Cénomanien inférieur
CENB	Cénomanien basal	Glauconie de base
GAUL	Gault	Argiles du Gault et sables de l'Albien / Aptien
BASE	BASE	Formations anté-crétacé

Illustration 33 : Localisation et légende de la coupe géologique SO-NE, présentée à l'Illustration 34, issue du modèle géologique de l'Avre (David et al., 2015)

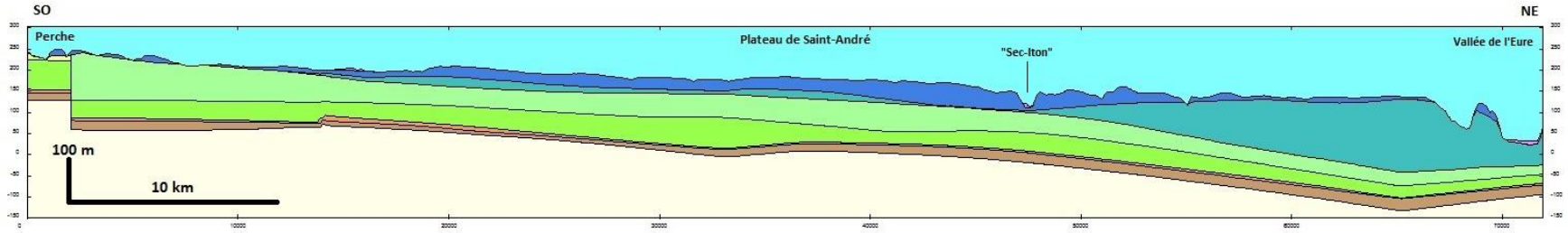


Illustration 34 : Coupe SO-NE dans le bassin versant de l'Iton montrant un pendage vers le NE (coupe issue du modèle géologique de l'Avre, David et al., 2015)

D'autre part, ce monoclinal régional est marqué par une succession de structures tectoniques plicatives (synclinaux, anticlinaux, flexures) ou cassantes (failles) d'orientation essentiellement *armoricaine* (ONO-ESE à NNO-SSE). Notons que le recouvrement tertiaire et quaternaire masque vraisemblablement un grand nombre d'accidents mineurs. Certains d'entre eux peuvent être parfois indirectement supposés à partir d'anomalies topographiques, lithologiques ou hydrologiques. Cette répartition des structures tectoniques a probablement eu un rôle majeur sur la géométrie actuelle du cours de l'Iton, en forme de baïonnette, tantôt orientée NE-SO, tantôt NO-SE.

Enfin, l'analyse et la corrélation des sondages disponibles dans la Banque du Sous-Sol (BSS) a permis, dans certains secteurs, d'émettre des hypothèses concernant la présence éventuelle de structures cassantes jusqu'ici parfois non encore identifiées, à l'origine d'anomalies dans les altitudes des toits des différentes formations. Ce point sera traité dans le paragraphe 4.6.

4.5.1. Les structures plicatives : axes anticlinaux, synclinaux, flexures et bombements

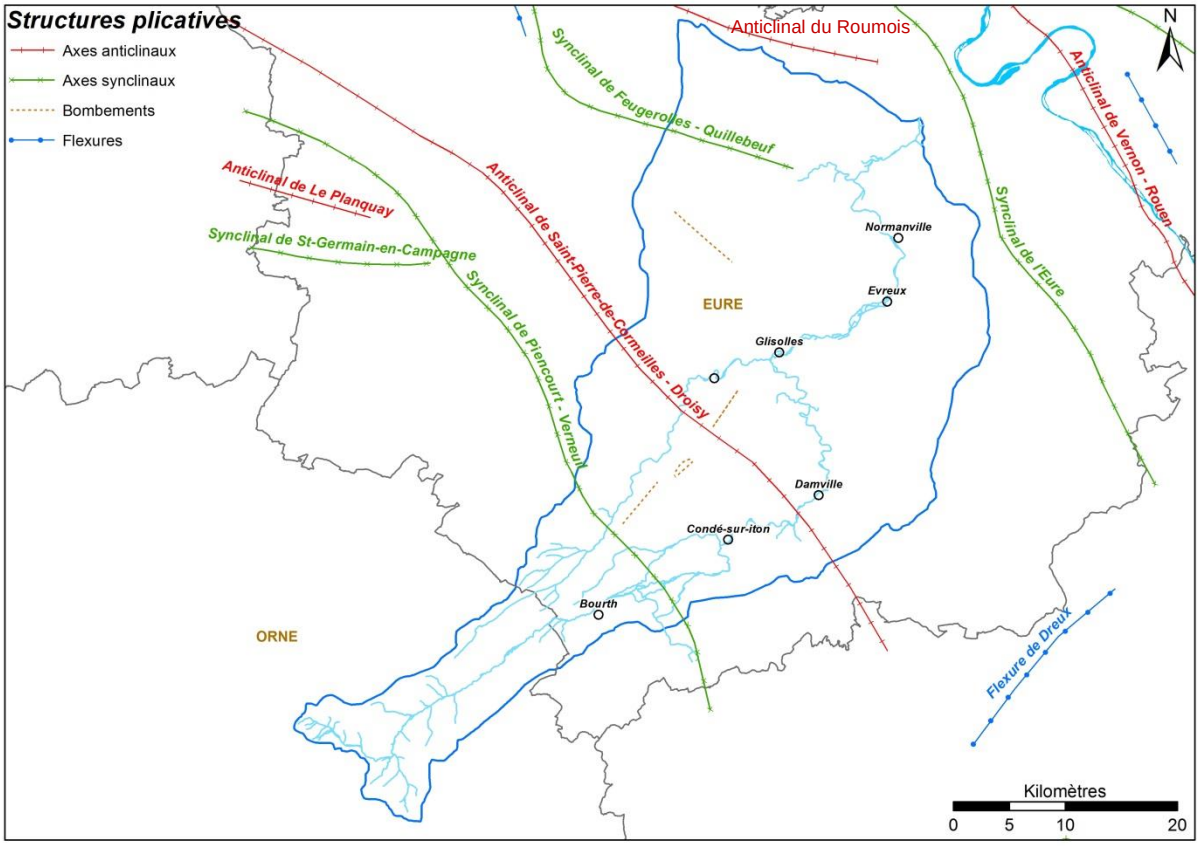


Illustration 35 : Cartographie des structures tectoniques plicatives qui affectent le secteur d'étude (complitation de sources diverses, voir texte)

Le bassin versant de l'Iton est affecté (ou en partie affecté) par les structures plicatives suivantes, décrites du sud au nord (Illustration 35 et carte des localités évoquées en annexe 3) :

L'axe synclinal de Piencourt – Verneuil

D'orientation NNO-SSE (*armoricaine*), ce synclinal se caractérise par deux cuvettes de profondeurs inégales : celle de Verneuil-sur-Avre, au niveau de laquelle la profondeur du mur de la craie descend en-dessous de la côte -40 m NGF, et la cuvette de Bernay, moins marquée, au niveau de laquelle le mur de la craie se site à la côte + 40 m NGF. Au nord de Bernay, l'axe s'incurve vers le NO, et une nouvelle cuvette s'amorce au droit de Piencourt (ANTEA, 2005).

L'axe anticlinal de Saint-Pierre-de-Cormeille – Droisy

D'orientation NO-SE à ONO-ESE, cet anticlinal est jalonné de deux dômes : au sud-est, le dôme de Les Essarts, au niveau duquel la base de la craie se situe à la côte + 90 m NGF et au nord-ouest, le dôme de Saint-Pierre-de-Cormeilles, où le mur de la craie culmine à la côte + 80 m NGF (ANTEA, 2005) ;

L'axe synclinal de Feugerolles – Quillebeuf

Seule la partie orientale de cette structure tectonique affecte la zone d'étude. Il s'agit d'une cuvette, orientée NNO-SSE puis ONO-ESE vers Feugerolles, qui fait descendre le mur de la craie jusqu'à la côte – 50 m NGF.

L'axe synclinal de l'Eure

Cet axe synclinal borde la limite nord-est de la zone d'étude. Il s'agit d'un synclinal relativement pincé et légèrement sinueux, dont l'axe est globalement orienté NNO-SSE (orientation *armoricaine*). Au sud d'Autheuil-Anthouillet, l'Eure coule exactement à son aplomb, sur plus de 25 km, jusqu'à Garennes-sur-Eure (ANTEA, 2005).

L'axe anticlinal du Roumois

Cet axe anticlinal, globalement orienté NNO-SSE à ONO-ESE, borde la limite nord de la zone d'étude. A l'aplomb de ce dôme anticlinal, le mur de la craie est situé à la côte + 170 m NGF.

4.5.2. Les structures cassantes (failles)

Hormis pour le secteur sud de la zone d'étude (nord du département de l'Orne), peu de failles ont été reconnues à l'affleurement et représentées pas les géologues sur les cartes géologiques au 1/50.000. Néanmoins, la prise en compte de certains traits morphologiques ou d'alignements de vides d'origine karstique par exemple, ont conduit les auteurs de certaines cartes à supposer l'existence de failles mineures masquées sous les formations superficielles (*Arbonnier et al.*, 2004) (Illustration 36 et Tableau 6).

Le modèle géologique réalisé pour le bassin de l'Avre (*David et al.,* 2015), situé au sud-est de la zone d'étude, permet d'avoir un aperçu des rejets et des contacts géologiques induits par les principales failles du bassin versant de l'Iton, notamment celle de Courtomer-Moulins-la-Marche (coupes n°1 et 2 Illustration 37) et de Senonches (coupe n°3 Illustration 37)). La légende des coupes est identique à celle présentée en Illustration 33. Pour la faille d'Aulnay / Iton (4), non comprise dans le modèle géologique de l'Avre (cf. annexe 12), la corrélation des logs géologiques de la BSS permet d'avoir un aperçu du contact anomalique Cénomanien / Sénonien.

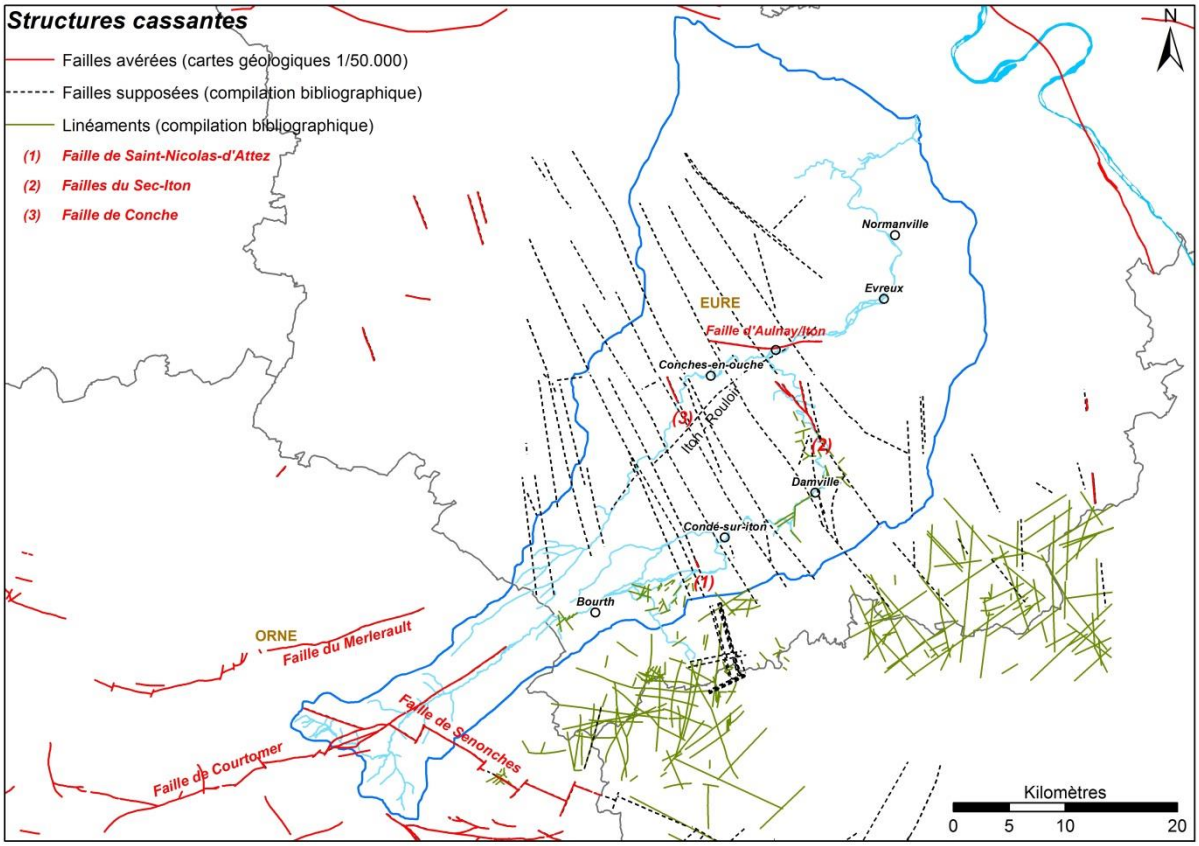


Illustration 36 : Cartographie des structures cassantes recensées

Nom	Jeu	Orientation	Pendage	Rejet	Terrains concernés	Commentaires
Faille de Courtomer – Moulins-la-Marche	Inverse	N050 à N080	70°N	40 à 130 m	c_2	Faille mise en évidence par un décalage des assises du Turonien inférieur
Faille de Senonches	?	N110-N115	?	?	$c_3 – c_4 – c_5$	Nature précise de cet accident inconnu. Limite l'extension des Sables du Perche
Faille d'Aulnay-sur-Iton	Normal probable	N090	?	50 à 80 m	$c_1 – c_2 – c_3$ (c_4 ?)	Met en contact les formations cénomaniennes avec les formations sénoniennes
Faille de Saint-Nicolas-d'Attez	Normal probable	N160	?	5 à 10 m ?	$c_2 – c_3 – g_1$	Faille probable, signalée sur la carte géologique n°179 par affaissement de Sables du Stampien à l'Est et anomalies dans des logs de sondages
Failles du Sec-Iton et faille de Conches	?	N140 à N170	?	?	FS	Failles probables signalées sur la carte géologique n°179 par des indices nombreux et rapprochés dans les formations superficielles (FS)

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des informations concernant les principales structures cassantes connues sur le secteur d'étude

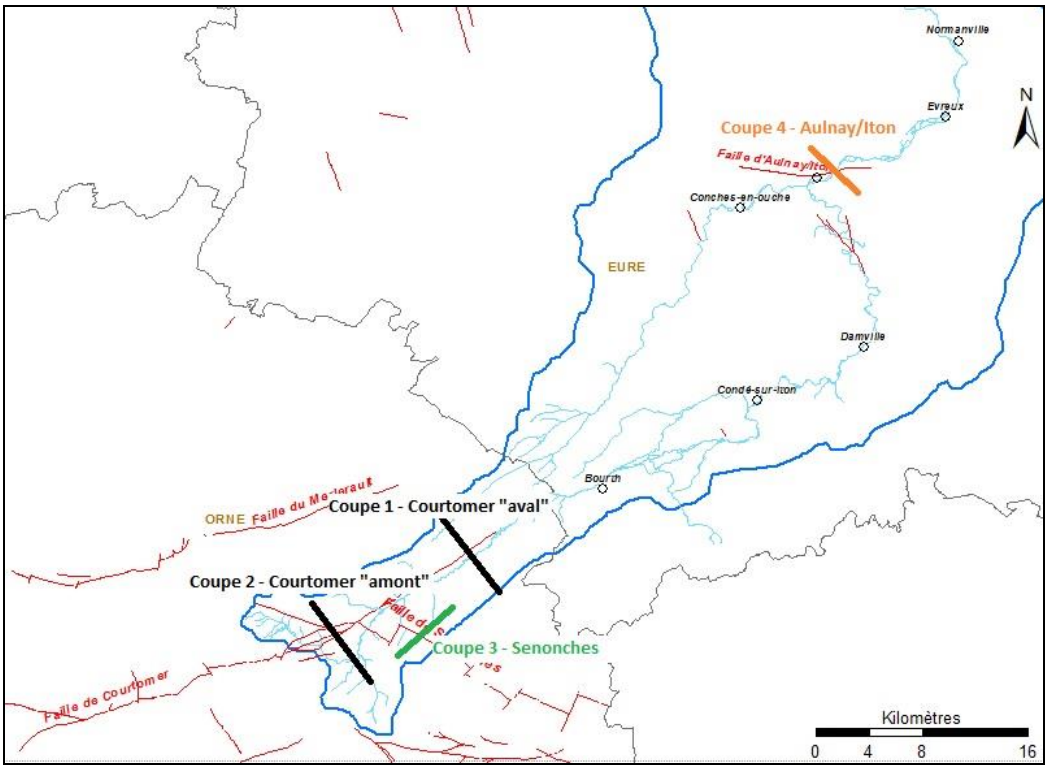
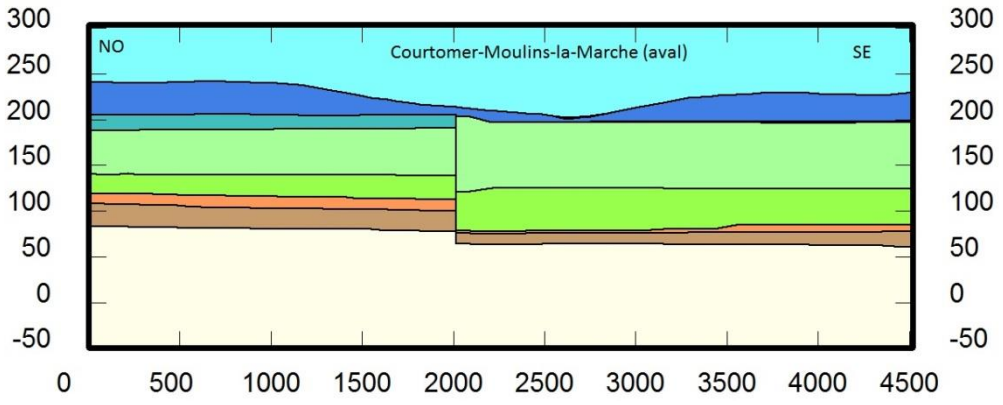


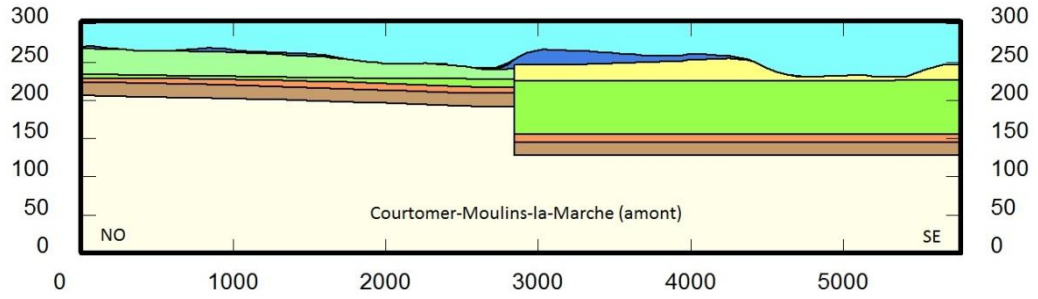
Illustration 37 : Localisation des coupes géologiques mettant en évidence le rejet et les contacts des principales failles de la zone d'étude

La faille de Courtomer – Moulins-la-Marche

Cette faille, orientée de N050 à N080, a été mise en évidence au cours du levé de la carte géologique de L'Aigle (n°214, *Ménillet et al.,* 1998). Il s'agit d'une faille inverse, à pendage nord de 70° environ et présentant un rejet variant de 40 m à 130 m vers Courtomer (Orne). Cette faille se prolonge vers le nord-est en rive gauche de l'Iton, où, au nord de Bonnefoi, elle est attestée par un décalage des assises du Turonien inférieur (*Ménillet et al.,* 1998).



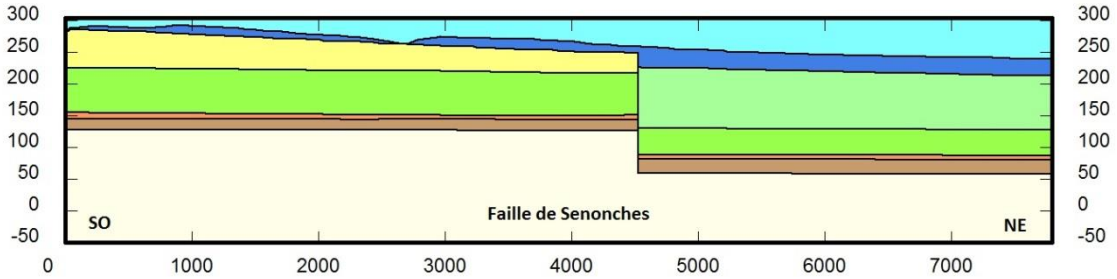
Coupe n°1 (localisation du trait de coupe à l'Illustration 37 et légende présentée en Illustration 33)



Coupe n°2 (localisation du trait de coupe à l'Illustration 37 et légende présentée en Illustration 33)

La faille de Senonches

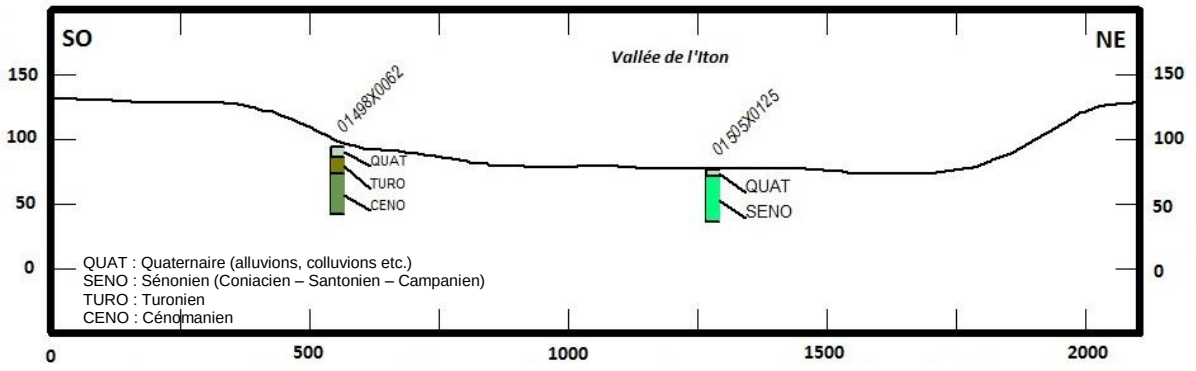
Cette faille, de structure inconnue (faille simple, en faisceau, faille flexure ou flexure ?) présente une direction moyenne N110°E, vraisemblablement décalée par une faille en N20°E dans le bois du Châtelet pour rejoindre Randonnai où elle semble limiter, vers le Nord-Est, l'extension des Sables du Perche. Cet accident a formé la limite septentrionale de l'éperon du Perche au Jurassique et au Crétacé mais son jeu principal est postérieur au Turonien puisqu'il affecte les terrains sénoniens (*Ménillet et al.,* 1998).



Coupe n°3 (localisation du trait de coupe à l'Illustration 37 et légende présentée en Illustration 33)

La faille d'Aulnay-sur-Iton (aussi nommée faille de la Bonneville-sur-Iton)

Il s'agit d'une faille orientée Est-Ouest, presque exclusivement masquée par les formations superficielles. Elle met en contact les formations du Cénomanien avec les formations de la base du Sénonien (Coniacien-Santonien), situées au nord de la faille. Cette faille présenterait donc un rejet de l'ordre de 50 m à 70-80 m (*Kuntz,* 1981, *Artis et al.,* 1971), soit l'équivalent de l'épaisseur du Turonien. Des anomalies dans les altitudes des craies supposent une continuité de cette structure vers l'ouest et l'est, qui pourrait expliquer, dans le prolongement Est de cette faille, la présence d'une vallée orientée Est-Ouest (cf. chapitre 4.6.1). Vers l'Ouest, le prolongement de cette faille pourrait expliquer le coude brusque de la Risle au sud-est de Noyer-en-Ouche (§ 4.6.1).



Coupe n°4 (localisation du trait de coupe à l'Illustration 37 et légende présentée en Illustration 33)

La faille de Merlerault

Faille se situant en bordure Ouest du bassin versant de l'Iton. De direction N60 à N70°E, passant à une orientation N110°E via un jeu de failles N20°E, elle présente un rejet estimé entre 50 et 100 m (*Ménillet et al.,* 1998) (Illustration 36, Illustration 37 et Tableau 6).

La faille de Saint-Nicolas-d'Attez (1)

Petite faille probable d'orientation N160, identifiée sur la carte géologique de Breteuil-sur-Iton par la présence de Sables du Stampien. Ces sables sont affaissés de 5 à 10 m à l'Est de cet accident supposé. Cet affaissement pourrait être indépendant du sens du rejet dans les terrains crétacés (piégeage possible des sables dans une vaste dépression karstique localisée contre la faille) (*Kuntz,* 1982) (Illustration 36, Illustration 37 et Tableau 6).

Les failles du Sec-Iton (2) et la faille de Conches (3)

Ce sont des failles probables signalées sur la carte géologique de Breteuil-sur-Iton par des indices nombreux et rapprochés dans les formations superficielles, et ce malgré l'absence de données dans le substratum crayeux. Leurs orientations varient de N140 à N170 pour le réseau de failles du Sec-Iton et de N150 à N160 pour la faille située à l'ouest de Conches (*Kuntz*, 1982). La faille du sec Iton se prolongerait vers la vallée du Ruet dans le bassin de l'Avre (Illustration 36, Illustration 37, Tableau 6 et Annexe 3).

Faille supposée Iton – Rouloir

Faille hypothétique d'orientation NE-SO tracée par G. Kuntz en 1982 sur la carte géologique 1/50.000 de Beaumont-le-Roger (archives BRGM). Cette faille limiterait vers le nord-ouest un axe anticlinal supposé situé dans la forêt d'Evreux, au sud d'Aulnay-sur-Iton (axe assez court orienté ENE-OSO qui traverserait le vallon des Abrevos) et se prolongerait sur la carte de Breteuil-sur-Iton, au sud de Conches puis au-delà en direction de la haute vallée du Lême. En abordant la vallée de l'Eure près de Glisolles, le tracé de cet accident passerait par un point de résurgence de l'Iton : la Fosse aux Dames (*Kuntz,* 1982) (Illustration 36, Illustration 37, Tableau 6 et Annexe 3).

Les autres failles supposées et les linéaments

Les failles supposées sont serrées et essentiellement orientées NNO-SSE ou NO-SE (orientation *armoricaine*), parfois SO-NE ou E-O. Elles ont été tracées par certains auteurs des

cartes géologiques d'après des traits morphologiques, des alignements de vides karstiques (bétoires), du levé des formations superficielles ou grâce à des alignements de sables stampiens piégés en karst (*Kuntz*, 1981). La précision de leur tracé est donc approximative.

Les linéaments correspondent à des anomalies supposées à partir de différentes méthodes (analyse de photographies aériennes par stéréoscopie, analyse du MNT et de la végétation, analyses morphologique, analyses géologiques, analyses hydrologiques) utilisées au cours d'études effectuées dans le secteur (recherches en eau, périmètres de protection, études hydrogéologiques, études géophysiques ou études structurales). Globalement, ces linéaments sont peu documentés.

4.5.3. Le « paléo-Iton »

D'après *Dewolf et al.,* (1976), la présence de cailloutis de très haut niveau sur les plateaux bordant les vallées de l'Eure et de l'Iton, à l'Est d'Evreux, posent le problème du paléocours de ces deux rivières. Dans cette région, le cours de la Seine et de ses affluents semble avoir été influencé par le rejeu plio-quaternaire d'anciens accidents du substrat. L'une des hypothèses avancée par les auteurs serait que le paléocours de l'Iton rejoignait la paléo-Eure en passant par le Buisson Garamboug et par le Val David. Le déversement de l'Iton vers le nord serait lié au rejeu d'un accident varisque.

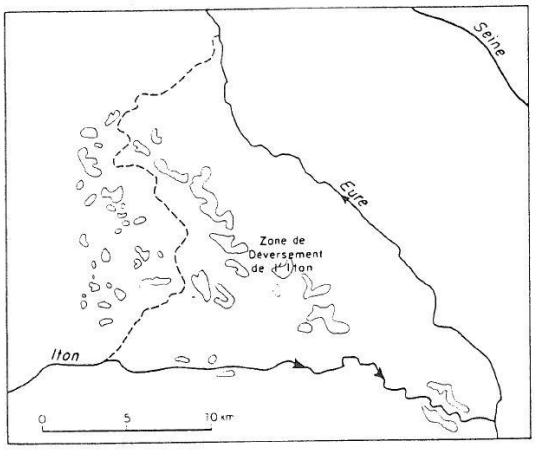


Illustration 38 : Tracé du paléo-Iton, par le Buisson Garambourg et le Val David (d'après Dewolf et al., 1976) (localisation du Val David en Annexe 3)

Notons que le tracé du paléo-Iton proposé par les auteurs coïncide avec le tracé du prolongement Est de la faille d'Aulnay-sur-Iton (Illustration 37 et Illustration 39, § 4.6.1), mis en évidence par la corrélation de sondages géologiques.

4.5.4. Rôle hydrogéologique des failles

Le rôle hydrogéologique des failles (drainant ou étanche) n'est pas abordé dans la bibliographie consultée.

4.6. EXPLOITATION ET CORRELATIONS DES DONNEES GEOLOGIQUES A L'ECHELLE DE LA ZONE D'ETUDE

Les données issues de la Banque du Sous-Sol (BSS), notamment les sondages disposant d'un log géologique validé, ont été corrélées et interprétées à l'aide du logiciel GDM®, développé par le BRGM.

L'objectif de ces corrélations est multiple :

- Identifier de nouvelles anomalies géologiques (par comparaison des logs géologiques), qui pourraient s'expliquer par la présence de structures tectoniques plicatives (anticlinal, synclinal) ou cassantes (failles) ;

- Localiser des anomalies géologiques qui pourraient expliquer la présence d'anomalies hydrogéologiques observées sur les cartes piézométriques ;

- Affiner la connaissance vis-à-vis des géométries des formations géologiques potentiellement aquifères ;

Ces corrélations se basent sur les sondages géologiques disponibles dans la Banque du Sous-Sol et disposant d'une coupe géologique validée. L'ensemble de ces forages a fait l'objet d'un codage sommaire sous GDM, basé sur la stratigraphie des formations.

Il est important de souligner que la précision des informations issues des corrélations dépend fortement de la qualité et de la quantité de données disponibles, et en particulier la densité des forages géologiques recoupant le substratum.

4.6.1. Les structures tectoniques hypothétiques mises en évidence par les corrélations géologiques

Prolongement(s) de la faille d'Aulnay-sur-Iton (aussi nommée faille de la Bonneville/Iton)

Dans les prolongements Est et Ouest de la faille d'Aulnay-sur-Iton, la corrélation des logs de forages a permis de mettre en évidence des anomalies dans l'altitude du toit des craies turoniennes, sous forme de légers synclinaux. Vers l'Est (coupe A-B, Illustration 39 à Illustration 41), ce synclinal pourrait éventuellement expliquer la présence d'une vallée orientée Est-Ouest (le Val David) et vers l'ouest (coupe C-D, Illustration 39 à Illustration 41), son prolongement pourrait expliquer le coude de la Risle à Châtel la Lune.

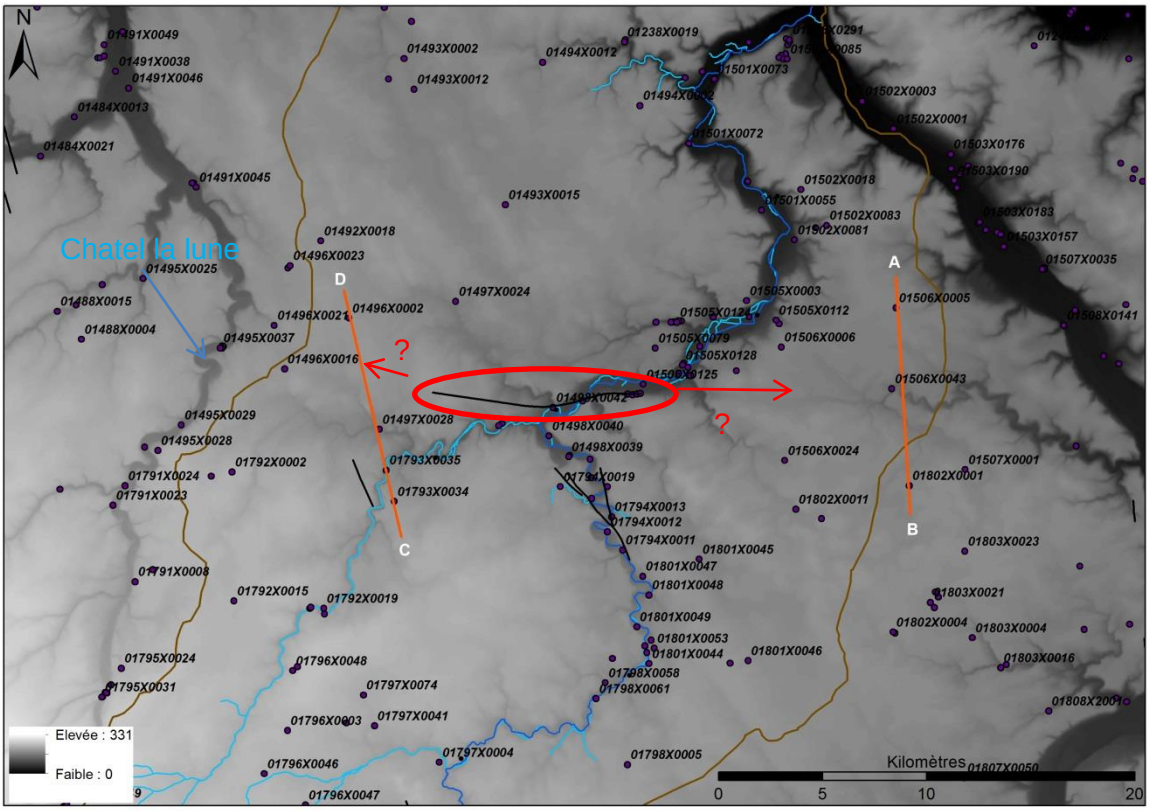


Illustration 39 : Localisation topographique de la coupe A-B, dans le prolongement Est de la faille d'Aulnay/Iton et de la coupe C-D, dans le prolongement Ouest

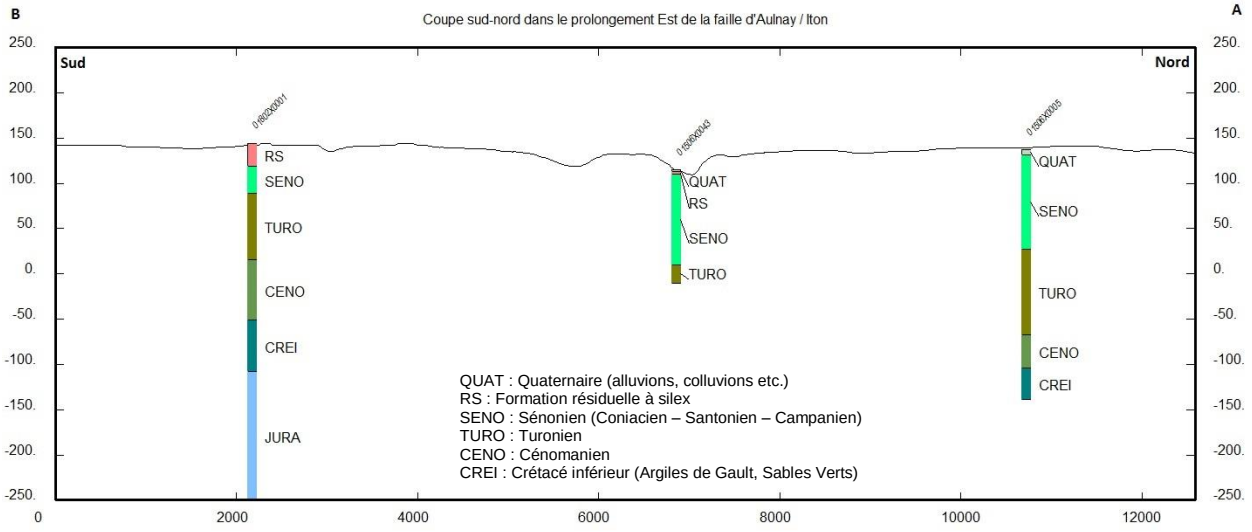


Illustration 40 : Corrélation des logs géologiques de la coupe A-B qui met en évidence une structure plicative de type synclinal dans le prolongement Est de la faille d'Aulnay-sur-Iton

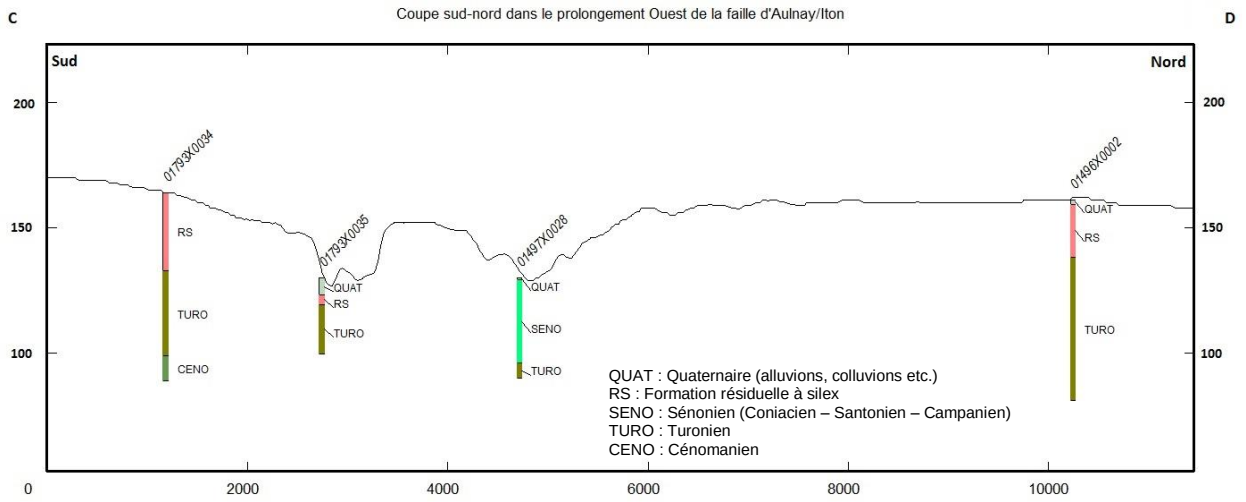


Illustration 41 : Corrélation des logs géologiques de la coupe C-D qui met en évidence une anomalie dans le prolongement Ouest de la faille d'Aulnay-sur-Iton

Faille supposée Iton-Rouloir

Cette faille hypothétique, supposée par Kuntz sur la carte géologique de Beaumont-le-Roger, présenterait une orientation globalement NE-SO, entre la vallée du Lême et la confluence Rouloir-Iton (cf. Annexe 3). Peu de données BSS sont disponibles dans ce secteur, hormis à proximité de la confluence entre le Rouloir et l'Iton, où les sondages 01497X0031 (vallée du Rouloir) et 01498X0040 (vallée de l'Iton), espacés de 2300 m, mettent en évidence un décalage important dans les assises crayeuses (cf. coupe présentée aux Illustration 42 et Illustration 43). En effet, les alluvions du Rouloir reposent sur des craies *a priori* coniaciennes, tandis que celles de l'Iton reposent sur des craies cénomaniennes. Ces deux sondages étant situés globalement à la même altitude, le rejet semble correspondre a minima à l'épaisseur du Turonien.

Le décalage dans les formations crayeuses entre ces deux ouvrages met en évidence la présence d'un accident de type faille, orienté NE-SO et qui pourrait correspondre au prolongement de la faille Rouloir – Iton. Toutefois, l'absence d'autres ouvrages BSS permettant des corrélations, notamment en amont, ne permettent pas à ce stade de valider l'orientation de l'accident. Seules de nouvelles investigations géologiques ou géophysiques permettrait de valider la présence de cette faille.

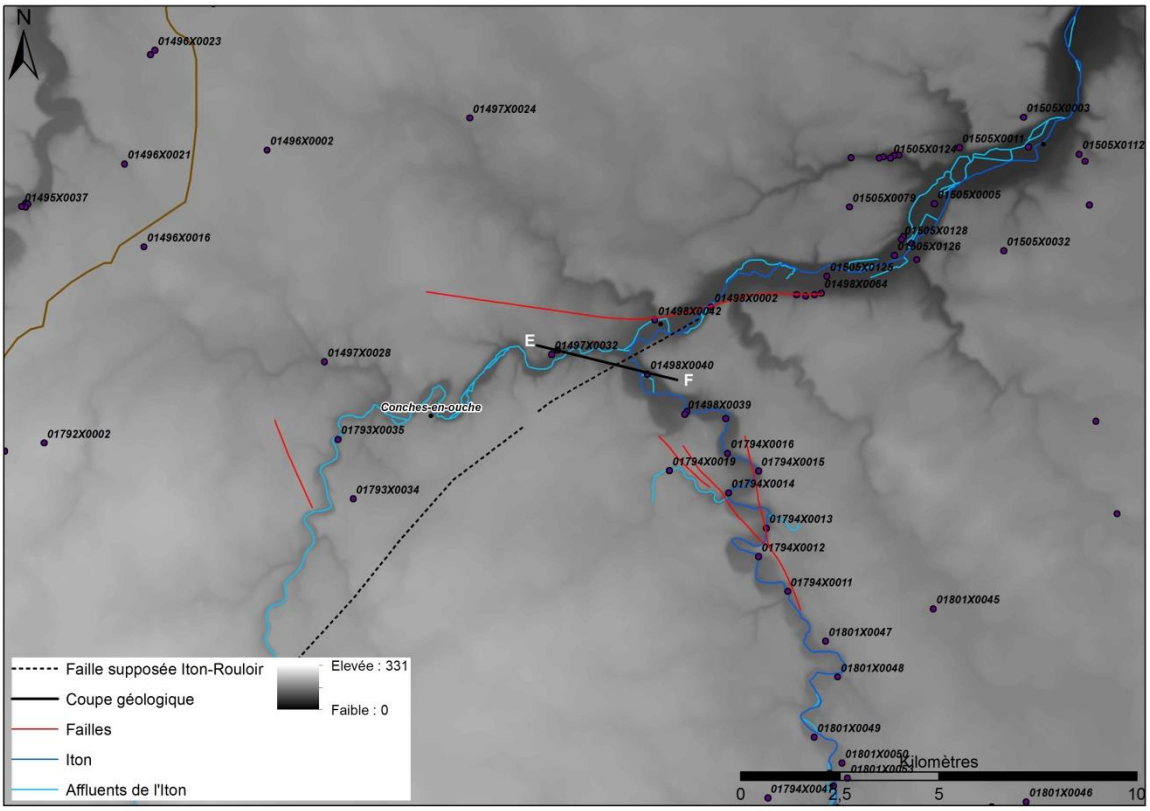


Illustration 42 : Localisation topographique de la coupe A-B, au niveau de la faille supposée Iton-Rouloir

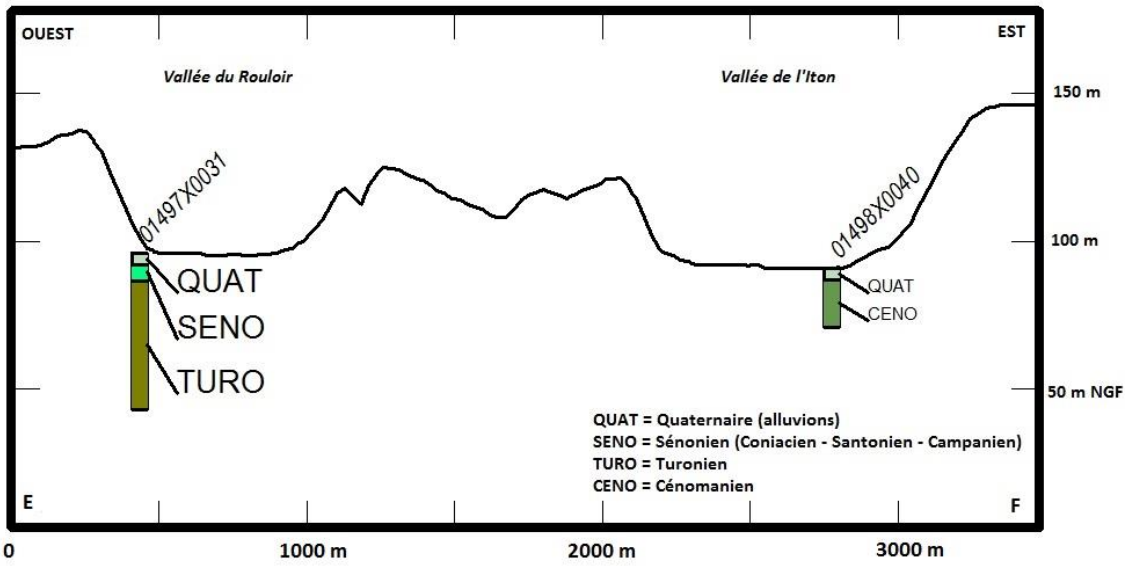


Illustration 43 : Corrélation des logs géologiques de la coupe E-F qui met en évidence un important décalage des assises crayeuses à proximité de la faille supposée Iton-Rouloir

4.6.2. Anomalie piézométrique de Damville

Au sud-Est de Damville, en bordure Est du bassin versant de l'Iton (en limite avec le bassin versant de l'Avre), la carte piézométrique du département de l'Eure (moyennes eaux) met en évidence un dôme piézométrique bien marqué, où l'altitude de la nappe atteint 140 m NGF. Vers le nord-est, la côte piézométrique diminue rapidement pour atteindre 70 m NGF au niveau

de Saint-André-de-l'Eure, soit une diminution de l'altitude du toit de la nappe de 70 m sur une dizaine de kilomètres. L'origine de cette anomalie piézométrique marquée n'est à l'heure actuelle pas connue avec certitude : le modèle géologique de l'Avre, qui comprend ce secteur, ne présente pas d'anomalies géologiques de type variation de faciès qui pourraient engendrer cette anomalie piézométrique (Illustration 45). Dans le cadre de la présente étude, les logs BSS existants ont été étudiés mais aucune corrélation de sondages BSS n'a mis en évidence de décalages notables (notons que la densité et la qualité des données BSS dans le secteur ne permet pas de corrélation précise). Ce secteur est cependant concerné par la présence d'une faille supposée, signalée par Kuntz dans la notice de la carte géologique de Saint-André-de-l'Eure (Illustration 46). D'après Kuntz, cette faille fait partie des failles hypothétiques tracées d'après des alignements particuliers de gisements sableux piégés dans des dépressions karstiques de la craie. La présence de cette faille ne pourra être vérifiée que par l'intermédiaire de nouvelles investigations géologiques (forages avec échantillonnage serré dans le Crétacé) ou géophysiques (sismique ou électrique).

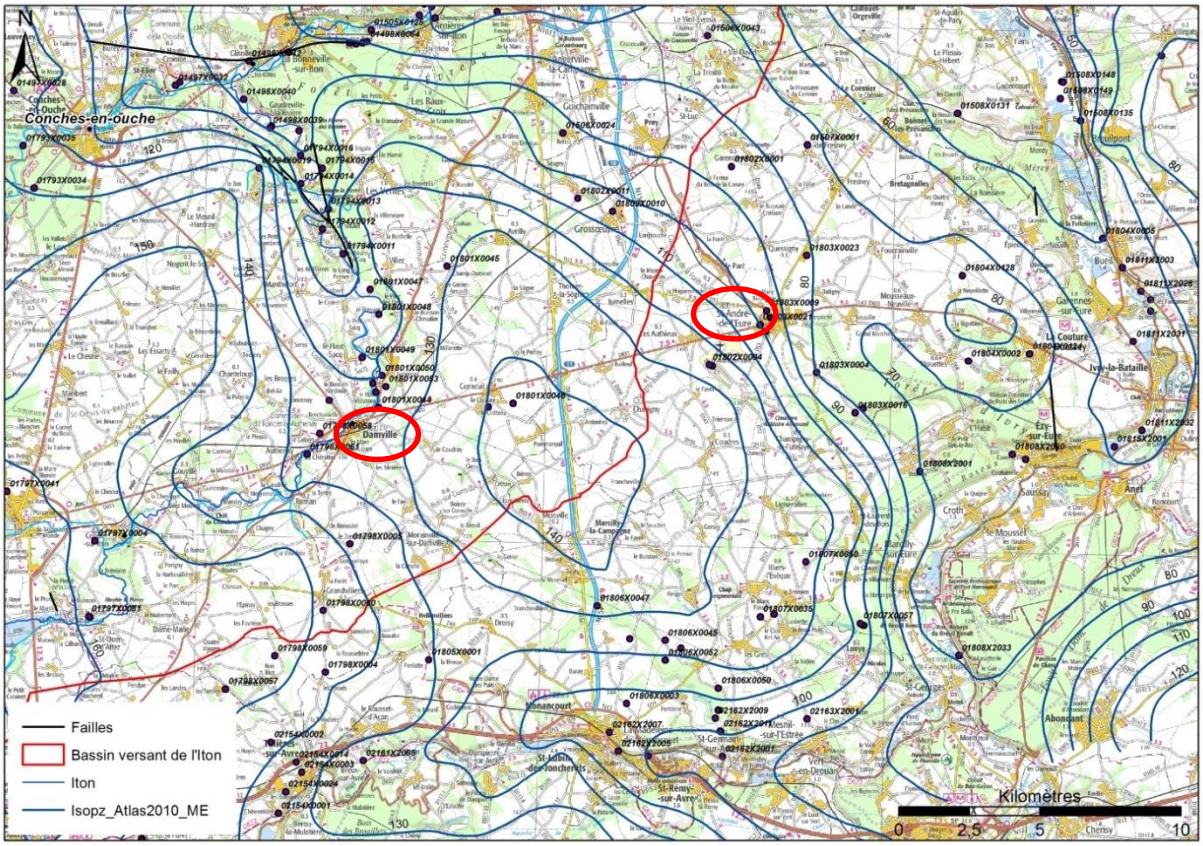


Illustration 44 : Plan de localisation du dôme piézométrique au sud-est de Damville et l'anomalie piézométrique de Saint-André-de-l'Eure (chute rapide du niveau piézométrique à l'Est de ce dôme)

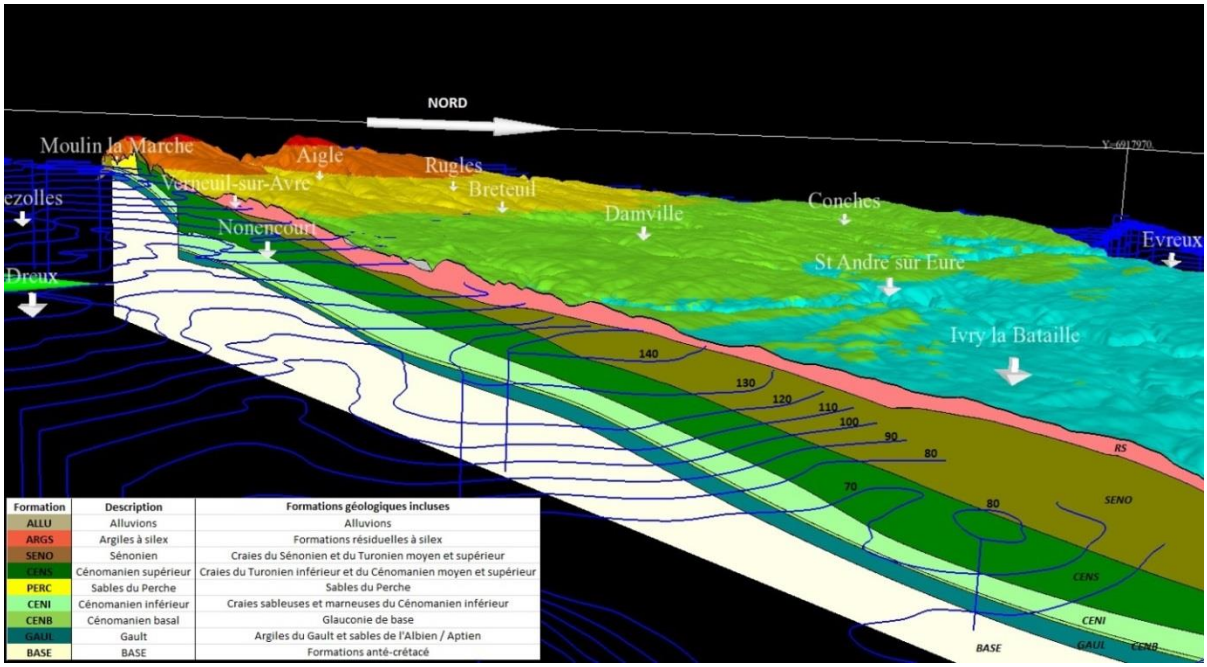


Illustration 45 : Corrélation entre la piézomètrie (moyennes eaux, carte piézomètrique du département de l'Eure, 2010) et le modèle géologique de l'Avre au niveau du dôme piézométrique de Damville et de l'anomalie piézométrique de Saint-André-de-l'Eure

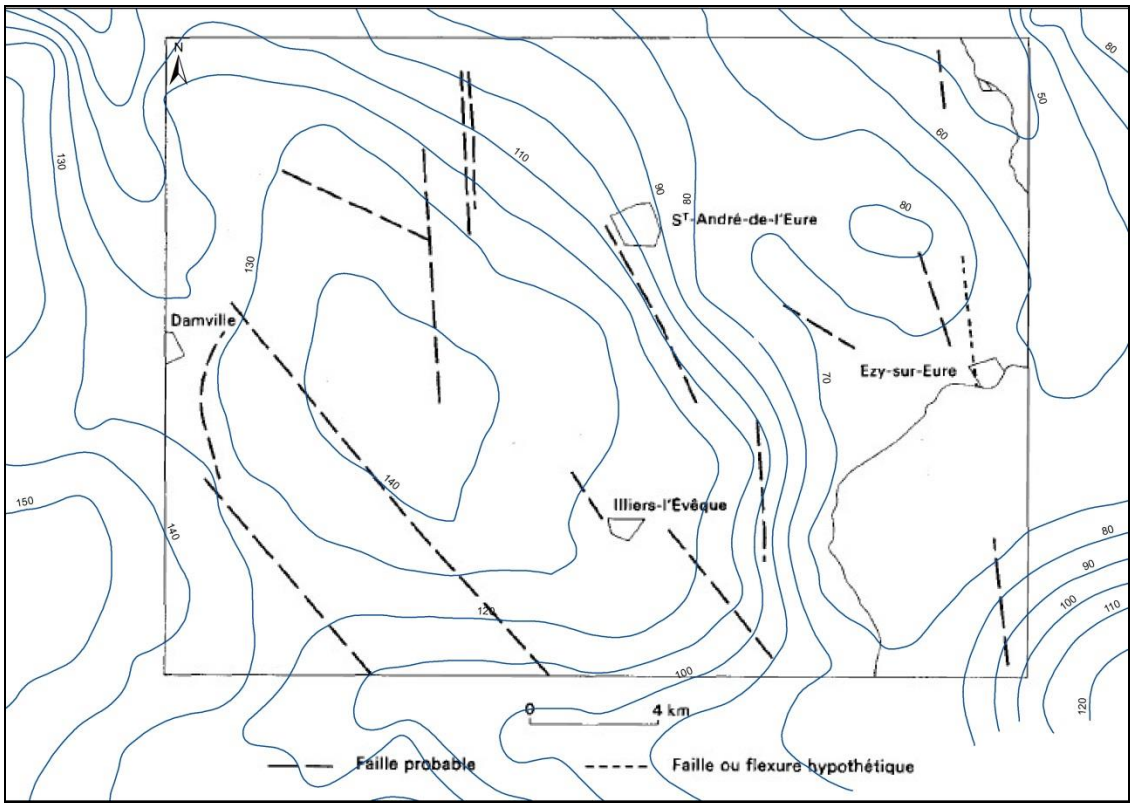


Illustration 46 : Localisation de l'anomalie piézométrique sur la carte des accidents tectoniques supposés par Kuntz dans la notice de la carte géologique de Saint-André-de-l'Eure

5. Fracturation et susceptibilité des formations crayeuses à la karstification

L'état de fracturation des formations crayeuses du Crétacé supérieur varie selon leur faciès et selon leur position géomorphologique (plateau, versant ou fond de vallée). Cette fracturation joue un rôle très important dans les processus d'écoulements souterrains, et c'est pourquoi seront traités, pour chaque formation crayeuse présente dans la zone d'étude, leur état de fracturation et leur susceptibilité à la karstogenèse. Pour cela, des corrélations ont été réalisées entre la présence d'indices de bétoires en surface ou la présence d'indices de vide en forage et le type de craie du substratum.

5.1. LE PHENOMENE DE KARSTIFICATION

En Haute-Normandie, la karstification résulte de l'érosion hydrochimique ou hydraulique des faciès crayeux du Crétacé supérieur. Ce phénomène se traduit par la formation de karsts, vides naturels caractérisés en surface par les exo-karsts (bétoires), et les endo-karsts souterrains, parfois rencontrés en forage. De par son substratum crayeux, l'ensemble du bassin versant de l'Iton est concerné par ces phénomènes de karstification.

D'après Rodet (*Rodet,* 1981), les karsts de la craie sont des karsts de concentration et de restitution, c'est-à-dire qu'ils se forment par érosion régressive à partir des émergences situées où la surface piézométrique rencontre la surface topographique (les sédiments de recouvrement de la craie étant un facteur limitant pour l'établissement de karsts d'introduction, plus rarement représentés en Haute-Normandie, hormis au niveau d'accidents tectoniques majeurs).

La géométrie classique d'un karst de concentration décrite par Rodet et reconnue dans les conduits explorés (notamment le réseau karstique de Caumont et du Thuit (27)) est la suivante :

- La zone d'émergence présente une tendance au deltaïsme (ceci s'explique notamment par les variations du niveau de base (= surface piézométrique)) ;
- La zone de collecteur (zone centrale), constituée d'un drain de grande dimension ;
- Le secteur amont est constitué d'un chevelu de drains de plus en plus petits, rarement pénétrables par l'Homme. Certains ne dépassent pas quelques centimètres de diamètre.

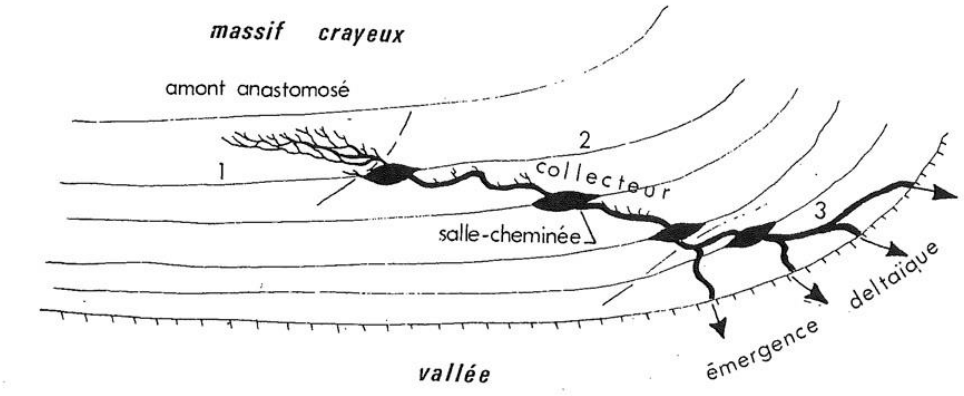


Illustration 47 : Organisation spatiale d'un réseau karstique de concentration dans la craie (Calba et al., 1979)

Concernant l'exo-karst, deux types peuvent être rencontrés dans le bassin versant de l'Iton : les bétoires de plateau et celles de vallées souvent plus nombreuses formant des alignements le long des vallées sèches voir même certaines vallées humides (cf. cas du sec-Iton § 5.4).

5.2. FRACTURATION DES FORMATIONS CRAYEUSES

Il est classiquement admis que deux familles de fissures affectent les formations crayeuses :

- Les fissures liées aux déformations de la masse crayeuse induite par la tectonique régionale ou locale. Cette fissuration présente une orientation globalement similaire (ou associée) aux accidents tectoniques régionaux et/ou locaux (failles, flexures). Dans le BV de l'Iton, cette orientation est principalement *armoricaine* (NO/SE) ;
- Les fissures liées aux contraintes de décompression (fissures de détente). Les contraintes à l'origine de cette famille de fissures sont induites par l' « appel au vide » que subissent les formations crayeuses lors du creusement des vallées et se répartissent donc en bordure de plateau (effet de décompression morphologique). Cette fissuration présente globalement une orientation pseudo-parallèle au versant (*Rodet*, 1991) ;

Les fissures qui affectent le massif crayeux jouent un rôle majeur dans la mise en place des réseaux karstiques puisqu'elles favorisent les circulations d'eau dans le massif, et donc les phénomènes d'altérations physico-chimiques à l'origine de la karstification.

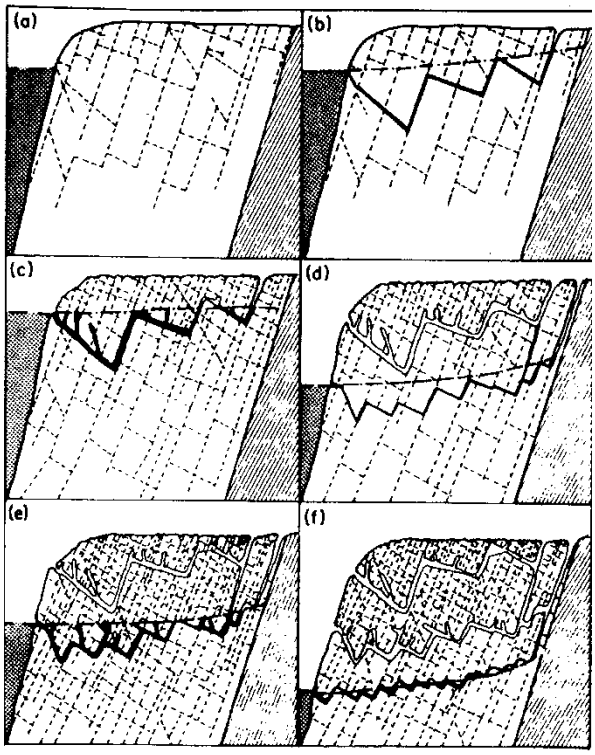


Illustration 48 : Représentation schématique de l'étagement des conduits karstiques liés d'une part au niveau de base (surface piézométrique) et d'autre part à la fracturation du massif (fissures de détente, tectonique)

Les fissurations de détentes (ou fissures de décompression) favoriseront une karstification localisée, en bordure de massif ou à la surface, tandis que les karstifications qui affectent le cœur d'un massif crayeux seront plutôt à mettre en relation avec son évolution tectonique

(*Rodet*, 1991). Il est également intéressant de signaler que l'intensité de la fracturation de la craie est plus importante sous les talwegs et dans les vallées, ce qui induit des circulations préférentielles.

D'autre part, le tracé du cours de l'Iton, en forme de baïonnette, trouve très probablement son origine dans les accidents géologiques qui affectent son substratum crayeux. La craie étant un matériau sensible aux contraintes mécaniques, il est raisonnable d'imaginer que les processus d'altérations mécaniques (fracturation) et physico-chimiques (karstification) affectant la craie soient préférentiellement localisés au niveau des secteurs « broyés » par cette tectonique armorico-varisque, réactivée au cours du Cénozoïque.

5.3. SUSCEPTIBILITE DES FACIES CRAYEUX A LA KARSTIFICATION

La répartition de la fracturation, alliée aux caractères intrinsèques des formations (porosité, perméabilité), influe sur les dynamiques hydrogéologiques. Dans la craie, il est nécessaire que la fissuration soit réduite à des fractures ordonnées pour donner lieu à un écoulement karstique. Si un réseau de fissure est trop développé et selon un modèle anarchique, il sera favorable à l'établissement d'un aquifère de fentes (*Rodet*, 1975).

En Haute-Normandie, le karst de la craie est principalement établi dans les faciès crayeux du Cénomanien supérieur (hormis les sables du Perche du Cénomanien supérieur qui sont par nature non-karstifiables), du Turonien et du Sénonien, qui présentent à l'échelle régionale des natures lithologiques homogènes et compactes, favorables au processus de karstification (*Rodet*, 1991). Cependant, localement, un contraste entre deux niveaux crayeux de perméabilité différente (exemple du contact entre une craie perméable sus-jacente à une craie argileuse, moins perméable) peut contrôler la mise en place de drainages karstiques, dont le niveau peu imperméable constituera le mur. Ces conduits karstiques, sub-horizontaux, s'observent bien sur les affleurements crayeux de référence que constitue la façade littorale du Pays de Caux.

La figure suivante (Illustration 49), prise dans les craies santoniennes au sud de Dieppe, illustre bien les différents conduits karstiques que l'on peut rencontrer dans les faciès crayeux : un réseau karstique conditionné par la fracturation (ici le long d'une faille normale sub-verticale, cerclée en vert ci-dessous) et un conduit karstique sub-horizontal, calé sur la stratification, au niveau d'un lit de silex imperméable (cerclé en rouge ci-dessous). Bien que cet affleurement soit distant du bassin versant de l'Iton, la nature relativement proche de la craie à l'échelle régionale permet de faire des analogies entre les observations du littoral et celles du BV de l'Iton.

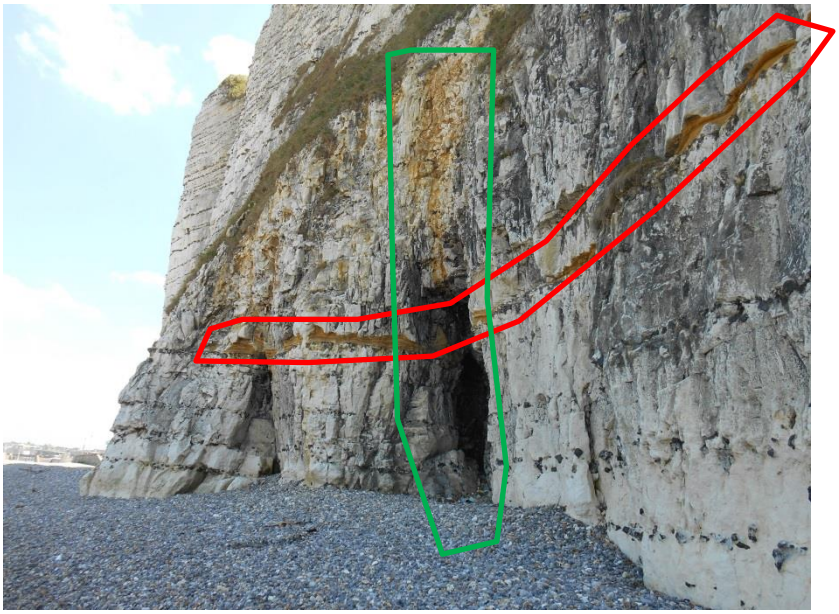


Illustration 49 : Développement d'un conduit karstique sub-horizontal (calé sur la stratification) au niveau d'un banc de silex imperméable sur la falaise de craie santonienne au sud de Dieppe (cerclé en rouge). Notons également le développement d'un réseau karstique appuyé sur la faille normale (cerclé en vert)

Notons que quelques réseaux karstiques sont également connus dans les faciès du Cénomanien inférieur mais leur nature plus sableuse et la fracturation anarchique ne favorise pas la formation de grands réseaux karstiques, les vides formés s'éboulent naturellement ou sont colmatés par les insolubles. Cet étage difficilement karstifiable est donc plus propice à la formation d'une nappe *sensu stricto* (*Rodet*, 1975 et *Rodet*, 1991).

Etage géologique	***Faciès***	***Porosité***	***%$CaCO_3$***	***Etat de fissuration*** ***(Rodet, 1975)***	***Susceptibilité à la karstification***	***Type de porosité***
Campanien	Craie blanche à silex	30-40 %	94 - 97 %	Fissuration en maille serrée, de l'ordre du décimètre	Forte à très forte	Karstique Fissurale Matricielle
Santonien			93 - 98 %			
Coniacien			87 - 98 %			
Turonien	Craie marneuse	25-50%	85 - 97%	Fissuration cassante et bien marquée sur le bord des vallées		
Cénomanien supérieur	Craie de Rouen	15-40%	70 - 95 %			
Cénomanien inférieur	Craie glauconieuse		70 %	**Très fissuré, fissuration anarchique**	Médiocre	

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des étages géologiques vis-à-vis de la fracturation et de la karstogenèse (sources diverses)

Les corrélations réalisées entre la présence de bétoires en surface, la présence d'indices de vides en sondages et la nature du substratum permet de confirmer ces observations.

Exo-karst : corrélation entre la présence d'indices de bétoires et la nature du substratum crayeux

Cette corrélation permet d'avoir un aperçu de la densité des indices d'exo-karsts (bétoires) en fonction de la nature du substratum crayeux. Pour cela, nous avons utilisé l'écorché des formations mésozoïques (*Quesnel*, 1997), confirmé par les sondages de la BSS disposant d'une coupe géologique.

L'analyse de la carte présentée sur la figure ci-dessous (Illustration 50) montre que l'essentiel des indices de bétoires se situent sur les craies sénoniennes (Coniacien, Santonien et dans une moindre mesure, Campanien), caractérisée globalement par une craie blanche à silex, ainsi que dans la partie supérieure des craies turoniennes. En outre, il s'agit également du secteur où le substratum crayeux est le plus épais, puisqu'au nord-est de la zone d'étude, les terrains cénomaniens et turoniens ont été a priori préservés de l'érosion. Notons toutefois que l'observation des bétoires, et donc leur recensement, ne sont pas exhaustifs. Ils sont par exemple fonction de la couverture forestière de la région car les observations sont plus difficiles en milieu forestier. Par ailleurs l'inventaire régional des bétoires a été essentiellement réalisé sur le territoire haut-normand (David, 2009). Le recensement des bétoires dans le département de l'Orne est donc très partiel.

Il est également intéressant de constater la densité et l'alignement de bétoires au niveau des failles dites du Sec-Iton, ce qui tend à démontrer l'importance de la fracturation dans le développement du karst de la craie. Ce secteur correspond aussi, d'après l'écorché géologique proposé par Quesnel, au contact entre les craies turoniennes et les craies coniaciennes. Notons également la présence de craies cénomaniennes sous les formations superficielles dans le lit du Sec-Iton (cf. 5.4) Les différences de lithologie entre ces craies pourraient également être un facteur à l'origine de la densité de la karstification.

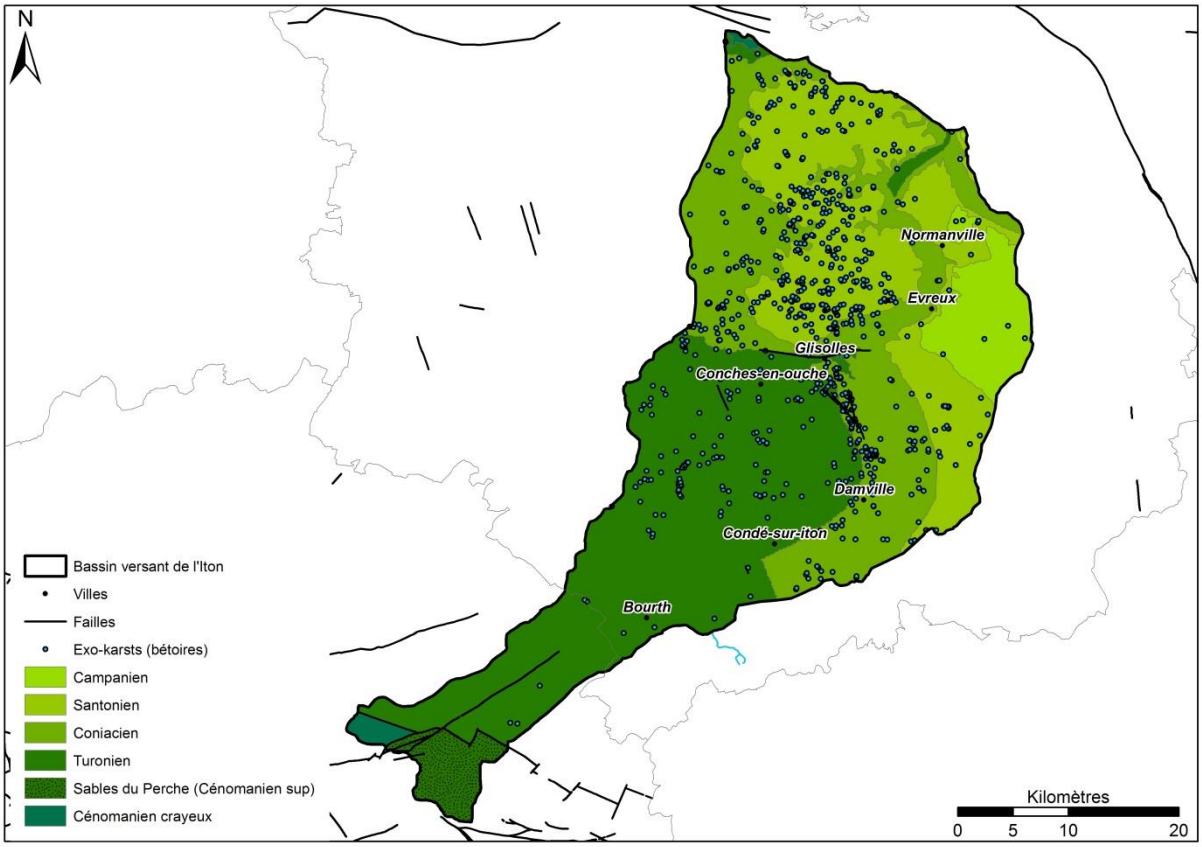


Illustration 50 : Corrélation entre la présence de bétoires et l'âge du substratum crayeux (écorché des formations du substratum d'après Quesnel, 1997) – Attention le recensement des bétoires dans le département de l'Orne est très partiel.

Endo-karst : corrélation entre la présence d'indices de vides en sondage et la nature du substratum crayeux

L'analyse des sondages de la BSS disposant d'une coupe géologique a permis de repérer les ouvrages ayant rencontré des anomalies potentiellement liées à des karsts. En effet, les coupes techniques des forages donnent par exemple des informations relatives aux chutes d'outils ou à la perte des fluides d'injection, caractéristiques de la foration d'un vide souterrain potentiellement karstique. Les coupes géologiques quant à elles donnent des informations sur le faciès rencontré en forage, et notamment la présence de craie très fissurée, de poches argilo-sableuses dans la craie etc., signatures de conduits karstiques. La consultation des archives papier de la BSS sur toute la zone d'étude ainsi que des requêtes par mots-clés dans la BSS numérique ont par ailleurs permis de localiser les forages ayant rencontré un vide a priori karstique, puis de corréler ces indices de vides avec la stratigraphie.

D'une manière générale, les vides rencontrés en forage se situent généralement entre 15 et 25 m de profondeur en vallée, et en-dessous de 30 m en plateau, et essentiellement dans les craies turoniennes ou sénoniennes. Quelques cas ont toutefois été observés dans les craies cénomaniennes, notamment dans le secteur sud-ouest de la zone d'étude, sous les craies turoniennes.

Il conviendra de garder en mémoire que la région Haute-Normandie présente une densité de vides souterrains anthropiques conséquente, ce qui signifie que tous les vides ou anomalies rencontrés en forage ne correspondent pas systématiquement à un endo-karst.

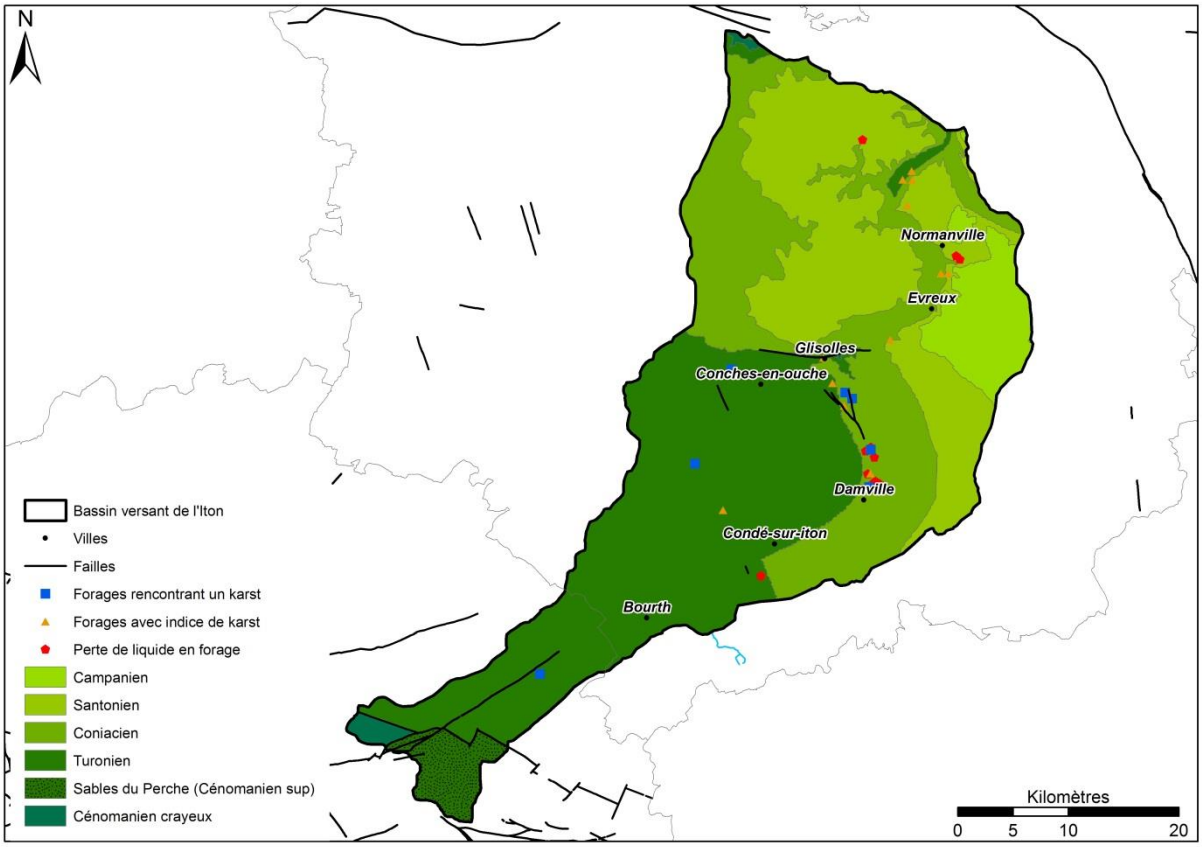


Illustration 51 : Corrélation entre la présence d'anomalies en forage et l'âge du substratum crayeux (écorché des formations du substratum d'après Quesnel, 1997)

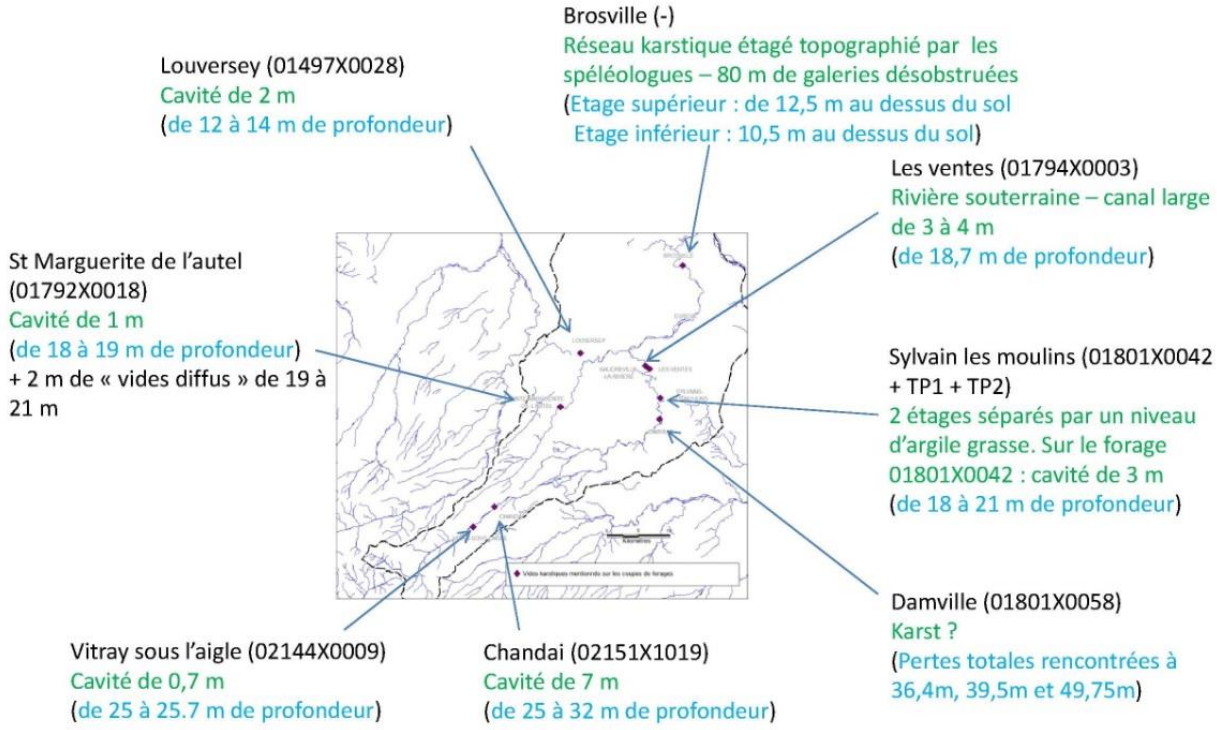


Illustration 52 : Localisation d'ouvrages de la BSS ayant rencontré des vides souterrains

Parmi ces endo-karsts, certains ont pu être reconnus par des visites spéléologiques. C'est le cas de l'endo-karst du Sec-Iton (présenté au § 5.4) mais également de celui situé sur la commune de Brosville à l'aval du bassin de l'Iton. Un réseau de galerie karstique fossile a en effet été découvert sur la commune de Brosville en 1972 (« site du Manoir ») et en 1983 (« site du bois ») (Illustration 53). Des travaux de désobstruction du site des galeries du manoir ont été menés par les groupes spéléologiques de Dieppe et Saint Sébastien (Bulletins de spéléologie de Dieppe, 1983). Ces galeries semblent se répartir en 3 niveaux dont 2 reliés :

- Le réseau supérieur (le trou du chien) situé à 12,5m au-dessus du niveau actuel de l'Iton. Le Bulletin de spéléologie de Dieppe n°2 indique que ce réseau présente 80 m de développement.
- Le réseau inférieur (environ 2 m plus bas). Ce niveau en cours de désobstruction présentait à la date du bulletin n°2, un développement de 25m et 50m sur les 2 entrées de ce niveau.

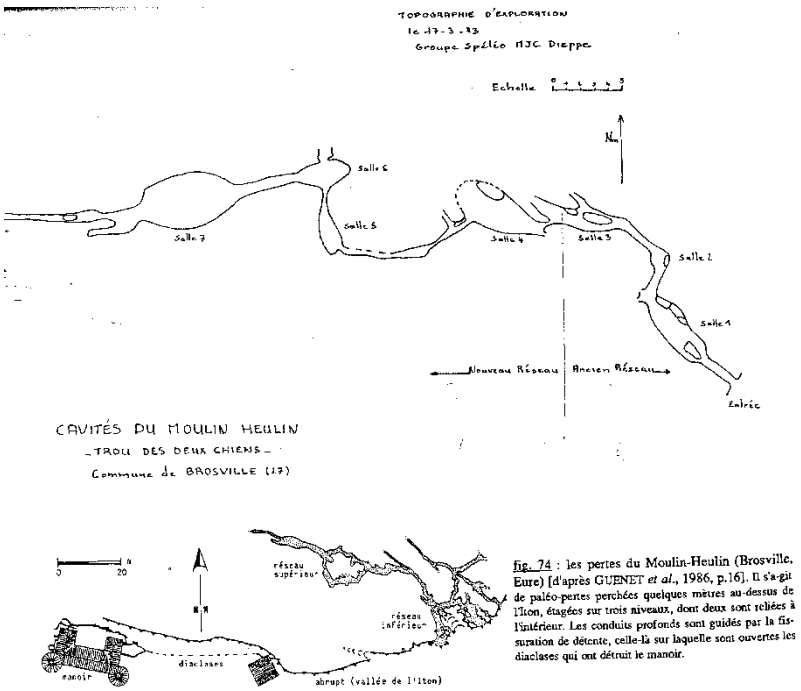


fig. 74 : les pertes du Moulin-Heulin (Brosville, Eure) [d'après GUENET *et al.*, 1986, p.16]. Il s'a-git de paléo-pertes perchées quelques mètres au-dessus de l'Iton, étagées sur trois niveaux, dont deux sont reliées à l'intérieur. Les conduits profonds sont guidés par la fissuration de détente, celle-là sur laquelle sont ouvertes les diaclases qui ont détruit le manoir.

Illustration 53 : Topographie du réseau karstique (niveau supérieur) de Brosville – Bulletin de spéléologie de dieppe n°2 (Bulletin de spéléologie de Dieppe, 1983) et Rodet 1991 (Rodet, 1991)

5.4. LE « SEC-ITON »

5.4.1. Présentation du secteur

Entre les communes de Damville et de Glisolles, le cours de l'Iton, en étiage, s'assèche progressivement depuis Breteuil pour disparaitre totalement certains étés à un kilomètre en aval du hameau du Rebrac. Certaines pertes sont bien identifiées et absorbent jusqu'à 150l/s mais en l'absence de bétoires caractérisées, le débit diminue tout de même progressivement.

Le Sec-Iton s'écoule suivant une orientation SE-NO, ce qui représente une variation de direction de près de 90° avec son cours amont. Cette variation brutale d'orientation des écoulements coïncide avec la présence de fractures orientées globalement SE-NO ou SSE-

NNO (failles du Sec-Iton). Ce secteur, dit du « Sec-Iton », est la zone où la densité d'exo-karsts observés est la plus forte dans la zone d'étude (Illustration 54).

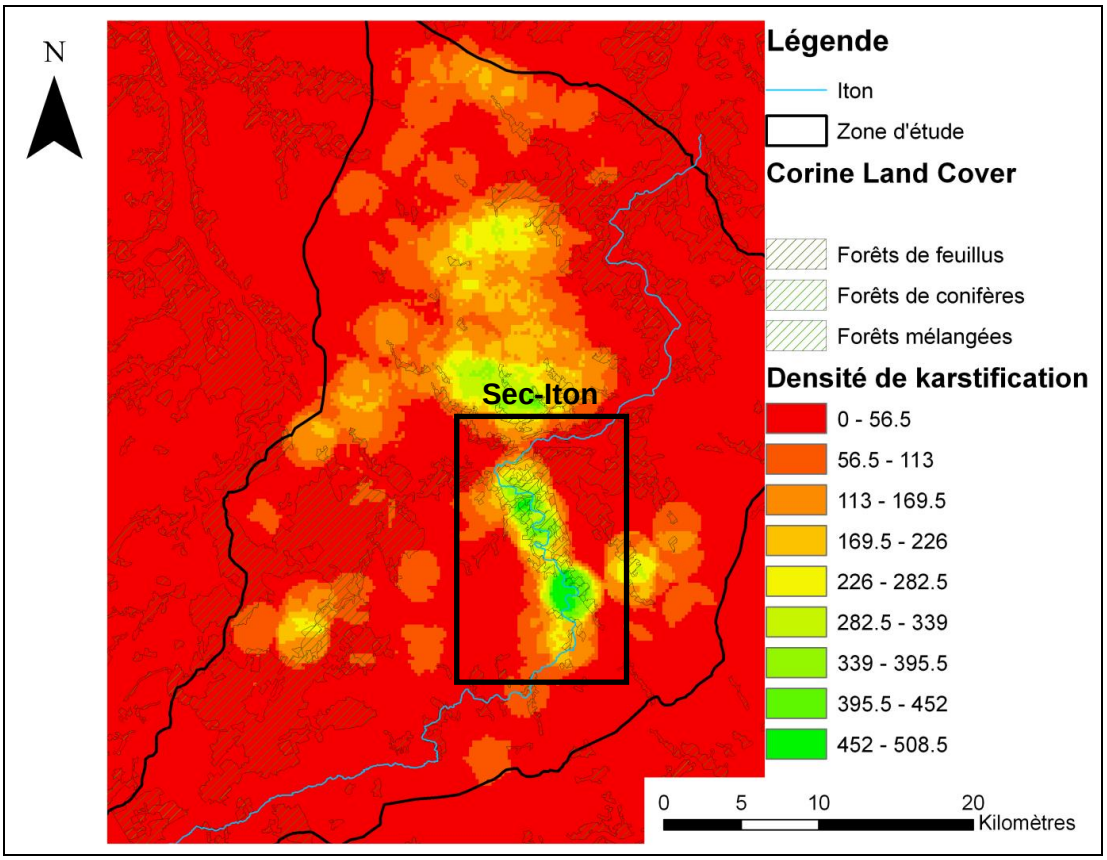
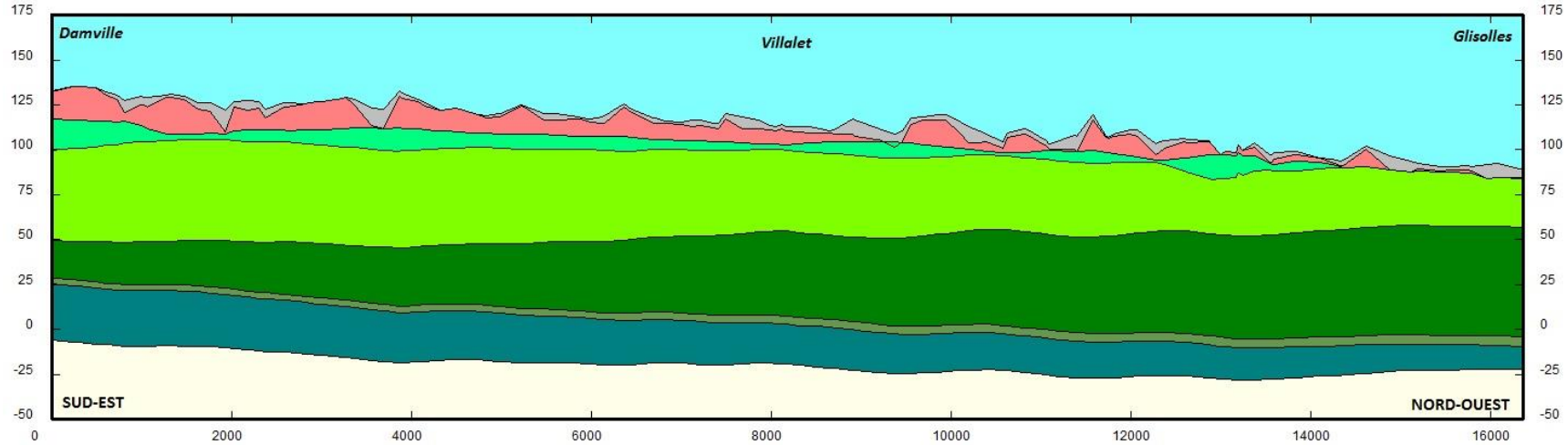


Illustration 54 : Carte de densité des phénomènes de karstification observés en surface (exo-karsts)

D'un point de vue géologique, l'étude réalisée par le BRGM en 1971 (*Artis et al.*, 1971) a mis en évidence un relèvement du Cénomanien dans le fond de la vallée du Sec-Iton (Illustration 55).



Formation	Description
ALLU	ALLUvions
ARGS	ARGiles à Silex
SENO	SENOnien
CENS	CENomanien Superieur
PERC	Sable de PERChe
CENI	CENomanien Inferieur
CENB	CENomanien Basal
GAUL	GAULt
BASE	BASE

Illustration 55 : Coupe géologique du Sec-Iton, de Damville à Glisolle (source : modèle géologique de l'Avre, David et al., 2015)

5.4.2. Observations de l'exo-karst du Sec-Iton (les bétoires)

Comme évoqué précédemment, la densité de bétoires au niveau du Sec-Iton est une des plus forte du bassin versant.

Concernant les bétoires de vallée, plus d'une 20aine de bétoires sont recensées entre Coulonges et Gaudreville. Il existe :

- des bétoires isolées : le Sacq, les longs champs, les boscherons,
- des chapelets de bétoires individualisées : à l'aval du Moulin du Coq (14 bétoires), au Rebrac (16 bétoires),

Leurs capacités d'absorption mesurées sont de l'ordre de 150 à 200l/s (156 l/s à la perte du gard en oct 1970) (BRGM, 1970).

Cet exo-karst se prolonge par ailleurs en plateau sous la forêt d'Evreux entre Gaudreville et la Bonneville.

Il se traduit par des « fosses » de dimensions importantes (fosse de la butte rouge, fosse Guerin, fosse au renard,…) consécutives à l'effondrement du toit des cavités (endokarst) et se présentent sous la forme de vastes entonnoirs de 10 à 15 m de profondeurs et de 20 à 40 m de diamètres (Illustration 56 et Illustration 57). La plus grande mesure 16 m de profondeur et 80 m de diamètre.

	Dimension (en m)	Profondeur (en m)
Fosse des champs Guérin	40 x 40	15
Fosse aux Vaches	10 x 10	4
Fosse des Dix Acres	15 x 15	10
Fosse de la Butte Rouge	40 x 40	15
Fosse des Murets	30 x 40	10
Fosse du Voisin	40 x 40	10
Fosse des Machines	20 x 20	8

Illustration 56 : Les grandes fosses de la forêt d'Evreux sur le plateau (Rodet, 1991)

Cette érosion souterraine semble encore actuelle, le dernier effondrement du plateau ayant été observé par Ferray en mars 1880, qui mentionne un effondrement brutal de 20 m de profondeur s'étant produit au bord du chemin venant de Gaudreville. Le rapport du BRGM de 1970 précisait que cette dépression était toujours visible, les versants étant encore bien raides et sans végétation (BRGM, 1970).

On dénombre au total une 15aine de fosses principales toutes alignées approximativement selon une ligne NNW-SSE, allant des Boscherons à la source de la Fosse aux Dames (BRGM, 1970).

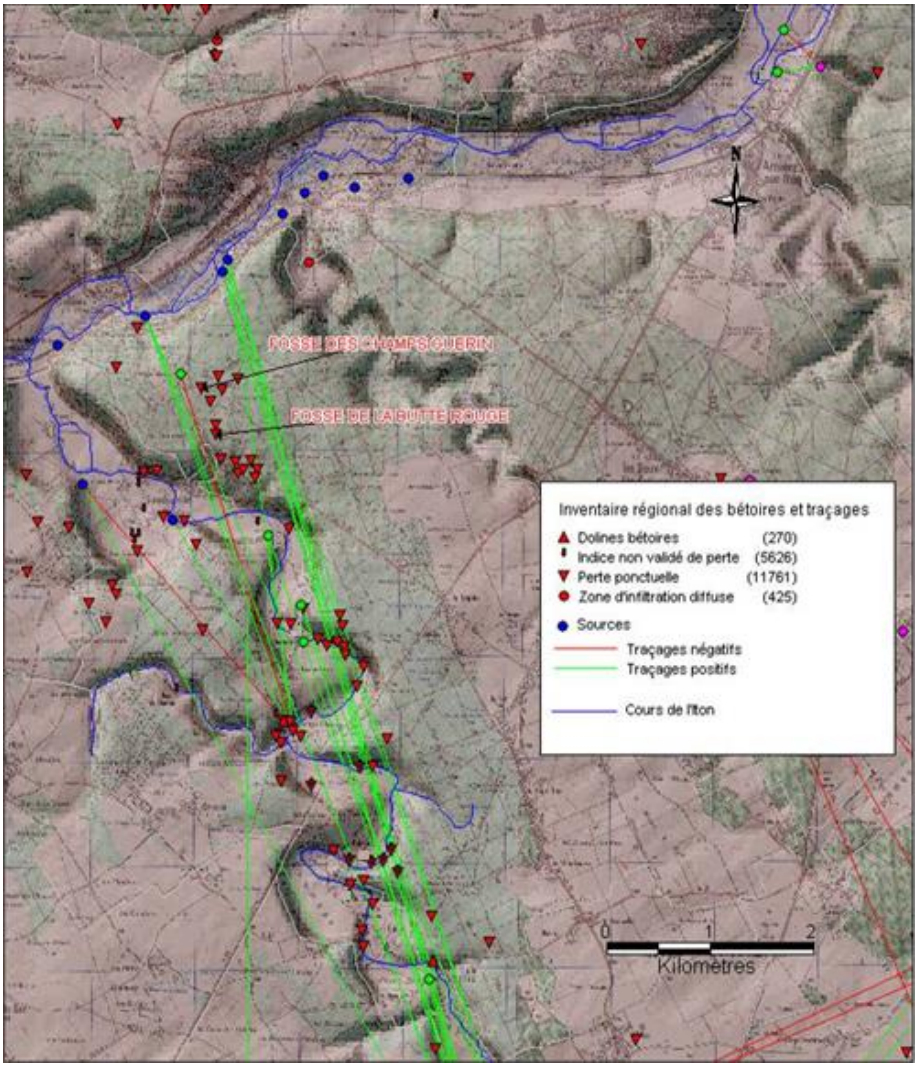


Illustration 57 : Bétoires et traçages positifs du secteur du Sec-Iton (Extrait de l'inventaire régional Bétoires/Traçages) – les points verts sur la carte représentent des forages/puits qui ont fait l'objet d'un suivi lors d'un traçage

Peu de ces effondrements de surface sont pénétrables. Le Bulletin de spéléologie de Dieppe n°2 (Bulletins de spéléologie de Dieppe, 1983) précise que la perte du Rebrac est la seule qui soit pénétrable. Cette perte se situe en rive droite de l'Iton sur la commune de Villalet au lieu-dit le « Rebrac ». L'effondrement correspond à une petite salle en forme de cloche, de deux mètres de haut. Cette cavité est formée dans la craie, son plancher est constitué d'un lit de galets (silex). Le fond de la salle est obstrué (Illustration 58).

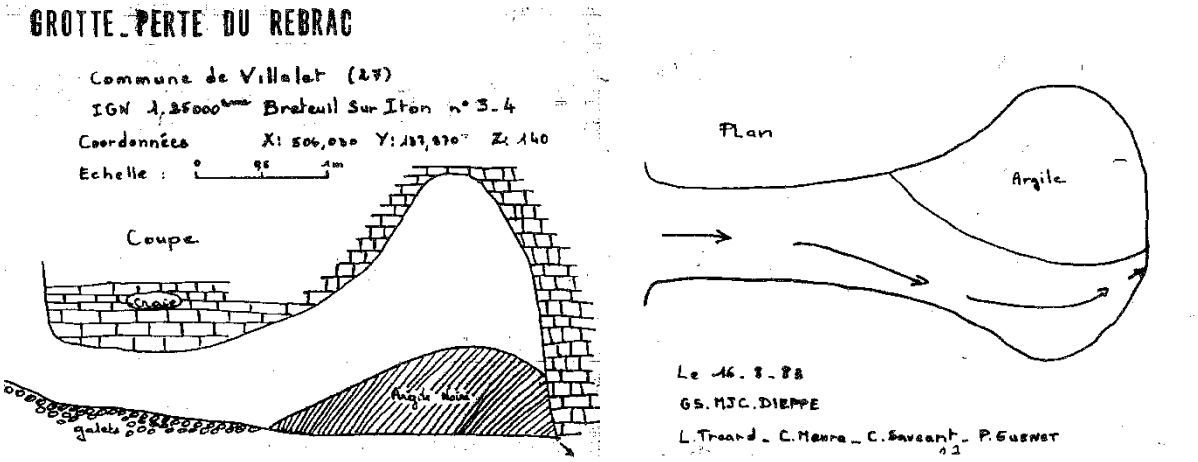


Illustration 58 : Perte du rebrac visitée par le comité de spéléologie de Dieppe - Bulletin de spéléologie de Dieppe n°2 (Bulletin de spéléologie de Dieppe, 1983)

Ces phénomènes montrent bien l'existence d'un important réseau karstique sous la vallée de l'Iton.

5.4.3. Observations de l'endo-karst du Sec-Iton

L'origine du Sec-Iton, dont le lit est à sec en été, est karstique. En effet, il est admis qu'il existe dans ce secteur des circulations souterraines du cours de l'Iton, au sein d'un endo-karst a priori très développé. Divers témoignages font état de ce réseau karstique sous le niveau de l'Iton :

- En 1861, des ouvriers marnerons ouvrant une carrière aux Boscherons mettent à jour à une profondeur de 18,7 m un canal large de 2,9 m et profond de 1,75 m creusé dans la craie et dans lequel circule un cours d'eau dont la vitesse est de 6 m / min (débit de 507 l/s). Ce canal est situé à 6 m sous le niveau de l'Iton (Artis et al., BRGM 1971) ;
- En 1857, M. Lapeyruque, conducteur des Ponts et Chaussées avait déjà signalé un cours d'eau souterrain dont le niveau était à 8 m sous le niveau de l'Iton (Artis et al., BRGM 1971) ;
- De 1884 à 1887, Ferray engage des travaux de recherche ;
    - Aux Boscherons et à Gaudreville, suite à un effondrement d'un puits ayant fait apparaître à 18,7 m de profondeur un canal de 3 à 4 m de largeur, livrant un passage à un cours d'eau souterrain (indice BSS n°01794X0003) ;
    - Ferray fait forer un puits de 44,5 m de profondeur à proximité de l'effondrement. Une galerie de 40 m est creusée dans des terrains argilo-siliceux riches en gros silex (Formation Résiduelle à Silex) puis dans une craie franche. Cette galerie atteint une immense cavité éboulée où des blocs de craie sont amassés, et une autre galerie aboutie à « une véritable rivière souterraine » (Illustration 59).
- Sur le forage de Sainte-Cécile (commune de Sylvains-les-Moulins – code BSS n°01801X0042), un vide karstique de 3 m de hauteur est rencontré entre 18 et 21 m de profondeur.
- Des travaux de forage (Sobesol, 2000) dans le secteur de Damville ont mis en évidence, dans la craie, des anomalies de vitesses d'avancement positives, corrélées à des pressions d'injection nulles, qui peuvent correspondre à des terrains très décomprimés ou des vides d'origine karstique ;

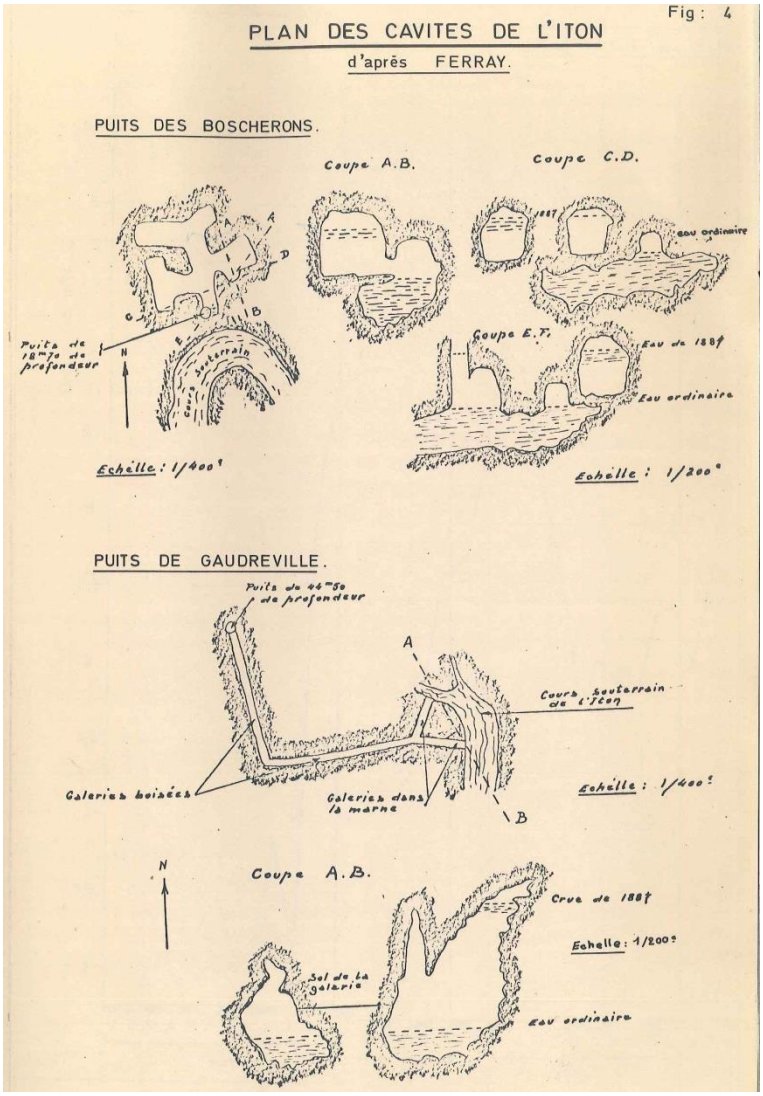


Illustration 59 : Endo-karst du Sec-Iton reconnu par observation réalisée par descente des puits des Boscherons et de Gaudreville (d'après Ferray, document de la BSS)

En se basant sur les effondrements en surface et sur les observations de Ferray, le laboratoire des Ponts et Chaussées a proposé en 1889 une carte de l' « Iton souterrain » (Illustration 60 et Illustration 61).

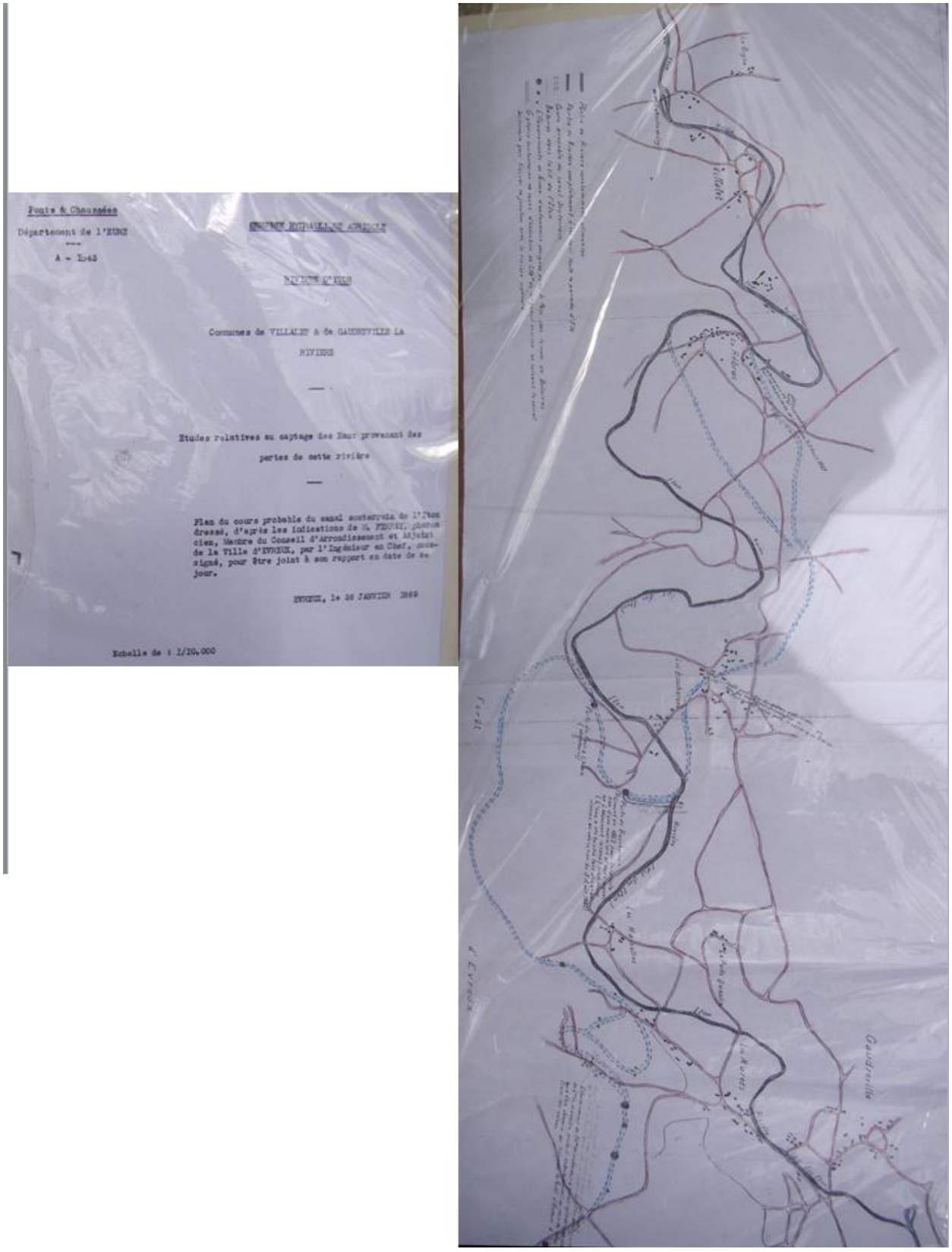


Illustration 60 : Plan des ponts & chaussées du 26/01/1889 transmis au BRGM par l'association équilibre Iton en 2013

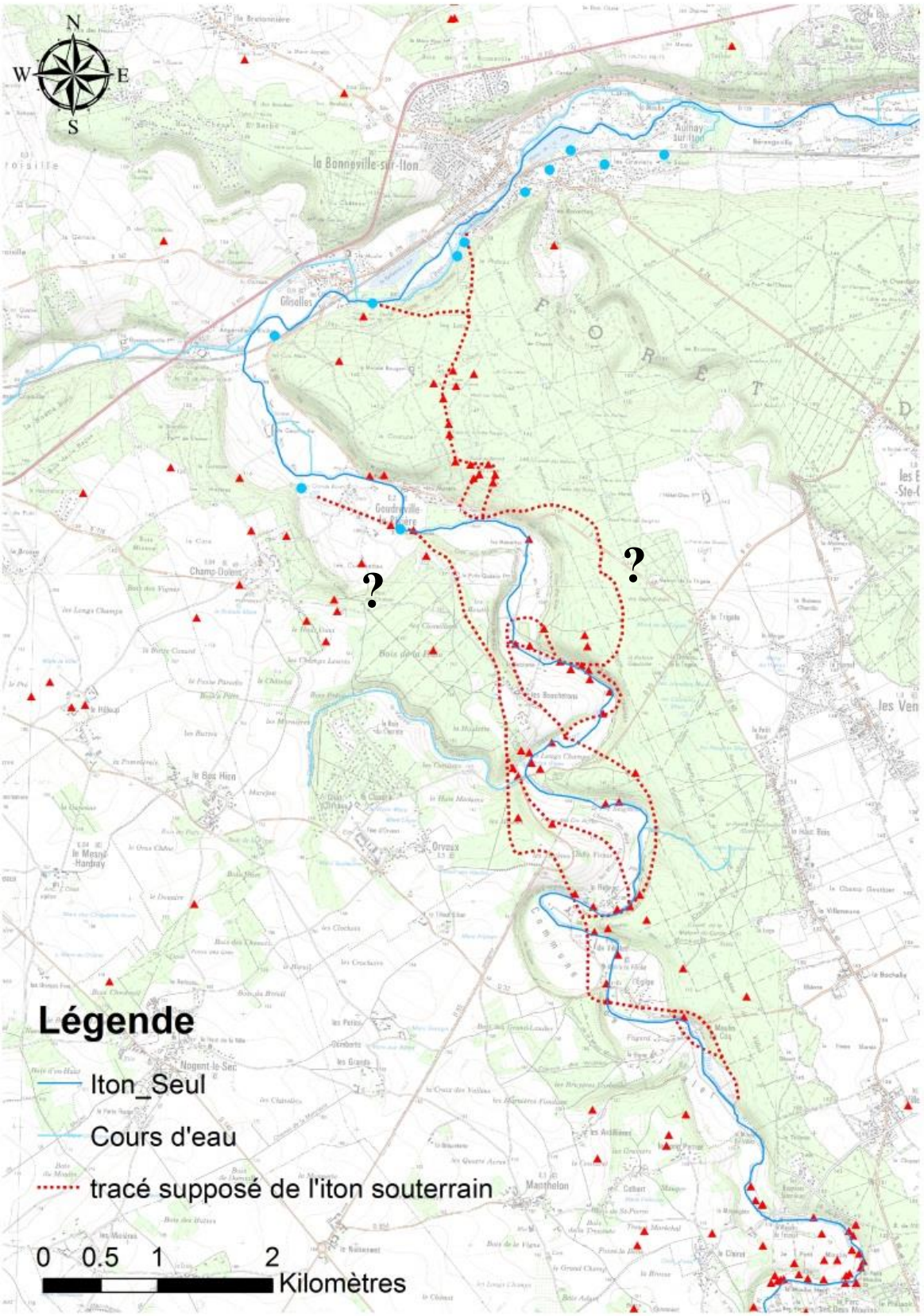


Illustration 61 : Plan des Ponts & Chaussées du 26/01/1889 géoréférencé et vectorisé par le BRGM en 2014

5.4.4. Hypothèses expliquant les phénomènes de karstification du Sec-Iton

La littérature propose diverses hypothèses pour expliquer la densité de karsts dans le secteur du Sec-Iton :

Une origine lithostratigraphique

La vallée du Sec-Iton se serait installée au début du Tertiaire au pied de la paléo-cuesta du Coniacien, en bordure du dôme anticlinal du Coniacien (entre Breteuil et Conches) et un karst de bordure se serait développé avec l'Iton comme niveau de base. Actuellement, après ennoyage de cette structure, le karst sénonien résiduel se retrouve sous les RS avec un développement prépondérant en rive droite du cours actuel de l'Iton (Hydroexpert, 1999).

Une autre hypothèse, suggérée par ANTEA en 2005, s'appuie sur le fait que le Sec-Iton coïncide avec la terminaison occidentale de la craie dure à silex du Coniacien, qui repose par l'intermédiaire d'un faciès de transition sur la craie plus marneuse du Turonien supérieur.

Une origine tectonique

Rodet (1981) indique que « les pertes karstiques se manifestent lorsque les cours d'eau prennent une direction normande (SSE-NNO), illustrée par de grands accidents tectoniques et que lorsque le cours d'eau reprend sa direction cataclinale initiale, le débit augmente grâce à l'apport de grosses émergences, voire d'affluents puissants ».

Enfin, une hypothèse proposée par De La Querière (1992) et tout à fait similaire à celle de Rodet explique que les fractures secondaires issues du jeu des failles et des accidents structuraux constituent l'élément originel de l'ensemble des facteurs qui ont provoqué l'existence du karst. Le trajet du Sec-Iton serait imposé par des séries de failles qui ont fracturé la craie et constitué un « graben », dans lequel le karst se développe au gré de l'état d'altération de la craie. La géométrie de ce karst peut être très variable : sous forme de cavités (forage de Thomer-la-Sôgne), ou sous forme d'écheveaux de fissures comme à Villalet. L'étude montre que le karst commence à Condé-sur-Iton.

6. Synthèse hydrogéologique

6.1. AQUIFERES EN PRESENCE

Le bassin versant de l'Iton comportent plusieurs aquifères qui hébergent les nappes d'eaux souterraines suivantes :

- les nappes temporaires qui se forment dans les formations superficielles,
- la nappe des formations tertiaires,
- la nappe des sables du perche,
- la nappe des alluvions,
- la nappe de la Craie (**principal aquifère**),
- la nappe albo-aptienne.

Les aquifères plus profonds (aquifère des calcaires du Tithonien, aquifère des sables et grès de l'oxfordien supérieur, aquifère corallien de l'oxfordien moyen) ne sont ici pas décrits car trop profonds.

6.1.1. Nappe perchée dans les limons et les argiles à silex

Les formations résiduelles à silex (RS) recouvrent l'ensemble des plateaux crayeux de la zone d'étude. L'épaisseur varie de quelques mètres à quelques décamètres : la moyenne étant d'environ 15 m. Les argiles à silex sont surmontées par les limons de plateaux.

D'un point de vue hydrogéologique, ces formations peuvent être le siège d'une nappe de stagnation temporaire. L'université de Rouen a étudié ces processus hydrologiques et plus particulièrement le rôle de stockage des eaux d'infiltration dans les formations superficielles en instrumentant un site atelier sur la commune de Bouville (site situé dans le département 76 mais le fonctionnement hydrologique est transposable aux domaines du département de l'Eure) (Dupont et al. 2009).

Les sols limoneux surmontant les argiles à silex sont perméables, ce qui favorise l'infiltration des pluies. En profondeur, la compaction des limons est à l'origine d'une diminution de la perméabilité avec la profondeur (Illustration 62). La diminution théorique de la perméabilité des limons des plateaux, avec la profondeur, suit une loi exponentielle, sans réelle rupture avec les argiles à silex, qui sont compactées mais la présence de silex introduit une hétérogénéité texturale qui induit une perméabilité non négligeable.

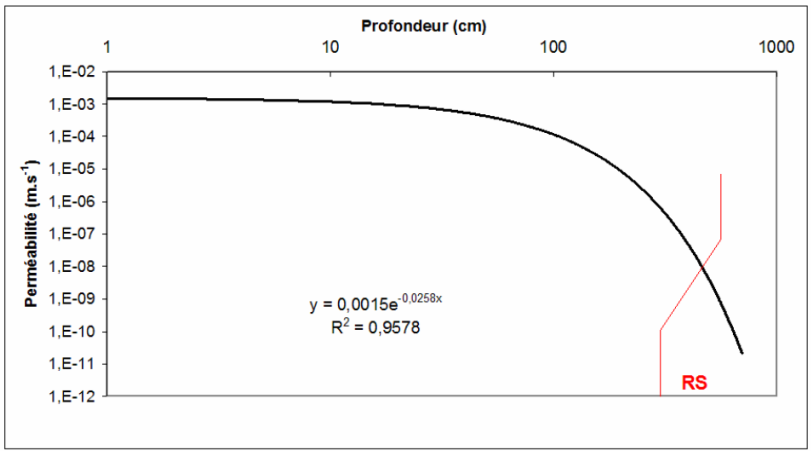


Illustration 62 : Modèle conceptuel d'évolution de la perméabilité des formations superficielles en fonction de la profondeur ; le modèle proposé est fondé sur des mesures de perméabilité réalisées au laboratoire en fonction de quelques valeurs de pression ; en rouge, passage de la base des limons aux argiles à silex (Dupont et al. 2009)

A l'interface craie-argile à silex, la désorganisation de la structure de la craie génère un horizon, localement saturée (observations lors de forages), moins perméable que les argiles à silex qui constituent le mur d'un aquifère de sub-surface, situés dans les formations superficielles constituées par les argiles à silex et les limons (Dupont et al. 2009).

Des prospections géophysiques (tomographie électrique et potentiel spontané – PS) réalisées par l'université de Rouen sur le site de Bouville ont montré le rôle des bétoires et « crypto-bétoires » dans le drainage de l'aquifère de sub-surface (Thèse de A. Jardani - 2007). La comparaison des cartes de PS réalisées au printemps et en été (Illustration 63) permet en effet de montrer :

- un abaissement global des niveaux piézométriques de sub-surface entre le printemps et l'été ;
- la présence d'un « entonnoir piézométrique » bien marqué, tant au printemps qu'en été, qui souligne le point d'infiltration principale (doline ou bétoire) des eaux de l'aquifère de sub-surface.

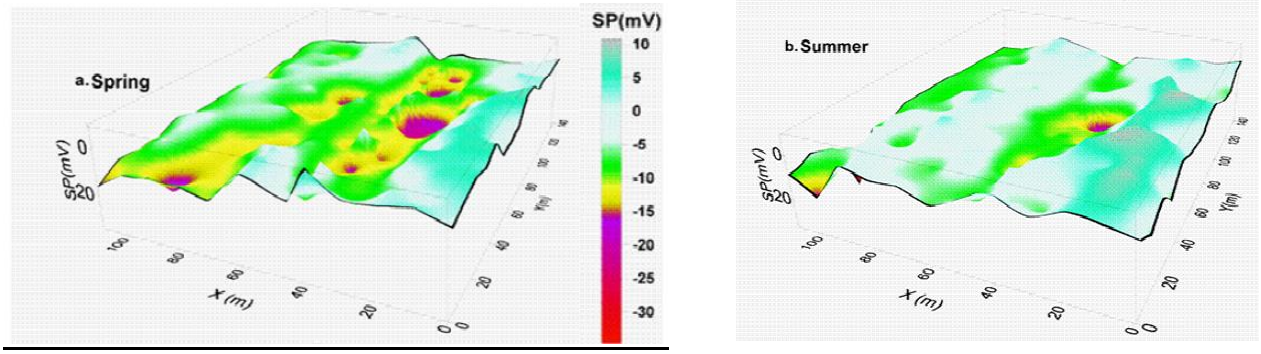


Illustration 63 : Comparaison des cartographies 3D des mesures de PS, réalisées au printemps (a) et en été (b) (Thèse de A. Jardani – 2007 dans Dupont et al. 2009)

Le suivi piézométrique réalisé dans les formations superficielles sur le même site de Bouville en 2007/2008 permet d'illustrer la réponse hydrologique de l'aquifère de sub-surface à la

pluviométrie efficace. Au cours du cycle hydrologique suivi (2007/2008), une recharge de l'aquifère superficiel (courbe rouge de l'Illustration 64) est enregistrée pendant l'automne (période pluvieuse qui a débuté en septembre), un maintien de hauts niveaux piézométriques pendant les périodes d'hiver et de printemps (avec des écoulements vers la bétoire qui sont compensés par la recharge par les pluies) pour arriver à l'étiage en été (vidange non compensée par des apports pluvieux conséquents).

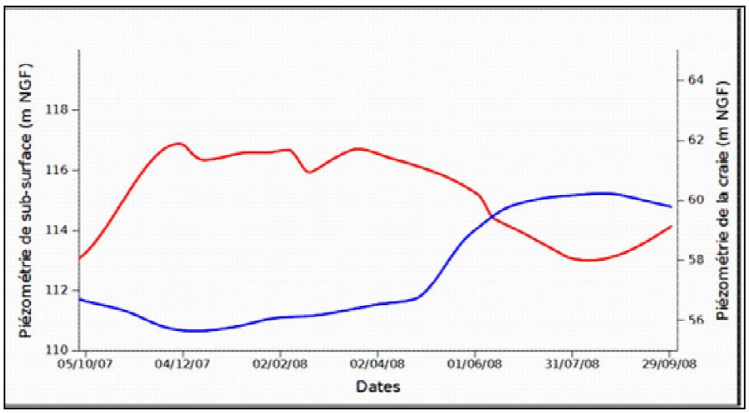


Illustration 64 : Comparaison des chroniques de piézométrie de l'aquifère superficiel (en rouge) et de piézométrie de l'aquifère de la craie (en bleu) (Dupont et al. 2009)

La comparaison des chroniques piézométriques de l'aquifère superficiel et de l'aquifère de la craie sous-jacent illustre le décalage entre les cycles crue-étiage de l'aquifère superficiel et de l'aquifère de la craie (respectivement courbe rouge et courbe bleue de l'Illustration 64). La recharge de l'aquifère de la craie débute progressivement en hiver pour s'accélérer, au printemps et atteindre les niveaux de crue en été. Ce délai important est lié aux capacités de stockage et d'écoulement dans les formations superficielles. Ce retard peut diminuer localement, en fonction de plus faibles capacités de stockage des formations superficielles et, en particulier des épaisseurs plus faibles de limons des plateaux comme c'est le cas des plateaux de l'Eure (Dupont et al. 2009).

Cette nappe temporaire correspond aux unités semi-perméables n°119AE05 « Formations résiduelles à silex de Normandie d'épaisseur supérieure à 15 m » et n°119AE07—« Formations résiduelles à silex de Normandie d'épaisseur comprise entre 15 et 2 m » du référentiel hydrogéologique français (BD LISA[10]).

6.1.2. Nappe tertiaire au Nord-Est d'Evreux

Dans le département de l'Eure, l'ensemble des formations tertiaires forme un aquifère multicouche généralement (mais pas toujours) séparé de l'aquifère de la craie par les argiles plastiques imperméables de l'Yprésien. Cet aquifère multicouche est présent essentiellement sur le plateau de Madrie (plateau entre les rivières Eure et Seine) mais également sous forme de placage à l'aval du bassin de l'Iton très localement sur les plateaux au Nord-Est d'Evreux. Les observations faites sur le plateau de Madrie au moment de la carte piézométrique de 1989 montrent que les niveaux mesurés concernent la nappe contenue dans les terrains bartoniens, lutétiens et cuisiens. Les nappes des sables stampiens et des calcaires sannoisiens sont

[10] Le référentiel hydrogéologique BDLISA (Base de Données des LImites des Systèmes Aquifères) est un outil national qui permet de localiser les données relatives à l'eau souterraine. Il vise à mettre à disposition une cartographie des entités hydrogéologiques sur l'ensemble du territoire (http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article167)

d'extension réduite et ont des productivités très minimes. Elles ne sont pas captées et ne donnent pas de sources notables. Les eaux qui débordent des marnes stampiennes et sannoisiennes s'infiltrent ensuite rapidement dans les calcaires lutétiens et surtout les sables cuisiens.

Il est généralement mentionné dans la littérature que l'aquifère de la craie est captif sous la couverture tertiaire dans le bassin parisien. L'Illustration 65 montre que ce n'est pas le cas dans le secteur de Douains (plateau de Madrie) ; cependant aucune étude concernant les relations nappe tertiaire / nappe de la craie n'a été réalisée à ce jour en Haute-Normandie. Cette observation ne peut donc pas être généralisée.

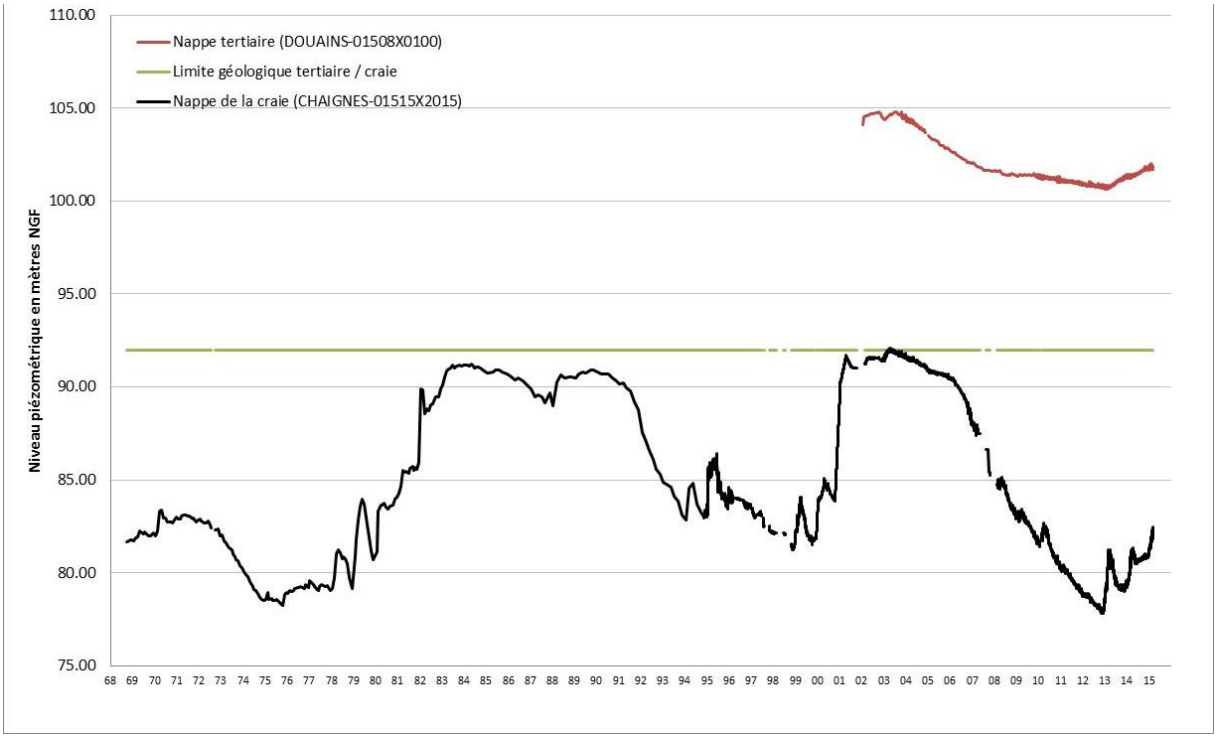


Illustration 65 : Suivi piézométrique de la nappe de la craie sur les puits de Chaignes (01515X2015) et de la nappe tertiaire sur le puits de Douains (les 2 puits sont situés à 3km l'un de l'autre).

Dans le secteur du bassin de l'Iton, l'aquifère du tertiaire est représenté par les sables de Cuise (sous forme de plaquage à l'est d'Evreux), les sables du Stampien (qui remplissent des vides d'origine karstique), les sables de Lozère (sous forme de plaquage à l'est d'Evreux, de quelques mètres d'épaisseur ou remplissent des dépressions et poches karstiques, parfois sur 20 mètres d'épaisseur). Des puits captant cet aquifère tertiaire sont notamment recensés sur le plateau situé entre les rivières Iton et Eure dans le secteur d'Irreville.

Cet aquifère correspond aux unités aquifères n° 104AA04—« Sables et argiles du Mio-Pliocène du Bassin Parisien (Bassin Seine-Normandie) », 113AQ11—« Calcaires et sables du Lutétien du sud du Bassin Parisien », n°113AV03 « Sables de Cuise de l'Yprésien sup. du Bassin Parisien » du référentiel hydrogéologique français (BD LISA).

6.1.3. Nappes des sables du perche

La nappe des Sables du Perche, hébergée par la formation du même nom est localisée à l'extrémité sud de la zone d'étude, en amont de la faille de Senonches qui limite leur extension vers le nord.

Cette nappe est en connexion hydraulique avec la nappe de la craie cénomanienne sous-jacente et avec la craie Turonienne au niveau de la faille de Senonches. Il s'agit de sables assez grossiers à la base, puis généralement plus fins, avec alternance de lits plus grossiers sur sa partie supérieure. Leur extension vers le nord est mal connue mais s'arrête probablement au niveau de la faille de Senonches (Illustration 66). L'extension vers le Nord des sables du perche a notamment été étudiée dans le rapport BRGM/RP-60458-FR de 2012 (David P-Y, 2012).

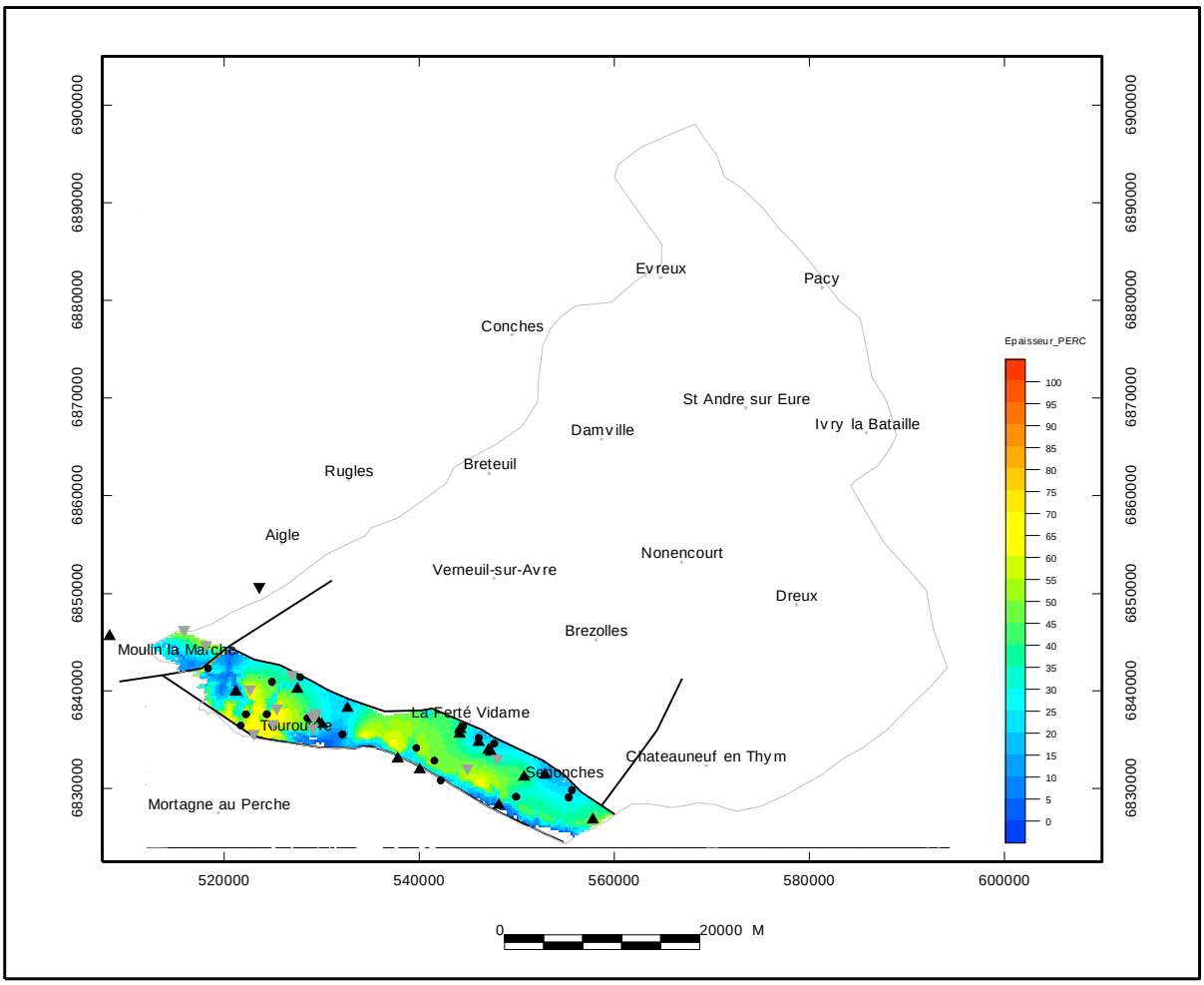


Illustration 66 : Extension et épaisseurs (en m) des sables du perche d'après le modèle géologique de l'Avre (David et al. 2015)

Les cartes piézométriques disponibles indiquent la présence d'une crête piézométrique qui coïncide avec la crête topographique Sud du bassin versant de l'Iton (Illustration 67 et Illustration 68).

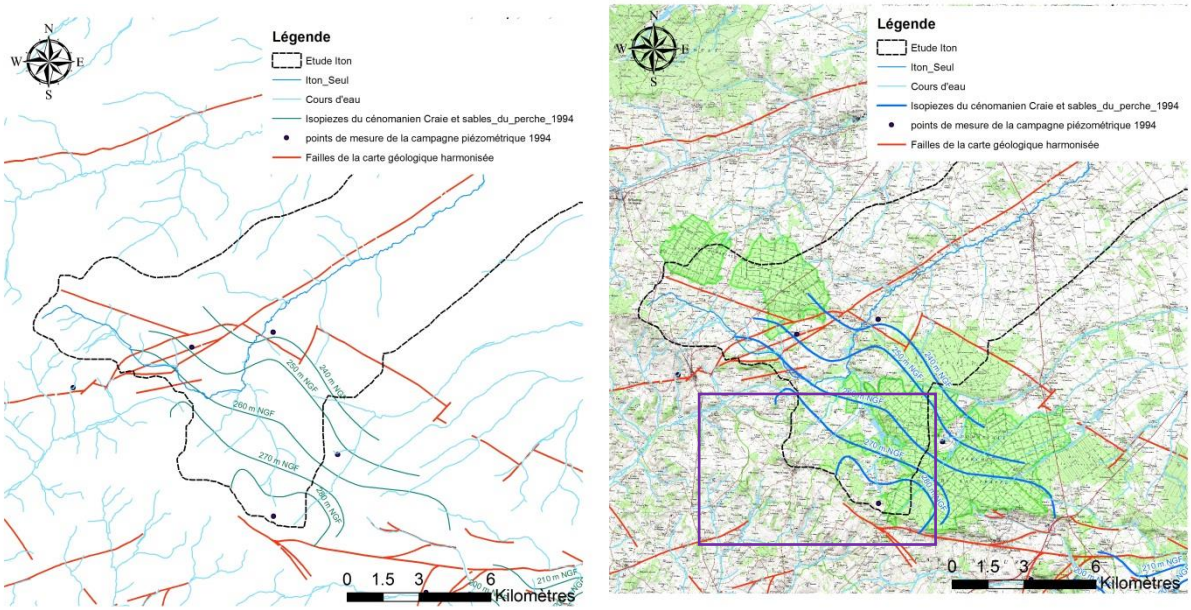


Illustration 67 : Carte piézométrique de 1994 de l'aquifère du cénomanien crayeux et des sables du perche . L'encadré violet situe l'emprise de la carte de l'Illustration 68

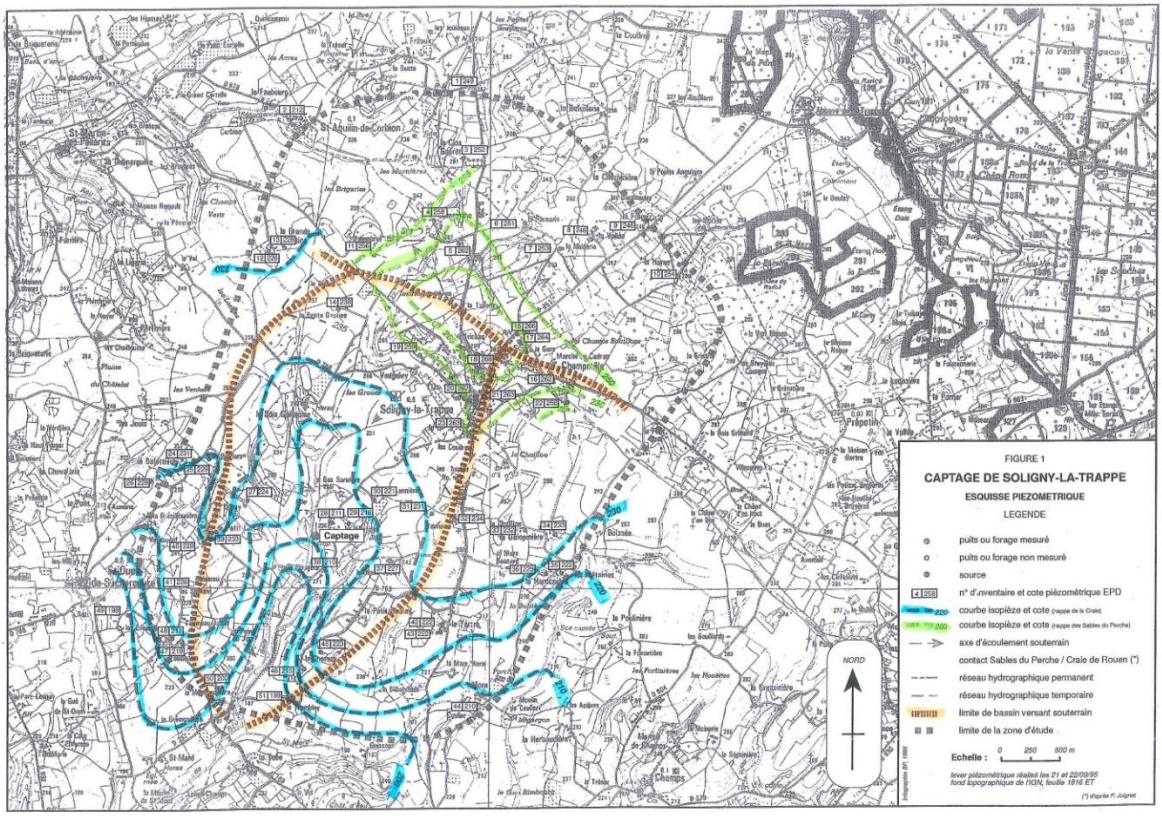


Illustration 68 : Carte piézométrique du secteur de Soligny-la-trappe (61) - Syndicat Départemental de l'Eau du CG61 – la localisation de cette carte est précisée par le cadre violet dans l'Illustration 67

Cet aquifère correspond aux unités aquifères n°123AC01—« Sables du Perche du Cénomanien supérieur du Bassin Parisien, bassin du Loir et de l'Eure » et n°123AC05— « Sables et Grès, Sables et Marnes glauconieux du Cénomanien inf. à moyen, bassin du Loir et de l'Eure » du référentiel hydrogéologique français (BD LISA).

6.1.4. Nappe des alluvions

À l'amont du bassin versant, la majorité des dépôts alluvionnaires sont des silts plus ou moins argileux. Il n'existe donc pas, à proprement parler de nappe des alluvions ; les alluvions sont par ailleurs séparés de la craie par plusieurs mètres d'argiles à silex ; les alluvions étant parfois moins perméables que la craie, **l'aquifère de la craie peut même être en charge sous le complexe alluvions/argiles-à-silex de fond de vallée** (cas observé sur plusieurs forages à l'amont du bassin de l'Iton cf. § 6.1.5).

A l'aval du bassin, en revanche, à partir du Sec-Iton, les alluvions ont une épaisseur plus importante de 5 mètres en moyenne mais pouvant atteindre jusqu'à 15 mètres dans le secteur du Sec-Iton au niveau de poches karstiques. Ces alluvions comportent parfois des alluvions anciennes plus perméables qui peuvent contenir une nappe alluviale.

Le suivi en continu des niveaux de la nappe réalisé sur le forage de Normanville (n°01501X0002) entre 1988 et 2008 montre que le niveau de la nappe de la craie est majoritairement situé sous le mur des alluvions à l'exception des périodes de hautes-eaux au cours desquelles le niveau s'établit dans les alluvions (1995, 2000, 2001,..).

Dans le référentiel hydrogéologique français (BD LISA) les alluvions réservoirs démarrent à partir de Glisolles (localité situées en Annexe 3). De Glisolles à la confluence avec l'Eure, le niveau de la nappe de la craie s'établit en effet généralement dans les alluvions (à l'exception du secteur d'Evreux à Normanville) ; la nappe de la craie et des alluvions étant en connexion hydraulique.

Cet aquifère correspond à l'unité aquifère n°924AC07—« Alluvions actuelles à anciennes de l'Eure et de l'Iton du Bassin Parisien » du référentiel hydrogéologique français (BD LISA).

6.1.5. Nappe de la craie

Le principal système aquifère de la zone d'étude est la nappe de la craie. Il est constitué par les eaux souterraines contenues dans les assises crayeuses du Cénomanien, du Turonien et du Sénonien. Le substratum théorique de la nappe de la craie est constitué par les argiles du Gault. En pratique, la craie est un matériau hétérogène, il existe des hétérogénéités (banc marneux, hard ground, failles…) qui peuvent constituer des obstacles aux écoulements au sein de la matrice crayeuse. Sous les plateaux, la craie est généralement compacte et peu fissurée ; la nappe est alors contenue dans la porosité propre de la roche. En revanche, sous les vallées sèches et les vallées humides, qui constituent des axes de drainage privilégiés, l'action de dissolution des eaux souterraines a largement agrandi les fissures ; l'écoulement de la nappe est donc bien plus rapide. En règle générale, les cours d'eaux représentent le niveau de base de la nappe de la craie et les niveaux nappe/rivière s'équilibrent. Les secteurs du bassin de l'Iton entre Damville et La Bonneville et entre Evreux et Tourneville font exception à la règle (Artis et al., 1971).

Du fait des perméabilités moyennes mesurées, deux unités aquifères au sein de l'aquifère de la craie sont parfois distinguées :

- la nappe du cénomanien et du turonien inférieur,
- la nappe du turonien supérieur ou sénonien.

Il est toutefois à noter que ces deux unités aquifères sont en connexion hydraulique et constituent un seul aquifère.

Nappes du cénomanien et du turonien inférieur

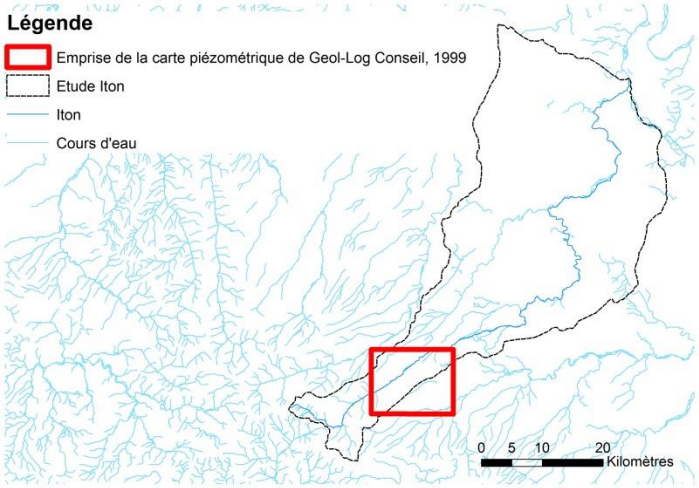
Il s'agit d'un ensemble hydrogéologique continu ou discontinu selon les secteurs (notice de la carte géologique n° 214). Les deux horizons (Cénomanien et Turonien) sont parfois séparés par 1 à 4 m d'argiles (dans certains secteurs de l'amont de la Risle et de l'Iton). Toutefois la présence de ces argiles n'a été que ponctuellement observée sur certains logs géologiques. L'aquifère est libre à semi-captif et parfois localement captif au moins dans la vallée de l'Iton à l'amont, sous les alluvions et les argiles à silex (exemple de cas de captivité mis en évidence au captage AEP de Chandai ou au forage AEP des Planches n°02141X0034). Le rapport Geol-Log Conseil de 1999 indique d'ailleurs explicitement que la nappe de la craie est captive au moins dans la vallée de l'Iton [amont] sous les alluvions et argiles à silex.

Le rapport Oolite de 2012 (Oolite, 2012), indique qu'au niveau de Moulin Rollin à Vitrai-sous-L'aigle (61), l'aquifère du Cénomanien est de type semi-captif mais que cependant l'aquifère du Turonien participe par drainance à l'alimentation de la nappe du Cénomanien. La protection de l'aquifère Cénomanien est donc relative puisque les nitrates peuvent migrer vers cette nappe.

Dans les secteurs de vallée, la nappe a pu localement être observée artésienne sous les alluvions et les argiles à silex (ouvrages 021443X0052, 02144X0043 et 02144X0046 : le forage 021443X0052 capte le Cénomanien tandis que les 2 autres captent le Turonien). Généralement, les forages d'eau potable captent l'une ou l'autre ou les deux formations en même temps. La craie turonienne a été observée karstifiée et la craie cénomanienne très fracturée.

Une carte piézométrique locale de la nappe du Turo-Cénomanien à l'amont du BV de l'Iton a été réalisée en 1999 par Géo-log Conseil entre Crulai et Chandai (Geol-Log Conseil, 1999) (Illustration 69).

Cet aquifère correspond aux unités aquifères n° 123BS01— « Marnes et craie marneuse, sableuse et glauconieuse du Cénomanien du Bassin Parisien du Neubourg au Saint-André - bassin versant de l'Eure, Iton, Avre (bassin Seine-Normandie) » et n°121AS30— « Craie marneuse et marnes du Turonien inférieur du Bassin Parisien du Neubourg au Saint-André - bassin versant de l'Eure, Iton, Avre (bassin Seine-Normandie) » du référentiel hydrogéologique français (BD LISA).



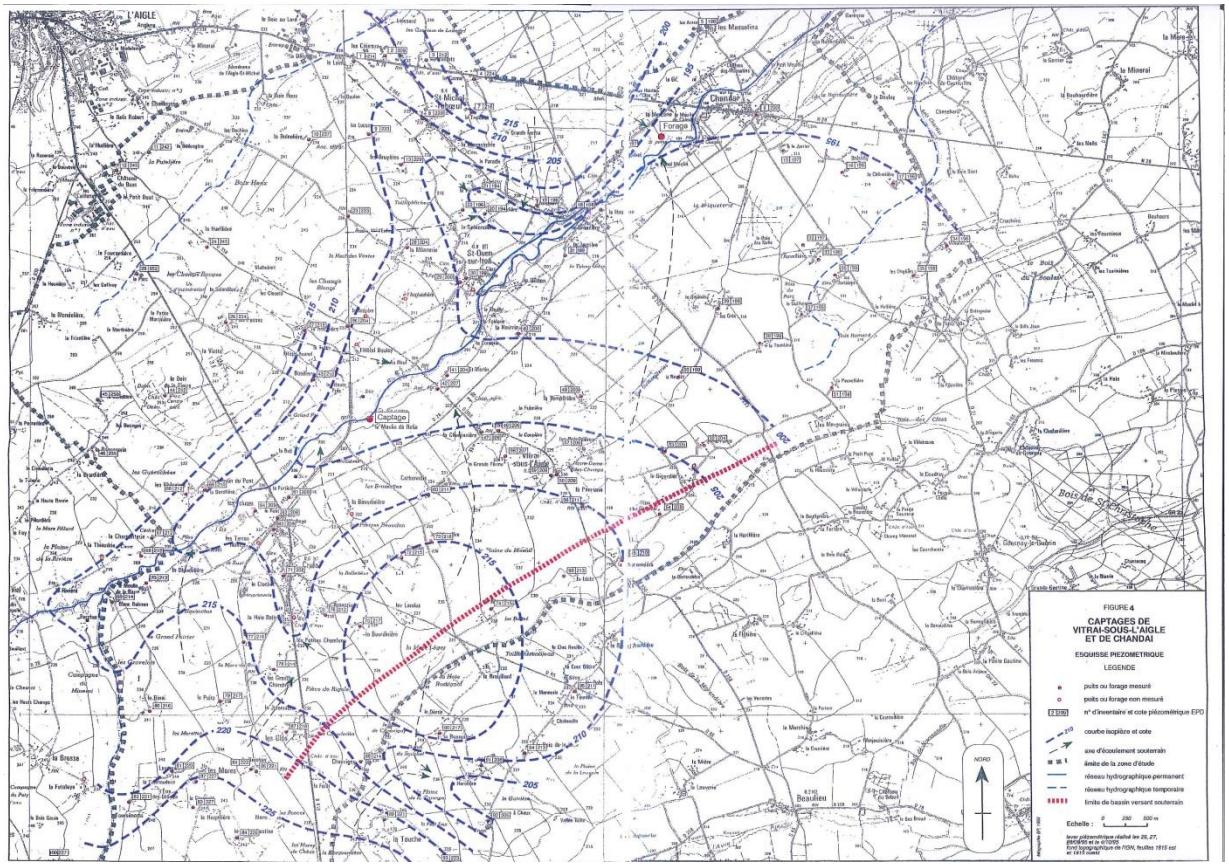


Illustration 69 : Carte piézométrique locale de la nappe du turo-cénomanien à l'amont du BV de l'Iton entre Crulai et Chandai (Geol-Log Conseil, 1999)

Nappe du Turonien supérieur au Sénonien

Cette nappe, contenue dans les craies du Turonien supérieur au Sénonien, se situe à l'aval du bassin versant. Elle est en continuité hydraulique avec la nappe de la craie du Cénomanien et du Turonien inférieur. Ces craies aquifères ont une forte teneur en carbonates avec une porosité importante et homogène. L'épaisseur peut dépasser 100 m. Cet aquifère offre des perméabilités importantes notamment en vallée.

Cette nappe est libre. Toutefois, un cas d'artésianisme est mentionné dans la bibliographie en vallée à l'amont de Damville. Il s'agit du puits de ROMAN (01798X0006) qui présentait le 20/01/1967 un artésianisme d'environ +0,55m au-dessus du sol. D'après Antea, aujourd'hui cet artésianisme a disparu ; le 21/01/1997, le niveau piézométrique « au repos » était de 5,04m sous la surface du sol (Antea, 1997) dans (Anus, 2000).

Cet aquifère correspond à l'unité aquifère n°121AS01—« Craie du Séno-Turonien du Bassin Parisien du Neubourg au Saint-André - bassin versant de l'Eure, Iton, Avre (bassin Seine-Normandie) » du référentiel hydrogéologique français (BD LISA).

6.1.6. Nappe albo-aptienne

La nappe albo-aptienne est une nappe captive séparée de la nappe de la craie par les argiles du Gault, formation imperméable qui constitue le toit de la nappe albo-aptienne, captive, et le mur de la nappe de la Craie.

Cette nappe s'étend sous tout le bassin de l'Iton et disparait vers le Sud-ouest de la Haute-Normandie. La limite d'extension de cet aquifère varie dans la bibliographie (parfois placée proche de la limite Sud-Ouest de l'ex-Haute-Normandie parfois légèrement au-delà. En Haute-Normandie, l'épaisseur de cet aquifère diminue rapidement au Sud-ouest d'une ligne reliant le Havre, Bernay et Verneuil. Dans le Lieuvin et l'ouest du Pays d'ouche, les sables verts sont réduits à quelques lentilles dans des argiles. Dans le département de l'Eure, la nappe des sables verts n'est puissante qu'à l'Est et au Nord du département.

Une carte piézométrique de la nappe de l'Albien couvrant le bassin de l'Iton est présentée à l'Illustration 70. La direction principale des écoulements au droit du bassin de l'Iton est orientée vers le Nord-Est.

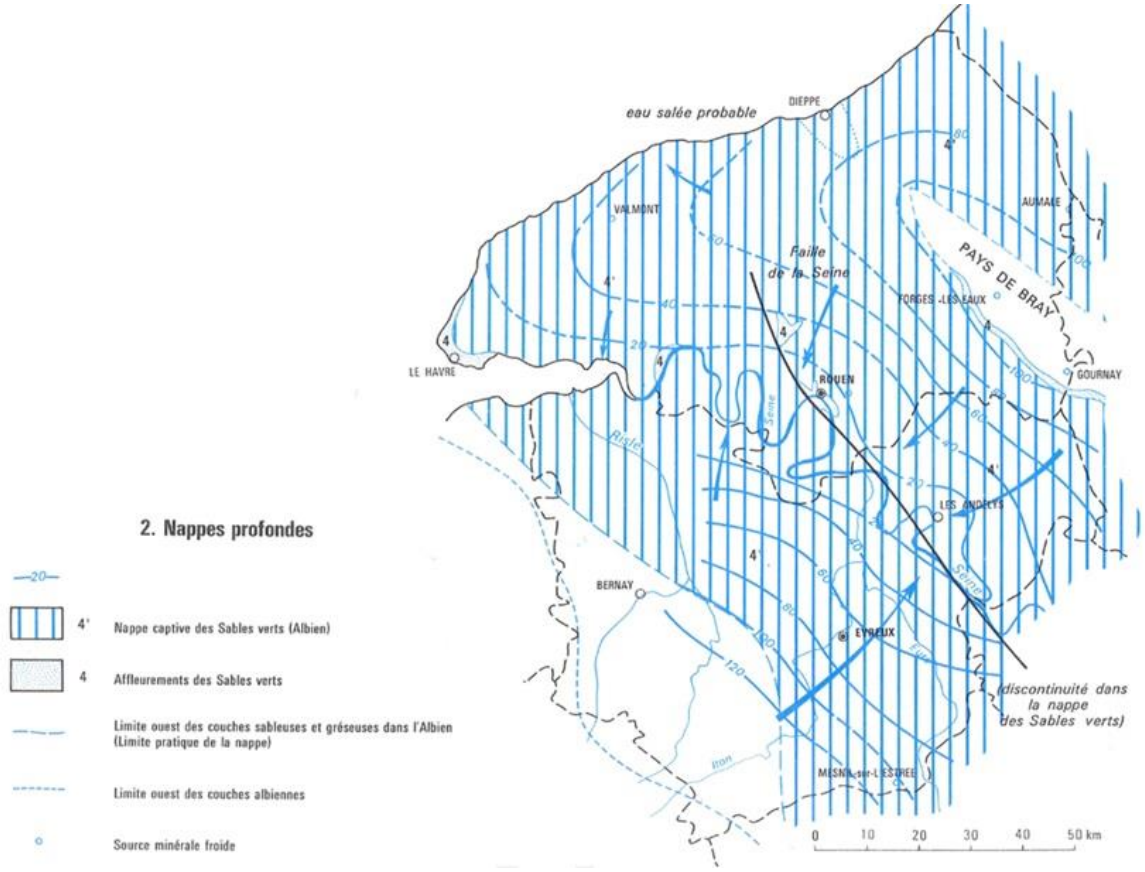


Illustration 70 : Carte piézométrique de la nappe de l'Albien pour la Haute-Normandie (Atlas des eaux souterraines de la France (BRGM, 1970-1972)) (la rivière Iton est mentionnée sur cette carte et permet de situer la zone d'étude)

Le rapport BRGM/86-SGN-664-HNO présente les possibilités de production d'eau pour l'AEP à partir des aquifères profonds de Haute-Normandie : sables Albiens, calcaires du Portlandien, calcaires du Kimméridgien, Sables de Glos et calcaires coralligènes de l'Oxfordien et calcaires du dogger.

Ce rapport conclut que les sables de l'Albien sont hétérogènes mais que des productions avoisinant les 90m^3/h peuvent être obtenus en Haute-Normandie au nord de la Seine. Dans l'Eure, la puissance de la série (qui remonte vers la surface du sol au sud du département) diminue et les productions se réduisent à des valeurs de 30 à 40 m^3/h.

Depuis 2001, le SDAGE Seine-Normandie définit les nappes captives de l'Albien-Néocomien comme étant une ressource stratégique pour assurer la fonction de ressource AEP de secours ultime. En complément au dispositif de gestion du SDAGE, la nappe de l'Albien-Néocomien est classée en Zone de Répartition des Eaux (ZRE). Son exploitation pour l'eau potable est donc contrôlée et limitée pour préserver la ressource en quantité suffisante en cas de crise.

Cet aquifère correspond à l'unité aquifère n°127AA99—« Sables indifférenciés et argiles de l'Apto-Albien du Bassin Parisien» du référentiel hydrogéologique français (BD LISA).

6.2. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Les différents paramètres hydrodynamiques (débit spécifique, transmissivité, perméabilité, Coefficient d'emmagasinement), déterminés lors de la réalisation d'essais de pompage sur des puits ou forages, ont été collectés et compilés dans le cadre de cette étude principalement à partir des dossiers de la Banque du Sous-Sol (BSS) mais également en consultant les archives du Conseil Départemental de l'Eure et du Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne.

Afin de comparer les caractéristiques hydrodynamiques des différents aquifères, les puits/forages disposant de paramètres hydrodynamique ont été rattachés dans la mesure du possible à l'aquifère qu'il capte.

La carte ci-dessous (Illustration 71) présente les résultats de ce travail pour les débits spécifiques[11].

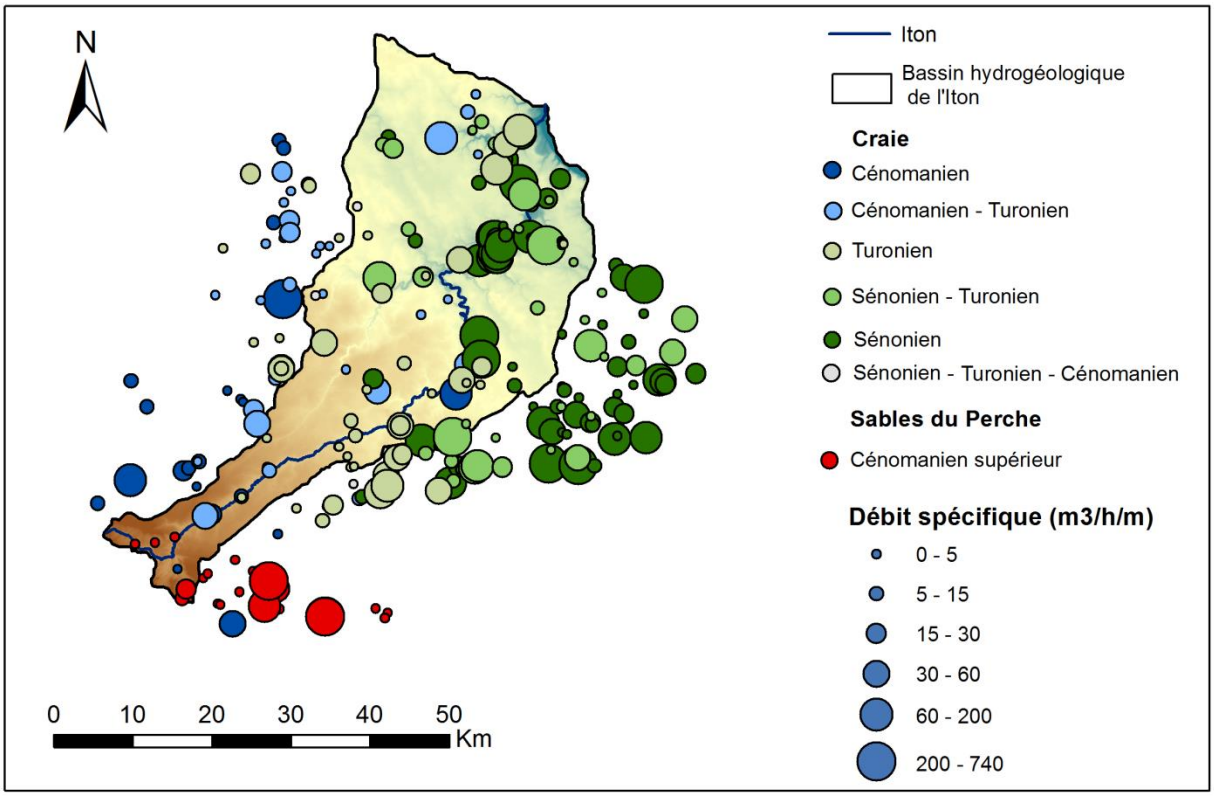


Illustration 71 : Débits spécifiques mesurés autour de la zone d'étude et étages crayeux associés

Le débit spécifique donne, en première approximation, une idée de la productivité de l'aquifère. Au vu de ces résultats, il apparait que les débits spécifiques les plus importants sont mesurés sur les ouvrages situés en vallée. Par ailleurs il semble que les forages captant l'aquifère du Sénonien disposent des débits spécifiques les plus importants, avec une valeur moyenne de 63 $m^3/h/m$.

Les données de transmissivité sont plus rarement disponibles. En effet, cette donnée nécessite la réalisation d'un pompage d'essai dans les règles de l'art et son interprétation. La transmissivité exprimée en m^2/s qui rend compte de la capacité de l'aquifère à laisser circuler

[11] rapport du débit de pompage (en m3/h) sur le rabattement (en m) provoqué par ce pompage

l'eau (débit pouvant circuler par unité de largeur de l'aquifère). Elle est le produit du coefficient de perméabilité (m/s) et de la hauteur d'eau de la nappe (m). L'Illustration 72 présente les différentes valeurs de transmissivité disponibles.

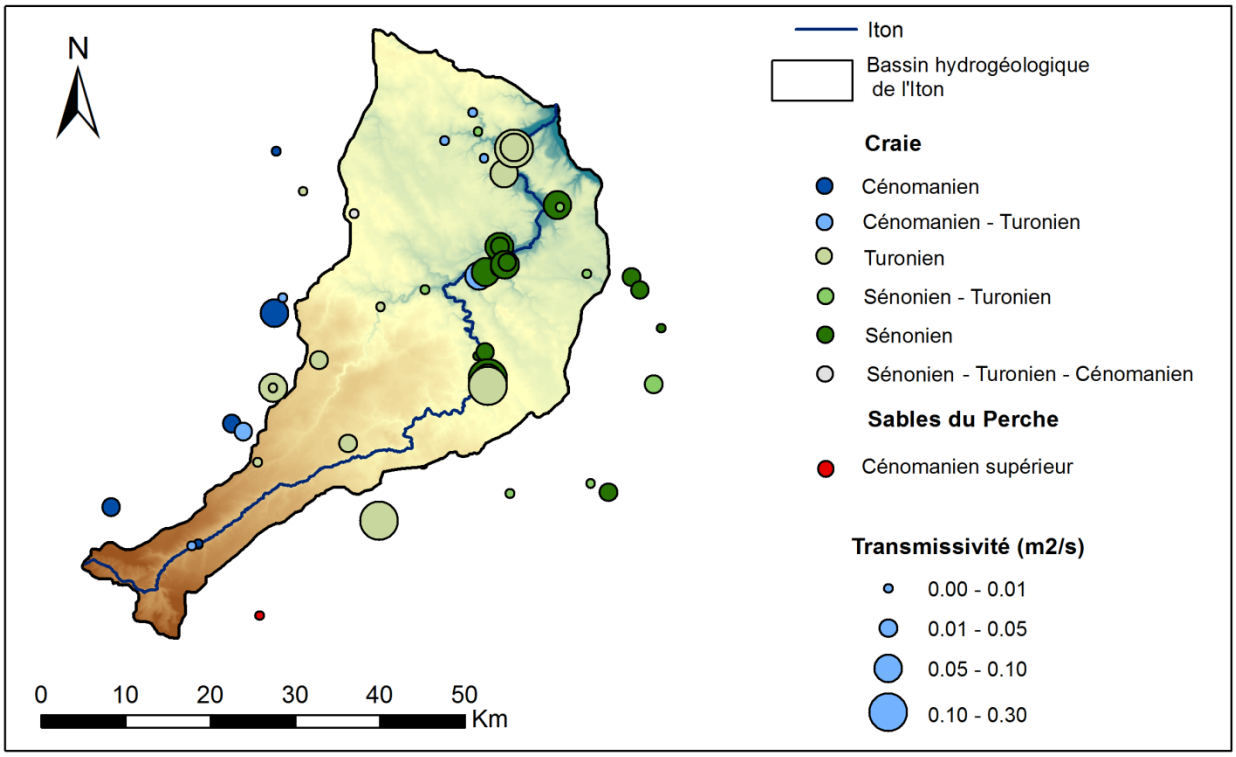


Illustration 72 : Transmissivités mesurées autour de la zone d'étude et étages crayeux associés

Une étude statistique a été menée en parallèle de la réalisation des cartes présentées ci-dessus. L'Illustration 73 présente les résultats graphiques de ce traitement.

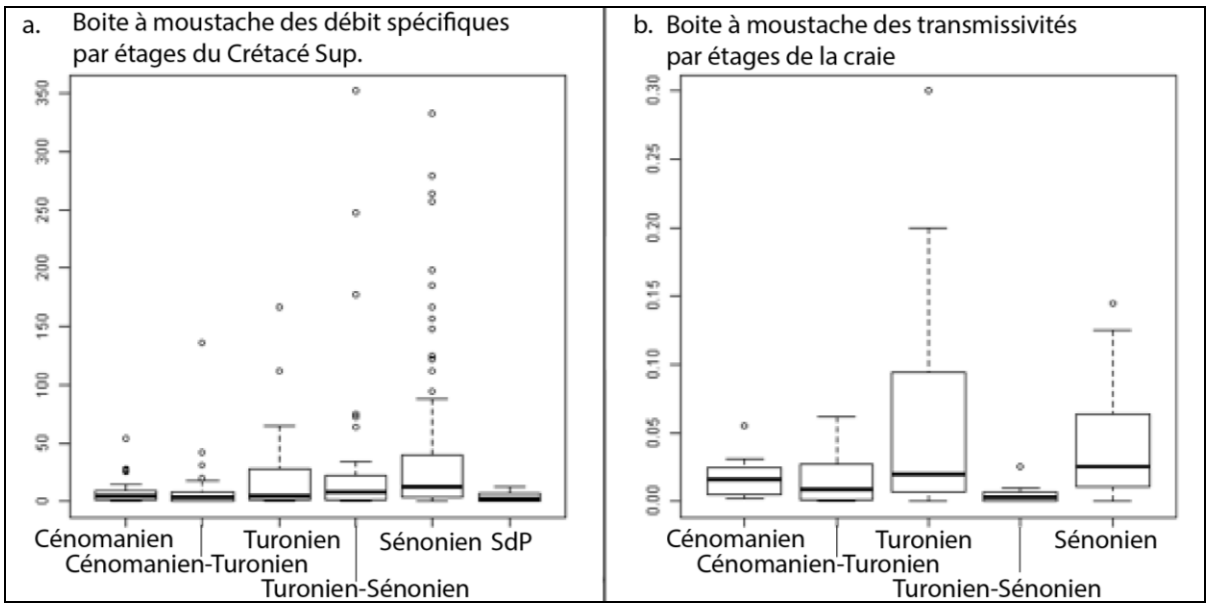


Illustration 73 : Comparaison des débits spécifiques (m3/h/m) et des transmissivités (m²/s) des différents aquifères – (SdP signifieSables du Perche)

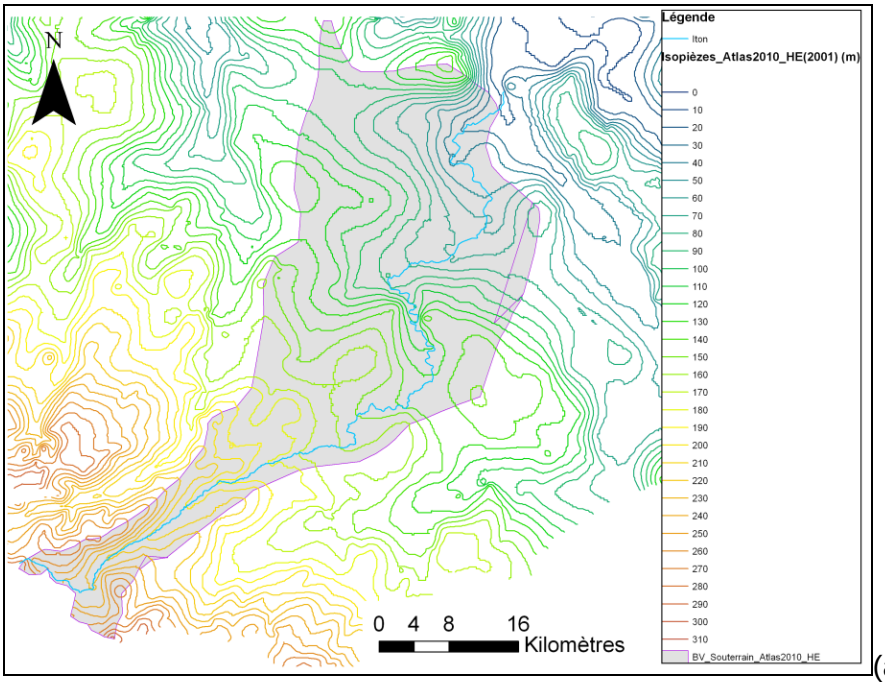
L'Illustration 73 montre que les craies du Turonien et du Sénonien présentent les plus fortes valeurs de débit spécifique et de transmissivité et que les Sables du Perche (SdP) et les craies du Cénomanien semblent moins productifs. Ces différences dans les paramètres hydrodynamiques sont similaires dans de nombreuses zones de Haute-Normandie, et peuvent s'expliquer au moins en partie par les différences lithologiques existant entre ces couches. En effet, les couches du Cénomanien comportent souvent une proportion non négligeable d'argiles qui contribuent à abaisser la perméabilité de la roche. A l'inverse, les faciès plus récents comme le Turonien ou le Sénonien correspondent à des craies plus franches et moins argileuses, qui ont donc des perméabilités plus importantes.

6.3. PIEZOMETRIE

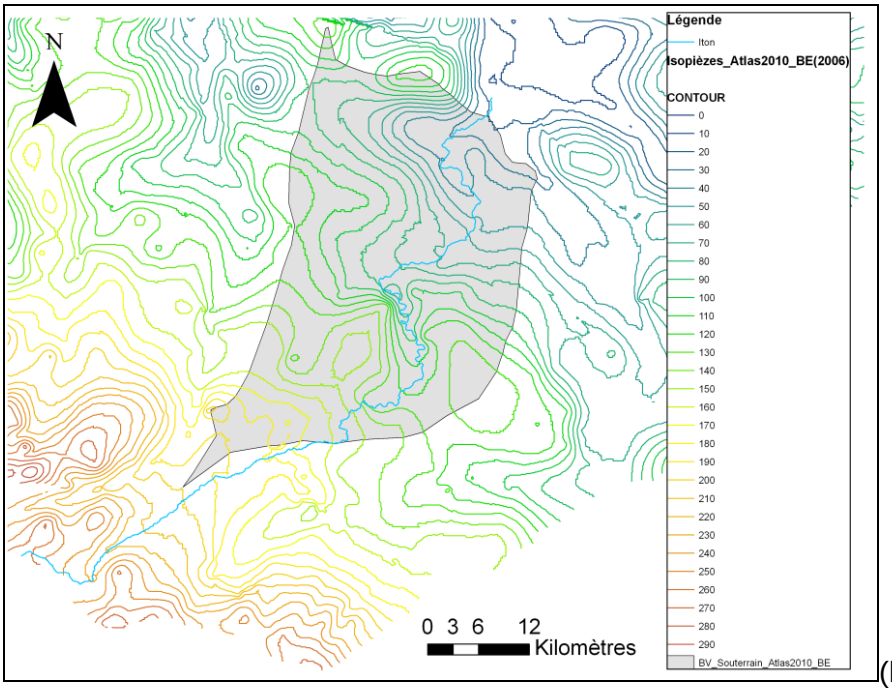
6.3.1. Fluctuation du bassin versant hydrogéologique de l'Iton

L'Atlas hydrogéologique de Haute-Normandie de 2011 fournit des cartes piézométriques réalisées à partir de campagnes piézométriques de hautes eaux (2001) et de basses eaux (2006). Le bassin versant hydrogéologique de l'Iton a été tracé à partir de ces 2 cartes piézométriques (Illustration 74). Il apparait qu'en situation de basses eaux, le bassin versant hydrogéologique de l'Iton semble diminuer du fait de la disparition de la crête piézométrique séparant le BV de l'Iton du BV de l'Avre (le bassin hydrogéologique de l'Iton amont serait alors capté par celui de l'Avre).

Afin de vérifier cette hypothèse, dix piézomètres ont été équipés spécifiquement par le BRGM de septembre 2013 à août 2015 pour tenter de lever cette incertitude. Les données de ce suivi sont présentées à l'Illustration 5 et Illustration 6. Il apparait que dans le secteur des Barrils (Illustration 5 et Illustration 6) la crête piézométrique est bien marquée contrairement au secteur de Piseux (entre Verneuil et Breteuil) où la crête piézométrique est très peu marquée. Dans ce dernier secteur, l'écart de hauteur entre la crête piézométrique et le niveau de la nappe au droit de l'Iton est inférieur à 2 m (Illustration 6). Il n'est donc pas exclu qu'en période de vidange prononcée de l'aquifère, la crête piézométrique s'efface et que les écoulements s'inversent (drainage du bassin souterrain de l'Iton par le bassin souterrain de l'Avre).



(a)



(b)

Illustration 74 : Bassin versant hydrogéologique de l'Iton en hautes eaux (2001) (a) et basses eaux (2006) (b)

6.3.2. Fluctuations de la nappe de la craie

L'Illustration 75 présente plusieurs chroniques piézométriques (profondeur par rapport au sol, et piézométrie normalisée) (Charlier et al., 2015) pour comparer les différentes dynamiques entre 1997 et 2015 avec un zoom sur le cycle hydrologique 2012-2013. On observe sur les

chroniques pluriannuelles le caractère exceptionnel des hautes eaux de 1999-2001, suivi par une décennie de basses eaux.

On remarque que la quasi-totalité des piézomètres semblent être affectés par une composante pluriannuelle de leur fluctuation et semblent être en phase. Les fluctuations saisonnières sont en revanche plus ou moins marquées selon le piézomètre.

Le piézomètre de Cierrey se distingue des autres piézomètres pour deux raisons : (1) le signal saisonnier n'est pas visible et (2) les fluctuations pluriannuelles sont déphasées de 2 à 3 ans par rapport aux autres piézomètres.

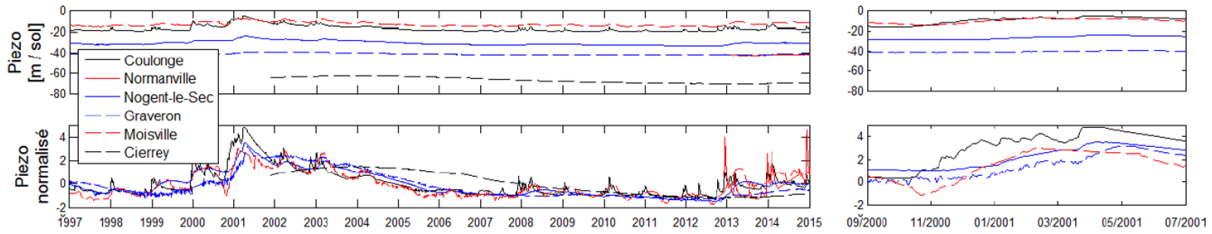


Illustration 75 : Comparaison de quelques chroniques piézométriques du bassin de l'Iton entre 1997 et 2015 (à gauche) avec un zoom en 2000-2001 (à droite) ; la piézométrie est exprimée en profondeur par rapport au sol, et en niveau d'eau normalisé pour comparer les dynamiques entre elles (Charlier et al., 2015) – (Le piézomètre de Normanville mentionné sur ce graphique est le 01502X0089)

Afin d'aller plus loin dans l'analyse des fluctuations piézométriques, les variogrammes des différents piézomètres ont été analysés (localisation des piézomètres à l'Illustration 76, détails techniques des piézomètres en Annexe 1).

Variogrammes des chroniques piézométriques

L'objectif de l'analyse géostatistique des chroniques piézométriques est de dégager la structure des courbes d'évolution des niveaux piézométriques. La méthode mise en œuvre repose sur le calcul automatique des variogrammes piézométriques. Cette méthode consiste, par l'intermédiaire d'un variogramme temporel, à comparer sur un piézomètre donné et pour différentes valeurs de Δt, une mesure à un temps t à une mesure à un temps t +Δt. La méthode géostatistique présente l'avantage de pouvoir caler un modèle théorique de variogramme sur la courbe expérimentale, valable pour toute une gamme d'intervalles de temps. Il est aussi possible de comparer de façon systématique les différents variogrammes obtenus en les regroupant par familles, ceci indépendamment des périodes sur lesquelles ont été acquises les chroniques piézométriques.

Dans le cadre de l'étude menée par Lopez et al. (BRGM, 2012), les résultats des ajustements automatiques des variogrammes expérimentaux ont été analysés à la fois visuellement et en fonction des valeurs prises par les différents paramètres. Cette approche « à dire d'expert » permet d'identifier différentes classes de comportement hydrodynamique. Ces classes ont été revues dans le cadre de la présente synthèse afin d'apporter une interprétation plus locale des résultats (Illustration 76).

On observe sur l'Illustration 76 que les secteurs de l'aquifère situés loin des axes de drainage que constituent les vallées, sont des secteurs très inertiels où les fluctuations se font à un rythme pluriannuel (sans ou avec peu de fluctuations saisonnières).

Les secteurs de l'aquifère de la craie situés en vallées comportent des fluctuations mixtes (interannuelles et saisonnières) voir même avec une dominante saisonnière comme sur la commune de Normanville (piézomètre n°01501X0002).

On constate toutefois qu'il existe certains secteurs de plateau qui possèdent néanmoins des cycles saisonniers bien marqués (piézomètre de Moisville par exemple) ; ce qui montre la présence de recharge relativement rapide même dans certains secteurs de plateau. Une faille traversant le plateau est suspectée sur ce secteur et pourrait expliquer ces recharges saisonnières plus marquées.

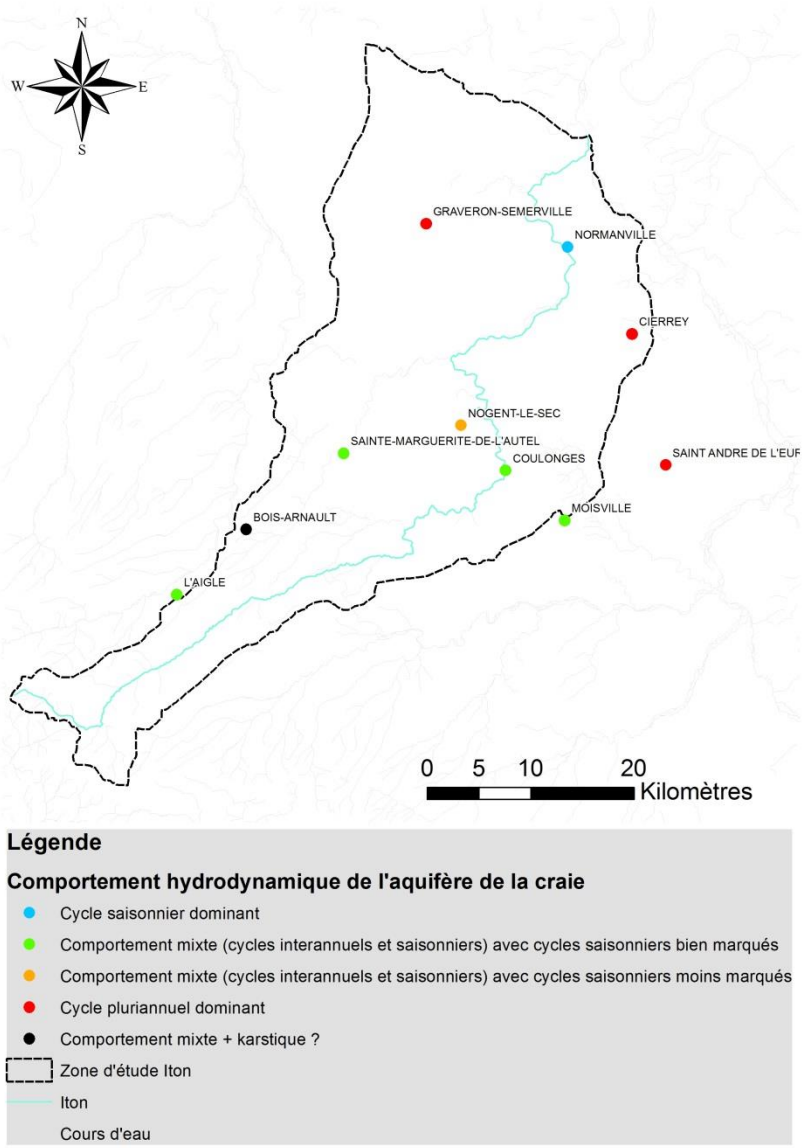


Illustration 76 : Comportement hydrodynamique de l'aquifère de la craie dans le bassin de l'Iton (dpt 27 et 61) - (Le piézomètre de Normanville mentionné sur ce graphique est le 01501X0002)

Remarque sur la méthode : l'analyse des chroniques piézométriques par variogrammes peut être biaisée par la longueur des chroniques disponibles (cf. annexe 1). Par définition, il est en effet impossible de mettre en évidence des cycles pluriannuels dont la période serait plus longue que la taille de la chronique elle-même. Le nombre de piézomètres appartenant aux classes de comportements hydrodynamiques inertiels est ainsi vraisemblablement sous-estimé.

Cas particulier des fluctuations de la nappe de la craie dans le sec-Iton

Dans le cadre de l'étude menée entre 1968 et 1971, le BRGM a équipé 2 puits de limnigraphes dans le Sec-Iton (Artis et al., BRGM 1971) :

- Puits des Boscherons : 01794X0003 de janvier 1968 à janvier 1971 puis déplacé au puits de la Touchardière à Coulonges de janvier 1971 à mai 1971 ;
- Puits des Haisettes : 01498X0031 de juillet 1969 à mai 1971.

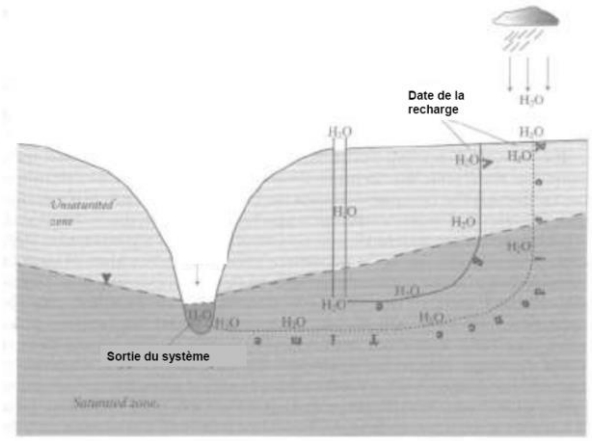
Plusieurs observations ont pu être réalisées (Artis et al., BRGM 1971) :

- des fluctuations interannuelles importantes sont mesurées malgré la position en vallée de ces piézomètres (fluctuations de 2,85 m à 3,8 m). Ces fluctuations semblent plus fortes à l'amont qu'à l'aval (du sec-iton) ;
- les fluctuations sont très brusques et rapides aussi bien à la montée qu'à la descente. Le réseau souterrain réagit rapidement aux crues de l'Iton et à la vidange ;
- la nappe n'atteint jamais la cote de l'Iton. Le décrochement subsiste donc pendant les crues normales (Artis et al., BRGM 1971), à l'exception du puits des Haisettes qui semble se reconnecter à la rivière ponctuellement en février 1971.

6.4. DATATION DES EAUX SOUTERRAINES

Dater les eaux souterraines signifie déterminer l'âge de l'eau souterraine, i.e. le temps écoulé à partir du moment où l'eau devient souterraine, en d'autres termes, depuis son infiltration dans le sol à partir des précipitations ou depuis tout autre type d'eau de surface (rivières, lacs).

Cette notion d'âge de l'eau a été définie il y a une 50aine d'années mais le concept a évolué depuis. On considère actuellement le temps écoulé entre l'entrée de l'eau souterraine dans le réservoir au niveau des aires de recharges et la sortie de l'eau du système par les aires de décharges est un temps de résidence. On peut définir également l'âge de l'eau comme le temps écoulé entre l'entrée de l'eau dans le système et une localisation spécifique de l'aquifère, en général le point de prélèvement.



Source : Kazemi et al., 2006

Illustration 77 : Représentativité de l' « âge » de l'eau et du temps moyen de résidence (Arnaud et Baran, BRGM, 2009)

A un point donné (forage, source), l'eau collectée correspond à une multitude de gouttes d'eau accumulées ayant un âge plus ou moins grand. Etant donné qu'un échantillon d'eau souterraine est l'intégration de nombreuses lignes de flux, le résultat de la datation ne représente pas un âge « unique » mais plutôt une moyenne pondérée d'une distribution de l'âge des eaux souterraines. C'est pour cela que l'âge estimé par les traceurs chimiques est considéré et nommé âge « apparent ». Ainsi pour parler de l'âge d'une eau on pourra indiquer un temps moyen de résidence des eaux au sein d'un aquifère, de l'âge moyen de la recharge ou d'un pourcentage moyen d'eau jeune. Il existe plusieurs méthodes pour calculer ou estimer l'âge des eaux souterraines à l'aide de traceurs géochimiques (tritium, CFC, SF_6,…).

La datation est intéressante notamment pour l'interprétation des données d'évolution des teneurs en nitrates. Les datations permettent en effet d'argumenter les inerties de réponses de la qualité des aquifères aux variations de pression azotée et de pluie efficace. Par exemple, dans les secteurs où les eaux ont un âge apparent récent, il est possible que les eaux souterraines s'équilibrent rapidement avec les activités en surface qui guideraient ainsi de façon majoritaire l'état de contamination des eaux.

Dans le cadre de l'étude de Lopez et al. (Lopez et al., BRGM 2012) menée à l'échelle du bassin Seine-Normandie, des campagnes de mesures ont été réalisées 2009 et 2010. Cependant seulement deux points de mesures ont concerné le bassin de l'Iton : à Vieil Evreux (01506X0043) et à Roman (01798X0006).

Le temps de résidence apparent à Vieil Evreux est estimé à 10 ans (calcul selon le modèle exponentiel), la teneur en nitrate était alors de 26,5mg/l. Le puits de Romans a en revanche fait l'objet de 2 prélèvements : une interprétation des données par le modèle Piston donne une date moyenne de recharge à 1987 pour le prélèvement de juillet 2010 et à 1997 pour celui d'octobre 2010 (les concentrations en nitrate étant respectivement de 51,2 mg/L et de 52,4 mg/L). Une interprétation des données par le modèle exponentiel donne un temps de résidence de 20-30 ans pour le prélèvement de juillet 2010 et de 15-20 ans pour celui d'octobre 2010.

La différence significative d'âge entre les deux prélèvements peut venir des conditions de pompage, d'un problème de prélèvement ou d'une variation de situation hydrologique (hautes eaux / basses eaux).

En utilisant le tableau de correspondance de l'Illustration 78, les résultats obtenus avec les différents modèles d'interprétation (exponentiel, piston,…) ont pu être représentés sur une même carte (Illustration 79).

Groupe d'âge	Modèle piston / Date de la recharge	Modèle exponentiel / temps de résidence (ans)	Mélange binaire / pourcentage d'eau jeune
1	>2000	<5	>95
2	1991-2000	5-15	81-95
3	1981-1990	16-25	56-80
4	1971-1980	26-35	31-55
5	1961-1970	36-45	10-30
6	≤1960	>45	<10

Illustration 78 : Constitution des groupes d'âge apparent suivant le modèle d'écoulement utilisé pour la datation (Lopez et al., BRGM 2012)

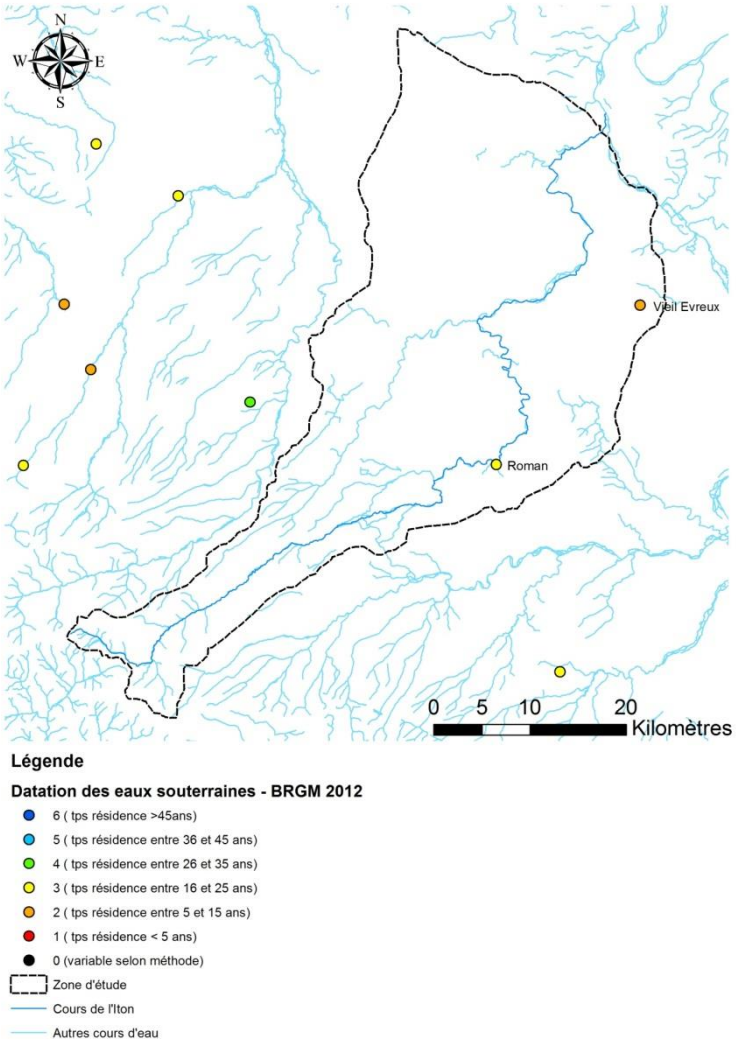


Illustration 79 : Datation des eaux souterraines (données brutes extraites de l'étude (Lopez et al., BRGM 2012))

6.5. LES SOURCES ET RESURGENCES

La base de données du karst de Haute-Normandie[12] recense 84 sources dans le bassin topographique de l'Iton, réparties en 4 zones géographiques :

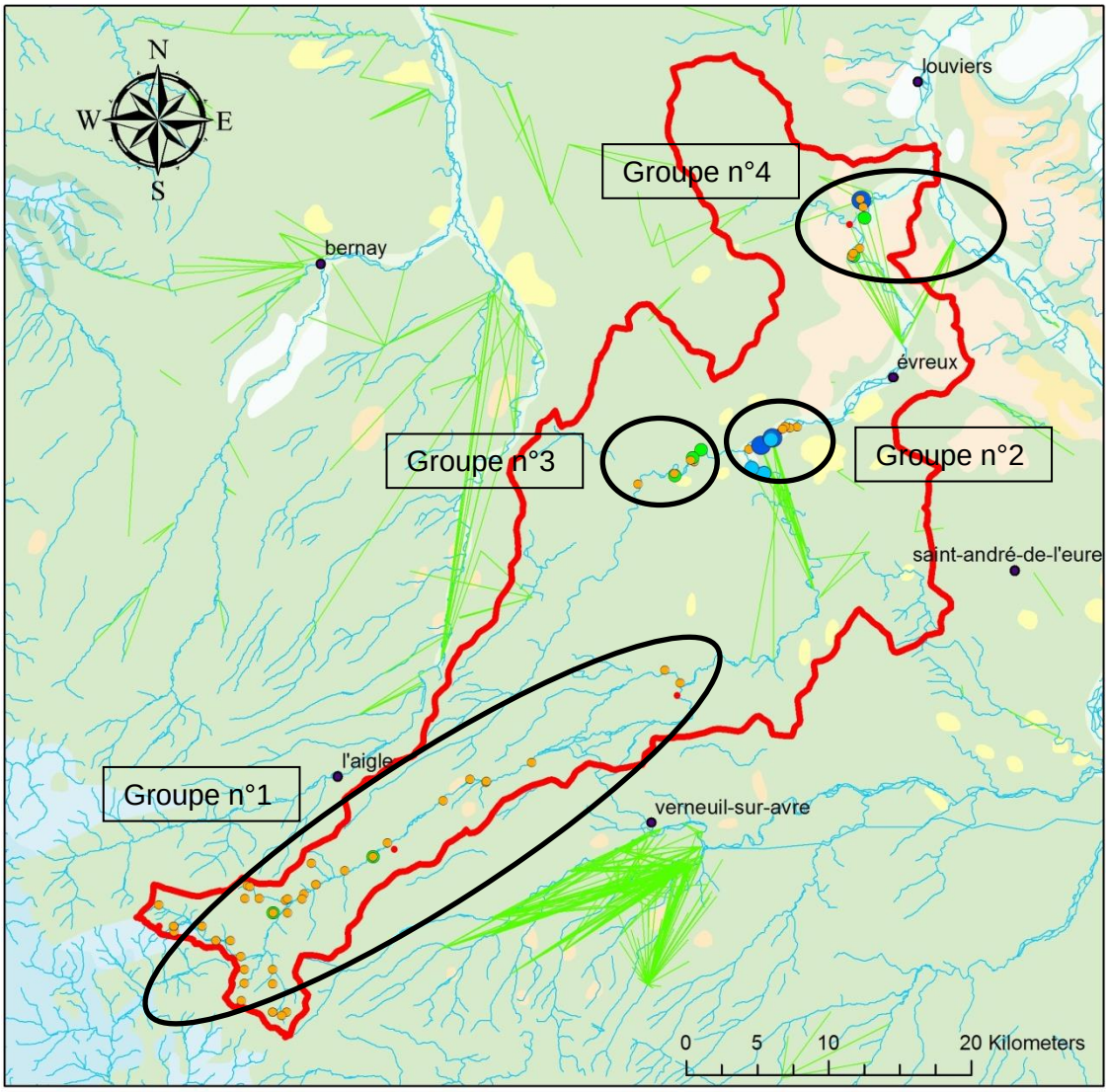
- 1) Groupe 1 : sources de l'amont du bassin : depuis la naissance de l'Iton jusqu'à Condé-sur-Iton. Cette zone, notamment sa partie amont dans les collines du Perche contient la plus forte densité de sources ;
- 2) Groupe 2 : la deuxième zone de sources est située entre Gaudreville-la-Rivière et la Bonneville-sur-Iton ;
- 3) Groupe 3 : la troisième zone de sources correspond aux différentes sources du Rouloir entre Conche-en-ouche et Glisolle ;
- 4) Groupe 4 : enfin la dernière zone de sources se situe entre Brosville et Hondouville. Plus à l'Est on constate également la présence de sources dans la vallée de l'Eure (source de Cailly-sur-Eure) qui sont en relation directe avec le bassin versant de l'Iton (liens prouvés par traçages).

L'ensemble de ces sources ainsi que leurs débits (lorsque la donnée est disponible) est présenté à l'Illustration 80.

Ces nombreuses sources peuvent être classées en plusieurs catégories (De La Queriere et Pascaud, 1969) :

- les sources de tête de vallée humide qui correspondent à l'affleurement de la nappe ;
- les sources artésiennes de vallée humide qui correspondent au jaillissement de l'eau sous forme d'une vasque dans la craie suite à une mise en pression par les alluvions et argiles à silex moins perméables. C'est le cas de la source de la Fontaine d'Hondouville et des sources de Brocfontaine à Brosville ;
- les sources karstiques comme celles de Cailly-sur-Eure, qui correspondent à la résurgence d'un réseau karstique développé en amont.

[12] Données téléchargeables depuis le SIGES Seine-Normandie : http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article116



Légende

Sources (débits en l/s)

- sans données
- 0.01 - 50
- 50 - 100
- 100 - 300
- > 300
- BV topographique de l'Iton
- Traçages positifs (base de données Haute-Normandie)
- Cours d'eau

Illustration 80 : Sources du bassin versant de l'Iton (données du SIGES Seine-Normandie - http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article116)

Groupe 1

Le tronçon de l'Iton compris entre sa source et Condé-sur-Iton, et notamment la partie amont dans les collines du Perche, contient la plus grande densité de sources du bassin. Il s'agit toutefois de sources à faibles débits comme le montre la carte de l'Illustration 80. Deux sources présentent toutefois des débits supérieurs à 50 l/s : la source n°02147X0029 à l'amont du captage de la Bourdinière (80 l/s) sur la commune des Aspres et la source de la Fortinière n°02144X0011 à Crulai (60 l/s).

La source captée Les Bourdinières (02147X0006) sur la commune des Aspres est issue de la craie glauconieuse et est en liaison avec un système karstique. Elle présente une vulnérabilité importante lors d'épisodes pluvieux de forte intensité (notice de la carte géologique n°214).

Groupe 2

La deuxième zone de sources est située entre Gaudreville-la-Rivière et La Bonneville-sur-Iton.

Les expériences de traçages faites par le BRGM en 1970 ont montré que la plupart de ces sources sont des résurgences du Sec-Iton (Artis et al., BRGM 1971) :

- les sources du bois des carrières (01498X0024) (faible débit –une 10aine de l/s – sources souvent sèches).
- la fosse aux dames (01498X0005) (448 l/s en mai 1968 et 319 en octobre 1970)
- les résurgences de la Forge (01498X0046 et 01498X0047) (1450 l/s en octobre 1968)

La source des grands riants (01498X0025) (475 l/s en mai 68, 340 l/s en oct 68 et 220 l/s en octobre 1970) est la source permanente de l'Iton en toute saison. Elle se situe à Gaudreville en rive gauche de la vallée en pied de versant. Elle est principalement alimentée par la nappe des plateaux ouest de l'Iton. Cependant la coloration d'octobre 1970 a démontré qu'il existait une très légère liaison avec les pertes de l'Iton. Cette source serait donc faiblement connectée au karst amont de l'Iton (résultat positif lors de l'injection de la bétoire du Gard sur la commune du Sacq) et non connectée au karst aval (résultat négatif lors de l'injection à la bétoire des longs champs sur la commune de Gaudreville (Artis et al., BRGM 1971).

Il est à noter que les sources de la Forge sont les principales résurgences du système karstique sec-Iton.

A noter que 5 autres sources sont recensées en aval des sources de la Forge entre Aulnay/Iton et Arnière/Iton mais leurs débits sont limités (inférieurs à 50 l/s chacune) (Illustration 81).

01498X0076	**01498X0051 « trou de mouton »**	**01498X0015 « lavoir »**	**01498X0004 « Pré mou »**	**01498X0003 « le souci »**
Non jaugée (source recensée par Gaudriot en 2002)	30	30	20	36

Illustration 81 : Débits (l/s) des 5 sources situées dans la vallée de l'Iton entre Aulnay/Iton et Arnières/Iton (jaugeages réalisés entre 1967 et 1971)

Groupe 3

Cet ensemble de sources regroupe les différentes sources présentes dans la vallée du Rouloir. On distingue d'amont vers l'aval :

- la source du Rouloir (01793X0024/S) dont le débit a été estimé à 30 l/s en novembre 1970. Les mesures de jaugeage ponctuel de la DREAL indiquent en revanche des débits compris entre 216 l/s (sept 2004) et 988 l/s (juin 2001)
- en aval de cette source, entre le bourg de Conches-en-Ouche et la confluence avec l'Iton, le débit du Rouloir est soutenu par trois groupes de sources :
  - Sources « Le Cherpin » (01497X0015) (7l/s en nov 70), « de la Pisciculture » à Conches-en-Ouche (01497X0020) (5l/s en nov 70); « ex-aep » (01497X0014) (85l/s en nov 70) ;
  - Sources du « château de Quenet » (01497X0018) (50l/s en nov 70), de « La Fontaine Lallier » (01497X0016) (50l/s en nov 70) et du « Moulin Athelin » (01497X0017) à Saint-Elier (60l/s en nov 70) ;
  - Source de « Launay » (01497X0013) à Saint-Elier (75l/s en nov 70).

Groupe 4

Enfin la dernière zone de source se situe entre Brosville et Hondouville dans la vallée de l'Iton et à Cailly-sur-Eure dans la vallée de l'Eure (sources en relation directe avec le bassin versant de l'Iton).

Les sources de ce groupe n°4 qui ont fait l'objet d'un jaugeage en 1969 sont présentées ci-dessous (Illustration 82 et Illustration 84). Les traçages ont montré que certaines de ces sources sont des résurgences des pertes de la rivière dans le secteur Evreux-Normanville.

Commune	Num BSS	Désignation	Débit (l/s)
Hondouville	01501X0006/S	Source de la Fontaine	1093
Brosville	01501X0025/S	Source de Brocfontaine	165
La Vacherie	01501X0033/S	Source Cocke	88
Brosville	01501X0023/S	Source Lemarié	86
Brosville	01501X0021/S	Source de la Cressonnière	41
Brosville	01501X0022/S	Source de la pâture Lefevre	7
Hondouville	01501X0005/S	Source de la Fontaine	2
Hondouville	01501X0004/S	Fontaine Jean Bart	1

Illustration 82 : Débits mesurés aux différentes sources du groupe n°4 dans la vallée de l'Iton (De La Queriere et Pascaud, 1969)

Quatre sources présentent des débits supérieurs à 50 l/s. La source de la fontaine (N°01501X0006/S) à Hondouville possède le débit le plus important (1093 l/s). Il s'agit d'ailleurs d'une des sources les plus importantes de la Haute-Normandie. Cette source est probablement la résurgence d'un système karstique très développé dans les vallées sèches en rive gauche de

l'Iton, entre les communes du Neubourg et d'Hondouville, mais faute d'étude dédiée, ce système karstique n'est pas ou peu connu. Le rapport BRGM de 1991 (BRGM/91HNO053, Fay de l'Estrac H. et Mansas J., 1991), indique l'existence de ce « vaste réseau karstique qui se superpose aux nombreux vallons secs qui entaillent le plateau en rive gauche de l'Iton entre le Neubourg et Hondouville (grande vallée, vallée du mont Gouet, vallée de Landes, vallée aux Anes, la vallée ….). Ces axes d'écoulements privilégiés ont été reconnus par de nombreux sondages (Feuguerolles, Neubourg, Houetteville…) ». Ce même rapport indique que l'exutoire de ce réseau karstique se manifeste par de nombreuses sources dans la vallée de l'Iton (Fontaine d'Hondouville, source des courtieux, Fontaine Jean Bart…).
Des investigations pourraient être menées afin de déterminer le bassin karstique dont la source n°01501X0006/S est la résurgence (Illustration 83). Cette connaissance participerait à la connaissance de l'extension du bassin versant hydrogéologique de l'Iton et de son fonctionnement.

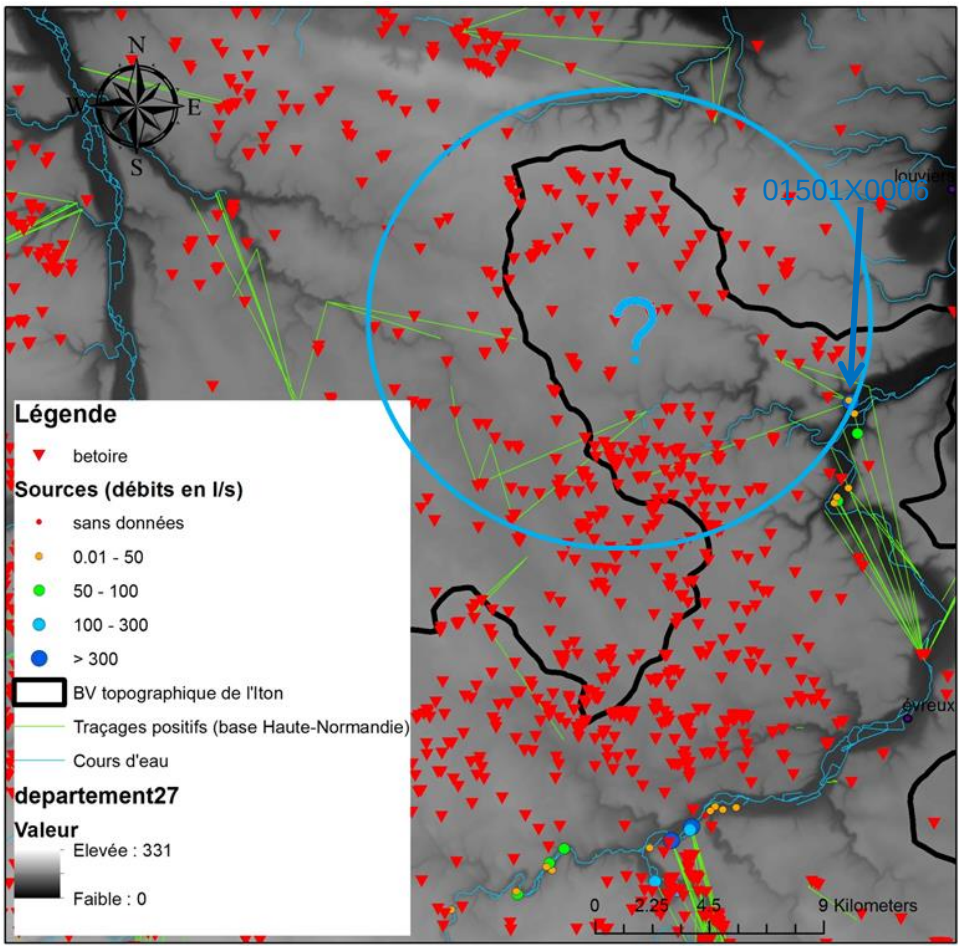


Illustration 83 : Carte localisant la zone à investiguer (par traçages notamment) pour connaitre le bassin d'alimentation de la source d'Hondouville (01501X0006/S)

Enfin le groupe de source n°4 inclut également des sources situées dans la vallée de l'Eure mais dont des traçages ont montré qu'elles constituaient des résurgences des pertes en rivière de l'Iton dans le secteur Evreux-Normanville (Illustration 84).

Commune	Désignation	Débit (l/s)
Cailly	Source pâture de Bouteret	< 0,5
Cailly	Source Jalounex	145
Cailly	Sources des Cressonnières Retout	30
Cailly	Sources du Vieux-Moulin	102
Cailly	Source de l'ancien moulin	161
Cailly	Sources des Cressonnières	50

Illustration 84 : Débits mesurés aux différentes sources du groupe n°4 dans la vallée de l'Eure (De La Queriere et Pascaud, 1969)

7. Synthèse hydrologique

Le bassin versant hydrographique de l'Iton, d'une surface de 1 195 km^2, est drainé par deux principaux cours d'eau : L'Iton, et son affluent le Rouloir. Le Rouloir est prolongé en amont par le Lême, même rivière mais s'écoulant essentiellement en souterrain. La présence d'un bras forcé est également à noter, qui dérive une partie du débit de l'Iton vers le bassin de l'Avre au Sud. L'Illustration 85 présente ces cours d'eau au sein du réseau hydrographique de la zone d'étude, ainsi que l'emplacement des principales stations hydrométriques, qui sont décrites dans le Tableau 8.

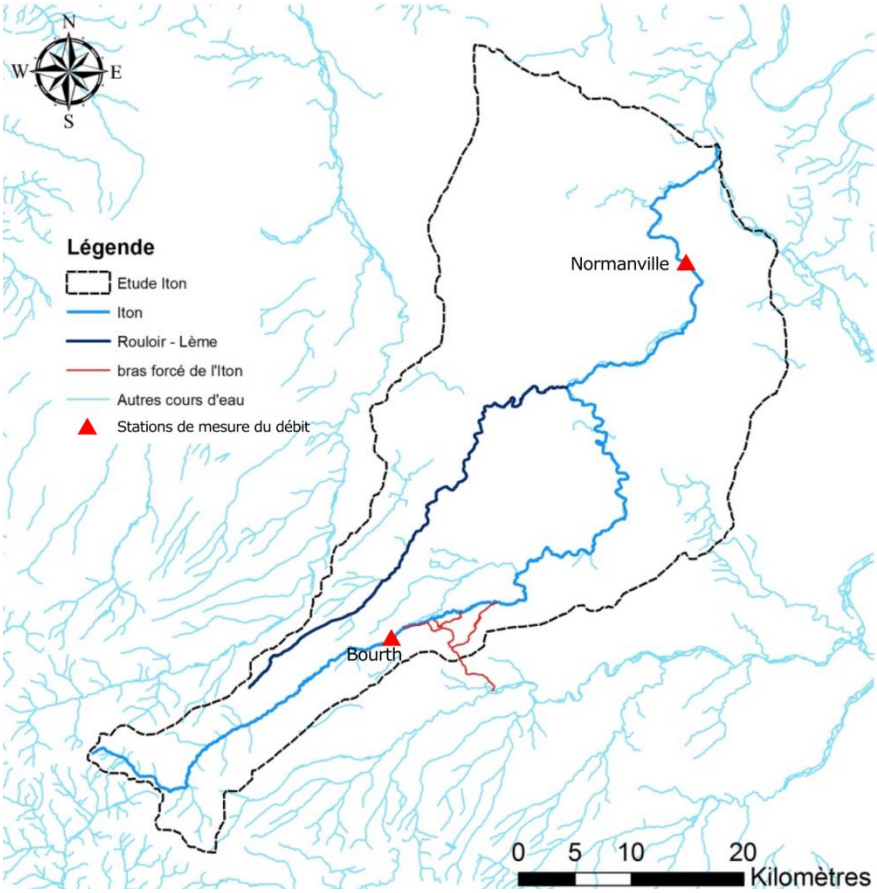


Illustration 85 : Localisation des cours d'eau du bassin versant de l'Iton et des stations de jaugeage

N° station	Rivière	Commune	Superficie BV amont	Période d'enregistrement	Paramètres mesurés
H9403510	ROULOIR	GLISOLLES	261 km^2	2003 – 2015	Hauteur
H9402050	ITON	LES ASPRES	68 km^2	2004 – 2015	Hauteur
H9402040	ITON	BOURTH	159 km²	1999 – 2015	Débit et hauteur
H9402060	ITON	DAMVILLE	352 km^2	2004 – 2015	Hauteur
H9402070	ITON	LA BONNEVILLE S/I	787 km^2	2003 – 2015	Hauteur
H9402030	ITON	NORMANVILLE	1 031 km²	1967 – 2015	Débit et hauteur

Tableau 8 : Caractéristiques des stations hydrométriques de l'Iton et du Rouloir
Source : Banque hydro (www.hydro.eaufrance.fr)

7.1. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DE L'ITON

La rivière Iton prend sa source dans les sables du Perche au lieu-dit Cherougerie (266 m NGF) dans la commune ornaise de Maheru. Il se jette en rive gauche de l'Eure à Acquigny (18 m NGF), 78 km au Nord-Est, après avoir traversé un paysage de plaines et plateaux (plaines du Neubourg et de Saint-André) et l'agglomération d'Evreux. Sa longueur depuis sa source jusqu'à sa confluence avec l'Eure est de 132 km linéaires.

Le bassin de l'Iton est l'un des bassins versants du département de l'Eure présentant le plus de particularités, notamment les suivantes :

- séparation de la rivière en 2 bras autour de Damville ;
- cours d'eau en situation perchée sur une partie du linéaire, au droit du Sec-Iton, mais aussi en aval d'Evreux, et vraisemblablement en amont, avec de nombreuses pertes et sources à forts débits ;
- double confluence à l'aval de l'Iton vers l'Eure ;
- dérivation anthropique d'une partie du débit de l'Iton vers le bassin de l'Avre ;
- petit cours d'eau affluent (Rouloir) prolongé à l'amont par une longue vallée sèche, la vallée du Lême.

L'Iton s'écoule selon deux principales orientations, quasiment perpendiculaires : la première, suivant le pendage des formations géologiques vers le centre du bassin de Paris (orientation WSW-ENE), et la seconde de direction SSE-NNW (direction tectonique armoricaine). On observe, en première approximation que, les portions de l'Iton suivant le pendage des couches sont bordées de sources, alors que les portions alignées selon l'axe tectonique armoricain sont affectées par des pertes et bétoires (Illustration 87) (une analyse plus fine montre que le fonctionnement de l'hydrosystème est plus complexe que cela, cf. §8). Ces deux directions correspondent à celles d'accidents tectoniques, ce qui favorise les phénomènes karstiques et donc les pertes ou apports de débit.

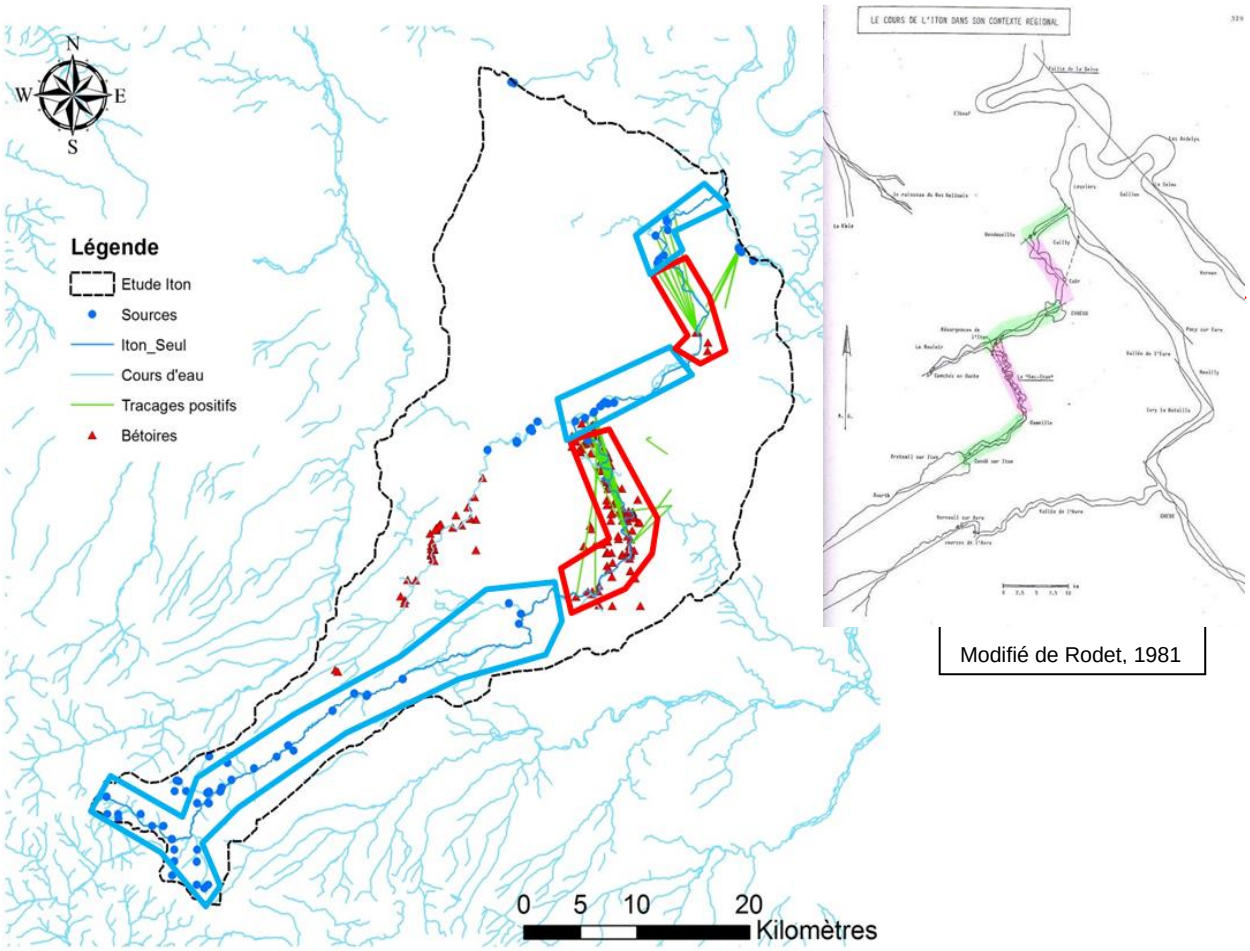


Illustration 87 : Gands tronçons hydrauliques de l'Iton et orientations du cours d'eau (découpage approximatif basé sur la présence de sources ou de bétoires, un découpage plus fin du fonctionnement de l'Iton est présenté au §8 en se basant sur des données de débits du cours d'eau)

Les deux grandes orientations du cours d'eau se retrouvent également pour la rivière de l'Eure (Rodet, 1981). Elles définissent cinq tronçons hydrauliques le long de l'Iton, qui ont chacun un fonctionnement propre.

7.1.1. L'Iton amont

Le premier tronçon correspond à la partie amont de l'Iton, depuis sa source jusqu'à la commune de Damville, 50 km au Nord-Est. Il est composé de plusieurs portions qui s'organisent comme suit :

- la tête d'alimentation du bassin versant, des sources de l'Iton jusqu'aux Aspres : les ruissellements générés sur les formations peu perméables du Cénomanien sont captés par un réseau hydrographique relativement dense et évacués rapidement vers l'aval ;
- des Aspres à Bourth : le bassin versant est étroit, aucun affluent notable ne vient alimenter l'Iton qui s'écoule de manière rectiligne du Sud-Ouest vers le Nord-Est ; parallèlement, le ruisseau du Lemme (ou Lême) naît, se perd puis réapparaît ;

- Le « delta intérieur de l'Iton » (Dewolf et Kuntz, 1980) situé entre Bourth et Condé-sur-Iton : dans ce tronçon le cours d'eau se désorganise alors que la vallée s'estompe pour laisser place à une plaine dans laquelle la rivière divague. Elle se sépare en deux bras qui isolent la butte de la madeleine, au sud de Breteuil : le bras de Breteuil et le bras de Verneuil. Un 3ieme bras « l'Iton rivière Morte » ou « Mort Iton », situé entre le bras de Verneuil et le bras de Breteuil, ne présente des écoulements qu'en période de crue. La platitude de ce tronçon est telle qu'elle a permis la dérivation d'une partie des eaux de la rivière par le « bras forcé » réalisé au XIIème siècle au profit de Verneuil-sur-Avre. (cf. § 7.3.4) ;
- Entre Condé-sur-Iton et Damville les différents bras du cours d'eau sont regroupés en un seul et même lit. L'Iton forme alors des méandres et s'enfonce progressivement dans une vallée plus incisée. On a ici toujours la même direction d'écoulement depuis la tête d'alimentation.

7.1.2. Le Sec-Iton

En aval de Damville, l'Iton forme un étang puis change subitement de direction pour s'orienter selon un axe SSE-NNW. Il forme alors de nombreux coudes et méandres dans une vallée relativement étroite qui sépare les plateaux du Neubourg à l'Ouest et de Saint-André à l'Est. L'Iton subit alors de nombreuses pertes de débits à la faveur des bétoires, points d'infiltration préférentiels vers le système karstique, très denses dans cette zone (cf. §5.4). La rivière est donc ici en situation « perchée » par rapport à la nappe qu'elle alimente via des pertes, son débit s'en trouve fortement diminué. Du hameau du Rebrac jusqu'aux premières résurgences de Gaudreville-la-Rivière, le Sec-Iton est sec en moyenne 6 mois par an (Artis et al., BRGM 1971).

7.1.3. L'Iton de Gaudreville-la-Rivière à l'amont d'Evreux

A partir de Gaudreville-la-Rivière, d'importantes résurgences apparaissent et soutiennent le débit de l'Iton (Sources des Grands Riants à Gaudreville-la-Rivière, la Fosse aux Dames à Glisolles, l'Etang de la Forge, …). Ces résurgences marquent la reconnexion de la nappe de la craie à la rivière, et une réaugmentation des débits de l'Iton qui perd son appellation de Sec-Iton. De plus, l'Iton reçoit en rive gauche les eaux du Rouloir, tandis qu'il reprend sa direction SW-NE dans une vallée qui s'élargit.

7.1.4. L'Iton entre l'amont d'Evreux et Tourneville

A partir d'Evreux, la rivière Iton décrit un large virage qui lui redonne une orientation SE-NW. Même si la densité de bétoires connues est moins importante qu'au niveau du Sec-Iton (Illustration 87), la rivière ne draine plus la nappe à partir de l'amont d'Evreux, et des campagnes de traçage et de mesure de ligne d'eau ont montré sa situation perchée par rapport à la nappe à cet endroit (rapports Artis et al., 1971 ; Hole J.-P., 1987 et Le Mesnil M et al. 2016). Le lit de l'Iton a d'ailleurs été canalisé entre Caër et Normanville afin d'éviter de trop grandes pertes de débit. Les pertes de l'Iton viennent alimenter le réseau karstique sous-jacent, dont les résurgences se trouvent plus en aval le long de l'Iton, ou encore de l'autre côté du plateau de Saint-André, au niveau des sources de Cailly-sur-Eure (voir traçages Illustration 87).

7.1.5. L'Iton aval

La commune de Tourneville marque un coude prononcé et le retour à une orientation de l'Iton SW-NE. Ce changement de direction s'accompagne de l'apparition d'importantes résurgences le long de la vallée de l'Iton, comme les sources de la Cressonnière et de Brocfontaine à Brosville ou de la Fontaine d'Hondouville (indice BSS 01501X0006/S, débit estimé à 1000 l/s). Après Hondouville, l'Iton suit une trajectoire rectiligne vers sa confluence avec l'Eure au niveau d'Acquigny, 6 km au Nord-Est.

7.2. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU LEME/ROULOIR

Le Rouloir, principal affluent de l'Iton, est au sens strict un cours d'eau de faible longueur puisqu'il prend sa source sur la commune de Conches-en-Ouche et conflue avec l'Iton 5 km plus à l'Est, à Glisolles. Son bassin versant est d'une superficie de 15km². Cependant, le Rouloir est prolongé à l'amont par une longue vallée sèche : la vallée du Lême / Lemme, dont le bassin versant est d'une superficie de 264 km².

Le cours d'eau du Lême/Rouloir possède diverses orthographes qui traduisent probablement cette absence de continuité visible en surface : Lemme au niveau de l'Aigle et dans la forêt de l'Aigle, Lême à partir de Chéronvilliers puis Rouloir lors de sa résurgence à Conches-en-Ouche.

Deux autres petits bassins versants amont convergent vers le bassin du Rouloir : le bassin du Fidelaire (99km²) et le bassin de Vaux Goin (12km²). Le bassin versant du Fidelaire possède une grande proportion de terres agricoles, et ses talwegs sont parfois parcourus par des fossés de drainage agricole. L'Illustration 88 représente ces différents bassins versants et talwegs.

Le Lême est un ruisseau qui prend naissance sur la commune de Saint-Ouen-sur-Iton et se termine artificiellement à Conches-en-Ouche où il change de nom et devient le Rouloir. Sur les 38 km de talweg entre Saint-Ouen-sur-Iton et Conches-en-ouche, le Lême n'est réellement pérenne que sur une petite section à l'amont (cf. trait gras sur l'Illustration 88). Ces alternances entre sections pérennes et vallées sèches permettent de définir quatre tronçons du Lême/Lemme/Rouloir aux caractéristiques hydrauliques particulières. Les quatre tronçons, figurés sur l'Illustration 88, sont successivement décrits dans les paragraphes suivants.

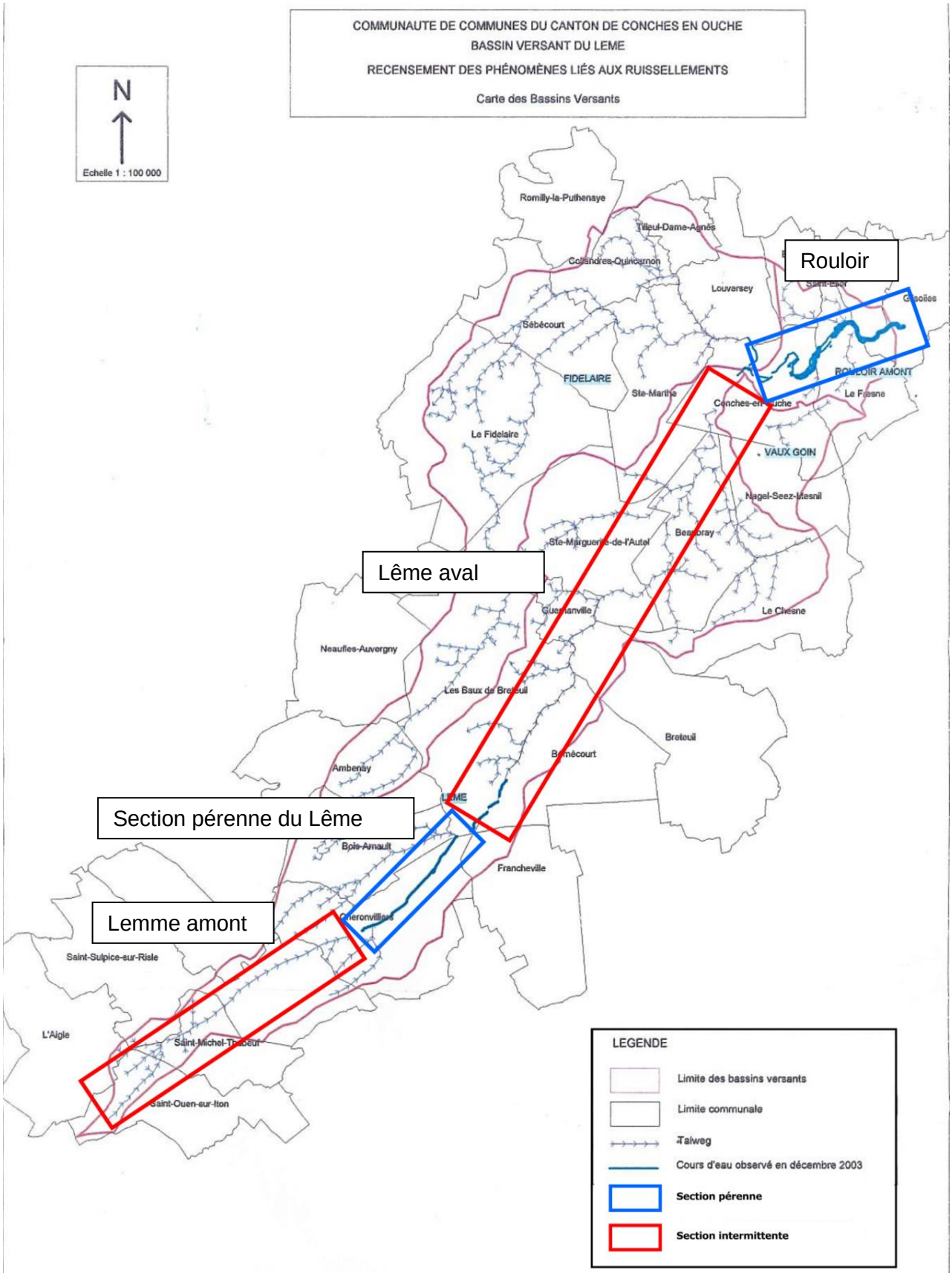


Illustration 88 : Carte des 4 tronçons hydraulique du Lême/Rouloir, écoulements de surface observés en décembre 2003 – Modifié de Aqua-Sol Projets, janvier 2004

7.2.1. Le Lemme amont

Le Lemme prend naissance à l'extrémité Ouest de la commune de Saint-Ouen-sur-Iton, dans le département de l'Orne en Basse-Normandie. Jusqu'à Chéronvilliers, 10 km en aval, c'est un cours d'eau temporaire orienté SO-NE dont l'écoulement superficiel est occasionnel et dépend des niveaux de nappes et des épisodes pluvieux. Sur ce tronçon, des pertes par infiltration (bétoires) sont recensées, notamment dans la forêt de l'Aigle (commune de Saint-Sulpice-sur-Risle, Illustration 88), néanmoins des écoulements sont constatés chaque hiver pluvieux pendant quelques jours. Il est à noter que le Lemme a été reprofilé en fossé d'assainissement agricole sur ce tronçon.

7.2.2. Section pérenne du Lême

La longueur de ce tronçon est fonction des niveaux de nappe, et donc des tendances climatiques. Les cartes IGN indiquent que le Lême forme un cours d'eau permanent depuis Chéronvilliers jusqu'à son entrée dans la forêt de Breteuil au niveau du lieu-dit la Délogerie dans la commune de Sainte-Suzanne (à l'aval de la RD141), soit sur un linéaire d'environ 5 km (Illustration 89). Une étude (Aqua-Sol Projets, 2004) de recensement des phénomènes liés aux écoulements dans le bassin versant du Lême fait état d'un écoulement sur 5,2 km en décembre 2003, et sur 9,2 km en février 2004. La carte géologique de Breteuil-sur-Iton (n° 179), révisée en 1982, mentionne également un écoulement jusqu'en aval de la RD 141 dans la forêt de Breteuil.

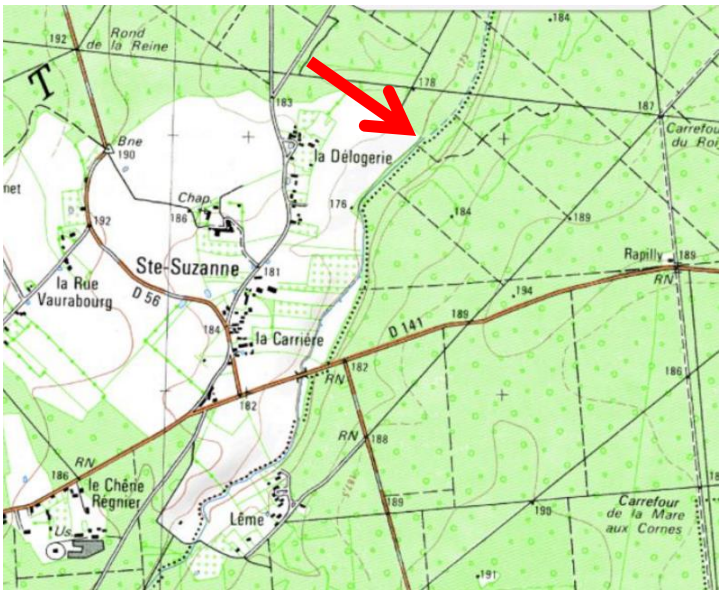


Illustration 89 : Fin de la section perenne du Lême d'apres la carte IGN au 25000ieme

7.2.3. Le Lême aval

La section aval du Lême est caractérisée par de rares écoulements superficiels dus à une augmentation de la densité des bétoires. Ces pertes se font plus fréquentes à partir de la RD 141 et contribuent à la diminution du débit des écoulements de surface. Ce linéaire est majoritairement forestier (forêt de Breteuil puis de Conches) et n'a fait l'objet que de peu d'observations. Néanmoins la bibliographie fait état d'un écoulement observé jusqu'à Sainte-Marguerite-de-l'Autel durant l'hiver 2000/2001 (Aqua-Sol Projets, 2004). Cet écoulement surfacique correspond probablement à une remontée de nappe. En effet, au niveau des

piézomètres de l'Aigle (02144X0005) et de Bois-Arnault (01795X0011), les niveaux maximum de 2001 dépassent de plus de 10 m ceux de 2003. Or le suivi de nappe initié en 2003 à Sainte-Marguerite-de-l'Autel (01792X0020) indique une hauteur piézométrique à 141,8 m NGF en février 2003 dans le talweg au lieu-dit la Brèche aux Poules. On peut donc supposer que le niveau de nappe a dépassé 150 mNGF à l'hiver 2000/2001, or le fond du talweg a une cote de 149 m NGF d'après les cartes IGN.

7.2.4. Le Rouloir

Le lieu-dit de La Maison Verte, à l'amont de Conches-en-Ouche, marque la présence des dernières bétoires recensées, et celle de la source du Rouloir (indice BSS 01793X0024/S) dont le débit a été estimé à 30 l/s en novembre 1970. En aval de cette source, les Etangs du vieux Conches matérialisent un changement de direction du cours d'eau vers l'Est/Nord-Est. Entre le bourg de Conches-en-Ouche et la confluence avec l'Iton, le débit du Rouloir est soutenu par trois groupes de sources :

- Sources Le Cherpin (01497X0015), de la Pisciculture (01497X0020) et « ex-aep » (01497X0014) à Conches-en-Ouche ;
- Sources du château de Quenet (01497X0018), de La Fontaine Lallier (01497X0016) et du Moulin Athelin (01497X0017) à Saint-Elier ;
- Source de Launay à Saint-Elier (01497X0013).

Le Rouloir est considéré comme un cours d'eau permanent, néanmoins une étude d'Hydratec et Aquascop (Syndicat Aval de l'Iton, 1992) indique qu' « au cours de l'été 1992, celui-ci n'était pérenne qu'à partir des sources situées au Moulin des Fontaines à l'aval de l'agglomération de Conches » (c'est-à-dire probablement à partir des sources de Quenet et de la Fontaine Lallier à Saint-Elier). Le Rouloir s'est par ailleurs asséché en novembre 2007 sur les trois premiers kilomètres de son cours pendant une durée de l'ordre de 15 jours. La localisation de l'assec est présentée à l'Illustration 90 (Arnaud L., 2008). Cet assec était lié au tarissement quasi-complet des sources de « Maison verte ».

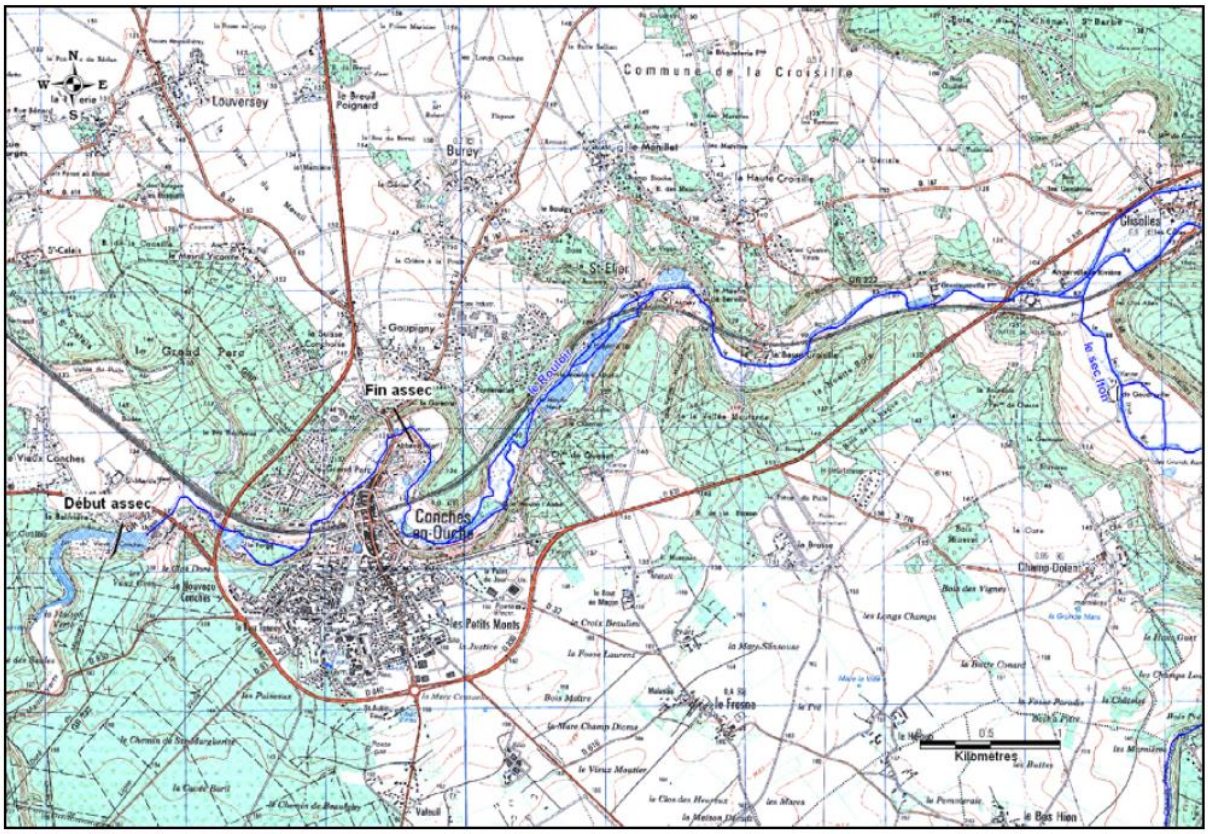


Illustration 90 : Localisation de la zone d'assec du Rouloir en novembre 2007 (Arnaud L. 2008, rapport BRGM/RP-56189-FR)

La qualité du forage capté pour l'AEP (01793X0035) et situé à une 15aine de mètres en amont des sources du Rouloir (01793X0024) atteste d'un fonctionnement karstique de l'hydro-système. En effet, le suivi de turbidité réalisé sur ce point indique des pics mesurés par exemple lors des années 2001/2002 (65 NTU en février/avril 2001 ; 25 NTU en février 2002). L'analyse des pics de turbidité réalisée par Aqua-sol (Aqua-Sol projets, 2004) sur la période 2001-2003 conclue que :

- La turbidité suit la pluviométrie avec un décalage de 2 à 4 jours.
- Les pics de turbidité sont provoqués soit par un épisode pluvieux court de forte intensité (le pic est alors bref mais de forte amplitude), soit par un cumul de pluie d'intensité relativement faible mais présentant un cumul important. L'épisode turbide est plus long et d'amplitude plus faible.

Le fonctionnement du système karstique du Leme/Rouloir a toutefois été peu étudié. Il n'existe à notre connaissance pas de traçage réalisé pour étudier cet hydrosystème. Les bassins d'alimentation des 3 groupes de sources du Rouloir ne sont ainsi pas connus.

7.3. ANTHROPISATION DE L'ITON ET DU ROULOIR

7.3.1. Référencement des ouvrages hydrauliques

Le Référentiel des Obstacles à l'Ecoulement (ROE)[13] est une base de données qui recense l'ensemble des ouvrages et systèmes hydrauliques qui impactent l'écoulement des eaux sur les cours d'eau de France. Une extraction de ces points a été réalisée sur le territoire correspondant à la zone d'étude. La base de données, dont l'état de bancarisation correspond au mois de mai 2014, comporte 252 points situés sur l'Iton et ses affluents.

Les ouvrages situés sur le lit de l'Iton sont au nombre de 199 ; les 53 autres concernent ses affluents (majoritairement le Lème/Rouloir) (cf. localisation à l'Illustration 91). Le Tableau 9 récapitule les types d'ouvrages présents sur le bassin versant de l'Iton et le nombre d'entités pour chacun d'eux.

Type d'ouvrage	Nombre d'ouvrages
Epis en rivière	5
Barrages	Barrages en remblai : 5
Seuils en rivière	Déversoirs : 152
	Radiers : 69
	Enrochements : 2
	Autres : 9
Non renseigné	10

Tableau 9 : Ouvrages hydrauliques sur l'Iton et ses affluents

La notice descriptive du ROE fournit les définitions suivantes pour les types d'ouvrages hydrauliques :

- Un épi en rivière est un ouvrage placé perpendiculairement au cours d'eau sur une partie du lit mineur ou du lit majeur permettant de diriger le courant et de limiter l'érosion d'une berge (dans le cas de l'Iton les épis peuvent également servir à détourner le cours de la rivière pour contourner une bétoire ou une zone de pertes) ; ces épis en rivière sont localement nommés « auger » (cf. § 7.3.2) ;
- Un barrage est un ouvrage qui barre plus que le lit mineur d'un cours d'eau permanent ou intermittent ou un talweg ;

[13] L'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema) met à disposition le Référentiel national des Obstacles à l'Ecoulement (ROE) dans le but d'inventorier les obstacles et d'évaluer leurs impacts (http://www.eaufrance.fr/referentiel-des-obstacles-a-l)

- Un seuil en rivière est un ouvrage fixe ou mobile, qui barre tout ou une partie du lit mineur.

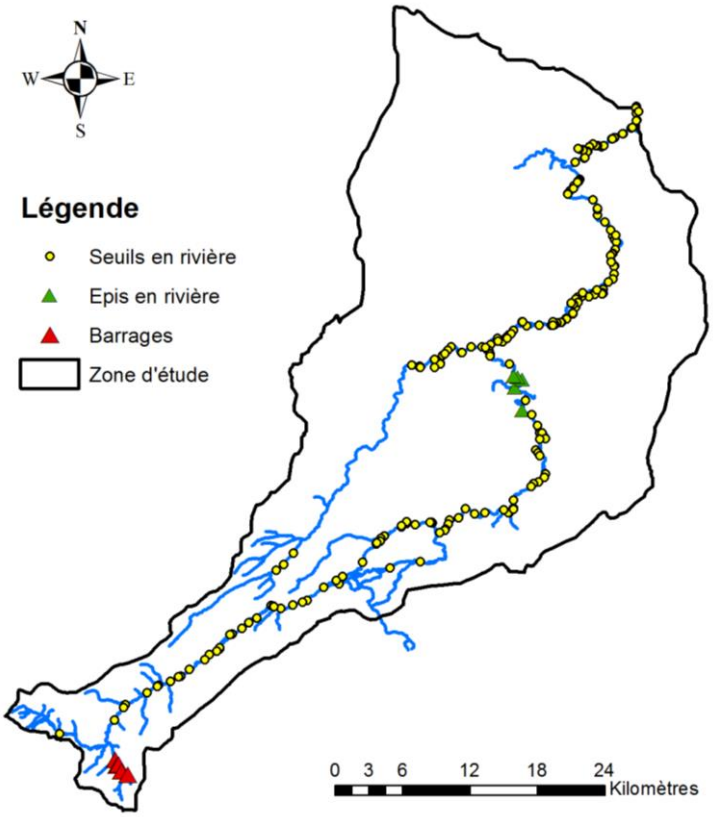


Illustration 91 : Carte des ouvrages hydrauliques sur l'Iton et ses affluents

L'Illustration 91 montre la localisation des différents ouvrages hydrauliques de l'Iton et de ses affluents. Les seuils, au nombre de 232, sont répartis sur tout le linéaire des cours d'eau permanents. Les 5 barrages se trouvent en tête de bassin, tout au sud de la zone d'étude. Ils sont regroupés sur un linéaire de moins de 2 km et donnent lieu à des étendues d'eau utilisées comme sites de pêche ou bases de loisirs : l'étang Neuf, l'étang Dais, l'étang de Chaumont et l'étang de Rancé.

Les épis en rivière (ou auger) sont quant à eux situés sur le tronçon du Sec-Iton (cf. § 7.3.2 suivant).

7.3.2. Les augets du sec-Iton

Ces ouvrages permettent de détourner le cours de la rivière et donc de contourner les zones de pertes afin de limiter les pertes de débit de la rivière vers la nappe afin de tenter de maintenir un écoulement en étiage. D'importants travaux de ce genre ont été réalisés de 1896 à 1899 au niveau de plusieurs bétoires, afin de conserver un débit minimum dans la rivière en toutes saisons (Artis et al., BRGM 1971). Ces augers semblent maintenus depuis (Illustration 92 et Illustration 93). A noter que l'hiver, le cours de l'Iton occupe tout le lit mineur, y compris la zone où se situe la bétoire.

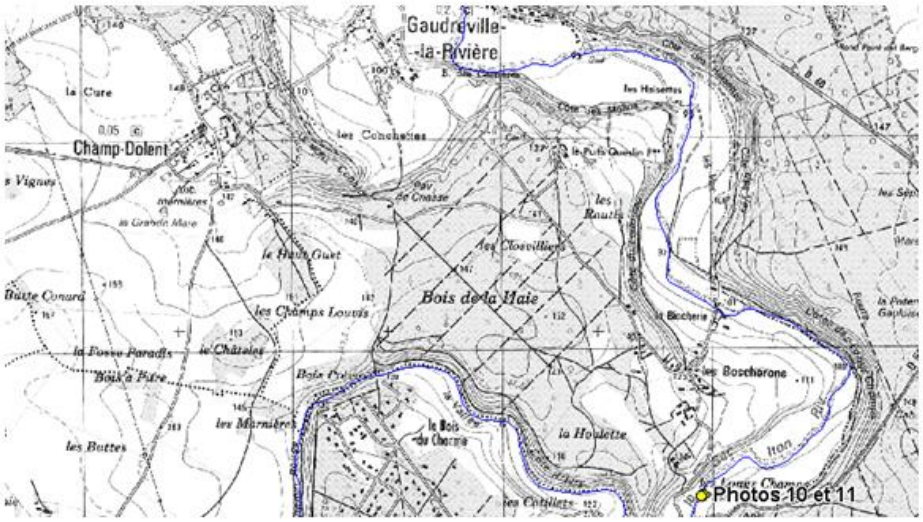




Illustration 92 : Section de l'Iton aménagé par un auget pour contourner une bétoire située en amont de Gaudreville-la-Rivière (Photo 10)

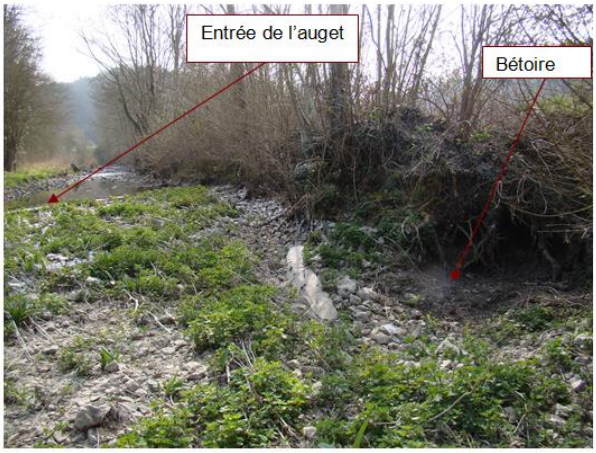




Illustration 93 : Vue sur la bétoire contournée par l'auget (Photo 11)

7.3.3. Canalisation de l'Iton en amont de Normanville

Le lit de l'Iton a été canalisé sur sa portion allant de Caër à Normanville afin d'éviter de trop importantes pertes de débit (Le Mesnil et al., 1996). Les limites exactes de cette portion canalisée ne sont pas connues précisément.

7.3.4. Les bras forcés de l'Iton

a) *Eléments de contexte*

Un des éléments anthropiques les plus importants de l'Iton est l'ouvrage répartiteur du Becquet (Illustration 94). Cet élément de maçonnerie, construit au XII^{ème} siècle, est implanté sur la partie aval de la commune de Bourth. Il est constitué de deux déversoirs qui alimentent les deux canaux que sont le bras forcé de Breteuil en rive gauche et le bras forcé de Verneuil en rive droite. Depuis chacun de ces canaux, des prises d'eau sont effectuées et retournent vers le lit initial de l'Iton, qui porte alors le nom de Mort-Iton (Illustration 95).



Illustration 94 : Ouvrage répartiteur du Becquet (vue vers l'amont)

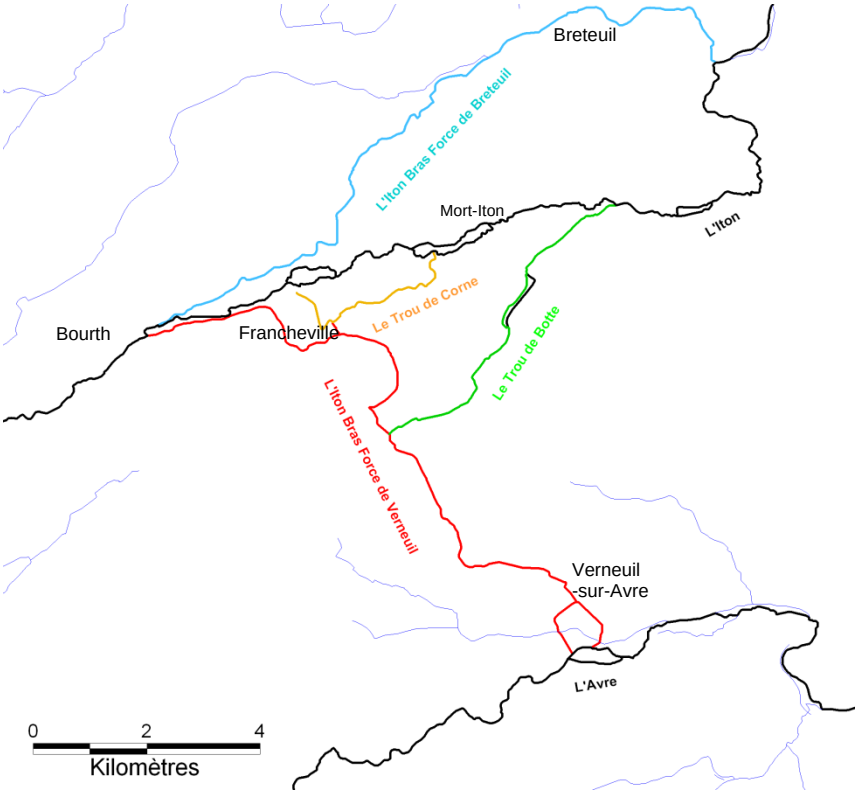


Illustration 95 : Localisation des bras forcés de Breteuil et de Verneuil

Le bras forcé de Verneuil a été mis en place pour alimenter la ville forte de Verneuil-sur-Avre, et actionne également plusieurs moulins avant de rejoindre l'Avre. Par la suite, deux dérivations supplémentaires ont été creusées pour reprendre une partie de ces eaux : le Trou de Corne et le Trou de Botte (Illustration 95). En aval de ces dérivations, les eaux qui transitent par le bras forcé sont dirigées vers l'Avre et quittent le bassin versant de l'Iton.

Ce bras forcé ne fait l'objet d'aucun suivi de débit en continu. Les débits qui y transitent sont partiellement connus par des données de jaugeages ponctuels réalisés dans le passé par la DREAL (cf. § b) ci-dessous). Par ailleurs une étude visant à modéliser le fonctionnement de cet ouvrage a été menée en 2006 pour le Syndicat Intercommunal de la Vallée de l'Iton par le Bureau d'études SETEGUE (SETEGUE, 2006) (cf. § C) ci-après).

b) *Estimation du débit du bras forcé de Verneuil par analyse des données de jaugeages ponctuels de la DREAL*

Les données de jaugeages volants existants pour le bras forcé de l'Iton ont été récupérées auprès de la DREAL Haute-Normandie. Un point de jaugeage situé sur le bras forcé en amont de la ville de Verneuil-sur-Avre possède 5 mesures de débit réparties de 2000 à 2004 essentiellement mesurées en étiage.

La confrontation de ces 5 valeurs de débits mesurés et des débits simulés pour le bras forcé semble montrer que le modèle SETEGUE de 2006 (modèle présenté dans le paragraphe c) ci-après) surestime le débit du bras forcé à l'étiage (surestimation débits pour les débits de l'Iton amont <1m^3/s).

Le modèle surestimant les débits d'étiage, et afin de réaliser une estimation des débits de l'Iton perdus au profit de l'Avre, une corrélation a été réalisée entre les débits issus des jaugeages volants du bras forcé et ceux de la station de jaugeage de l'Iton à Bourth (i.e. en amont du répartiteur du Becquet). La corrélation semble relativement satisfaisante (R^2 = 0.934 cf. Illustration 96) même s'il est vrai qu'un si faible nombre de points disponibles ne permet pas d'obtenir un résultat fiable. Une chronique estimée des débits transférés du bassin de l'Iton vers celui de l'Avre par ce canal a ainsi été réalisée. L'Illustration 97 présente cette chronique, qui a été écrêtée à 500 l/s (hypothèse retenue de débit maximal pouvant effectivement transiter dans le bras forcé de Verneuil).

Toutes ces hypothèses seraient à vérifier par la mise en place d'une station de jaugeage permanente sur le bras forcé de l'Iton.

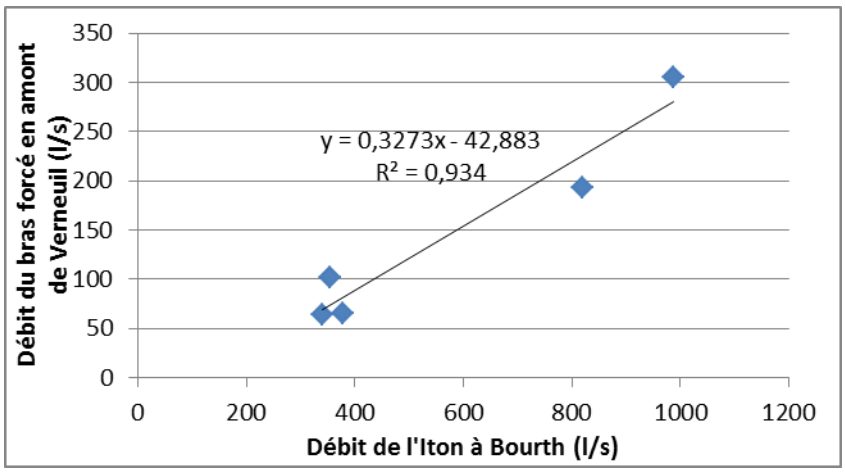


Illustration 96 : Corrélation des débits de l'Iton à la station de Bourth et au bras forcé en amont de Verneuil-sur-Avre

D'après cette estimation, le débit moyen qui transite de l'Iton vers l'Avre est de 260 l/s sur la période 2000-2014, ce qui représente 19 % du débit moyen de l'Iton à Bourth sur cette même période (1 340 m^3/s). Le volume annuel moyen correspondant est d'environ 8 millions de mètres cubes.



<u>Cette chronique de débit du bras forcé de Verneuil n'est pas mesurée mais estimée. Les incertitudes de calcul sont très fortes car très peu de données sont disponibles. Or cette chronique estimée est utilisée dans différents calculs de ce rapport notamment aux paragraphes 8, 9, 10, 11, 12, 13. Tous les résultats obtenus dans ces paragraphes sont donc soumis à l'incertitude forte de l'estimation de cette chronique de débit. Afin de lever cette incertitude, il est nécessaire de mettre en place un suivi en continu des débits du bras forcé de Verneuil. Les résultats obtenus dans les différents paragraphes cités précédemment seront donc à revoir lorsque les débits du bras forcé seront réellement connus.</u>

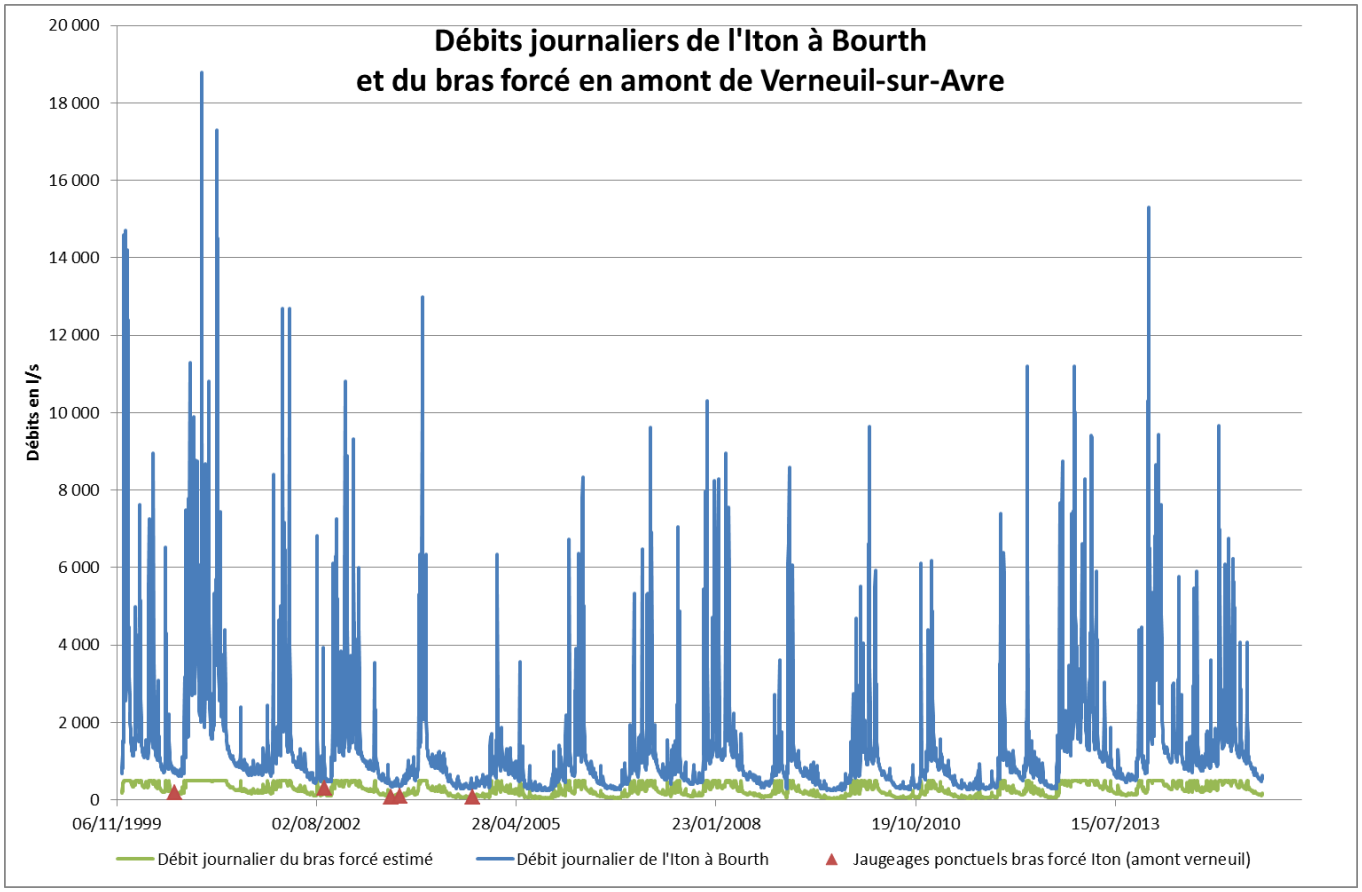


Illustration 97 : Débits journaliers de l'Iton à Bourth et débits estimés du bras forcé en amont de Verneuil

Contrôle de la pertinence de cette estimation : le schéma ci-dessous (Illustration 98) présente la répartition des débits entre les différents bras de l'Iton à l'étiage, mesurés le 26 juin 2010 par le bureau d'études CE3E depuis le répartiteur du Becquet jusqu'à Condé-sur-Iton et après les pertes du Sec-Iton (CE3E, janvier 2010). La part du débit qui transite vers l'Avre (76 l/s) représente environ 16 % du débit entrant (479 l/s), ce qui est relativement cohérent avec l'extrapolation réalisée ci-avant.

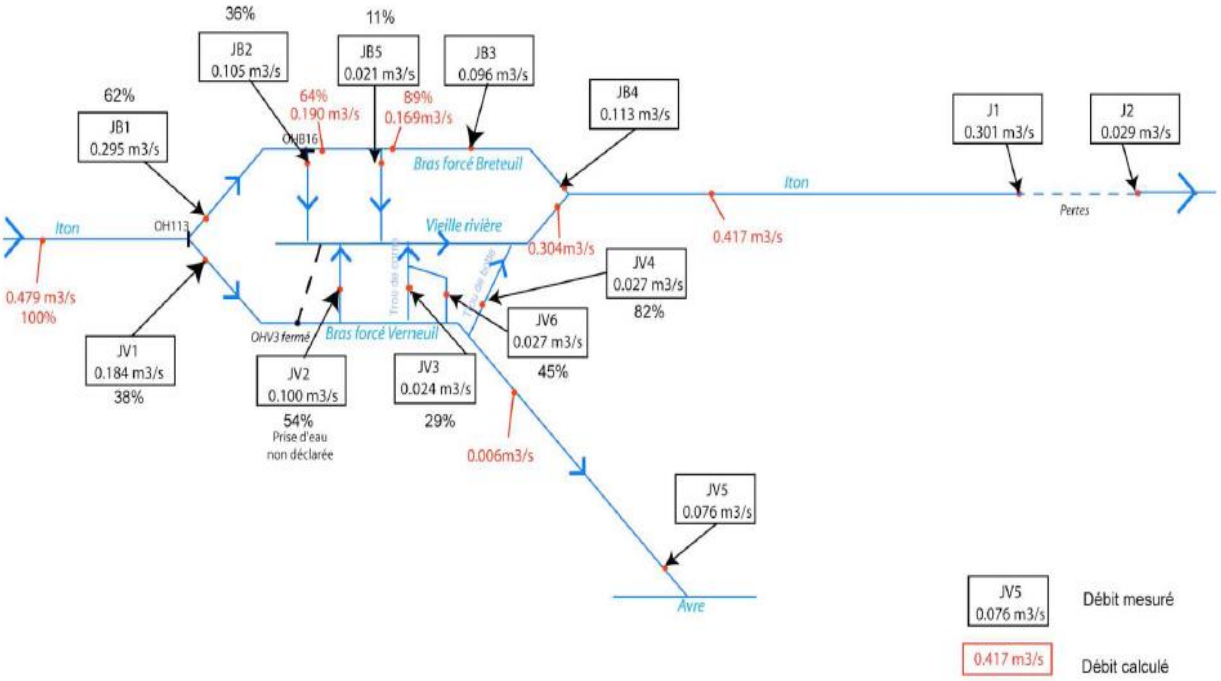


Illustration 98 : Répartition des débits entre les différents bras de l'Iton, depuis le Becquet jusqu'au Sec-Iton, mesures prises le 26 juin 2009 en situation d'étiage – Source : CE3E, 2010

Le bras forcé de Verneuil constitue donc un exutoire secondaire important du bassin versant de l'Iton, avec une part non négligeable des débits qui sont détournés vers le bassin de l'Avre. La mise en place d'une station de jaugeage permanente sur le bras forcé de Verneuil, en aval des deux canaux de retour (trou de Botte et trou de Corne) est nécessaire pour une meilleure appréciation des pertes réelles du cours d'eau Iton vers le bassin de l'Avre. Très peu de données de débit sont disponibles concernant le bras forcé de Breteuil. Toutefois ce canal présente un intérêt moindre car c'est une dérivation qui rejoint l'Iton 13 km en aval du Becquet, dans la commune de Condé-sur-Iton.

C) Modélisation hdyraulique de bras forcé de Verneuil (SETEGUE, 2006)

Une étude visant à modéliser le fonctionnement de cet ouvrage a été menée en 2006 pour le Syndicat Intercommunal de la Vallée de l'Iton par le Bureau d'études SETEGUE (SETEGUE, 2006). Le fonctionnement hydraulique de ce secteur est très complexe, car un certain nombre d'ouvrages mettent en communication les différents bras et leurs fonctionnements dépendent de la ligne d'eau de la rivière et des vannages (Illustration 99).

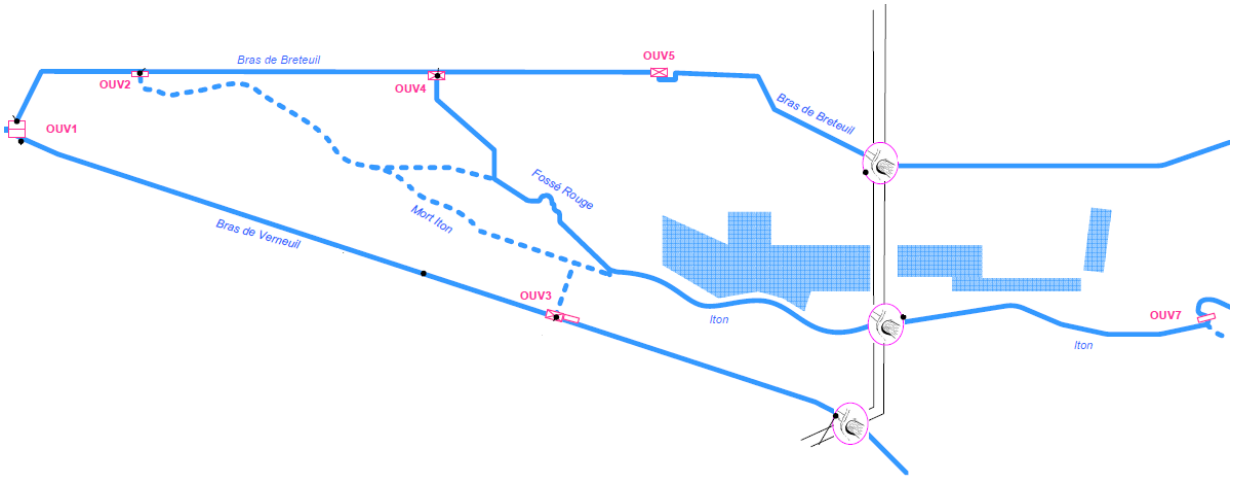


Illustration 99 : Schéma simplifié des ouvrages mettant en communication les différents bras de l'Iton à l'aval du Becquet (ouv1 = ouvrage répartiteur du Becquet ; ouv3 = vanne du Moulin à Poudre ; ouv2 = déversoir ; ouv4 = prise d'eau du fossé rouge ; cercle rose = ponts) SETEGUE, 2006)

Pour plus d'informations concernant la construction du modèle, hypothèses retenues et données utilisées, se reporter au rapport SETEGUE de 2006 mentionné en bibliographie.

Les résultats de cette modélisation concluent qu'en période d'étiage (SETEGUE, 2006) :

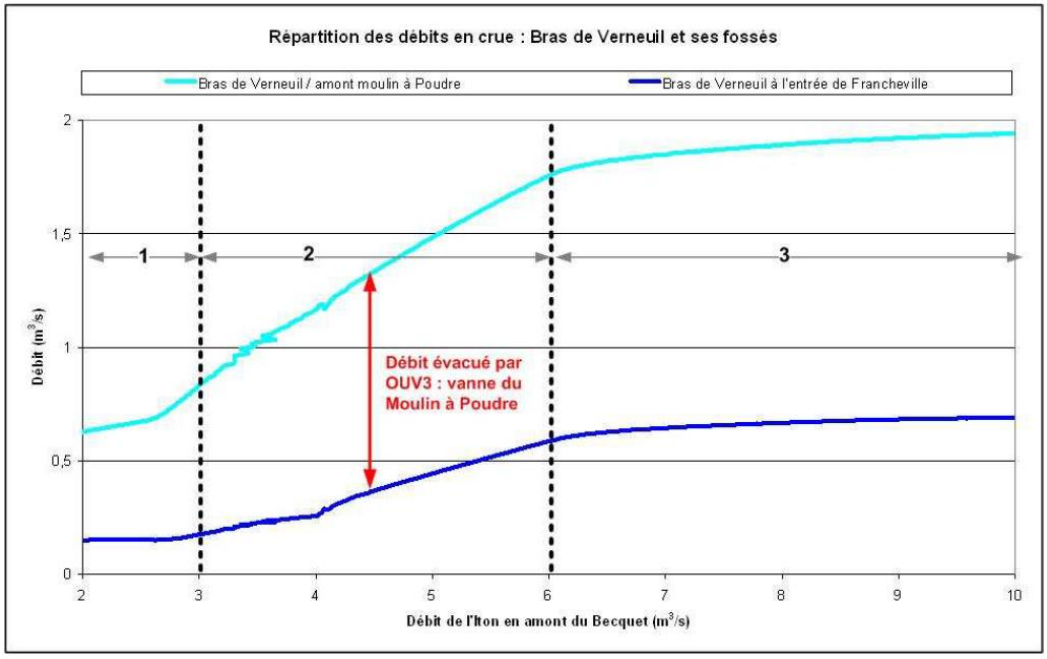
Pour les débits inférieurs à 1 m^3/s (dont le QMNA5 évalué à 320 l/s), la répartition des débits est de :

- **50 % pour le bras forcé de Verneuil ;**
- **25 % pour le bras forcé de Breteuil ;**
- **25 % pour l'Iton.**

Pour les débits compris entre 1 et 2 m^3/s, la part du bras forcé de Verneuil réduit au profit du bras de Breteuil et de l'Iton. **Pour le module, soit 1,5 m^3/s, la répartition des débits est de :**

- **38 % pour le bras forcé de Verneuil ;**
- **32 % pour le bras forcé de Breteuil ;**
- **30 % pour l'Iton.**

En période de crue, la répartition modélisée des débits dans les différents bras de l'Iton sont présentés à l'Illustration 100. Le modèle indique notamment que le débit évacué par le bras de Verneuil dans Francheville ne dépasse pas 700l/s. D'après ce modèle, les 2 bras forcés évacuent au maximum 2,3 m^3/s (soit 15% du débit de pointe biennal -17 m^3/s-) (SETEGUE, 2006).



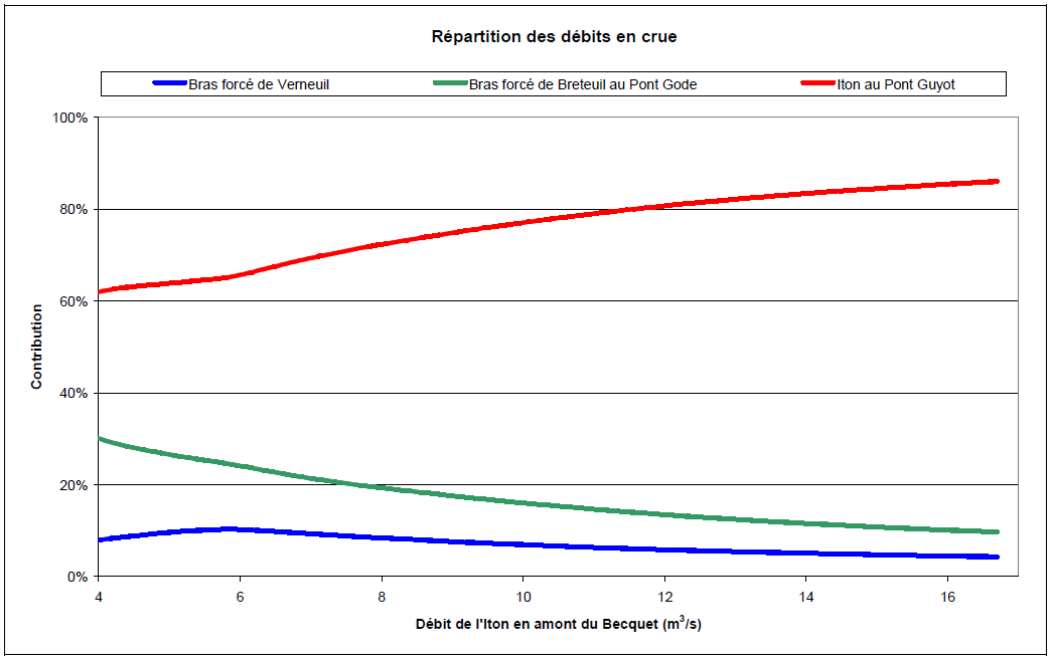


Illustration 100 : Résultats du modèle SETEGUE sur le fonctionnement hydraulique des bras forcés de l'Iton (SETEGUE, 2006)

Ce modèle surestime le débit du bras forcé de Verneuil que ce soit à l'étiage ou en période de crue. Par exemple, pour l'épisode de crue du 9 mars 2006, le débit jaugé sur le bras forcé à l'aval de l'ouv3 était de 500l/s alors que le débit simulé était de 700l/s.

Même si ce modèle surestime les débits transitant dans le bras forcé de Verneuil, un résultat intéressant à retenir est que les débits pouvant transiter dans les deux bras forcés ont une capacité maximum. Ainsi en période de crue, l'essentiel du débit transite dans le cours historique de l'Iton.

7.4. PROFILS HYDROLOGIQUES DE L'ITON ET DU ROULOIR

L'Iton a fait l'objet de plusieurs séries de jaugeages depuis le XIX^{ème} siècle. L'exploitation des résultats de ces campagnes de jaugeage permet de comprendre l'évolution spatiale du fonctionnement du cours d'eau et ses relations avec la nappe sous-jacente, en mesurant les variations de débit le long de son linéaire. Les principales campagnes effectuées sont les suivantes :

- 1 campagne réalisée par Edouard Ferray en 1882 sur tout le linéaire de l'Iton,
- trois campagnes réalisées par le BRGM entre 1968 et 1970 spécifiquement dans le secteur du sec-Iton,
- divers campagnes réalisées par la DREAL (ex DIREN) sur le linéaire de l'Iton.

7.4.1. Campagne de E. Ferray de 1882

A la fin du XIXème siècle, Edouard Ferray mène d'importantes recherches sur le cours d'eau de l'Iton et son régime particulier. Notamment, il réalise en 1882 (mois inconnu) un jaugeage du débit de l'Iton sur presque tout son linéaire : depuis son entrée dans le département de l'Eure au niveau du moulin de Chandai jusqu'à sa confluence avec la rivière de l'Eure. Les résultats obtenus lors de cette campagne ont été retranscrits sur le graphique qui suit (Illustration 101). Le profil débitmétrique original est présenté en Annexe 2.

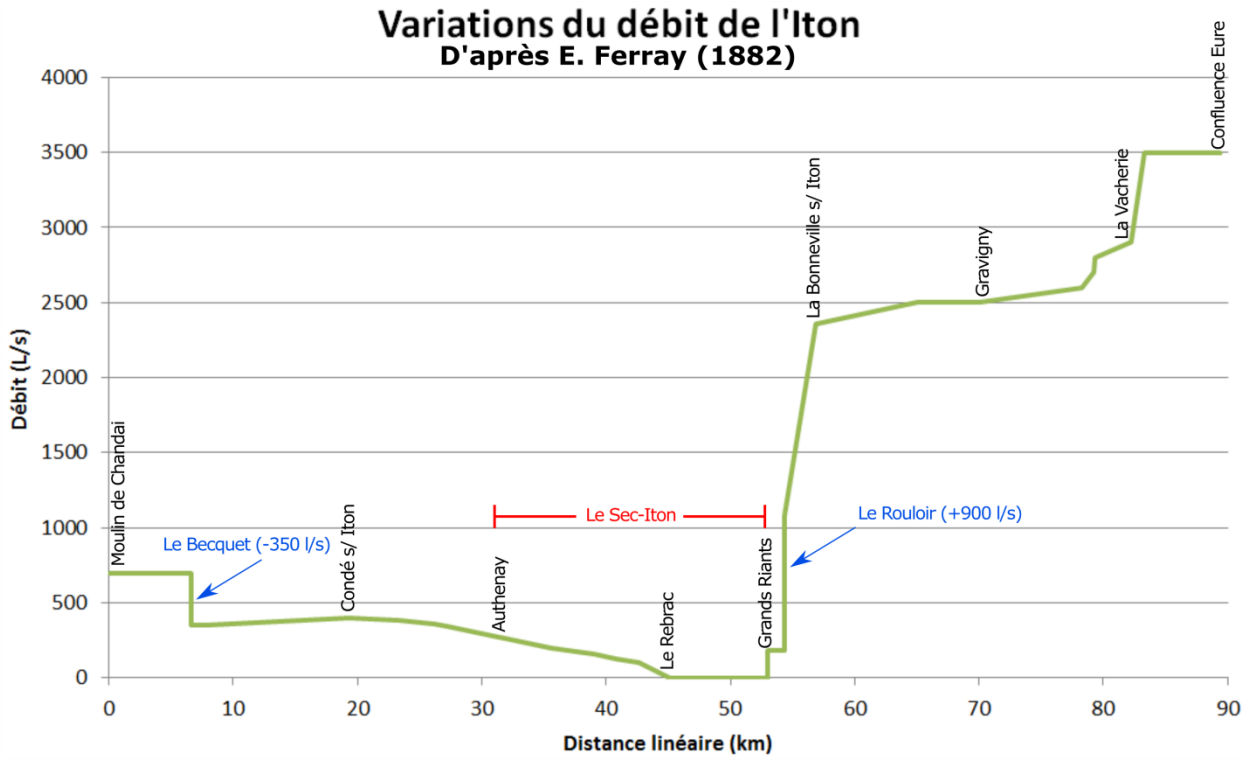


Illustration 101 : Profil de débit de l'Iton, d'après Ferray (1882) (Ferray, 1882)

Plusieurs variations brutales du débit de l'Iton sont observables le long de son cours. L'ouvrage répartiteur du Becquet provoque une division par deux du débit du cours d'eau (passage de 700 à 350 l/s). Par ailleurs, les sources des Grand Riants et la confluence avec le Rouloir représentent des apports successifs respectivement de 180 et 900 l/s. Entre la confluence avec le Rouloir et la Bonneville-sur-Iton, le débit passe de 1 080 à 2 360 l/s, soit un apport de 1 280 l/s, assuré par les sources d'Angerville-la-Rivière, de la Fosse aux Dames et de la Forge

de la Bonneville. De même, au niveau de La Vacherie, une augmentation de 600 l/s est mesurée sur un linéaire d'environ 1 100 mètres ; augmentation au moins en partie due aux sources d'Hondouville au débit conséquent (source d'Hondouville jaugée à plus de 1 m^3/s à une autre date, indice BSS 01501X0006/S).

A la période de réalisation de cette campagne de jaugeage, l'Iton était sec depuis le hameau du Rebrac jusqu'aux sources des Grands Riants. Il est donc probable que les jaugeages aient été réalisés entre les mois de mai et d'octobre.

Le profil de débits met en évidence un secteur sur lequel le débit de l'Iton diminue. Ce secteur débute à Condé-sur-Iton, voire plus en amont, et se termine à l'amont des sources Grand Riants à Gaudreville (le débit devient nul dès le Rebrac). Aucune zone de pertes significatives de débit n'est ensuite visible sur le profil levé par Ferray. Néanmoins deux zones au débit constant attestent que la rivière ne draine probablement pas la nappe par endroits : entre le Moulin d'Harrouard (Evreux ouest) et Gravigny, ainsi qu'entre le lieu-dit des Plis et la confluence avec l'Eure 6 000 m en aval.

7.4.2. Campagnes du BRGM de 1968 et 1970

Le BRGM a réalisé trois campagnes de jaugeage de l'Iton, en mai 1968, octobre 1968 et octobre 1970 (résultats disponibles en Annexe 2). Les points jaugés se répartissent de Bourth jusqu'au lieu-dit les Planches à Amfreville (lieu-dit correspondant à la terminaison du plateau de Saint-André et à l'intersection des vallées de l'Eure et de l'Iton, 2 500 m en amont de la confluence au sens strict). Néanmoins il est à noter que cette série de jaugeages s'inscrivait dans le cadre d'une étude concernant le Sec-Iton, et que la densité des points de mesure n'est réellement exploitable que dans le tronçon situé entre le Petit Sacq et Aulnay-sur-Iton.

Les résultats de ces campagnes de jaugeages sont présentés de l'Illustration 102 à Illustration 104.

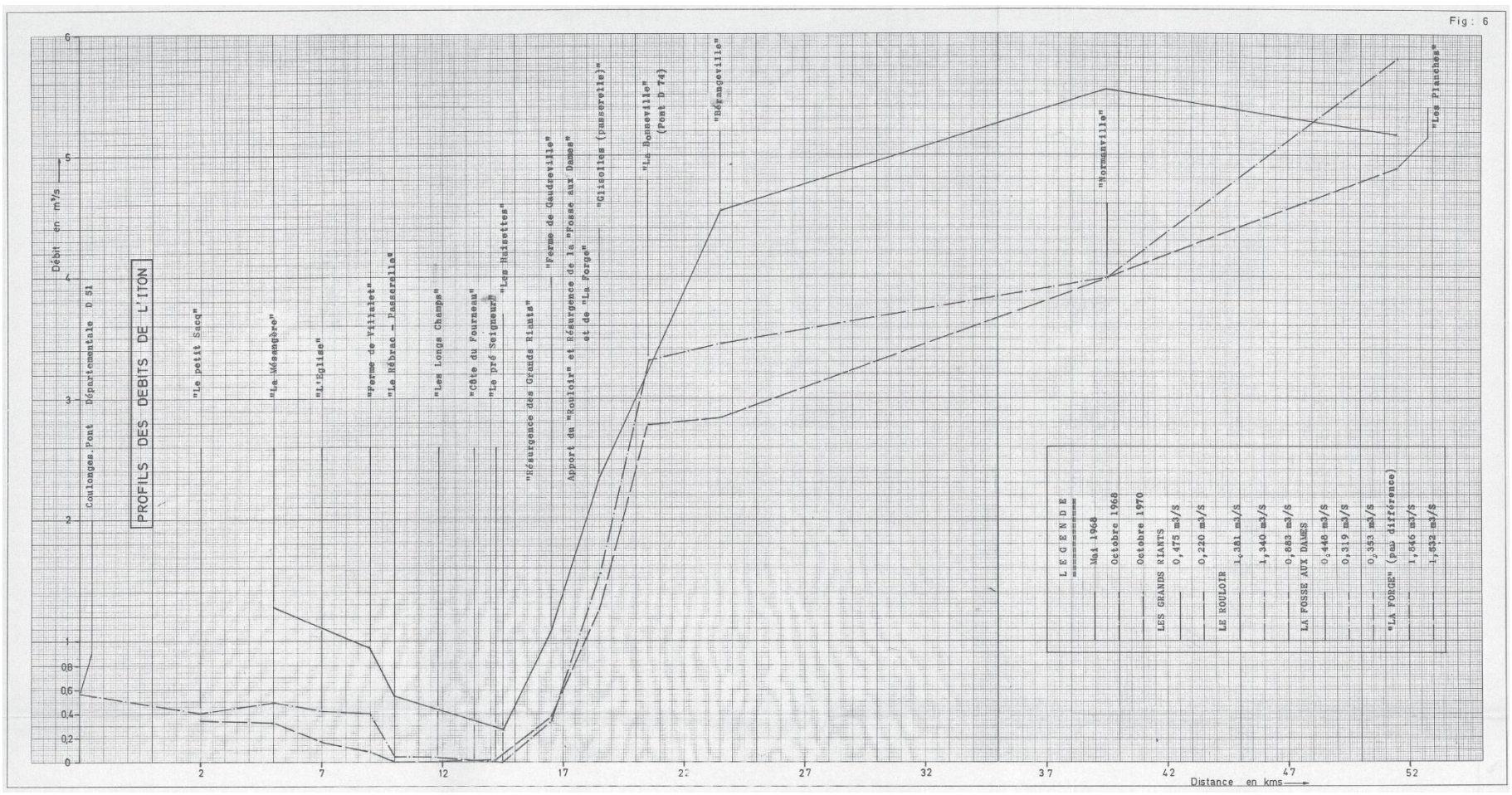


Illustration 102 : Résultats des trois campagnes de jaugeages de mai 1968 , octobre 1968 et octobre 1970 pour le secteur du Sec-Iton (BRGM, 1971)

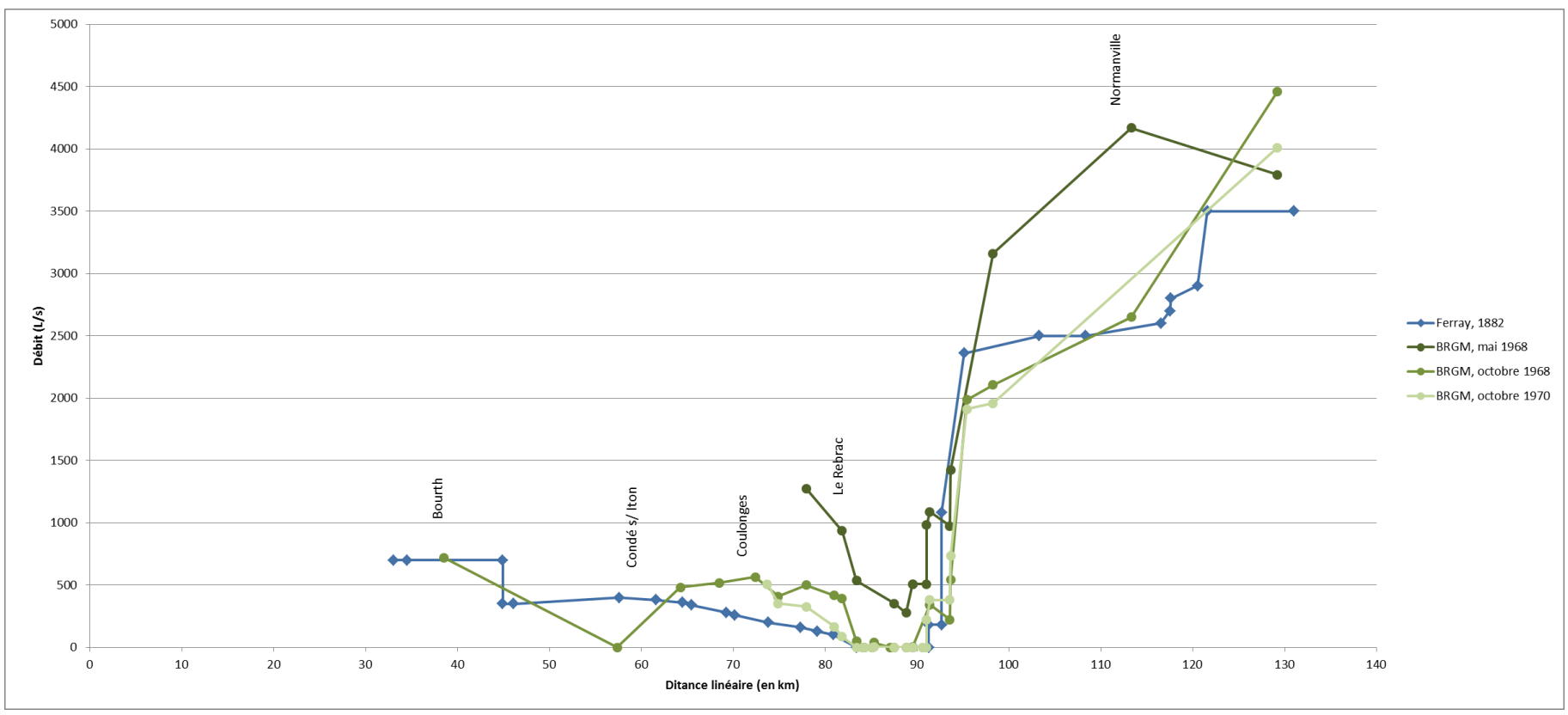


Illustration 103 : Résultats des trois campagnes de jaugeages de mai 1968 , octobre 1968 et octobre 1970 comparées aux résultats de la campgne de Ferray de 1882

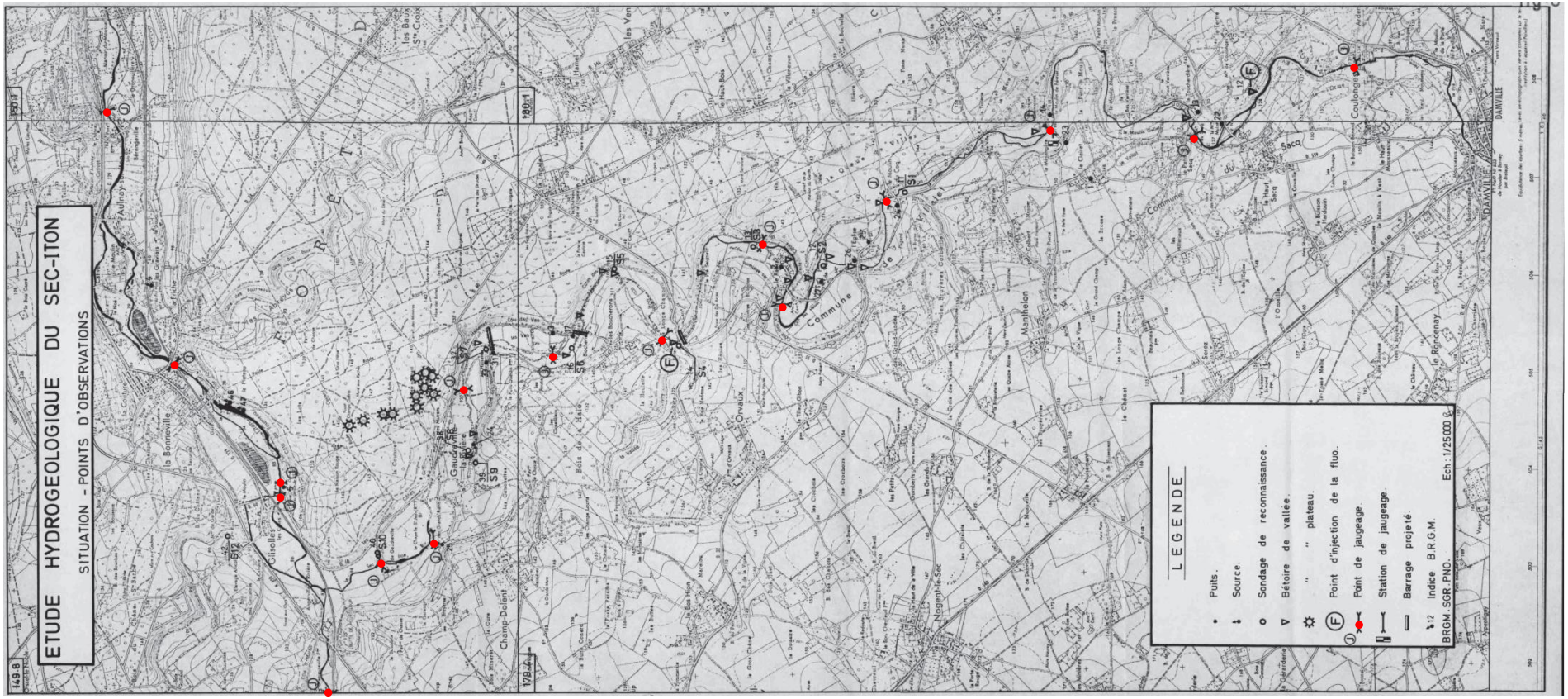


Illustration 104 : Localisation des points de jaugeage (du kilomètre 70 au kilomètre 100 de l'Illustration 102) des trois campagnes de jaugeages de mai 1968 , octobre 1968 et octobre 1970 pour le secteur du Sec-Iton (BRGM, 1971)

Campagne de mai 1968

Lors de cette première campagne de jaugeage, l'Iton ne présente pas d'assec et coule depuis sa source jusqu'à la confluence avec l'Eure. On peut ici distinguer quatre zones de pertes principales (cf Illustration 113) :

- En aval du Petit Sacq : depuis le lieu-dit La Mésangère (commune de Manthelon) jusqu'à la Ferme de Villalet, l'Iton perd 340 l/s sur un linéaire d'environ 4 km ;
- Au Rebrac : sur une boucle de 1 600 m, le débit de l'Iton diminue de 400 l/s, ce qui représente la zone de plus fortes pertes le long du Sec-Iton ;
- Au lieu-dit Les Boscherons (commune de Gaudreville-la-Rivière), le débit diminue de 186 l/s sur un linéaire d'environ 4 km ;
- Enfin la dernière zone de perte se situe au niveau de la confluence du Rouloir : sur un linéaire de 2 km correspondant à la confluence des différents bras du Rouloir, le débit de l'Iton (isolé de l'apport du Rouloir) diminue de 112 l/s.

De même, certaines portions de l'Iton sont caractérisées par d'importants gains de débit. Dans le cas de cette campagne de jaugeage, ces zones sont principalement celles bordant la source des Grands Riants (apport de 475 l/s), de la Fosse aux Dames (apport de 448 l/s), et de différentes sources situées à La Bonneville-sur-Iton (apport de 1 566 l/s).

Campagne d'octobre 1968

Lors de cette deuxième campagne de jaugeage, le BRGM a réalisé des mesures depuis Bourth jusqu'aux Planches. Les mêmes zones de pertes qu'en mai 1968 sont observées : en aval du Petit Sacq (- 106 l/s) ainsi qu'au Rebrac qui constitue toujours la principale zone de pertes (- 344 l/s). L'Iton présente ensuite un assec depuis la Côte des Longs Champs jusqu'à la source du Bois des Carrières plus de 3 km en aval.

A partir de cette source, l'Iton s'écoule de nouveau en surface (seulement 2 l/s), et la source des Grands Riants augmente ensuite le débit de l'Iton de 339 l/s, qui est mesuré à 341 l/s au niveau de la Ferme de Gaudreville. Puis on retrouve toujours une zone de pertes à la confluence du Rouloir. Après cette confluence, les diverses sources du secteur de la Bonneville-sur-Iton contribuent à augmenter le débit de la rivière : la Fosse aux Dames porte le débit de l'Iton à 1 881 l/s qui atteint finalement 3 447 l/s à Bérengeville. Les points de mesure plus en aval ne permettent pas de visualiser d'autres baisses du débit jusqu'aux Planches. Les variations de débit le long de l'Iton lors de cette campagne de jaugeage sont représentées sur l'Illustration 114.

Campagne d'octobre 1970

Dans cette dernière campagne, les zones de pertes et d'assecs sont légèrement plus importantes que celles des campagnes précédentes (voir Illustration 115). En effet, les pertes de débit commencent dès le lieu-dit du Petit Sacq (et non en aval), où l'écoulement représente 351 l/s puis s'épuise jusqu'à tarir complètement au lieu-dit de La Biocherie (Côtes des Longs Champs). La source du Bois des Carrières ne produit aucun débit, et ce n'est qu'à partir de la source des Grands Riants (jaugée à 220 l/s) que l'Iton retrouve un écoulement surfacique visible.

Le débit du Rouloir n'ayant pas été mesuré cette année-là, il n'est pas possible d'isoler la part de son apport dans le débit de l'Iton. Par conséquent les pertes ne peuvent pas être évaluées sur la portion de rivière intégrant la confluence. Néanmoins il est probable que des pertes de débit existent à cet endroit, comme lors des campagnes de 1968. Enfin la source de la Fosse aux Dames contribue au débit de l'Iton à hauteur de 353 l/s, et les autres sources de La Bonneville-sur-Iton apportent un débit supplémentaire de 1 224 l/s le long d'une section de rivière de 4 500 m jusqu'à Bérengeville.

7.4.3. Jaugeages ponctuels

Depuis la seconde moitié du XXème siècle, divers jaugeages ponctuels ont été réalisés sur les cours d'eau du bassin de l'Iton par la DREAL Haute-Normandie (ex-DIREN) et le BRGM. L'Illustration 105 localise les différents points jaugés. Parmi ces points, seuls certains sont récurrents et font partie de campagnes synchrones qui intègrent plusieurs points le long des rivières du bassin (points rouges sur la carte).

La combinaison des points des campagnes synchrones avec les valeurs de débits correspondantes mesurées aux stations de jaugeage permanentes permet d'obtenir sept valeurs de débit à une date donnée le long de l'Iton (la station de Crulai, hors service depuis 2011, n'est pas représentée sur la carte). La combinaison de ces données est possible pour quatre dates : les 11 septembre 2002, 5 août 2003, 18 septembre 2003 et septembre 2004. Le graphique présenté en Illustration 106 représente les variations de débits de l'Iton pour ces quatre dates.

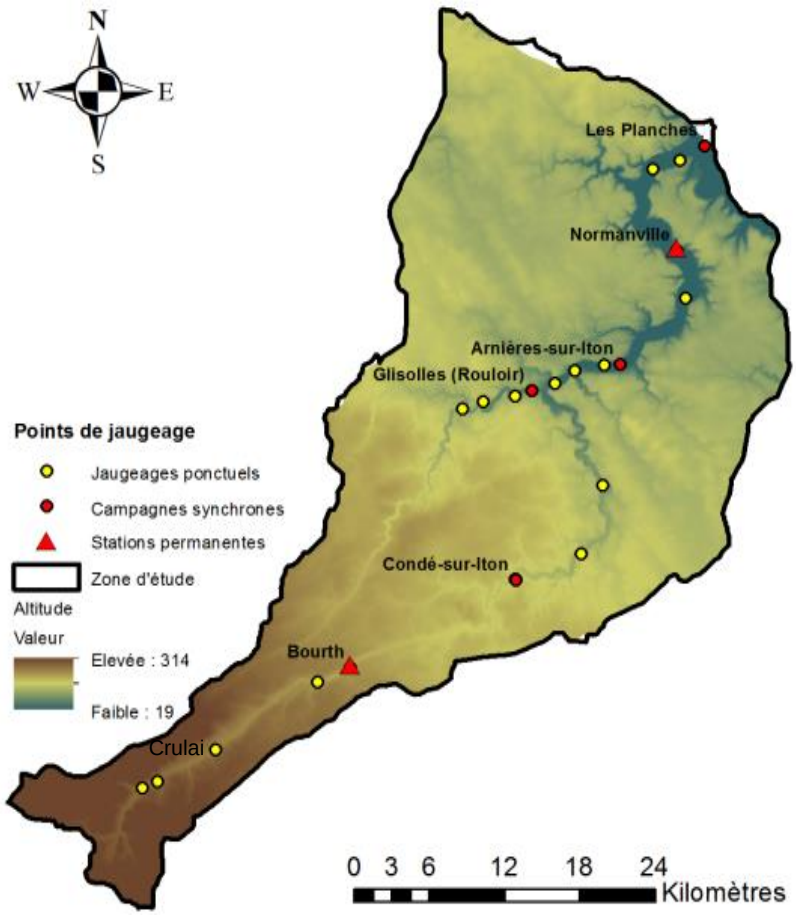


Illustration 105 : Localisation des points de jaugeage ponctuels réalisés depuis 1965 (DIREN, DREAL, BRGM) (les stations permanentes représentées par un tiangle rouge, sont celles encore en activité en 2016)

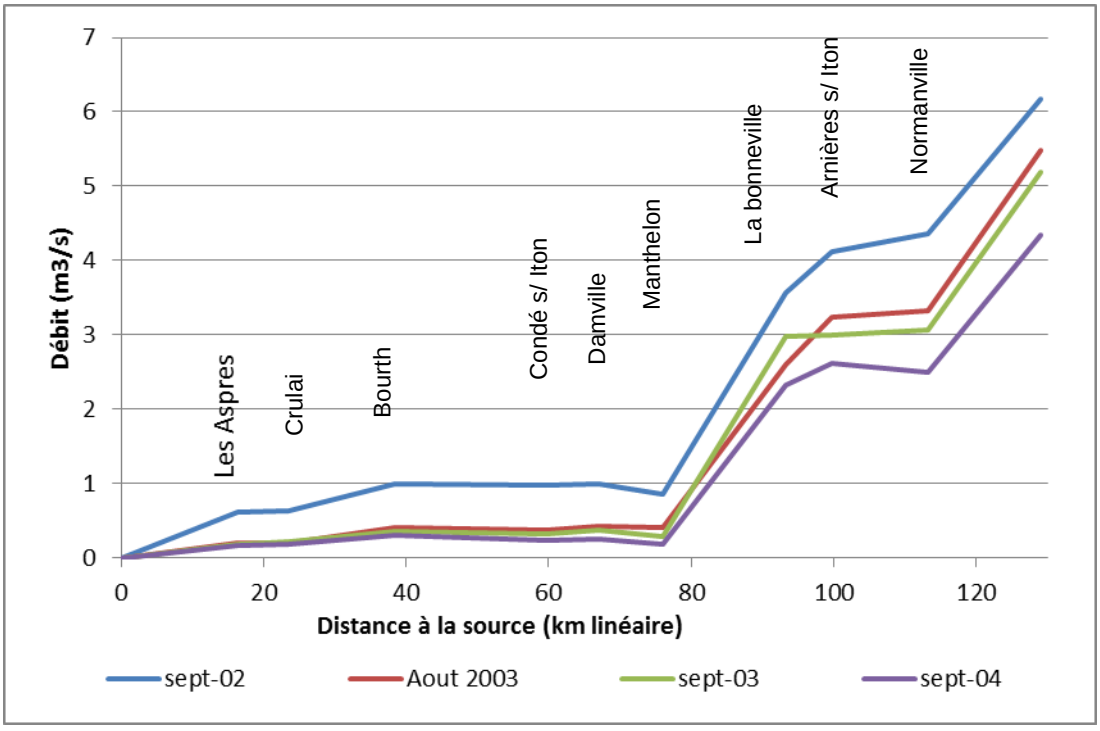


Illustration 106 : Mesures de débit le long de l'Iton - Source : campagnes de jaugeage DIREN Haute-Normandie

Du fait de la localisation des points de jaugeage, ces courbes ne permettent pas de quantifier les éventuelles pertes de débit dans les zones précédemment identifiées (Sec-Iton, voir partie 5.4.2). Seul le tronçon situé entre Bourth et Condé-sur-Iton présente un débit constant, ce qui correspond en réalité à des pertes de débit, compensées par des apports d'eau par les versants, c'est-à-dire une diminution du débit spécifique. Le tronçon compris entre Arnières/Iton est tantôt en perte (en 2004) tantôt en gain de débit (2002 et 2003) selon la date de mesure.

Concernant les zones de gains majeurs de débit, comme l'avaient montré les précédentes campagnes de jaugeage, deux tronçons ressortent : le secteur de la Bonneville sur Iton et celui de Hondouville.

Une comparaison des débits spécifiques peut être réalisée entre les points de mesure. Le débit spécifique est le rapport du débit du cours d'eau en un point sur la superficie de bassin versant qui l'alimente. La comparaison des débits spécifiques entre deux points peut par exemple renseigner sur d'éventuelles pertes de débit sur le linéaire qui les sépare. Le Tableau 10 synthétise les données calculées sur les différents points jaugés.

Localité	Superficie du bassin (km^2)	Débit spécifique (en $l/s/km^2$)		
		sept-02	aout 2003	sept-03
Crulai	103	6,17	1,96	2,15
Bourth	158,96	6,21	2,52	2,30
Condé	273,34	3,60	1,40	1,15
Glisolles	261,01	4,33	5,13	4,79
Arnières	860,18	4,79	3,77	3,48
Normanville	1030,51	4,23	3,22	2,98
Planches	1197,79	5,15	4,58	4,33

Tableau 10 : Débits spécifiques le long de l'Iton - Données : campagnes de jaugeage DIREN Haute-Normandie

Le diagramme en Illustration 107 présente les valeurs moyennes du débit spécifique pour chaque point de mesure.

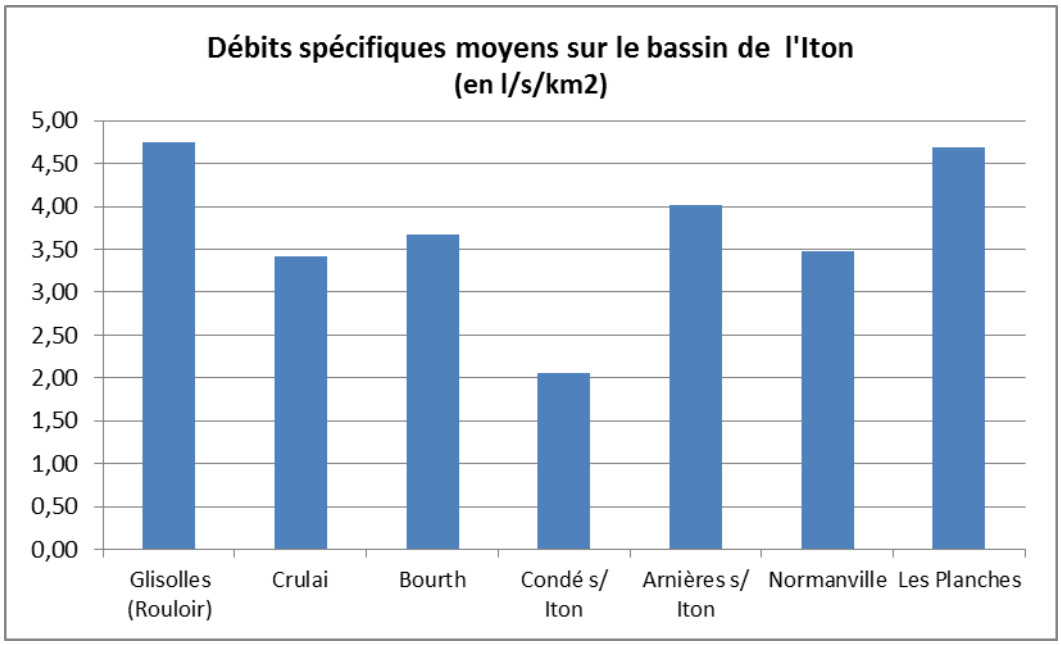


Illustration 107 : Valeurs moyennes de débit spécifique sur les points de mesure - Données : Campagnes DIREN Haute-Normandie 2002 et 2003

Les débits spécifiques (rapport du débit du cours d'eau sur la surface de bassin d'alimentation) les plus importants sont ceux mesurés sur le Rouloir à Glisolles et sur l'Iton à Amfreville (lieu dit les planches). Ces fortes valeurs s'expliquent par le fait que ces points de mesure sont situés aux exutoires de deux bassins versants dont toutes les infiltrations et pertes sont restituées au réseau hydrographique avant l'exutoire (pertes vers les bassins de l'Avre et de l'Eure exceptées) :

- Bien que le Lème subisse de très importantes pertes de débits du fait des nombreuses bétoires présentes dans sa vallée, plusieurs sources sont situées à l'aval du bassin et restituent a priori l'écoulement souterrain à la rivière du Rouloir (cf. sources de Conches-en-Ouche, du Château Quenet, de la Fontaine Lallier ou encore du Moulin Athelin). Des mesures de turbidité attestent d'ailleurs du fonctionnement karstique de ce secteur (cf. partie 7.2.4) ;
- Le point de mesure des Planches représente l'exutoire de la totalité du bassin versant de l'Iton (pertes vers l'Eure et l'Avre exceptées), il est donc comparable en terme de débit spécifique au point de mesure de Glisolles pour le Rouloir. Par ailleurs, les pertes de débit de Normanville vers les sources de la vallée de l'Eure peuvent éventuellement être au moins partiellement compensées par l'apport de la source d'Hondouville (indice BSS 01501X0006/S), source karstique dont le bassin versant non connu précisément pour le moment, couvre probablement des secteurs situés au-delà du bassin versant topographique de l'Iton.

Le débit spécifique (Qs) de l'Iton diminue fortement entre Bourth et Condé-sur-Iton. Ceci s'explique probablement par le fait que le bras forcé de Verneuil dérive une partie non négligeable du débit de l'Iton vers le bassin de l'Avre. Au niveau d'Arnières-sur-Iton, le Qs augmente jusqu'à une valeur supérieure à celle mesurée à Bourth. Cette augmentation est probablement due à l'importante zone de résurgences de la région de La Bonneville-sur-Iton (sources des Grands Riants, de la Fosse aux Dames, de la Forge, du Pré Mou, du Souci, …).

Le fonctionnement hydraulique de l'Iton est similaire sur sa partie aval. Des pertes de débit ont lieu entre Evreux et Normanville (des traçages attestent notamment des pertes de l'Iton vers la vallée de l'Eure) ; et une zone de résurgences succède ensuite à ces pertes, entre Tourneville-la-Rivière et Hondouville (source d'Hondouville jaugée à plus de 1 m^3/s, indice BSS 01501X0006/S). D'où un Qs plus faible à Normanville et supérieur aux Planches.

7.4.4. Les constats d'assecs sur l'Iton et le Rouloir

Afin de compiler un maximum de données sur les différents assecs qu'ont connu l'Iton et le Rouloir, une recherche bibliographique a été effectuée. Les principaux ouvrages et bases de données consultés sont les suivants :

- Les pertes de l'Iton, par Edouard Ferray, 1882, dans L'Eure Souterraine ;
- Etude hydrogéologique du Sec-Iton, BRGM, 1971 (Rapport 71-SGN-127 PNO) ;
- Base de données ROCA de l'ONEMA de 2005 à 2011 (Réseau d'Observation des Crises d'Assec) ;
- Base de données ONDE de l'ONEMA, de 2012 à 2015 (Observatoire National Des Etiages) ;
- Assec du Rouloir, Commune de Conches-en-Ouche (Eure) – Avis du BRGM, Rapport final (Rapport RP-56189-FR).

L'Illustration 108 localise les différents assecs recensés sur le Rouloir et l'Iton. Les pentagones oranges matérialisent les points d'observation de l'ONEMA ayant fait l'objet d'assecs. Seules ces observations ponctuelles sont disponibles, et l'extension de ces phénomènes d'assec n'est malheureusement pas connue. Les détails concernant ces points sont synthétisés dans un tableau présenté en Annexe 8.

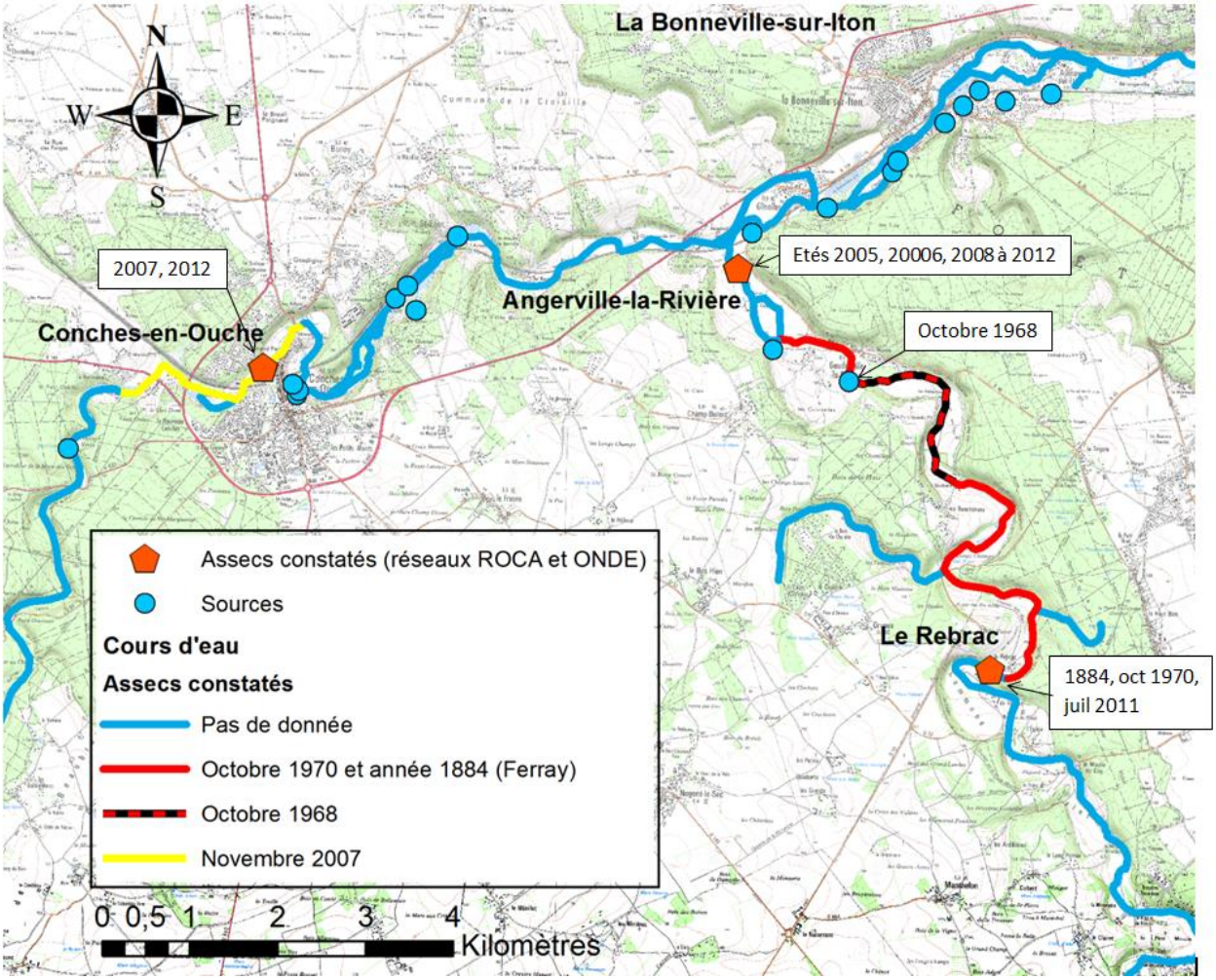


Illustration 108 : Localisation des différents assecs observés dans le passé sur le Rouloir et l'Iton

Concernant l'Iton, la zone principale subissant des assecs correspond au secteur aval du Sec-Iton allant du Rebrac jusqu'à Gaudreville-la-Rivière. Ce phénomène est attesté entre le Rebrac et la source des Grands Riants dans les ouvrages de Ferray (1884), et dans la campagne de jaugeage du BRGM d'octobre 1970 (BRGM, 1971). Le jaugeage effectué par le BRGM dans le cadre de cette même étude en octobre 1968 indique que l'Iton était à sec sur un tronçon d'extension moindre : depuis le lieu-dit La Biocherie jusqu'à la source du Bois des Carrières.

L'ONEMA a mis en place, depuis 2004, des réseaux d'observation des écoulements des cours d'eau (Réseau d'Observation des Crises d'Assec de 2004 à 2011, puis Observatoire National Des assecs depuis 2012). Sur le bassin de l'Iton, ces points sont situés d'amont en aval sur les communes suivantes : Chaise-Dieu-du-Theil, Verneuil-sur-Avre (Bras Forcé de Verneuil), La Guéroulde, Saint-Nicolas-d'Attez, Villalet, Conches-en-Ouche (Rouloir). Parmi ces points, seuls ceux de Villalet et Gaudreville-la-Rivière présentent périodiquement des assecs (cf. tableau en annexe 8). A Gaudreville-la-Rivière, le point de suivi (situé en aval de la source des Grands Riants) a subi des assecs durant plusieurs mois pendant les étés 2005, 2006, 2008, 2009,

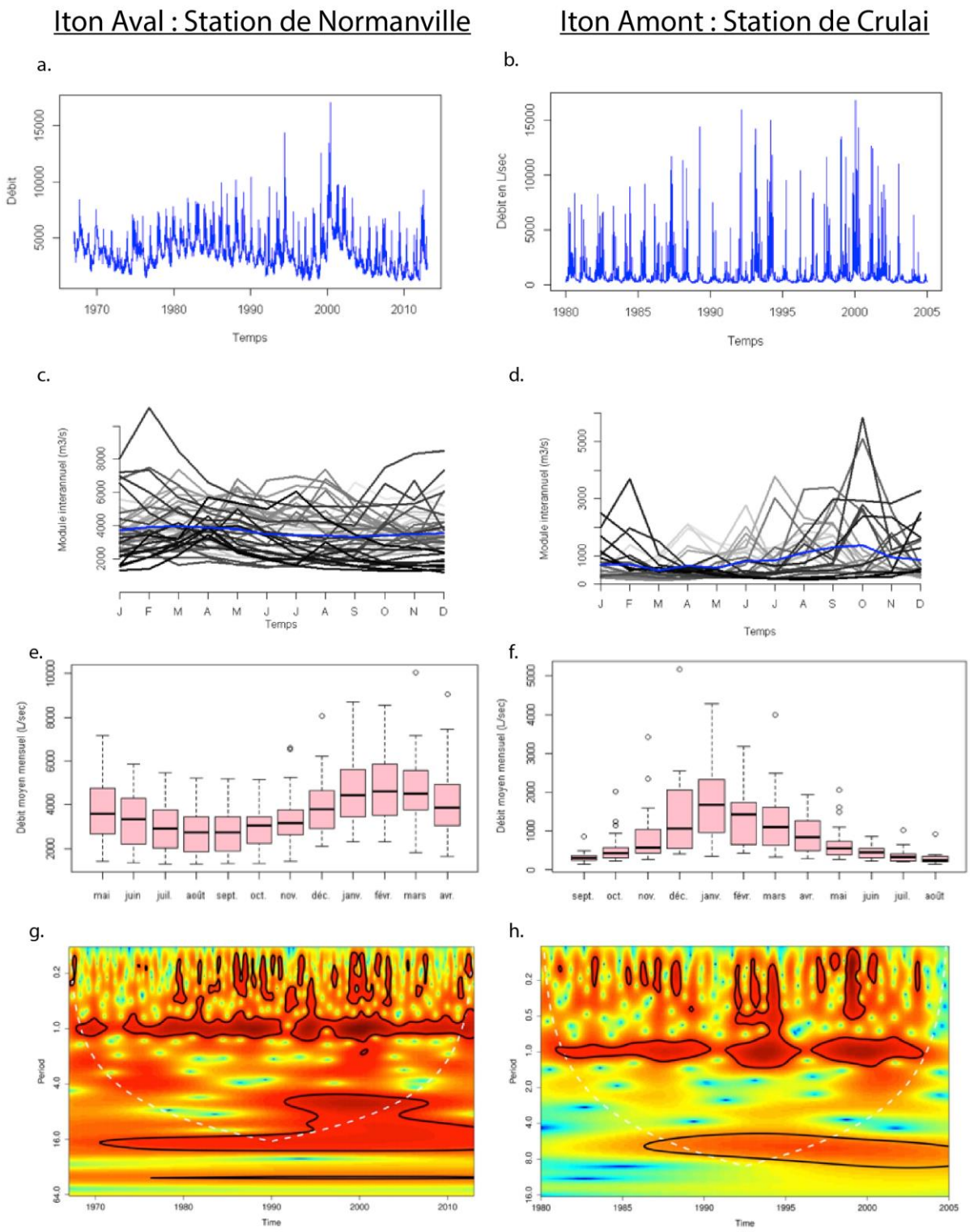
2010, 2011 et 2012. Le Rouloir n'ayant pas présenté d'assec à ces dates, la confluence marquait alors la reprise de l'écoulement superficiel de l'Iton. Bien que le point amont de ces phénomènes ne soit pas connu, il est toujours situé entre Gaudreville-la-Rivière et Villalet, car ce dernier point ne subit généralement pas d'assec. L'Iton présentait néanmoins un assec à Villalet le 25/07/2011, assec qui ne se prolongeait pas jusqu'au point de suivi de Gaudreville. Au vu des tendances récurrentes, la reprise de l'écoulement superficiel de l'Iton était alors probablement située au niveau de la source du Bois des Carrières ou des Grands Riants.

Le Rouloir, quant à lui, ne présente que plus rarement des phénomènes d'assec. En novembre 2007, il s'est asséché pendant quinze jours sur les trois premiers kilomètres de son cours : depuis le pont séparant les deux étangs du Vieux Conches jusqu'à l'exutoire de la station d'épuration de Conches-en-Ouche. La cause de cet assec était le faible taux de remplissage de l'aquifère crayeux dû aux précipitations hivernales déficitaires les années précédentes (BRGM, 2008). De plus, le réseau de suivi ONDE de l'ONEMA a relevé un phénomène d'assec s'étalant de mai à septembre 2012 sur le point de suivi de Conches-en-Ouche. Là encore, l'extension totale de ce phénomène n'est pas connue, mais il est probable que l'exutoire de la station d'épuration de Conches-en-Ouche ait là encore constitué le départ de l'écoulement surfacique du Rouloir.

Les différents phénomènes d'assec cités dans cette partie ont été recensés dans diverses études et bases de données, néanmoins il faut garder à l'esprit que le Sec-Iton présente régulièrement des tronçons sans écoulement en périodes de basses eaux, et de nombreux phénomènes similaires ont eu lieu auparavant, sans que ceux-ci n'aient été quantifiés ou localisés précisément. Enfin, bien que le système d'observation des assecs mis en place par l'ONEMA assure un suivi régulier, les points observés ne sont pas toujours placés de façon optimale.

7.5. ETUDES STATISTIQUES DES DEBITS AUX STATIONS DE CRULAI (ITON AMONT) ET DE NORMANVILLE (ITON AVAL)

L'étude statistique utilise les données de débits journaliers fournies par la DREAL pour les stations de Crulai (Iton amont) et de Normanville (Iton aval) (localisation des 2 stations à l'Illustration 105). Cette analyse statistique a été conduite avec le logiciel R (Illustration 109).



a. Chronique des débits de l'Iton à Normanville	e. Boîte à moustache des débits moyens mensuels à Normanville
b. Chronique des débits de l'Iton à Crulai	f. Boîte à moustache des débits moyens mensuels à Crulai
c. Régime hydrologique de l'Iton à Normanville	g. Analyse CWT des débits de l'Iton à Normanville
d. Régime hydrologique de l'Iton à Crulai	h. Analyse CWT des débits de l'Iton à Crulai

Illustration 109 : Analyse statistique des débits de l'Iton aux stations de Crulai et Normanville

7.5.1. Analyse des chroniques de débits

L'Illustration 109 (a et b) présente les chroniques de débits de l'Iton mesurés à Normanville et à Crulai, respectivement de 1967 à 2013 et de 1980 à 2005. Ces chroniques mettent en évidence les deux composantes principales du débit de l'Iton qui sont le débit de base, et les pics qui se superposent sur ce dernier lors des épisodes de crues. Pour chaque station, il existe un pic principal par an, qui correspond à la période de crue qui a généralement lieu en hiver. Le débit redescend entre chacun de ces pics à une valeur minimale correspondant au débit de base, sous lequel le débit ne descend jamais.

Entre la station amont à Crulai et la station aval à Normanville, d'importantes différences existent dans les régimes de débit :

- Les pics de débit enregistrés sont relativement importants à Crulai ; avec des valeurs atteignant régulièrement 10 000 l/s en crue avec des écarts importants par rapport au débit de base. A Normanville, en revanche, cette valeur est atteinte beaucoup plus rarement et les écarts entre les pics de crue et le débit de base sont plus limités ;
- La valeur du débit de base est également très différente entre ces deux stations. En effet, il est relativement constant à Crulai et y dépasse rarement quelques centaines de L/s, alors qu'il effectue de fortes variations interannuelles à la station de Normanville, avec des valeurs pouvant atteindre plus de 5 000 L/s (2001 par exemple).

Le débit de base peut être défini comme la part du débit d'un cours d'eau qui est due à des apports indirects, c'est-à-dire de l'eau ayant transité par des réservoirs temporaires comme les nappes phréatiques, par opposition aux apports directs du ruissellement des précipitations. La différence du régime de débit de base entre les deux stations de mesure peut s'expliquer par une contribution souterraine moindre dans le bassin versant de Crulai. Ce qui confirme la carte des contributions souterraines plus faibles à l'amont du bassin versant.

Cette différence dans la répartition entre ruissellement et infiltration explique également la variation de l'importance des pics de crue. En effet, les sols étant plus ruisselants sur l'amont du bassin (d'où un réseau hydrographique plus dense), les fortes précipitations sont peu tamponnées par les réservoirs souterrains et sont donc transmises au cours de l'Iton plus rapidement.

7.5.2. Analyse des régimes hydrologiques (Illustration 109 c. et d.)

La détermination des régimes hydrologiques interannuels pour un cours d'eau permet une bonne représentation de la tendance générale de distribution des débits mensuels moyens au cours de l'année. Le régime hydrologique d'une rivière est donc un état hydrologique moyen sur un temps donné et permet de mettre en évidence la présence d'une éventuelle évolution du fonctionnement hydrologique du cours d'eau. Sur le régime hydrologique de Crulai, les valeurs moyennes du module interannuel lors de période « hautes eaux » et « basses eaux » sont aisément distinguables (Illustration 109 d.). Il y a, à Crulai, une réelle différence en ce qui concerne le régime hydrologique en été et en hiver. En revanche les variations du régime hydrologique de Normanville (Illustration 109 c.) sont bien moins importantes. Il est, en effet, difficile de déterminer ici, un maxima et un minima. On a donc un état, en aval, bien plus « constant » qu'en amont. Une telle différence ne peut être expliquée que par l'existence d'un système de régulation qui joue un rôle tampon entre l'amont et l'aval.

Sur l'ensemble du bassin versant de l'Iton, deux stations hydrométriques sont, en 2016, en service : à Bourth et à Normanville. Les stations de Manthelon et de Crulai sont arrêtées. Leurs

principales caractéristiques sont données ci-dessous (source DREAL Haute-Normandie – Banque HYDRO) :

N° station	Commune	Altitude	Superficie BV amont	Période d'enregistrement
H9402020	CRULAI	203 m NGF	108 km²	1980 – 2005
H9402040	BOURTH	181 m NGF	290 km²	1999 – 2016
H9402010	MANTHELON	119 m NGF	414 km²	1970 – 1992
H9402030	NORMANVILLE	49 m NGF	1 050 km²	1967 – 2016

Tableau 11 : Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin versant de l'Iton

Les débits caractéristiques de crue sont estimés (source Banque HYDRO) au niveau des stations hydrométriques de CRULAI, de MANTHELON et de NORMANVILLE :

Station	Débit de crue biennale Q_2	Débit de crue quinquennal Q_5	Débit de crue décennale Q_{10}	Débit de crue vicennale Q_{20}	Débit de crue cinquantennal Q_{50}
CRULAI	12 m^3/s (11 – 13 m^3/s)	15 m^3/s (14 – 17 m^3/s)	17 m^3/s (15 – 19 m^3/s)	18 m^3/s (17 – 22 m^3/s)	21 m^3/s (19 – 25 m^3/s)
MANTHELON	10 m^3/s (8,6 – 13 m^3/s)	17 m^3/s (14 – 22 m^3/s)	21 m^3/s (18 – 28 m^3/s)	25 m^3/s (21 – 34 m^3/s)	31 m^3/s (26 – 42 m^3/s)
NORMANVILLE	8 m^3/s (7,6 – 8,6 m^3/s)	10 m^3/s (9,4 – 11 m^3/s)	11 m^3/s (10 – 13 m^3/s)	13 m^3/s (11 – 14 m^3/s)	14 m^3/s (13 – 16 m^3/s)

Tableau 12 : Débits de crue caractéristiques (source Banque HYDRO)

L'évolution des débits caractéristiques de l'amont vers l'aval témoigne de l'existence de pertes importantes entre les stations de MANTHELON et de NORMANVILLE, puisque, malgré les rejets des eaux pluviales et de la STEP de l'agglomération d'EVREUX, les débits caractéristiques diminuent de 40 à 55 % (excepté pour les débits biennaux) alors que la superficie du bassin versant a été multipliée par 4 (Antea, 2005).

7.5.3. Analyse des boites à moustaches

Les graphiques de l'Illustration 109 (e. et f.) présentent la répartition des débits moyens mensuels sous forme de boîtes à moustache. La médiane des débits moyens mensuels est beaucoup plus lissée au cours du cycle hydrologique à Normanville qu'à Crulai.

7.5.4. Analyse des CWT

La transformée en ondelette continue ou CWT (Continuous Wavelet Transform) est une technique d'analyse de traitement du signal permettant une décomposition d'un signal temporel dans l'espace temps-fréquence.

Cette méthode est utilisée pour identifier la structure spectrale des signaux et les espaces fréquentiels où des cycles périodiques apparaissent. Appliquée aux séries climatiques et

hydrologiques, l'analyse en ondelettes permet donc de décrire la variabilité des fluctuations hydrologiques en mettant en évidence les périodes d'oscillations régulières dans le temps (sous la forme de bandes d'énergie) ou les phénomènes ponctuels erratiques (sous la forme de pics d'énergie).

Les résultats de cette analyse sur les chroniques de débit des stations de Normanville et Crulai sont présentés sur l'illustration 111 g et h.

A l'echelle infra-annuelle (périodicité <1 an), on observe des composantes isolées plus ou moins intenses selon les années, reflétant le ou les mois pluvieux de la saison automnale/hivernale. Ces pics s'observent sur les deux stations sur la plupart des années de la série mis à part les années 70 et les années les plus récentes (post 2002), lors des décades plus sèches.

A l'échelle annuelle (périodicité = 1 an), on distingue un cycle annuel bien marqué aux deux stations. La régularité de cette cyclicité est stoppée au début des années 1970 et 1990 mettant en évidence des années de faibles écoulements annuels en période de basses eaux.

A l'échelle pluri-annuelle (périodicité entre 4 et 16 ans), la différence entre les deux stations est notable, reflétant une réponse hydrologique distincte. A Crulai, les variations pluri-annuelles se matérialisent par une composante à 8 ans encadrant la période de hautes eaux 1990-2002. A Normanville, les composantes pluri-annuelles s'étalent sur les périodes de 4 à 16 ans : i) une composante à 4-5 ans sur la période de hautes eaux incluant les années humides 1995, 1998-1999 et 2002, ii) et une composante à 16 ans sur l'ensemble de la chronique disponible, mettant en évidence de grandes alternances de décades sèches et humides depuis les années 70. L'analyse des composantes pluri-annuelles est à prendre avec précaution car la chronique de Crulai n'est que de 25 ans et celle de Normanville de 46 ans.

Cette analyse en ondelette reflète donc un changement de régime hydrologique principalement dans les grandes longueurs d'onde entre la station amont de Crulai, peu influencée par les nappes, et celle de Normanville à l'aval, en lien avec l'aquifère de la Craie. On peut supposer que la station de Normanville imprime les grands cycles pluri-annuels mis en évidence sur les piézomètres à la section 6.3.2. On peut supposer de la même façon que la station de Crulai imprime les cycles pluri-annuels de précipitation et la répartition recharge/ruissellement évoqué au paragraphe 3. Toutes ces chroniques seront analysées conjointement par les modèles globaux (TEMPO et GARDENIA) respectivement aux paragraphes 12.3 et 9.

7.5.5. Synthèse

Les différents éléments développés précédemment mettent en évidence un signal beaucoup plus tamponné des débits à l'aval du bassin versant.

Une composante inertielle est présente dans le signal de débit à Normanville liée au contrôle du débit de la rivière par la nappe (cf. résultats présentés au paragraphe 8).

8. Qualification et quantification des échanges nappe/rivière

Dans le paragraphe précédent, l'interprétation des résultats des campagnes de jaugeage a déjà permis de qualifier les échanges nappe/rivière en identifiant les secteurs du cours d'eau présentant des pertes ou des gains de débit.

Ce présent paragraphe a pour objectif de préciser et compléter cette analyse de 4 façons :

- La qualification des échanges nappe/rivière est ici abordée par comparaison des altitudes de la rivière (ligne d'eau) et de celles de la nappe (piézométrie) (cf. § 8.1) ;
- La quantification des échanges nappe/rivière par analyse des mesures débitmétriques ;
- La quantification des échanges sera ensuite effectuée par analyse de la répartition des écoulements en basses eaux (cf. § 8.3) ;
- Enfin, le § 8.4 tentera de quantifier le fonctionnement du cas particulier du secteur karstique du sec-Iton (quantification des débits perdus et restitués).

8.1. QUALIFICATION DES ECHANGES NAPPE/RIVIERE PAR COMPARAISON DE LA LIGNE D'EAU ET DES NIVEAUX DE LA NAPPE

Il n'existe pour le moment pas de campagne de mesure de la ligne d'eau ayant couvert l'ensemble de la rivière Iton. Seuls deux tronçons ont fait l'objet de mesure : le Sec-Iton (étude BRGM de 1968-1971) et l'Iton à l'aval d'Evreux (Etude BRGM de 2014).

L'analyse de l'écart qui existe entre le niveau piézométrique au droit de l'Iton et la ligne d'eau de la rivière, permet de fournir des éléments pour estimer en première approche le lien hydraulique éventuel qui existe entre les deux, et dans l'affirmative, l'orientation du gradient hydraulique et le sens des échanges de flux entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

8.1.1. Secteur du Sec-Iton

Le BRGM, dans son étude de 1968-1970 (Artis et al., BRGM 1971), a étudié les connexions entre la nappe de la craie et la rivière Iton. Pour cela, 22 puits ont été recensés dans la vallée du Sec-Iton, de Coulonges à la Bonneville-sur-Iton, et des mesures piézométriques y ont été réalisées (localisation de ces puits à l'Illustration 104).

En parallèle, des relevés topographiques de la ligne d'eau de l'Iton ont été effectués et ont permis de dresser un profil nappe/rivière. Celui-ci est présenté en Illustration 110.

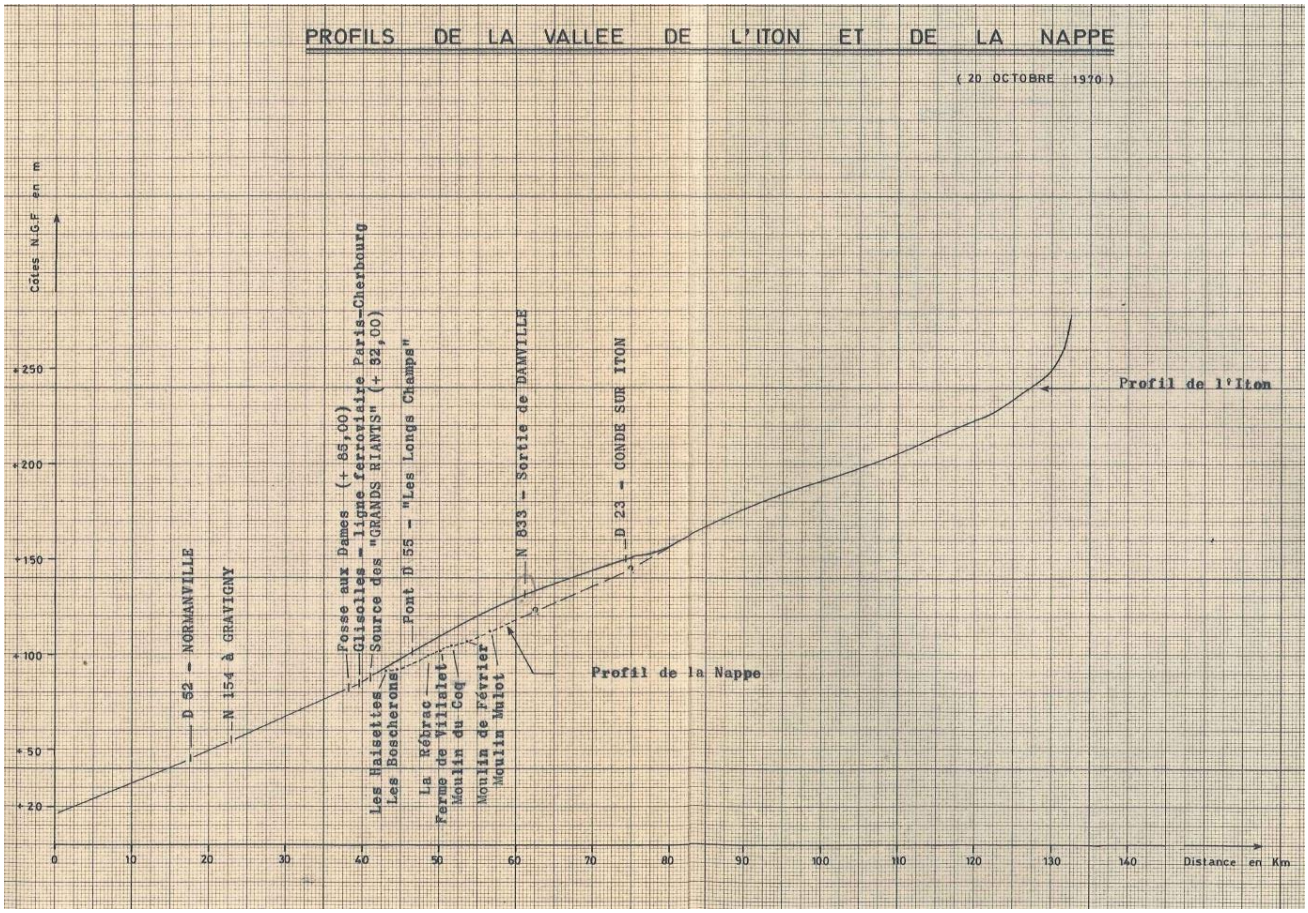


Illustration 110 : Profils d'altitude de la vallée de l'Iton et de la nappe (source : Artis et al., BRGM 1971)

Le profil réalisé montre un décrochement significatif de la nappe par rapport au lit de l'Iton. Ce décrochement s'étend jusqu'au lieu-dit des Haisettes, en amont de Gaudreville-la-Rivière. L'écart d'altitude atteint son maximum au niveau du lieu-dit du Petit-Sacq, dans la commune de Le Sacq, avec plus de 12 mètres d'écart entre le niveau de la nappe et la ligne d'eau de la rivière. Néanmoins, il est important de noter que les mesures ont été réalisées en période de basses eaux (mois d'octobre 1970), elles constituent donc probablement un décrochement maximal à l'échelle de l'année hydrologique complète.

Sur le profil ci-dessus, le décrochement de la nappe a été représenté depuis Condé-sur-Iton, car les premières pertes de débit ont été enregistrées à cet endroit, notamment par Ferray dans les années 1880 ; toutefois le début de la déconnexion entre la nappe et la rivière n'a pas pu être déterminé précisément par cette étude de 1971, car le puits le plus amont mesuré est situé au Moulin Mulot, au niveau du Petit Sacq, lieu-dit situé très en aval de Condé-sur-Iton. Le secteur déconnecté entre Condé-sur-Iton et Moulin Mulot serait donc à confirmer par des mesures sur le terrain.

Un suivi piézométrique en continu effectué de 1969 à 1971 sur trois puits (respectivement de l'amont à l'aval : La Touchardière, Les Boscherons, Les Haisettes - localisation de ces lieux-dits à l'Illustration 104) montre que le niveau piézométrique sur le tronçon du Sec-ITon n'a jamais atteint la côte du lit de l'Iton. En effet, pour chacun de ces points, l'écart minimal (période de hautes eaux) entre le niveau de la nappe et de l'Iton est respectivement de 5,40 m, 1,80 m et 60 cm pour les Haisettes, où la nappe commence à se reconnecter à la rivière.

Le relevé de la ligne d'eau de l'Iton met en évidence que sur le tronçon correspondant au Sec-Iton, le cours d'eau est convexe. L'Iton n'y aurait donc pas atteint son profil d'équilibre, ce qui pourrait expliquer partiellement le décrochement du cours d'eau par rapport au niveau de la nappe (Artis et al., BRGM 1971).

8.1.2. Secteur de l'Iton aval

Dans le cadre de l'étude de la pollution d'un captage AEP dans la vallée de l'Iton (Le Mesnil M. et al. 2016), le BRGM a réalisé en 2014 deux campagnes de mesure de la ligne d'eau de l'Iton ainsi que de la piézométrie. Ces mesures ont permis d'établir un profil en long de la nappe et de la rivière, entre La Bonneville-sur-Iton et Amfreville-sur-Iton (voir Illustration 111).

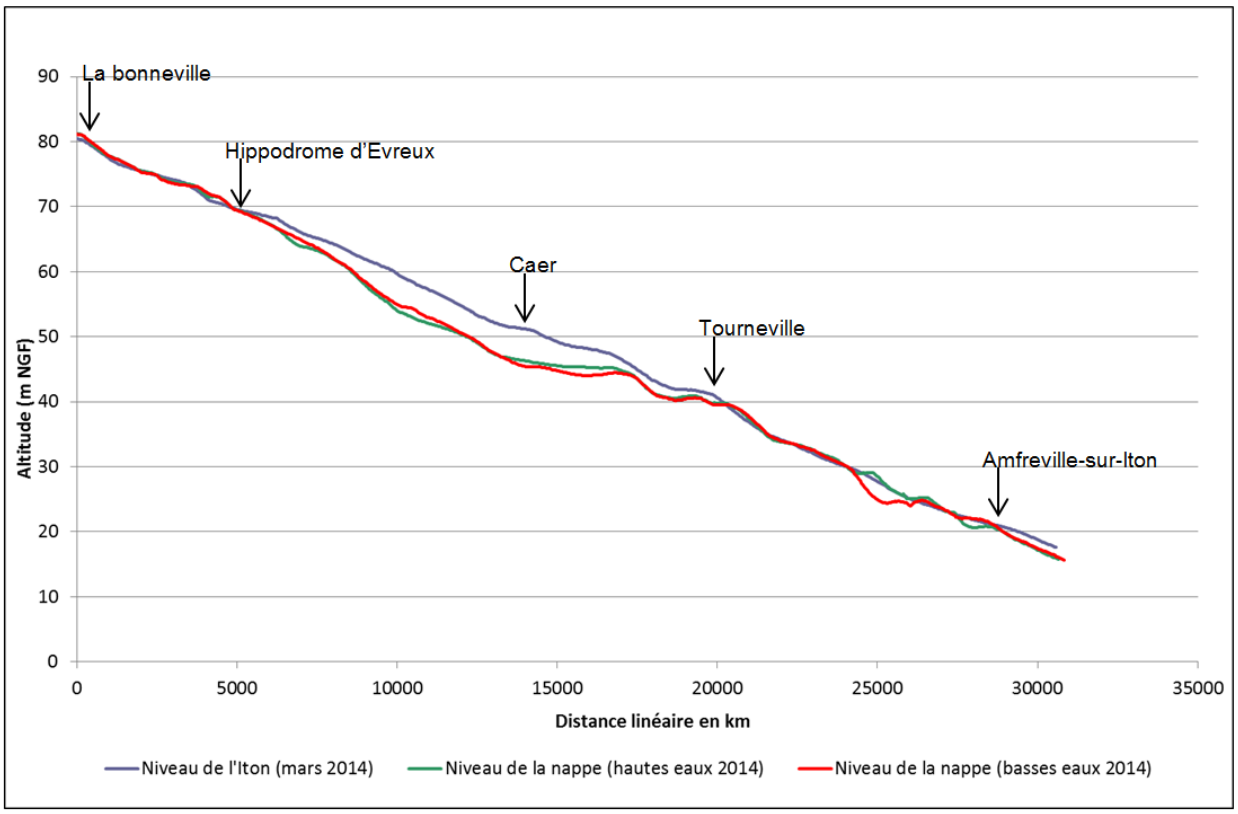


Illustration 111 : Profil nappe/rivière schématique de l'Iton entre la Bonneville-sur-Iton et Amfreville-sur-Iton (source : Le Mesnil M. et al. 2016)

Ce profil en long met en évidence deux zones principales de décrochement de la nappe par rapport à l'Iton :

- Le niveau piézométrique est fortement déconnecté de la rivière à partir de l'amont d'Evreux (au niveau de l'hippodrome) jusqu'à Saint-Germain-des-Angles, avec un décrochement pouvant atteindre 8 mètres entre Gravigny et Normanville ;
- La nappe semble également déconnectée depuis d'Amfreville-sur-Iton jusqu'à Acquigny. Les mesures effectuées qui montrent des écarts entre le niveau de la nappe et celui de la rivière sont présentées dans le Tableau 13. **Il n'est pas exclu que l'écart constaté au niveau du puits 01245X0092 à Amfreville soit lié aux pompages industriels situés à proximité et que la déconnexion nappe/rivière soit d'origine anthropique.**

Piézomètre mesuré	Distance du point de mesure de la ligne d'eau le plus proche du piézomètre	Ecart entre l'altitude de la rivière et l'altitude de la surface piézométrique (mars 2014)	Ecart rivière/surface piézométrique (septembre 2014)
01246X0144	270 m en aval	55 cm	87 cm
01245X0092	38 m en aval	1,42 m	1,66 m

Tableau 13 : Données piézométriques et de ligne d'eau dans le secteur aval de l'Iton (campagne de mesure réalisée par le BRGM en 2014 dans le cadre de l'étude Le Mesnil M. et al. 2016)

En fonction de la différence d'altitude observée entre la surface piézométrique et la ligne d'eau de l'Iton, le linéaire de la rivière a été cartographié selon trois configurations distinctes dans la carte de l'Illustration 112 : rivière connectée à la nappe, rivière perchée, et rivière perchée en basses eaux uniquement. Par souci de lisibilité, les différentes zones sont affichées sur toute la largeur de la vallée, mais il convient de garder à l'esprit que l'information représentée est la connexion nappe/rivière, qui prend place essentiellement au droit du lit mineur du cours d'eau, voire de quelques sources dans la vallée.

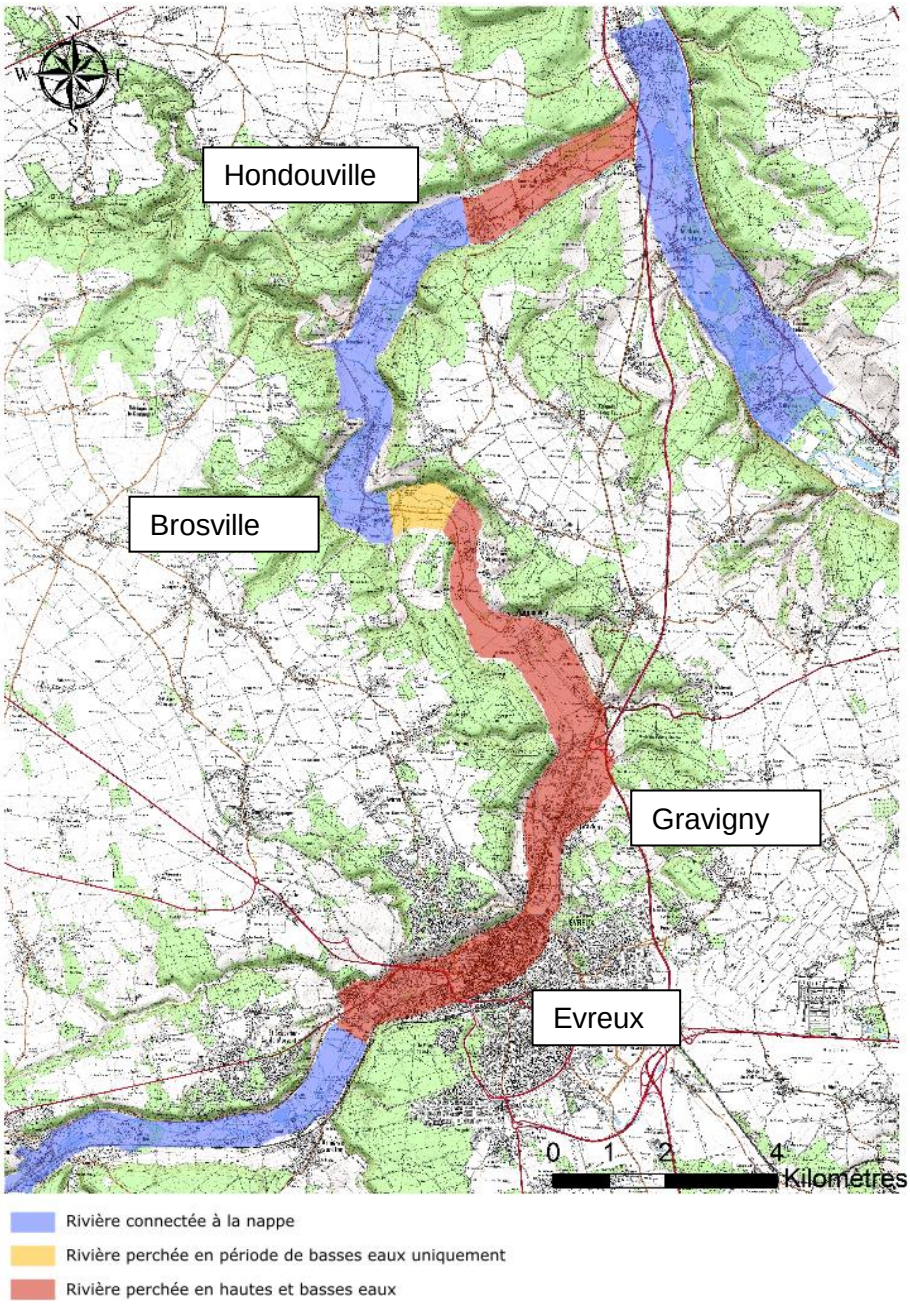


Illustration 112 : Cartographie des relations nappe/rivière dans le secteur de l'Iton aval (résultats valables pour la situation hydrologique de l'année 2004) (source : Le Mesnil M. et al. 2016)

8.2. QUANTIFICATION DES RELATIONS NAPPE/RIVIERE PAR ANALYSE DES RESULTATS DES CAMPAGNES DE JAUGEAGE

Les différentes campagnes de jaugeage de l'Iton confirment ce découpage en différents tronçons du fonctionnement hydraulique de l'Iton successivement caractérisés par des pertes ou des gains de débits du fait des échanges de la rivière avec la nappe.

Ces échanges entre la nappe et la rivière ne sont plus ici abordés en comparant les altitudes des niveaux d'eau, mais par l'évolution du débit du cours d'eau (gain ou perte) entre deux points de mesures.

Pour chacune de ces 3 campagnes de mesure réalisées par le BRGM entre 1968 et 1970, une carte des débits linéaires échangés avec la nappe le long de l'Iton a été réalisée dans le cadre de la présente synthèse.

Le principe consiste à calculer la différence de débit entre 2 points de jaugeage à laquelle sont retranchés également les éventuels apports de débits des affluents, le tout est ensuite divisé par le linéaire du cours séparant ces 2 points.

La représentation des débits spécifiques linéaires (l/s/km) permet de visualiser les tendances de variation de débit le long du cours d'eau et de quantifier les échanges entre la nappe et la rivière (cf. Illustration 113, Illustration 114 et Illustration 115). Le débit du Rouloir à Glisolles, juste avant la confluence Rouloir/Iton a été mesuré lors de ces campagnes. Cette valeur a été soustraite des débits mesurés sur l'Iton en aval de la confluence, afin d'isoler l'apport du Rouloir et d'observer uniquement les échanges nappe/rivière.

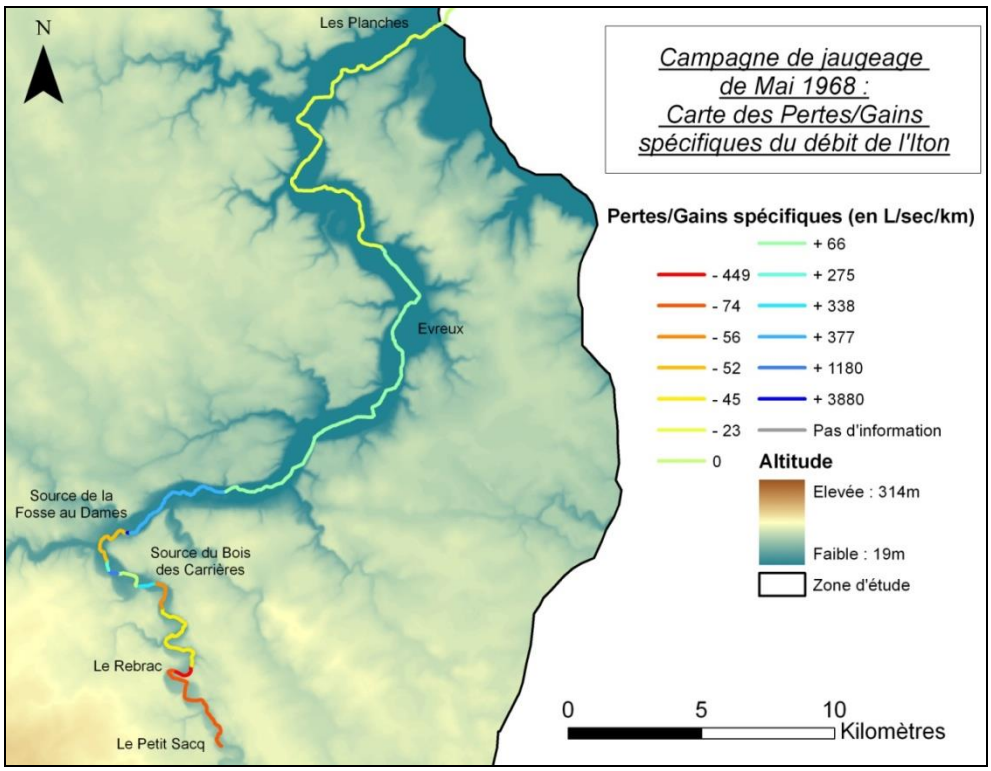


Illustration 113 : Pertes et gains de débit le long de l'Iton – Campagne de jaugeage BRGM de mai 1968

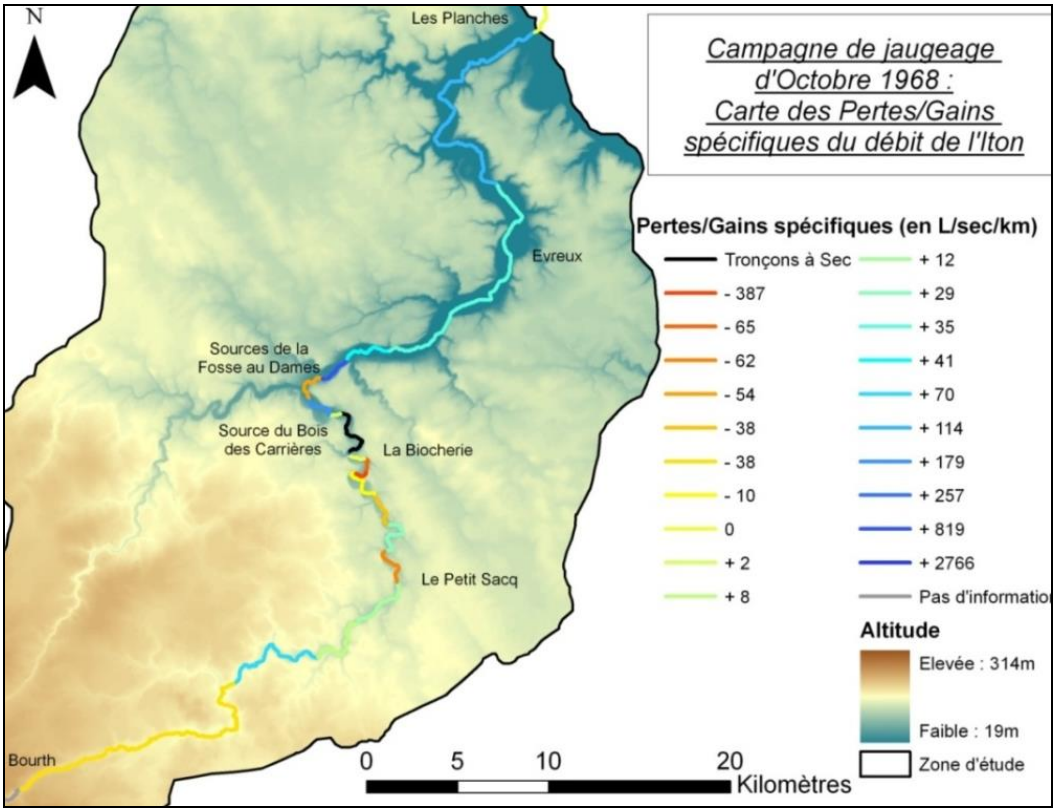


Illustration 114 : Pertes et gains de débit le long de l'Iton – Campagne de jaugeage BRGM d'octobre 1968

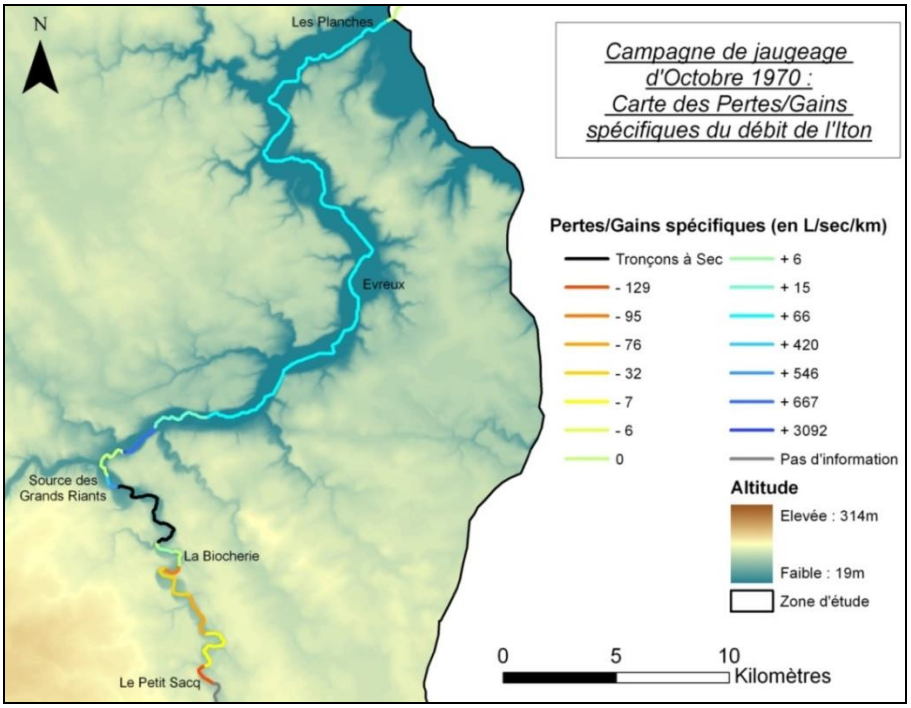


Illustration 115 : Pertes et gains de débit le long de l'Iton – Campagne de jaugeage BRGM d'octobre 1970

Les 3 cartes précédentes permettent essentiellement de localiser et quantifier les secteurs préférentiels de pertes au niveau du Sec-Iton. Les capacités d'engouffrement de chaque tronçon du sec-Iton varient dans le temps.

Ces cartes indiquent également que l'essentiel des apports de nappe à l'aval du Sec-Iton se concentrent dans le secteur de la Bonneville-sur-Iton ; le tronçon incluant les sources situées entre Aulnay-sur-Iton et Arnière-sur-Iton présente en effet des gains spécifiques beaucoup plus faibles (ces localités sont situées en Annexe 3).

En définitive, les différentes campagnes de jaugeage disponibles (Ferray, BRGM et DIREN/DREAL) permettent un découpage de l'Iton en tronçons comme suit :

- Principales zones de pertes de débit de l'Iton, d'amont en aval :
    - **Secteur du Bras forcé de Verneuil** : des pertes de débit du cours de l'Iton sont observées, du fait du détournement anthropique d'une partie des eaux de l'Iton vers le bassin de l'Avre via le bras forcé de Verneuil. Ce bras forcé ne dispose pas d'une station de jaugeage mais une estimation du débit « perdu » est proposée au § 7.3.4.
    - **Secteur du Sec-Iton** : cette zone constitue la section où les pertes de débit sont les plus importantes. Ces pertes, liées à une forte densité de bétoires qui acheminent les eaux de l'Iton vers des réseaux karstiques, sont observées généralement dès Damville mais peuvent l'être dès Condé/Iton (jaugeage Ferray, 1882). Ces pertes causent régulièrement des assecs de la rivière (cf. § 7.4.2 et 8.4.1). Ce phénomène d'assec, selon la sévérité de l'étiage, peut s'étendre sur un secteur allant du Rebrac jusqu'à la résurgence des Grands Riants (cf. carte des assecs au § 7.4.4). Il est à noter également que les jaugeages différentiels réalisés par le BRGM en 1968/1970 ont mis en évidence une zone de pertes de débit de l'Iton dans le secteur de la confluence du Rouloir.
    - **Secteur d'Evreux** : les évolutions du débit de la rivière sur ce tronçon diffèrent selon les campagnes de mesure (hausse en septembre 1989, septembre 2002, août et septembre 2003 et baisse en août 2000 et septembre 2004). En revanche, le débit spécifique (débit/surface du bassin versant) observé diminue entre Arnières-sur-Iton et Normanville quelle que soit la campagne de mesure (Illustration 107). Ce secteur correspond à la zone de déconnexion nappe/rivière présentée au § 8.1).

- Principales zones de gains de débit de l'Iton, d'amont en aval :
    - **Secteur de La Bonneville-sur-Iton** : en plus de l'apport conséquent du Rouloir au niveau de Glisolles, la zone allant de Gaudreville-la-Rivière à Arnières-sur-Iton est caractérisée par d'importantes augmentations du débit de l'Iton par apport de la nappe (ces localités sont situées en Annexe 3). Cette augmentation est visible sur l'ensemble des campagnes de jaugeages disponibles. Toutefois, seules les trois campagnes de mesure de 1968 et 1970 disposent de points de mesure suffisamment pertinents pour en faire une estimation (Illustration 116). Les apports de nappe de ce secteur représentent 44% du débit de l'Iton à

l'exutoire à Amfreville (valeur moyenne des 3 campagnes de jaugeage de basses eaux) (Illustration 116).

- **Secteur de Brosville à Hondouville** : la localisation des points de jaugeage des diverses campagnes ne permet pas de quantifier avec précision l'augmentation du débit de l'Iton dans ce secteur, néanmoins de nombreuses sources y alimentent le cours d'eau, notamment la Fontaine d'Hondouville, jaugée à plus de 1 m3/s en 1968 (indice BSS 01501X0006/S). Huit campagnes de mesure permettent toutefois de faire une première estimation de ces apports de nappe (Illustration 116). Ils représentent 34% du débit de l'Iton à l'exutoire à Amfreville (valeur moyenne des 8 campagnes de jaugeage de basses eaux).

Ainsi ces deux secteurs d'apport important de débits provenant de la nappe, contribueraient en moyenne à près de 80% du débit de Iton à l'exutoire (somme des 44% et 34%). A titre de comparaison, le rouloir contribuerait à hauteur de 20% en moyenne (Attention, ces chiffres sont à prendre avec beaucoup de précautions car ils sont issus de données non synchrones entre les 2 secteurs et valables uniquement en période d'étiage, ils permettent toutefois de fixer les ordres de grandeurs dans l'attente de disposer de campagnes de mesures adaptées).

	Débit Iton à fin du Sec-Iton (l/s) (a)	Débit du Rouloir à Glisolle (l/s) (b)	Débit de l'Iton à Arnière-sur-Iton (l/s) (c)	Débit de l'Iton à Amfreville (planches) (l/s) (d)	Débit apporté par nappe secteur Glisolle-Arnière (e=c-a-b)	Part du débit de l'Iton aux planches apporté par la nappe dans le secteur Glisolle-Arnière (en%) (=e/d)	Part du débit de l'Iton aux planches apporté par le rouloir (en%) (=b/d)
mai-68	277	975	3161	3793	1909	50%	26%
oct-68	0	222	2107	4461	1885	42%	5%
oct-70	0	380	1957	4010	1577	39%	9%
moyenne						**44%**	**13%**

	Débit Iton à fin du Sec-Iton (l/s) (a)	Débit du Rouloir à Glisolle (l/s) (b)	Débit de l'Iton à Arnière-sur-Iton (l/s) (c)	Débit de l'Iton à Normanville (l/s) (d)	Débit apporté par nappe secteur Glisolle-Arnière (e=c-a-b)	Part du débit de l'Iton à Normanville apporté par la nappe dans le secteur Glisolle-Arnière (en%)	Part du débit de l'Iton à Normnaville apporté par le rouloir (en%)
mai-68	277	975	3161	4169	1909	46%	23%
oct-68	0	222	2107	2649	1885	71%	8%
oct-70	0	380	1957	3640	1577	43%	10%
moyenne						**53%**	**14%**

Date	Débit de l'Iton à Normanville (l/s) (a)	Débit de l'Iton à Amfreville (Les-Planches) (l/s) (b)	Débit apporté par nappe secteur Broville-Amfreville (c)=(b)-(a)	Part du débit de l'Iton aux planches apporté par la nappe dans le secteur Broville-Amfreville (en%) (d)=(c)/(b)
sept-03	3070	5188	2118	41%
sept-04	2490	4339	1849	43%
août-03	3320	5480	2160	39%
sept-02	4360	6170	1810	29%
août-00	3080	4760	1680	35%
sept-89	3180	4789	1609	34%
oct-68	2649	4461	1812	41%
oct-70	3640	4010	370	9%
moyenne				**34%**

	Rouloir à Glisolles (l/s) (jaugeage ponctuel) (a)	Iton à Normanville (l/s) (jaugeage ponctuel) (b)	Iton à Normanville (l/s) (station jaugeage encontinu) (c)	Iton à Amfreville (l/s) (jaugeage ponctuel) (d)	Part du débit de l'Iton à Normanville (jaugeage ponctuel) apporté par le Rouloir (en%) (a)/(b)	Part du débit de l'Iton à Normanville (jaugeage continu) apporté par le Rouloir (en%) (a)/(c)	Part du débit de l'Iton à Amfreville apporté par le Rouloir (en%) (a)/(d)
01/05/1968	975	4169	5050	3793	23%	19%	26%
01/10/1968	222	2649	3750	4461	8%	6%	5%
01/10/1970	380	3640	3640	4010	10%	10%	9%
26/06/1984	1180	3740	3840	5680	32%	31%	21%
25/09/1984	1200		3860	5850		31%	21%
27/06/1989	1110	2720	3680	4840	41%	30%	23%
27/09/1989	1050		3180	4790		33%	22%
22/08/2000	980		3080	4760		32%	21%
05/07/2001	1740		5910			29%	
12/09/2002	1130		4360	6170		26%	18%
06/08/2003	1340		3320	5480		40%	24%
19/09/2003	1251		3070	5188		41%	24%
20/11/2003	1231		3470			35%	
MOYENNE					**23%**	**28%**	**19%**

Illustration 116 : Quantification des principales zones d'apports de la nappe et des apports du Rouloir à l'Iton

8.3. QUANTIFICATION DES ECHANGES NAPPE/RIVIERE PAR ANALYSE DE LA REPARTITION DES ECOULEMENTS EN BASSES EAUX

8.3.1. Objectif et méthode

L'objectif de ce paragraphe est d'analyser l'organisation spatiale des écoulements à l'intérieur du bassin versant en utilisant des mesures instantanées de débits réalisées en périodes de basses eaux. Les résultats, corrélés avec les surfaces de bassins versants correspondantes, servent à construire des profils hydrologiques. De l'information ainsi fournie sont déduits les débits caractéristiques d'étiage, utilisés pour spatialiser les écoulements à l'intérieur du bassin versant. Cette méthode a été développée par Corbonnois et al. en 1999.

La méthode d'élaboration du profil hydrologique est fondée sur la relation existant entre le débit Q et la surface A correspondante du bassin au point de mesure, selon la loi

$$Q = h A^{g}$$

Cette relation est souvent utilisée en hydrologie pour spatialiser les débits de crues et les modules qui sont sous dépendance des précipitations. Pour les étiages, la même relation peut être employée, mais en raison du mode d'alimentation alors différent des cours d'eau, elle n'est applicable que par secteur homogène de bassin versant.

En coordonnées logarithmiques, la fonction se traduit par une droite d'équation :

$$\text{Log } Q = g \text{ Log } A + \text{Log } H$$

Les recherches effectuées par Corbonnois et al.(1999) comprennent une étude des paramètres g et h de cette droite :

- g, la pente de la droite, définit la fonction de transfert des écoulements des réservoirs souterrains vers le cours d'eau (vitesse de vidange) ;
- h caractérise l'état des réserves en eau souterraine et correspond à une fonction de production

Un bassin versant au comportement homogène sera représenté par une seule droite, alors qu'un bassin comprenant une succession de milieux homogènes sera représenté par une succession de segments de droite.

Les profils hydrologiques renseignent par leur pente g, sur la rapidité ou la lenteur de l'accroissement du débit Q pour des portions de bassins homogènes (cf. Illustration 117).

Le paramètre h représente l'état des aquifères par portion homogène de bassin ; il varie lorsque le niveau des nappes se modifie d'une campagne de mesure à l'autre. Ainsi, en affichant sur un même graphique les profils obtenus à partir de plusieurs campagnes de mesure, on peut suivre la réduction ou l'augmentation des apports d'eau souterraine au réseau de surface (h diminue ou augmente respectivement).

Ainsi pour un bassin versant, les conditions de restitution de l'eau souterraine au réseau hydrographique déterminent des profils semblables qui restent parallèles les uns aux autres ou dissemblables lorsqu'ils se déforment.

Les profils hydrologiques servent finalement à déterminer et analyser la répartition des apports en basses eaux. Les conditions de l'écoulement sont influencés par de nombreux facteurs parmi lesquels la caractéristique et le fonctionnement des aquifères jouent un rôle important.

CLASSE	Valeur de g	Variation de Q l/s	Caractéristique de Qs l/s/km²
A	> 1	Q augmente plus vite que la surface du BV - Apport très abondant d'eau correspondant provenant de la nappe	rapide croissance
B	proche de 1	Q augmente dans les mêmes proportions que la surface du BV. Apports soutenus d'eau en provenance de la nappe	Constant
C	0 < <1	Q augmente moins vite que la surface du BV, apports peu abondant d'eau en provenance de la nappe	lente décroissance
D	autour de 0	aleternance entre la classe C et E selon la période de mesure : soit Q augmente moins vite que la surface du BV soit Q diminue lorsque la surface du BV augmente selon la période. Apports peu abondant de la nappe ou à certaine période arrêt de l'alimentation par la nappe et pertes d'eau	alternance entre lente décroissance et rapide décroissance
E	<0	Q diminue lorsque la surface du BV augmente. Pertes d'eau	rapide décroissance

Illustration 117 : Signification de la pente g des profils hydrologiques (Corbonnois et al. 1999, modifié dans le cadre de la présente étude)

8.3.2. Résultats et interprétation

Aucune investigation terrain n'était prévue dans le cadre de cette présente étude. Toutefois, six campagnes de jaugeages synchrones réalisées en étiage par la DREAL dans le passé et composées de suffisamment de points de jaugeage, ont pu être valorisées. Elles présentaient 12 points de mesure sur l'Iton et le Rouloir.

Les profils hydrologiques de l'Iton et du Rouloir obtenus pour les 6 campagnes de mesure à l'étiage sont présentés à l'Illustration 118 a) et l'Illustration 119. L'Illustration 118 b) présente également les profils hydrologiques de l'Iton et du Rouloir pour les 6 campagnes de mesure mais en corrigeant les débits de l'Iton situés à l'aval du bras forcés de Verneuil (le débit perdu par le bras forcé de l'Iton a été ajouté aux débits mesurés afin de mettre en évidence sur ce graphique les échanges nappes/rivières).

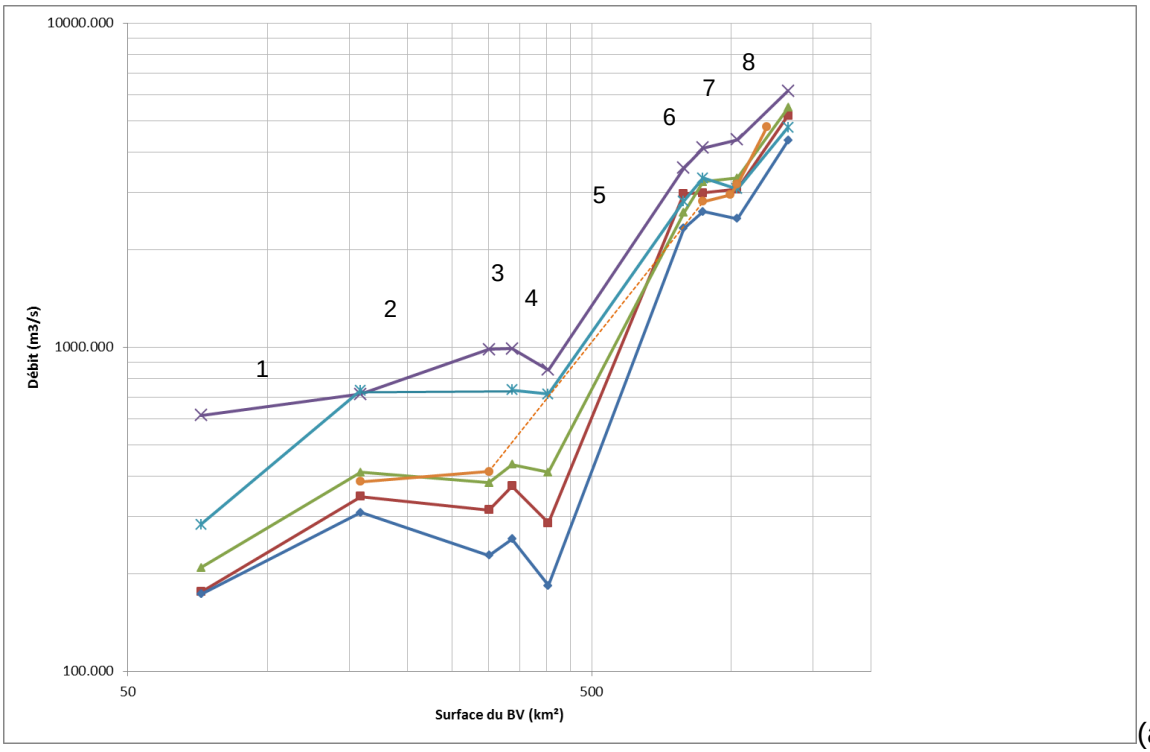
Les coefficients g et h ont pu être déterminés pour les 8 tronçons de l'Iton et les 3 tronçons du Rouloir et sont présentés en Annexe 4. Ces tronçons sont définis et numérotés à l'Illustration 120. Ces numéros apparaissent également sur les profils des Illustration 118 et Illustration 119.

Une moyenne du paramètre g a été calculée sur l'ensemble des campagnes. Ces valeurs moyennes et la classe associée sont présentées aux Illustration 120 et Illustration 121.

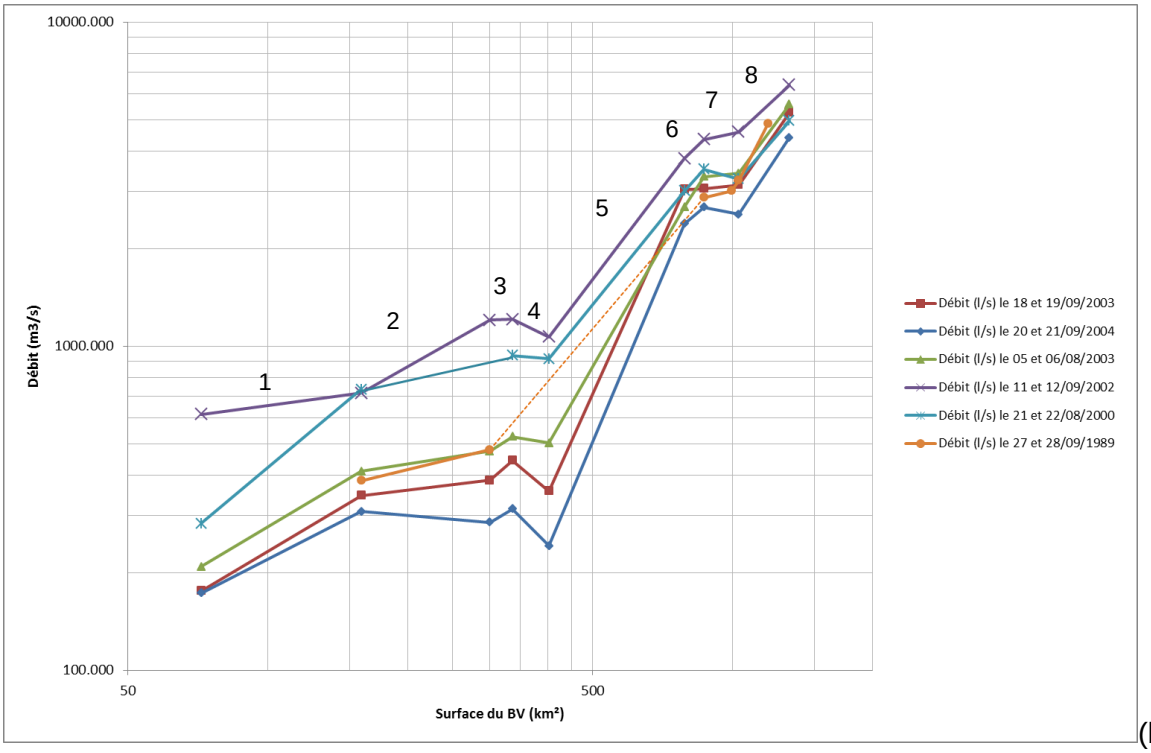
A partir des moyennes de coefficients g calculés, une classe (définie à l'Illustration 117) a été affectée à chaque tronçon.

Ces résultats mettent en évidence la variabilité géographique des contributions de la nappe au débit du cours d'eau. Certains tronçons sont situés dans la même classe quelle que soit la campagne de mesure alors que d'autres oscillent entre deux classes ce qui met en évidence une variabilité également temporelle de ces contributions (cf. tableau en Annexe 4).

Cette méthode vient confirmer et compléter les résultats des deux paragraphes précédents. Cette approche permet donc d'appréhender le fonctionnement de l'hydrosystème et ses évolutions spatiales et temporelles (Illustration 121 et Illustration 117).



(a)



(b)

Illustration 118 : Profils hydrologiques de l'Iton obtenus pour 6 campagnes de mesure à l'étiage (a) données de débits utilisées sans correction ; (b) données de débits corrigées : pour les points de mesure situés à l'aval du bras forcés de verneuil, le débit perdu par le bras forcé de l'Iton a été aujouté aux débits mesurés afin de mettre en évidence sur ce graphique les échanges nappes/rivières - (Les tronçons numérotés de 1 à 8 dans définis dans le tableau de l'Illustration 120)

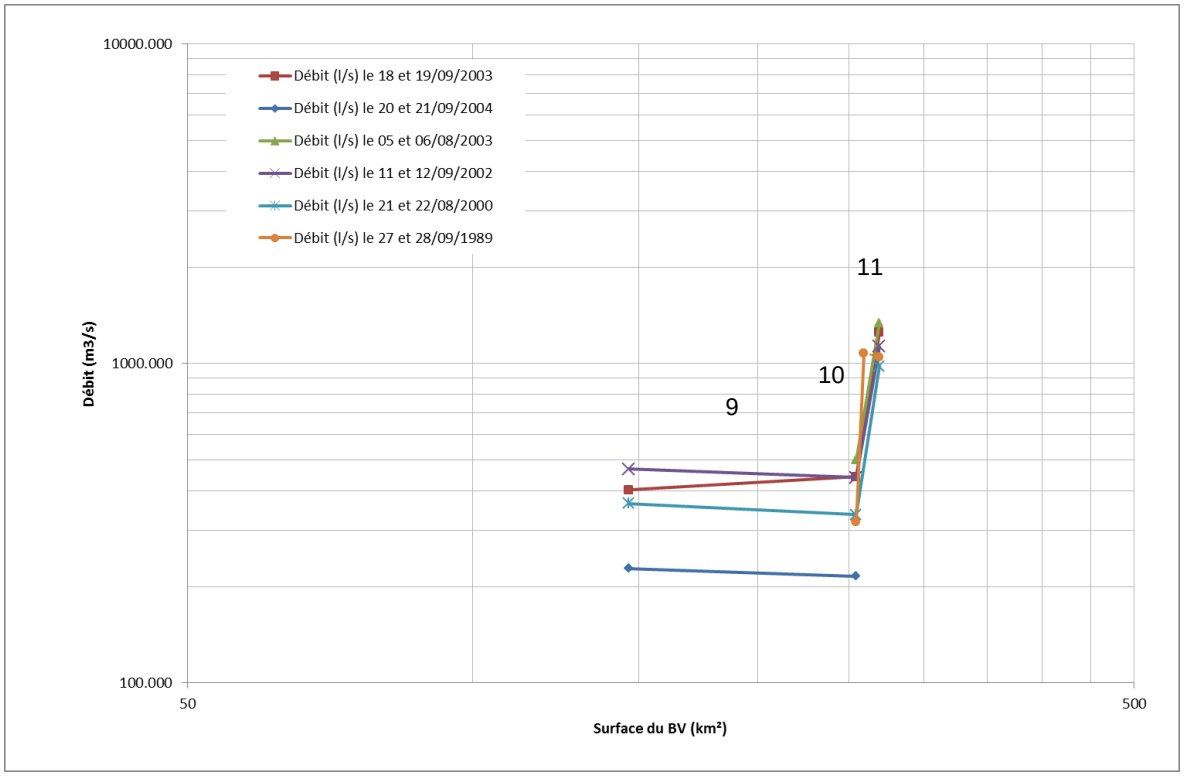


Illustration 119 : Profils hydrologiques du Rouloir obtenus pour 6 campagnes de mesure à l'étiage

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Les Aspres à Bourth	De Bourth à Condé	De condé à Damville	De Damville à Gaudreville	De Gaudreville à La bonneville	De la Bonneville à Arnière	De Arnière à Normanville	De Normanville à Amfreville
g moyenne	0.78	0.28	0.74	-0.72	2.56	1.29	0.10	1.95
Classe	B - C	D	B - C	E	A	B	D	A

(a)

		9	10	11
	De l'amont de l'étang à l'aval de l'étang	De l'aval de l'étang au pont de la D840	Du pont de la D840 au ld La croisille	Du ld la Croisile à Glisolle
MOYENNE	147.3	-0.1	66.0	-0.7
CLASSE	A	D	A	E

(b)

Illustration 120 : Valeur moyenne du paramètre g et classe associée obtenue par moyenne des résultats des différentes campagnes de mesure pour chaque tronçon - le détail des résultats, campagne par campagne, est présenté en Annexe 4 ce qui permet de voir la variabilité temporelle du coefficient g calculé

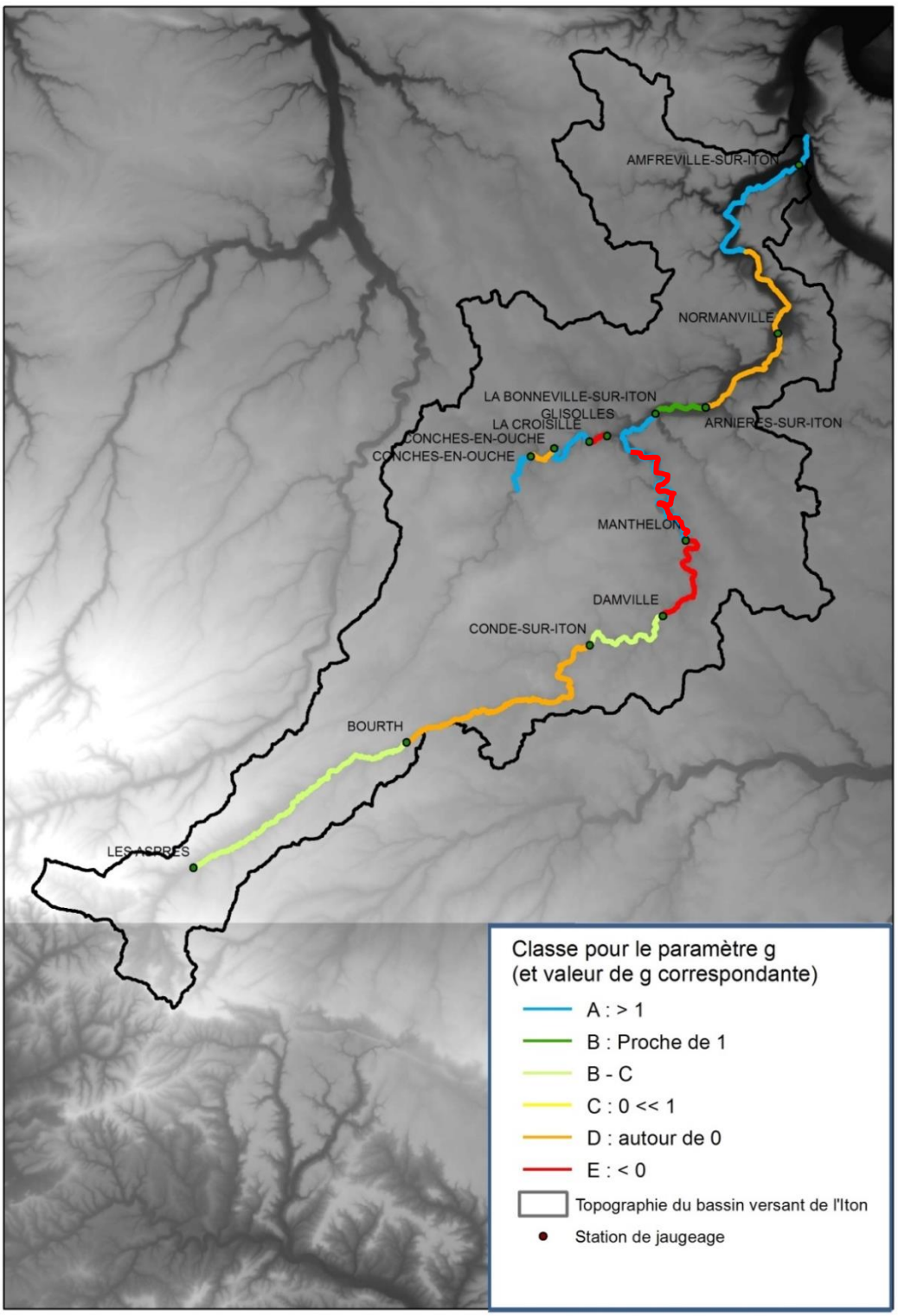


Illustration 121 : Carte des différents tronçons homogènes de l'Iton mis en évidence par la classe associée ; la valeur du coeficient g (résultats des différentes campagnes de mesure pour chaque tronçon interprétés selon la méthode développée par Corbonnois et al. en 1999 – le détail des résultats campagne par campagne est présentée en Annexe 4.) La définition des classes A à E est présentée à l'Illustration 117

8.4. QUANTIFICATION DU FONCTIONNEMENT DU SEC-ITON

Au sein des différents tronçons mis en évidence sur la carte précédente (Illustration 121), le tronçon du Sec-Iton est un tronçon au comportement complexe. Ce paragraphe a pour objectif de quantifier, sur la base des données disponibles, les débits perdus par le cours d'eau au niveau de ce tronçon, ainsi que les débits restitués par les principales résurgences karstiques situées à l'aval de celui-ci.

8.4.1. Quantification des pertes du Sec-Iton

L'absence de station de jaugeage en aval du Sec-Iton à Gaudreville-la-rivière, ne permet pas d'estimer de façon continue les pertes du Sec-Iton.

Ainsi, la quantification des pertes de débits a été réalisée selon deux approches qui exploitent :

- les résultats des campagnes d'observation des écoulements effectuées par l'ONEMA en période d'étiage (constat d'assec) (a) ;
- les résultats des campagnes de jaugeage dont la position des points de mesure permettait une exploitation des données (points de mesure situés en amont et à l'aval immédiat du tronçon en perte) (b)

c) *Estimation des pertes du Sec-Iton grâce aux constats d'assec*

Les campagnes d'observation des cours d'eau réalisées par l'ONEMA (observatoire national des étiages[14]) permettent, lorsqu'un assec est constaté, de connaître une valeur de débit absorbé par le Sec-Iton à une date donnée. Pour cela, le débit de l'Iton en amont de ses pertes est estimé par la valeur du débit à Bourth, à laquelle on retranche l'estimation du débit dérivé par le bras forcé de Verneuil (voir § 7.3.4). Cette valeur de débit correspond donc au débit absorbé au niveau des pertes du Sec-Iton lors d'un assec. Le graphique en Illustration 122 présente les différentes valeurs de débit engouffré ainsi calculées, sur la période 2005-2015, période sur laquelle les données de constat d'assecs ont pu être collectées auprès de l'ONEMA. Il est à noter qu'aucun assec n'a été constaté depuis l'été 2012.

[14] http://onde.eaufrance.fr/

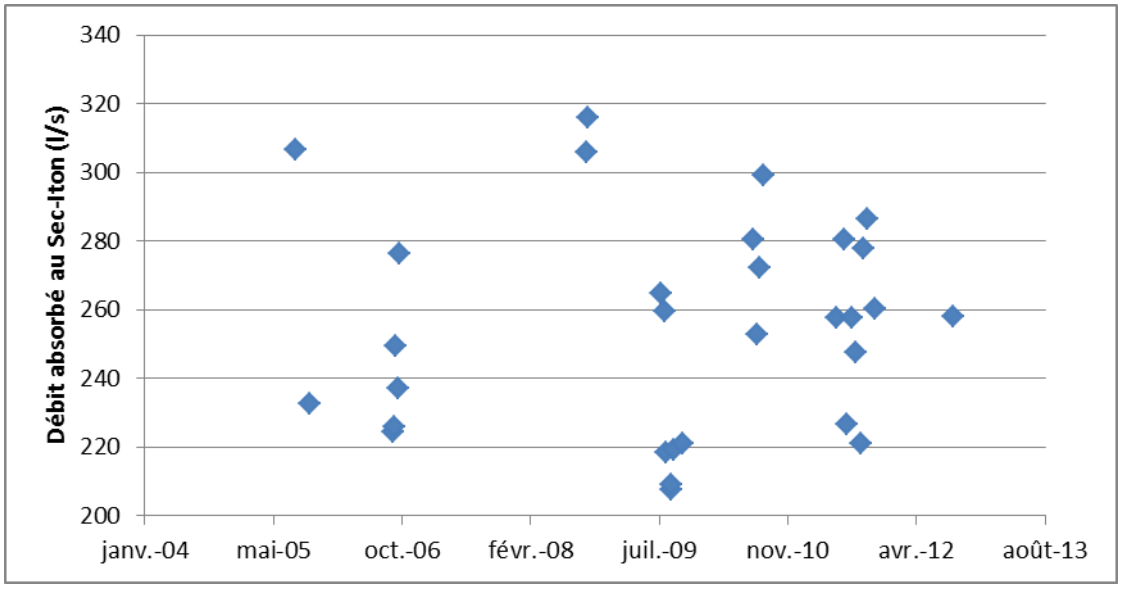


Illustration 122 : Débits engouffrés au niveau du Sec-Iton sur la période 2005-2013

Les différentes campagnes d'observation des écoulements révèlent que des assecs ont eu lieu tous les ans entre 2005 et 2012, excepté en 2007. **Les débits d'engouffrement calculés varient entre 200 et 320 l/s.** Il est important de noter que ces valeurs sont représentatives des conditions d'étiage uniquement. Les différents assecs ont été constatés entre les mois de juin et octobre.

L'étude BRGM de 1971 semblait indiquer que les débits engouffrés pouvaient être en partie corrélés à la charge hydraulique du cours d'eau au-dessus des bétoires. Ainsi ces pertes de débits estimées en période d'étiage sont probablement très inférieures à celles qui se produisent en période de crue.

En l'état actuel de l'instrumentation de ce bassin versant, il n'est pas possible de calculer la variabilité des pertes à l'échelle d'une année hydrologique.

d) *Estimations complémentaires des pertes du Sec-Iton*

La campagne de jaugeage du BRGM de mai 1968 est la seule, parmi les différentes campagnes de jaugeage disponibles, qui permet d'estimer les débits perdus le long du Sec-Iton. Cette campagne de jaugeage a en effet inclus un point de mesure situé au niveau des Haisettes, qui représente le point le plus aval du Sec-Iton, en amont du village de Gaudreville-la-Rivière et des résurgences associées. Le point le plus amont de cette campagne est en revanche situé au lieu-dit de la Mésangère, sur la commune de Manthelon. La valeur calculée de débit perdu ne va donc pas prendre en compte les pertes situées entre Condés-sur-Iton et Manthelon.

En mai 1968, le débit de l'Iton mesuré était de 1275 l/s à Manthelon et de 277/ l/s aux Haisettes. **Les pertes du Sec-Iton à partir de la Mésangère (Manthelon) sont donc de 998 l/s.**

Les débits perdus sur le tronçon Condé-sur-Iton – Manthelon ne sont pas connus pour mai 1968 mais une estimation de ces débits a été réalisée à différentes dates. Pour cela, ont été utilisés les débits disponibles à la station de jaugeage de Manthelon, en service sur la période

1970-1991 ainsi que les débits mesurés ponctuellement par la DIREN Haute-Normandie à Condé-sur-Iton et Manthelon. La différence de débit entre Condé-sur-Iton et Manthelon a ainsi pu être calculée pour 29 dates entre 1976 et 2004. Ces mesures ne couvrent pas l'ensemble des situations hydrologiques, il existe une prévalence de mesure en basses eaux.

L'Illustration 123 présente les débits des pertes ainsi calculés, en fonction du débit à l'amont à Condé-sur-Iton.

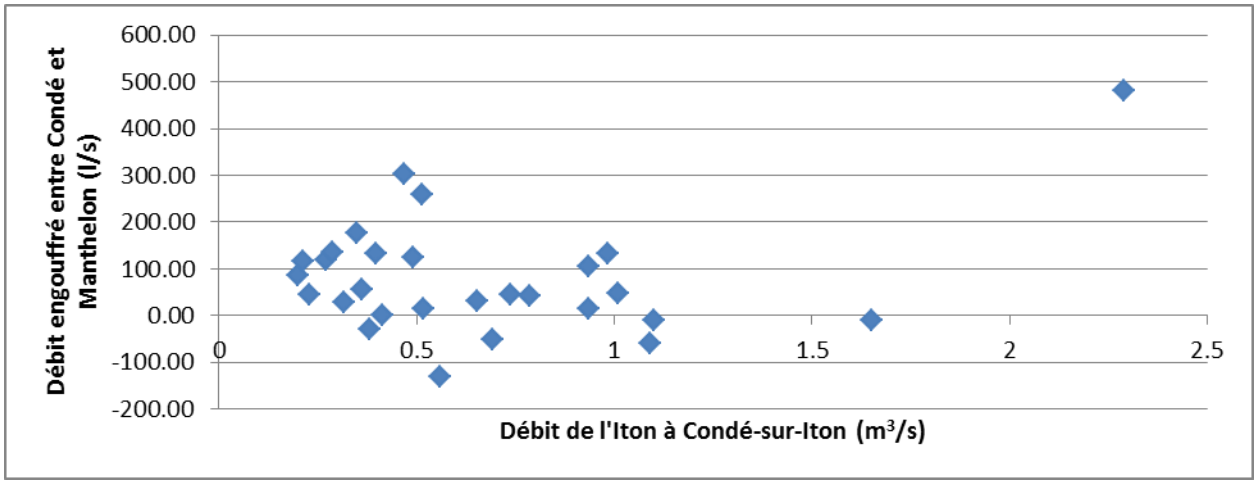


Illustration 123 : Pertes du Sec-Iton amont en fonction du débit à Condé-sur-Iton

Pour les faibles valeurs de débit, il ne semble pas exister de corrélation linéaire entre le débit de l'Iton à l'amont de la zone de pertes et le débit des pertes dans ce secteur du Sec-Iton amont. **Les débits de perte oscillent entre 0 et 300l/s.** Toutefois, **une valeur de perte de 500 l/s** a été atteinte lorsque le débit à Condé-sur-Iton a atteint près de 2500l/s.

L'Illustration 123 met en évidence également quelques rares gains de débits (points aux valeurs négatives).

L'Illustration 124 présente la part des débits infiltrés entre Condé-sur-Iton et Manthelon, par rapport au débit total de l'Iton à Condé-sur-Iton. La compilation des 29 dates disponibles permet de représenter ces débits d'engouffrement pour chaque mois de l'année. La proportion du débit infiltré varie entre quelques pourcents et 50 %. Il semble que les mois de juin à octobre soient caractérisés par une forte infiltration des eaux dans le Sec-Iton, contrairement aux mois de décembre à avril. Le pourcentage négatif au mois d'avril est dû au fait que le débit de l'Iton a augmenté entre Condé-sur-Iton et Manthelon (reconnexion nappe/rivière à cette période).

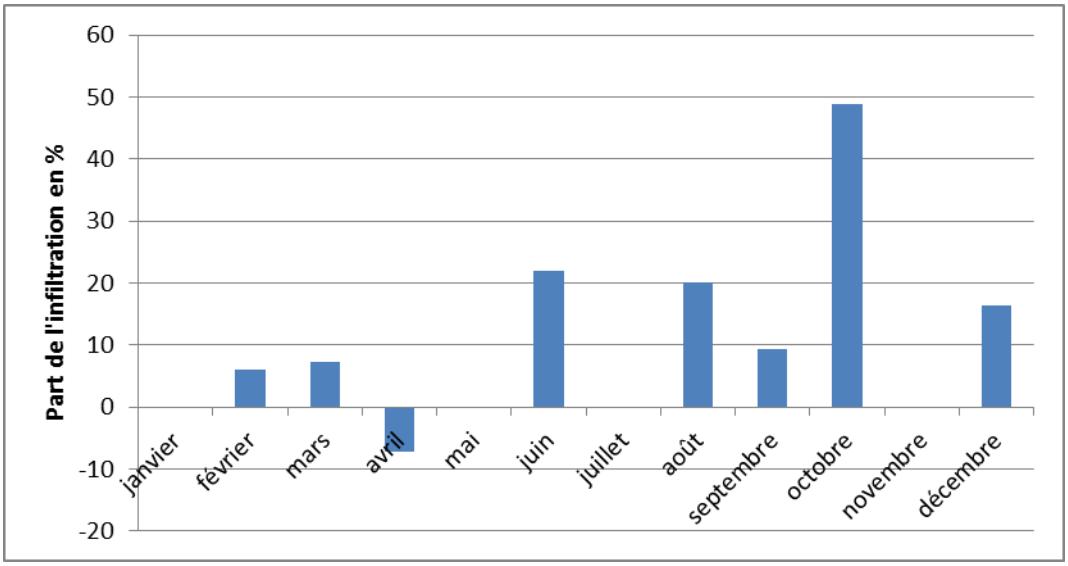


Illustration 124 : Proportion du débit infiltré dans le Sec-Iton amont sur le débit total de la rivière à Condé-sur-Iton (moyennes interanuelles)

En définitive, aucune campagne de mesure ne permet actuellement de réaliser une estimation fiable des débits perdus au niveau du sec-Iton. Le capacité maximale d'engouffrement du karst du Sec-Iton n'est actuellement pas connue mais serait probablement supérieure à 1500 l/s sur l'ensemble du secteur du Sec-Iton compris entre Condé-sur-Iton et les Haisettes (somme des débits de perte maximum mesurés sur les tronçons Condé-sur-Iton – Manthelon (500l/s) et Manthelon-Les Haisettes (1000l/s)).

8.4.2. Quantification des résurgences karstiques situées à l'aval du Sec-Iton

Lors de sa campagne de jaugeage de 1882 (Ferray, 1882), E. Ferray a effectué le calcul des apports souterrains du bassin de l'Iton entre Condé-sur-Iton et la Bonneville-sur-Iton. Pour cela, il part du principe que le débit de l'Iton à la Bonneville-sur-Iton (alors jaugé à 2 360 l/s) est constitué des composantes suivantes :

- Débit initial de l'Iton avant ses pertes (400 l/s à Condé-sur-Iton) ;
- Source des Grands Riants, jaugée à 180 l/s ;
- Confluence du Rouloir, jaugé à 900 l/s ;
- Sources de la Fosse aux Dames et des Forges

Ferray a réalisé une expérience de coloration le 5 août 1887. Celle-ci a montré que l'introduction de fluorescéine dans une bétoire du lit de l'Iton dans le bourg de Villalet affecte la caverne des Boscherons, le puits de Gaudreville et plusieurs sources de la rive droite de l'Iton ; en revanche la source des Grands Riants n'est pas affectée par le traceur. Suite à ces constatations, il considère que l'apport de débit de la source des Grands Riants ne constitue pas une résurgence des débits perdus par la rivière lors de la traversée du Sec-Iton. La résurgence du système karstique du Sec-Iton correspond donc principalement aux sources de la Fosse aux Dames et des Forges et peut donc se calculer comme le débit de l'Iton à la Bonneville, auquel on retranche les apports du Rouloir et de la source des Grands Riants. On obtient donc :

$$2\,360 - 900 - 180 = 1\,280\,\mathrm{l/s}$$

La contribution du compartiment souterrain à l'aval du Sec-Iton (sources de la Fosse aux Dames et des Forges à la Bonneville ainsi qu'à celle d'Angerville-la-Rivière probablement) est donc estimée à 1 280 l/s lors de la campagne de jaugeage de Ferray de 1882. Ce chiffre est donc bien supérieur au débit perdu au niveau du sec-Iton lors de cette campagne de mesure (400 l/s).

Le même type de calcul peut être réalisé à partir des campagnes de jaugeage du BRGM de 1968 et 1970, ainsi que d'une campagne de la DIREN Haute-Normandie de juin 1989. Les points de jaugeage permettent d'effectuer cette estimation en prenant en compte l'intégralité des sources comprises entre la Fosse aux Dames et la source du Souci à Aulnay-sur-Iton.

Le Tableau 14 présente ces résultats pour les différentes campagnes de jaugeage. Un schéma de principe des différentes contributions au débit de l'Iton à Bérengeville est proposé en Illustration 125 (la localité Bérengeville est située en Annexe 3).

Sur ces 4 campagnes de jaugeage disponibles, la part du débit perdu dans le Sec-Iton puis restitué représente entre 17% et 32% du débit de l'Iton à Bérengeville. La contribution la plus importante au débit provient en fait d'un apport de débit par la nappe (entre 38% et 63%) supplémentaire au débit de restitution des pertes du sec-Iton (colonne (g) du Tableau 14). Le rouloir quant à lui contribue à hauteur de 11% à 33%.

	Débit de l'Iton à l'amont (à défaut point le plus amont mesuré) du Sec-Iton (l/s) **(a)**	**Débit de l'Iton à l'aval du Sec-Iton (lieu-dit Haisette) (l/s)** **(b)**	**Débit de perte du Sec-Iton (l/s)** **(c)=(a)-(b)**	**Débit du Rouloir à Glisolle (l/s)** **(d)**	**Débit de l'Iton à Bérengeville (l/s)** **(e)**	**Gains de débit par apport de nappe dans le secteur de la Bonneville-Bérengeville (l/s)**[15] **(f)=(e)-(d)**	**Apport de la nappe vers l'Iton (l/s)** **(g) =(f)-(c)**
Mai 1968	1 275 (Manthelon)	277	> 998	975	3161	2 186	<1188
Octobre 1968	565 (Coulonges)	Sec	> 565	222	2107	1 885	<**1 320**
Octobre 1970	507 (Le Haut-Sacq)	Sec	> 507	380	1957	1 577	**<1 070**
Juin 1989	560 (Condé-sur-Iton)	Sec	560	1110	3349	2239	**1679**

Tableau 14 : Estimation de l'apport de la nappe aux débits de l'Iton entre Gaudreville et Bérengeville (La colonne (f) correspond au calcul des apports totaux de nappe dans le secteur de la Bonneville-Bérengeville ; la colonne (g) en revanche correspond au calcul des apports totaux de nappe dans le secteur de la Bonneville-Bérengeville auxquels on retranche la restitution des débits karstiques estimée en premiere approximation comme étant égal au débit des pertes amont (collonne c))

[15] Valeur correspondant au gain de débit de l'Iton, entre la passerelle de Glisolles (en aval de la confluence avec le Rouloir) et Bérengeville.

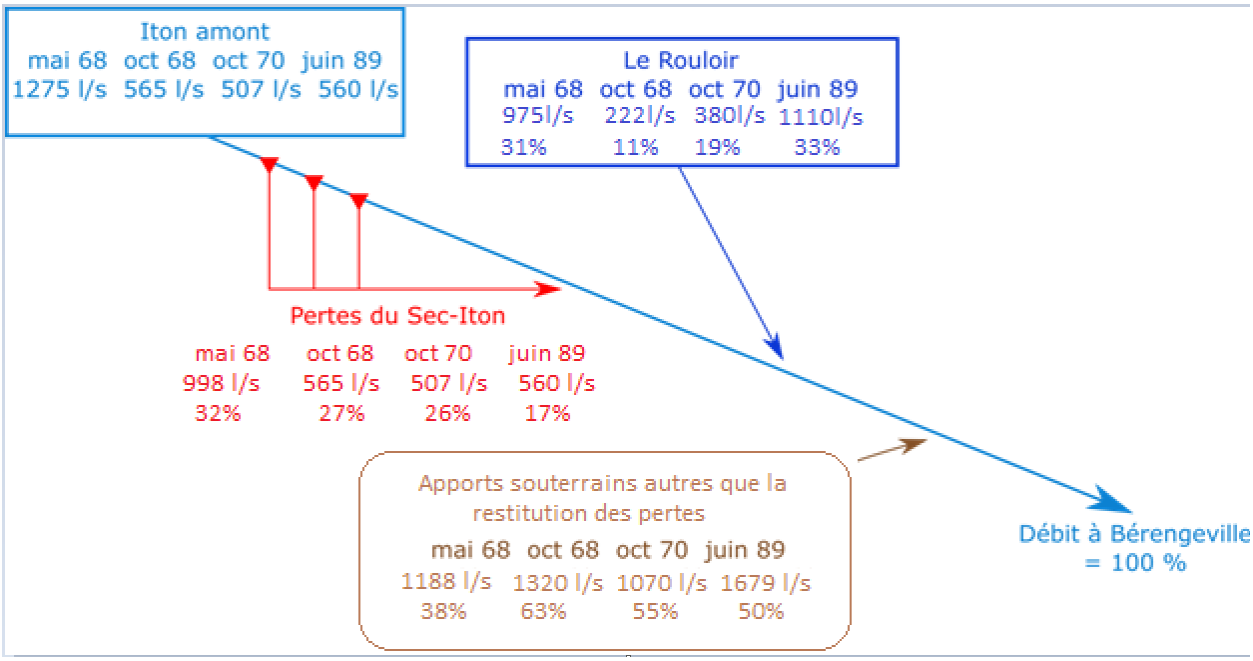


Illustration 125 : Schéma de principe de répartition des débits entre l'amont et l'aval du Sec-Iton, et proportions des débits associés

9. Estimation de la contribution de la nappe au débit de l'Iton et des débits de fuite par modélisation GARDENIA

La modélisation globale d'un bassin versant avec le logiciel GARDENIA peut avoir de nombreuses applications telles que la prévision des crues ou des étiages, la réalisation de bilans, le calcul de la pluie efficace, de la recharge, …

Dans le cadre de cette étude, des modèles GARDENIA ont été établis au niveau des stations de Bourth et de Normanville dans l'objectif de :

1. estimer la part du débit lent (correspondant à l'alimentation par la nappe) dans le débit total de l'Iton et sa variation temporelle ;
2. estimer les débits de fuite (débit souterrain sortant du bassin versant), notamment du fait de la présence de pertes karstiques.

9.1. MODELE PLUIE-DEBIT-PIEZOMETRIE AVEC LE CODE GARDENIA

9.1.1. Principe

Le modèle hydrologique global GARDENIA est un code de calcul développé par le BRGM (Thiéry, 2003, 2014, 2015). Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant par des lois physiques simplifiées représentant un écoulement à travers une succession de réservoirs. À partir de chroniques météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle) sur un bassin d'alimentation, GARDENIA permet de calculer le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou celui d'une source) et / ou le niveau piézométrique en un point de la nappe libre sous-jacente. GARDENIA fournit également la pluie efficace et la recharge du système.

9.1.2. Structure du modèle

Dans sa mise en œuvre la plus simple, GARDENIA simule le cycle de l'eau par un système de 3 réservoirs en cascade qui représentent successivement (Illustration 126) : les premières dizaines de centimètres du sol (siège des phénomènes d'évapotranspiration), une zone intermédiaire générant de l'écoulement rapide, et une zone aquifère générant de l'écoulement souterrain lent et retardé.

La structure du réservoir SOL (Illustration 126) est de type « réserve utile » et permet de calculer la pluie nette ALIMH en calant la capacité du réservoir RU. Si la pluie est en excès par rapport à cette capacité, l'eau s'infiltre dans le système. L'évapotranspiration réelle (ETR) est estimée à partir des données d'évapotranspiration potentielle (ETP) et du stock d'eau disponible dans le réservoir SOL.

Le réservoir qui représente la ZONE NON SATUREE (Illustration 126) a une hauteur d'eau notée H. Il est alimenté en eau par la pluie nette ALIMH provenant du réservoir superficiel, et est vidangé par deux exutoires :

- Une percolation dans le réservoir souterrain G, notée ALIMG, suivant une loi linéaire (vidange exponentielle) de constante de temps THG :

ALIMG = H . dt / THG (dt = durée du pas de temps)

- Un écoulement à l'extérieur du bassin, sous forme d'une composante rapide QH du débit, selon une loi non-linéaire contrôlée par le paramètre RUIPER. Ce paramètre RUIPER est en fait la hauteur d'eau dans le réservoir H pour laquelle la percolation ALIMG et l'écoulement QH sont égaux :

QH = H . dt / (THG . RUIPER / H)

Le ratio QH / ALIMG est égal au rapport H / RUIPER. Le calcul s'effectue en réalisant une répartition de la Pluie Nette ALIMH en composantes ALIMG et QH.

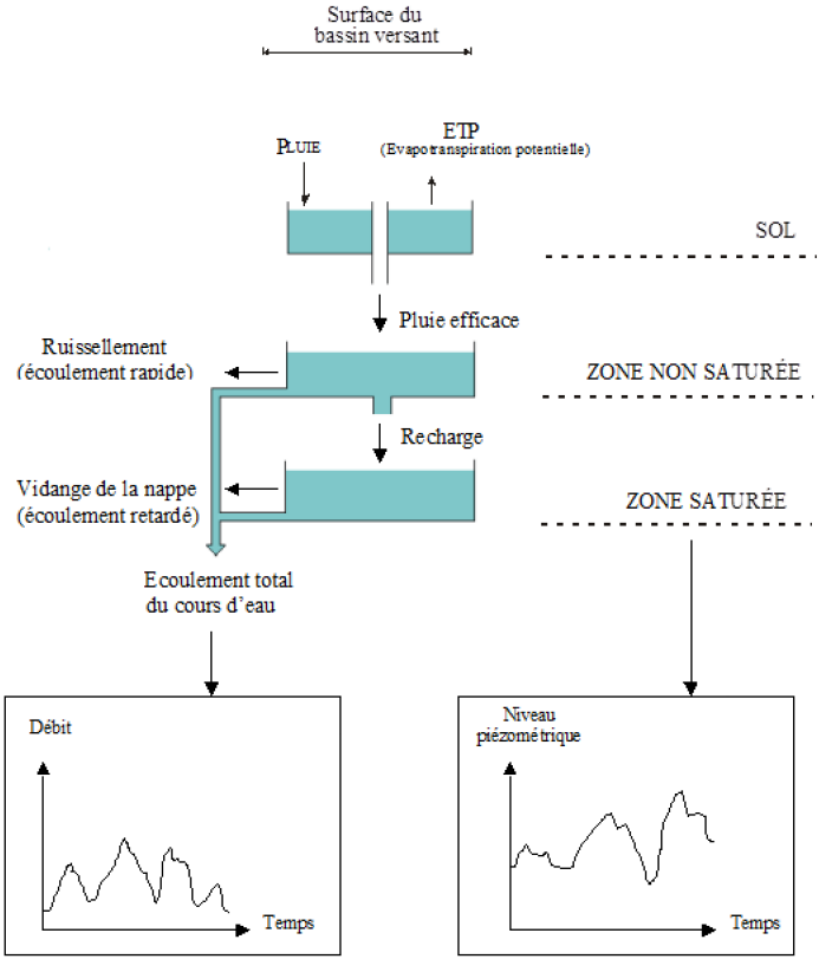


Illustration 126 : Structure du modèle GARDENIA utilisé pour simuler le débit en rivière ainsi que le niveau piézométrique de la nappe drainée (Thiéry, 2014)

Le réservoir de la ZONE SATUREE (Illustration 126) produit l'écoulement lent qui provient de l'aquifère et a une hauteur d'eau notée G. Il est alimenté par le réservoir intermédiaire H (ALIMG), et est vidangé vers l'exutoire du bassin sous forme de débit QG, suivant une loi de vidange exponentielle de constante de temps TG :

$$QG = G \cdot dt / TG$$

Le niveau piézométrique N est calculé en mm et transformé en niveau absolu en mètres par division par le coefficient d'emmagasinement global Coef_Emmag et ajout du niveau de base local Nbase :

$$N = G / Coef\_Emmag + Nbase$$

Dans les bassins versants ayant une composante souterraine conséquente, il est fréquent que des ECHANGES SOUTERRAINS se produisent avec l'extérieur. Il peut arriver qu'une partie de la composante souterraine n'apparaisse pas dans le débit mesuré à l'exutoire. Cette partie de l'écoulement souterrain peut se propager dans la nappe souterraine latéralement vers l'extérieur du bassin, ou bien « sous » la section de jaugeage. On a donc une perte de débit (échange souterrain négatif). Ce débit perdu apparaîtra dans un bassin voisin. A l'opposé il peut arriver qu'un débit souterrain additionnel provienne d'un bassin versant voisin. On a alors un gain de débit (échange souterrain positif). Ces échanges souterrains sont modélisés avec un coefficient d'échange souterrain externe :

$$Q\_Echang\_Souterr = Fact\_Echang \cdot QG\_Avant\_Echang$$

soit :

$$Q\_Echang\_Souterr = QG \cdot Fact\_Echang / (1 + Fact\_Echang)$$

Les échanges souterrains affectent la composante souterraine du débit calculé mais n'affectent pas le niveau du réservoir souterrain. Ils n'affectent donc pas le niveau de la nappe calculé.

9.1.3. Stratégie de calibration

Les paramètres du modèle pour calculer le débit sont au nombre de 5 :

- RU : Capacité du réservoir SOL de type « réserve utile » ou « réserve disponible pour l'évapotranspiration » : en mm,
- THG : Temps de demi-montée du réservoir H (temps de ½ percolation) : en mois,
- RUIPER : Hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation : en mm,
- TG : Temps de demi-tarissement du réservoir G : en mois,
- Fact_Echang : Coefficient d'échange souterrain externe : en %,

Un paramètre supplémentaire est nécessaire pour exprimer le niveau d'eau en piézométrie :

- Coef_Emmag : Coefficient d'emmagasinement global de l'aquifère

La calibration du modèle est effectuée simultanément sur le débit à l'exutoire et le niveau piézométrique en donnant un poids relatif (alpha et 1-alpha) à chacune des deux variables simulées. Le critère d'ajustement F est alors :

$$F = (alpha \times F\_Débit) + (1\text{-}alpha \times F\_Niveaux)$$

en retenant comme critères de performance pour F_Débit et F_Niveaux respectivement le coefficient de Nash sur la racine carré des débits Nash $Q_{0.5}$ et sur la racine carré de la piézométrie Nash $h_{0.5}$.

9.2. APPLICATION D'UN MODELE PLUIE-DEBIT-PIEZOMETRIE A LA STATION DE NORMANVILLE

9.2.1. Objectif

La modélisation a pour objectif de simuler le débit à Normanville en tenant compte des spécificités du bassin :

- Fonction de production contrôlée par la saturation du sol (type RFU) et par la saturation de l'aquifère

- Composante rapide pour simuler le ruissellement issu des versants (ruissellement de surface et sources karstiques)

- Composante lente pour simuler le débit issu des réserves de l'aquifère de la craie

- Des échanges avec l'extérieur du bassin pour simuler les écoulements souterrains inter-bassins (une partie de l'écoulement souterrain peut se propager dans la nappe souterraine latéralement vers l'extérieur du bassin via les transferts karstiques vers l'Eure, ou bien « sous » la section de jaugeage)

L'idée est donc d'utiliser un modèle qui contraint la simulation des écoulements rapides par une simulation conjointe du niveau de nappe, en calant simultanément les débits (somme des simulations des 2 composantes rapide et lente) et la piézométrie (simulation du niveau du réservoir nappe qui génère la composante lente du débit).

9.2.2. Données et paramétrisation

Les données d'entrée utilisées sont la pluie et l'ETP SAFRAN de Météo France (cf. §3.4), et les données de sortie sont le débit à Normanville (données DREAL) et la piézométrie à Moisville (données BRGM).

Afin d'évaluer au mieux les pertes de débit souterrains du bassin, la chronique de débit à Normanville utilisée a été corrigée des pertes liées au bras forcé de l'Iton ($Q_{cor\ normanville} = Q_{mesuré\ normanville} + Q_{estimé\ bras\ forcé}$).

- modèle Pluie-Débit-Piézométrie au pas de temps journalier entre 1994 et 2013 sur la période de disponibilité de données du piézomètre :
  - période d'initialisation : 1994-1996
  - période de calage : 1997-2013

La stratégie de calibration porte sur un partage équilibré des périodes de très hautes-eaux et de basses eaux.

La surface du bassin versant a été fixée (1031 km²) (bassin versant topographique). L'écart entre le bassin versant topographique et hydrogéologique sera étudié dans les résultats du modèle par l'estimation des échanges souterrains. Le critère de performance retenu pour

l'optimisation est la moyenne des deux coefficients de Nash calculés sur i) la racine carré du débit, et ii) sur la piézométrie. On autorise 500 itérations pour l'optimisation des paramètres.

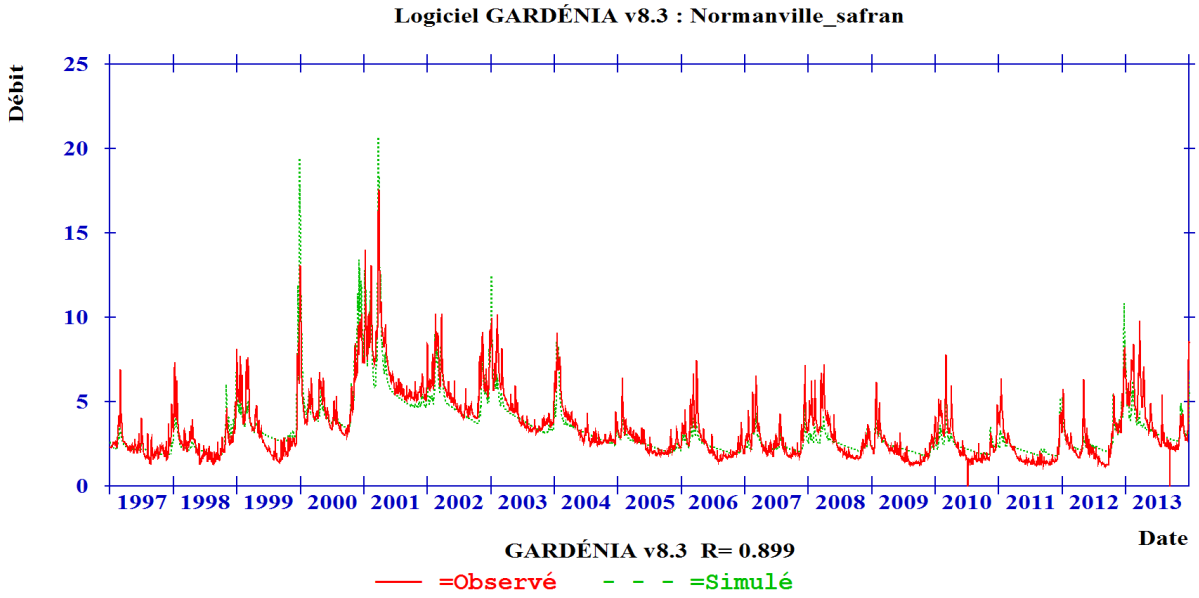
Les paramètres calés sont présentés dans l'Illustration 127 :

Paramètre	Signification	Unités	Calibration Pluie-Débit-Piézo (Normanville - Moisville) entre 1997 et 2013
RU	**Capacité de la réserve superficielle**	**(mm)**	102
RUIPER	**Hauteur de répartition entre Ruissellement et percolation**	**(mm)**	155
THG	**Temps de 1/2 montée (temps de 1/2 percolation)**	**(mois)**	0.428
TG	**Temps de 1/2 tarissement souterrain 1**	**(mois)**	13.26
Fact_Echang	**Facteur d'échange externe**	**(%)**	-41.2
S	**Coefficient emmagasinement**		4%

Illustration 127 : Paramétrisation du modèle GARDENIA utilisé pour simuler le débit et la piézométrie de l'Iton

9.2.3. Résultats du Modèle Pluie-Débit-Piézométrie (Normanville - Moisville) entre 1997 et 2013

La comparaison des débits et niveaux piézométriques simulés et mesurés sont présentés à l'Illustration 128.



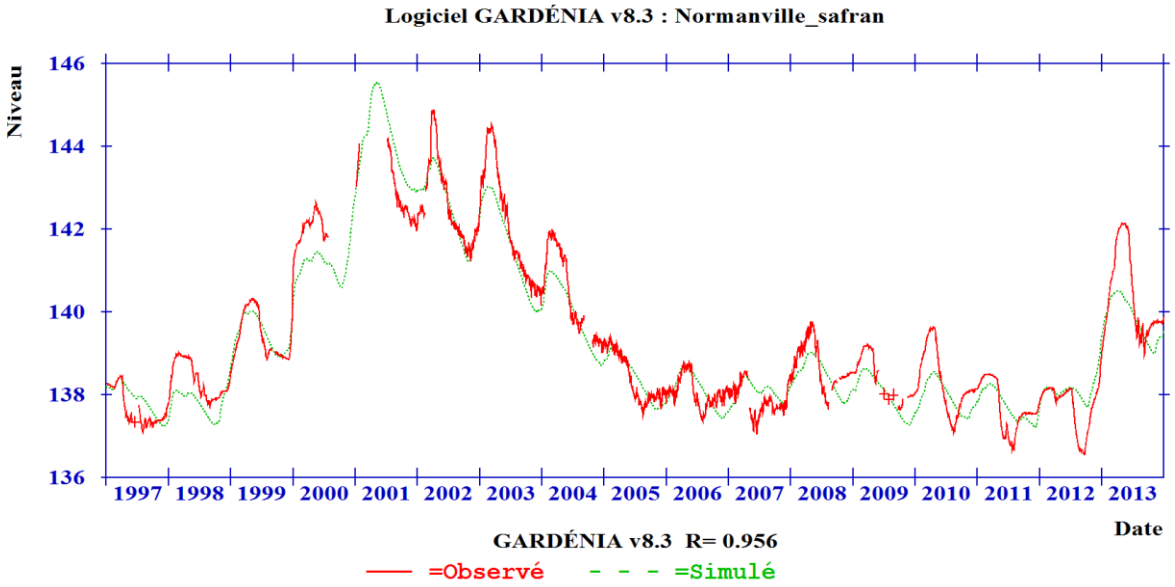


Illustration 128 : Résultats de la simulation des débits à Normanville et des niveaux d'eau à Moisville

9.2.4. Synthèse des résultats

a) *Performances du modèle*

Globalement, les résultats des simulations montrent que le modèle permet de reproduire le débit et la piézométrie. Les coefficients de Nash utilisés comme critères de performance sont les suivants :

- Coefficient de Nash sur la racine carrée du débit : 0.8247
- Coefficient de Nash sur le niveau piézométrique de nappe : 0.9136

Dans le détail, les récessions sont très bien simulées, probablement grâce à la structure du modèle contraint par une simulation conjointe du débit et de la nappe drainée par la rivière. La surestimation de la simulation vis-à-vis des débits mesurés pour certains étiages peut être liée aux prélèvements non pris en compte ou à l'hypothèse forte sur les débits du bras forcé (cf.7.3.4). La dynamique rapide des crues (montée et décrue sur quelques jours) est très bien reproduite.

b) *Echanges inter-bassins*

Dans le département de l'Eure, le débit spécifique de l'Iton est l'un des plus faibles après celui de l'Oison (Equilbey et al., 2004). Si la faible alimentation efficace l'explique en grande partie, c'est aussi lié aux nombreux débits de fuite de l'Iton.

Les résultats du modèle indiquent un facteur d'échange moyen simulé de -41%, ce qui signifie que de fortes pertes en souterrain vers un ou plusieurs bassins sont simulées. Dans le cas de l'Iton, des échanges souterrains sont probables avec le bassin de l'Avre au Sud, le bassin de la Risle à l'Ouest et le bassin de l'Eure à l'Est. Le bassin versant hydrogéologique de l'Iton n'est en effet à l'heure actuelle pas connu précisément.

Le modèle a permis de simuler les débits souterrains sortants du bassin versant. Le résultat de la simulation est présenté à l'Illustration 129.

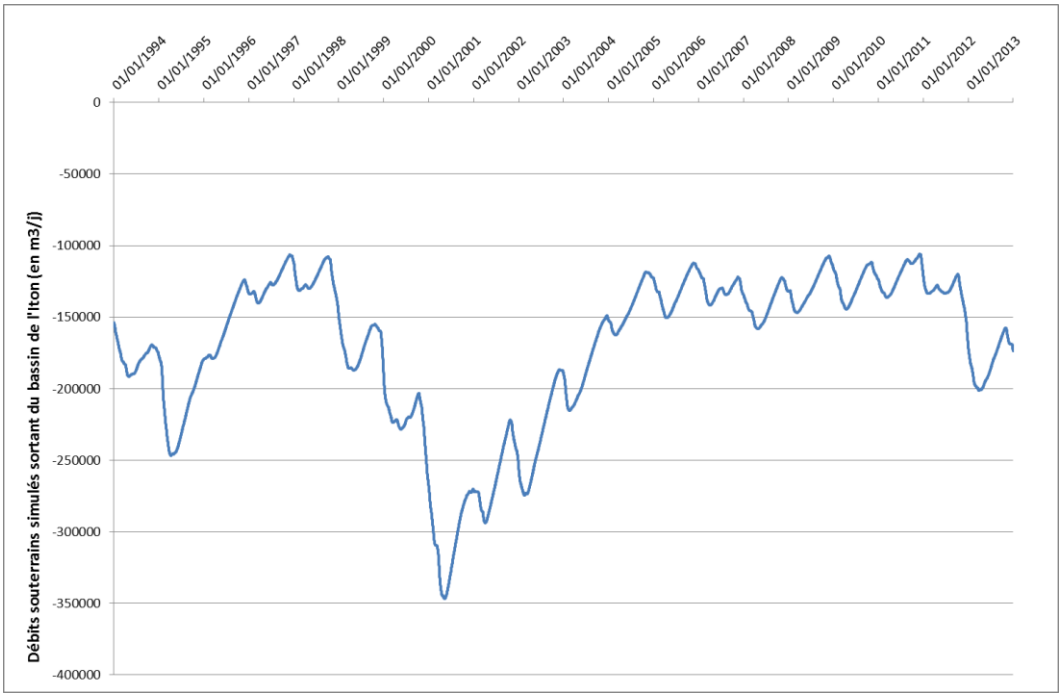


Illustration 129 : Résultats de la simulation des débits souterrains sortant du bassin de l'Iton

En moyenne sur la période 1997-2013, ces pertes représentent 62Mm^3/an environ (soit 2 m3/s). Cela représente près de 36% de la pluie efficace du bassin versant. Ainsi 1/3 des entrées d'eau (pluie efficace) sortirait du bassin versant par le compartiment souterrain.

Ces volumes varient toutefois selon la situation hydrologique. Le tableau ci-dessous présente les volumes simulés pour des années hydrologiques représentatives de hautes et basses eaux :

Cycle hydrologique	Débits souterrains simulés sortant du bassin de l'Iton (Mm^3/an)
2000/2001 (hautes eaux)	-106 Mm3
2011/2012 (basses eaux)	-45,7 Mm3

Il convient toutefois de prendre ces résultats avec beaucoup de précaution car il s'agit de résultats simulés. Par ailleurs, il faut retrancher à ces chiffres la part évapotranspirée des prélèvements du bassin versant (part qui n'est pas restituée via la station d'épuration et qui est réellement perdue pour le bassin). Cette part est actuellement incluse dans ce débit de fuite car les prélèvements ne sont pas pris en compte dans le modèle. La différentiation entre débits de fuite souterrains et prélèvement sera faite lors des calculs des bilans (cf. §11).

Validation des résultats du modèle

Parmi la liste des pertes souterraines supposées (possibles ou probables) vers d'autres bassins versants, certaines d'entre elles ont pu être estimées approximativement dans la bibliographie consultée (cf. tableau ci-dessous). Sans compter les pertes non estimées dans la bibliographie, la somme des pertes estimées représentent un volume de **32.3Mm3. Les résultats du modèle sont donc tout à fait dans l'ordre de grandeur des pertes estimées.**

Identification / supposition de pertes de débit souterrains	Tentative d'estimation
Ecoulement matriciel « sous » la section de jaugeage de normanville	Estimation à **1,3 Mm3/an** (calcul avec un gradient de la nappe i=0.00196 et une transmissivité de T=0.023m²/s
Ecoulement karstique « sous » la section de jaugeage de normanville mis en évidence par traçage (débit de fuite sous alluviale ré-émergent plus aval autour de Brosville)	500 l/s de débit de fuite sous alluviales (valeur estimée d'après le rapport BRGM d'Evaluation des Ressources Hydrauliques n°70SGN041PNO) qui ressortent en aval de Normanville aux sources de Brosville (Equilbey et al., 2004) Soit **15.8 Mm3/an**
Ecoulement souterrain se propageant latéralement vers l'extérieur du bassin vers la Risle (non estimable)	Non estimées
Ecoulement souterrain se propageant latéralement vers l'extérieur du bassin vers l'Avre (non estimé)	Non estimées
Ecoulement souterrain se propageant latéralement vers l'extérieur du bassin vers l'Eure (si absence de crête piézométrique dans le secteur de la chapelle aux bois de faux (non estimé)	Non estimées
Transferts karstiques vers l'Eure (pertes mise en évidence par traçage : débit de fuite émergent aux sources vers l'Eure sont situées à Cailly-sur-Eure, en rive gauche de l'Eure)	800 l/s d'effluence de Gravigny (Iton, à quelques km en amont de Normanville) vers Cailly-sur-Eure (Eure), qui disparaissent sous forme de pertes dans la vallée de l'Iton pour ressortir sous forme de sources de pied de versant à Cailly-sur-Eure (valeurs estimées d'après les valeurs de mesures des sources de Paris à Cailly-sur-Eure : rapport BRGM n° 80SGN715HNO) (Equilbey et al., 2004) Soit **25,2 Mm3/an**

On n'oubliera pas qu'il existe aussi en amont une perte en surface liée à la dérivation d'une partie des débits de l'Iton vers l'Avre. On note également pour mémoire, les pertes liées aux prélèvements AEP non restitués par les STEP estimées dans le §10.6 à environ à 3,5 Mm3/an moyennant le fait que (1) tous les prélèvements/STEP ne sont pas en amont de Normanville, (2) que l'estimation n'inclue que les communes raccordées à une STEP.

c) *Contribution des écoulements lents au débit de l'Iton*

Le modèle permet de décomposer le débit de la rivière en une composante rapide (ruissellement + écoulement karstique rapide) et une composante lente souterraine (contribution des aquifères au débit de la rivière). Ces résultats doivent être pris avec précautions, car il n'y a pas de certitude dans le fait d'assimiler les écoulements identifiés comme lents aux écoulements souterrains. Cette décomposition permet, cependant, de dégager des informations tendancielles sur l'alimentation du cours d'eau par la nappe.

Les Illustration 130 et Illustration 131 représentent les variations saisonnières des contributions des écoulements rapides et lents au débit de l'Iton sur la période 1997-2013.

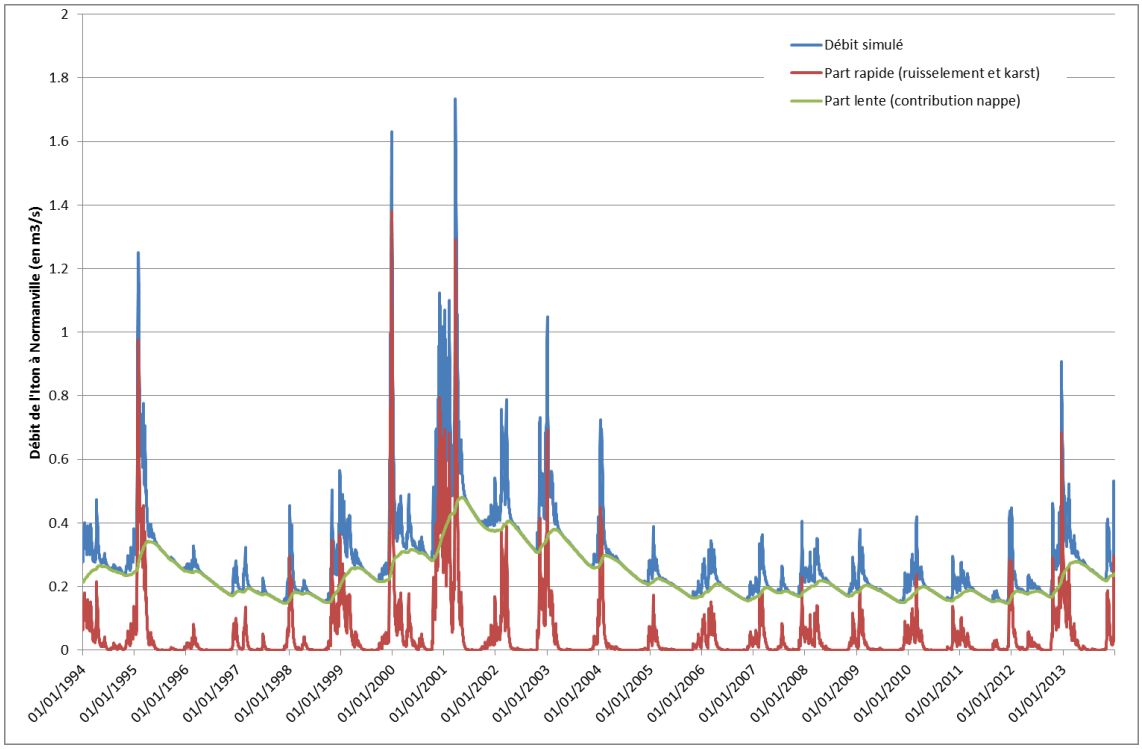
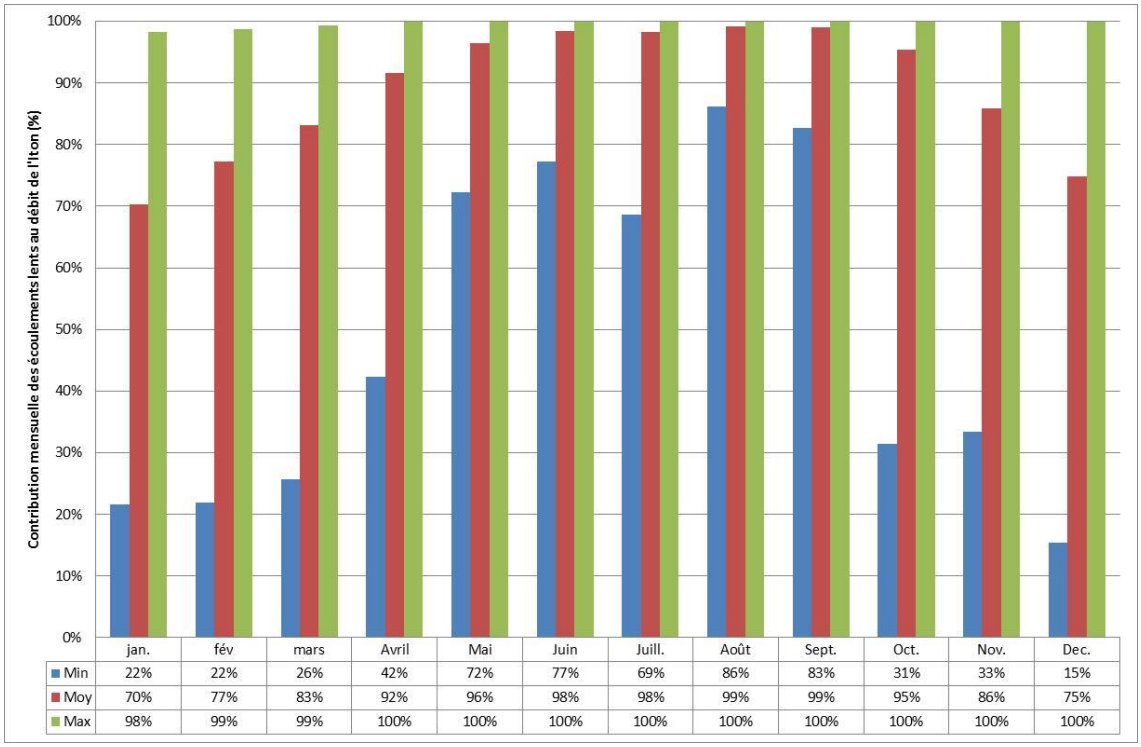


Illustration 130 : Contributions simulées des écoulements souterrains lents et écoulements rapides au débit de l'Iton (1997-2013)



	jan.	fév	mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Min	22%	22%	26%	42%	72%	77%	69%	86%	83%	31%	33%	15%
Moy	70%	77%	83%	92%	96%	98%	98%	99%	99%	95%	86%	75%
Max	98%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Illustration 131 : Contributions simulées mensuelles moyennes, min et max des écoulements souterrains lents au débit de l'Iton (1997-2013)

A titre indicatif, plusieurs constats peuvent être faits :

- sur la période 1997-2013, la modélisation GARDENIA calcule une contribution minimale des écoulements souterrains lents au débit de l'Iton de 15 %, une contribution maximale de 100 % et une contribution moyenne de 89 % ;

- de mai à septembre, le débit de l'Iton est essentiellement assuré par les écoulements souterrains lents : de 96 à 99 % en moyenne d'après la modélisation globale. L'analyse statistique montre que les écarts interannuels sont les plus faibles pour ces périodes : quelles que soient les précipitations, la part du ruissellement reste, en effet, très faible (absence de pluies efficaces) ;

- en période de recharge hivernale (d'octobre à avril), la contribution des écoulements souterrains lents au débit de l'Iton est logiquement plus faible mais reste largement prépondérante : de 70 à 95 % en moyenne. Les écarts interannuels sont, en revanche, plus importants : la part du ruissellement est, en effet, fortement dépendante des précipitations hivernales. Durant ces périodes (octobre à avril), la part des écoulements souterrains peut atteindre ponctuellement des minima (lors d'épisode de crues) allant de 15% à 42% (à titre de comparaison ces minima sont toujours supérieurs à 70% sur la période Mai-Septembre) ;

- des ruissellements significatifs ne sont observés que lors des hivers exceptionnellement pluvieux avec en général plusieurs mois très humides consécutifs. A titre indicatif, les ruissellements et résurgences karstiques auraient contribué à plus de 70% au débit de l'Iton lors des mois d'hivers suivants : janvier et février 95 ; déc. 1999 ; dec. et janv. 2000, mars 2001 ; dec. 2012.

d) *Bilan moyen*

Le schéma ci-dessous (Illustration 132) présente le bilan hydrique quantitatif moyen établi sur la période 1997-2013 à partir des résultats de la modélisation Gardenia. Il se résume selon le schéma suivant :

- en bleu les entrées d'eaux dans le bassin versant,
- en rouge les sorties d'eaux,
- en vert les transferts au sein de l'hydrosystème.

Il schématise la répartition moyenne des circulations de l'eau dans les différents compartiments du bassin versant.

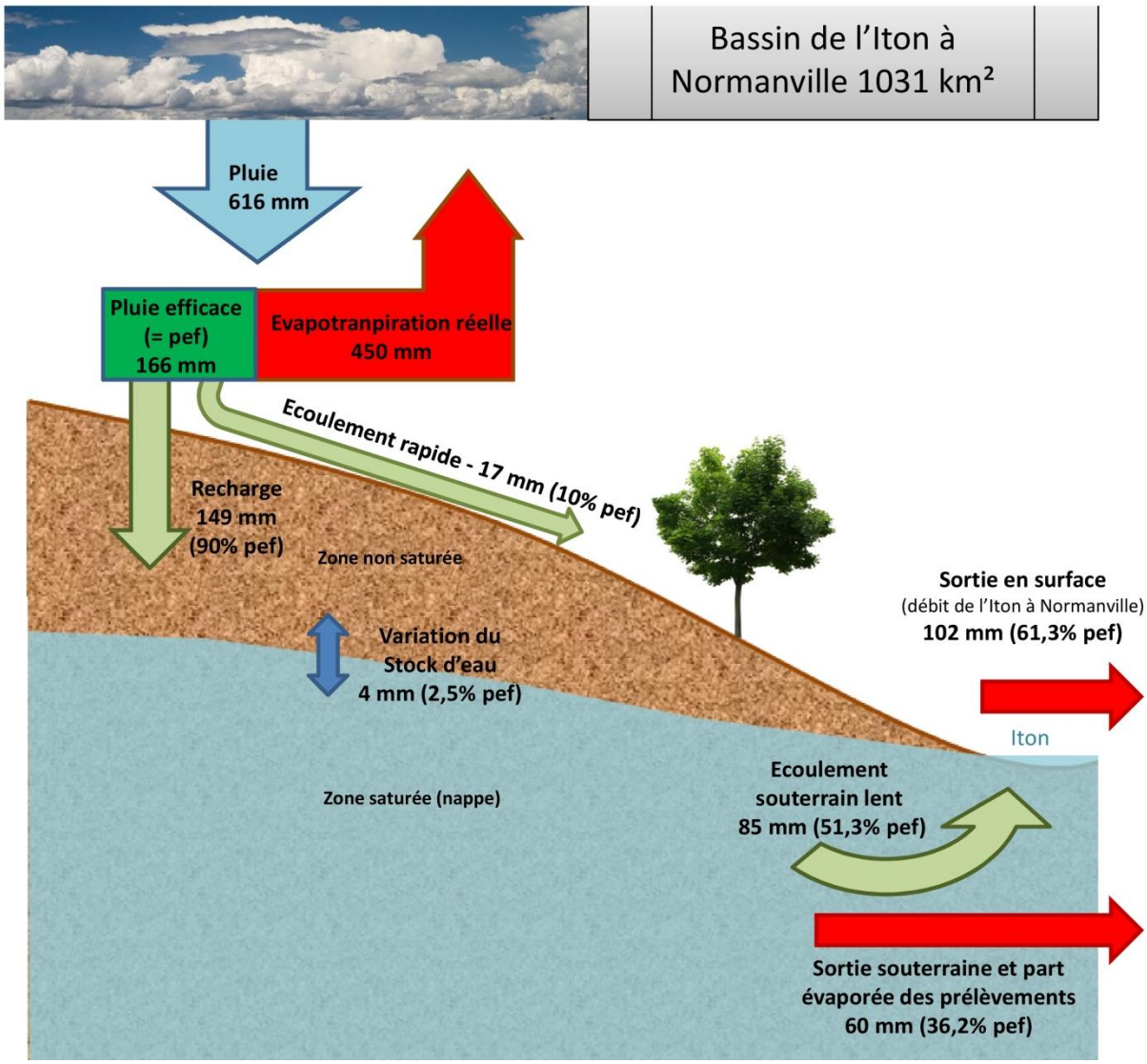


Illustration 132 : Eléments du bilan hydrologique du bassin de l'Iton (1997-2013) d'après les résultats de la modélisation globale GARDENIA pluie-débit-niveaux

Ce schéma indique qu'en moyenne et d'après les résultats de ce modèle de l'Iton à la station de Normanville :

2. Sur les 616mm de pluie, 450mm retourne dans l'atmosphère via l'évapotranspiration et 166 mm seulement constituent la pluie efficace du bassin versant ;

3. Sur les 166 mm de pluie efficace :
    - 10% (17 mm) ruisselle en surface ou est transféré par des écoulements karstique (part rapide du débit de l'Iton),
    - 90% (149 mm) s'infiltre vers la nappe,
4. Parmi les 149mm d'eau qui s'infiltre :
    - 85 mm réalimente la rivière (composante lente du débit de l'Iton),
    - 4 mm sont stockés dans la nappe,
    - 60 mm sont perdus par transfert souterrain vers un autre bassin ou sont évaporés après prélèvement par l'homme[16] ;
5. On obtient ainsi une très forte influence des écoulements souterrains lents avec 83 % de contribution au débit de la rivière ;
6. **En définitive, sur les 616 mm entrés dans le bassin versant de l'Iton :**
    - **73% (450 mm) reparte dans l'air par évapotranspiration,**
    - **9,7% (60 mm) sortent du bassin par des écoulements souterrains ou du fait des prélèvements anthropiques,**
    - **0,6% (4mm) sont stockés dans l'aquifère,**
    - **16,6% (102 mm) sortent du bassin par des écoulements de surface (débit de l'Iton)**

9.3. APPLICATION D'UN MODELE PLUIE-DEBIT-PIEZOMETRIE A LA STATION DE BOURTH

Un deuxième modèle a été réalisé au niveau de la station débitmétrique de Bourth afin de simuler le fonctionnement de l'amont du bassin de l'Iton. Les résultats de ce modèle ont ensuite été utilisés dans le §14.3.

Pour les données d'entrée de ce modèle, une station fictive de pluie a été créée par pondération des stations pluviométrique du secteur, pour prendre en compte la variabilité spatiale de la pluie : Station pluie fictive du BV Bourth = 44,1% *Beaulieu*[17] *+ 44,6% Soligny*[18] *+ 11,3% Rueil*[19]

Concernant l'ETP, étant donné sa faible variabilité spatiale, l'ETP d'Evreux a été utilisé.

Le modèle a été calé sur les débits de la station de Bourth (données DREAL) et la piézométrie de l'Aigle (02144X0005) (données BRGM).

[16] Les prélèvements peuvent revenir dans le système après rejet, une partie pouvant néanmoins s'évapotranspirer

[17] Code météo France : 61034001

[18] Code météo France : 61475001

[19] Code météo France : 28322003

- modèle Pluie-Débit-Piézométrie au pas de temps journalier entre 1995 et 2013 sur la période de disponibilité de données piézométriques :
  - période d'initialisation : 1995-1997
  - période de calage : 1998-2013

La stratégie de calibration porte sur un partage équilibré des périodes de très hautes-eaux et de basses eaux.

La surface du bassin versant a été fixée (187 km²) (bassin versant hydrogéologique).
Le critère de performance retenu pour l'optimisation est la moyenne des deux coefficients de Nash calculés sur i) la racine carré du débit, et ii) sur la piézométrie. On autorise 500 itérations pour l'optimisation des paramètres.

Les paramètres calés sont présentés dans l'Illustration 133 :

Paramètre	Signification	Unités	Calibration Pluie-Débit-Piézo (Normanville - Moisville) entre 1997 et 2013
RU	**Capacité de la réserve superficielle**	**(mm)**	326
RUIPER	**Hauteur de répartition entre Ruissellement et percolation**	**(mm)**	15
THG	**Temps de 1/2 montée (temps de 1/2 percolation)**	**(mois)**	0.2
TG	**Temps de 1/2 tarissement souterrain 1**	**(mois)**	3.9
Fact_Echang	**Facteur d'échange externe**	**(%)**	0
S	**Coefficient emmagasinement**		0.8%

Illustration 133 : Paramétrisation du modèle GARDENIA utilisé pour simuler le débit de l'Iton à Bourth et la piézométrie à L'Aigle

Résultats du Modèle Pluie-Débit-Piézométrie (Bourth – L'Aigle) entre 1995 et 2013 :

La comparaison des débits et niveaux piézométriques simulés et mesurés sont présentés à l'Illustration 134.

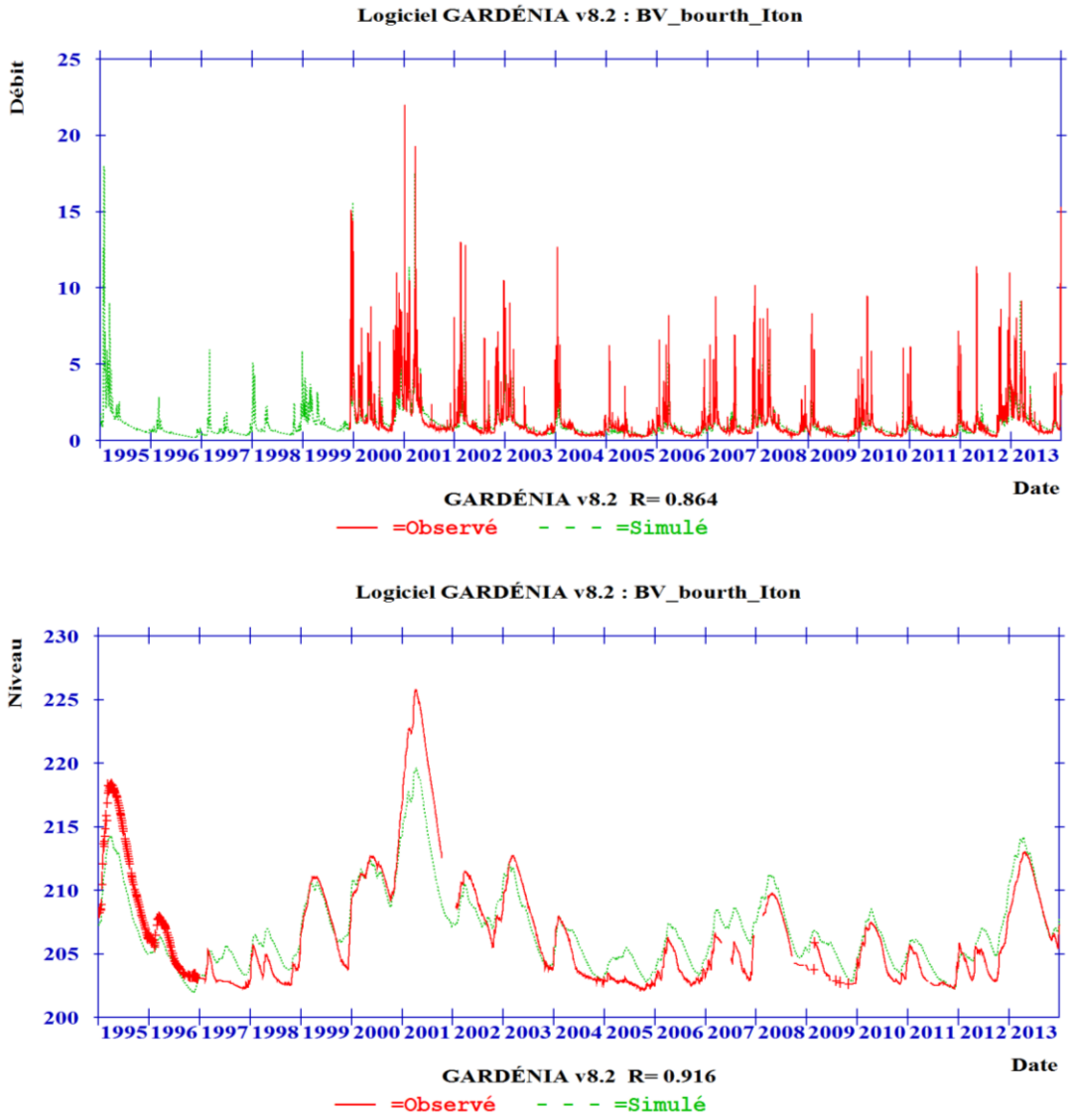


Illustration 134 : Résultats de la simulation des débits à Bourth et des niveaux piézométriques à l'Aigle

Performances du modèle

Globalement, les résultats des simulations montrent que le modèle permet de reproduire le débit et la piézométrie. Les coefficients de Nash utilisés comme critères de performance sont les suivants :

- Coefficient de Nash sur la racine carrée du débit : 0.75
- Coefficient de Nash sur le niveau piézométrique de nappe : 0.84

10. Les prélèvements et rejets en nappe et en rivière

10.1. DEMARCHE SUIVIE POUR LE RECUEIL DES DONNEES DE PRELEVEMENTS

Un inventaire des points de prélèvements et des volumes prélevés a été dressé en consultant et en confrontant diverses sources de données (AESN, DREAL, IREP, DDTM27, SATESE 27, SATEMA 61). En complément, des enquêtes ont été menées par envoi de questionnaires à l'ensemble des communes (pour le recensement des forages) et des syndicats d'eau (pour obtenir les données de prélèvement au pas de temps mensuel) de la zone d'étude. Ces prélèvements ont été distingués selon les trois principaux types d'usage : les besoins en alimentation en eau potable (AEP), les utilisations pour l'agriculture et l'élevage et les utilisations pour l'industrie. En fonction de la disponibilité des données de base, la distinction entre prélèvements en nappe et dans les eaux superficielles a été réalisée.

10.2. PRELEVEMENTS AGRICOLES

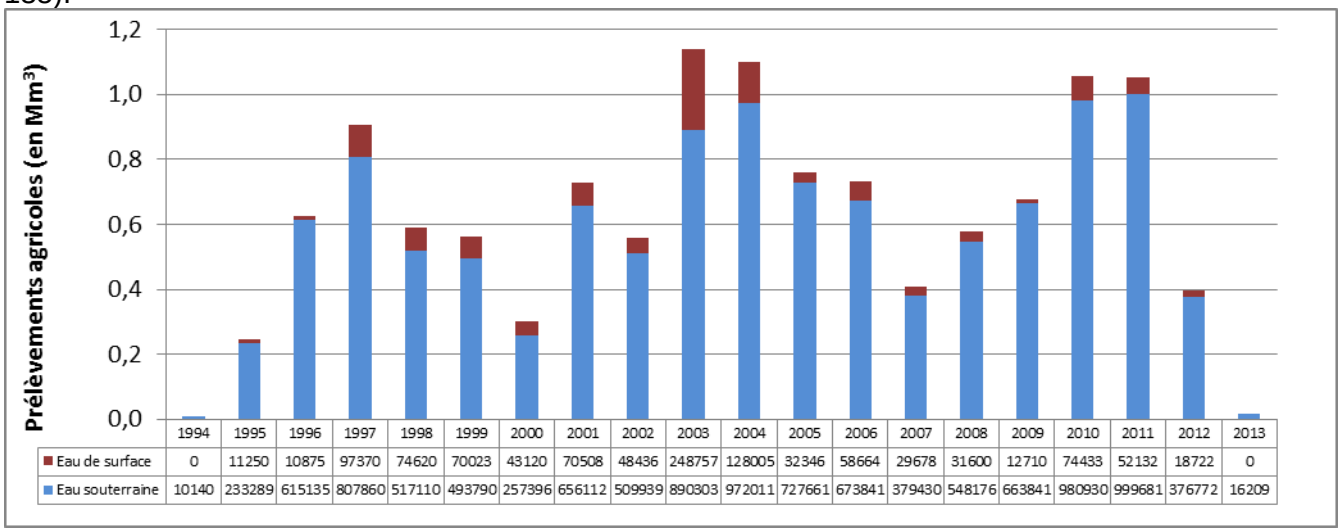
10.2.1. Inventaire des prélèvements agricoles

L'inventaire des prélèvements agricoles dans la zone d'étude a été réalisé à partir de la base de données de l'AESN qui recense les prélèvements pour l'irrigation et les élevages. Certaines données datant d'avant 2008 n'ont pas de coordonnées spatiales associées, dans ce cas les coordonnées du centroïde de la commune ont été utilisées.

Au total, 77 ouvrages de prélèvement ont été recensés au sein de la zone d'étude (Illustration 143), dont :

- 20 ouvrages de prélèvement d'eau de surface ;
- 57 ouvrages de prélèvement d'eau souterraine.

Les prélèvements agricoles connaissent une forte variabilité d'une année sur l'autre, celle-ci s'explique notamment par la variabilité pluviométrique. A l'échelle du bassin versant, les prélèvements agricoles varient de 250 000 à près de 1,15 million de m^3 par an (cf. Illustration 135).



	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Eau de surface	0	11250	10875	97370	74620	70023	43120	70508	48436	248757	128005	32346	58664	29678	31600	12710	74433	52132	18722	0
Eau souterraine	10140	233289	615135	807860	517110	493790	257396	656112	509939	890303	972011	727661	673841	379430	548176	663841	980930	999681	376772	16209

Illustration 135 : Volumes annuels des prélèvements agricoles

Il est à noter que ce recensement n'est très probablement pas exhaustif et que les volumes prélevés pour l'irrigation et l'élevage sont donc sous-estimés.

10.2.2. Mensualisation des données

La méthode utilisée pour mensualiser les données collectées au pas de temps annuel consiste à estimer la dose d'irrigation nécessaire en fonction du type de culture, de la pluie et de l'évapotranspiration maximale (ETM[20]) de façon décadaire sur la période 1994-2012 (cette méthode est utilisée par la Chambre d'Agriculture de l'Eure afin de calculer la dose d'irrigation préconisée dans les bulletins envoyés aux agriculteurs).

Cette dose d'irrigation estimée est ensuite utilisée pour calculer des coefficients de répartition servant à mensualiser les volumes prélevés. Les données utilisées pour cela sont les suivantes :

- Inventaire des points de prélèvement recensés dans la zone d'étude ;
- Données SIG du registre parcellaire graphique de 2013 (îlots PAC et groupes de culture associés en 2013) ;
- Données de pluie à la station de Marcilly-La-Campagne et d'ETP à Evreux pour le calcul de l'ETM ;
- Données des coefficients culturaux (Kc) pour le blé, l'orge, le maïs et les pois (Annexe 5) ;
- Cartographie de la réserve utile (RU) des sols (source : carte régionale des sols au 1/250.000)

Les différents groupes de cultures pratiquées dans la zone d'étude ainsi que leurs surfaces respectives sont présentés dans le § 14.2.2.

Pour chaque pas de temps décadaire j, la dose d'irrigation nécessaire a été calculée ainsi :

- ETM(j) = ETP(j) x Kc

- Si RU(j-1) + Pluie(j) – ETM(j) < Seuil RU,
  Dose d'irrigation(j) = Seuil RU - RU(j-1) + Pluie(j) – ETM(j)

- Si RU(j-1) + Pluie(j) – ETM(j) > ou = Seuil RU,
  Dose d'irrigation(j) = 0

- RU (j) = RU (j-1) + Dose d'irrigation + Pluie(j) – ETM(j)

Les surfaces de cultures pouvant nécessiter une irrigation étant largement dominées par le blé tendre, la dose d'irrigation nécessaire n'a été calculée qu'avec le coefficient Kc du blé. Néanmoins, la réserve utile n'étant pas homogène à l'échelle du bassin versant, deux valeurs différentes ont été utilisées : une réserve utile de 210 mm a été utilisée dans les parties nord et est du bassin versant tandis qu'une valeur de 75 mm a été prise dans le sud de la zone d'étude (Illustration 136). Le seuil minimal de réserve utile a été fixé à 50 mm sur l'ensemble du bassin versant.

[20] L'ETM est l'évapotranspiration tenant compte de l'espèce considérée et de son stade végétatif. L'ETM corrige l'ETP à l'aide d'un coefficient Kc calculé expérimentalement pour chaque espèce en fonction de son stade végétatif.

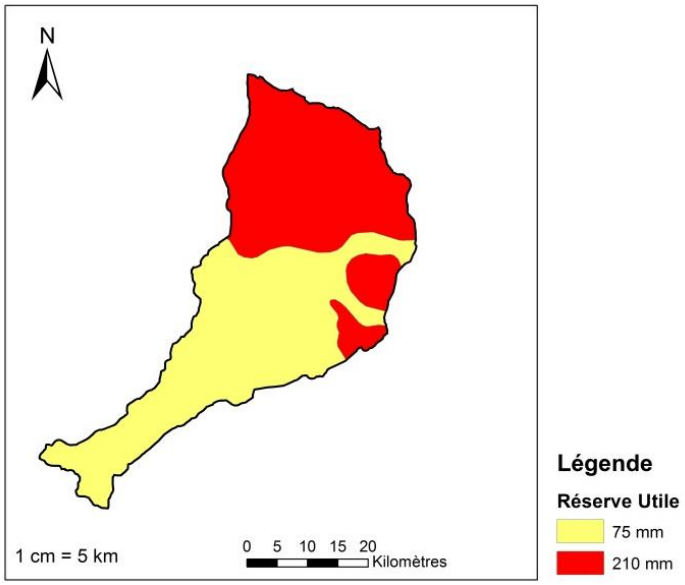


Illustration 136 : Cartographie des réserves utiles dans la zone d'étude

Mensualisation des prélèvements agricoles

Les doses d'irrigation nécessaires ainsi calculées au pas décadaire pour la période 1994-2012 ont été sommées pour obtenir des valeurs mensuelles. Les données annuelles de prélèvements de la base AESN ont ensuite été mensualisées en utilisant un coefficient de répartition. Celui-ci correspond aux doses d'irrigation mensuelles normalisées :

- Dose irrigation mensuelle = somme sur chaque mois des doses irrigation décadaires
- Dose irrigation mensuelle normalisée (ou coefficient de répartition) = Dose d'irrigation mensuelle/ moyenne sur l'année en cours des Doses d'irrigation mensuelle
- Volume prélèvement mensuel = (Volume prélèvement annuel/12) x Dose irrigation mensuelle normalisée

Les Illustration 137 et Illustration 138 présentent les coefficients de répartition obtenus, pour les deux zones de sol (réserves utiles de 75 mm et 210 mm).

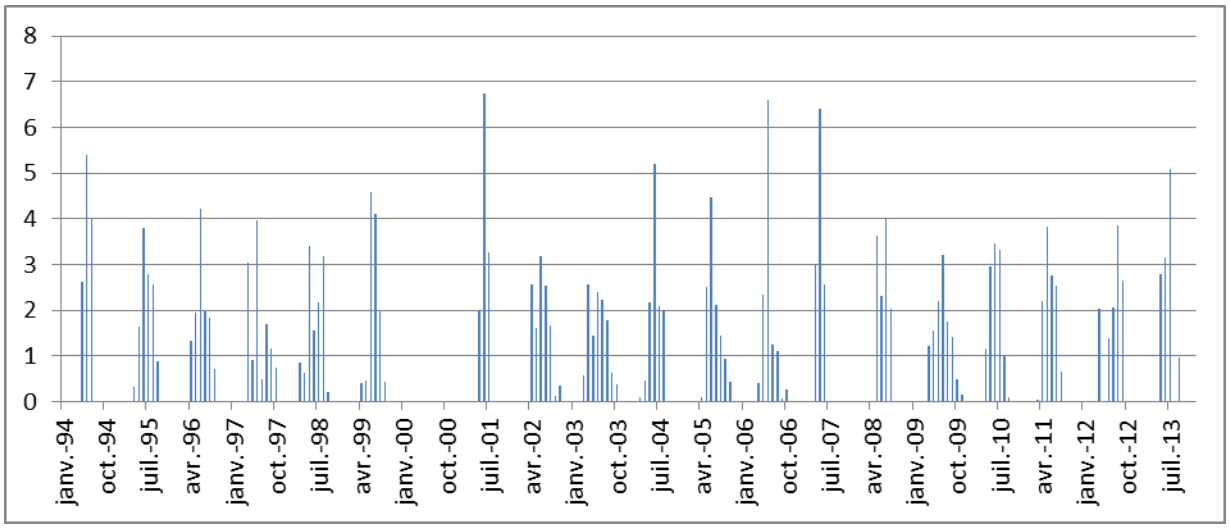


Illustration 137 : Coefficient de répartition des données annuelles pour une réserve utile de 75 mm

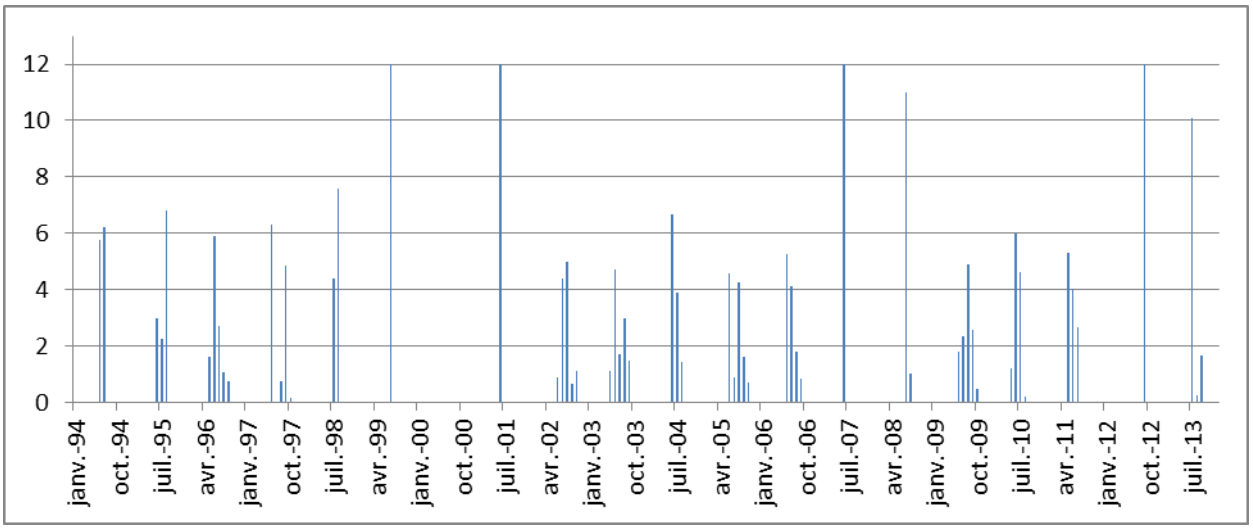


Illustration 138 : Coefficient de répartition des données annuelles pour une réserve utile de 210 mm

En se basant sur les données de pluie et d'ETP, on remarque que la réserve utile n'est pas descendue en-dessous du seuil de 50 mm au cours de l'année 2000. En effet, l'année 2000 a été une année pluvieuse et théoriquement l'irrigation n'était pas nécessaire. Le coefficient de répartition de l'année 1999 a été utilisé pour mensualiser les données de l'année 2000.

Résultats de la mensualisation

La mensualisation des prélèvements pour l'irrigation montre que la répartition de ces prélèvements n'est pas homogène sur l'année et que les années ne sont pas équivalentes entre elles. L'Illustration 139 présente la répartition des volumes des prélèvements agricoles mensuels sur la période 1994 – 2012. Ces prélèvements varient entre 0, principalement en saison hivernale, et 527 641 m^3/mois au maximum (été 2004).

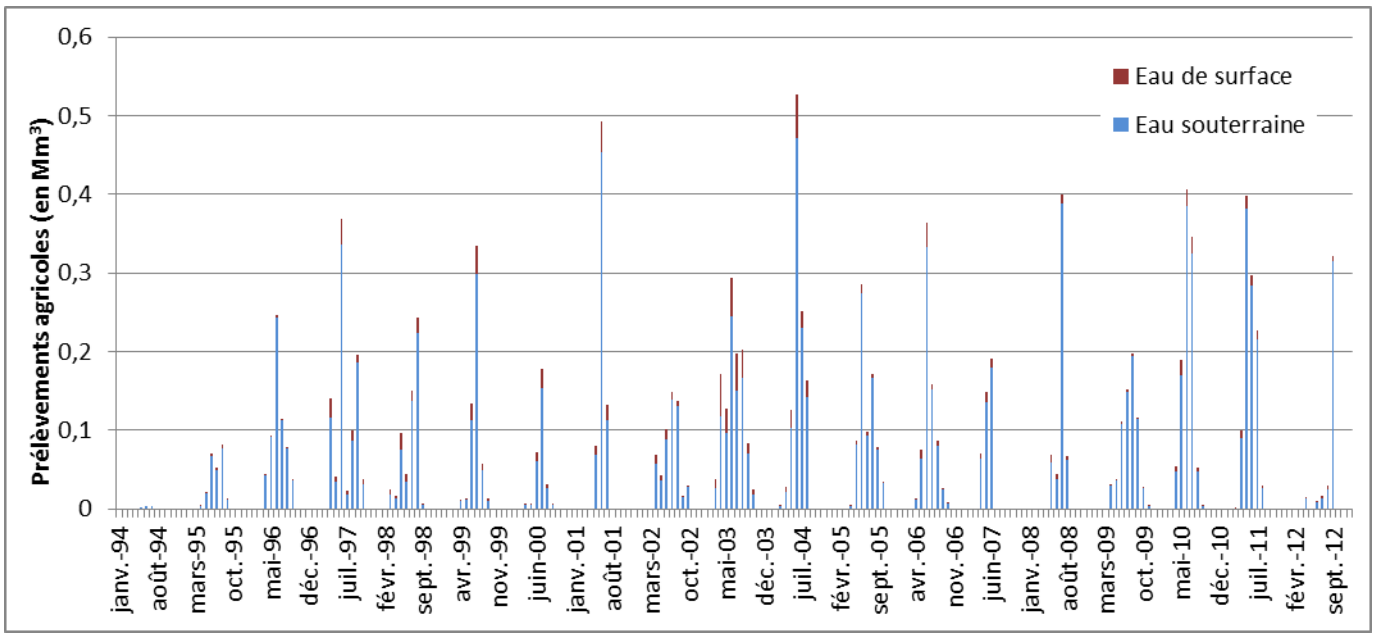


Illustration 139 : Répartition mensuelle des prélèvements pour l'agriculture

10.3. PRELEVEMENTS INDUSTRIELS

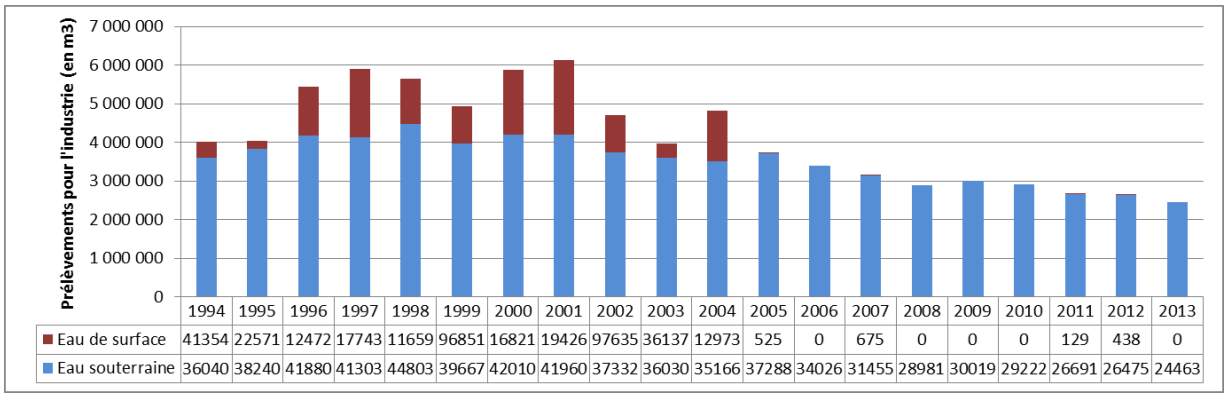
10.3.1. Inventaire des prélèvements industriels

L'inventaire des prélèvements industriels dans la zone d'étude a été réalisé à partir de la base de données de l'AESN et du Registre français des Emissions Polluantes (iREP). Les établissements industriels sont redevables de l'AESN et à ce titre, ils remplissent annuellement des déclarations d'activités polluantes et de volumes prélevés dans le milieu naturel.

Au total 43 ouvrages de prélèvements industriels ont été recensés au sein de la zone d'étude (Illustration 143) dont :

- 13 ouvrages de prélèvement d'eau de surface ;
- 30 ouvrages de prélèvement d'eau souterraine.

Les prélèvements industriels varient entre 2,5 et 6 Mm^3/an (Illustration 140). Il est à noter que les prélèvements pour l'industrie sont majoritairement des prélèvements d'eau souterraine.



	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Eau de surface	41354	22571	12472	17743	11659	96851	16821	19426	97635	36137	12973	525	0	675	0	0	0	129	438	0
Eau souterraine	36040	38240	41880	41303	44803	39667	42010	41960	37332	36030	35166	37288	34026	31455	28981	30019	29222	26691	26475	24463

Illustration 140 : Volumes annuels des prélèvements d'eau industriels

Les prélèvements industriels mensuels ont été considérés comme ne variant que peu au cours de l'année. Ainsi les volumes mensuels ont été obtenus en divisant les volumes annuels par 12.

10.4. PRELEVEMENTS AEP

10.4.1. Inventaire des prélèvements AEP

Une enquête a été réalisée par le BRGM par envoi de questionnaires à tous les producteurs d'eau de la zone d'étude (syndicats d'eau et communes). Il leur a été demandé de fournir :

- les données de prélèvements pour chaque puits/forage/source au pas de temps mensuel ;
- les éventuels projets de création de nouveaux ouvrages de prélèvement ;
- les éventuels projets d'abandon d'ouvrages de prélèvement.

Pour compléter les lacunes des données fournies par les producteurs d'eau, la base de données AESN a été utilisée (déclaration dans le cadre des redevances des volumes annuels prélevés). Au total, 104 ouvrages de prélèvement ont été recensés dans la zone d'étude, tous captant des eaux souterraines.

Les prélèvements pour l'AEP de la zone d'étude ont diminué de 1995 à 2013, passant de 18 Mm^3 à 11 Mm^3 par an. L'Illustration 141 présente les volumes annuels prélevés pour l'AEP sur la période 1994 – 2013.

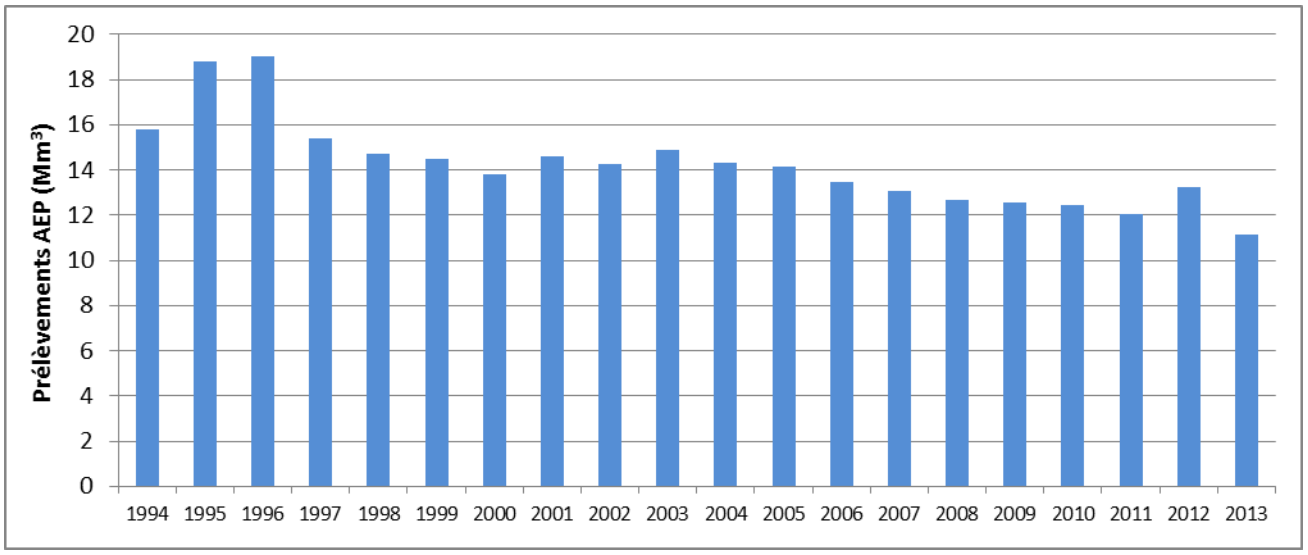


Illustration 141 : Volumes annuels des prélèvements AEP

10.4.2. Mensualisation des données

Lorsque les données mensuelles n'étaient pas disponibles, les données de production annuelles ont été mensualisées selon des coefficients de répartition mensuelle. Ceux-ci ont été calculés soit à partir des prélèvements mensuels du forage sur une autre période, soit sur d'autres forages du secteur d'étude.

10.5. SYNTHESE DES DONNEES DE PRELEVEMENT

D'un point de vue quantitatif, le premier usage de l'eau dans le bassin de l'Iton est l'eau potable. L'AEP représente en moyenne 14 Mm^3 par an sur la période 1994 – 2013, soit 75 % des volumes totaux prélevés (en eaux de surface et eaux souterraines). Les prélèvements industriels constituent le second usage le plus consommateur d'eau, avec un volume moyen annuel de 4,2 Mm^3, soit une part de 22 % des prélèvements effectués sur la zone d'étude. Enfin, les prélèvements agricoles pour l'irrigation et l'élevage sont estimés à 0.6 Mm^3 annuels et représentent 3 % des prélèvements d'eau à l'échelle annuelle (Illustration 142). Les prélèvements agricoles étant concentrés sur certains mois de l'année, ils peuvent représenter une part plus importante (jusqu'à 24%) sur des bilans réalisés à l'échelle mensuelle (cf. Illustration 144).

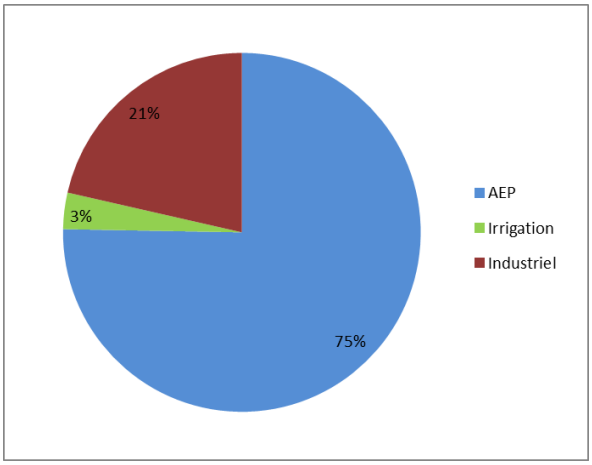


Illustration 142 : Répartition des prélèvements en eaux de surface et eaux souterraines selon les usages (moyenne réalisée sur la période 1994-2013)

La localisation de tous les ouvrages de prélèvements, distingués selon le secteur d'usage, est présentée sur l'Illustration 143.

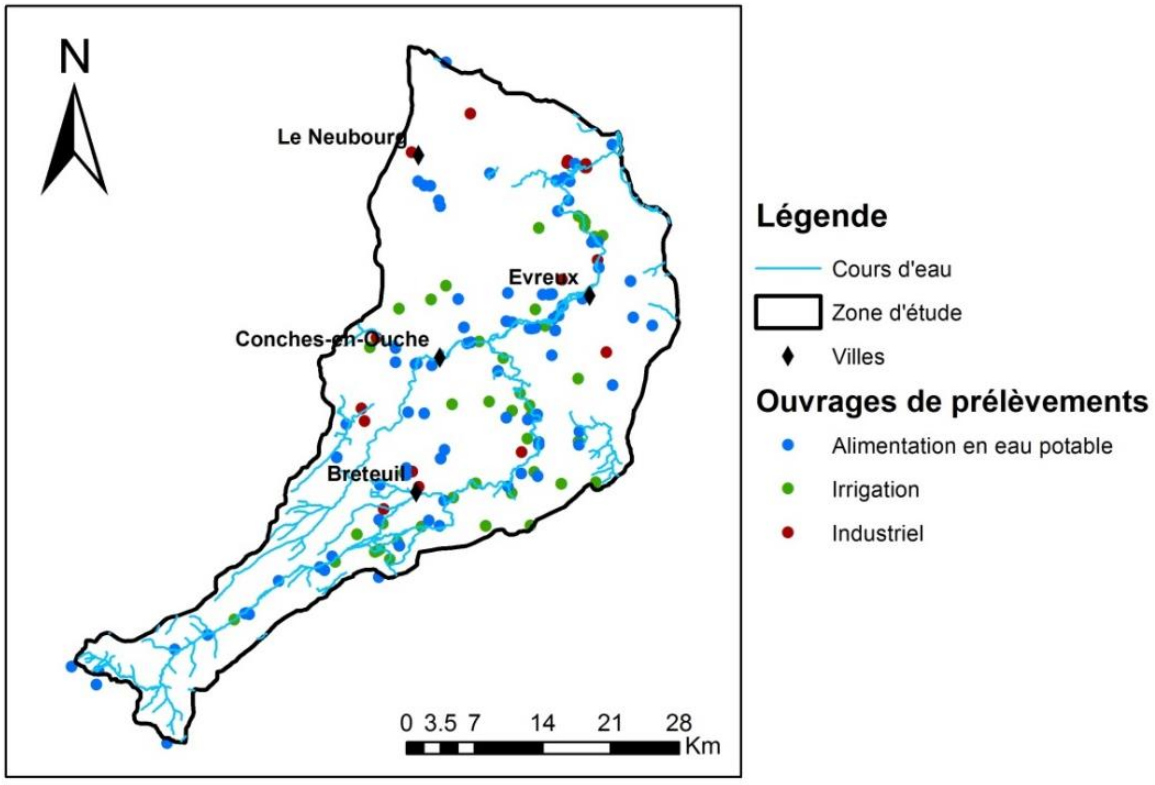


Illustration 143 : Localisation des ouvrages de prélèvements recensés par type d'usage

La majorité des ouvrages de captage sont localisés dans les secteurs de vallée. Bien qu'il existe des captages pour l'AEP tout le long des cours d'eau du bassin, il est intéressant de noter que la production d'eau potable de l'agglomération ébroïcienne représente près de 65 % de la production d'eau potable totale du bassin de l'Iton pour l'année 2007. Quant aux prélèvements industriels, ils sont majoritairement implantés sur la moitié aval du bassin, avec

un site qui représente près de 90 % des volumes prélevés (source : SAGE Iton, 2010). Ce site est situé à Hondouville, en limite de la commune d'Amfreville-sur-Iton.

L'Illustration 144 présente les volumes mensuels prélevés par usage sur la période 1994-2013.

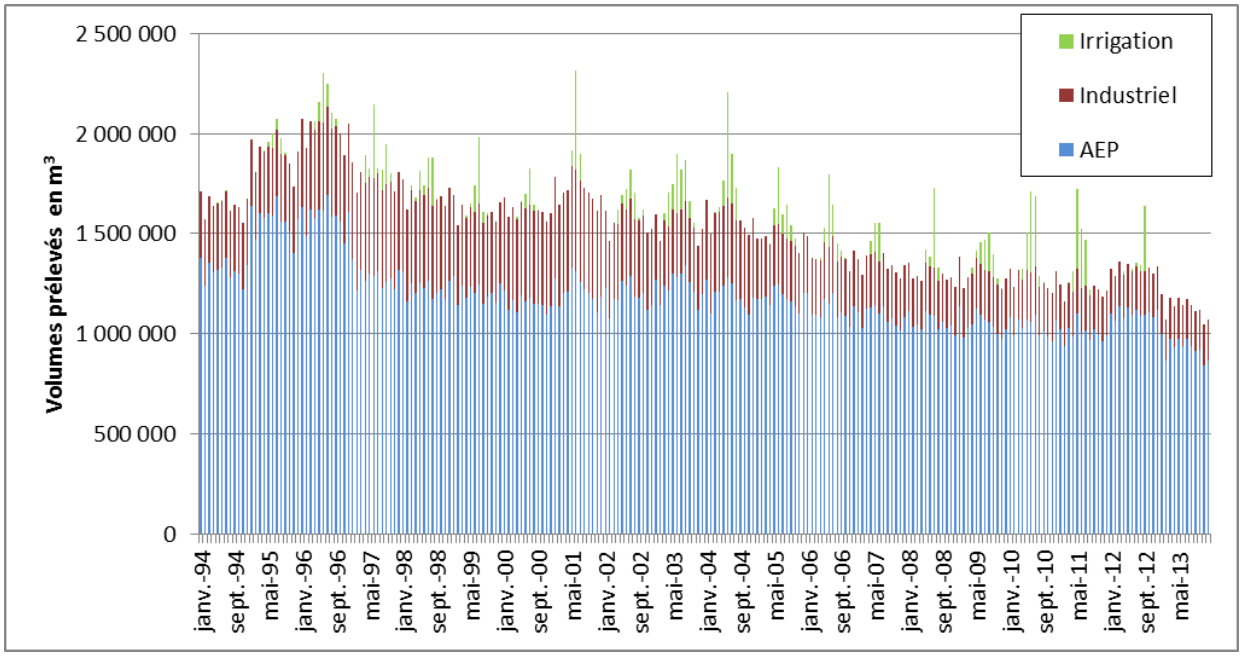


Illustration 144 : Bilan des prélèvements par usage au pas mensuel pour la période 1994-2013

On constate que les volumes prélevés varient entre 1 et 2,5 Mm^3 par mois. Les grandes tendances qui ressortent quant à l'évolution des volumes d'eau prélevés sur la période 1994-2013 sont les suivantes :

- Forte variabilité des volumes prélevés pour l'agriculture, due aux variations climatiques et notamment pluviométriques entre les années, et au sein de chaque année ;
- Baisse de la production d'eau potable, qui passe de plus de 1,5 Mm^3/mois en 1995 à moins de 1 Mm^3/mois en 2013, soit une baisse de plus de 30 % en 18 ans ;
- Diminution des prélèvements industriels, qui passent d'environ 0.5 Mm^3/mois sur la période 1997-2001, à moins de 0.25 Mm^3/mois depuis 2010 ;
- Certains mois les prélèvements agricoles peuvent représenter une part plus importante (jusqu'à 24%) des prélèvements totaux.

10.6. LES REJETS

10.6.1. Les rejets des stations d'épuration

Sur les 164 communes de la zone d'étude :

- 126 communes ne sont pas reliées à une station d'épuration. Les effluents sont alors traités par un système d'assainissement non collectif ;

- 38 communes sont reliées à un système d'assainissement collectif. Ces 38 communes totalisent 68% de la population du bassin versant.

Concernant l'assainissement collectif, ces 38 communes amènent les effluents à traiter vers 21 stations d'épurations (STEP) publiques. Ces stations sont localisées sur l'Illustration 145. Les stations aux capacités les plus importantes desservent les agglomérations de Conches-en-Ouche, Le Neubourg et Evreux.

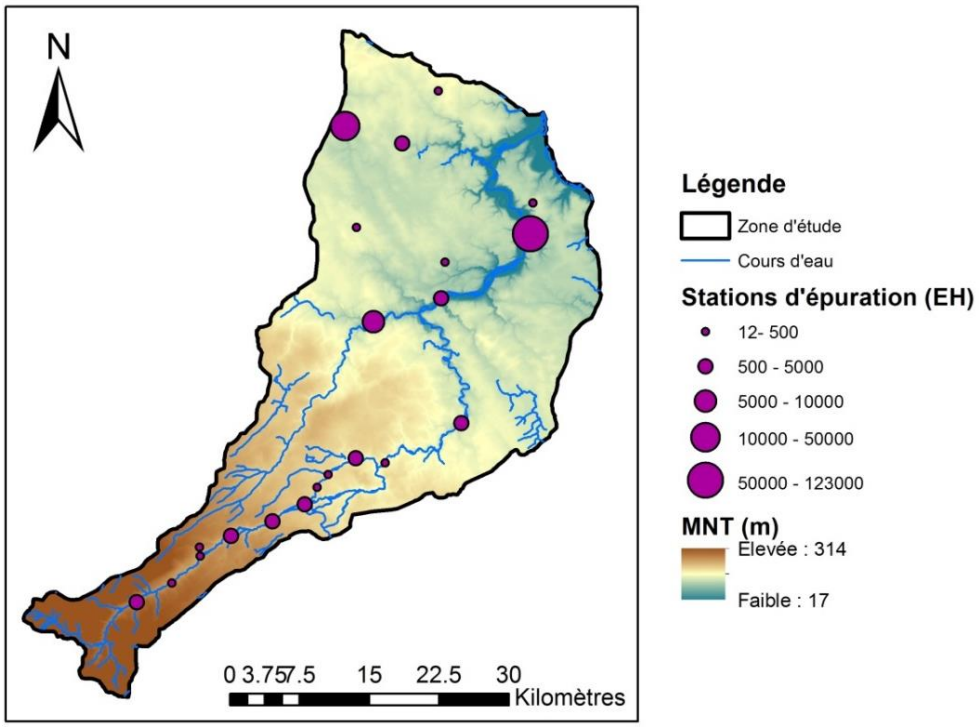


Illustration 145 : Localisation et capacité en équivalent habitant (EH) des stations d'épuration présentes sur la zone d'étude.

Les volumes rejetés par les STEP de la zone d'étude ont été collectés auprès du SATESE 27 et du SATTEMA 61. Les données récupérées auprès de ces organismes sont synthétisées dans le Tableau 15. Les données n'ont pu être fournies pour toutes les stations et toutes les années, une corrélation entre le nombre de personnes raccordées et le volume rejeté a donc été réalisée afin d'estimer le volume total rejeté par les STEP de la zone d'étude (Illustration 146).

						VOLUMES ANNUELS REJETES (EN M^3)										
STATION	**COMMUNES RACCORDEES**	**CODE SANDRE**	**CAPACITE (EH)**	**POPULATION RACORDEE (EH)**	**EXUTOIRE**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**
Les Aspres	Les Aspres	036142201000	700	330	Iton	22630	29930	28105	29930	33945	32120	33108	23550	36315	47140	46302
Crulai	Crulai	036114001000	500	234	Iton	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Ouen-sur-Iton	Saint-Ouen-sur-Iton	036144001000	500	345	Iton	37203	29930	28105	29930	33945	32120	33108	23550	36315	47140	46302
Saint-Michel-Thubeuf	Saint-Michel-Thubeuf	036143201000	500	117	Iton	-	-	-	-	-	-	10297	-	20173	-	22926
Chandai	Chandai	036109201000	700	325	Iton	-	-	-	17885	19710	22630	25185	24090	27847	31250	46657
Bourth	Bourth	032710801000	1 300	865	Iton	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35206	-
Francheville-Bourg	Francheville-Bourg	032726501000	800	759	Iton	-	-	-	-	-	-	-	90	36208	28501	54353
Francheville-Pont-Thibout	Francheville-Pont-Thibout	032726502000	500	338	Iton	-	-	-	-	-	-	-	32	24856	-	34078
La Guéroulde	La Guéroulde	032730501000	75	40	Infiltration	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Condé-sur-Iton	Condé-sur-Iton	032716601000	500	707	Iton	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Breteuil-sur-Iton	Breteuil-sur-Iton	032711201000	4 000	3 168	Iton	-	-	-	-	-	-	-	98940	120221	106232	130403
Damville	Damville	032719801000	3 000	1 987	Iton	-	-	-	-	-	-	-	70390	88589	96534	83568
Conches-en-Ouche	Conches-en-Ouche, Louversey	032716502000	6 000	5 222	Rouloir	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56413
La Bonneville-sur-Iton	La Bonneville-sur-Iton, Aulnay-sur-Iton	032708201000	3 000	2 582	Iton	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39105
Caugé	Caugé	032713201000	100	93	Infiltration	-	-	-	-	-	-	-	3370	-	3650	-
Gravigny	Angerville-la-Campagne, Arnières-sur-Iton, Aviron, Avrilly, Les Baux-Sainte-Croix, Evreux, Fauville, Gravigny, Guichainville, Huest, Les Plessis Grohan, Saint-Sébatien-de-Morsent, Normanville Les Ventes	032729902000	123 000	76 839	Iton	-	-	-	-	-	-	-	375978	2785210	3624280	2651650
Emanville	Emanville	03272101000	500	425	Fossé pluvial	-	-	-	-	-	-	-	-	22781	-	-
La Boulay-Morin	La Boulay-Morin	032709901000	500	471	Infiltration	-	-	-	-	-	-	-	14423	-	14600	-
Saint-Aubin d'Escroville	Saint-Aubin d'Escroville	032751101000	850	510	Infiltration	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Le Neubourg	Crosville-la-Vieille, Le Neubourg Vitot	032742801000	11 000	9 384	Infiltration	-	-	-	-	-	-	190859	-	346750	318491	267444
Daubeuf la Campagne	Daubeuf la Campagne	032720101000	12	12	Infiltration	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 15 : Stations d'épuration de la zone d'étude, capacités associées et volumes rejetés

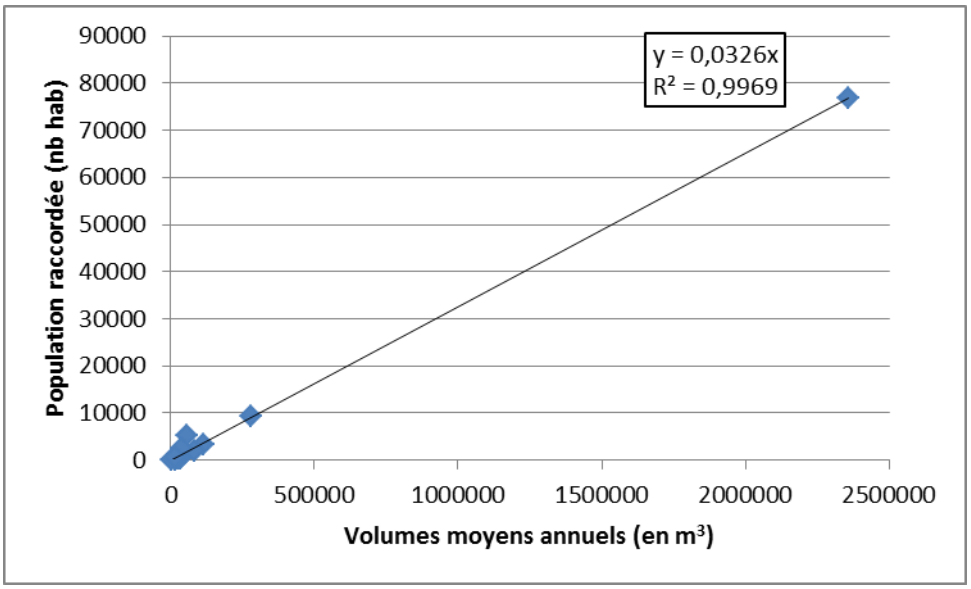


Illustration 146 : Corrélation entre la population raccordée et les volumes annuels moyens rejetés (m^3)

A partir de cette corrélation, les volumes annuels ont pu être estimés afin de compléter les données manquantes. Ainsi le volume rejeté par les STEP de la zone d'étude est estimé à 4 566 692 m^3 pour l'année 2013. Ce volume correspond au traitement des effluents de 68% de la population.

Le coefficient de restitution, rapport entre les volumes restitués au milieu et les volumes prélevés, vise à calculer la part des prélèvements nets.

$$\text{Coefficient de restitution} = \frac{\text{Volume rejeté par les STEP}}{\text{Volume des prélèvements AEP}}$$

En calculant le rapport du volume prélevé pour l'alimentation en eau potable par 68% de la population et le volume rejeté par les STEP, on obtient un coefficient de restitution de 60% (cf. détail du calcul dans le Tableau 16). Cette valeur est proche du coefficient de restitution de 65 % généralement admis pour les usages AEP (David, 2012).

A	Somme estimée des volumes rejetés par les STEP de la zone d'étude en 2013 (m^3)	4 566 692
B	Somme des prélèvements AEP réalisés en 2013 sur l'ensemble de la zone d'étude (m^3)	11 133 094
C	Somme estimée des prélèvements AEP réalisés an 2013 par 68% de la population de la zone d'étude (m^3) (= B x 68%)	7 570 504
D	Coefficient de restitution (= A / C)	60 %

Tableau 16 : Volumes des prélèvements AEP et rejet de STEP pour l'année 2013

Ce calcul du coefficient de restitution proche de 60% sera utilisé lors du calcul des bilans quantitatifs du bassin (cf. § 11).

11. Bilans des flux dans le bassin de l'Iton

Les données collectées permettent d'établir des bilans préliminaires des flux d'eau dans la zone d'étude. Ces bilans se basent sur les flux d'eau calculés, de façon indépendante dans les chapitres précédents et récapitulés ci-après.

Les bilans sont réalisés pour deux cycles hydrologiques (hautes eaux et basses eaux) qui sont déterminés dans le paragraphe 11.1.

Les termes d'entrée des bilans sont déterminés dans le §11.2 et le terme de sortie dans le §11.3.

Les bilans sont ensuite réalisés dans le § 11.4 sur 2 secteurs déterminés à partir de la position des 2 stations hydrométriques de Bourth et Normanville (Illustration 147). Le secteur A correspond au bassin versant hydrogéologique de la station de Bourth et représente la partie amont de la zone d'étude. Le secteur B correspond au bassin versant hydrogéologique de la station de Normanville amputé du secteur A.

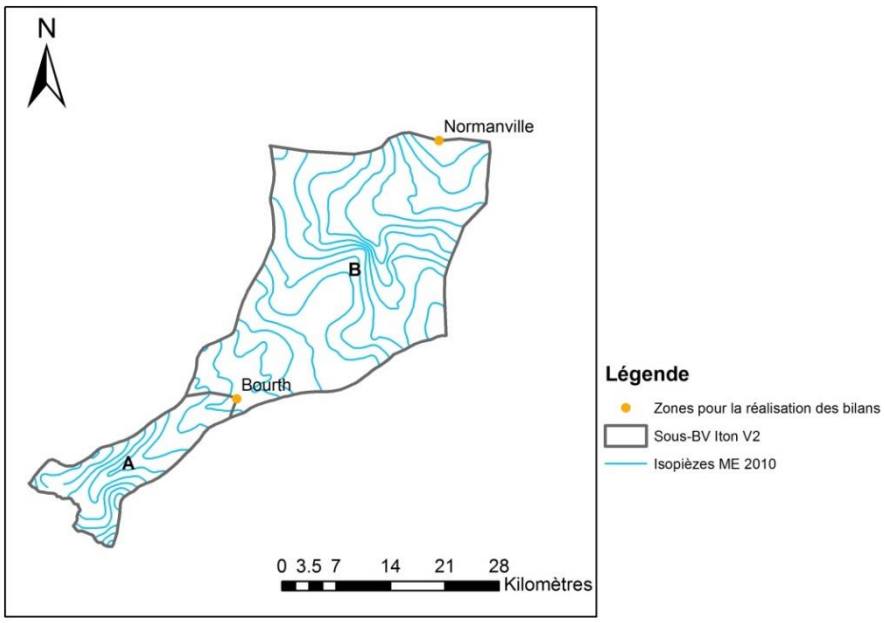


Illustration 147 : Définition des 2 secteurs sur lesquels seront effectués les bilans

11.1. DETERMINATION DES ANNEES DE REFERENCE POUR L'ETABLISSEMENT DES BILANS QUANTITATIFS

Afin de réaliser des bilans quantitatifs sur des années caractéristiques, la méthode utilisée a consisté à classer les années selon que l'hiver et l'été ont été humides ou secs.

On différencie les pluies efficaces d'hiver, qui rechargent les nappes et donnent lieu aux crues dans les rivières, des pluies d'été (juin, juillet et août) qui ne participent pas à la recharge des nappes mais constituent la part principale des eaux consommées par les végétaux.

On arrive ainsi à classer les années selon que l'hiver a été humide ou sec (supérieur ou non à la moyenne) et que l'été a été humide ou sec (supérieur ou non à la moyenne). Les Illustration 148 et Illustration 149 montrent les résultats de ce classement pour les deux zones du secteur d'étude (A amont et B aval).

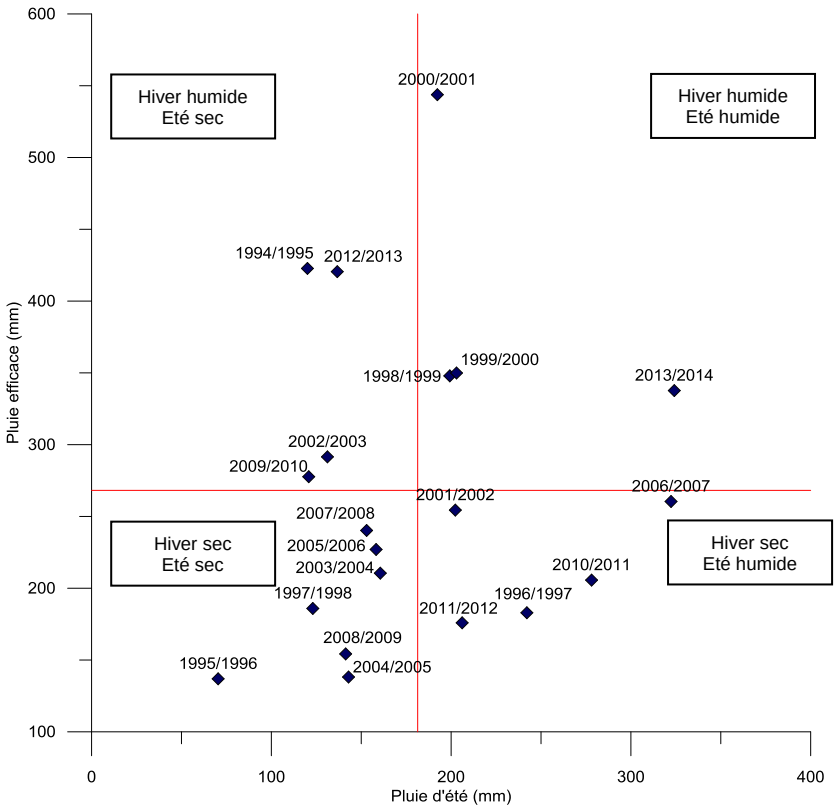


Illustration 148 : Corrélation entre les pluies efficaces et les pluies d'été (juin, juillet, août) pour la zone A amont (Bourth)

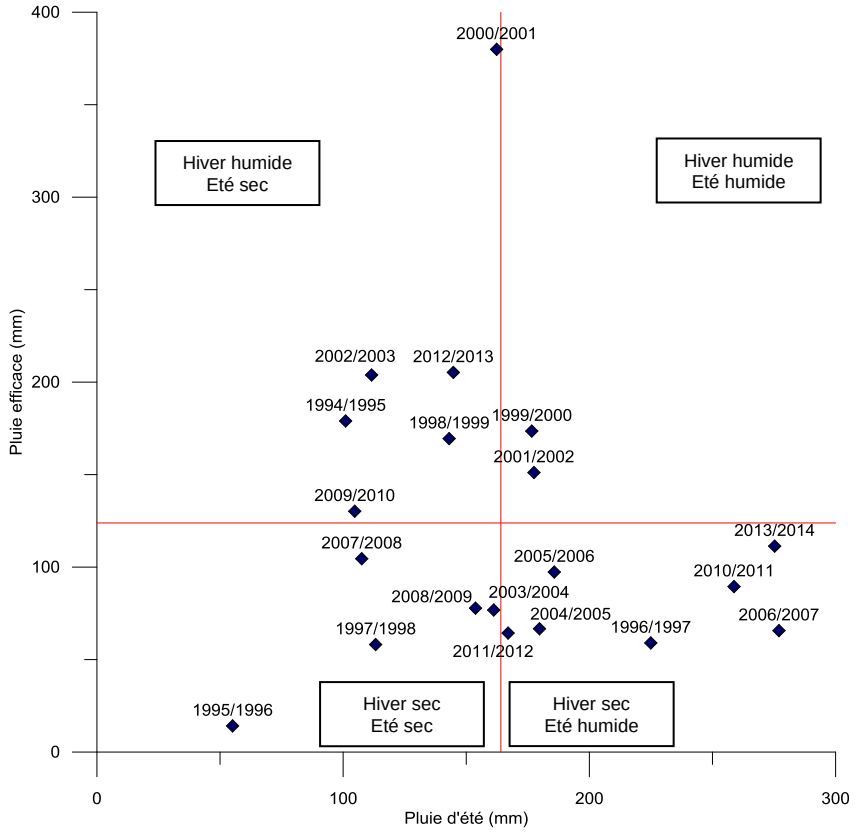


Illustration 149 : Corrélation entre les pluies efficaces et les pluies d'été (juin, juillet, août) pour la zone B aval (Normanville)

Le résultat de ce classement est présenté dans le tableau ci-dessous :

	Cycle humide (hiver + été)	Cycle sec (hiver + été)
Zone A (Amont) [21]	**2013/2014** ou 1999/2000 ou 2000/2001	**1995/1996** ou 1997/1998
Zone B (Aval) [21]	**2000/2001** ou 1999/2000 ou 2001/2002	**1995/1996** ou 1997/1998 ou 2008/2009

Cependant, étant donné le caractère pluriannuel des fluctuations de l'aquifère de la craie, cette analyse n'est pas suffisante pour faire le choix des années de référence sur lesquelles seront établis les bilans.

Nous avons cherché à retenir une situation sèche à la fois concernant la pluviométrie et le niveau des nappes. Ainsi afin de prendre en compte l'inertie de l'aquifère, a été recherchée une année sèche qui intervenait après plusieurs autres années sèches (le même raisonnement a été appliqué pour les années humides) afin que la nappe soit en équilibre et représentative de cet état (cf. le rôle que peut jouer la nappe dans le soutien des débits des cours d'eau à l'étiage).

[21] Les zones A et B sont définies dans le § 11

Les Illustration 150 et Illustration 151 montrent que :

- **le cycle hydrologique 2000/2001** est le cycle le plus représentatif d'une **situation humide** : enchaînement de trois cycles hydrologiques dont les pluies efficaces sont supérieures à la moyenne. Les pluies de l'été 2001 sont proches voir supérieures aux moyennes selon les secteurs ;

- **le cycle hydrologique 2011/2012** est un cycle acceptable pour représenter une **situation sèche** : succession de 2 cycles présentant des pluies efficaces faibles.

Remarque : concernant le choix de l'année sèche : il aurait été préférable de retenir l'année 1997/1998 ; cependant peu de données de prélèvements antérieures à 2000 ont pu être collectées. La réalisation de bilans antérieurs à l'année 2000 semble donc plus délicate.

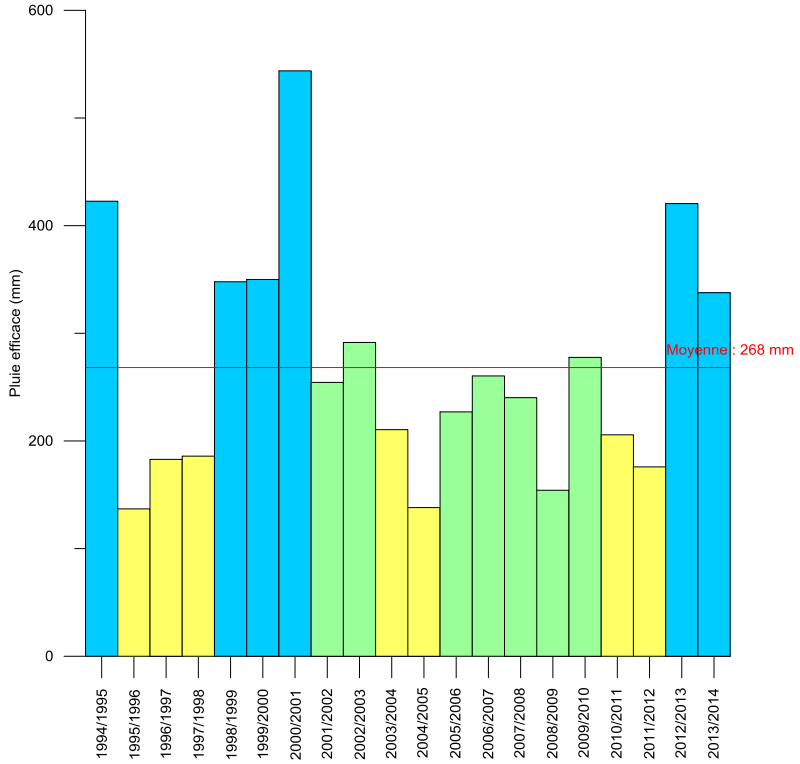


Illustration 150 : Pluies efficaces moyennes de la zone A Amont (Bourth) (en jaune les pluies efficaces faibles, en vert les pluies efficaces proches de la moyenne et en bleu les pluies efficaces très supérieures à la moyenne)

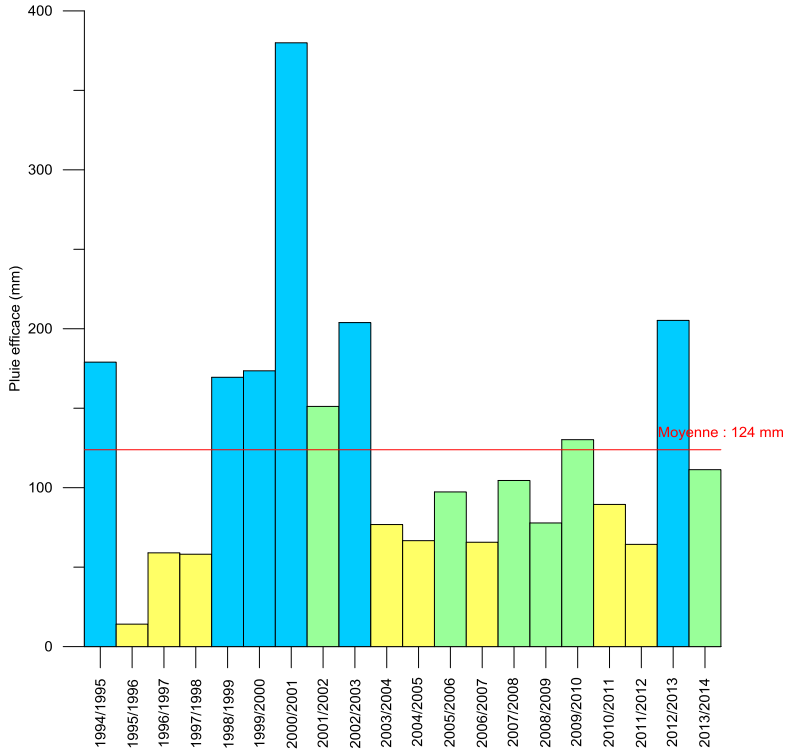


Illustration 151 : Pluies efficaces moyennes de la zone B Aval (Normanville) (en jaune les pluies efficaces faibles, en vert les pluies efficaces proches de la moyenne et en bleu les pluies efficaces très supérieures à la moyenne)

11.2. ENTREES DU SYSTEME

Les entrées du système sont la part de la pluie qui ruisselle et s'infiltre (la pluie efficace) ainsi que tout apport extérieur d'eaux superficielles ou souterraines.

La pluie efficace a été calculée au §1.3 pour chaque zone de météo et réserve utile homogènes. Les pluies efficaces ont ensuite été agrégées à l'échelle de chacun des 2 secteurs A et B et sont disponibles au pas de temps mensuel (Annexe 6). Un tableau récapitulatif au pas de temps annuel est présenté par l'Illustration 152 pour les trois cycles hydrologiques qui vont être étudiés :

		Cycle hydrologique		
		2000/2001	2011/2012	**MOYENNE de 1994 à 2014**
Secteur A 175 km^2	(en Mm3 /an)	95.45	30.87	**46.86**
	(en mm /an)	543.79	175.89	**267.86**
Secteur B 828 km^2	(en Mm3 /an)	314.60	53.29	**102.86**
	(en mm /an)	379.96	64.36	**124.23**
Zone étude 1003 km^2	(en Mm3 /an)	410.05	84.16	**149.72**
	(en mm /an)	408.61	83.87	**149.35**

Illustration 152 : Pluie efficace annuelle par secteur

Les apports extérieurs en eaux souterraines : pour le bilan réalisé à l'échelle du bassin, les contours extérieurs des secteurs (secteur A + secteur B) s'appuyant sur des crêtes piézométriques, il n'y a donc pas d'apport extérieur d'eau souterraine à considérer (*hypothèse d'une absence de connexion karstique interbassin, cette hypothèse sera discutée dans les résultats*).

11.3. SORTIES DU SYSTEME

Les prélèvements

Les prélèvements calculés ou estimés pour chaque usage au § 10 ont été pris en compte pour les bilans. La géolocalisation de chaque prélèvement a permis de les attribuer à chacun des 2 secteurs considérés.

Pour les besoins du bilan ce sont les prélèvements nets qui doivent être pris en compte (prélèvements – rejets). Les taux de restitution rencontrés dans la bibliographie sont les suivants :

	Domestique/ AEP	Agricole (irrigation/Elevage)	Industrie	Non renseigné	Collectivité
Diren Bretagne	65%	20%	87%	40%	35%
Rapport atlas hydrogéologique de l'Eure 2004	65%	30%	93%		
IFEN (2004)	75%	0%	90%		

Pour l'établissement de notre bilan, nous retenons :

- Un taux de restitution de 65% pour les prélèvements AEP du bassin (chiffre validé au § 10.6),
- Un taux de restitution de 10% pour les prélèvements liés à l'irrigation,
- Un taux de restitution de 90% pour les prélèvements liés à l'industrie.

Les flux d'eaux de surface

Les secteurs sur lesquels sont réalisés les bilans s'appuyant à l'aval sur une station hydrométrique, les flux d'eaux de surface sortant seront ceux mesurés à chaque station.

Les flux souterrains matriciels sous la section de jaugeage

Pour l'estimation des flux d'eau souterraine, un calcul est réalisé à partir des cartes piézométriques et des données de transmissivité existantes à proximité de chaque station de jaugeage.

Q écoulement souterrain = T x i x L

Avec T = Transmissivité ; i = gradient hydraulique de la nappe et L = largeur du front d'écoulement estimée à partir des isopièzes

Les volumes calculés sont présentés dans le tableau suivant :

	Delta h (m)	Delta X (m)	i	L (m)	T (m²/s)	Q (m3/s)	Volume annuel (m3)
Bourth	10	6300	0.0015873	200	0.023	0.00730159	230 263
Normanville	10	5100	0.0019608	900	0.023	0.04058856	1 280 001

Les autres flux souterrains (dont karstiques)

Le secteur d'étude présente un nombre important de bétoires et de sources témoignant d'un fort développement karstique (Annexe 7). Des traçages ont par ailleurs montré des connexions avec des bassins versants voisins (cf. § 2.2). Par ailleurs, certaines limites du bassin versant souterrains de l'Iton semblent s'effacer dans certaines conditions (cas de la crête piézométrique séparant l'Avre de l'Iton dans le secteur de Breteuil (cf. §2.2) et une partie des écoulements souterrains de ce secteur se dirigent alors vers le bassin de l'Avre.

Ces flux sortants non mesurables ont été estimés par modélisation dans le § 9.

Les sorties en eau de surface

Les débits apportés à l'Avre par le bras forcé de l'Iton seront considérés comme des sorties du système. Une chronique de débits a été reconstituée au § 7.3.4.

11.4. BILANS

11.4.1. Année humide (cycle 2000/2001)

Le bilan réalisé en année humide est présenté ci-dessous :

	2000/2001				
	Secteur	Origine donnée	Amont (A)	Aval (B)	Zone d'étude
	Superficie (km²)		175	828	1003
Entrées	Pluie efficace	a	95 451 489	314 598 481	410 049 970
	Flux souterrains (estimés)	b	-	230 263	-
	Flux eau surface (secteur amont)	c	-	89 614 512	-
	TOTAUX		**95 451 489**	**404 443 256**	410 049 970
Sorties	Prélèvements bruts	d	1 259 559	13 826 393	15 085 952
	Rejets estimés	e	818 713	9 166 429	9 985 142
	Prélèvements nets	(=d-e)	440 846	4 659 964	5 100 810
	Flux eau surface (stations jaugeage)	c	89 614 512	214 378 272	214 378 272
	Flux eau surface (bras forcé)	f	-	12 494 181	12 494 181
	Flux souterrains matriciels sous la station de jaugeage (estimés)	b	230 263	1 280 001	1 280 001
	Flux souterrains autres (dont fuites karstiques) (estimés)	g		101 340 036	101 340 036
	TOTAUX		**90 285 621**	**334 152 454**	**334 593 300**
BILAN			5 165 868 5%	70290802 17%	75456670 18%

a : calcl réalisé au § 3
b : calcul réalisé au § 11.3
c : mesure DREAL
d : calcul réalisé au § 10
e : calcul réalisé au § 10.6
f : calcul réalisé au § 7.3.4
g : résultats du modèle gardenia, § 9.2

Illustration 153 : Bilan des flux en m^3/an dans les différents secteurs de la zone d'étude en année moyenne (cycle hydrologique 2000/2001)

En année humide, le bilan est excédentaire à l'échelle de la zone d'étude. Les entrées du système sont supérieures aux sorties de 18%. Les zones amont et aval sont excédentaires respectivement de 5% et 17%.

Sur l'ensemble de la zone d'étude, en période de hautes eaux, les prélèvements ne représentent qu'une faible part des sorties du système. Les prélèvements bruts et nets correspondent par ailleurs respectivement à 3.7% et 1.2% de la pluie efficace (Illustration 154).

Secteur	Amont (A)	Aval (B)	Zone d'étude
Part des prélèvements bruts dans les sorties du système	1.3%	4.4%	3.7%
Part des prélèvements nets dans les sorties du système	0.5%	1.5%	1.2%

Illustration 154 : Part des prélèvements dans les sorties du système pour le cycle 2000-2001

Le piézomètre de Coulonges présente une nette augmentation de ses niveaux sur la période octobre 2000 – septembre 2001 (Illustration 155) indiquant un stockage d'eau dans l'aquifère au cours de ce cycle hydrologique. Ces observations sont en accord avec le bilan excédentaire observé à l'échelle de la zone d'étude.

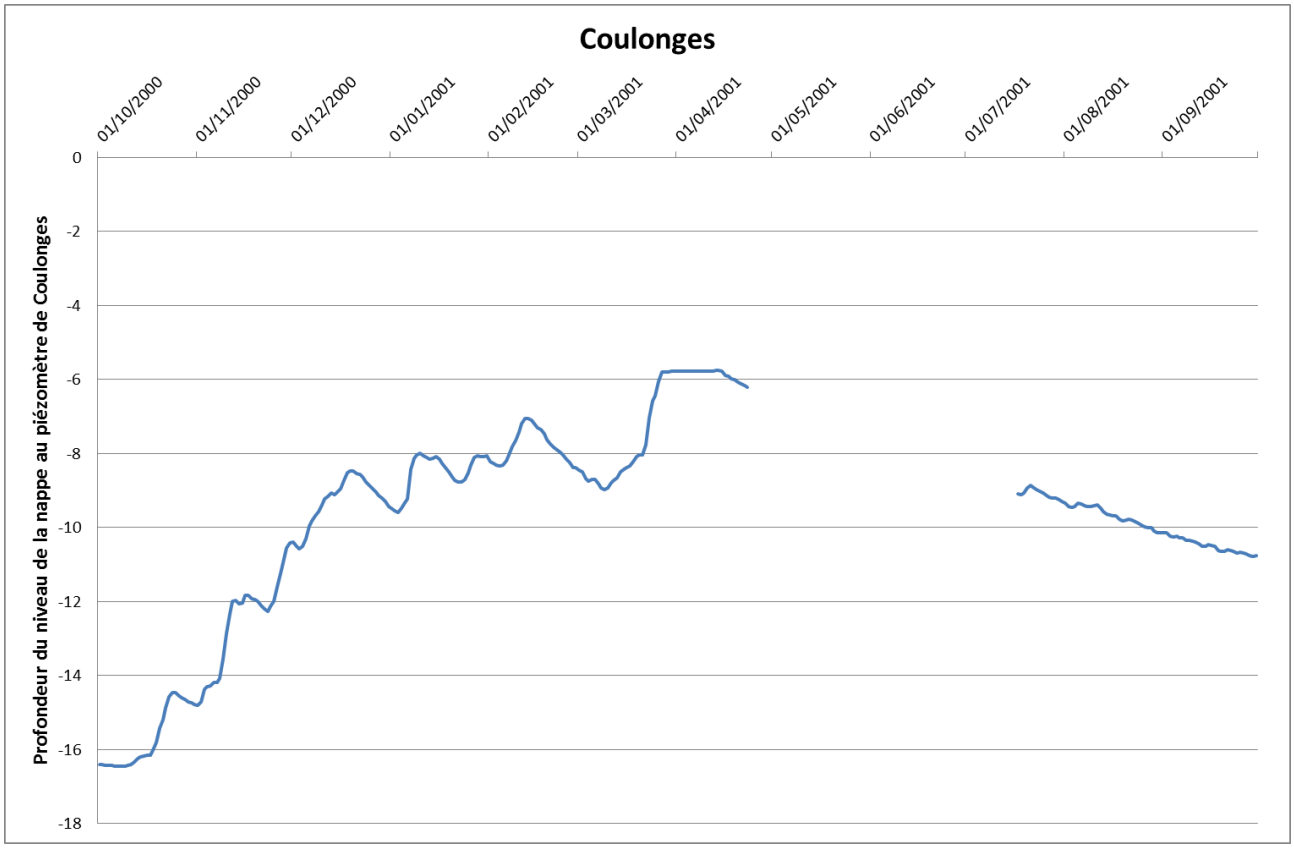


Illustration 155 : Variations du piézomètre de Coulonges

11.4.2. Année sèche (cycle 2011/2012)

Le bilan réalisé en année sèche est présenté ci-dessous :

	2011/2012				
	Secteur	Origine donnée	Amont (A)	Aval (B)	Zone d'étude
	Superficie (km²)		175	828	1003
Entrées	Pluie efficace	a	30 873 971	53 288 419	84 162 390
	Flux souterrains (estimés)	b	-	230 263	-
	Flux eau surface (secteur amont)	c	-	28 670 285	-
	TOTAUX		**30 873 971**	**82 188 967**	**84 162 390**
Sorties	Prélèvements bruts	d	731 333	10 316 086	11 047 419
	Rejets estimés	e	471 284	6 689 027	7 160 311
	Prélèvements nets	(=d-e)	260 049	3 627 059	3 887 108
	Flux eau surface (stations jaugeage)	c	28 670 285	62 456 832	62 456 832
	Flux eau surface (bras forcé)	f	-	6 104 343	6 104 343
	Flux souterrains matriciels sous la station de jaugeage (estimés)	b	230 263	1 280 001	1 280 001
	Flux souterrains autres (dont fuites karstiques) (estimés)	g		42072941	42072941
	TOTAUX		**29 160 597**	**115 541 176**	**115 801 225**
BILAN			1 713 374 6%	-33352209 -41%	-31638835 -38%

a : calcul réalisé au § 3
b : calcul réalisé au § 11.3
c : mesure DREAL
d : calcul réalisé au § 10
e : calcul réalisé au § 10.6
f : calcul réalisé au § 7.3.4
g : résultats du modèle gardenia, § 9.2

Illustration 156 : Bilan des flux dans les différents secteurs de la zone d'étude en année moyenne (cycle hydrologique 2011/2012)

En année sèche, le bilan est déficitaire à l'échelle de la zone d'étude. Les sorties du système sont supérieures aux entrées de 38%. Le secteur amont est excédentaire de 6% tandis que le secteur aval présente un bilan négatif de 41% par rapport aux entrées.

Le piézomètre de Nogent-le-Sec présente une baisse de ses niveaux sur la période octobre 2011 – septembre 2012 (Illustration 157), indiquant un déstockage de l'aquifère sur cette période. Ces observations sont en accord avec le bilan déficitaire observé à l'échelle de la zone d'étude.

La pression des prélèvements est plus forte en période de basses eaux. Les prélèvements bruts et nets représentent respectivement 13.1% et 4.6% de la pluie efficace à l'échelle du

bassin versant (Illustration 158). Ils atteignent respectivement 19.4% et 6.8% de la pluie efficace dans la zone aval (secteur B).

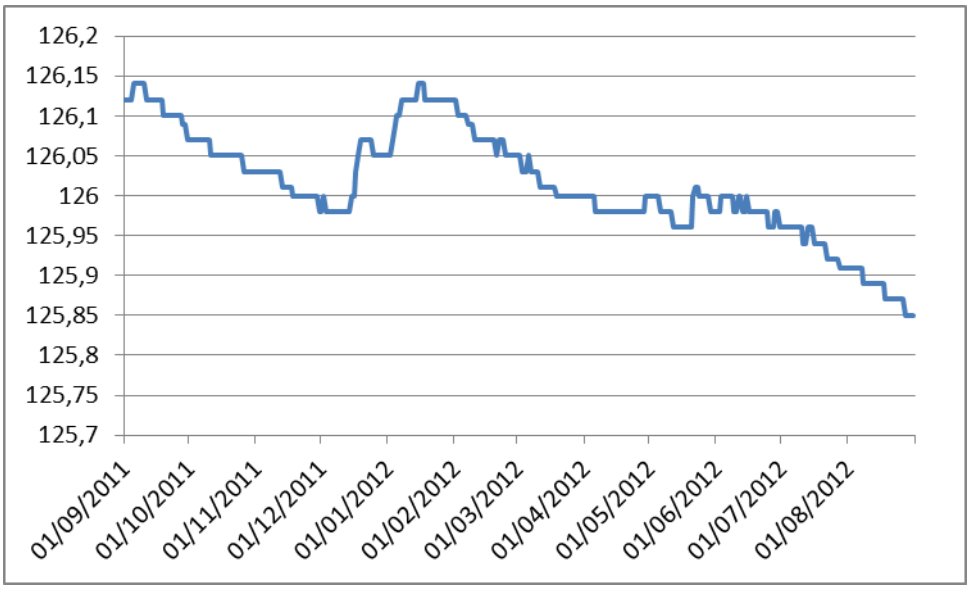
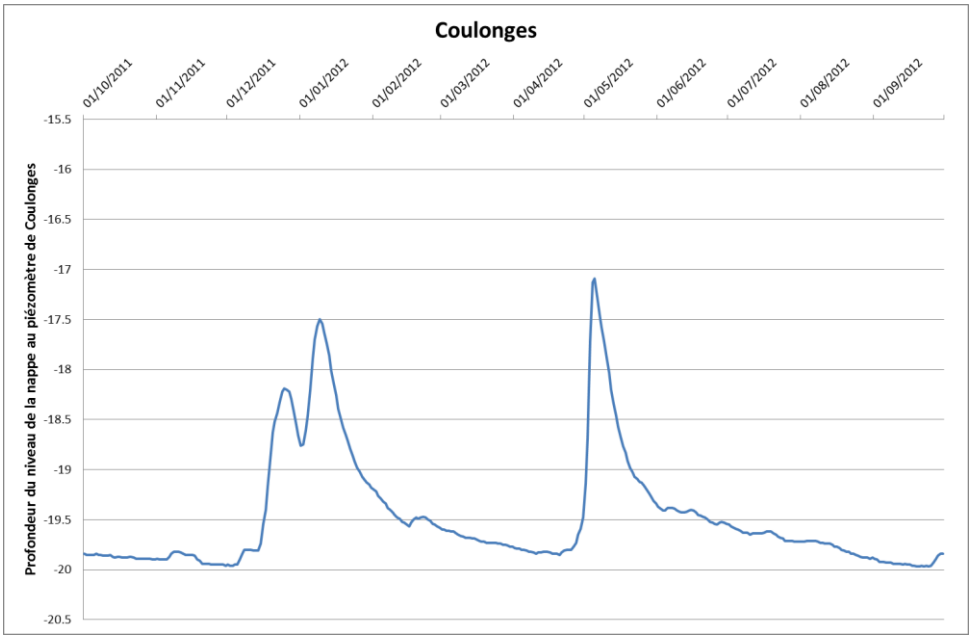


Illustration 157 : Variations du piézomètre 01794X0035 (Nogent-le-Sec)



Secteur	Amont (A)	Aval (B)	Zone d'étude
Part des prélèvements bruts dans les sorties du système	2,4%	19.4%	13.1%
Part des prélèvements nets dans les sorties du système	0.8%	6.8%	4.6%

Illustration 158 : Part des prélèvements dans les sorties du système pour le cycle 2011-2012

12. Fonctionnement du bassin de l'Iton lors des évènements extrêmes : cas des étiages

12.1. VULNERABILITE DE LA RIVIERE AUX ETIAGES

12.1.1. Analyse des dépassements des seuils sécheresse

Seuils, limitation des prélèvements et restrictions des usages

Dans le cadre des observatoires sécheresse, des seuils de vigilance, d'alerte, de crise et de crise renforcée ont été définis pour 2 stations de mesures des débits de l'Iton. L'arrêté n°2012 094-0001 du 3 avril 2012 définit les mesures communes de gestion de l'eau du bassin hydrographique de Seine-Normandie pour limiter les effets de la sécheresse. Il comprend, entre autres, la définition des seuils et la définition de mesures de restriction des usages de l'eau.

Les seuils de vigilance, alerte, crise et crise renforcée sont définis par rapport au VCN3 (débit moyen minimum sur 3 jours consécutifs) de périodes de retour respectivement de 2, 5, 10 et 20 ans. L'Illustration 159 présente ces valeurs de seuils pour chaque station.

Station de mesure	Seuil de vigilance (m^3/s)	Seuil d'alerte (m^3/s)	Seuil de crise (m^3/s)	Seuil de crie renforcée (m^3/s)
Bourth	**0.58**	**0.38**	**0.28**	**0.23**
Normanville	**2.5**	**2**	**1.7**	**1.5**

Illustration 159 : Valeurs des seuils de débit de l'Iton à Bourth et Normanville (Article 7 de l'arrêté n° 2012 094-0001)

Le franchissement des seuils est constaté par arrêté préfectoral et des mesures de sensibilisation, de surveillance et de restriction des usages sont prises de manière progressive à chaque franchissement de seuil. Elles concernent tous les utilisateurs (particuliers, entreprises, irrigants, collectivités, services publics). Les prélèvements pour l'alimentation en eau potable sont prioritaires.

- **seuil de vigilance** : les campagnes de sensibilisation et d'appel au comportement citoyen sont lancées afin de réduire les utilisations de l'eau qui ne sont pas indispensables. Afin de réduire les risques de pollution, un rappel à la vigilance est fait auprès des principaux sites produisant des rejets polluants. Une surveillance accrue des rejets les plus significatifs est mise en place ;
- **seuil d'alerte** : des efforts coordonnés de restriction et d'interdiction des usages non productifs, correspondant à une réduction d'au moins 30% des prélèvements en eau de surface et dans les eaux souterraines de la zone, hors AEP, doivent être mis en place ;
- **seuil d'alerte renforcée** : les restrictions sont renforcées, correspondant à une réduction d'au moins 50% des prélèvements en eau de surface et dans les eaux souterraines de la zone, hors AEP ;
- **seuil de crise** : seule l'alimentation en eau potable et le respect de la vie biologique sont assurés. Tous les prélèvements en eau de surface, en eaux souterraines, et les

prélèvements pour l'alimentation en eau potable sont restreints au minimum. (Article 8 de l'arrêté n° 2012 094-0001).

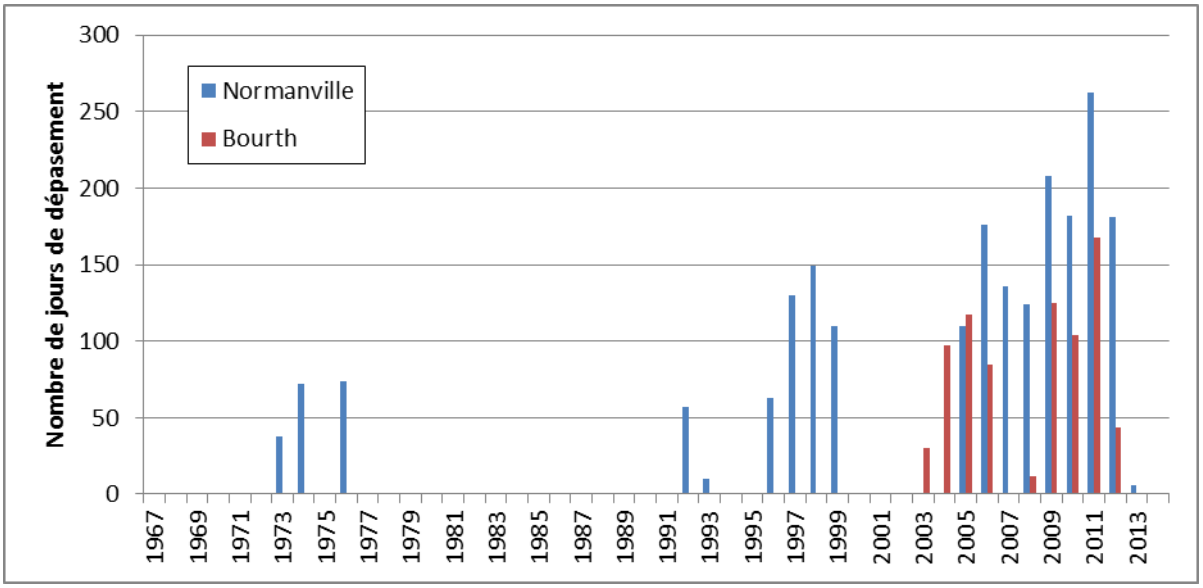
Analyse des dépassements de seuil

Le nombre de jour de dépassement des seuils actuels d'alerte et de crise, ont été comptabilisés pour chaque année pour les stations de Bourth et Normanville ; ils sont présentés à l'Illustration 160.

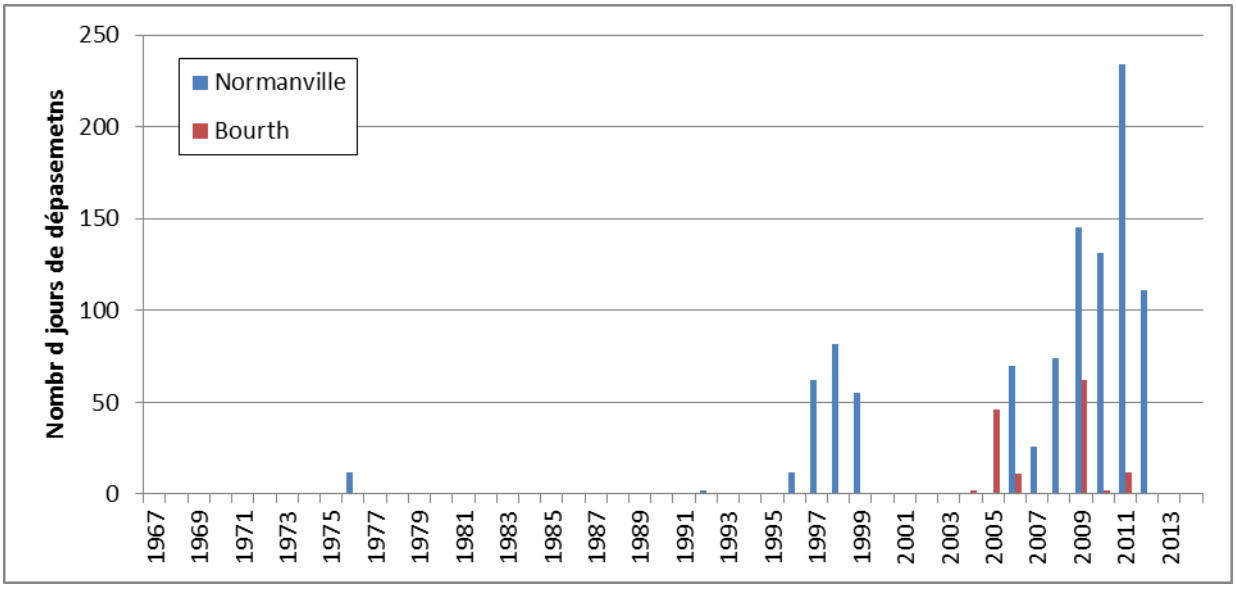
La station de jaugeage de Normanville a été installée en 1967 tandis que celle de Bourth date de 1999. Les données de débits n'étaient pas disponibles sur l'ensemble de l'année en 1992 et 1996 pour la station de Normanville et 1999 pour celle de Bourth.

L'analyse de ces franchissements de seuil met en évidence plusieurs périodes d'étiages marqués :

- de 1973 à 1976,
- de 1992 à 1999,
- de 2003 à 2013 ce dernier étant de loin le plus long (10 années consécutives de dépassement de seuil de vigilance) et le plus sévère (7 années consécutives de dépassement de seuil de crise à Normanville).



a- dépassements des seuils d'alerte (données disponibles de 1967 à 2014 pour Normanville et de 1999 à 2014 pour Bourth)



b -dépassements des seuils de crise (données disponibles de 1967 à 2014 pour Normanville et de 1999 à 2014 pour Bourth)

Illustration 160 : Nombre de jours par an de dépassement des seuils de débits (seuils actuellement établis par arrêté préfectoral)

Sur les 20 dernières années (1994-2013) seules 7 années n'ont pas connu de dépassement de seuil de vigilance à Normanville (soit 35%). Lors des 20 années précédentes (1974-1993), 16 années n'avaient connu de dépassement (soit 80%). La sensibilité à la sécheresse de ce bassin semble donc très variable dans le temps.

Pour comprendre cette variabilité, le nombre de jours de dépassement des seuils a été comparé à la pluie efficace. En comparant sur un même graphique le nombre de jours de dépassement des seuils de vigilance à la station de Normanville et les volumes annuels de pluie efficace (cf. §3.2) dans le bassin versant hydrogéologique de l'Iton (Illustration 161), on s'aperçoit que les périodes d'étiages sévères correspondent à des périodes de faibles pluies efficaces. La corrélation semble être décalée de 1 à 3 ans ; effet probable du caractère pluriannuel de l'aquifère crayeux (aquifère qui intervient en soutien du débit du cours d'eau) (inertie mise en évidence également par le modèle Gardenia : le temps de demi-tarissement a été estimé à 13 mois en moyenne).

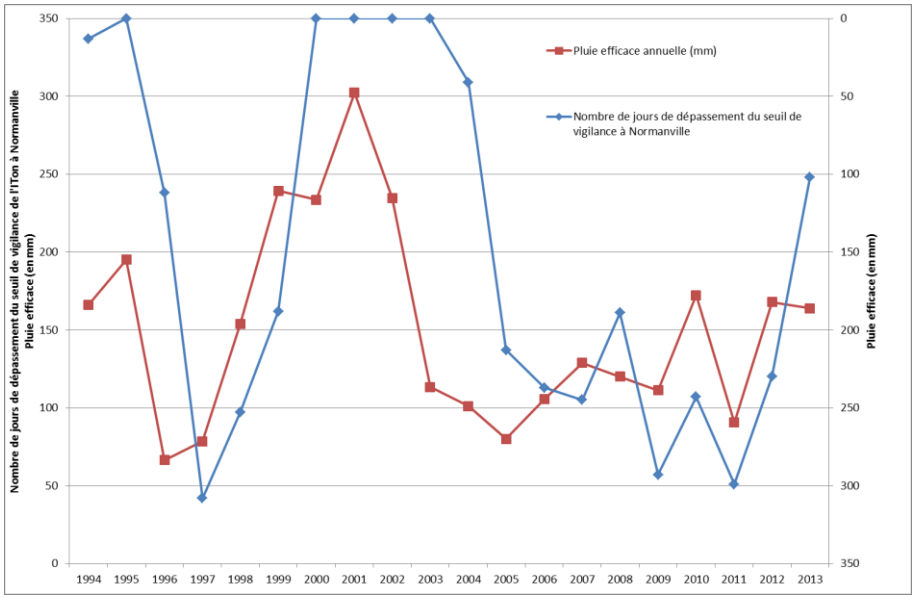


Illustration 161 : Corrélation entre les volumes annuels de pluie efficace dans le bassin versant hydrogéologique de l'Iton et le nombre de jours de dépassement du seuil de vigilance à la station de Normanville

Pour prendre en compte l'amortissement du signal d'entrée (la recharge) par l'aquifère à comportement pluriannuel, nous avons réalisé une moyenne mobile sur 2 ans de la pluie efficace, puis avons réalisé à nouveau ce graphique (Illustration 162). La corrélation semble cette fois relativement synchrone.

Enfin, l'Illustration 163 montre une très bonne corrélation entre les niveaux de nappe sous le plateau du Neubourg au piézomètre de Graveron (01493X0001) et le nombre de jours de dépassement de seuil de vigilance. **Cette corrélation montre ainsi que le débit de l'Iton à Normanville est fortement contrôlé par le soutien apporté par le débit de la nappe lui-même contrôlé par les niveaux de nappe sous les plateaux.**

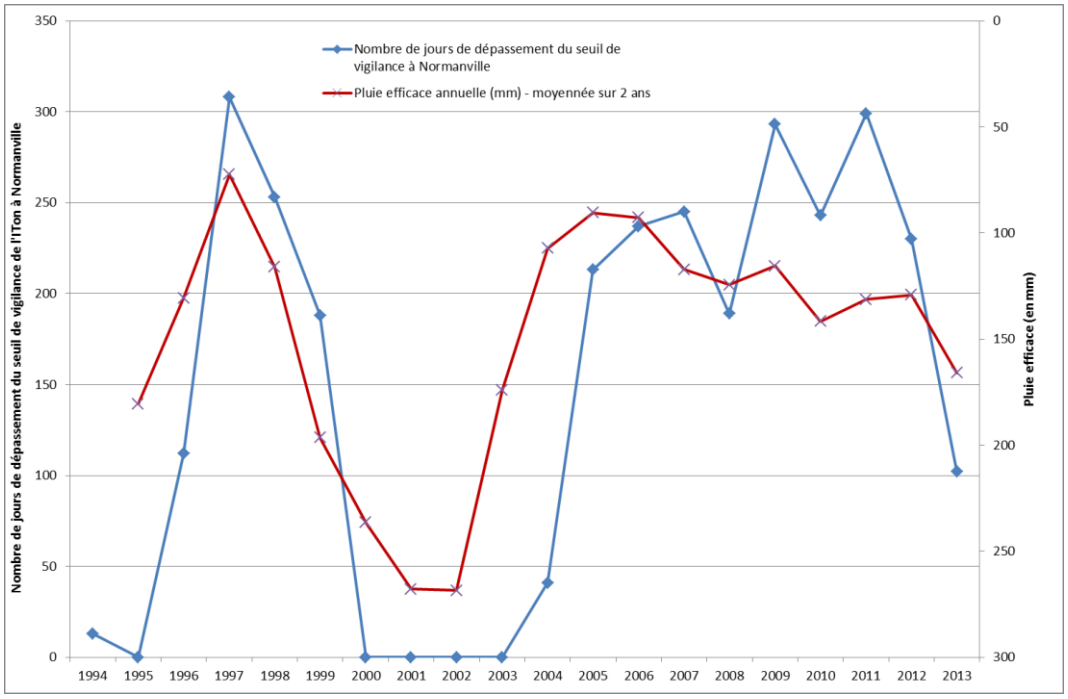


Illustration 162 : Corrélation entre la moyenne mobile sur 2 ans des volumes annuels de pluie efficace dans le bassin versant hydrogéologique de la station de Normanville et le nombre de jours de dépassement du seuil de vigilance à la station de Normanville

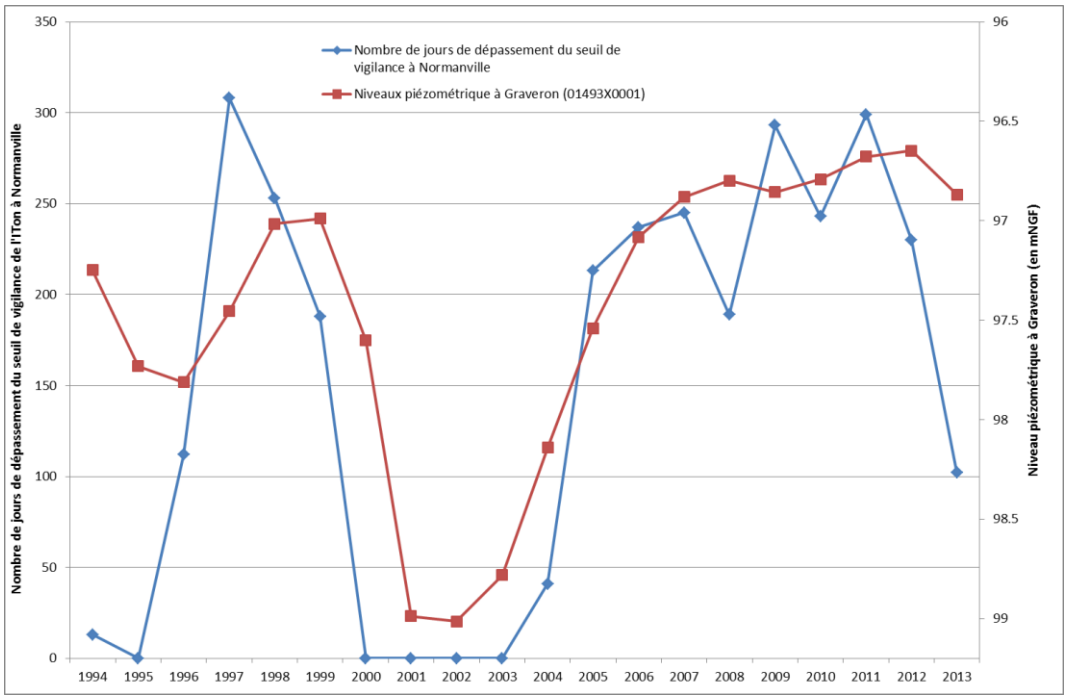


Illustration 163 : Corrélation entre le niveau piézométrique à Graveron (01493X0001) et le nombre de jours de dépassement du seuil de vigilance à la station de Normanville

12.2. RECHERCHE D'INDICATEURS D'ALERTE

Le § 12.1.1 a montré une corrélation entre les épisodes d'étiages marqués et les faibles pluies efficaces. Le paragraphe 8 sur les échanges nappe-rivière, de même que les Illustration 163 et Illustration 164 ci-dessous ont mis en évidence un contrôle fort des débits de l'Iton à Normanville par les niveaux de nappe.

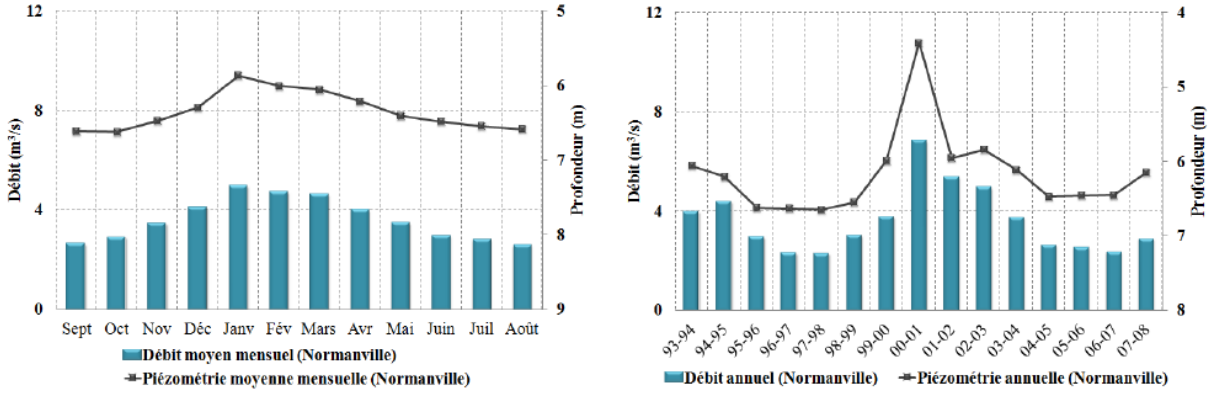


Illustration 164 : Evolution mensuelle et annuelle piézométrie-débit du bassin versant de l'Iton (Kharroubi O., 2013)

Le présent paragraphe a ainsi pour objectif de rechercher des relations entre la pluie, les niveaux piézométriques et les débits de l'Iton dans l'objectif de mettre en place des indicateurs d'alerte.
L'indicateur piézométrique peut se définir de la façon suivante : variable de contrôle de l'état d'une ressource en eau souterraine soumise à des règles de gestion et associée à un piézomètre (ou plusieurs) de suivi de l'évolution de cette ressource. L'indicateur peut être caractérisé par une gamme de valeurs particulières (que l'on peut appeler seuils de gestion), qui peuvent correspondre à :

- un objectif de gestion : par exemple une piézométrie objectif d'étiage (POE),
- un (ou plusieurs) niveaux d'alerte (PSA), destinés à anticiper une situation de crise,
- un seuil de crise (PSC).

Dans le cas d'une nappe en relation avec un cours d'eau dont elle assure le soutien d'étiage, l'objectif de gestion n'est pas tant piézométrique que débitmétrique : il faut en effet définir une cote piézométrique (POE) qui permette de garantir le DOE (Débit Objectif d'Etiage) du cours d'eau, qui constitue donc la contrainte.

12.2.1. Indicateurs piézométriques d'alerte au printemps

Une étude BRGM réalisée à l'échelle de la Haute-Normandie en 2009 (Carn-Dheilly A., 2010) avait recherché plusieurs indicateurs piézométriques dont la recherche de corrélation entre les niveaux piézométriques et les débits à l'étiage permettant de relier un niveau à un seuil caractéristique de débit en rivière, en suivant l'évolution de cette corrélation au cours du temps (de la période de recharge jusqu'à la fin du printemps). Dans ce cas, l'objectif de l'indicateur piézométrique est d'anticiper une situation d'étiage en rivière (soutien).

L'analyse des relations nappe-rivière au cours d'épisodes climatiques secs permet de mettre en évidence des corrélations pour des couples rivière-piézomètres. Les indicateurs piézométriques définis pour ces couples rivière-piézomètres correspondant à des niveaux piézométriques de référence pour différents débits caractéristiques d'étiage (seuil de vigilance, d'alerte, de crise et de crise renforcée). Ces indicateurs, évoluant au cours du temps, permettent ainsi d'anticiper d'éventuelles situations critiques dans les cours d'eau.

Des corrélations (relations entre le débit journalier minimal annuel de la rivière et le niveau moyen mensuel du piézomètre pour la même année) sont recherchées entre :

- les niveaux dans le piézomètre de **Coulonges (01801X0010)** et les débits de la rivière Iton à la station **Bourth**
- les niveaux dans le piézomètre de **l'Aigle (02144X0005)** et les débits de la rivière Iton à la station **Bourth**
- les niveaux dans le **piézomètre Nogent-le-sec (01794X0035)** et les débits de la rivière Iton à la station **Normanville**

Les résultats des corrélations et des seuils piézométriques déduits sont présentés dans le tableau de l'Illustration 165.

Rivière	Station suivie	Piézomètre	Mois de réf	coef R^2	Seuil de vigilance (m^3/s)	cote piézo (m)	Seuil d'alerte (m^3/s)	cote piézo (m)	Seuil de crise (m^3/s)	cote piézo (m)	Seuil de crise renforcée(m^3/s)	cote piézo (m)	QMNA5	cote piézo (m)	VCN3	cote piézo (m)
Iton amont	**Bourth**	**Coulonges**	**mai**	**0.61**	**0.58**	**120.85**	**0.38**	**116.80**	**0.28**	**114.80**	**0.23**	**113.80**	**0.3**	**115.20**	**0.3**	**115.20**
Iton amont	**Bourth**	**Coulonges**	**janvier**	**0.604**	**0.58**	**121.50**	**0.38**	**117.60**	**0.28**	**115.60**	**0.23**	**114.70**	**0.3**	**116.00**	**0.3**	**116.00**
Iton amont	**Bourth**	**Aigle**	**juin**	**0.726**	**0.58**	**214.80**	**0.38**	**208.00**	**0.28**	**204.30**	**0.23**	**202.80**	**0.3**	**205.20**	**0.3**	**205.20**
Iton amont	**Bourth**	**Aigle**	**mai**	**0.669**	**0.58**	**216.00**	**0.38**	**208.80**	**0.28**	**205.30**	**0.23**	**203.55**	**0.3**	**203.00**	**0.3**	**203.00**
Iton amont	**Bourth**	**Aigle**	**avril**	**0.609**	**0.58**	**216.40**	**0.38**	**209.40**	**0.28**	**206.00**	**0.23**	**204.20**	**0.3**	**206.70**	**0.3**	**206.70**
Iton amont	**Bourth**	**Aigle**	**mars**	**0.605**	**0.58**	**215.40**	**0.38**	**209.30**	**0.28**	**206.20**	**0.23**	**204.70**	**0.3**	**206.80**	**0.3**	**206.80**
Iton aval	**Normanville**	**Nogent**	**avril**	**0.77**	**2.5**	**129.80**	**2**	**128.70**	**1.7**	**128.10**	**1.5**	**127.70**	**2**	**128.70**	**1.31**	**127.30**
Iton aval	**Normanville**	**Nogent**	**mai**	**0.761**	**2.5**	**129.75**	**2**	**128.70**	**1.7**	**128.15**	**1.5**	**127.75**	**2**	**128.70**	**1.31**	**127.35**
Iton aval	**Normanville**	**Nogent**	**juin**	**0.744**	**2.5**	**129.60**	**2**	**128.65**	**1.7**	**128.10**	**1.5**	**127.70**	**2**	**128.65**	**1.31**	**127.35**
Iton aval	**Normanville**	**Nogent**	**mars**	**0.737**	**2.5**	**129.60**	**2**	**128.70**	**1.7**	**128.15**	**1.5**	**127.80**	**2**	**128.70**	**1.31**	**127.40**

Illustration 165 - Relations entre le niveau piézométrique moyen mensuel et le débit journalier minimal annuel définis pour des débits caractéristiques et au cours du temps (source : rapport BRGM/RP-59136-FR)

Exemple d'utilisation de ces résultats :

Admettons que l'indicateur d'alerte de printemps ait été fixé au mois d'avril. Pour le cas de la station de Normanville, si le niveau piézométrique moyen d'avril de Nogent-le-sec, est :

- inférieur à 129.8m NGF, alors le seuil de vigilance rivière sera très probablement dépassé au cours de l'étiage qui suit,
- inférieur à 128.7m NGF, alors le seuil d'alerte rivière sera très probablement dépassé au cours de l'étiage qui suit,
- inférieur à 128.1m NGF, alors le seuil de crise rivière sera très probablement dépassé au cours de l'étiage qui suit,
- inférieur à 127.7m NGF, alors le seuil de crise renforcé rivière sera très probablement dépassé au cours de l'étiage qui suit,

La corrélation ayant été établie à un coefficient $R^2 = 0.77$.

Dans le cadre de la présente étude une corrélation complémentaire est recherchée selon la même procédure, mais pour un nouveau couple débitmètre-piézomètre : corrélation entre les niveaux dans le piézomètre de **Coulonges** et les débits de la rivière Iton à la station **Normanville.**

Les résultats de cette nouvelle corrélation sont présentés à l'Illustration 166.

Les corrélations obtenues sont meilleures (exemple R^2=0.82 pour le mois d'avril) que celles obtenues entre le piézomètre de Nogent-le-sec et la station de Normanville (exemple R^2=0.77 pour le mois d'avril).

Rivière	Station suivie	Piézomètre	Mois de réf	coef R^2	Seuil de vigilance (m^3/s)	cote piézo (m)	Seuil d'alerte (m^3/s)	cote piézo (m)	Seuil de crise (m^3/s)	cote piézo (m)	Seuil de crise renforcée(m^3/s)	cote piézo (m)	QMNA5	cote piézo (m)	VCN3	cote piézo (m)
Iton aval	**Normanville**	**Coulonges**	**avril**	**0.82**	**2.5**	**117.10**	**2**	**115.60**	**1.7**	**114.70**	**1.5**	**114.10**	**2**	**115.60**	**1.31**	**113.50**
Iton aval	**Normanville**	**Coulonges**	**mai**	**0.807**	**2.5**	**116.55**	**2**	**115.20**	**1.7**	**114.40**	**1.5**	**114.00**	**2**	**115.20**	**1.31**	**113.40**
Iton aval	**Normanville**	**Coulonges**	**juin**	**0.847**	**2.5**	**116.10**	**2**	**114.90**	**1.7**	**114.20**	**1.5**	**113.70**	**2**	**114.90**	**1.31**	**113.20**

Illustration 166 - Relations entre le niveau piézométrique moyen mensuel de Coulonges et le débit journalier minimal annuel de Normanville définis pour des débits caractéristiques et au cours du temps

12.2.2. Indicateurs piézométriques de garantie de débit minimal

L'indicateur piézométrique idéal serait un piézomètre dont les mesures permettent d'établir une régression avec les mesures de débit à la station hydrométrique de référence. Si des indicateurs de ce type sont effectivement disponibles dans certains contextes géologiques particuliers, la grande majorité des corrélations entre mesures piézométriques et mesures de débit à la station hydrométrique se présentent sous la forme d'un nuage de points plus ou moins étendu. La dispersion des points, constituant cette corrélation, peut néanmoins s'expliquer par différents effets cumulés notamment :

- l'ajout, au débit de base souterrain, du ruissellement superficiel, de rejets divers ou de sous écoulement à la station,
- l'impact d'éventuels prélèvements sur le débit et/ou le niveau piézométrique dans le cas où les données n'ont pas été naturalisées (c'est-à-dire corrigées des influences anthropiques),
- le décalage temporel entre le niveau au piézomètre et le débit à la station, décalage qui peut être variable en fonction de la pente de l'écoulement souterrain et du contexte de la relation d'échange nappe-rivière (vidange ou recharge). Ce décalage peut être toutefois globalement corrigé au moyen de décalage défini par autocorrélation,
- d'autres phénomènes cumulatifs à préciser (taux de colmatage des berges, ….).

Les Illustration 168 à Illustration 170 fournissent la relation entre débit de l'Iton (aux stations de Bourth et Normanville) et le niveau piézométrique observé à différents piézomètres (Moisville, Graveron, Nogent-le-Sec).

Sur ces graphiques, il a été reporté les différents seuils d'alertes actuellement utilisés pour les stations de débits de l'Iton à Bourth et Normanville.

Dans le cadre de la détermination du débit d'étiage, il paraît souhaitable de définir le débit le plus probable c'est-à-dire en éliminant les couples (débit, niveau piézométrique) pouvant être modifiés par le biais d'apport au débit de ruissellement superficiel ou de rejet complémentaire. **La lecture de ces graphiques permet donc de définir les cotes piézométriques aux différents piézomètres garantissant un débit minimal égal au débit des différents seuils (cf. Illustration 167).**

Station	Référence piézométrique	Seuil de vigilance	Seuil d'alerte	Seuil d'alerte renforcée	Seuil de crise
Normanville	**Graveron**	97.85	97.80	97.50	97.45
Normanville	**Nogent-le-sec**	130.00	129.70	129.20	129.10
Normanville	**Moisville**	140.25	139.30	139.20	139.10
Bourth	**Aigle**	210.50	208.20	204.00	203.50

Illustration 167 : Côtes piézométriques garantissant un débit égal ou supérieur au débit des différents seuils de l'Iton à Normanville et Bourth

Si l'on décompose les périodes de recharge et de vidange de la nappe on constate qu'il existe un effet « d'hystérésis » entre les variations de niveaux piézométriques et les variations de débits à la station, effet généré, au moins en partie, par inversion des échanges nappe-rivière.

En ne s'intéressant, pour la prévision d'un débit d'étiage, qu'à la courbe de vidange, la largeur du nuage de point pourrait être réduite fortement.

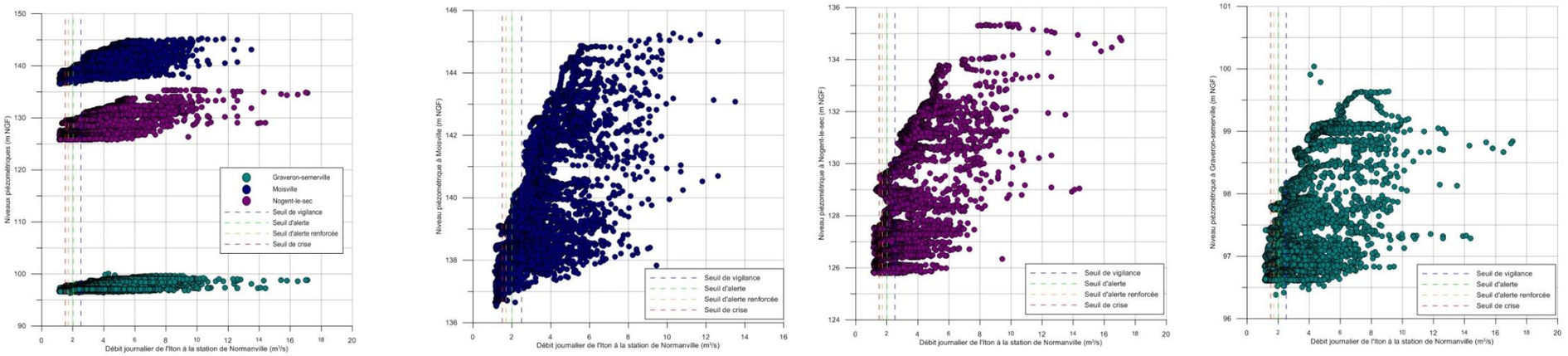


Illustration 168 : Corrélation entre le débit journalier de l'Iton à Normanville et les niveaux piézométriques à Moisville, Nogent-le-sec et Graveron

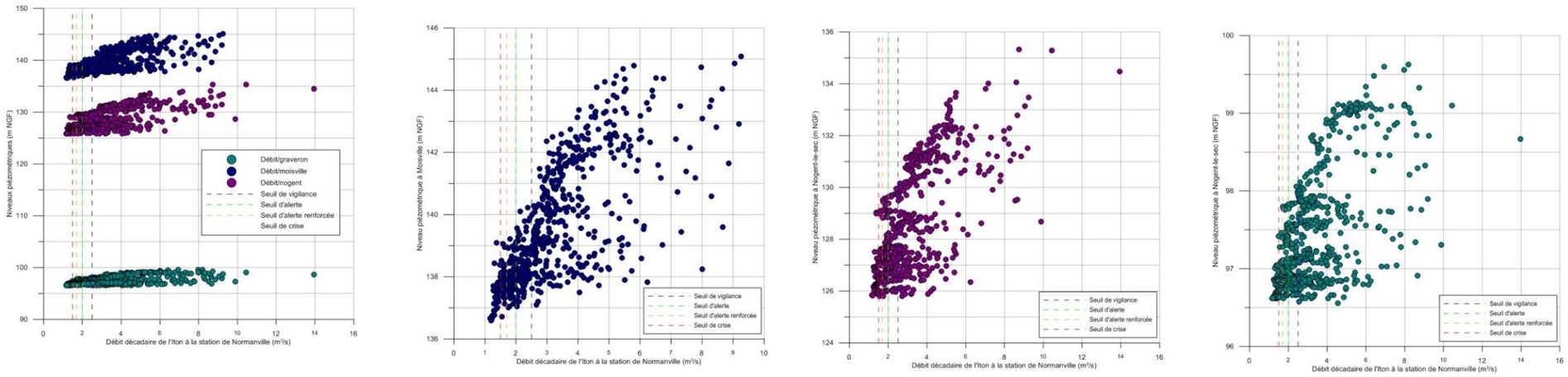


Illustration 169 : Corrélation entre le débit décadaire de l'Iton à Normanville et les niveaux piézométriques à Moisville, Nogent-le-sec et Graveron

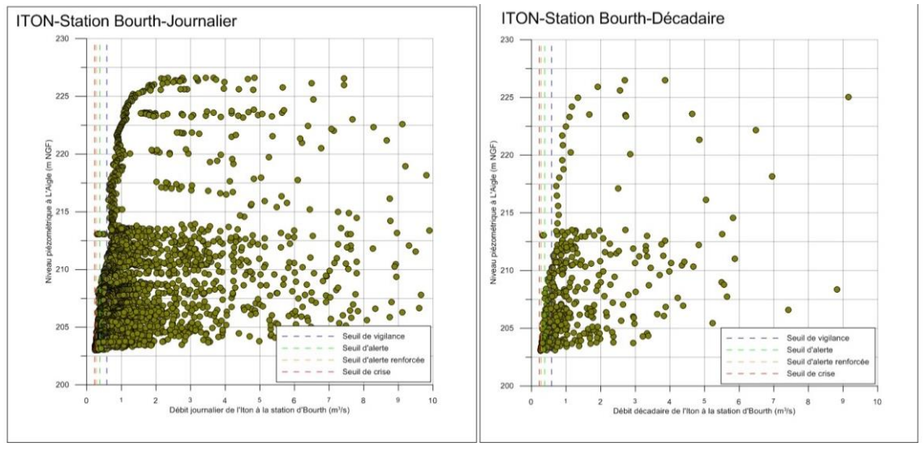


Illustration 170 : Corrélation entre le débit journalier et décadaire de l'Iton à Bourth et les niveaux piézométriques à l'Aigle

12.3. VERS LA MISE EN PLACE DE MODELES DE PREVISION : MODELE TEMPO DE PREVISION DES NIVEAUX DE NAPPES ET DE DEBITS

12.3.1. Présentation de la méthode

Principe de la modélisation

Le logiciel TEMPO, développé par le BRGM, est utilisé depuis plusieurs années dans le domaine de l'hydro(géo)logie (hydrologie et hydrogéologie) pour modéliser et prévoir des niveaux de nappes ou des débits à l'exutoire d'un bassin versant.

TEMPO peut être considéré comme apparenté aux logiciels de traitement du signal (d'une façon générale, on appelle « signal » toute variable évoluant dans le temps). Dans le domaine de l'hydro(géo)logie, TEMPO permet de modéliser le fonctionnement d'un hydrosystème, tel que celui schématisé par l'Illustration 171.

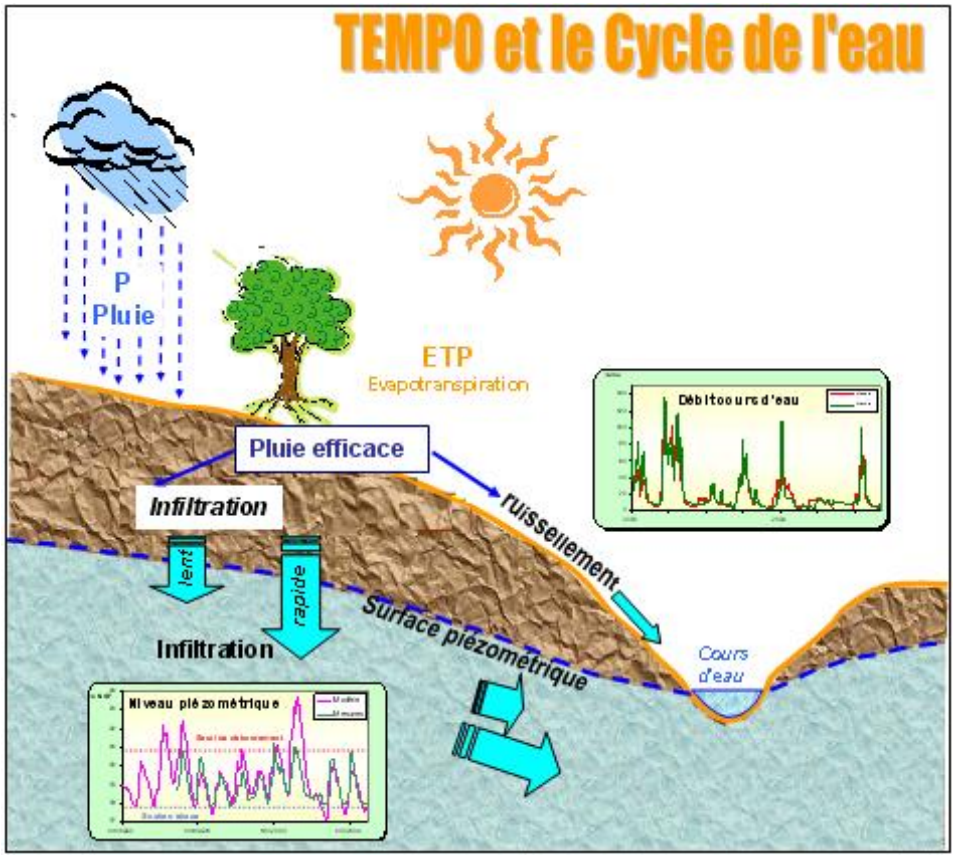


Illustration 171 : Exemple d'hydrosystème modélisable par TEMPO

Modélisation globale

La modélisation globale de l'hydrosystème consiste à rechercher la liaison entre l'entrée du système (pluie et ETP) et la sortie (niveaux et/ou débits) (Illustration 172), en cherchant à reproduire la ou les sortie(s) à l'aide des données d'entrée.

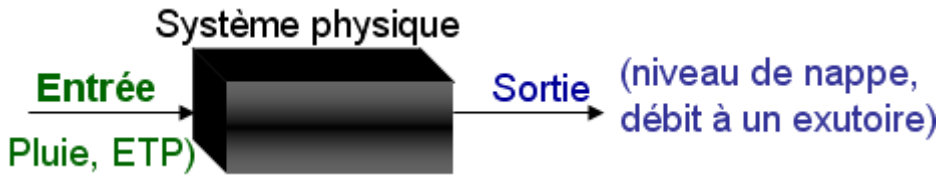


Illustration 172 : Les modèles construits avec TEMPO sont du type « boîte noire »

Le modèle construit avec TEMPO sera un modèle de type « boîte noire », en se référant à la typologie établie pour classer les modèles.

A la différence des modélisations réalisées à l'aide de « modèles maillés », qui tiennent compte explicitement des équations décrivant les écoulements, une modélisation avec TEMPO n'est pas basée sur de telles équations et ne nécessite pas l'utilisation des caractéristiques physiques et spatialisées de l'hydrosystème, comme la géométrie, les perméabilités ou encore les coefficients d'emmagasinement de l'aquifère.

La modélisation d'un hydrosystème avec TEMPO consistera à reproduire les niveaux de la nappe et/ou les débits à l'exutoire, représentant la « sortie » du système à l'aide des données climatiques, pluies et ETP, représentant l'« entrée » du système.

Le système est considéré comme un « tout » et la modélisation est dite « globale ».

Contrairement à un modèle maillé (spatialisé), une modélisation globale ne permettra pas d'établir de différentiations spatiales. Par exemple une zone à forte concentration de pompages, un secteur aquifère plus productif qu'un autre ou une zone de forte infiltration ne seront pas pris explicitement en compte.

La liaison entre « entrée » et « sortie » est assurée par l'intermédiaire d'une fonction qui doit caractériser globalement l'hydrosystème et qui permet de s'affranchir de tous les paramètres inconnus du bassin superficiel et souterrain.

La fonction recherchée doit reproduire le fonctionnement de l'hydrosystème, c'est-à-dire sa réponse aux épisodes pluvieux (élévation du niveau de la nappe, augmentation du débit à l'exutoire, …). La sortie calculée (niveaux ou débits) doit s'ajuster au mieux sur la série de mesures en reproduisant en particulier :

- les déphasages : il y a généralement une réaction différée de l'hydrosystème aux épisodes pluvieux, le « temps retard » étant plus ou moins important en fonction des caractéristiques du bassin (taille, topographie, densité de drainage, paramètres hydrodynamiques de l'aquifère sous-jacent) ;
- les amplitudes de fluctuations.

La fonction recherchée est appelée fonction de transfert (F.T.).

Modèles utilisés pour chaque bassin versant

Pour chacun des bassins versants étudiés (de Bourth et Normanville), plusieurs types de modèles ont été mis en place :

- un modèle permettant de décrire la réponse du « niveau piézométrique » et « du débit » de la rivière à deux entrées : « climatologique » (pluie et ETP);
- et d'autres modèles reliant la «chronique de débit » aux entrées « climatiques » (pluie et ETP) et « piézométrique », par exemple pour prendre en compte la composante inertielle liée à la participation de la nappe au débit de la rivière.

Après avoir testé différentes fonctions de transfert, il est apparu que :

- le débit à Bourth peut être modélisé en utilisant uniquement les entrées « climatiques » (pluie et ETP),
- le débit à Normanville pouvait être modélisé en utilisant comme entrée la pluie/ETP et une chronique piézométrique (Graveron ou Coulonges),
- la piézométrie à Coulonges peut être modélisée en utilisant comme entrée les entrées « climatiques » (pluie et ETP) et le débit de l'Iton à Bourth. En effet ce piézométre (localisation en Annexe 3) se situe dans la vallée du Sec-Iton, secteur où la rivière alimente la nappe du fait des pertes dans le lit du cours d'eau.

Le modèle retenu in fine pour le bassin versant de l'Iton est une succession de modèles de transfert en grappe alimentée par un seul générateur de pluie (cf. schéma de l'illustration ci-dessous). Ce modèle permet, à partir des seules entrées climatiques, de reproduire les débits à Bourth et Normanville et la piézométrie à Coulonges.

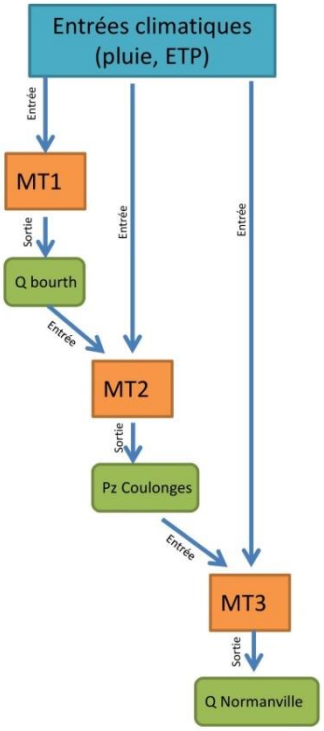


Illustration 173 : Schéma du modèle retenu, composé de méthodes de transfert en grappe pour simuler les débits à Bourth, à Normanville et la piézométrie à Coulonges

Les fonctions de transfert appropriées sont décrites en Annexe 9

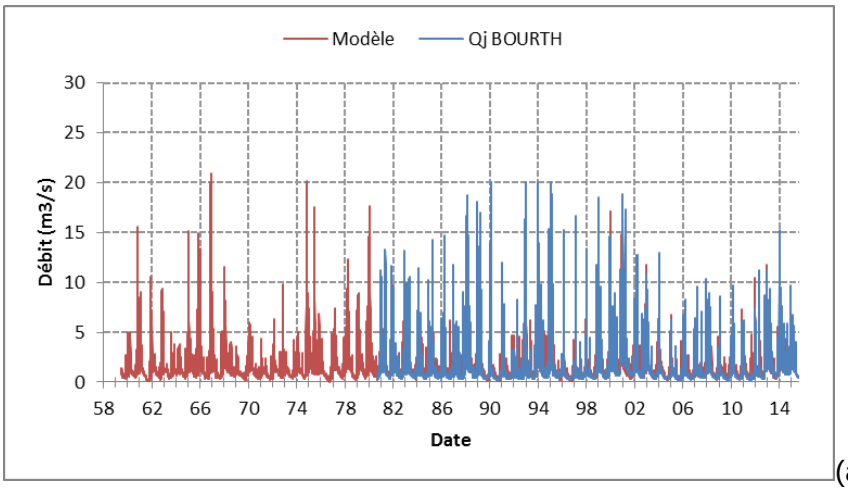
Les modélisations Pluie-Niveau et Pluie-Niveau-Débit ont été effectuées au pas de temps journalier en utilisant les données suivantes :

- données d'entrée : les précipitations et ETP du bassin versant de Normanville (modèle de pluie SAFRAN – cf § 3.4) sur la période 1958-2014 ;
- données de calage :
  - les débits journaliers aux stations hydrométriques de Bourth (1980-2015) et Normanville (1967-2015) ; la chronique de débit à Bourth (enregistrée de 1999-2016) a en effet été rallongée sur la période 1980-1998 par correlation avec les débits à la station de Crulai ;
  - la chronique piézomètrique à Coulonges (01801X0010) (1985-2015).

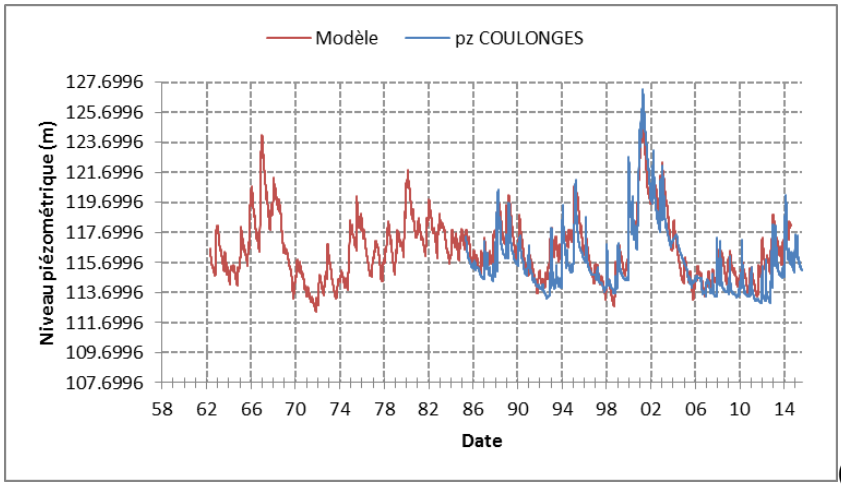
La période de calage est : 1980 – 2013 pour la méthode de transfert MT1, 1985 – 2013 pour la méthode de transfert MT2 et 1967-2013 pour la méthode de transfert MT3. Vue l'inertie de la nappe sur ce bassin et la présence de cycles interannuels marqués sur les chroniques piézométriques et de débit, il était important d'avoir une période de calage assez longue.

Les calages sont globalement satisfaisants (cf. Illustration 174), avec un coefficient de R^2 [22]=0.816 pour le débit à Normanville, de R^2=0.909 pour la piézométrie à Coulonges et de R^2=0.783 pour le débit à Bourth.

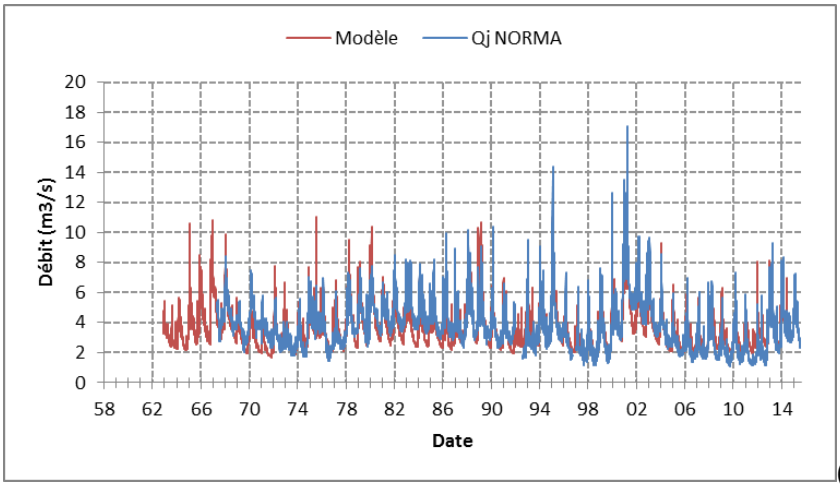
[22] Le coefficient R^2 quantifie la précision des simulations. Ce critère permet de mesurer le degré d'ajustement entre les valeurs observées et simulées.



(a)



(b)



(c)

Illustration 174 : Calage du modèle pour le débit à Bourth et Normanville et le niveau piézométrique à Coulonges

12.3.2. Prévision des niveaux de nappes et des débits

Principe

Une fois le modèle calé et la (ou les) fonction(s) de transfert calculée(s), la phase de prévision (débits, niveaux) peut être mise en œuvre.

Comme on ignore les pluies efficaces futures de la période de prévision, la méthode utilisée est de type probabiliste.

Grâce à un générateur de pluies et d'ETP, TEMPO peut produire un grand nombre de scénarios climatiques suivant un processus aléatoire mais reproduisant néanmoins les caractéristiques des séquences climatiques passées (moyenne, saisonnalité, …). Le simulateur de pluie et d'ETP de TEMPO est décrit en Annexe 10.

Le modèle ayant été calé et la (ou les) fonction(s) de transfert identifiée(s), on peut donc pour chacun des n scénarios climatiques faire le calcul de la variable de sortie (débit ou niveau) sur la période de prévision choisie et à un pas de temps défini, par exemple décade par décade sur 10 ans.

On obtient alors n scénarios indépendants pour les niveaux ou les débits (Illustration 175 et Illustration 176 avec n=5). Pour que les fréquences calculées soient significatives, plusieurs centaines de scénarios sont nécessaires.

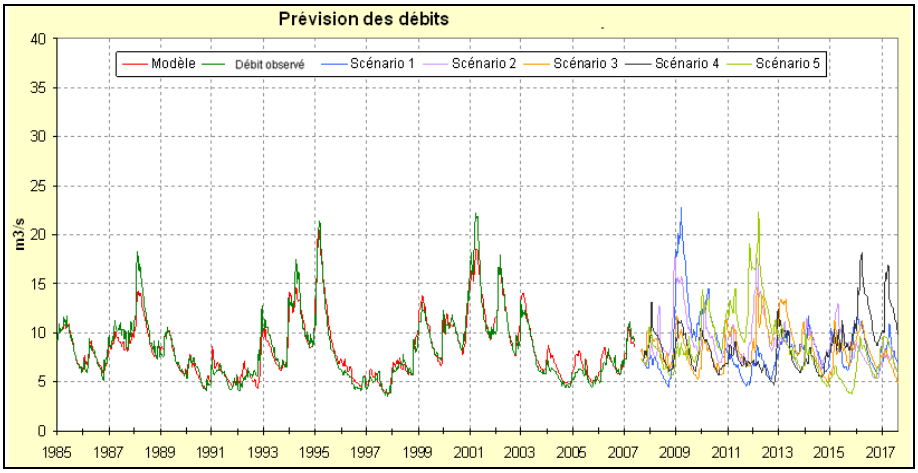


Illustration 175 : Eexemple de calculs de débits à partir de scénarios climatiques entre 2008 et 2018

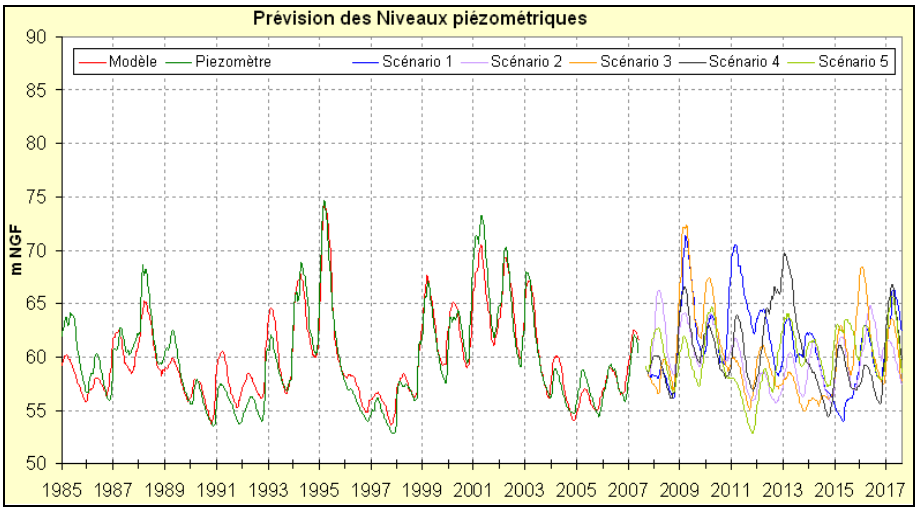
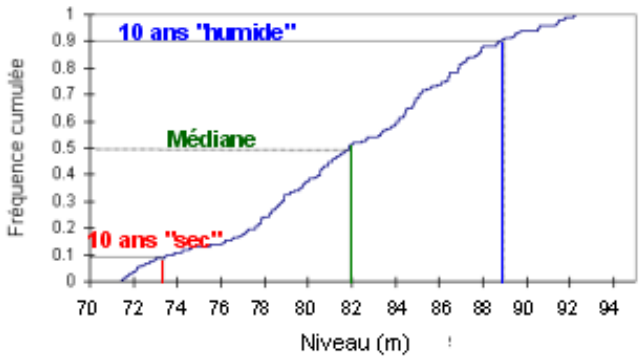


Illustration 176 : Exemple de calculs de niveaux à partir de scénarios climatiques

Les résultats de toutes les simulations sont ensuite regroupés intervalle de temps par intervalle de temps, par exemple par décade.

Sur chacun de ces intervalles de temps les niveaux sont classés par ordre croissant, ce qui revient à construire une distribution cumulée des fréquences (Illustration 177) et permet de calculer une fréquence d'occurrence de telle ou telle valeur dans chaque intervalle de temps (une fréquence de dépassement ou de non dépassement).



Sur ce graphique :

- la valeur H = 89 m est dépassée 1 année sur 10 (10 ans "humide");
- la valeur H = 73,5 m n'est pas dépassée 1 année sur 10 (10 ans "sec");
- la valeur H = 82 m est la médiane (dépassée ou non dépassée 1 année sur 2).

Illustration 177 : Courbe de fréquence cumulée

Les valeurs correspondant à ces différentes fréquences sont calculées pas de temps par pas de temps et reportées ensuite sur un graphique (Illustration 178) où les courbes tracées doivent s'interpréter non pas comme représentant des chroniques continues, c'est-à-dire des courbes d'évolution possibles avec une certaine fréquence d'apparition, mais comme des suites de valeurs correspondant chacune à une certaine fréquence d'apparition sur l'intervalle de temps considéré.

Tempo propose 7 fréquences particulières (Illustration 178) réparties en deux groupes correspondant aux années dites « humides » et aux années dites « sèches » de part et d'autre d'une valeur « médiane » correspondant à la valeur qui divise la « population » statistique sur l'intervalle de temps considéré en deux parties d'effectifs égaux ; la valeur médiane est dépassée (ou non dépassée) une année sur 2.

Pour information, les « 20 ans humides » s'interprètent comme la valeur de niveau ou de débit dépassée 1 année sur 20. Les « 20 ans secs » s'interprètent comme la valeur de niveau ou de débit qui n'est pas dépassée 1 année sur 20. De même pour les autres fréquences.

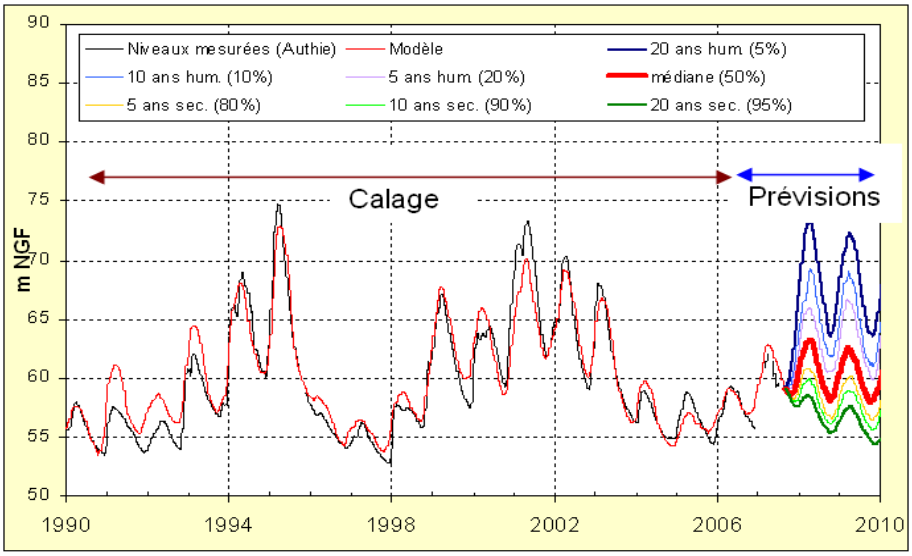


Illustration 178 : Exemple de prévision fournie par TEMPO

Exemple de prévision pour le bassin de l'Iton

A titre d'exemple les figures suivantes fournissent une prévision des débits et des niveaux piézométriques probables à l'étiage pour l'année 2014 simulés à partir du 28 février 2014 (Illustration 179 à Illustration 181).

Avant de faire les simulations, un processus autorégressif sur les écarts a été lancé afin de réduire au mieux les écarts entre les simulations et les observations de débits avant la période de prévision.

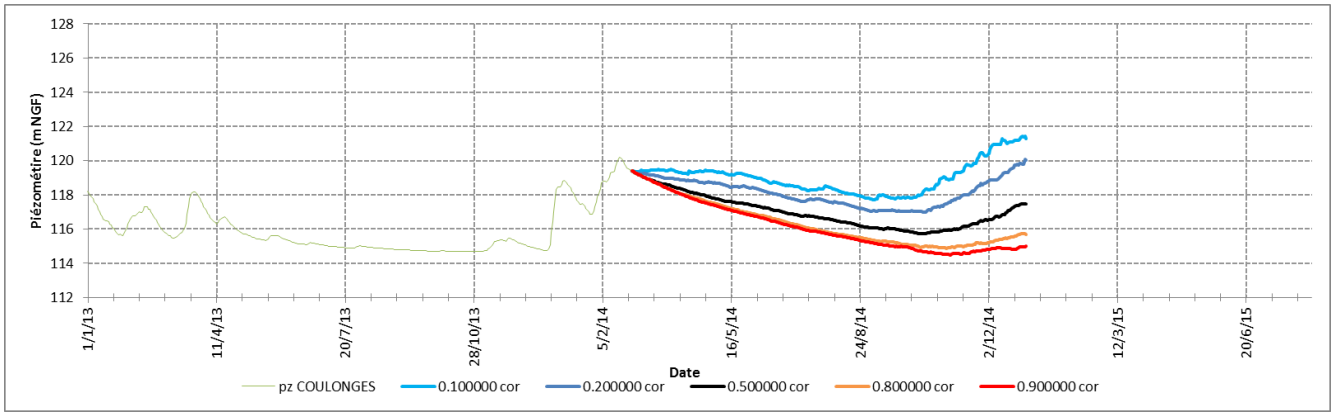


Illustration 179 : Prévision des niveaux piézométriques journaliers à partir du 28/02/2014 au piézomètre de Coulonges

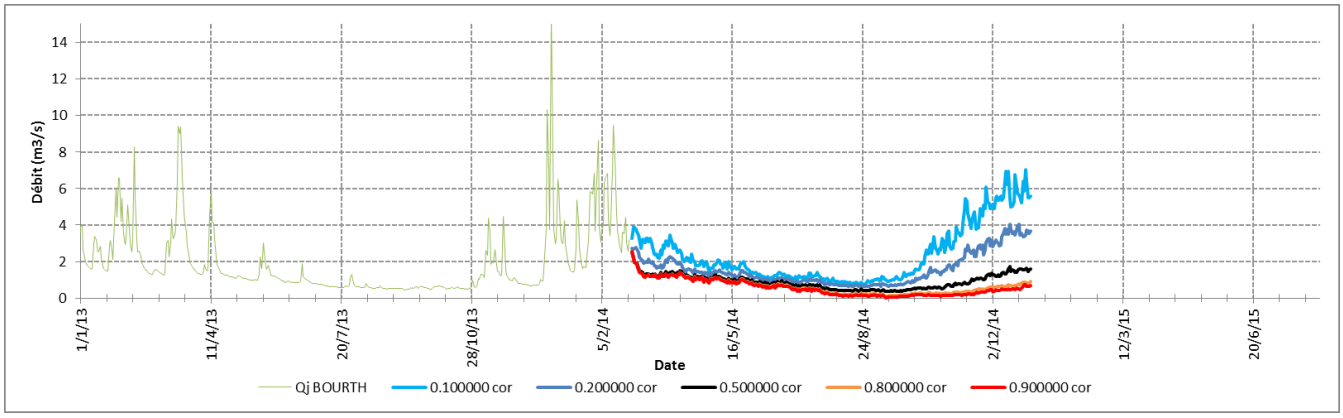


Illustration 180 : Prévision des débits journaliers à partir du 28/02/2014 à la station de Bourth

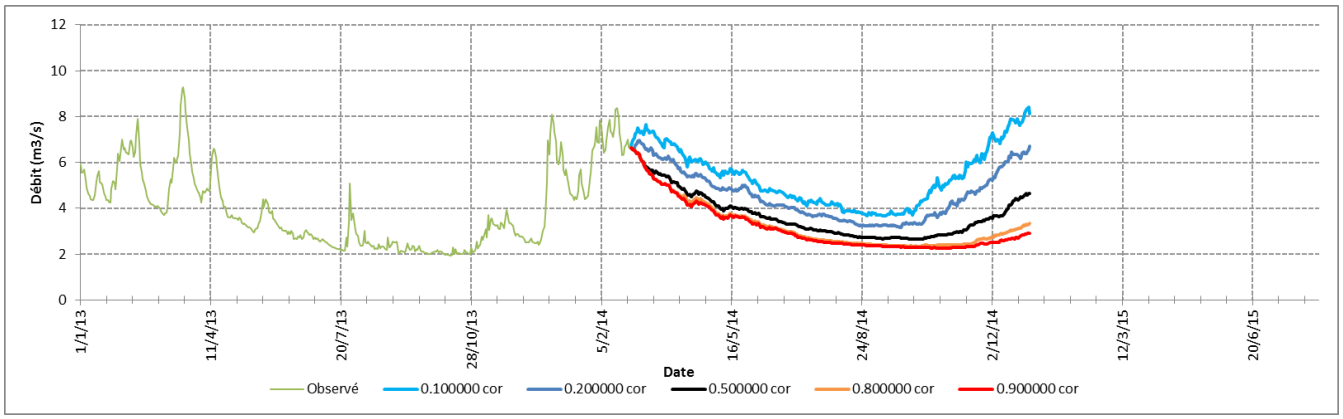


Illustration 181 : Prévision des débits journaliers à partir du 28/02/2014 à la station de Normanville

13. Fonctionnement du bassin de l'Iton lors des évènements extrêmes : cas des crues

13.1. RAPPEL DES PRINCIPALES CRUES HISTORIQUES

Dans sa synthèse sur les crues de l'Iton, ANTEA (Antea, 2005) évoque deux types de crues : les crues *hivernales* et les crues *estivales*. Les paragraphes suivants mettent en relation les chroniques de débits et de pluies enregistrées à l'amont et à l'aval du bassin versant.

13.1.1. Crues estivales de l'Iton

Crue de juillet 1975

La crue estivale la plus importante évoquée dans les rapports et les témoignages recueillis par l'étude ANTEA de 2005 est celle de juillet 1975. Une autre crue importante évoquée par l'étude d'ANTEA notamment dans la partie amont du bassin versant (département de l'Orne) est celle de mai 2000 (Tableau 17).

Crue	Manthelon			Normanville		
	Qp	Date	Période de retour estimée	Qp	Date	Période de retour estimée
Juillet 1975	43,8 m^3/s	06/07	> 50 ans	6,45 m^3/s	07/07	< 2 ans

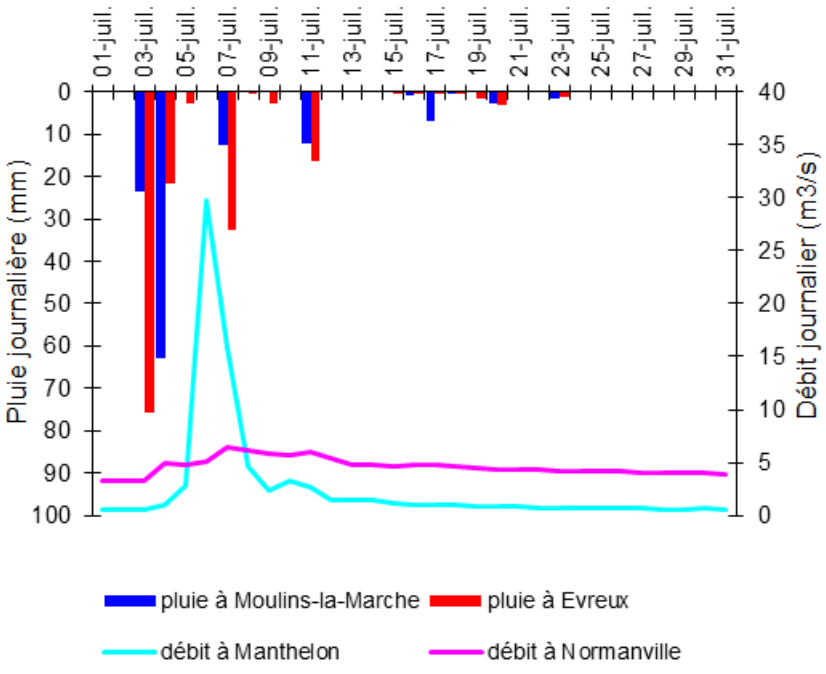
Crue	Crulai			Normanville		
	Qp	Date	Période de retour estimée	Qp	Date	Période de retour estimée
Mai 2000	14,6 m^3/s	07/05	5 ans	6 m^3/s	11/05	< 2 ans

Tableau 17 : Débits enregistrés lors des deux principales crues estivales (juillet 1975 et mai 2000)

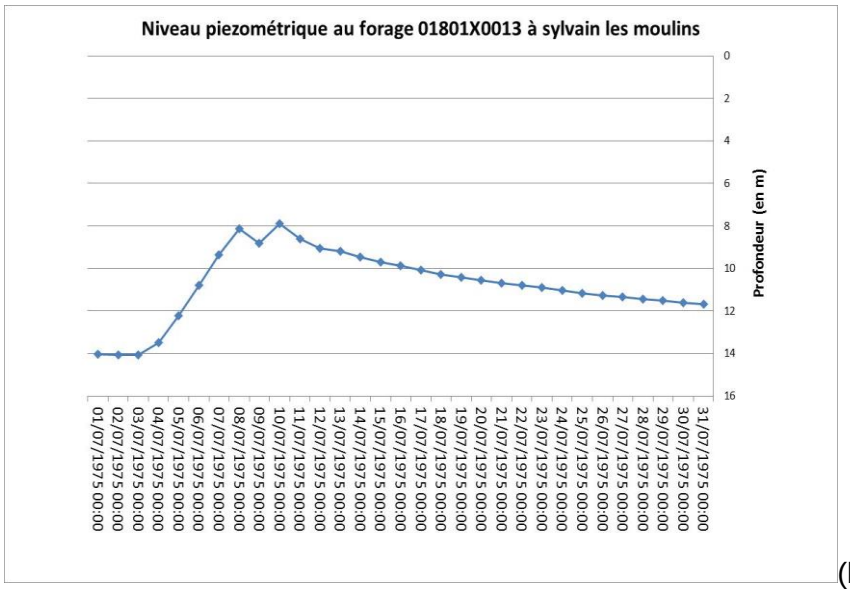
Concernant la crue de juillet 1975, l'observation des débits de base, avant et après la crue, aux stations de Manthelon et de Normanville, illustre la *différence de fonctionnement de l'Iton en amont et en aval du Sec-Iton* :

- à Manthelon, l'Iton est perché par rapport à la nappe phréatique, son débit dépend directement de la pluviométrie et son débit de base est faible (de l'ordre de 0,5 m^3/s),
- à Normanville, l'Iton draine la nappe phréatique, son débit de base est relativement soutenu (ici de l'ordre de 4 m^3/s) et dépend directement du niveau de la nappe.

La crue exceptionnelle enregistrée à Manthelon (43,8 m^3/s le 06 juillet) est très peu visible à Normanville, où aucun pic significatif n'a été enregistré (Illustration 182).



(a)



(b)

Illustration 182 : Pluies, débits journaliers enregistrés à l'amont et à l'aval du Sec-Iton lors de la crue de juillet 1975 (a) (source ANTEA, 2005) et piézométrie dans le secteur du Sec-Iton (Sylvain les moulins) à la même période (b)

<u>Hypothèses de fonctionnement :</u>

Ces constats mettent en évidence l'étalement de la crue d'amont en aval et un éventuel rôle tampon joué par les pertes de l'Iton, notamment au niveau du Sec-Iton. Cet éventuel rôle tampon du karst du sec-iton qui engouffrerait une partie du pic de crue semble confirmé par le suivi des niveaux piézométriques à Coulonges où une remontée de la nappe de 6 m environ a été observée lors du passage de cette crue (Illustration 182). La vidange de la nappe semble longue puisqu'à la fin du mois de juillet, les niveaux étaient encore 2 mètres supérieurs aux niveaux d'avant l'épisode pluvieux exceptionnel de début juillet. Ceci semble indiquer que les capacités de restitution du karst dans ce cas étaient inférieures aux capacités d'introduction, ce qui pourrait expliquer, en première hypothèse du moins partiellement, l'étalement de

l'hydrogramme de crue sur la partie de l'Iton située à l'aval des résurgences du système karstique de l'Iton.

Ces hypothèses seront étudiées aux § 13.2 et 13.3.

13.1.2. Crues hivernales de l'Iton

Les principales crues évoquées dans les rapports et les témoignages sont celles de 1966, janvier 1993, janvier 1995, décembre 1999 et mars 2001 (Antea, 2005). Les données hydrométriques enregistrées au moment de ces crues sont données dans le tableau suivant :

Crue	Crulai			Normanville		
	Qp	Date	Période de retour estimée	Qp	Date	Période de retour estimée
Janvier 1993	17,9 m^3/s	12/01	20 ans	9,5 m^3/s	14/01	5 ans
Janvier 1995	17,0 m^3/s	22/01	10 ans	14,8 m^3/s	30/01	> 50 ans
Décembre 1999	14,8 m^3/s	31/12	5 ans	12,8 m^3/s	31/12	20 ans
Mars 2001	15,3 m^3/s	25/03	5 ans	17,5 m^3/s	27/03	> 50 ans

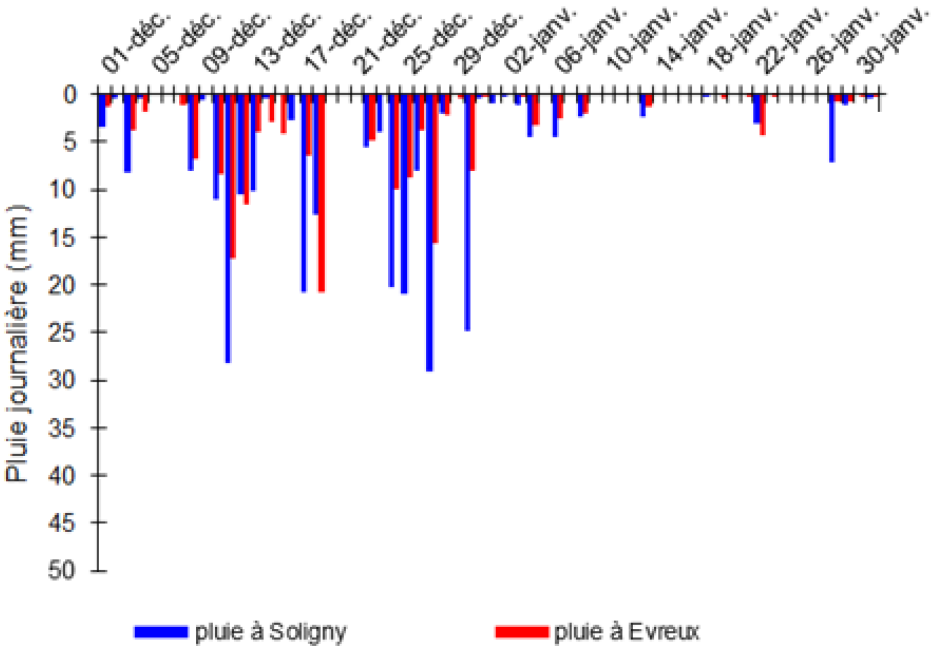
Tableau 18 : Débits de crue enregistrés lors des crues hivernales de l'Iton

D'une manière générale (excepté pour la crue de janvier 1993), la période de retour estimée des crues hivernales enregistrées à Normanville (station aval) est plus importante que celle des crues hivernales enregistrées à Crulai (station amont). En d'autres termes, des crues exceptionnelles peuvent survenir à l'aval sans que des crues exceptionnelles ne soient observées en tête de bassin.

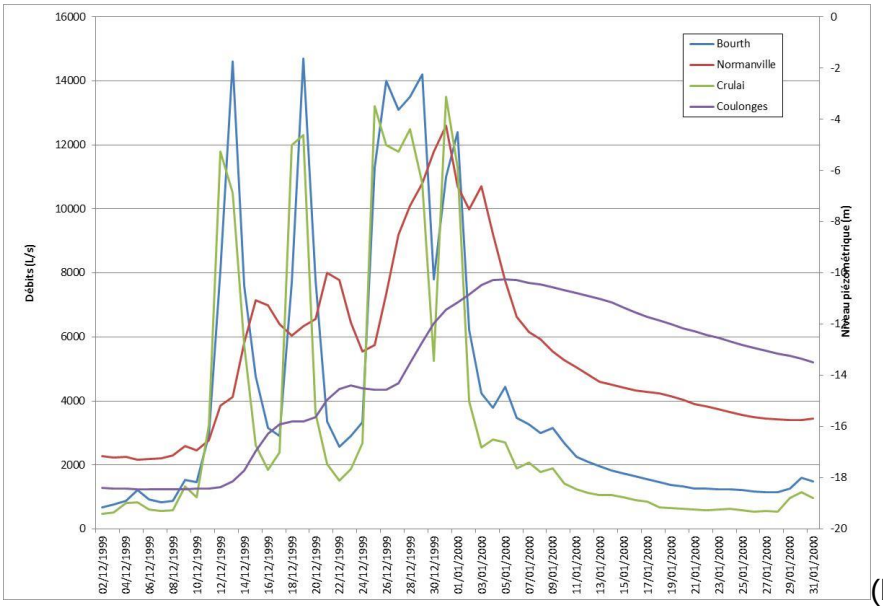
Par ailleurs, le niveau de la nappe joue un rôle important sur le débit de base du cours d'eau. Un état du remplissage important de la nappe sera donc un phénomène aggravant (fort débit de soutien provenant de la nappe) à des phénomènes de pluies de grande intensité. Les plus grandes crues survenues à Normanville ces dernières années ont eu lieu en janvier 1995 et en mars 2001 (périodes de retour supérieures à 50 ans), à des périodes où la nappe était particulièrement haute.

Crue de décembre 1999

En décembre 1999, le cumul mensuel de précipitations a été de 144 mm à Evreux-Huest (valeur exceptionnelle proche de la valeur centenale pour le mois de décembre, estimée à 156 mm). Le cumul mensuel de 233 mm a également été exceptionnel à Soligny-la-Trappe à l'amont du bassin versant. L'épisode de crue qui en a résulté est présenté à l'Illustration 183.



(a)



(b)

Illustration 183 : Pluies à Soligny et Evreux en déc. 1999 et janv. 2000 (a) ; débits journaliers enregistrés à l'amont (stations de Bourth et Crulai) et à l'aval (station de Normanville) et niveaux piézométriques dans le sec-Iton (piézomètre de Coulonges) lors du passage de la crue de déc. 1999 et janv. 2000 (b)

Avant la crue, le débit de base au niveau de Normanville était relativement faible, de l'ordre de 2,5 m^3/s. Entre le 08 et le 31 décembre, quatre pics de crue ont été générés à l'amont du bassin versant, avec des périodes de retour comprises entre 2 et 5 ans à Crulai.

Lors des 2 premiers pics de crues, les très forts pics de débits (de l'ordre de 12 à 14 m^3/s) enregistrés aux stations amont (respectivement à Crulai et Bourth) ont semble-t-il été tamponnés à Normanville où ont été enregistrés des pics beaucoup plus faibles (de l'ordre de 7 à 8 m^3/s). A chaque passage de ces 2 premières crues, le niveau piézométrique à Coulonges est monté (cf. courbe violette de l'Illustration 183). Lors du passage des 3ème et 4ème épisodes

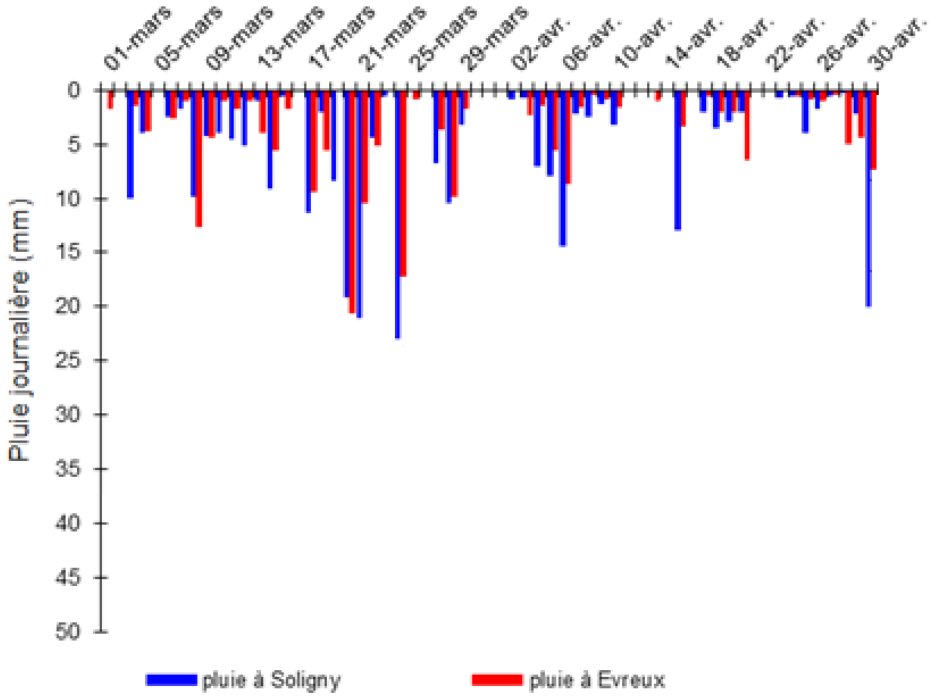
de crue, le niveau piézométriques est encore monté à Coulonges et les pics de crues mesurés aux stations amont et à Normanville ont cette fois étaient relativement proches (Illustration 183).

Hypothèses de fonctionnement :

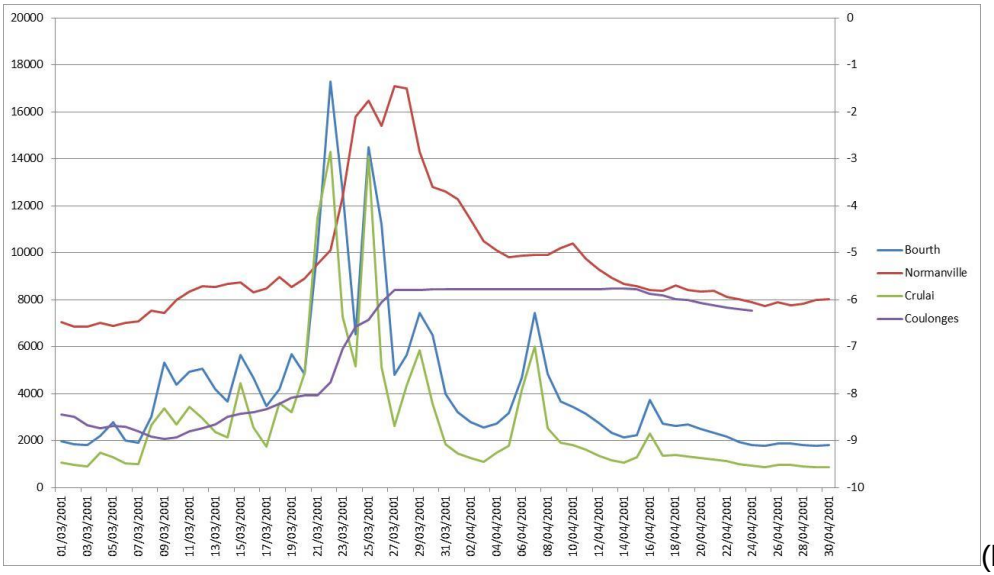
Les pertes de l'Iton ont-elles joué un rôle important dans l'amortissement de la crue à l'aval ? Le § 13.3 tentera d'y répondre.

Crue de mars 2001

Lors de la crue de mars 2001, les niveaux de nappe étaient bien supérieurs à ceux observés lors de l'épisode de décembre 1999. Ainsi, avant le passage de cet épisode de crue, le débit de base à Normanville était déjà de l'ordre de 7 m^3/s et le niveau piézométrique à Coulonges était de 2 mètres plus haut qu'à la fin de l'épisode de crue de décembre 1999.



(a)



(b)

Illustration 184 : Pluies et débits journaliers enregistrés à l'amont et à l'aval du bassin versant lors de la crue de mars 2001

Deux pics de crue se sont succédés à Crulai, entre le 22 et le 25 mars, avec des périodes de retour comprises entre 2 et 5 ans. Le niveau piézométrique est encore monté lors du passage de ces crues, jouant ainsi un probable rôle tampon (Illustration 184).

A Normanville, les pics de crues observés étaient supérieurs ou équivalents à ceux mesurés à l'amont, le débit a augmenté (17,5 m^3/s le 27 mars ; période de retour supérieure à 50 ans). C'est la crue la plus importante jamais enregistrée depuis 1966.

La différence entre les débits de pointe atteints à Normanville en mars 2001 et en décembre 1999 est de l'ordre de la différence des débits de base (débits de drainage de la nappe) entre ces deux dates.

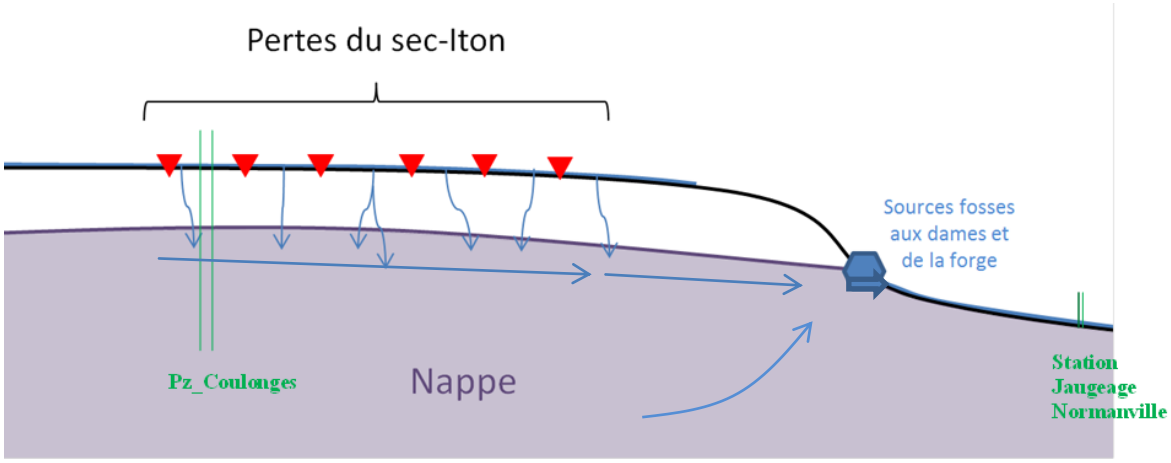


Illustration 185 : Schéma de fonctionnement de l'éventuel rôle tampon joué par les pertes du sec-iton lors de la transmisssion des crues de l'amont vers l'aval du bassin

Ce constat semble donc confirmer que l'état du remplissage de la nappe est un phénomène aggravant à des phénomènes de pluie de grande intensité.

13.1.3. Crues du Rouloir

Le Lème/Rouloir est un hydrosystème qui a été peu étudié. Cet affluent de l'Iton n'est pérenne que sur une faible partie de son cours (petite section à l'amont, cf. trait gras sur l'Illustration 88, et à l'aval dans le tronçon où il se nomme Rouloir). Sur le reste de son cours, le Lème/Rouloir est une vallée sèche, l'écoulement s'infiltre et s'effectue en souterrain.

Toutefois, la bibliographie fait état d'un écoulement observé jusqu'à Sainte-Marguerite-de-l'Autel durant l'hiver 2000/2001 (Aqua-Sol Projets, 2004). Cet écoulement surfacique correspond très probablement à un phénomène de remontée de nappe (cf. § 7.2.3).

Ainsi, en période de hautes eaux piézométriques, le fonctionnement du bassin versant du Rouloir, habituellement à infiltration majoritaire, semble se modifier : les remontées de nappe semblent provoquer un écoulement en surface du Lème/Rouloir. Dans ces conditions, les pluies ruissellent et ne sont plus infiltrées dans le sous-sol, ce qui peut provoquer des crues qui se transmettent à l'aval, dans la vallée de l'Iton à l'amont d'Evreux.

Le SPC SACN[23] estime que ce cours d'eau a pu contribuer de manière non négligeable lors de la crue de décembre 1999. Une estimation minimale à l'aide d'un modèle hydraulique (modélisation à la station de Glisolles, avec le logiciel HEC-RAS ; Zaniolo et al. 2015), de l'ordre de 5.7 m^3/s, représenterait alors environ 40% de la pointe de crue de l'Iton à Normanville (13.9 m^3/s). La difficulté pour mieux comprendre le fonctionnement de ce sous-bassin karstique est l'absence de suivi débitmétrique sur le rouloir à Glisolles.

Afin de vérifier ces hypothèses de fonctionnement et la part de la contribution du Rouloir au débit de l'Iton à Normanville, il serait intéressant d'installer une station de jaugeage en continu de débits du Rouloir à Glisolles (avant la confluence avec l'Iton) afin de mieux comprendre le régime de cours d'eau en période de crues.

13.2. RECHERCHE DE PREMIERS INDICATEURS D'ALERTE

En parallèle de la présente étude, le BRGM a réalisé en 2015, une étude de la contribution des eaux souterraines aux crues des bassins de l'Iton et de l'Orbiquet, pour le compte du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations). Les résultats de cette étude sont disponibles dans le rapport BRGM/RP-65570-FR (Charlier et al. 2015). Les §13.2.1 , 13.2.2 et 13.3 reprennent les résultats de cette étude.

13.2.1. Relations Débit vs. Piézométrie à Normanville (source BRGM/RP-65570-FR)

L'objectif est de caractériser les relations débit-piézométrie sur l'Iton, et d'évaluer la pertinence d'un indicateur piézométrique pour caractériser le niveau de saturation du bassin entre Bourth et Normanville.

La séparation des hydrogrammes en débit de base et débit de crue a été réalisée par la méthode BFI (Gustard et al., 1992 et Gustard and Tallaksen, 2008) à l'aide du logiciel ESPERE (Caballero et al., 2015). Un exemple de résultat est donné à l'Illustration 186. En comparant les chroniques de débit à Bourth (en noir) et Normanville (en bleu), on observe nettement une forte augmentation du niveau de base d'un facteur 3 à 4 qui indique un drainage d'une nappe sur

[23] SPC SACN : Service de Prévision des Crues Seine Aval et Côtiers Normands

l'aval du bassin. Dans le même temps, une diminution des débits de pointe de plusieurs m^3/s est associée à un laminage de l'hydrogramme de crue. Le § 13.3 sur les échanges surface/souterrain donnera des réponses quant aux influences respectives de l'hydraulique (diffusion) et du karst (pertes) pour expliquer ce laminage lié au transit de l'hydrogramme dans le lit majeur.

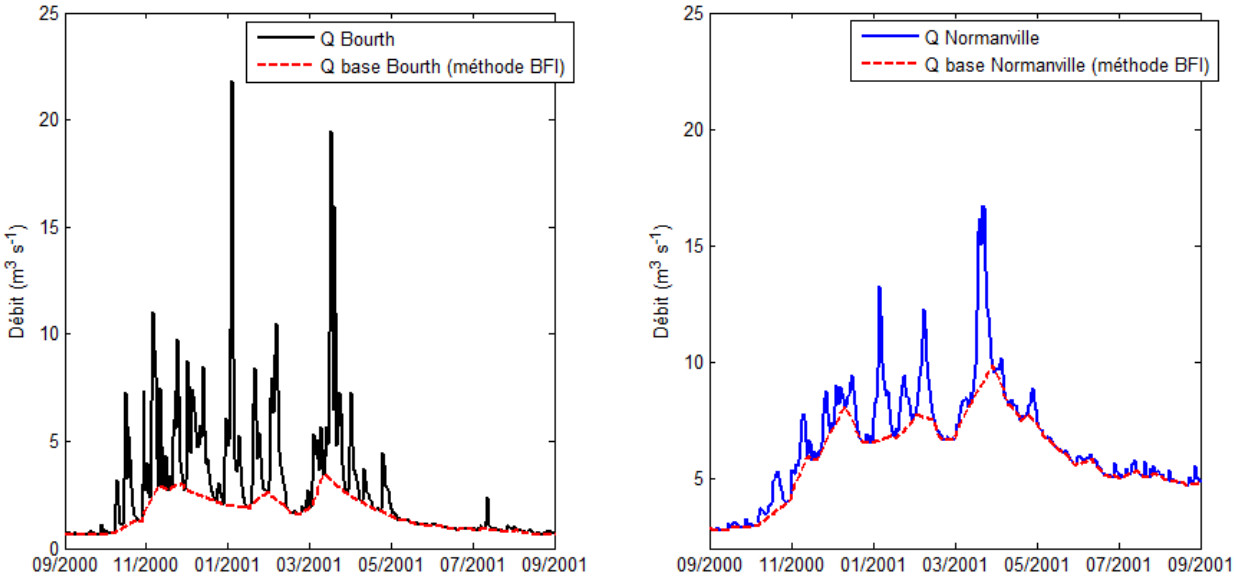


Illustration 186 : Séparation de l'hydrogramme à Bourth (à gauche) et à Normanville (à droite) par la méthode BFI ; exemple du cycle hydrologique 2000-2001

L'Illustration 187 présente le débit de base ainsi calculé à Normanville *vs.* les indices de saturation du sol (HU2[24]) et des nappes. On observe une absence de corrélation pour le HU2 et les piézomètres présentant principalement des variations des cycles annuels et pluri-annuels (respectivement piézo Normanville et Cierrey). Les meilleures corrélations sont obtenues pour les piézomètres présentant des cycles annuels associés à des variations interannuelles plus ou moins marquées comme ceux de Nogent-le-Sec, Moisville, et Coulonges (meilleure corrélation avec $r^2 = 0.75$). **Coulonges est un piézomètre susceptible d'être influencé par l'Iton sur la partie la plus amont de la zone de pertes à cause de sa position proche du cours d'eau. Cependant, si sa dynamique est bien corrélée à celle du débit de base de l'Iton à l'exutoire du bassin (Normanville), c'est qu'il est forcément en grande partie représentatif des fluctuations de la nappe de la craie à l'échelle du bassin.**

[24] HU2 : saturation des sols estimée par la chaîne de calcul SIM-ISBA

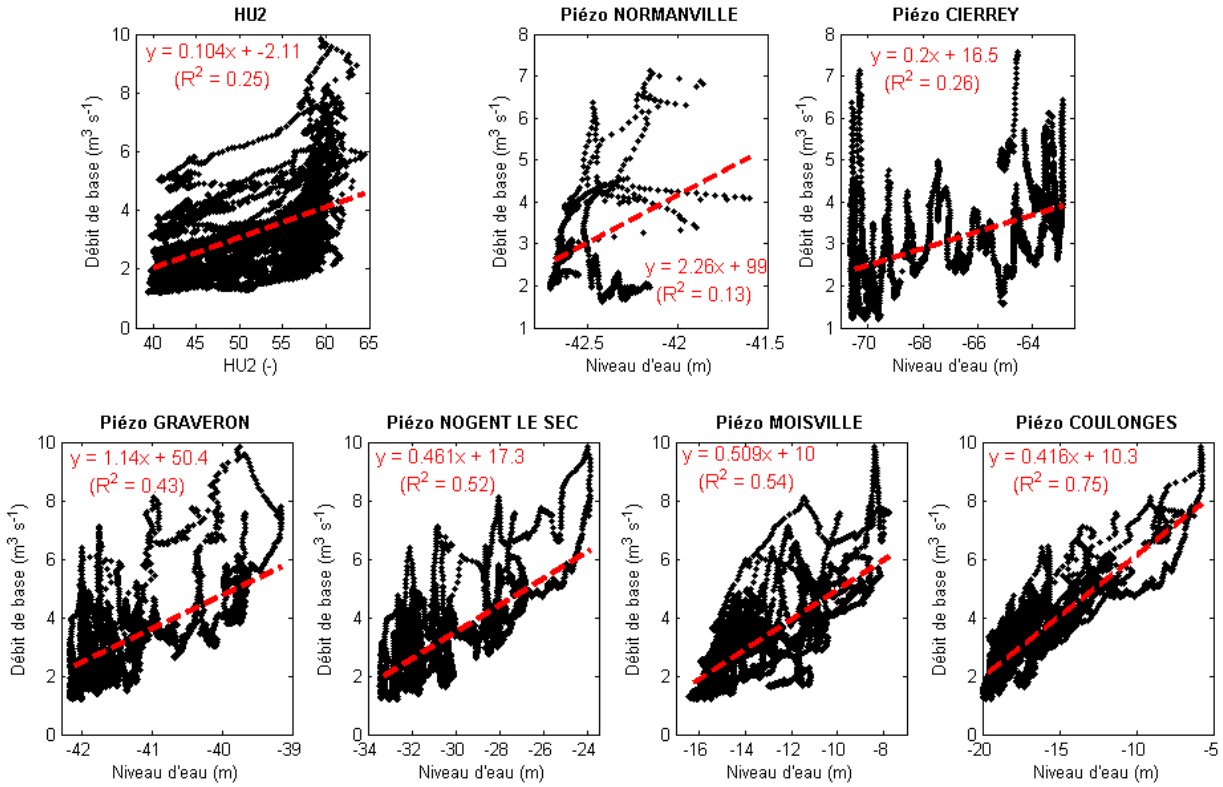


Illustration 187 : Débit de base de l'Iton à Normanville vs. indicateurs de saturation du bassin (HU2 et piézomètres du bassin)

13.2.2. Relations Débit-Débit et Hauteur-Hauteur en fonction du niveau de saturation du karst (source BRGM/RP-65570-FR)

Le tronçon du Sec-Iton est encadré par les deux stations de débit Bourth et Normanville, mais également par les deux stations de hauteur Damville et la Bonneville-sur-Iton. Ce présent paragraphe tente de caractériser ces 2 relations Débit-Débit et Hauteur-Hauteur en fonction du remplissage du karst à Coulonges.

Sur une sélection des 33 épisodes de crue les plus forts (critère de sélection : débit de pointe à Bourth), l'Illustration 188 présente la relation Débit-Débit entre Bourth et Normanville en fonction du niveau initial au piézomètre Coulonges qui est le mieux corrélé avec le débit de base à Normanville. On observe globalement un très fort laminage des crues car les débits de pointe à Normanville sont en moyenne 2 fois plus faibles que ceux de Bourth. **Pour des niveaux initiaux inférieurs à -12 m de profondeur** (groupe Piézo ini <-16m et groupe -16<PIézo ini<-12m), **l'écrêtement des crues est important car en moyenne d'un facteur 2**. **Par contre, lorsque le piézomètre est à un niveau de saturation supérieur (Piézo ini >-12m), on observe nettement une plus forte réponse hydrologique à Normanville avec dans certains cas une absence du laminage de l'onde de crue**.

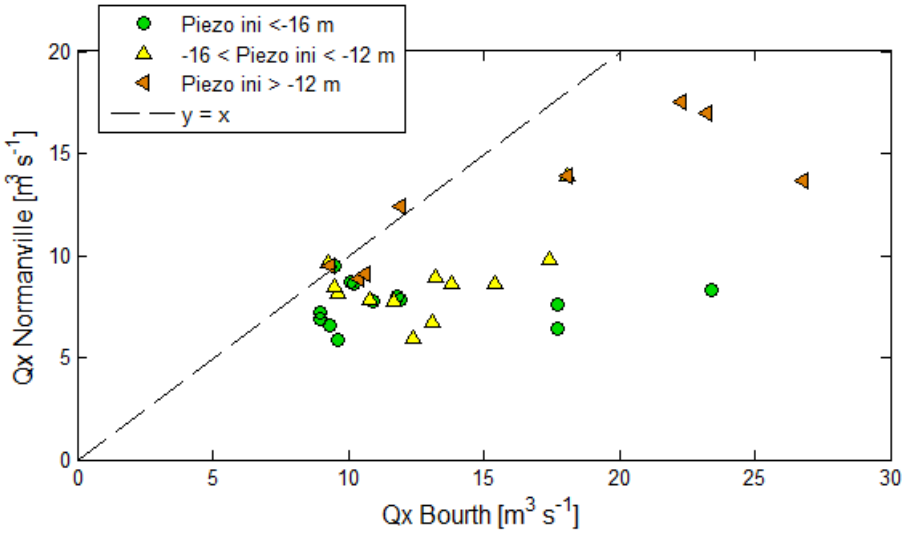


Illustration 188 : Débits de pointe de crue à Normanville vs. Débits de pointe de crue à Bourth en fonction du niveau initial du piézomètre Coulonges

Le SPC SACN a établi une relation hauteur–hauteur entre Damville et la Bonneville-sur-Iton sur l'ensemble de la chronique dès que l'association des hauteurs correspondantes était possible. Elle peut s'ajuster par une fonction polynomiale d'ordre 2 (Illustration 189).

En faisant apparaitre l'état de saturation initial du sol (HU2) dans cette relation Hauteur-Hauteur sur l'Illustration 190[25], on observe une répartition des crues à forte humidité sur toute la gamme de hauteur. La relation n'est donc pas influencée par le degré d'humidité du sol.

[25] La crue de 1995 n'apparait pas sur la relation faute de données sur l'indice HU2

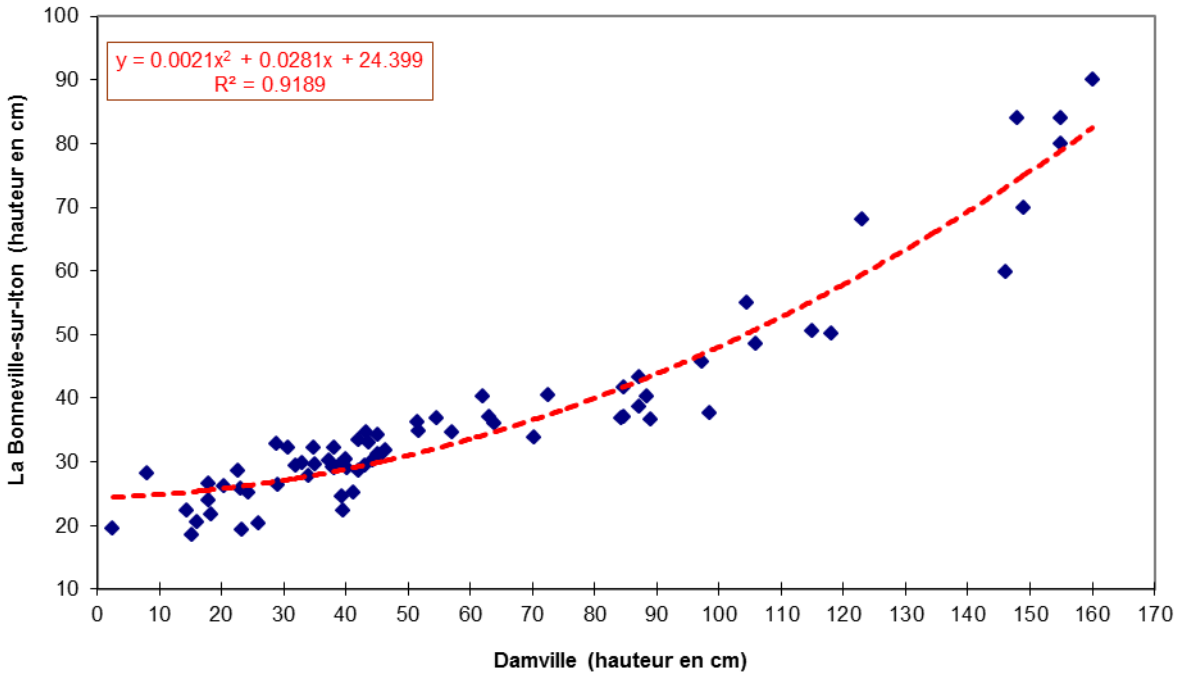


Illustration 189 : Relation Hauteur-Hauteur entre les stations de Damville et Bonneville-sur-Iton établie par le SPC SACN

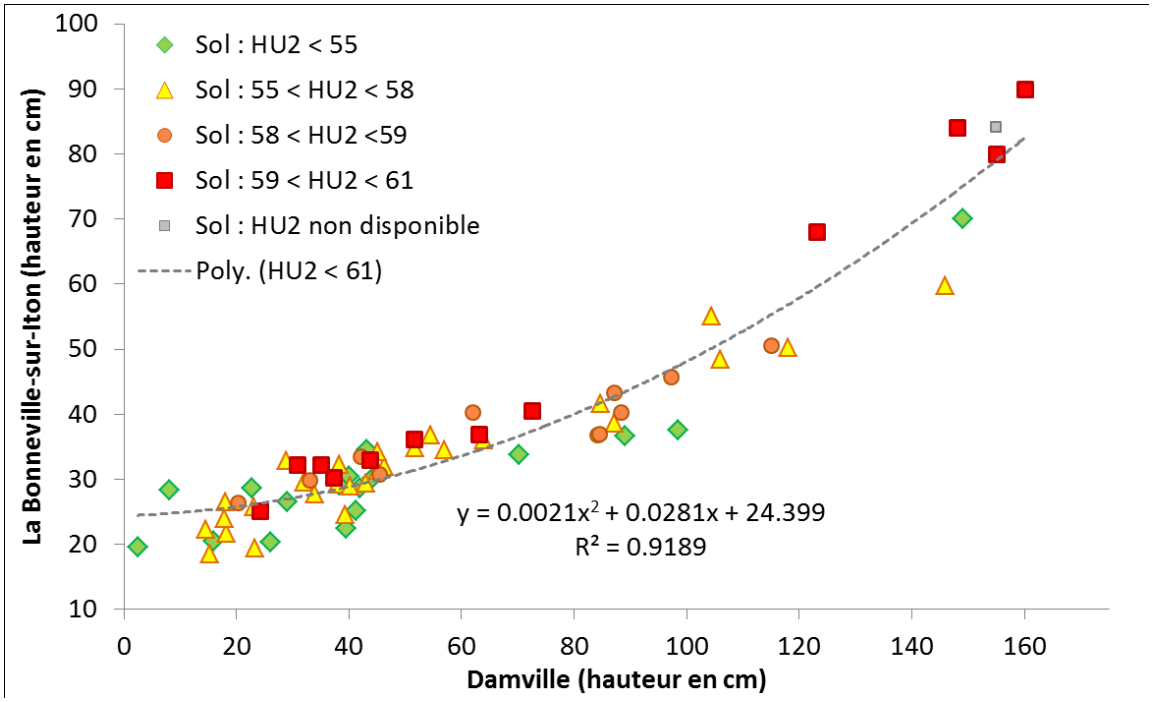


Illustration 190 : Relation Hauteur-Hauteur entre les stations de Damville et Bonneville-sur-Iton en fonction de l'état de saturation du sol (HU2)

Nous avons cherché à évaluer l'influence potentielle du karst sur cette relation en se basant sur la piézométrie. Deux piézomètres sont testés parmi ceux ayant de bonnes corrélations avec le

débit de base à Normanville : Coulonges (situé sur le tronçon Damville-Bonneville) et Graveron (le plus éloigné du tronçon). L'Illustration 191 différencie les points selon 4 niveaux de remplissage du karst en se basant sur la profondeur piézométrique :

- Profondeur piézométrique à Coulonges : i) < -18 m (en vert), ii) entre -18 et -15 m (en jaune), entre -15 et -10 m (en orange), et iii) entre -10 et -8 m (en rouge).
- Profondeur piézométrique à Graveron : i) < -42,0 m (en vert), ii) entre -42,0 et -41,5 m (en jaune), entre -41,5 et -41,0 m (en orange), et iii) entre -41,0 et -40,0 m (en rouge).

Une influence très similaire est détectée pour les deux piézomètres. Pour des pointes de crue à Damville inférieures à 120 cm, c'est-à-dire la gamme d'écoulement complète hors crues exceptionnelles, la relation est linéaire entre les pics de hauteur à Damville et à la Bonneville, et le critère de remplissage du karst n'apparaît pas discriminant.

Au-delà de 120 cm, les points s'écartent de la droite dans le sens de plus fortes variations à la station de La Bonneville. Excepté les 2 pointes de crue de janvier 1995 et décembre 1999 (entourées d'un cercle bleu pointillé) qui se sont produites en condition de karst rechargé (sans être complètement saturé), les pointes de crue exceptionnelles se sont produites en état de karst totalement sursaturé (profondeurs comprises entre -10 et -8 m pour Coulonges et -41.0 et -40 m pour Graveron), et correspondent toutes aux crues de 2001 (entourées d'un cercle rouge pointillé).

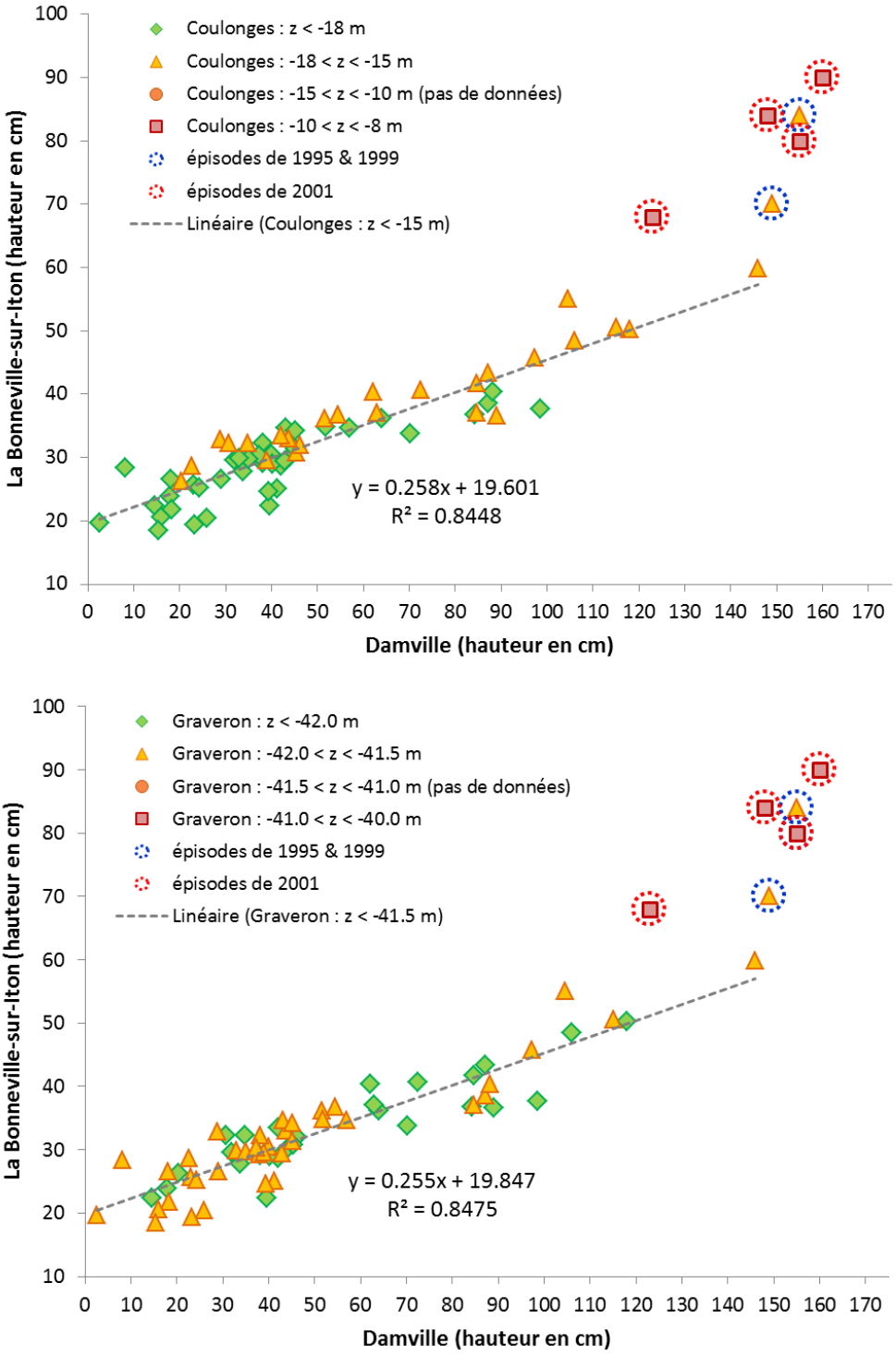


Illustration 191 : Relation Hauteur-Hauteur entre les stations de Damville et Bonneville-sur-Iton en fonction de l'état de remplissage du karst au piézomètre Coulonges (en haut) et au piézomètre Graveron (en bas)

En comparant les deux relations Débit-Débit et Hauteur-Hauteur, on peut alors estimer qu'un effet seuil dans la réponse hydrologique intervient lorsque le niveau piézométrique dans le karst atteint un niveau exceptionnel, proche de -12 m à Coulonges (-10 à -15m ? incertitude du fait de l'absence de données de crues pour les niveaux compris entre -15 et -10m) et -41 m pour Graveron. Les crues exceptionnelles non alignées sur la relation

Hauteur-Hauteur suggèrent une amplification des crues en aval du Sec-Iton lorsque le karst est saturé.

13.2.3. Relation engouffrement sec-Iton / niveau piezo

Les résultats du paragraphe précédent ont mis en évidence un effet de seuil dans la réponse hydrologique qui intervient lorsque le niveau piézométrique dans le karst atteint un certain niveau. Au-dessous d'un certain niveau (-12m à Coulonges d'après la relation débit-débit ; -12 (-10 à -15 m ; incertitude du fait du manque de données), d'après la relation haute-hauteur, l'écrêtement des crues entre Bourth et Normanville (ou entre Damville et la Bonneville-sur-Iton) est important (en moyenne d'un facteur 2) ; en-dessous de ce seuil, on observe une plus forte réponse hydrologique à Normanville avec dans certains cas une absence du laminage de l'onde de crue.

Afin d'étayer ces résultats, la relation entre le débit engouffré dans la partie amont du Sec-Iton (entre Condé-sur-Iton et Manthelon) et le niveau piézométrique à Coulonges a été étudiée et est présentée à l'Illustration 192. Le débit engouffré est estimé par la différence du débit de l'Iton à Manthelon (station de jaugeage permanente) et à Condé-sur-Iton (jaugeages ponctuels).

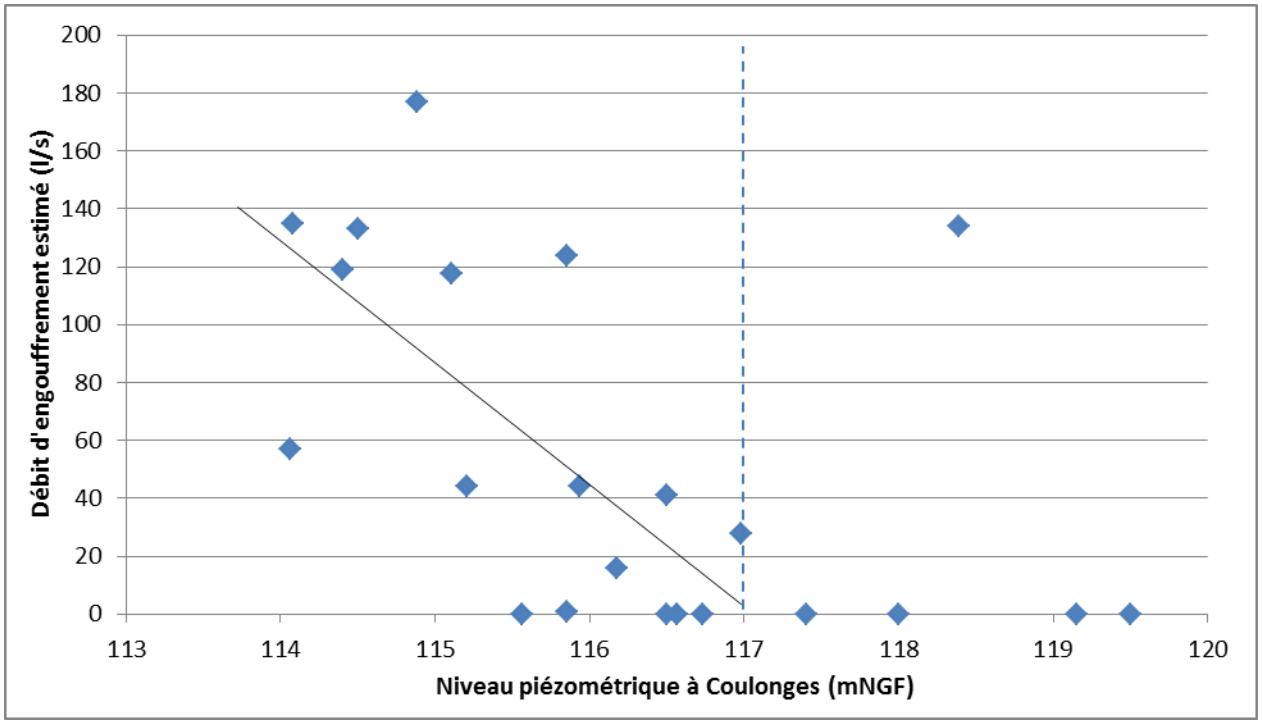


Illustration 192 : Relation entre le débit d'engouffrement estimé entre Condé-sur-Iton et Manthelon et le niveau piézométrique à Coulonges. Remarque : une augmentation de débit a parfois été mesurée entre ces deux points de mesure, ces valeurs n'ont pas été prises en compte et apparaissent sur le graphique comme égales à zéro

Le semis de points obtenu semble indiquer que deux régimes se distinguent selon le niveau piézométrique à Coulonges. Le niveau piézométrique de 117 m NGF (-16 m de profondeur) semble ici aussi constituer un seuil au-dessus duquel le Sec-Iton n'est plus en capacité d'absorber de débit via les pertes en rivière (bétoires), du moins sur la partie amont du Sec-Iton ici étudiée (en amont de Manthelon). Par ailleurs, lorsque le niveau piézométrique est inférieur à 117 m NGF (-16 m de profondeur), la capacité d'engouffrement du Sec-Iton (au moins sa partie amont ici étudiée) semble évoluer avec celui-ci, avec des valeurs maximales de l'ordre de

150 l/s pour un niveau autour de 114 m NGF, qui diminuent pour devenir nulles vers 117 m NGF.

13.3. MODELISATION DE LA CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES AUX CRUES DE L'ITON (SOURCE BRGM/RP-65570-FR)

13.3.1. Présentation et principes

L'approche retenue est une approche Débit-Débit entre deux stations hydrométriques. Elle permet d'étudier les écoulements latéraux qui peuvent se produire sur le tronçon. A partir des hydrogrammes mesurés à la station amont et à la station aval, il est possible de modéliser l'hydrogramme du bassin intermédiaire, sur lequel se produisent les écoulements latéraux issus des versants situés entre les deux stations.

La simulation de l'hydrogramme des écoulements latéraux (Q latéral) nécessite l'utilisation d'un modèle de propagation de l'onde de crue. Le modèle de l'onde diffusante avec écoulements latéraux (cf Charlier et al., 2015) simule la propagation de l'onde de crue entre deux stations en tenant compte d'apports ou de pertes uniformément répartis sur le tronçon. Pour caractériser ces écoulements latéraux, nous utilisons dans cette étude le modèle inverse qui simule le débit latéral à partir des données mesurées au droit des stations amont et aval.

Le détail de la méthode est présenté en annexe 11.

13.3.2. Résultats : échanges surface / souterrain sur le tronçon Bourth-Normanville lors des crues

Modélisation des échanges latéraux

Cette section a pour objectif de présenter une analyse des échanges latéraux sur les crues les plus fortes, sélectionnées pour leur ampleur sur un critère de débit à Bourth (33 épisodes).

Exemple 1 : crue monopic du 06/01/2001

Un exemple d'analyse est donné ici sur une crue monopic (crue du 06/01/2001). Sur l'Illustration 193, sont affichés de haut en bas la pluie radar, l'indice HU2, la piézométrie à Coulonges, les chroniques de débit totaux, et enfin les chroniques de débit de crue, calculés à partir du débit total auquel a été retranché le débit de base initial.

Sur les chroniques hydrométriques, 4 courbes sont présentées correspondant au débit mesuré à la station amont de Bourth (courbe noire), au même débit propagé sur le réseau jusqu'à la station de Normanville calculé à l'aide du modèle de l'onde diffusante sans écoulements latéraux (courbe en tiretés noirs), au débit à l'aval à Normanville (courbe verte), et au débit latéral calculé à partir du modèle inverse de l'onde diffusante (courbe en tiretés rouge).

Remarques : le débit à Normanville n'est pas égal à la somme des débits à Bourth+latéral mais bien à la somme des débits à Bourth propagés + latéral propagé. Les débits « négatifs » calculés pour le sous-bassin latéral correspondent à des pertes au sein du réseau hydrographique.

Le débit latéral est estimé à l'aide du modèle de propagation détaillé en annexe 11 qui permet de simuler les écoulements latéraux uniformément répartis le long du tronçon à partir des 2

hydrogrammes amont et aval. Le calage des paramètres Célérité C et Diffusivité D est détaillé en annexe 11.

Sur les débits totaux, le débit latéral calculé correspond aux échanges moyens composés de l'ensemble des pertes (Sec-Iton) et apports simultanés (Rouloir, émergences, ruissellement).

Sur les débits de crue (débit total auquel est retiré le débit initial avant la crue), on s'affranchit des apports de base principalement constitués par le drainage des nappes (qui augmente fortement le débit de base entre Bourth et Normanville). Le débit latéral calculé correspond aux échanges liés uniquement aux écoulements rapides.

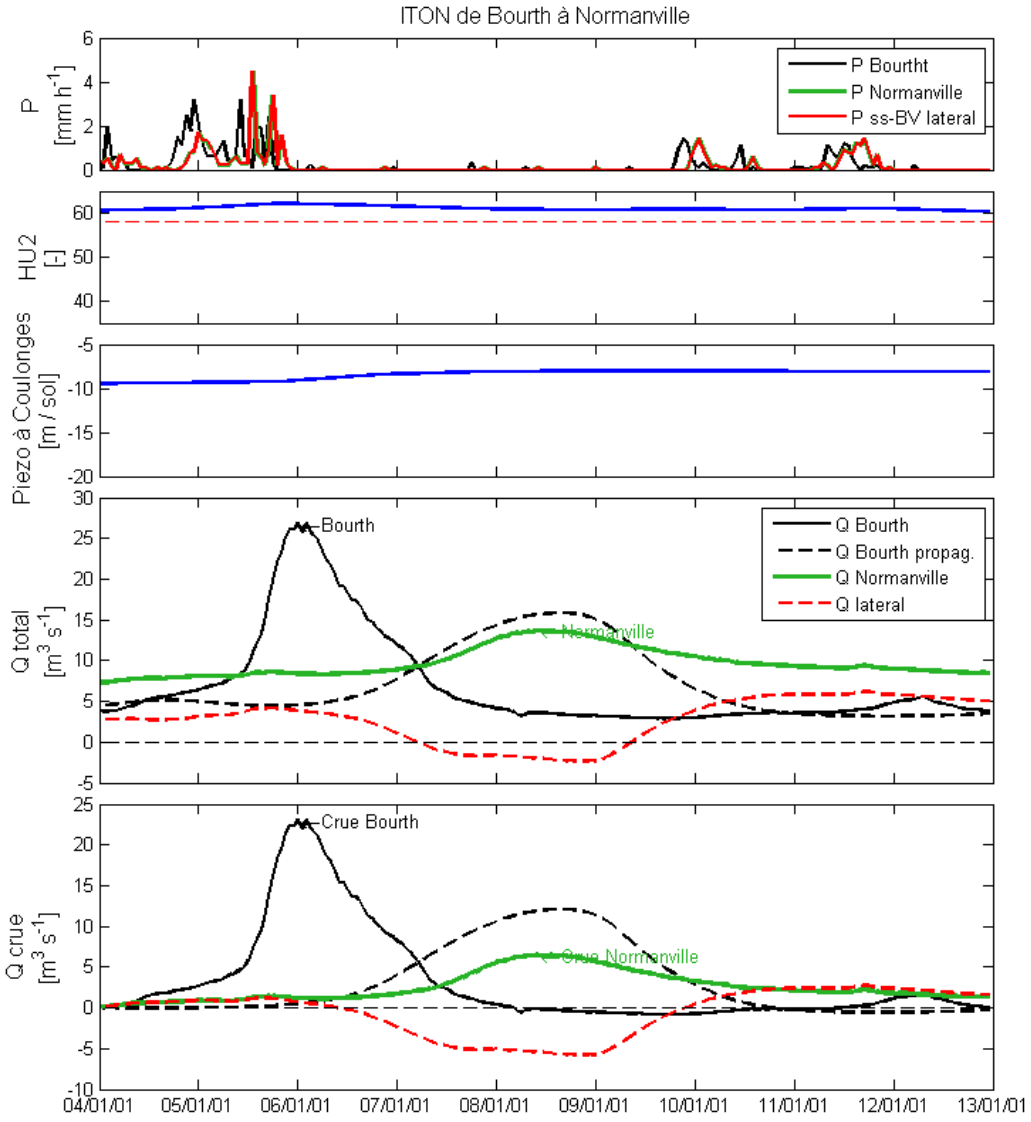


Illustration 193 : Echanges latéraux lors de la crue du 06/01/2001 (Qcrue = Qtotal – Qbase-avant-crue)

Ainsi, sur l'exemple de la crue du 06/01/2001, en se focalisant sur l'analyse des débits totaux, on observe le laminage de la crue entre Bourth (Qx Bourth = 26.8 m^3/s) et Normanville (Qx

Normanville = 13.7 m^3/s) de l'ordre de 13 m^3/s. En début de crue, les apports latéraux sont de près de 2.7 m^3/s, apports qui disparaissent lors du passage de la crue (Q latéral proche de 0 et légèrement négatif). La propagation de l'onde de crue est responsable d'un laminage de la crue de l'ordre de 11 m^3/s (Qx Bourth = 26.8 m^3/s et Qx Bourth propagé = 15.8 m^3/s).

Si on se focalise sur l'analyse des débits de crue, on peut quantifier des pertes qui atteignent en instantané près de 6 m^3/s (valeur de -6 m^3/s sur les Q latéral).

La conclusion de cette analyse est que le laminage de la crue entre Bourth et Normanville est dû à la conjonction des 2 phénomènes de pertes sur le réseau et de diffusion de l'onde de crue, dans un rapport de 1 à 2 environ. S'y ajoutent les apports des aquifères (débit de base) qui tamponnent cet écrêtement.

Exemple 2 : analyse des crues de décembre 1999

La même analyse est portée sur les épisodes exceptionnels de décembre 1999 en condition de karst initialement sec (piézo < -15 m GF) avec une saturation progressive de l'aquifère au cours de la succession des différents épisodes. Il est intéressant de noter que l'indice HU2 est déjà saturé.

On observe globalement des débits latéraux négatifs à chaque passage de crue, mais avec une diminution progressive de leur intensité entre les premiers et les derniers épisodes. Cela indique une diminution des pertes au cours du mois de décembre. Pour le dernier épisode (01/01/2000 à Bourth), les apports latéraux (rouloir et résurgences) sont supérieurs aux pertes et la diffusion de l'onde de crue explique principalement le laminage de la crue.

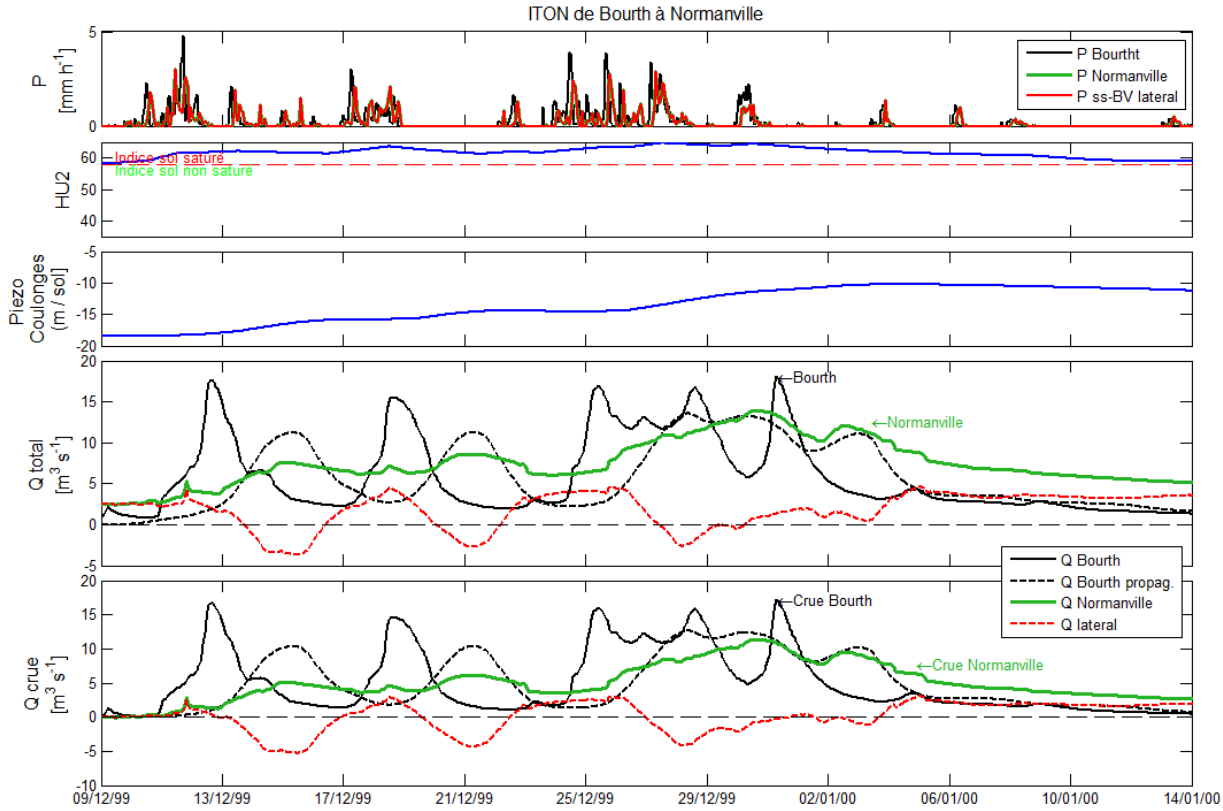


Illustration 194 : Echanges latéraux lors de la crue de décembre 1999

Exemple 3 : analyse des crues de mars 2001

Une autre analyse est portée sur le double épisode de mars 2001 en condition de karst déjà saturé initialement (piézo > -10 m GF). L'indice HU2 est déjà saturé également.

On observe des débits latéraux négatifs lors du passage de la première crue, qui deviennent légèrement positifs lors du passage de la seconde crue.

Dans ce cas-ci, en plus d'une diminution des pertes, le modèle permet de mettre en évidence une augmentation des apports latéraux. Il faut peut-être chercher ce type de contributions auprès de l'affluent principal Le Rouloir.

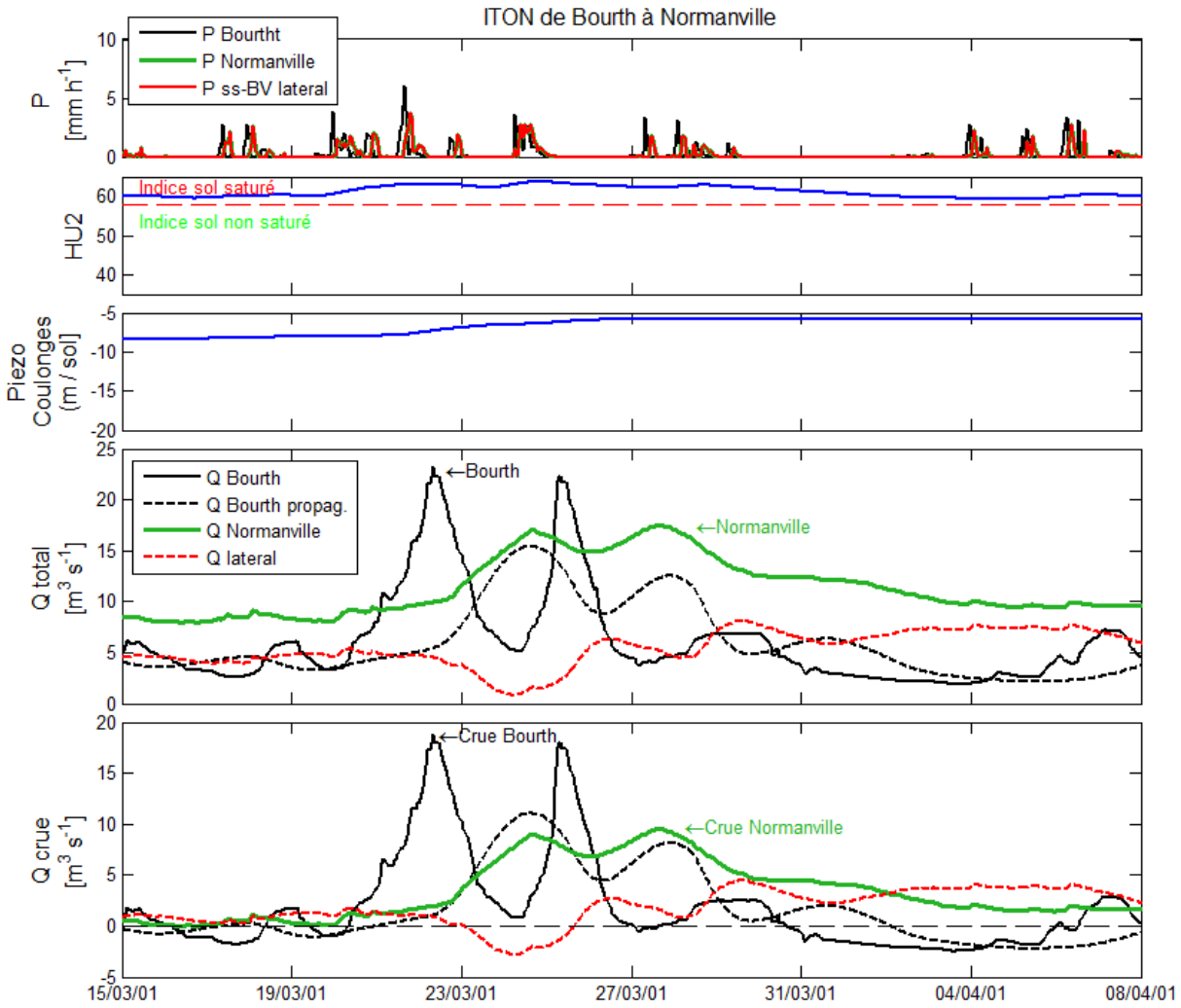


Illustration 195 : Echanges latéraux lors de la crue de mars 2001

Evaluation des pertes de l'Iton

A partir de ces premières analyses, nous avons cherché à regarder de manière systématique le rôle potentiel du karst sur les échanges latéraux du tronçon Bourth-Normanville. Sur la base de 33 épisodes sélectionnés sur un critère de débit, nous avons calculé le débit d'échange maximal (qu'il soit négatif ou positif).

L'Illustration 196 présente ce débit maximal latéral *vs.* débit de pointe de crue à Bourth en fonction du niveau initial du piézomètre Coulonges. Il est intéressant de noter que les débits d'échange maximaux sont systématiquement négatifs, ce qui signifie que les pertes sont toujours supérieures en intensité aux apports. Globalement, on observe une augmentation de l'intensité des pertes avec une augmentation du débit de crue à Bourth. Cependant, on observe un plafonnement de ces pertes autour de -7 m^3/s au-delà d'un débit de crue maximal de 12 m^3/s. Le résultat le moins attendu est l'absence de lien avec le niveau de remplissage initial du karst. Ainsi, le débit de pertes semble être principalement contrôlé par le débit de crue sans qu'un effet de seuil lié au karst ne soit observé.

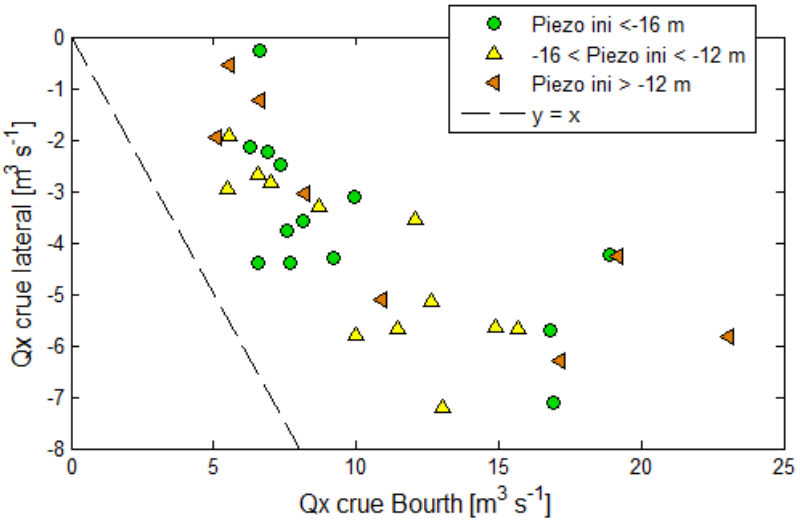


Illustration 196 : Débit de perte maximale vs. Débit de pointe de crue à Bourth en fonction du niveau initial du piézomètre Coulonges

La première conclusion est que le piézomètre Coulonges est potentiellement un indicateur du niveau de saturation du bassin (relation forte avec le débit de base Illustration 187) sans pour autant être un indicateur du laminage des crues sur le tronçon Bourth-Normanville qui intègre tout un ensemble de pertes (Sec-Iton, Lême) et d'apports (Rouloir, émergences, etc.).

La seconde conclusion est que l'augmentation de la réponse hydrologique à Normanville sur la relation Débit-Débit (Illustration 190) qui met en évidence une influence du niveau de remplissage du karst, n'est a priori pas liée à une baisse du taux de pertes (et donc au rôle écrêteur du karst), mais plutôt liée aux déclenchements d'apports ne se produisant qu'en crue exceptionnelle. Ces derniers pourraient provenir de la mise en eau du Rouloir qui se produit dans ce type de condition extrême et/ou des contributions plus intenses des émergences de Conches-en-Ouche et de Glisolles.

Laminage des crues

Deux phénomènes concourent au laminage des crues entre Bourth et Normanville : un rôle hydraulique du fait de la diffusivité de l'onde de crue, et un rôle du karst sur la ré-infiltration des écoulements au niveau des pertes du Sec-Iton. La question porte alors sur leurs impacts respectifs.

L'Illustration 197 présente la comparaison du degré de laminage des crues les plus fortes entre ces deux phénomènes. On observe globalement un rapport qui augmente de 1 à 2 à 1 à 3 entre respectivement le laminage dû aux pertes et celui dû à la propagation de l'onde de crue. La plus grande proportion de laminage dû à l'hydraulique est probablement engendrée par le plafonnement des pertes autour de 7 m^3/s, comme vu précédemment.

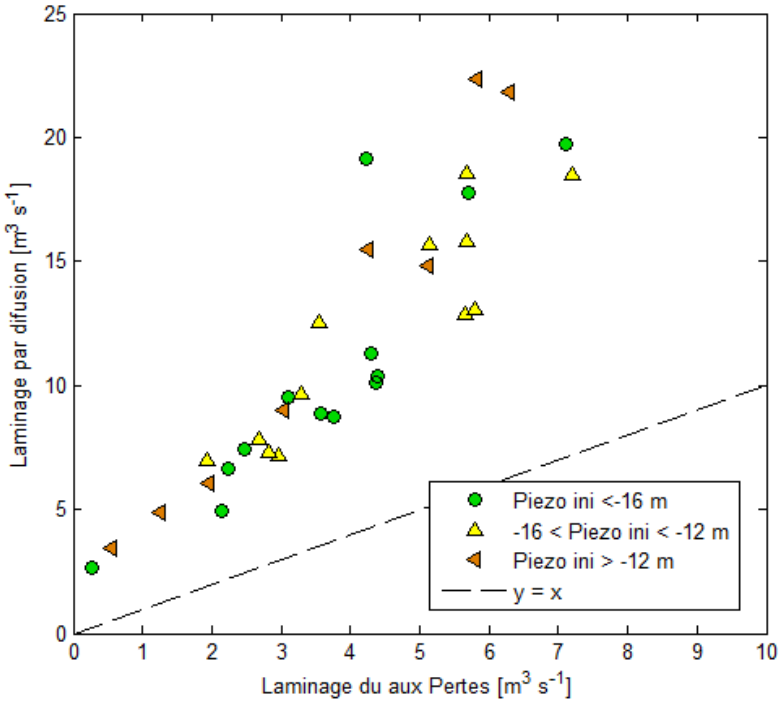


Illustration 197 : Débits de perte maximale vs. Débit de pointe de crue à Bourth en fonction du niveau initial du piézomètre Coulonges

La conclusion de ce travail montre que, bien que le karst joue un rôle écrêteur sur le laminage des crues, l'atténuation des pics de crue entre Bourth et Normanville est majoritairement liée à une question hydraulique, plutôt qu'à une perte effective de débit. Cette forte diffusion de l'onde de crue peut être liée à la morphologie méandriforme du réseau hydrographique au niveau du tronçon Damville-Glisolles, ainsi qu'aux nombreuses zones de débordement et stockage temporaire.

14. Volet Qualité

14.1. VOLET 1: CARACTERISATION HYDROGEOCHIMIQUE

Les données utilisées dans ce volet proviennent de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie pour les eaux de surface (extraction de 2000 à 2012), de l'observatoire des Bassin d'alimentation de captage du CD27 (période 2013-2014) et de la base de données des eaux souterraines ADES (extraction au 06/2014) pour les eaux souterraines. Parmi toutes ces données, seuls les points inclus dans le périmètre de la zone d'étude ont été utilisés dans la suite.

Les données ont été rassemblées dans une base de données commune et ont été traitées après mise en forme et validation.

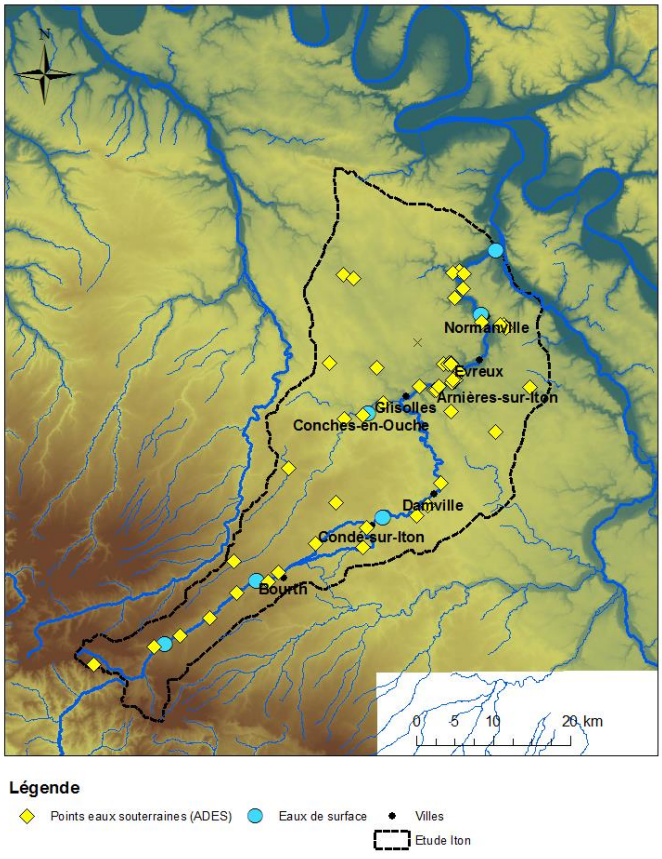


Illustration 198 : Carte de situation du bassin versant de l'Iton indiquant les points d'eau souterraines (ADES et CG) et de surface (AESN) utilisés pour l'étude

14.1.1. Publications récentes sur la chimie des eaux souterraines en Haute-Normandie

Des travaux récents publiés par l'Université de Rouen et l'Université UPMC de Paris ont porté sur l'analyse des contraintes contrôlant la chimie des eaux souterraines karstiques.

Une première publication a permis de coupler des analyses spatiales des contrôles structuraux sur la géochimie des eaux souterraines karstiques à l'échelle régionale (Valdes et al., 2007). En dépit des propriétés karstiques, une analyse en composantes principale (ACP) met en évidence deux ensembles d'ions dans les eaux de la craie : les ions allochtones Cl, Na, SO_4 et NO_3 et les ions d'origine autochtone HCO_3 et Ca. En raison des interactions eaux-roche, le Mg appartient à ces deux familles d'ions. En comparant la géochimie des eaux souterraines avec les propriétés physiques de l'aquifère, les auteurs mettent en évidence le contrôle majeur de la géométrie et du contexte structural de l'aquifère dans la chimie des eaux souterraines. Ils montrent que le degré de minéralisation des eaux augmente le long des chemins de circulation en raison de l'augmentation des teneurs en ions Ca et HCO_3. Dans les zones où la capacité d'écoulement de l'aquifère est limitée en raison d'une diminution de l'épaisseur de la section d'écoulement, le temps de résidence augmente, ce qui accroit la minéralisation des eaux.

Des outils SIG et statistiques (ACP) ont été utilisés pour mettre en évidence que l'épaisseur des argiles à silex contrôle la recharge de la craie vers le karst dans le bassin versant aval de la Seine (Valdes et al., 2014). Selon les auteurs, l'épaisseur des argiles à silex est négativement corrélée avec la concentration des ions autochtones, mais positivement corrélée à celle des ions allochtones. Ceci implique que les niveaux fins d'argiles à silex permettent une infiltration diffuse de la recharge avec peu d'évaporation et des teneurs faibles en ions allochtones. En revanche, les couches épaisses d'argiles à silex permettent le stockage d'eau dans une nappe perchée qui subit l'évapotranspiration, résultant en des concentrations importantes en ions allochtones et de faibles teneurs en ions autochtones. L'infiltration des eaux de nappe perchée est également différée. Pour le bassin versant de l'Iton et par extension la partie ouest du bassin versant de la Seine, l'analyse du rôle de l'épaisseur des argiles à silex est plus complexe car les Sables du Perche apportent une eau faiblement minéralisée, des dépôts tertiaires semblent apporter une contribution majeure en Mg, et les anticlinaux et failles jouent également un rôle important.

Enfin, l'hétérogénéité spatiale de la géochimie de la craie a été mise en évidence par l'étude locale de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud en Picardie. Une ACP met en évidence les sources d'éléments dissous comme l'agriculture, la présence d'argiles à silex et de la craie et les processus qui contrôlent la chimie de la craie comme la dissolution, l'échange ionique et le rôle du stockage (Barhoum et al., 2014).

Ces approches géochimiques régionales et locale fondées sur des analyses statistiques (ACP) sur la craie de Haute-Normandie complètent les études menées sur la craie du Bassin Parisien et Londonien présentant des analyses des processus majeurs qui contrôlent la chimie des eaux souterraines de la craie en se fondant notamment sur l'étude des rapports Ca/Sr, Mg/Sr et des isotopes du strontium et des isotopes de l'eau (Brenot et al., 2008; Cary et al., 2014; Edmunds et al., 1987; Edmunds et al., 2003; Edmunds and Smedley, 2000; Gourcy and Brenot, 2011; Kloppmann et al., 1996; Kloppmann et al., 1998; Négrel and Petelet-Giraud, 2005).

L'ACP de la chimie des eaux souterraines atteint ses limites lorsqu'il s'agit par exemple d'étudier le comportement d'un élément trace dont la présence dans les eaux souterraines est liée aux conditions géologiques et hydrogéologiques.

14.1.2. Les faciès majeurs des eaux du bassin versant de l'Iton

Le diagramme de Piper permet de faire apparaître les facies majoritaires des eaux étudiées (Illustration 199). Dans le bassin versant de l'Iton, les eaux sont toutes bicarbonatées calciques, faciès typique des eaux issues de l'aquifère de la craie. La composition des eaux de surface est très similaire à celle des eaux souterraines. Les points d'eau sélectionnés ne comprennent pas

les points de suivi des ICSP[26], tels que les résultats des analyses réalisées au droit du CET[27] du Boulay Morin (01502X0078/F2). Les concentrations des éléments sont également étudiées dans des diagrammes binaires avec celles des chlorures comme référence. Les chlorures sont en effet un ion allochtone considéré comme conservatif. Les diagrammes binaires concernant les eaux de surface (Illustration 200) et souterraines (Illustration 201) sont discutés en parallèle.

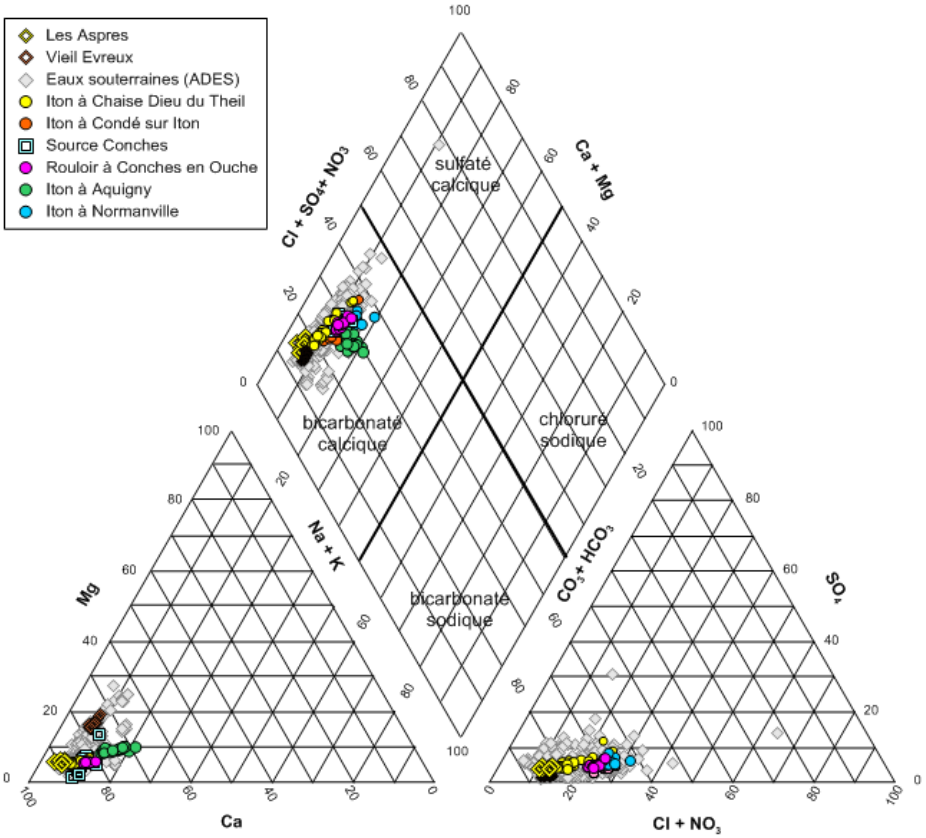


Illustration 199 : Diagramme de Piper des eaux de surface de l'Iton et du Rouloir, d'après les données de l'AESN sur la période 2001-2013 et des eaux souterraines de 1992 à 2013, d'après les données ADES extraites sur le bassin versant de l'Iton (les losanges représentent les suivis eaux souterraines et les ronds les suivis eaux de surface)

Comparaison avec la qualité des eaux de bassins versants proches

Les concentrations en chlorures, calcium, magnésium et sulfates mesurées dans la nappe de la craie du bassin versant de l'Iton sont très comparables à celles de la nappe de la craie dans le bassin versant de la Bassée (Gourcy and Brenot, 2011) ou de la craie dans la Somme (Négrel and Petelet-Giraud, 2005). Elles sont en revanche inférieures à celles mesurées dans la nappe de la craie à Lille (Cary et al., 2014) en raison d'un contexte géologique différent concernant les formations sus-jacentes à la craie.

Les eaux de surface (Iton et Rouloir) ont une composition chimique intermédiaire entre celles de la Seine et de la Somme. Elles sont chimiquement très proches de celles de la nappe de la craie aux différents points de mesures du bassin versant de l'Iton.

[26] **I**nstallations **C**lassées et **S**ites **P**ollués

[27] **C**entre d'**E**nfouissement **T**echnique

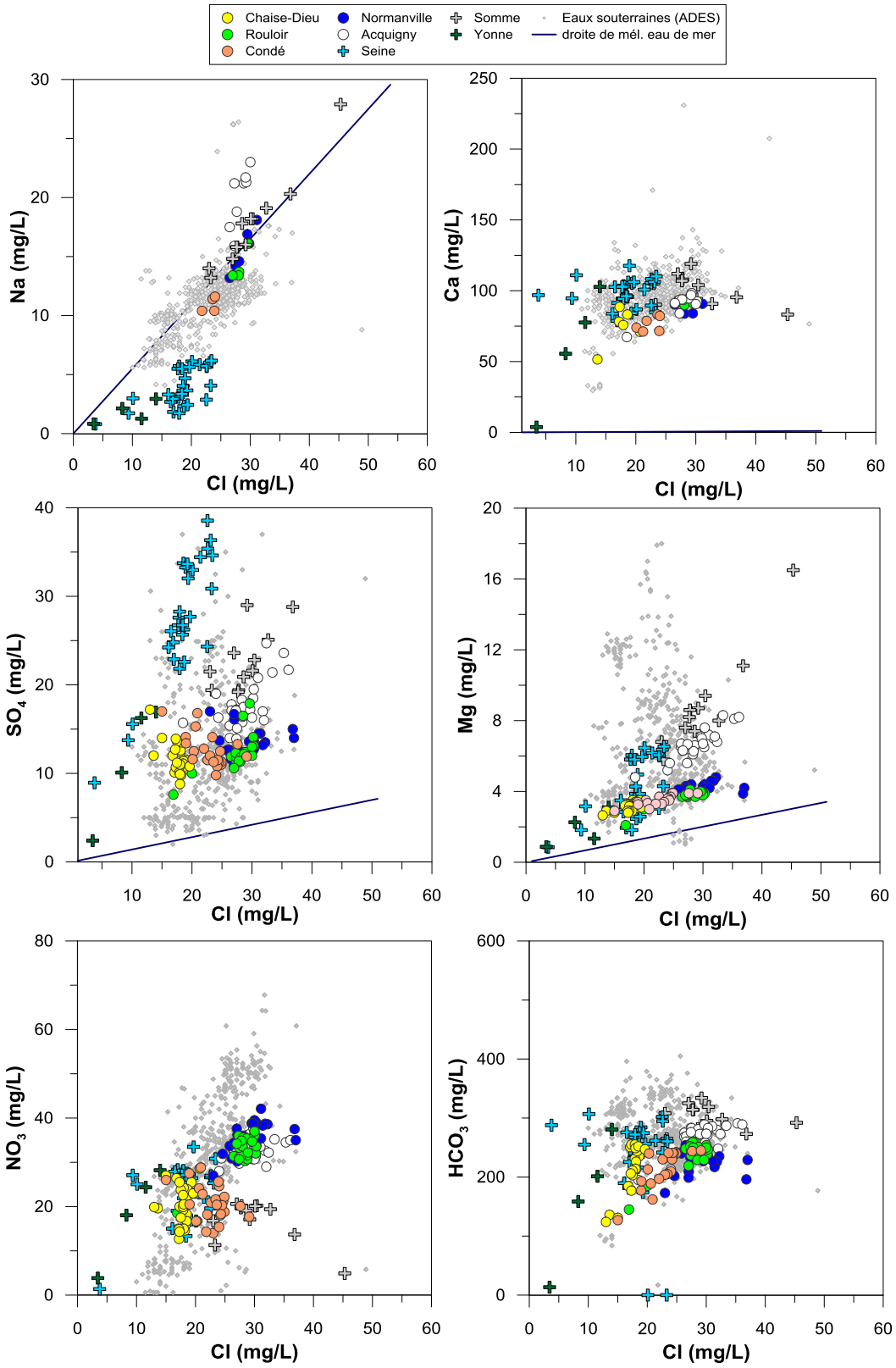


Illustration 200 : Diagrammes binaires des éléments présents dans les eaux de surface du bassin versant de l'Iton et d'autres bassins voisins : Seine et Yonne (Roy et al., 1999) et Somme (Négrel and Petelet-Giraud, 2005), et eaux souterraines du bassin versant de l'Iton (ADES), représentées pour faciliter la comparaison avec la figure suivante

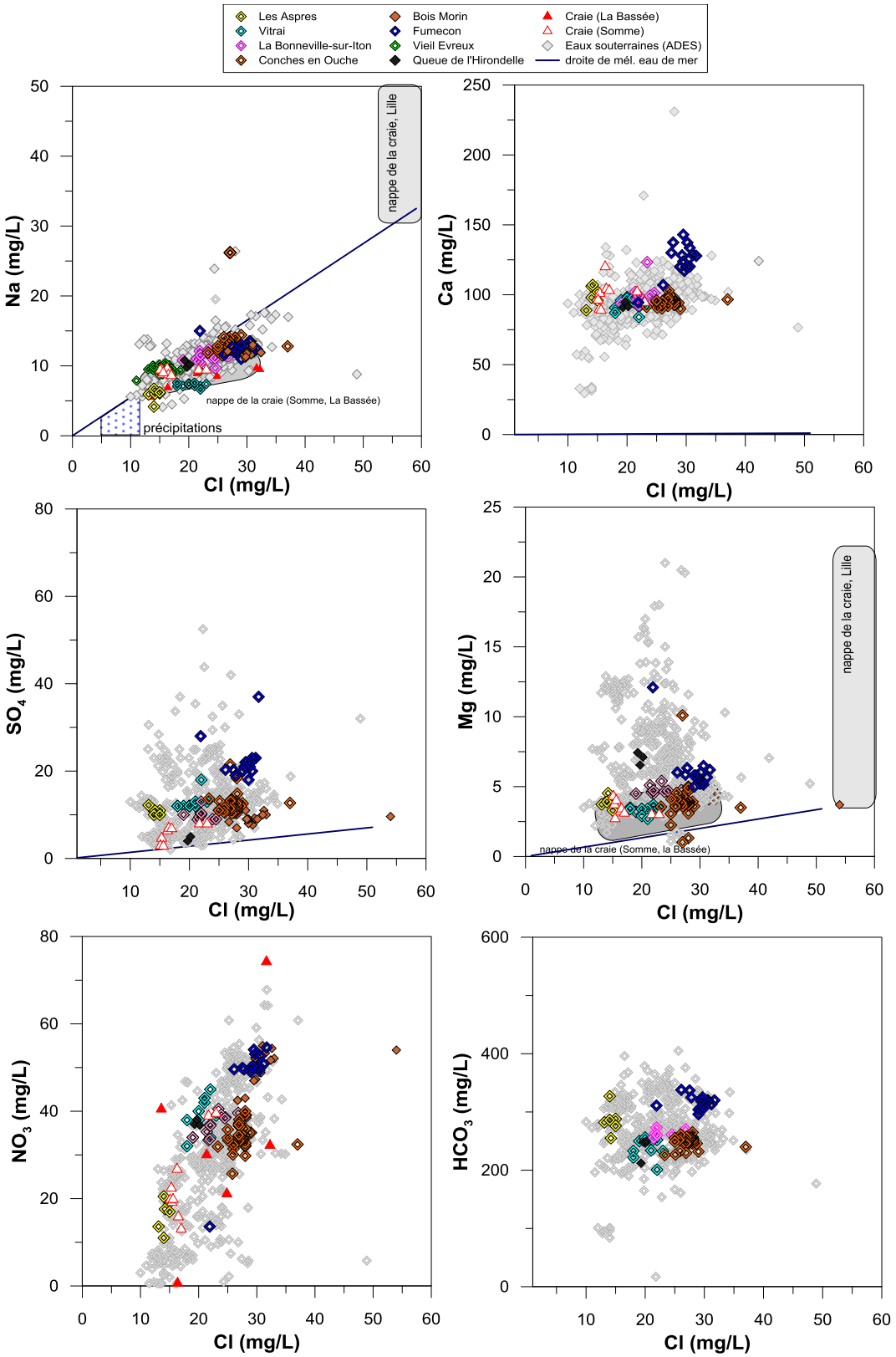


Illustration 201 : Diagrammes binaires des éléments présents dans les eaux souterraines du bassin versant de l'Iton (ADES)

Chlorures et sodium

En l'absence d'évaporites, les sources de chlorures dans l'aquifère de la craie sont les eaux de pluie et les activités anthropiques (eaux usées domestiques, lixiviats des décharges, engrais, sels de déglaçage, etc.). Les concentrations en Cl dans l'eau de pluie sont proches de 22 mg/L dans toutes les régions côtières, et diminuent à 4,2 mg/L à 50 km dans les terres. En appliquant un facteur de concentration lié à l'évapotranspiration, F= P/(P-E) qui varie entre 1,3 en hiver et 3 en été ainsi qu'il a été calculé pour la Somme (Amraoui et al., 2002), on obtient des valeurs de chlorures provenant des eaux de pluie variant entre 5 et 12 mg/L. L'ensemble des eaux de nappe ont des teneurs supérieures à cette valeur dérivée des pluies. C'est également le cas dans les eaux de surface, ce qui témoigne de perturbations d'origine anthropique.

Les teneurs en sodium dans la nappe sont relativement faibles (de 4,1 à 26,4 mg/L) et montrent des variations significatives. Dans le diagramme Na vs. Cl, une majorité de points se situe sous la droite de dilution de l'eau de mer avec un rapport Na/Cl inférieur à celui de la mer (0.87), ce qui signifie un excès de Cl par rapport au Na, et donc un apport anthropique. Les points au-dessus de la droite de dilution montrent en revanche un excès de Na qui peut provenir du lessivage des formations sus-jacentes en particulier les argiles à silex.

En amont aux Aspres, les eaux de nappe sont les moins concentrées en Cl et Na. Leur proximité par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer peut laisser penser que Cl et Na proviennent essentiellement des dépôts atmosphériques marins, complétés par une petite part anthropique. Les points d'eaux souterraines montrent des concentrations en Cl de 14 mg/L proches de celles apportées par les pluies, ce qui implique que les sources d'origine agricole contribuent encore peu en lien avec la présence des Sables du Perche qui favorise l'élevage et les forêts plutôt que les cultures.

Une augmentation amont-aval des concentrations en éléments majeurs est notable dans la nappe, en particulier en Cl (Illustration 202). De façon intéressante, les eaux souterraines parmi les plus concentrées en chlorures (22 à 32 mg/L) sont les eaux du point 01497X0010/P de Bois Morin - Ferrieres-Haut-Clocher (plateau en rive gauche). Ces valeurs traduisent la forte influence des activités agricoles.

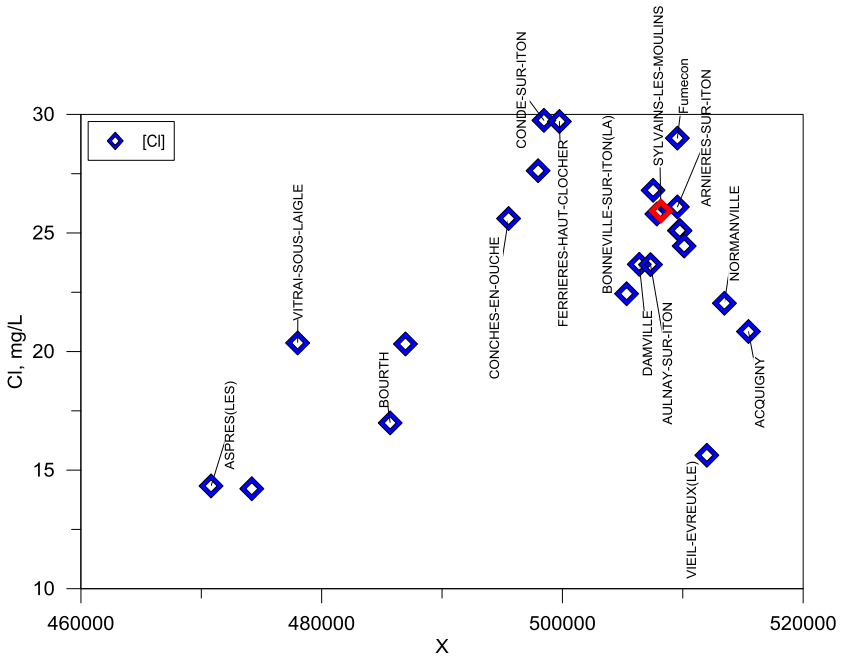


Illustration 202 : Teneurs en chlorures dans les eaux souterraines d'amont en aval dans le bassin versant de l'Iton (les points sont localisés sur cette figure en fonction de l' abscisse X (en mètres) de leur coordonnées géographiques (en lambert 93), ce qui, étant donné l'orientation du bassin versant, permet de les classer gloablement dans un sens amont/aval)

Pour les eaux de surface, les données qualité disponibles de l'Iton aux Aspres ne concernent que 2013 et ne présentent pas de mesures des éléments majeurs, mais 5 mesures de conductivité électrique variant entre 157 (03/2013) à 410 µS/cm (08/2013). Cette faible minéralisation est également à relier à la présence des Sables du Perche. Bien que nous n'ayons que peu de données pour les hautes-eaux pluriannuelles, il est possible de dire que les moyennes des teneurs en Cl en septembre (basses-eaux saisonnières) entre 2005 et 2012 (basses-eaux pluriannuelles) et pour les hautes-eaux pluriannuelles dont nous ne disposons que de l'année 2003 (avril) sont plus fortes en période de basses eaux, c'est-à-dire lorsque la contribution de la nappe à la rivière est la plus forte (Illustration 203). Le manque de données[28] temporelles ne permet pas de pousser l'analyse.

[28] *L'étude des variations de la composition chimique de la nappe de la craie en fonction du cycle hydrologique permettrait de définir les concentrations minimales et maximales en périodes de hautes-eaux et de basses-eaux.*

Une première sélection a été réalisée comme suit :

- *Sélection des valeurs pour chaque mois de septembre entre 2005 et 2012 afin d'obtenir une valeur de basses eaux pluriannuelles et saisonnières,*
- *Sélection des valeurs pour les mois de février-mars-avril entre 1999 et 2004 afin d'obtenir une valeur de hautes eaux pluriannuelles et saisonnières.*

A chaque point d'eau souterraine, les données disponibles sont insuffisantes pour réaliser des moyennes ou comparer les valeurs HE et BE. Pour un point d'eau, une seule date de mesure

clip	Moyenne Cl BE pluriannuelles saisonnières (septembre)	Moyenne Cl HE pluriannuelles saisonnières (avril)
CHAISE-DIEU	18,2	18,4
CONDE	25,7	22,6
ROULOIR	27,6	26,5
NORMANVILLE	30,7	25,8
ACQUIGNY	33,2	26,6

Illustration 203 : Moyenne des teneurs en Cl (en mg/L) pour les basses eaux saisonnières (2005-2012) et pluriannuelles dans les eaux de l'Iton (données AESN)

Dans le graphique Na vs. Cl, les eaux de surface ont une composition chimique intermédiaire entre celles connues de la Seine et de la Somme. Les eaux sont très proches de la droite de dilution de l'eau de mer, avec un comportement semblable à celui des eaux souterraines. Les eaux de l'Iton les plus pauvres en Na et Cl sont mesurées à Chaise-Dieu-du-Theil tandis que les eaux les plus enrichies en Na et Cl proviennent d'Acquigny, suivant ainsi une logique amont-aval. Une source significative de Cl et Na contribue au stock présent dans les eaux de l'Iton, et peut être attribuée à l'agriculture et inclure les engrais et les épandages de lisier.

Calcium et magnésium

Les teneurs en calcium dans les eaux souterraines proviennent essentiellement de la dissolution de la calcite de la craie. La variabilité des teneurs en Ca est importante (de 30 à 150 mg/L), avec seuls deux points montrant des teneurs supérieures à 150 mg/L. Il n'existe pas de variation notable en Ca entre l'amont et l'aval du bassin dans les eaux souterraines à proximité de l'Iton : la moyenne des teneurs en Ca est de 96 +/- 5,6 mg/L à l'amont aux Aspres, et de 99 +/- 3,6 mg/L à l'aval à Acquigny. En revanche dans les eaux de surface, il existe une légère variation entre l'amont et l'aval avec une moyenne de 81,5 +/- 12 mg/L à Chaise-Dieu, de 86,8 +/- 6 mg/L à Normanville et 92,6 +-1 9 mg/L à Acquigny.

Les moyennes des teneurs dans la nappe de la craie sont seulement très légèrement supérieures à celles mesurées dans l'Iton et le Rouloir (Chaise-Dieu du Theil : 81 mg/L ; Le Rouloir 84 mg/L, Normanville 86 mg/L). Ceci peut être l'indice de mélanges importants entre les eaux de surface et les eaux de nappe dans les points d'eau proche de l'Iton.

Le magnésium peut provenir de la dissolution de la craie et en particulier dans des zones où les temps de résidence de l'eau sont longs, mais également provenir du lessivage des argiles tertiaires (Cary et al., 2014; Valdes et al., 2007) ou de la salinité. Les teneurs en Mg dans les eaux souterraines du bassin versant de l'Iton varient entre 1 et 20 mg/L. Une grande partie des points d'eau souterraine d'intérêt proche de l'Iton (les Aspres, Bonneville…) ont des teneurs inférieures à 5 mg/L. Ces valeurs sont très proches de celles des eaux de l'Iton (moyenne de 4,47 mg/L) et du Rouloir (3,7 mg/L). Les valeurs les plus importantes se trouvent dans les points d'eau d'Acquigny (01246X0042/F en 1996 et 2002) et d'Aunay-sur-Iton (01498X0062/F15). En l'absence de relation entre Mg et Cl, les fortes valeurs peuvent

peut être disponible (comme aux Aspres en septembre 2010 pour 02144X0046/F2), ou bien 2 analyses sont disponibles pour les HE et aucune pour les BE (01498X0001/P à la Bonneville-sur-Iton).

témoigner de temps de résidence plus long et donc d'un transport des eaux de la nappe dans une porosité matricielle.

Dans l'Iton, les plus fortes valeurs en Mg (6-8 mg/L) sont mesurées à la station d'Acquigny.

Comme pour les teneurs en magnésium, les teneurs en sulfates sont supérieures à celles issues d'une simple dilution d'eau de mer, pour les eaux de surface et souterraines. Un excès de sulfates est noté par rapport aux chlorures. En l'absence d'évaporites, les sulfates peuvent provenir du gypse utilisé pour les amendements.

Nitrates

Les concentrations en nitrates des eaux souterraines du bassin versant de l'Iton sont également comparables à celles mesurées dans la craie du bassin parisien et londonien, avec des concentrations variant entre des valeurs faibles à fortes (0,2 à 70 mg/L). L'impact des activités anthropiques (agriculture, assainissement) sur les eaux de la nappe de la craie est donc très net.

Le point d'eau de Bois Morin présente parmi les plus fortes teneurs en nitrates (38 à 55 mg/L). Les plus basses teneurs en nitrates (0,5 à 5 mg/L) sont mesurées dans les eaux souterraines en amont du bassin versant à Ecorcei (02143X0015/F), Bourth (02151X0001/PC et 02151X0004/F), Pullay (02152X0001/PC), à Cheronvilliers (01795X0001/F situé entre deux forets) dans une zone où l'épaisseur des argiles à silex varie entre 14 et 30 m. Ces concentrations faibles en nitrates pourraient témoigner d'un processus de dénitrification. Ceci sera développé dans le chapitre suivant.

Quant aux eaux de surface, les teneurs en nitrates augmentent de l'amont vers l'aval. Les teneurs les plus faibles sont mesurées à l'amont à la Chaise-Dieu et Condé (autour de 15 à 25 mg/L). Les teneurs les plus élevées sont mesurées à l'aval sur le Rouloir (18 à 37 mg/L), à Normanville (27 à 42 mg/L) et Acquigny (28 à 37,7 mg/L). La gamme de variation des teneurs en nitrates dans les eaux de surface est identique à celle des points d'eaux souterraines proches de l'Iton (10-40 mg/L), confirmant l'hypothèse de mélange entre eaux de surface et souterraines.

14.1.3. Evolution de la composition des eaux de surface en fonction du débit

Les Illustration 204 et Illustration 205 mettent en évidence le comportement de groupes d'éléments en fonction du débit mesuré à Bourth en amont et de Normanville en aval :

- Les teneurs en chlorures, sodium, calcium, magnésium, bicarbonates et la conductivité électrique, ainsi que celles en arsenic, AMPA, glyphosate et DEA montrent une diminution de leurs teneurs corrélée avec une augmentation du débit, indiquant l'effet de dilution des eaux en période de hautes-eaux ;
- Les teneurs en nitrates en amont à Chaise-Dieu montrent d'abord une augmentation avec le débit jusqu'à 2 m^3/s, puis une diminution ; pour Normanville, les teneurs diminuent avec le débit ;
- Les teneurs en phosphore total, potassium, sulfates et nickel augmentent légèrement avec le débit, mais les deux premiers montrent une importante dispersion des points.

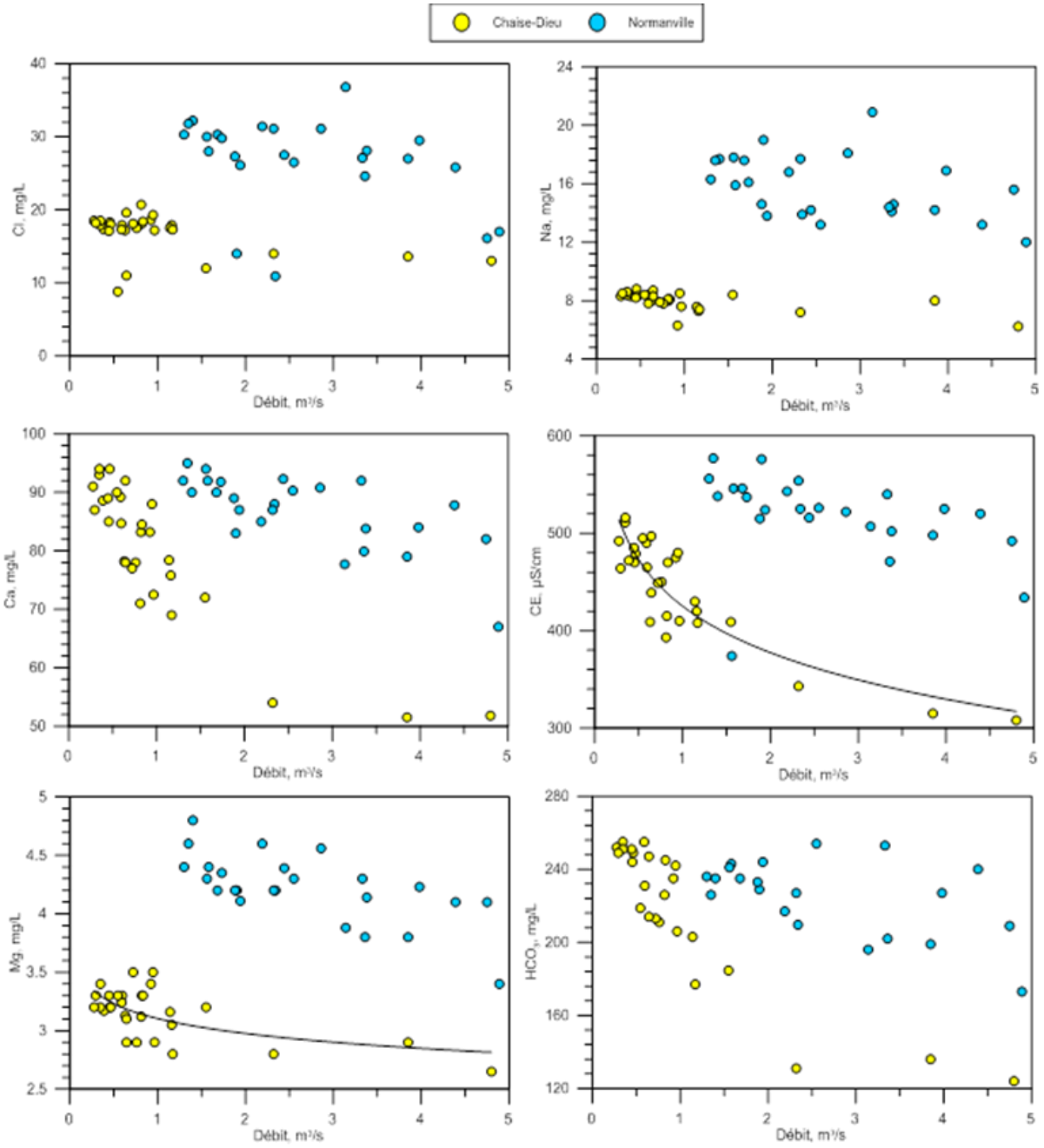


Illustration 204 : Concentrations des éléments dissous majeurs en fonction du débit de l'Iton à Bourth (proche de Chaise-Dieu-du-Theil) et Normanville pour la période 2000-2013

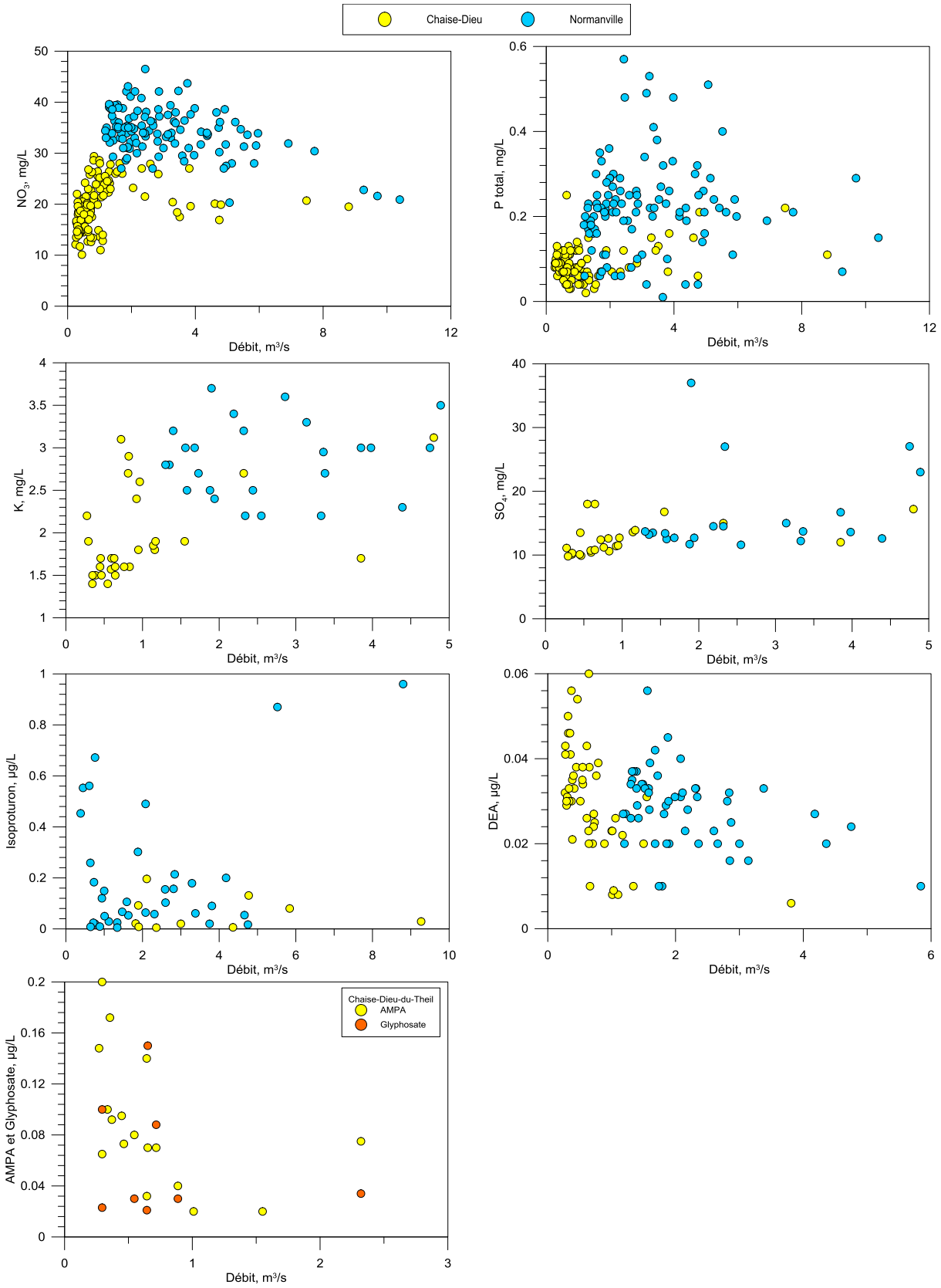


Illustration 205 : Concentrations des éléments dissous N, P et K, et sulfates en fonction du débit de l'Iton à Bourth (proche de Chaise-Dieu-du-Theil) et Normanville pour la période 2000-2013

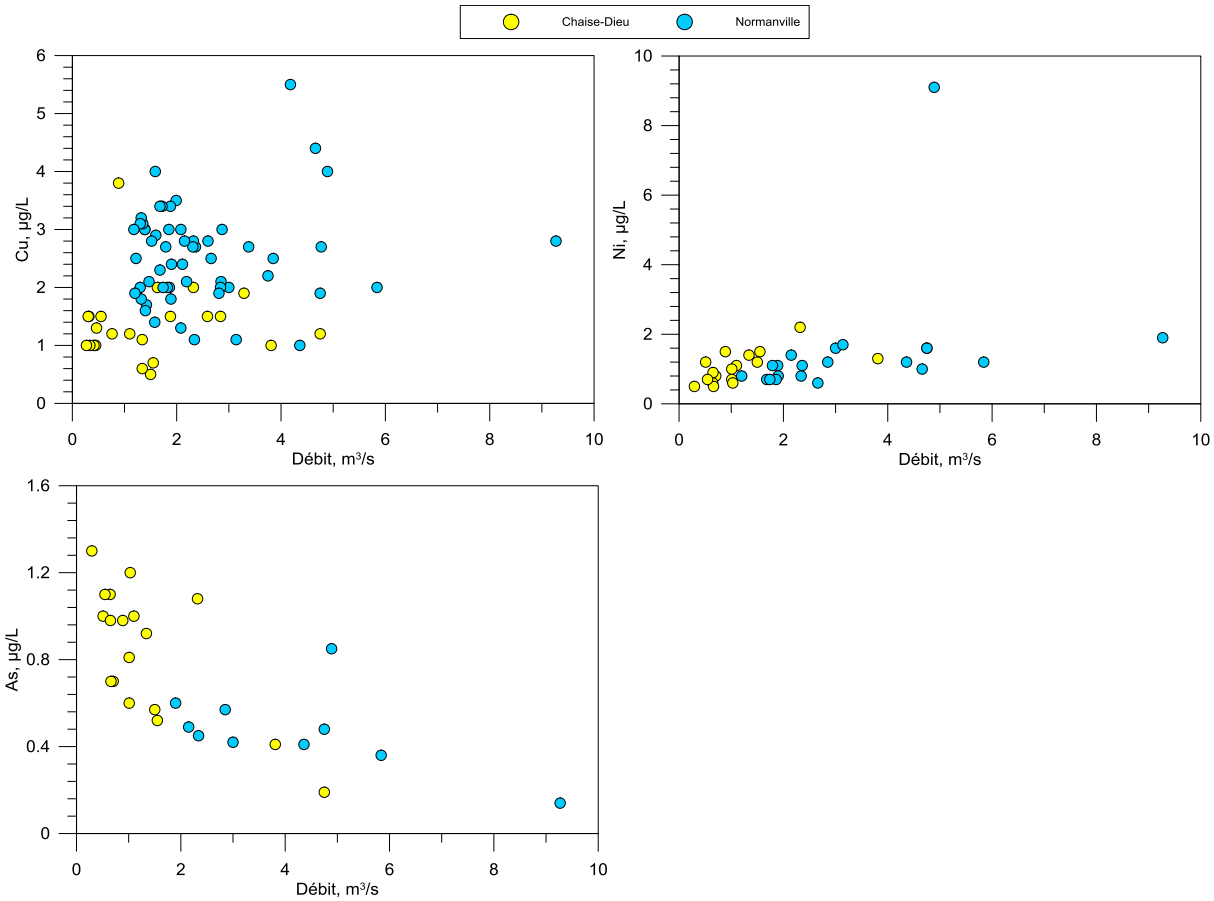


Illustration 206 : Concentrations des métaux traces dissous Cu, Ni, As, et pesticides DEA, isoproturon, AMPA et glyphosate en fonction du débit de l'Iton à Bourth (proche de Chaise-Dieu-du Theil) et Normanville pour la période 2000-2013.

14.1.4. Conditions d'oxydo-réduction

Dans l'ensemble du bassin versant, il existe une évolution entre des eaux réductrices (-200 mV < Eh < 0 mV) à des eaux oxydantes (Eh > 400 mV) (Illustration 207), la majorité des points étant semi-oxiques (Eh<200 mV). Ces conditions ont un impact important sur les espèces sensibles telles que les nitrates, le fer et le manganèse. En particulier, les valeurs de potentiel d'oxydo-réduction négatives sont le signe de la présence de processus de réduction, tel que par exemple la dénitrification. Cependant, la mesure du potentiel d'oxydo-réduction est une mesure délicate à réaliser et une faible confiance est attribuée pour ce paramètre aux valeurs bancarisées, d'origines diverses, dans la base ADES.

Pour certains points d'eau, la base ADES ne contient pas de mesure du potentiel d'oxydo-réduction (ex Sylvains les Moulins, etc).

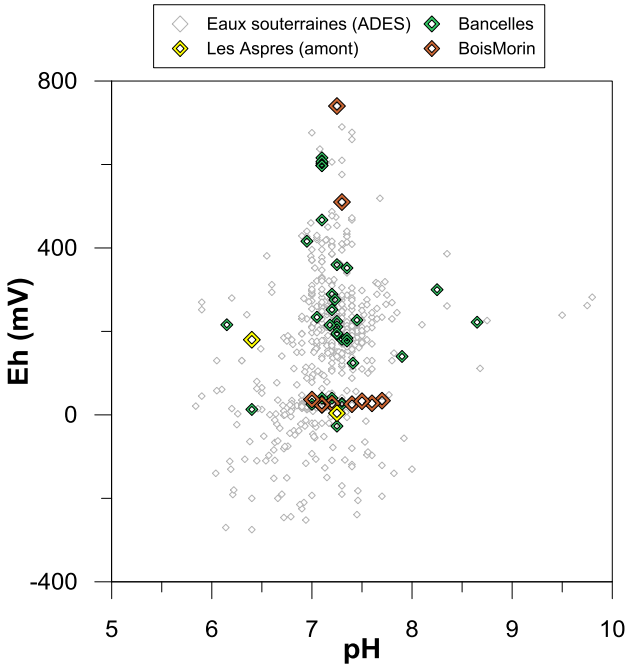


Illustration 207 : Potentiel d'oxydo-réduction versus pH dans les eaux souterraines du bassin versant de l'Iton (données ADES pour le bassin versant).

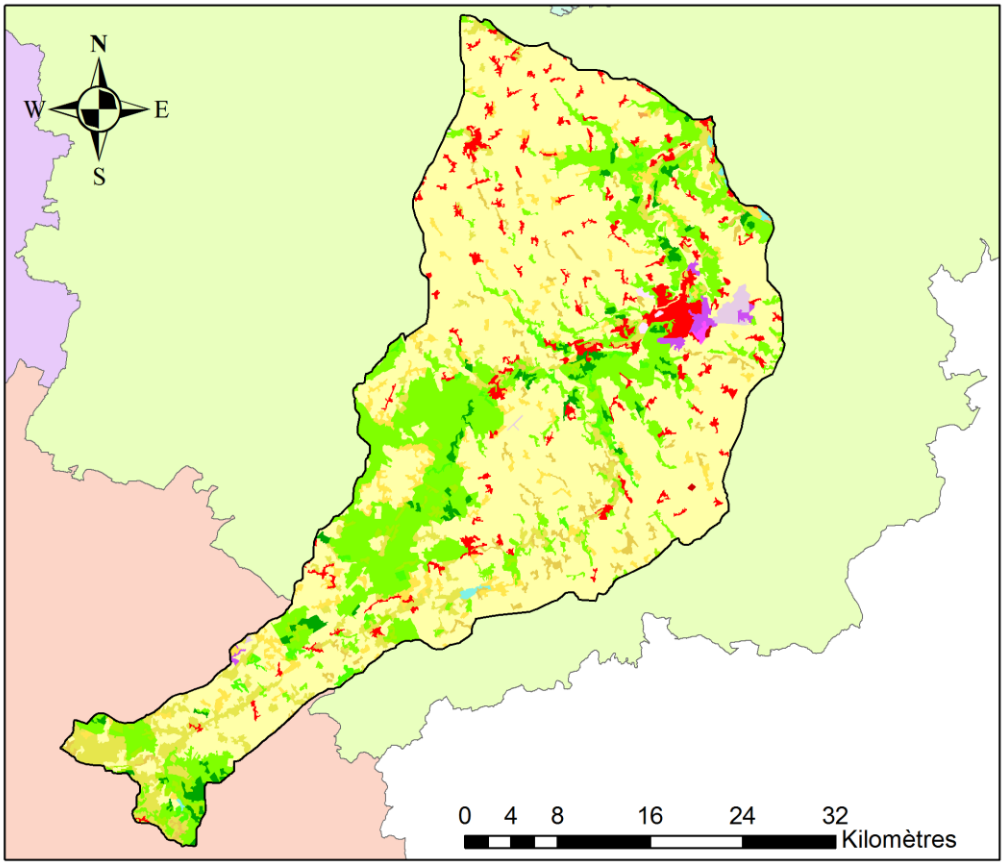
14.2. VOLET 2 : PRESSIONS EXERCEES SUR LE TERRITOIRE ETUDIE

14.2.1. Occupation du sol

D'après les données de la base Corine Land Cover (présentées à l'Illustration 208), la zone d'étude est constituée en très grande partie de territoires agricoles (plus de 70%), et plus particulièrement de terres arables (près de 60%). Le reste du territoire est constitué essentiellement par des forêts (près de 25%) et plus minoritairement par des territoires artificialisés (plus de 5%). Il est à noter également la présence de plans d'eaux épars, qui représentent moins de 1% du territoire. Le Tableau 19 présente les grands types d'occupation du sol que l'on retrouve sur la zone d'étude, ainsi que les proportions de surface occupée correspondantes.

L'essentiel des territoires artificialisés se situe en aval du bassin, notamment du fait de la présence de l'agglomération d'Evreux.

Les forêts et milieux humides sont majoritairement implantés sur les coteaux en bordure des vallées du Lême/Rouloir et de l'Iton aval. En effet, plus de 80% des forêts et milieux humides sont localisés à moins de 5 km de l'Iton ou du Rouloir.



Territoires artificialisés - Zones urbanisées
112 : Tissu urbain discontinu
Territoires artificialisés - Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication
121 : Zones industrielles et commerciales
122 : Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés
124 : Aéroports
Territoires artificialisés - Mines, décharges et chantiers
133 : Chantiers
Territoires artificialisés - Espaces verts artificialisés, non agricoles
142 : Equipements sportifs et de loisirs
Territoires agricoles - Terres arables
211: Terres arables hors périmètres d'irrigation
Territoires agricoles - Cultures permanentes
222 : Vergers et petits fruits
Territoires agricoles - Prairies
231: Prairies
Territoires agricoles - Zones agricoles hétérogènes
242 : Systèmes culturaux et parcellaires complexes
243 : Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants
Forêts et milieux semi-naturels - Forêts
311 : Forêts de feuillus
312 : Forêts de conifères
313 : Forêts mélangées
Forêts et milieux semi-naturels - Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
322 : Landes et broussailles
324 : Forêt et végétation arbustive en mutation
Surfaces en eau - Eaux continentales
512 : Plans d'eau

Illustration 208 : Occupation du sol de la zone d'étude (données : Corine Land Cover)

Occupation du sol	Pourcentage d'occupation de la zone d'étude Iton
Territoires artificialisés	5.5
Territoires agricoles	70.7
Forêts et milieux semi-naturels	23.7
Surfaces en eau	0.2

Tableau 19 : Occupation du sol et surfaces associées

14.2.2. Agriculture

Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) est un système d'information géographique mis en place en France depuis 2002. Ce registre est constitué d'îlots qui sont des regroupements de parcelles anonymes. L'Illustration 209 présente ces îlots ainsi que les types de cultures qui y sont pratiquées (pour l'année 2013), sur l'emprise de la zone d'étude.

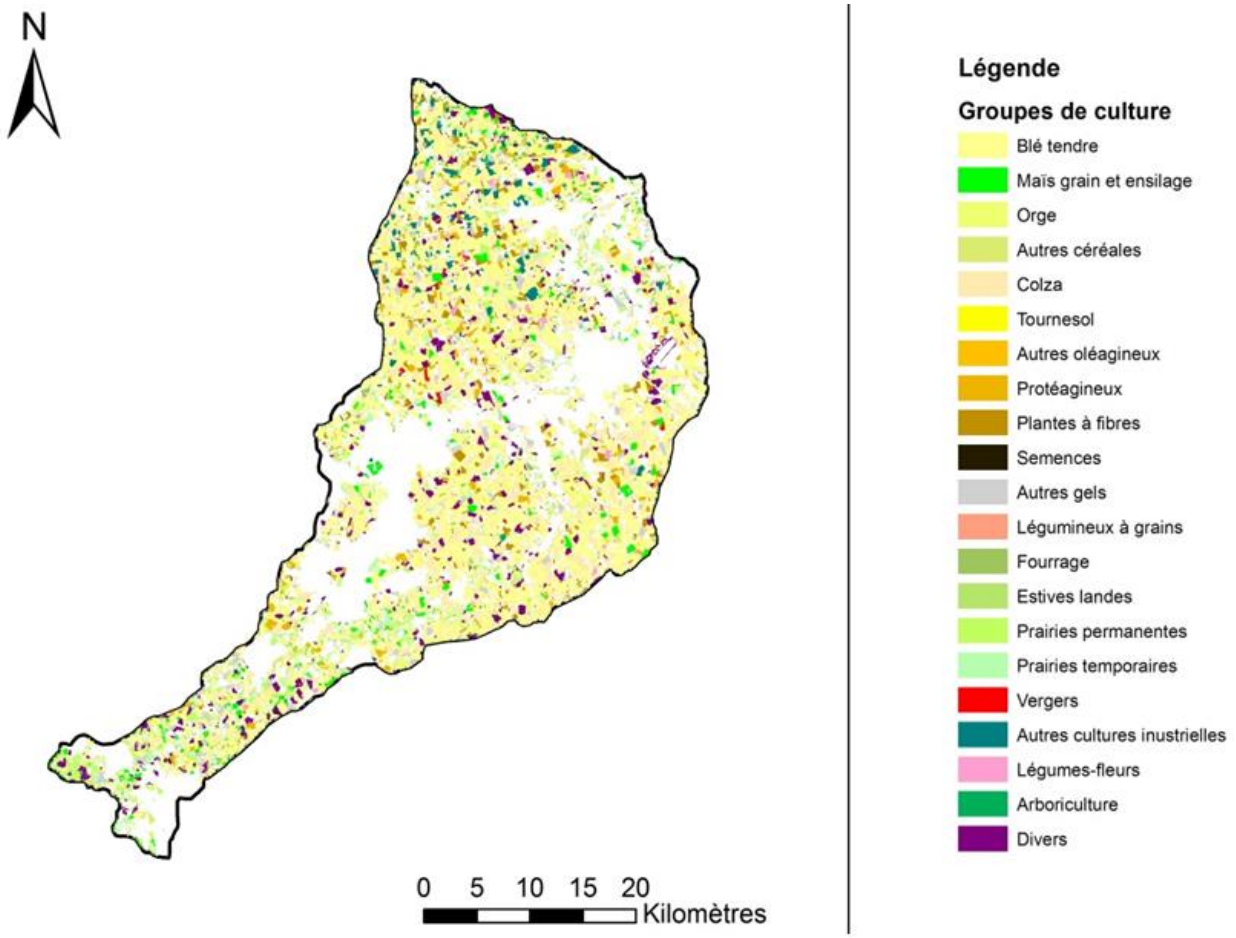


Illustration 209 : Cartographie des groupes de cultures pratiquées dans la zone d'étude par îlots PAC (données du Registre Parcellaire Graphique 2013)

L'Illustration 210 présente les groupes de cultures représentés sur la zone d'étude, et les surfaces cultivées associées. Sur l'ensemble du bassin versant, les cultures de blé tendre, colza et orge représentent plus de 77% de la surface cultivée. Les deux cultures dominantes sont le blé tendre et le colza avec respectivement 51% et 20% de la surface cultivée.

D'après la Chambre d'Agriculture de l'Eure, les principales cultures pouvant nécessiter une irrigation sont le blé, l'orge, les pois et le maïs.

Groupe de culture	Surface (hectare)	% en surface
Blé tendre	38253,08	**50,82%**
Colza	15294,13	**20,32%**
Orge	4862,27	**6,46%**
Prairies permanentes	4813,85	**6,40%**
Plantes à fibres	2534,65	**3,37%**
Protéagineux	2091,42	**2,78%**
Maïs grain et ensilage	2034,09	**2,70%**
Autres cultures industrielles	1331,54	**1,77%**
Prairies temporaires	1309,07	**1,74%**
Autres gels	1021,57	**1,36%**
Légumes-fleurs	487,55	**0,65%**
Autres céréales	476,9	**0,63%**
Divers	273,28	**0,36%**
Vergers	186,7	**0,25%**
Fourrage	166,91	**0,22%**
Semences	55,74	**0,07%**
Autres oléagineux	41,48	**0,06%**
Tournesol	21,32	**0,03%**
Arboriculture	5,62	**0,01%**
Légumineux à grains	5,15	**0,01%**
Estives landes	2,27	**0,00%**
Total	75268,59	**100,00%**

Illustration 210 : Groupes de cultures pratiquées sur le bassin versant de l'Iton et surfaces associées (données RPG 2013)

14.2.3. Impacts du drainage agricole sur la ressource en eau

Le drainage est une pratique agricole qui s'est beaucoup développée des années 1970 à 2000 notamment dans le Sud-Est du département de l'Eure afin d'améliorer les rendements agricoles dans les sols hydromorphes. En parallèle du drainage des parcelles (réalisé par les agriculteurs constitués en ASAD), des réseaux de collectes publics de ces eaux drainées ont été mis en place par des syndicats intercommunaux d'assainissement (SIA). La mise en place de ces réseaux d'assainissement public (fossé ou buses) a permis localement de développer l'assainissement pluvial des bourgs et des voiries en créant des exutoires artificiels. Ces pratiques ont été très développées notamment dans le pays d'Ouche.

Les données collectées dans le cadre de la BD drainage en cours de réalisation en Haute-Normandie (Ledun –AREAS-, David et al., -BRGM-, 2016), sont présentées à l'Illustration 211. Cette carte montre que ces pratiques ont été très développées dans toute la moitié amont des bassins versants de l'Iton et du Lème/Rouloir (pays d'Ouche) ainsi que plus localement sur le

plateau de Saint-André dans le secteur des communes de Thomer-la-Sogne/Marcilly-la-campagne.

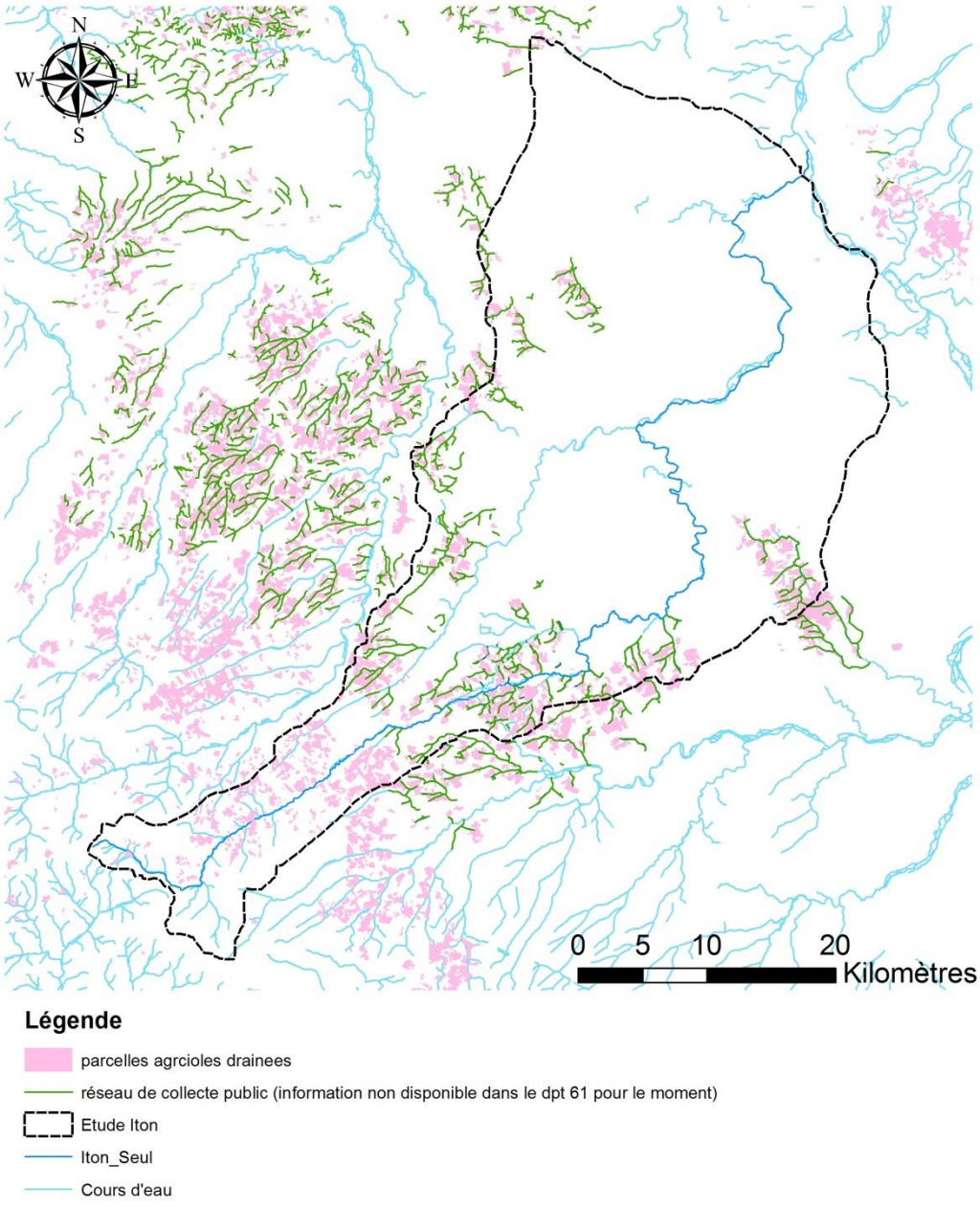


Illustration 211 : Parcelles agricoles drainées et réseaux de collecte publics des eaux drainées

Le drainage et le réseau d'assainissement agricole peuvent induire des impacts négatifs parfois mal appréhendés (Aqua-sol projets, 2004) :

- Les volumes restitués en hiver et notamment pendant la période de drainage intense sont plus élevés qu'avant drainage ;
- L'interception des eaux infiltrées peut réduire localement la recharge de la nappe, en particulier dans le cas des captages de qualité mais peu productifs sur les plateaux ;

- La continuité hydraulique créée par les réseaux d'assainissement provoque un transfert d'écoulements vers des zones d'infiltration rapide non contrôlé et constitue un vecteur potentiel de pollution (bétoires),
- La continuité hydraulique provoque un accroissement des volumes transmis vers l'aval des bassins versants. Ceux-ci peuvent être à l'origine de problèmes érosifs ou d'inondation ;
- A l'échelle de bassins versants, le cumul des débits des collecteurs et des fossés peut accroitre la fréquence des petites crues.

L'impact quantitatif du drainage est très difficile à établir (tantôt positif tantôt négatif) d'autant plus que de nombreux réseaux de drainage collectifs ont pour exutoire des bétoires. Dans ce dernier cas, l'eau soustraite à l'infiltration diffuse est injectée dans les réseaux karstiques.

C'est le cas par exemple du réseau collecteur public du plateau de Saint-André qui se rejette principalement dans 2 bétoires transformées en puits d'injections : les bétoires du parfond (B5780) et du failly (B5781) (cf. Illustration 212). Les eaux de drainage qui s'infiltrent dans le réseau karstique sont de qualité dégradée. Une analyse réalisée le 05/01/2012 sur les eaux brutes s'infiltrant dans la bétoire du parfond montre des teneurs de :

- 72,1 mg/l en nitrates
- 0,12 µg/l en chlortoluron
- 0,03 µg/l en diuron

Or le réseau karstique de la bétoire du parfond est connecté au réseau karstique capté pour l'AEP au forage de Bois Ste Cécile (01801X0042) à Sylvain-les-Moulins dans le sec Iton comme l'a montré le traçage T513 réalisé le 18/03/1997.

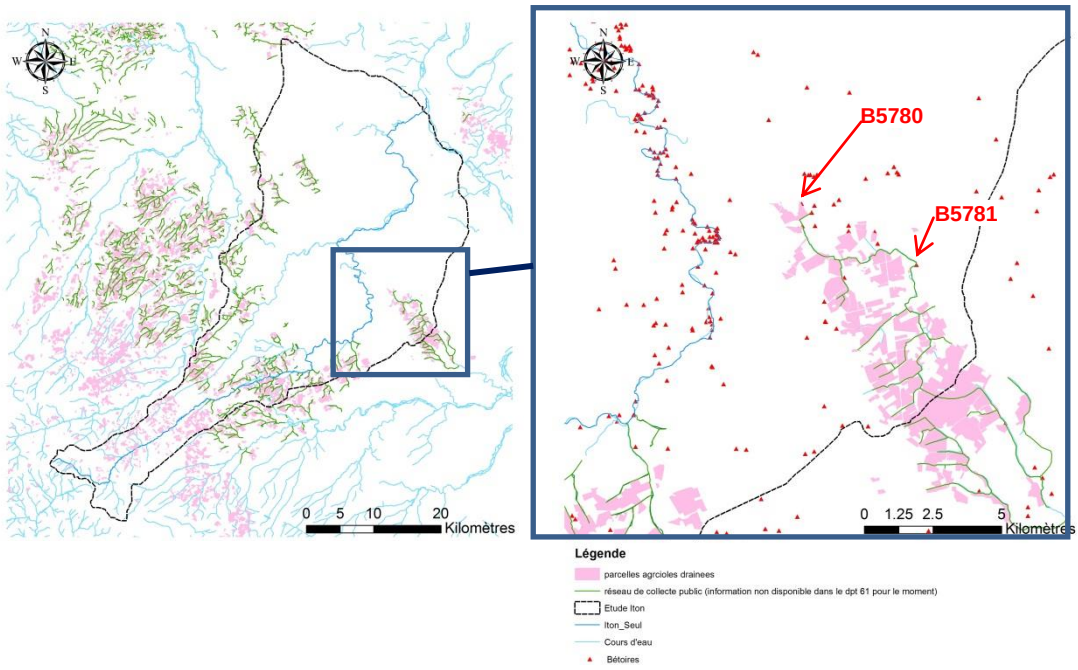


Illustration 212 : Exemple d'un réseau collecteur public de drainage agricole se rejetant dans une bétoire : les bétoires du parfond (B5780) sur la commune de THOMER-LA-SOGNE et du failly (B5781)

14.2.4. Industrie

Avec les activités agricoles, les activités industrielles constituent le principal risque de pollution des eaux souterraines et superficielles. Un inventaire de ces sites a été réalisé sur la zone d'étude. Celui-ci est présenté en Illustration 213 et regroupe :

- Les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) : installations susceptibles de causer des risques ou des dangers pour l'environnement et soumises à des réglementations particulières. Ces réglementations sont mises en application par les DREAL, ou les DDPP dans le cas des installations en lien avec l'élevage d'animaux et leur abattage (la carte fait apparaitre les ICPE du département de l'Eure uniquement) ;
- Les sites BASIAS : anciens sites industriels et activités de service, en activité ou non. Ces sites ne sont donc pas systématiquement pollués mais constituent un risque non négligeable pour l'environnement ;
- Les sites BASOL : sites et sols pollués ou potentiellement pollués. Ce sont des sites où une pollution est avérée ou très fortement probable.

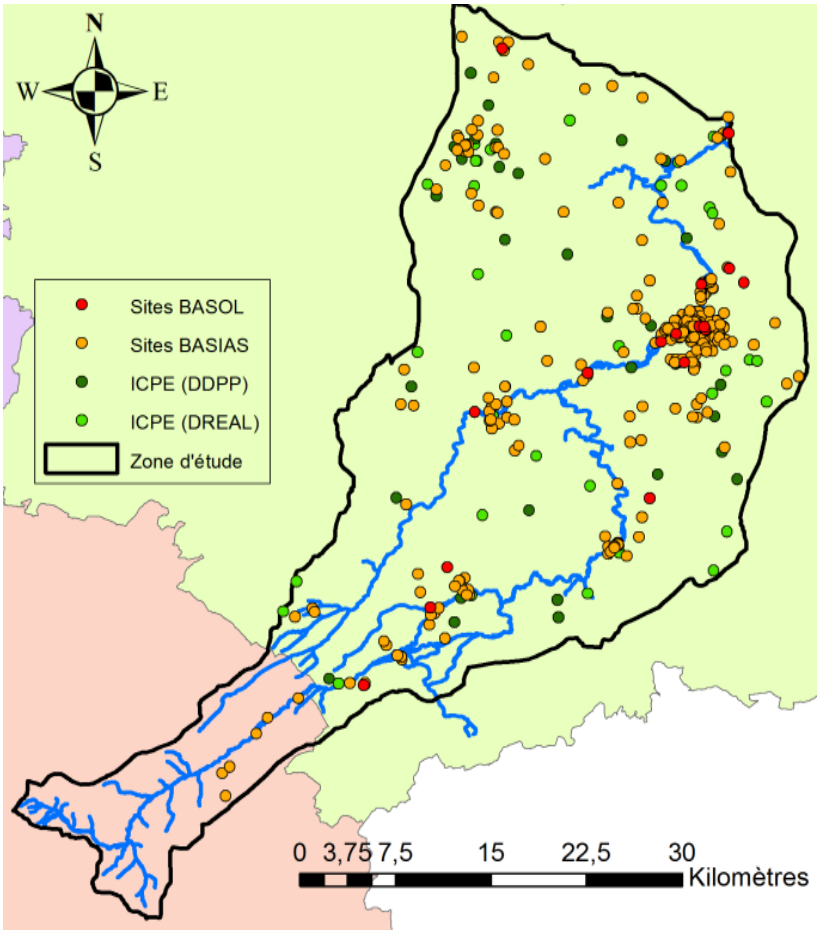


Illustration 213 : Localisation des principaux sites industriels (BASIAS, BASOL, ICPE) (attention, concernant les ICPE, la carte ne fait apparaitre que celles du département de l'Eure)

La zone d'étude comporte 345 sites BASIAS, 18 sites BASOL et 99 ICPE, dont 33 sont des élevages. La plupart des sites industriels sont concentrés dans les vallées le long des cours

d'eau, et en particulier autour des villes les plus importantes, telles qu'Evreux, Le Neubourg ou Conches-en-Ouche. En outre, la partie amont du bassin comporte moins de sites industriels que le reste de la zone d'étude. En effet, même si la partie ornaise du bassin n'a pas fait l'objet d'un recensement des ICPE, celle-ci est très rurale et ne comporte que 6 sites, classés BASIAS. Les sites BASOL représentent les risques de pollution les plus importants. Ceux-ci, bien que présents sur toute la zone d'étude, sont majoritairement situés dans l'agglomération Ebroïcienne.

Du fait de leur localisation majoritaire en vallée, les sites industriels constituent d'importantes sources potentielles de pollution de l'eau. En effet, ils sont souvent à proximité des cours d'eau et pratiquent parfois des rejets directement dans le réseau hydrographique. De plus, une pollution du sol dans une zone de vallée peut entraîner un important panache de pollution au sein des eaux souterraines car ces zones sont généralement très transmissives (importante fissuration du terrain).

14.3. VOLET 3 : ASPECT QUALITE DES EAUX – BILAN NITRATES

14.3.1. Le bore comme traceur de mélanges avec les eaux usées

Le bore dans les eaux de surface et souterraines provient essentiellement des eaux usées, des précipitations et des embruns marins, et des interactions avec les minéraux silicatés.

Les teneurs en Bore les plus importantes ont été mesurées dans les eaux souterraines à Conches-en-Ouche (01497X0014/SO) en 2007, probablement dûs à des rejets de la station d'épuration des eaux de Conches-en-Ouche dans l'Iton. Depuis cette date, les teneurs sont constantes et inférieures à 15 µg/L, ce qui est faible (Illustration 214). Quelques teneurs plus élevées sont mesurées dans la nappe sur les plateaux en l'absence de STEP, à la fois en rive gauche (2 points) et en rive droite (1 point) de l'Iton. La présence des argiles à silex sur les plateaux favorise l'échange de bore entre la solution aqueuse et la phase solide, le bore ayant tendance à se fixer sur les argiles, mais également les interactions eau-roche dans l'aquifère, pouvant entrainer une libération du bore en solution.

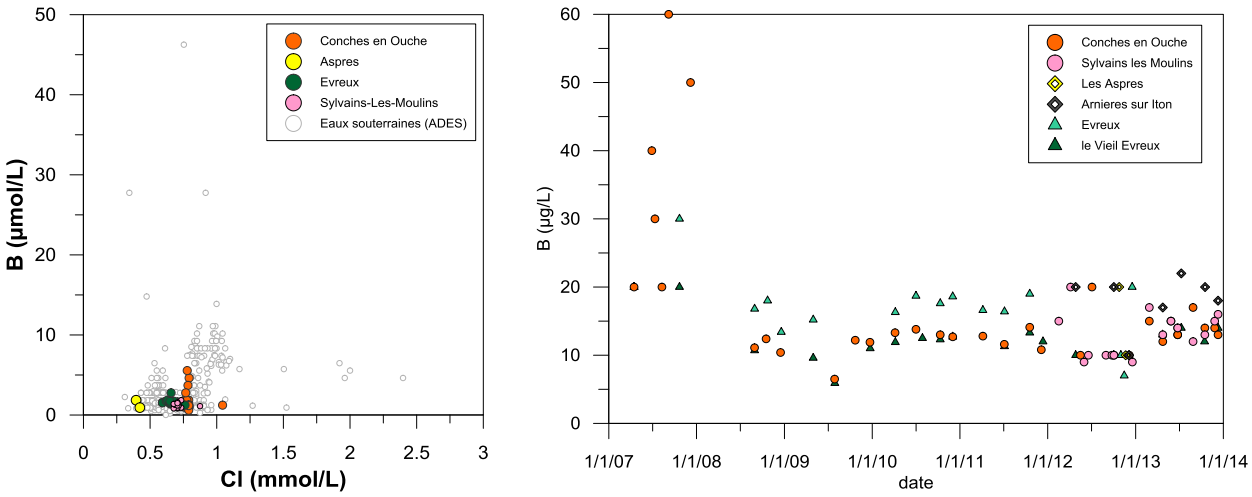


Illustration 214 : Teneurs en bore et en chlorures dans les eaux souterraines du bassin versant de l'Iton. Il n'existe pas de suivi en Cl dans les eaux de surface. Seules les données postérieures à 2007 sont reportées.

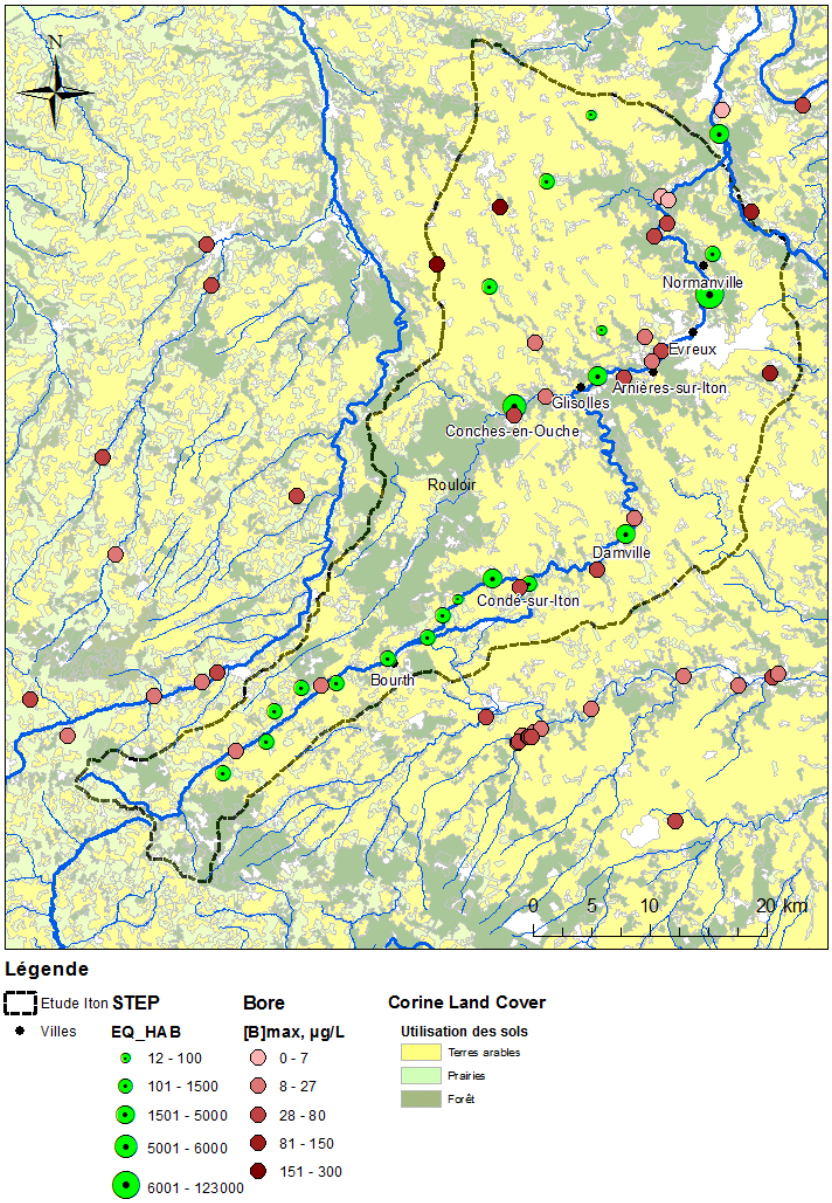


Illustration 215 : Localisation des stations d'épuration (STEP) et concentrations maximales en Bore mesurées dans les eaux souterraines. Les données en Bore dans les eaux de surface n'étaient pas disponibles dans les données fournies par l'AESN.

14.3.2. Les nitrates dans les eaux souterraines

Dans les eaux de surface du bassin versant de l'Iton, en 2013, les teneurs en nitrates ont varié entre 4,4 (Les Aspres) et 39 mg/L (le Rouloir à Conches en Ouches). Il n'est pas étonnant que la valeur maximum soit observée à Conches-en-Ouches ; en effet le Rouloir est l'émergence d'un système karstique (du Lème/Rouloir), les teneurs sur ce cours d'eau sont donc celles d'une eau souterraine.

D'après les données disponibles, les teneurs en nitrates dans les eaux souterraines ont varié entre 10 et 60 mg/L, les plus faibles teneurs ayant été mesurées à l'amont du bassin versant. Certains points excèdent donc la limite de 50 mg/L pour les eaux destinées à l'alimentation en eau potable. On observe une augmentation des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines

de l'amont de l'Iton (Aspres, Vitrai), où les teneurs sont inférieures à 20 mg/L, vers l'aval où les teneurs peuvent atteindre 60 mg/L (Illustration 216). Les teneurs maximales en nitrates ont été mesurées à Roman au point d'eau 01798X0006/P (Illustration 217).

Plus précisément, la nette augmentation des teneurs en nitrates se localise entre l'amont et l'aval de Condé-sur-Iton, sur les deux rives, et semble refléter une évolution de l'occupation des sols. A l'amont dans le Perche, sur les sables cénomaniens, les pairies et forets sont dominantes et les eaux de surface et souterraines montrent des teneurs en nitrates inférieures à 20 mg/L. Le caractère ruisselant des formations superficielles constitue une protection de la nappe vis-à-vis des polluants et implique des flux moindres vers les eaux souterraines, contribuant à expliquer les faibles teneurs dans les zones plus agricoles.

A l'aval des Aspres et essentiellement vers Condé-sur-Iton, de plus fortes teneurs en nitrates sont mesurées dans les eaux de surface et souterraines. Dans cette zone, l'agriculture intensive devient majoritaire et les cultures dominantes (blé tendre, colza et orge) reçoivent une forte quantité d'intrants, dont des engrais azotés.

Les forêts sont nombreuses dans le bassin versant et notamment à la transition entre l'Orne et l'Eure (Illustration 216) telle que la forêt de Bourth de la haute vallée de l'Iton qui s'étend en amont de la Chaise Dieu jusqu'à Conches. La forêt se développe principalement dans le fond de vallée du Lème/Rouloir et le sol se développe sur les argiles à silex. De manière générale, dans les forêts, les sources de nitrates sont faibles et les eaux souterraines y montrent des concentrations faibles, lesquelles peuvent également être favorisées par la présence de conditions réductrices entrainant la dénitrification des eaux.

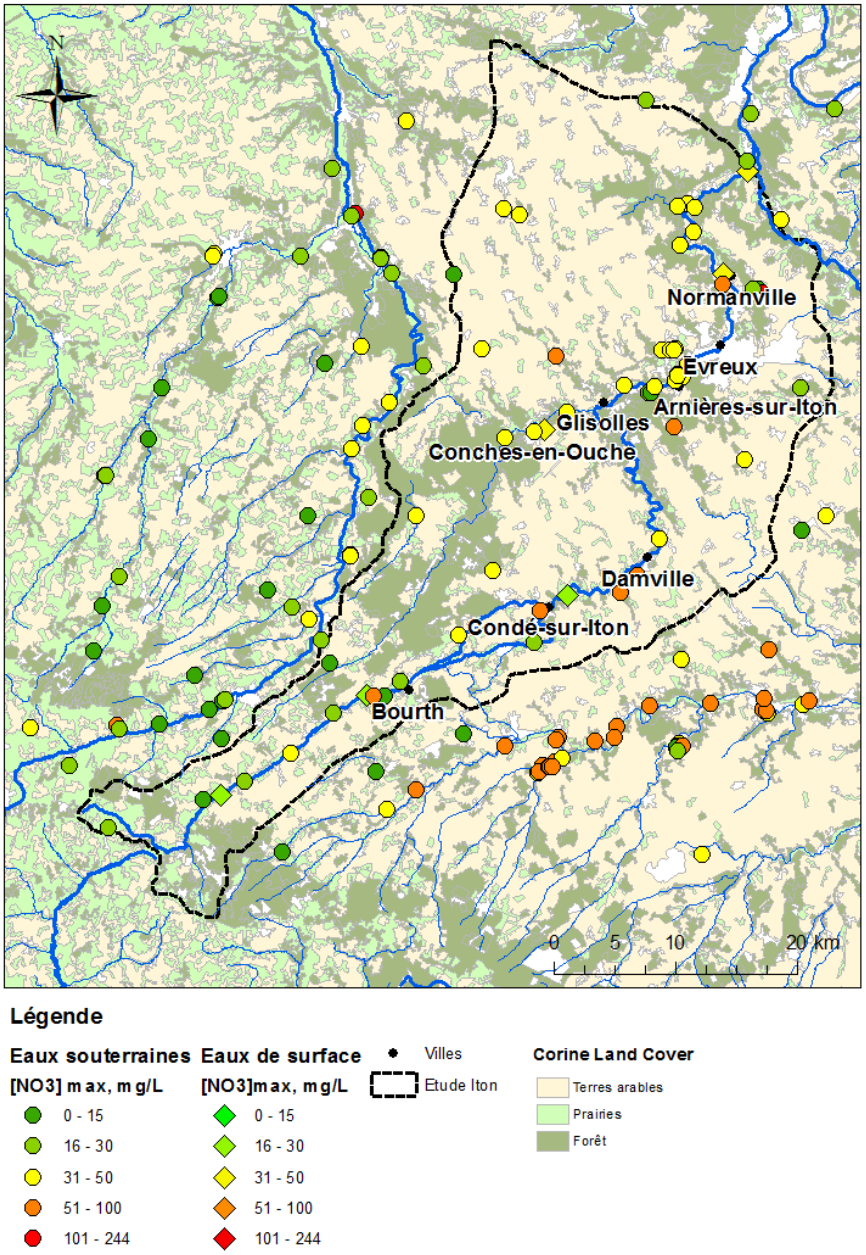


Illustration 216 : Carte des teneurs maximales en nitrates dans les eaux souterraines et les eaux de surface du bassin versant de l'Iton et de ses voisins, ainsi que de l'utilisation des sols.

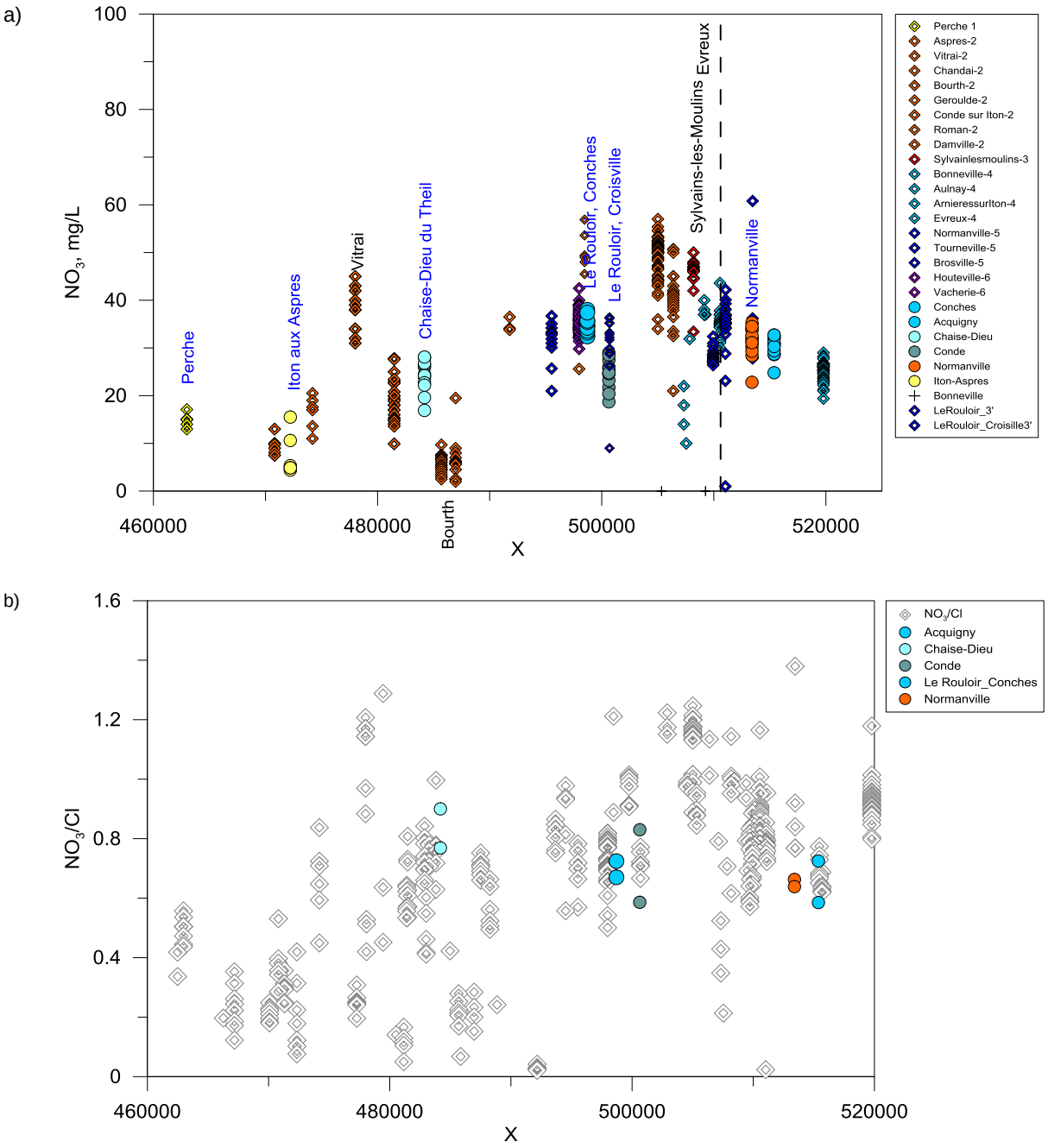


Illustration 217 : Transect amont-aval des gammes de variation a) des teneurs en nitrates et b) du rapport NO_3/Cl dans les eaux souterraines et eaux de surface (les points sont localisés sur cette figure en fonction de l' abscisse X (en mètres) de leur coordonées géographiques (en lampbert 93), ce qui permet de les classer gloablement dans un sens amont/aval).

La représentation des chroniques des teneurs en nitrates dans les eaux de surface et souterraines sur un transect amont-aval permet de montrer l'amplitude non négligeable de variations spatiales et temporelles (Illustration 217). L'augmentation des teneurs en nitrates d'amont en aval jusqu'à Sylvains-les-Moulins est tout à fait semblable à celle observée pour les chlorures (Illustration 202). L'augmentation des teneurs en nitrates d'amont en aval dans les eaux de l'Iton traduit l'évolution de l'occupation de sols (prairies, forets puis terres arables

cultivées) et de la superficie drainée avec au centre du bassin la prédominance de l'agriculture intensive. L'apparente diminution des teneurs en chlorures et nitrates à partir de Normanville pourrait être due aux processus de dénitrification qui peuvent entrer en jeu lors du transfert des eaux de la nappe vers l'Iton (à travers la zone hyporhéique…), mais ceci reste à démontrer, et non pas à une diminution des teneurs en nitrates dans la nappe à l'aval du bassin versant (illustration 218).

14.3.3. Qualité amont-aval des eaux de surface

Les données de l'AESN disponibles pour les eaux de surface du bassin versant de l'Iton montrent une variation significative des teneurs en oxygène en fonction du temps au cours d'une année (Illustration 218). Cette figure montre bien la consommation estivale de l'oxygène dans les eaux de surface. Pour chaque point de suivi, les teneurs en oxygène dissous dans les eaux de surface sont les plus fortes en hiver par rapport aux valeurs estivales.

Les teneurs en nitrates ne suivent pas l'évolution de l'oxygène dissous et varient assez peu au cours de l'année, en raison du cycle cultural, du transfert par le réseau de drainage et par les transferts lents et rapides des eaux souterraines. Le Rouloir à Conches-en-Ouches étant la résurgence du système karstique du Lème/Rouloir, les teneurs en nitrates à ce point sont donc celles d'une eau souterraine. Ce point de suivi présente en effet les teneurs les plus importantes en nitrates de l'ensemble des points de suivi rivière (Illustration 218).

Le caractère ruisselant de l'amont du bassin versant (bassin versant de Bourth) a été confirmé par la modélisation TEMPO.

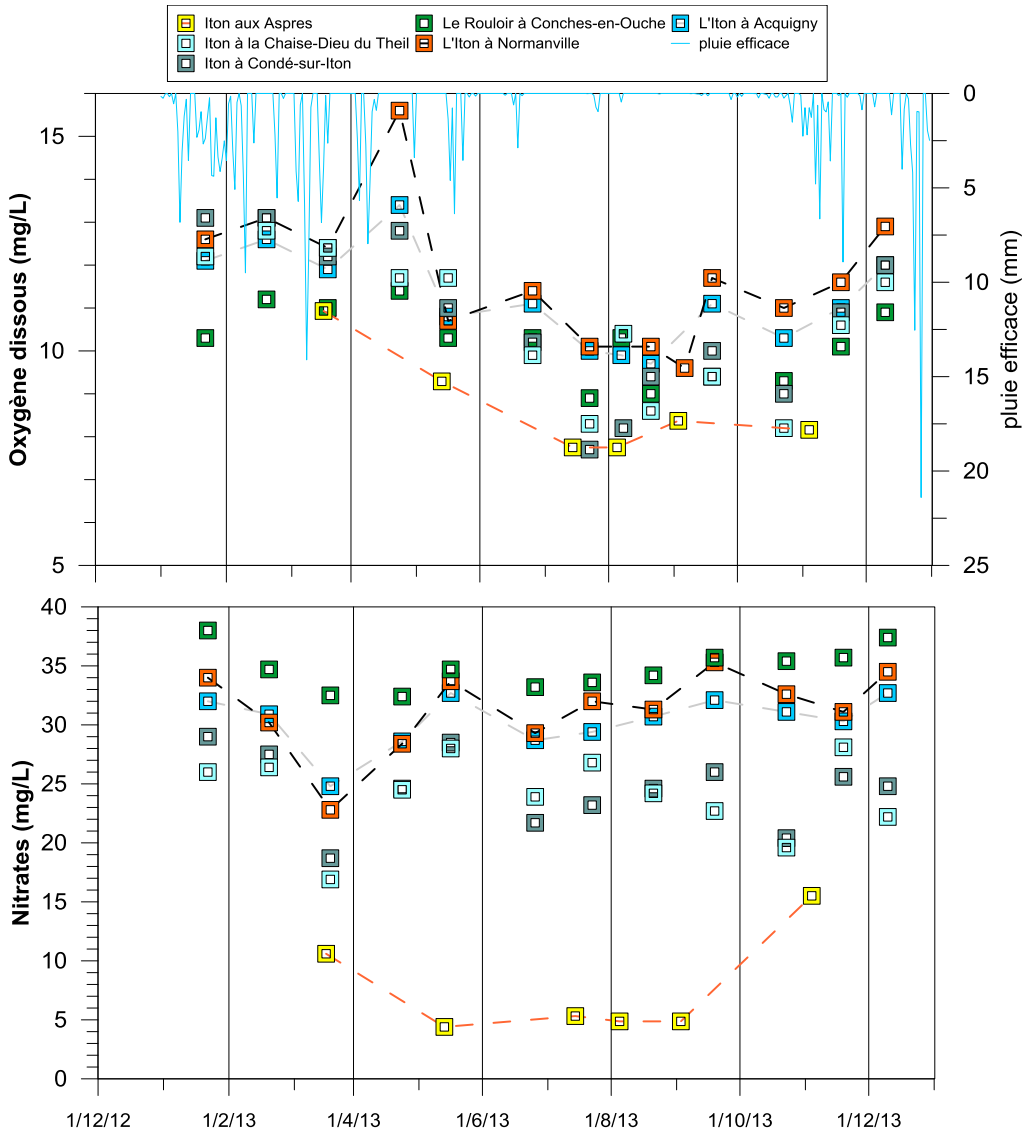


Illustration 218 : Evolution des teneurs en oxygène dissous et en nitrates dans les eaux de surface du bassin versant de l'Iton en 2013

14.3.4. Dénitrification

Dans certains points d'eau des Aspres, de faibles teneurs en oxygène dissous sont associées à de faibles teneurs en nitrates et peuvent indiquer que le processus de dénitrification se produit, rabattant ainsi les teneurs en nitrates (Illustration 219).

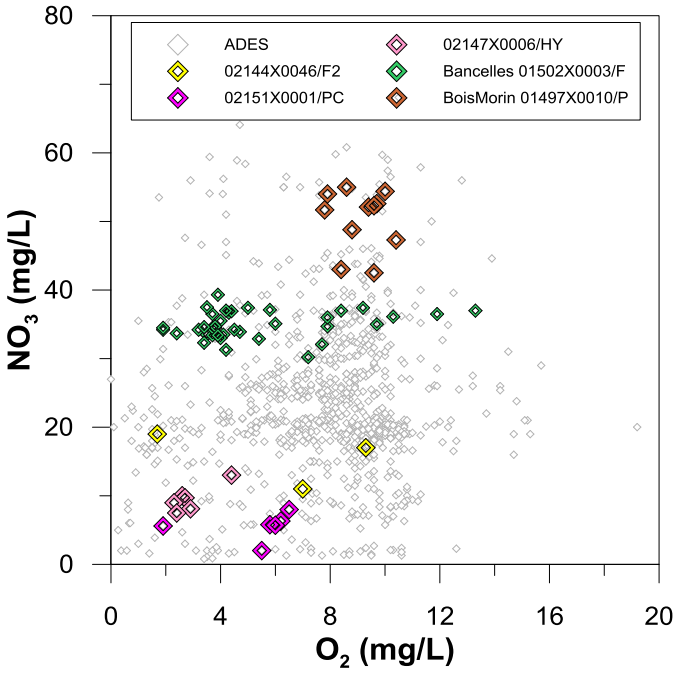


Illustration 219 : Teneurs en nitrates en fonction des teneurs en oxygène dissous dans les eaux souterraines du bassin versant de l'Iton

- aux Aspres, au point d'eau 02147X0006/HY, les teneurs en oxygène dissous varient entre 2,3 et 4,4 mg/L, et les teneurs en nitrates entre 7,5 et 13 mg/L entre 2000 et 2006.
- à Bourth, au point d'eau 02151X0001/PC, les teneurs en oxygène dissous varient entre 1,9 à 6,5 mg/L et les teneurs en fer varient entre 10 et 57 µg/L tandis que les teneurs en nitrates sont inférieures à 9 mg/L, témoignant de conditions physico-chimiques favorables à la dénitrification, entre 1990 et 2010.
- aux Aspres, au point d'eau 02144X0046/F2, les teneurs en oxygène dissous varient entre 1,7 et 9,3 mg/L, et les teneurs en nitrates entre 11 et 20 mg/L entre 2009 et 2011.

Les faibles teneurs en nitrates, associées à des teneurs faibles en oxygène dissous et à la présence de fer dans les eaux souterraines à Bourth pourraient résulter de processus d'oxydo-réduction. Entre Bourth et Chaise-Dieu, l'épaisseur des argiles à silex atteint 20 m et le niveau piézométrique de la nappe peut varier entre 22 et 27 m de profondeur par rapport au sol. La nappe de la craie peut donc être en charge sous les argiles à silex, dont la base peut se trouver, en période de hautes-eaux, en conditions saturées. Cette captivité induit des conditions réductrices favorables à la dénitrification.

Ces conditions de réduction des nitrates semblent pouvoir se retrouver également dans le cas où :

- l'aquifère de la craie est en charge sous les alluvions de fond de vallée ; ces alluvions ainsi que les dépôts glaciaires peuvent induire une captivité de la nappe et une dénitrification (Feast et al., 1998),
- les argiles à silex en vallée sont présentes sous les alluvions ; la présence d'argiles à silex en vallée sous les alluvions est mentionnée sur la coupe du puits 01798X0006 à Roman, et a entrainé un artésianisme aujourd'hui disparu,

- en plateau, les argiles à silex peuvent recouvrir la craie ; les niveaux de nappes peuvent remonter jusqu'aux argiles à silex aux pics de recharge notamment entre St-Christophe-sur-Avre et Bourth.

14.3.5. Variations des teneurs en nitrates en fonction du contexte géomorphologique et des niveaux de nappe

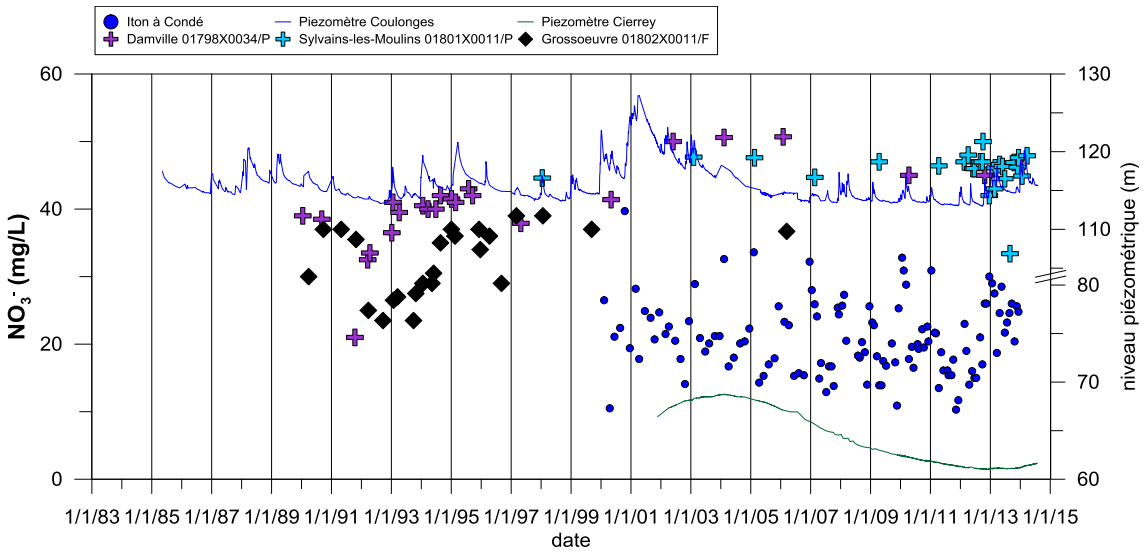
L'évolution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines à proximité de l'Iton et sur les plateaux est présentée dans l'Illustration 220.

Pour la période la plus riche en données de 1991 à 1997, les teneurs en nitrates en nappe en plateau à Grossoeuvre (en plateau rive droite) sont inférieures à celles de Damville, sous l'influence de la rivière. Le manque de données en nappe, comme au point d'eau Grossoeuvre, ne permet pas d'affiner cette comparaison pour la période la plus récente.

Entre 2001 et 2015, il existe une différence nette entre teneurs en nitrates dans la nappe à Sylvains-les-Moulins (variant autour de 50 mg/L) et en rivière à Condé-sur-Iton variant entre 10 et 35 mg/L. Ceci est potentiellement dû au processus de dénitrification qui doit entrer en jeu lors du transfert des eaux de la nappe vers l'Iton, notamment à travers la zone hyporhéique.

Le zoom sur la période récente 2011-2014 (Illustration 220b) montre que les teneurs en nitrates dans le forage de Sylvains-les-Moulins et dans l'Iton à Condé sont peu corrélées entre elles et aux variations piézométriques.

a)



b)

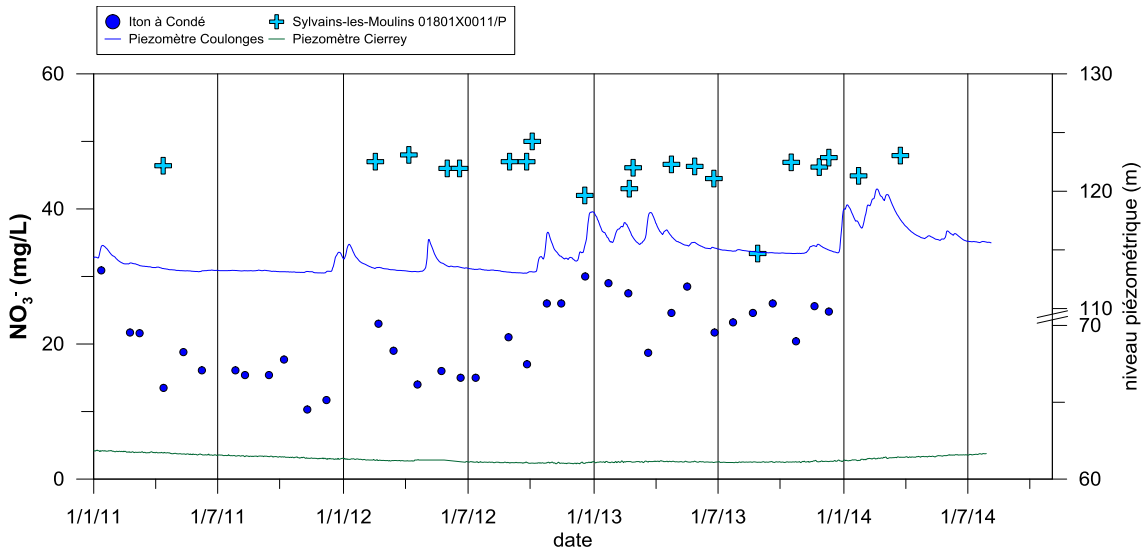


Illustration 220 : Chronique des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines en vallée (Damville, Sylvains-les-Moulins) et sous les plateaux (Grossoeuvre et les Baux-Sainte-croix) couplée à la piézométrie de nappe enregistrée à Cierrey et à Coulonges et zoom sur les années 2011-2015.

14.3.6. Tendance des teneurs en nitrates dans les eaux de surface

Une analyse des tendances des teneurs en nitrates dans les eaux de surface du bassin versant de l'Iton a été menée en réalisant le test de Mann-Kendall.

L'Iton à Condé-sur-Iton

L'analyse de la tendance des teneurs en nitrates montre une nette évolution avec une transition en juillet 2007 entre une période antérieure de moyenne 20,4 mg/L et une période postérieure de moyenne 25 mg/L (Illustration 221).

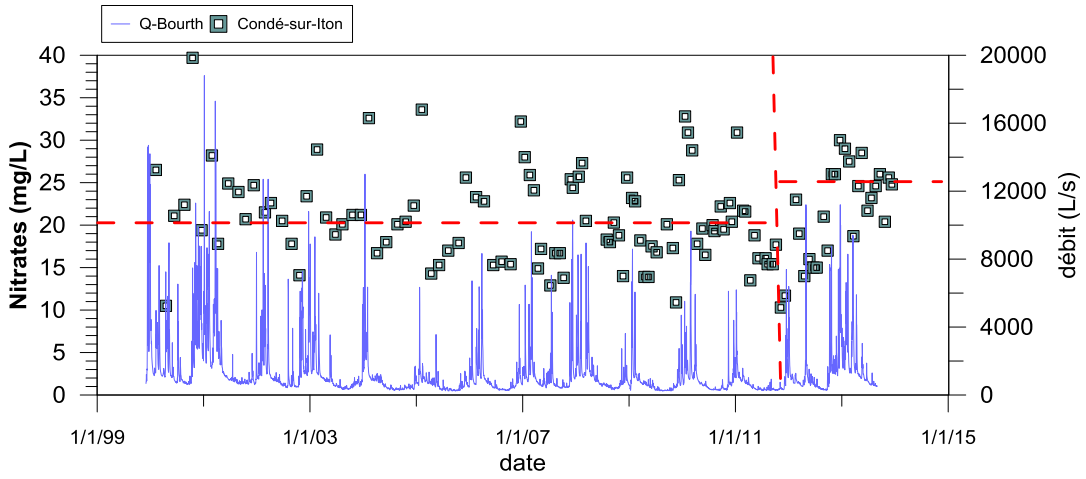


Illustration 221 : Evolution des teneurs en nitrates dans l'Iton à Condé-sur-Iton, tendances associées et débit associé (station de Bourth en amont).

Le Rouloir à Conches-en-Ouche

Sur la période 2003-2013, les eaux de surface du Rouloir à Conches-en-Ouche sont en moyenne plus minéralisées et en particulier plus riches en nitrates que les eaux amont de l'Iton (Tableau 20). Etant donnée l'analyse menée sur les concentrations des éléments majeurs, cette plus forte minéralisation montre que la nappe alimente le Rouloir de façon importante, en cohérence avec ce qui est déjà connu.

mg/L	Ca	Mg	Na	K	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Rouloir à Conches-en-Ouche	90,8	3,7	13,6	2,0	237,9	6,4	12,2	27,6	32,2
Aspres	81,1	3,2	8,1	1,9	220,8	3,3	11,7	17,7	20,1
Condé-sur-Iton	79,0	3,5	10,8	2,5	214,8	5,4	12,7	22,7	20,6

Tableau 20 : Moyennes des concentrations dans le Rouloir à Conches-en-Ouches et dans l'Iton en amont de la confluence sur la période 2003-2013.

L'évolution des teneurs en nitrates dans le Rouloir est analysée en fonction de la piézométrie à Sainte-Marguerite-de-l'Autel (Illustration 222). L'analyse de la tendance des teneurs en nitrates montre une évolution marquée avec une transition en juillet 2009 entre une période antérieure de moyenne 30,6 mg/L et une période postérieure de moyenne 35 mg/L. Les teneurs en nitrates dans les sources à Conches sont tout à fait comparables à celles du Rouloir.

Entre 2008 et 2015, les grands pics piézométriques de l'hiver 2010 et 2013 montrent d'abord une augmentation des teneurs en nitrates suivies par une diminution, pouvant indiquer une première arrivée d'eaux de ruissellement de surface suivie par une arrivée des eaux infiltrées dans les zones forestières du secteur karstique du bassin versant du Rouloir moins riches en nitrates. Une explication complémentaire peut se trouver dans le fonctionnement du réseau de drainage très dense du secteur.

Cependant, il est important de noter que la fréquence de mesure des teneurs en nitrates est plus faible que celle des niveaux piézométriques, d'où une difficulté à réellement bien interpréter les sources de nitrates aux différents épisodes piézométriques.

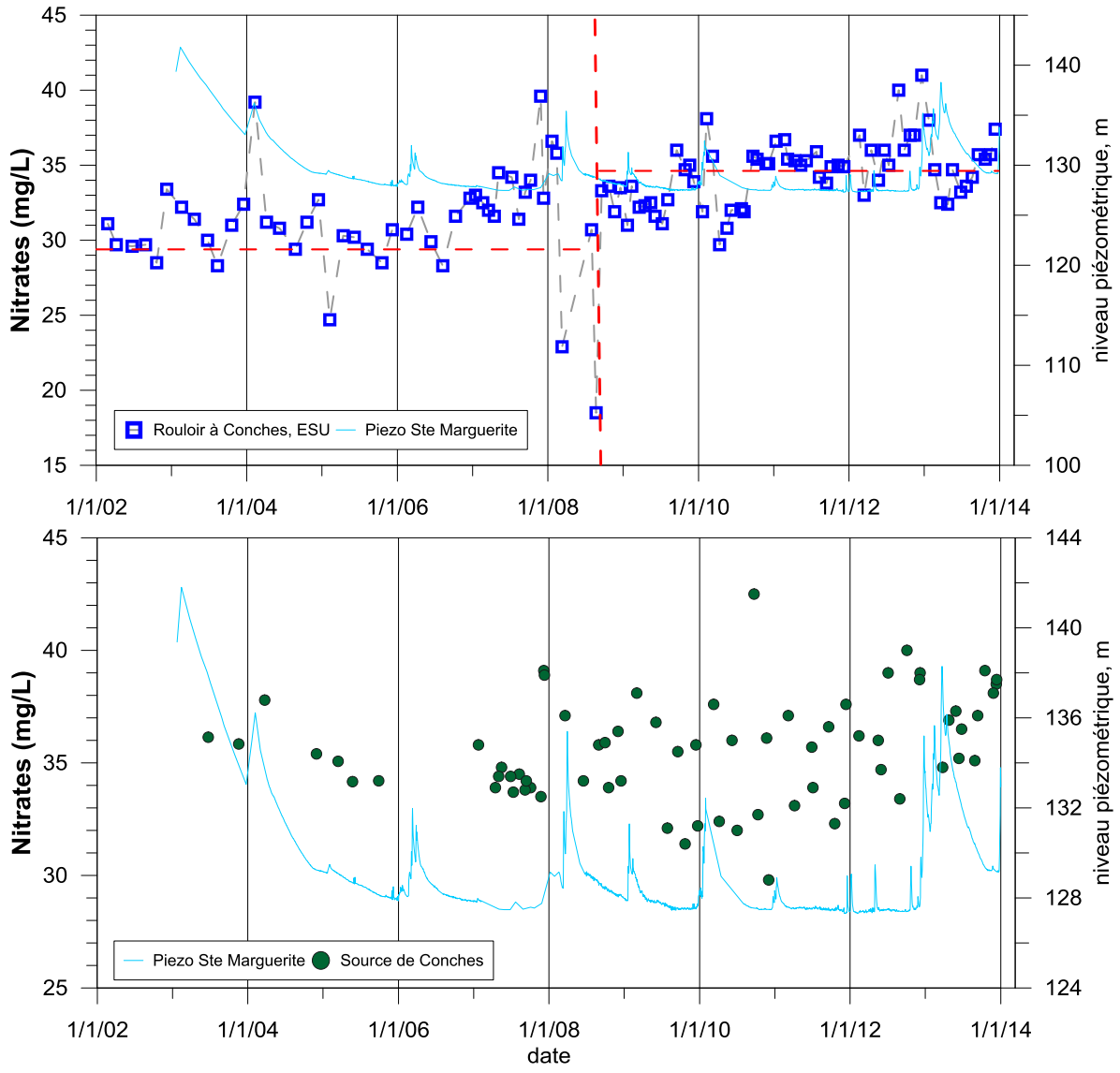


Illustration 222 : Evolution des teneurs en nitrates dans le Rouloir à Conches en Ouches et tendances associées, et évolution piézométrique (Sainte-Marguerite-de-l'Autel).

L'Iton à Chaise-Dieu-du-Theil

L'évolution des teneurs en nitrates en rivière à Chaise-Dieu-du-Theil montre une évolution depuis une moyenne à 19,6 mg/L jusqu'en mai 2011 où se produit une rupture de tendance. Après mai 2011, une tendance à la hausse se confirme avec augmentation de moyenne à 24,4 mg/L, avec plus de 4 mg/L de plus par an.

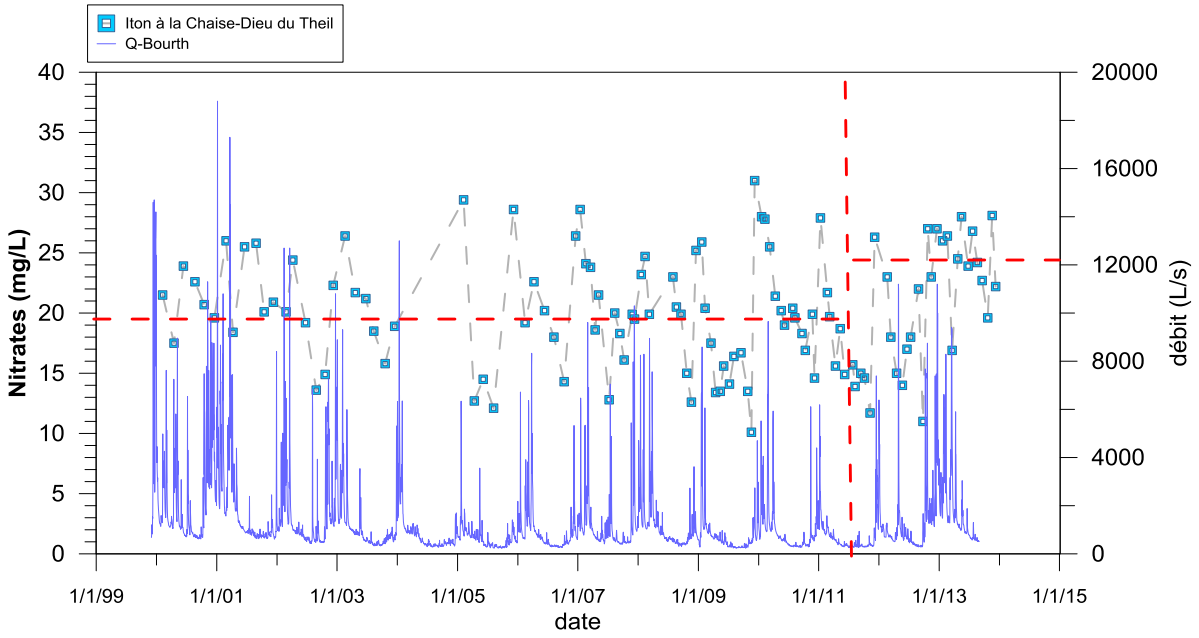


Illustration 223 : Evolution des teneurs en nitrates dans l'Iton à Bourth et débit à Chaise-Dieu-du-Theil pour la période 1999-2015.

Sec-Iton

Entre 1989 et 2013, les concentrations en nitrates dans les eaux souterraines à Damville en amont du Sec-Iton (01798X0034/P, moyenne de 40,5 mg/L), sont toujours supérieures à celles mesurées à la Bonneville-sur-Iton située en aval du sec-Iton (01498X0001/P, moyenne de 36,4 mg/L). Elles témoignent probablement des apports en nitrates du Rouloir (moyenne de 35 mg/L) ou d'apport d'eau souterraine moins chargée en nitrates sous la foret d'Evreux en rive droite. La nappe à la Croisille (01497X0029/F, moyenne 32 mg/L) à proximité de Glisolles montre une évolution très similaire à celle des deux points BSS précédents. Les teneurs en nitrates sont maximales pour chaque point d'eau durant la période de hautes eaux pluriannuelle de 2001 à 2004, témoignant du lessivage et du transfert des stocks de nitrates dans la zone non saturée.

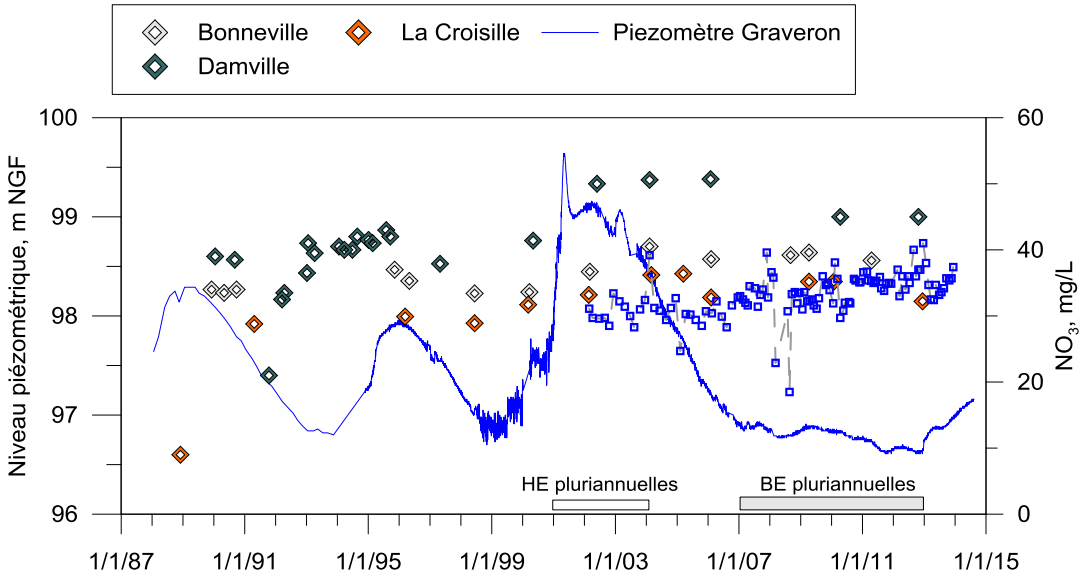


Illustration 224 : Evolution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines et dans le Rouloir (données de l'AESN) et de la piézométrie à Graveron pour la période 1987-2015.

L'Iton à Normanville

L'évolution des teneurs en nitrates à Normanville montre depuis octobre 2010 une inversion de tendance, avec avant la rupture, une tendance à la hausse de 2000 à 2010 (la teneur moyenne sur cette période s'établit à 35 mg/L), suivie d'une baisse de 2010 à 2013 (la teneur moyenne sur cette période est de 30,8 mg/L).

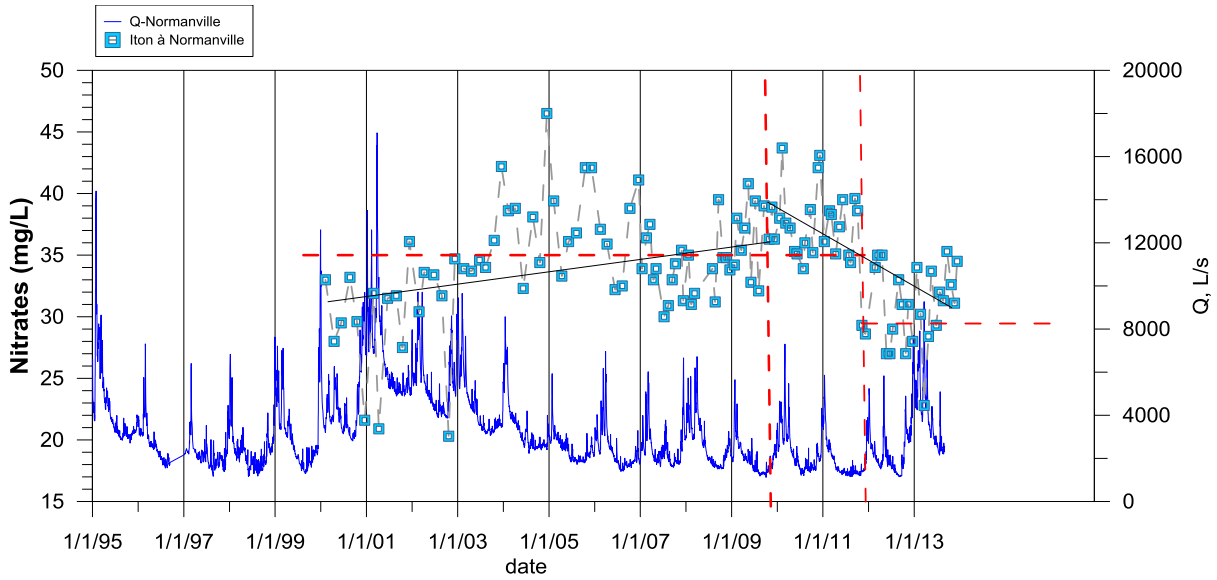


Illustration 225 : Débit de l'Iton et teneurs en nitrates à la station de Normanville (données AESN).

L'Iton à Acquigny

L'évolution des teneurs en nitrates à Acquigny montre une rupture en avril 2005, interrompant une tendance à la hausse (moyenne 33,2 mg/L) et suivie d'une tendance à la baisse (moyenne 29,7 mg/L). Cette baisse des teneurs en nitrates observée à Normanville se confirme donc également en aval à Acquigny.

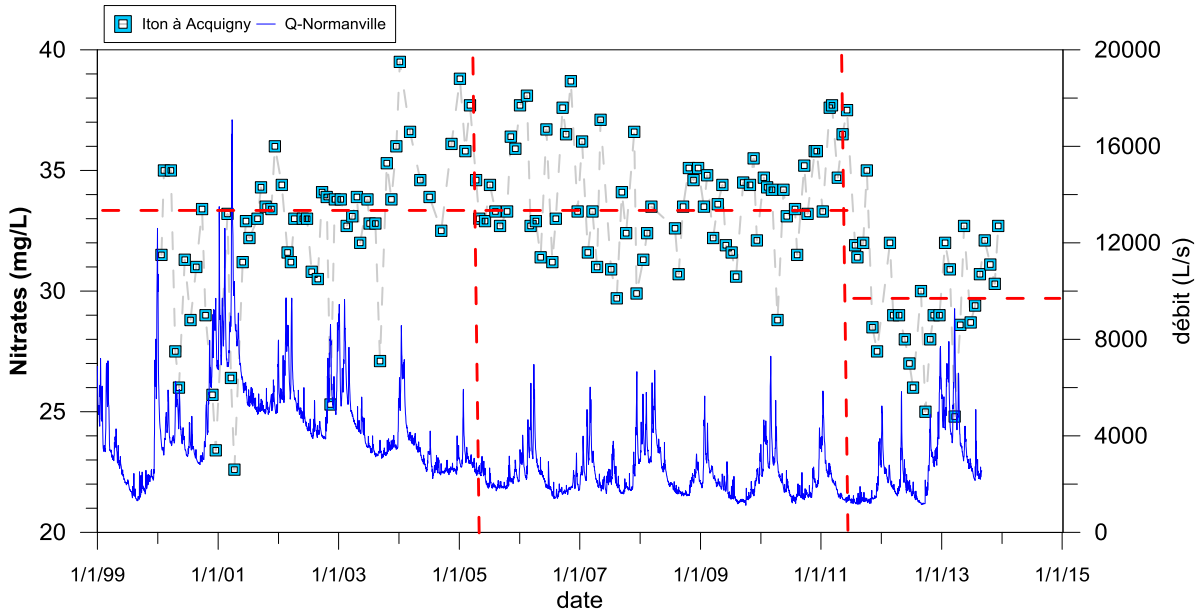


Illustration 226 : Débit de l'Iton et teneurs en nitrates à la station d'Acquigny (données AESN).

En conclusion, la rupture des tendances en amont de bassin s'est déroulée successivement en juillet 2007, juillet 2009 et mai 2011 pour respectivement l'Iton à Condé-sur-Iton, le Rouloir à Conches-en-Ouche, l'Iton à Chaise-Dieu-du-Theil et a été suivie d'une augmentation de la moyenne globale avec des tendances à la hausse. En revanche, en aval à Normanville et à Acquigny, la rupture de pente s'est faite en octobre 2010 et avril 2005, et a été suivie par une diminution des teneurs en nitrates.

14.3.7. Etude des sources de nitrates à Chaise-Dieu du Theil

Contribution de la nappe à l'Iton

Une modélisation avec Gardenia a été réalisée afin d'estimer la contribution des eaux souterraines aux eaux de surface de l'Iton (paragraphe 9). Deux périodes de hautes eaux ont été ciblées pour estimer les flux de nitrates dans le bassin versant de l'Iton : août 2000 et août 2003 (basses eaux saisonnières mais hautes eaux pluriannuelles). L'intérêt de sélectionner des périodes de basses eaux saisonnières est qu'il s'agit de la période de l'année où la nappe est la plus contributive au débit de la rivière (en proportion). En l'occurrence, d'après les résultats de la modélisation Gardenia, la nappe contribuait à 96,6% et 99,99% au débit de la rivière à Normanville respectivement en aout 2000 et aout 2003. Un premier calcul des flux de nitrates dans l'Iton a été réalisé (Tableau 21 et Tableau 22). Les flux calculés sont à prendre avec précaution car les nitrates, contrairement aux chlorures, ne sont pas des éléments conservatifs, c'est-à-dire qu'ils sont affectés par des processus réactifs, tel que par exemple la dénitrification.

Néanmoins les flux montrent une augmentation nette du stock de nitrates à Normanville et Acquigny comparé à l'amont de l'Iton aux deux périodes étudiées.

Station	NO_3, mg/L (donnée AESN)	Débit m^3/s (donnée DREAL)	Flux NO_3 T/j
Chaise-Dieu du Theil	22,6	0,778	1,5
Bourth		0,623	
Condé Damville	22,4	0,738	1,2
Rouloir à Conches en Ouche	27,1	0,336	0,8
Normanville	33,2	3,08	8,8
Acquigny	31	4,76	12,7

Tableau 21 : Calcul des flux de nitrates dans l'Iton sur la période 21-22/08/2000

Station	NO_3, mg/L (donnée AESN)	Débit m^3/s (donnée DREAL)	Flux NO_3 T/j
Chaise-Dieu du Theil	18,5	0,411	0,6
Bourth		0,411	
Condé	20,1	0,352	0,3
Rouloir à Conches en Ouche	28,3	0,499	1,2
Normanville	34	3,35	9,8
Acquigny	32,8	5,48	15,5

Tableau 22 : Calcul des flux de nitrates dans l'Iton sur la Période 12/08/2003

Origine des nitrates à la source de Chaise-Dieu-du-Theil

Bien que le soutien de la nappe et le ruissellement contribuent de façon importante aux taux de nitrates dans l'Iton (variant entre 10 et 30 mg/L), ils ne peuvent pas expliquer les fortes teneurs en nitrates supérieures à 35 mg/L à la source de Chaise-Dieu-du-Theil. La source de Chaise-Dieu du Theil (02151X0023) montre des teneurs en nitrates plus importantes que dans les eaux souterraines des points d'eau situés à proximité (02151X0001/PC et 02151X0004/F dont les moyennes respectives sont de 6,43 et 5,54 mg/L) et les eaux de l'Iton (10 à 30 mg/L). Les teneurs en nitrates de la source varient entre 39,6 et 91,2 mg/L sur la période 2004-2014 (Illustration 227). Les teneurs les plus fortes sont généralement mesurées en mars, décembre et juin et sont toujours associées aux fortes pluviométries. Hormis les périodes pluvieuses

hivernales, les relatives fortes teneurs en nitrates le 7/6/2010 et du 12/6/2013, respectivement de 67,7 et 64,3 mg/L sont bien associées à un épisode pluvieux.

Les fortes teneurs en nitrates en mars correspondent à la première période de fertilisation en azote minéral, directement disponible sous forme dissoute. De fortes précipitations suivant les périodes de fertilisation sont la configuration la plus négative pour la qualité des eaux souterraines, en particulier en milieu karstique où les eaux de pluie ruissellent et s'infiltrent très rapidement.

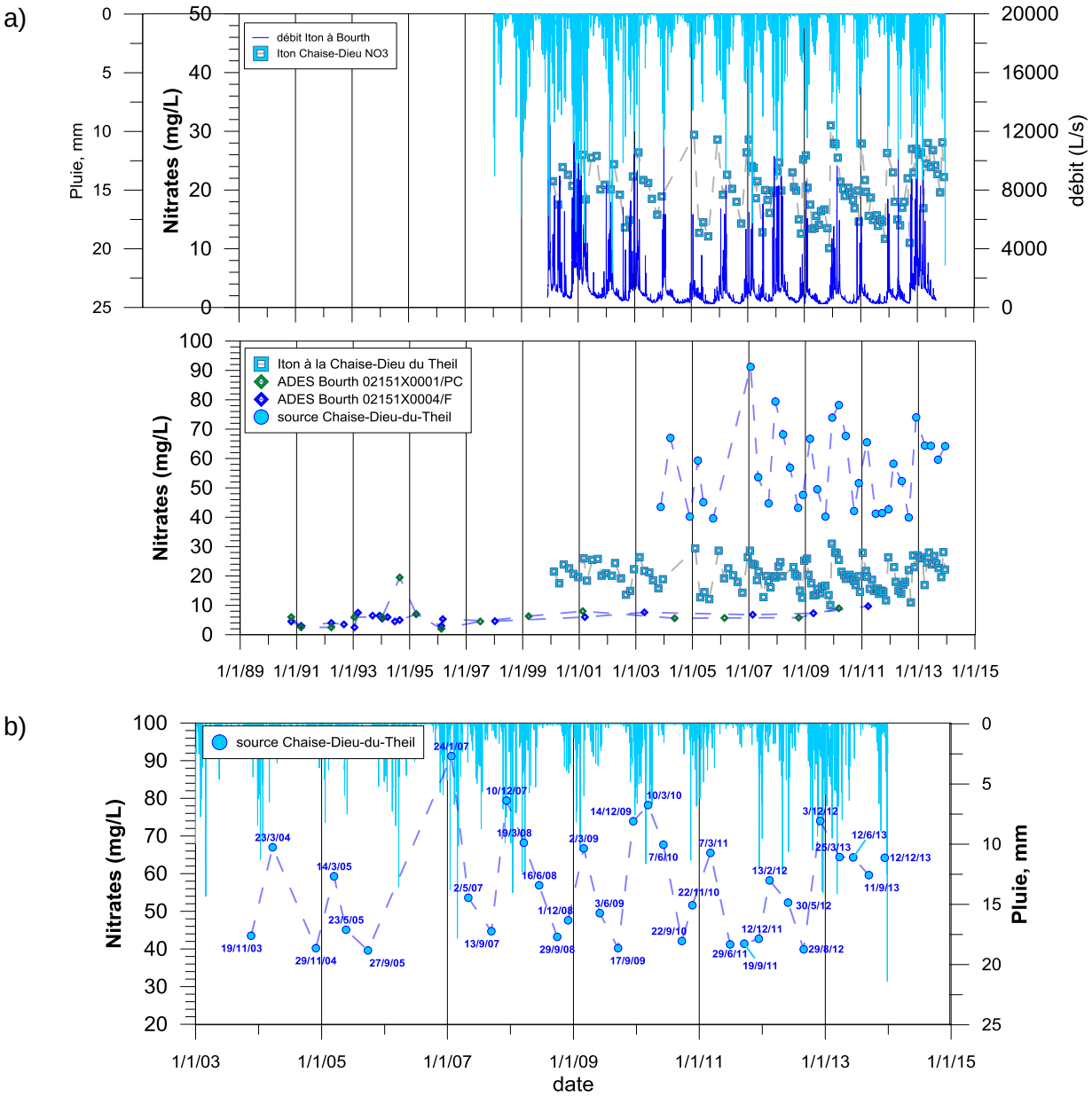


Illustration 227 : a) Variations des teneurs en nitrates à L'Iton à Chaise-Dieu-du-Theil, dans les eaux souterraines proches (points ADES) et à la source de Chaise-Dieu-du-Theil (02151X0023) et b) zoom sur les teneurs à la source.

De nombreuses parcelles au sud de Chaise-Dieu-du-Theil sont drainées par un réseau collecteur qui débouche au niveau de la source de Chaise-Dieu-du Theil (Illustration 228). Des pertes de ce réseau induisant des contaminations des eaux de la source en amont de sa résurgence pourraient expliquer les fortes teneurs en nitrates mesurées à la source. En particulier, il existe pour le moment peu de bétoires recensées sur ce secteur dans la base de données régionale des bétoires. Des vérifications sur le terrain seraient nécessaires pour confirmer ou infirmer cette hypothèse.

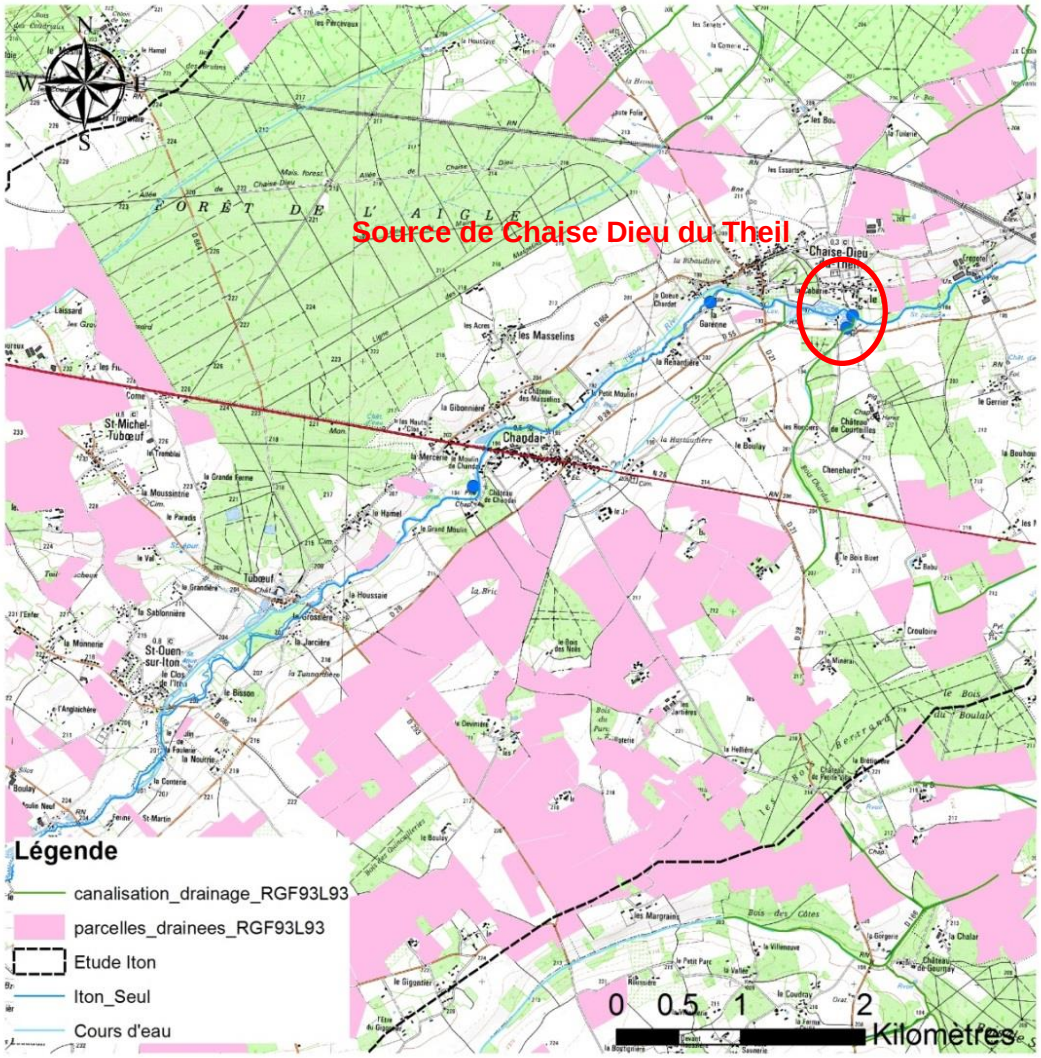


Illustration 228 : Réseau de drainage à proximité de Chaise-Dieu-du-Theil

14.3.8. Micropolluants des eaux de surface

Sur l'ensemble des stations de mesures de l'Iton, des traces de produits phytosanitaires (atrazine, glyphosate et diuron principalement) sont régulièrement observées et viennent donc dégrader l'état chimique des masses d'eau. L'objectif est ici d'étudier plus précisément la variation de la qualité des eaux de surface de l'Iton en fonction du débit. Quelques éléments d'intérêt majeur ont été sélectionnés. Les teneurs en atrazine mesurées au-dessus de la limite de détection étant toutes égales à 0,01 µg/L dans la base de données, c'est une de ses molécules filles qui a été étudiée, la deséthylatrazine (DEA) (Illustration 229). Le Glyphosate et l'un de ses produits de dégradation, l'AMPA, ont également été suivis. Le nombre de mesures supérieures à la limite de détection pour la simazine atteint 9, dont 8 mesurés à Acquigny pour les années 2000, 2001 et 2013 et varient entre 0,01 et 0,13 µg/L.

L'Illustration 229 présente, sur le même modèle que les Illustration 204 et Illustration 205, l'évolution des teneurs en pesticides en fonction du débit de l'Iton, en amont (qualitomètre de Chaise-Dieu-du-Theil et débitmètre de Bourth) et en aval (qualitomètre et débitmètre de Normanville). De façon intéressante, les teneurs en DEA, de l'AMPA et du glyphosate ont tendance à diminuer avec l'augmentation du débit de l'Iton, selon le schéma de dilution défini pour la conductivité électrique, le calcium et le magnésium. Cela peut signifier que les eaux souterraines sont bien la source principale de ces micropolluants. Cette observation est également valable pour Acquigny (qualitomètre de Acquigny et débimètre de Normanville).

Les fortes teneurs en pesticides sont généralement associées à des périodes d'étiage de faible débit, tandis que les faibles teneurs sont associées à des périodes de forts débits de l'Iton, comme c'est le cas pour les teneurs en DEA et AMPA à Chaise-Dieu-du-Theil (Illustration 230) et à Acquigny (Illustration 231). La chronique des teneurs en DEA de 2008 à 2014 illustre particulièrement bien cette observation.

En ce qui concerne les eaux souterraines, atrazine et DEA ont des teneurs supérieures à la limite de quantification dans 645 échantillons analysés sur plus de 40 points d'eau. En première lecture, les plus fortes teneurs en atrazine et DEA, tous points d'eau confondus, ont été mesurées dans les eaux souterraines entre 1999 et 2005, ce qui correspond à la période de hautes-eaux pluriannuelles régionale.

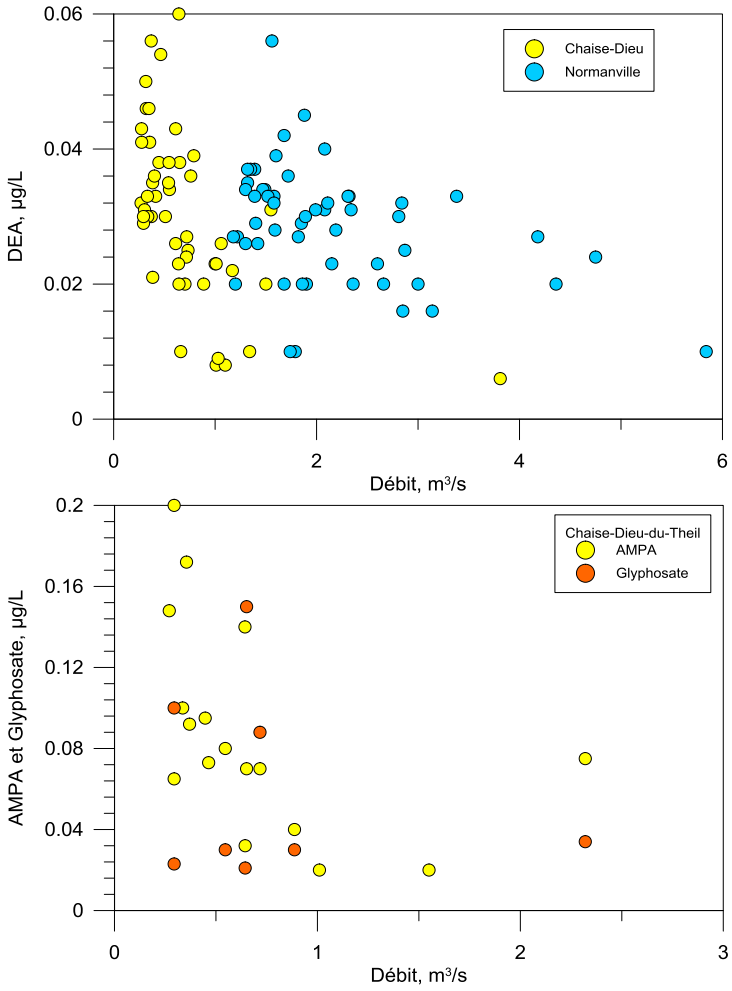


Illustration 229 : Teneurs en pesticides en fonction du débit dans les eaux de l'Iton

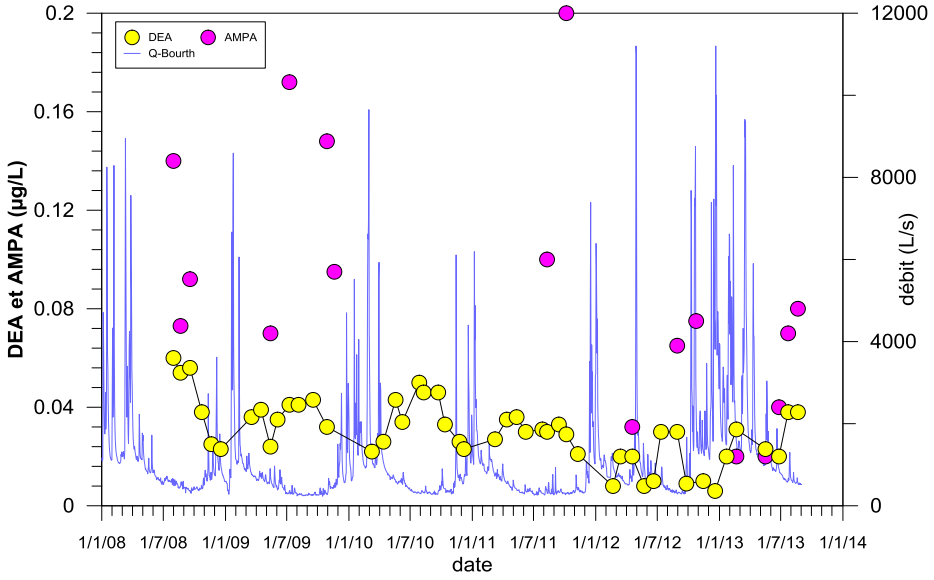


Illustration 230 : Evolution des teneurs en DEA et AMPA à Chaise-Dieu-du-Theil et du débit de l'Iton à Bourth en fonction du temps

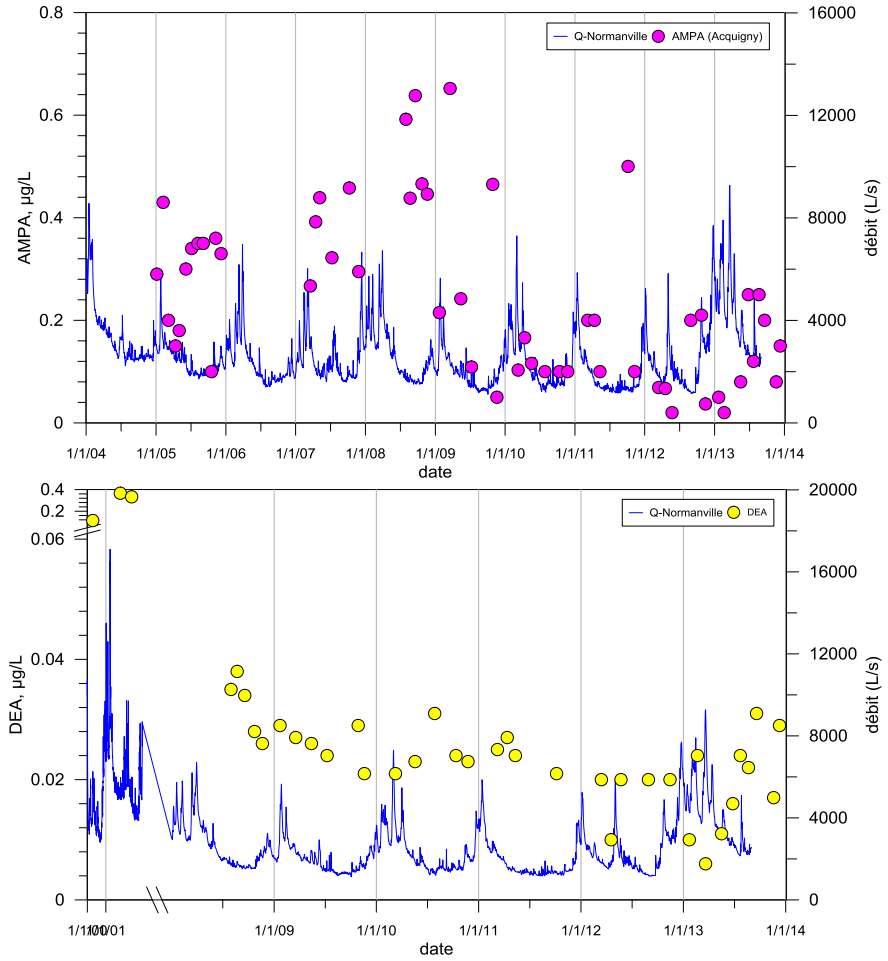


Illustration 231 : Evolution des teneurs en AMPA et DEA à Acquigny et du débit de l'Iton à Normanville en fonction du temps

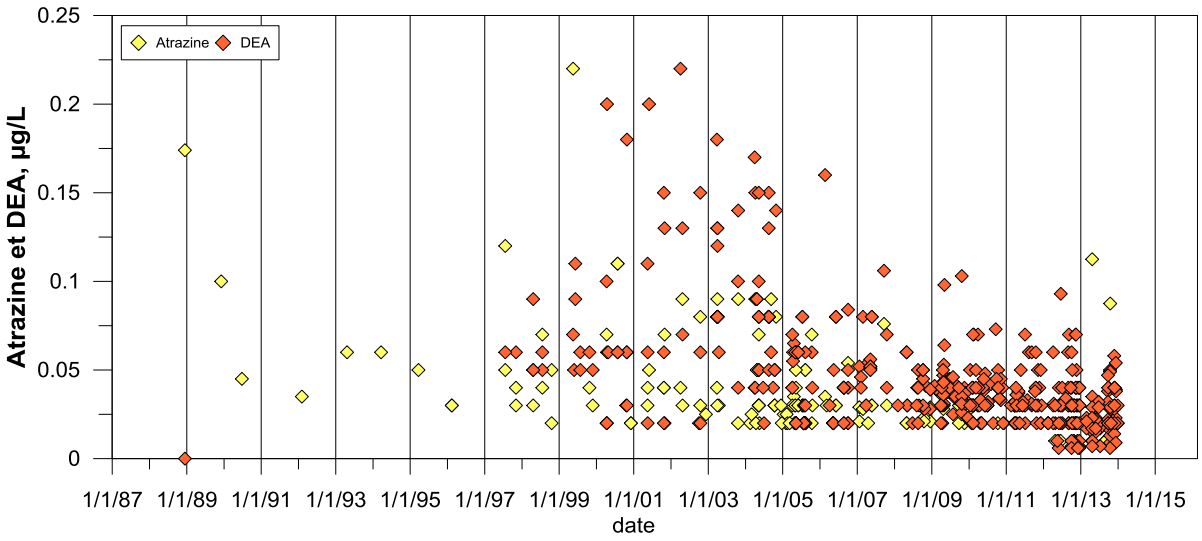


Illustration 232 : Chroniques des teneurs en atrazine et DEA dans les eaux souterraines du bassin versant de l'Iton

14.3.9. Point d'eau particulier

A l'aval du bassin versant de l'Iton, le point d'eau du Boulay Morin (01502X0078/F2) présente des teneurs importantes en éléments majeurs mais également en éléments traces (fer) ou issues des eaux usées (Streptocoques fécaux), en lien avec l'ancienne décharge de déchets ménagers du Boulay-Morin.

15. Conclusions

La présente étude a permis dans un premier temps de rassembler, d'analyser et de faire la synthèse des données existantes et disponibles pour le bassin versant souterrain de l'Iton.

Un certain nombre d'avancées significatives ont pu être réalisées au niveau de la connaissance des caractéristiques et du fonctionnement du bassin de l'Iton, mais beaucoup de zones d'ombre demeurent encore.

Plus spécifiquement, une synthèse géologique a été réalisée afin de compiler les données existantes concernant les différentes formations géologiques en présence, les structures tectoniques (failles, anticlinales,…) et la karstification. Concernant les failles, cette synthèse a mis en évidence que beaucoup de failles sont supposées mais que peu ont été reconnues à l'affleurement et représentées par les géologues sur les cartes géologiques au 1/50000. Des investigations complémentaires seraient nécessaires pour aller plus loin (cf. §16 Recommandations). Dans le cadre de cette étude quelques nouvelles structures ont pu être mises en évidence par corrélations géologiques. Cette étude a par ailleurs synthétisé de nombreux phénomènes karstiques en surface et en souterrain sur le bassin versant.

La synthèse hydrogéologique a permis de décrire les différentes nappes d'eaux souterraines présentes sur le bassin versant. L'aquifère de la craie constitue le principal aquifère du secteur ; une synthèse et une analyse statistique de ses paramètres hydrodynamiques ont été établies. L'analyse des variogrammes des piézomètres suivis en continu a ensuite mis en évidence la variabilité des comportements hydrodynamiques de cet aquifère au sein de la zone d'étude. Cette synthèse a par ailleurs montré que peu d'informations existent concernant la datation des eaux souterraines sur ce bassin versant. Un travail de synthèse a enfin été réalisé sur les sources. Celles-ci ont été classées en quatre groupes géographiques (1- amont du bassin ; 2- secteur de Gaudreville / La-bonneville ; 3- sources du rouloir ; 4- secteur de Brosville / Hondouville). La connaissance du fonctionnement de ces différentes sources est très lacunaire. Certaines de ces sources sont les résurgences de systèmes karstiques. Toutefois aucune de ces sources ne fait l'objet d'un suivi des débits en continu, ce qui limite la connaissance du fonctionnement de ces systèmes karstiques. On peut noter en particulier : les sources du rouloir, les résurgences du système karstique du sec-iton (sources de la fosse aux dames et de la forge), les résurgences du système karstique à Brosville et enfin la résurgence du système karstique développé sous le Roumois dont la source d'Hondouville (débit moyen de 1m^3/s environ) serait l'un des exutoires. Ce dernier système karstique est très peu connu. Des traçages seraient nécessaires pour mieux le définir.

Le bassin versant souterrain de l'Iton demeure encore mal défini dans plusieurs secteurs, notamment lié à des imprécisions au niveau des cartes piézométriques existantes (établies à une échelle régionale) et à des connexions karstiques interbassins à confirmer.

La synthèse hydrologique a établi le fonctionnement hydraulique des différents tronçons de l'Iton et de son affluent Leme/Rouloir sur la base des données disponibles. Les spécificités des cours d'eau de ce bassin versant ont été synthétisées et notamment un focus a été mené sur le fonctionnement du bras forcé de Verneuil qui dérive une partie du débit de l'Iton vers l'Avre. Le fonctionnement de ce bras forcé est très mal connu car il n'existe pas, à l'heure actuelle, de suivi en continu de son débit. Toutefois, pour les besoins de l'étude, et sur la base de la connaissance existante et de certaines hypothèses, une chronique de débit de ce bras forcé a été reconstituée. Les données de jaugeages ponctuelles existantes sur l'Iton ainsi que les chroniques de débits suivis en continus ont été exploitées. Les analyses statistiques de ces

dernières ont mis en évidence un régime différent de l'Iton à l'amont et à l'aval du bassin versant.

Un travail préliminaire de qualification et de quantification des échanges nappe/rivière a ensuite été mené en se basant sur différentes approches (comparaison des altitudes de la rivière et de la nappe, exploitation des données débitmétriques existantes, étude de la répartition des écoulements en basses eaux). Les relations nappe/rivières ont été sectorisées et quantifiées. Deux secteurs d'apports de débits par les eaux souterrains à l'Iton ont été mis en évidence (secteur de La Bonneville-sur-Iton et secteur de Brosville/Hondouville). Ces deux secteurs contribueraient en moyenne à près de 80% du débit de l'Iton à l'exutoire (à titre de comparaison, le rouloir contribuerait à hauteur de 20% en moyenne). Ces chiffres sont toutefois à prendre avec beaucoup de précautions car ils sont issus de données non synchrones entre les 2 secteurs et valables uniquement en période d'étiage, ils permettent toutefois de fixer les ordres de grandeurs dans l'attente de disposer de campagnes de mesures adaptées. Ils seraient à confirmer par la réalisation de plusieurs campagnes de jaugeages différentiels et synchrones à l'échelle du bassin versant.

Une attention a été portée en particulier sur le fonctionnement de l'Iton dans le secteur du Sec-Iton. Les débits perdus au niveau du Sec-Iton ont été estimés puis comparés aux débits restitués par les sources de la forge et de la fosse aux dames. Aucune campagne de mesure ne permet actuellement de réaliser une estimation fiable des débits perdus au niveau du sec-Iton. Le capacité maximale d'engouffrement du karst du Sec-Iton n'est actuellement pas connue, mais serait probablement supérieure à 1500 l/s sur l'ensemble du secteur du Sec-Iton compris entre Condé-sur-Iton et les Haisettes. Sur 4 campagnes de jaugeage exploitables, la part du débit perdu dans le Sec-Iton puis restitué représenterait entre 17% et 32% du débit de l'Iton à Bérengeville. La contribution la plus importante au débit proviendrait en fait d'un apport de débit par la nappe (entre 38% et 63%) supplémentaire au débit de restitution des pertes du sec-Iton. Le rouloir quant à lui contribuerait à hauteur de 11% à 33%. Tous ces chiffres sont également à prendre avec beaucoup de précaution et nécessitent d'être confirmés par des campagnes de mesures synchrones.

Le bassin versant de l'Iton a par ailleurs été modélisé à l'aide du logiciel GARDENIA (modèle globale) pour tenter d'effectuer un premier bilan au niveau des échanges nappe – rivière (Iton). Ce modèle traitant des relations pluie-débit-piézométrie a permis en particulier (1) d'estimer la part du débit lent (correspondant à l'alimentation par la nappe) dans le débit total de l'Iton et sa variation temporelle et (2) d'estimer les débits de fuite (débit souterrain sortant du bassin versant), notamment du fait de la présence de transferts karstiques. Les résultats de la simulation sous GARDENIA sur la période 1997-2013, montrent une contribution moyenne de 89% des écoulements lents (souterrains) au débit de l'Iton. De mai à septembre, le débit de l'Iton serait essentiellement assuré par les écoulements souterrains : de 96 à 99 % en moyenne. L'analyse statistique montre que les écarts interannuels sont les plus faibles pour cette période : quelles que soient les précipitations, la part du ruissellement reste, en effet, très faible (absence de pluies efficaces). En période de recharge hivernale (d'octobre à avril), la contribution des écoulements souterrains au débit de l'Iton est logiquement plus faible, mais reste largement prépondérante : de 70 à 95 % en moyenne. Les écarts interannuels sont, en revanche, plus importants : la part du ruissellement est, en effet, fortement dépendante des précipitations hivernales. Des ruissellements significatifs ne sont observés que lors des hivers exceptionnellement pluvieux, avec en général plusieurs mois très humides consécutifs. A titre indicatif, les ruissellements et résurgences karstiques auraient contribué à plus de 70% au débit

de l'Iton lors des mois d'hivers suivants : janvier et février 95 ; déc. 1999 ; dec. et janv. 2000, mars 2001 et dec. 2012.

Un schéma de fonctionnement basé sur le bilan moyen (1997-2013) a été établi et montre que, sur les 616 mm entrés dans le bassin versant de l'Iton :

- 73% (450 mm) reparte dans l'air par évapotranspiration,
- 9,7% (60 mm) sortent du bassin par des écoulements souterrains ou du fait des prélèvements anthropiques,
- 0,6% (4mm) sont stockés dans l'aquifère,
- 16,6% (102 mm) sortent du bassin par des écoulements de surface (débit de l'Iton)

Un important travail d'inventaire des points de prélèvements et des volumes prélevés ainsi que des rejets a également été mené dans le cadre de cette étude. Ces prélèvements ont été distingués selon les trois principaux types d'usage : l'alimentation en eau potable (AEP), les utilisations pour l'agriculture et l'élevage et les utilisations pour l'industrie. On constate que l'AEP représente 75 % des volumes totaux prélevés (moyenne de 14 Mm3 par an sur la période 1994 – 2013) suivi des prélèvements industriels 22% (4,2 Mm3 / an en moyenne) et enfin, les prélèvements agricoles pour l'irrigation et l'élevage sont estimés à 0.6 Mm3 /an en moyenne (soit 3 % des prélèvements totaux). Les prélèvements agricoles étant concentrés sur certains mois de l'année, ils peuvent représenter une part plus importante (jusqu'à 24%) sur des bilans réalisés à l'échelle mensuelle. Les grandes tendances qui ressortent quant à l'évolution des volumes d'eau prélevés sur la période 1994-2013 sont les suivantes :

- Forte variabilité des volumes prélevés pour l'agriculture, due aux variations climatiques et notamment pluviométriques entre les années, et au sein de chaque année ;
- Baisse de la production d'eau potable, qui passe de plus de 1,5 Mm^3/mois en 1995 à moins de 1 Mm^3/mois en 2013, soit une baisse de plus de 30 % en 18 ans ;
- Diminution des prélèvements industriels, qui passent d'environ 0.5 Mm^3/mois sur la période 1997-2001, à moins de 0.25 Mm^3/mois depuis 2010 du fait de la désindustrialisation de la vallée ;

Des bilans quantitatifs préliminaires ont ensuite pu être établis pour des cycles hydrologiques de hautes-eaux et de basses eaux. Ces bilans se fondent sur les flux d'eau calculés (entrées/sorties). Pour l'année humide étudiée (2000/2001), le bilan est excédentaire à l'échelle de la zone d'étude. Les sorties du système sont inférieures aux entrées de 18%. Sur l'ensemble de la zone d'étude, en période de hautes eaux, les prélèvements ne représentent qu'une faible part des sorties du système. Les prélèvements bruts et nets correspondent respectivement à 3.7% et 1.2% de la pluie efficace. L'année sèche étudiée (2011/2012) montre que le bilan est déficitaire à l'échelle de la zone d'étude. Les sorties du système sont supérieures aux entrées de 38%. Le piézomètre de Nogent-le-Sec présente une baisse de ses niveaux sur la période octobre 2011 – septembre 2012, indiquant un déstockage de l'aquifère sur cette période. La pression des prélèvements est plus forte en période de basses eaux. Les prélèvements bruts et nets représentent respectivement 13.1% et 4.6% de la pluie efficace à l'échelle du bassin versant. Ils atteignent respectivement 19.4% et 6.8% de la pluie efficace à l'aval du bassin versant.

Le fonctionnement du bassin de l'Iton lors des périodes d'étiage a ensuite été étudié. Une analyse de la vulnérabilité de la rivière a été menée, et les constats d'assecs du rouloir et de l'Iton ont été synthétisés et cartographiés. Une recherche d'indicateurs d'alerte a été menée et deux indicateurs sont d'ores-et-déjà proposés : (1) Indicateurs piézométriques d'alerte au

printemps, (2) Indicateurs piézométriques de garantie de débit minimal. Par ailleurs la mise en place d'un modèle de prévision a été testée de manière préliminaire avec le logiciel TEMPO (traitement du signal). Il semble qu'un modèle de prévision des niveaux de nappes et de débits utilisant en entrée un générateur de données de pluie et d'ETP soit envisageable pour simuler en fin de période de recharge les prévisions de débits et niveaux piézométriques probables pour l'étiage à venir. Cette démarche devra être approfondie pour une mise en application opérationnelle.

Le fonctionnement du bassin de l'Iton lors des épisodes de crues a ensuite été étudié. Une recherche de premiers indicateurs a été menée. En comparant les deux relations Débit-Débit et Hauteur-Hauteur, un effet seuil dans la réponse hydrologique semble intervenir lorsque le niveau piézométrique dépasse un certain seuil sur les piézomètres de Coulonges et Graveron. Les crues exceptionnelles suggèrent en effet une amplification des crues en aval du Sec-Iton lorsque le karst est saturé. En parallèle de la présente étude, le BRGM a réalisé en 2015, une étude de la contribution des eaux souterraines aux crues des bassins de l'Iton et de l'Orbiquet, pour le compte du SCHAPI (cf. Charlier et al. 2015). Les conclusions de cette étude montrent que le laminage de la crue entre Bourth et Normanville est dû à la conjonction de 2 phénomènes : un de nature hydraulique du fait de la diffusivité de l'onde de crue, et un second lié au rôle du karst sur la ré-infiltration des écoulements au niveau des pertes du Sec-Iton. On observe globalement un rapport qui augmente de 1 à 2 à 1 à 3 entre, respectivement, le laminage dû aux pertes, et celui dû à la propagation de l'onde de crue. La plus grande proportion de laminage dû à l'hydraulique est probablement engendrée par le plafonnement des pertes autour de 7 m^3/s (au-delà d'un débit de crue maximal de 12 m^3/s). S'y ajoutent les apports des aquifères (débit de base) qui tamponnent cet écrêtement. Le résultat le moins attendu de cette modélisation est l'absence de lien avec le niveau de remplissage initial du karst. Ainsi, le débit de pertes semble être principalement contrôlé par le débit de crue sans qu'un effet de seuil lié au karst ne soit observé.

En définitive, le piézomètre de Coulonges est potentiellement un indicateur du niveau de saturation du bassin (relation forte avec le débit de base) sans pour autant être un indicateur du laminage des crues sur le tronçon Bourth-Normanville qui intègre tout un ensemble de pertes (Sec-Iton, Lême) et d'apports (Rouloir, émergences, etc.).

L'augmentation de la réponse hydrologique à Normanville sur la relation Débit-Débit qui met en évidence une influence du niveau de remplissage du karst, n'est a priori pas liée à une baisse du taux de pertes (et donc au rôle écrêteur du karst), mais plutôt liée aux déclenchements d'apports ne se produisant qu'en crue exceptionnelle. Ces derniers pourraient provenir de la mise en eau du Rouloir qui se produit dans ce type de condition extrême et/ou des contributions plus intenses des émergences de Conches-en-Ouche et de Glisolles.

Ce travail montre que, bien que le karst joue un rôle écrêteur sur le laminage des crues, l'atténuation des pics de crue entre Bourth et Normanville est majoritairement liée à une question hydraulique, plutôt qu'à une perte effective de débit. Cette forte diffusion de l'onde de crue peut être liée à la morphologie méandriforme du réseau hydrographique au niveau du tronçon Damville-Glisolles, ainsi qu'aux nombreuses zones de débordement et stockage temporaire.

Enfin, un important travail d'analyse de la qualité des eaux du bassin versant de l'Iton a été menée sur la base des données disponibles sur ADES et celles transmises par l'AESN. Après une caractérisation hydrogéochimique du bassin versant (volet1) et une analyse des pressions (volet 2) une analyse plus détaillée a été menée concernant la question des nitrates (volet 3).

Les eaux de surface et souterraines du bassin versant de l'Iton sont typiques de l'aquifère de la craie. Les eaux de la nappe de la craie et des eaux de surface ont des compositions très proches suggérant des relations importantes entre elles. En conséquence, la nappe est très vulnérable aux pollutions de surface, en particulier à celles causées par l'activité agricole. Les eaux souterraines sont plus concentrées que les eaux de surface, en particulier en nitrates et pesticides et sont devenues, en raison de la grande vulnérabilité aux pollutions de surface, liée au contexte géologique karstique, un réservoir de polluants. L'alimentation de l'Iton par les eaux souterraines, en particulier en étiage, entraine la pollution des eaux de surface par les eaux souterraines. Il est notable que les tendances en nitrates dans l'Iton sont à la hausse à l'amont de Normanville et en baisse à l'aval. Des investigations complémentaires seraient nécessaires pour mieux comprendre ce phénomène.

Les fortes teneurs en pesticides dans les eaux de surface sont généralement mesurées en période d'étiage en lien avec l'alimentation prédominante par la nappe, tandis que les faibles teneurs sont associées à des périodes de forts débits de l'Iton sous l'effet de la dilution.

Le processus d'autoépuration par dénitrification pourrait être un facteur expliquant les faibles teneurs en nitrates dans les eaux souterraines dans certains secteurs à l'amont du bassin versant de l'Iton.

Le paragraphe qui suit liste les recommandations d'acquisitions de données complémentaires qui seraient nécessaires pour améliorer la connaissance du fonctionnement de ce bassin versant.



Illustration 233 : Les sources de la fosse aux dames à la Bonneville-sur-Iton (BRGM, 31/07/2013)

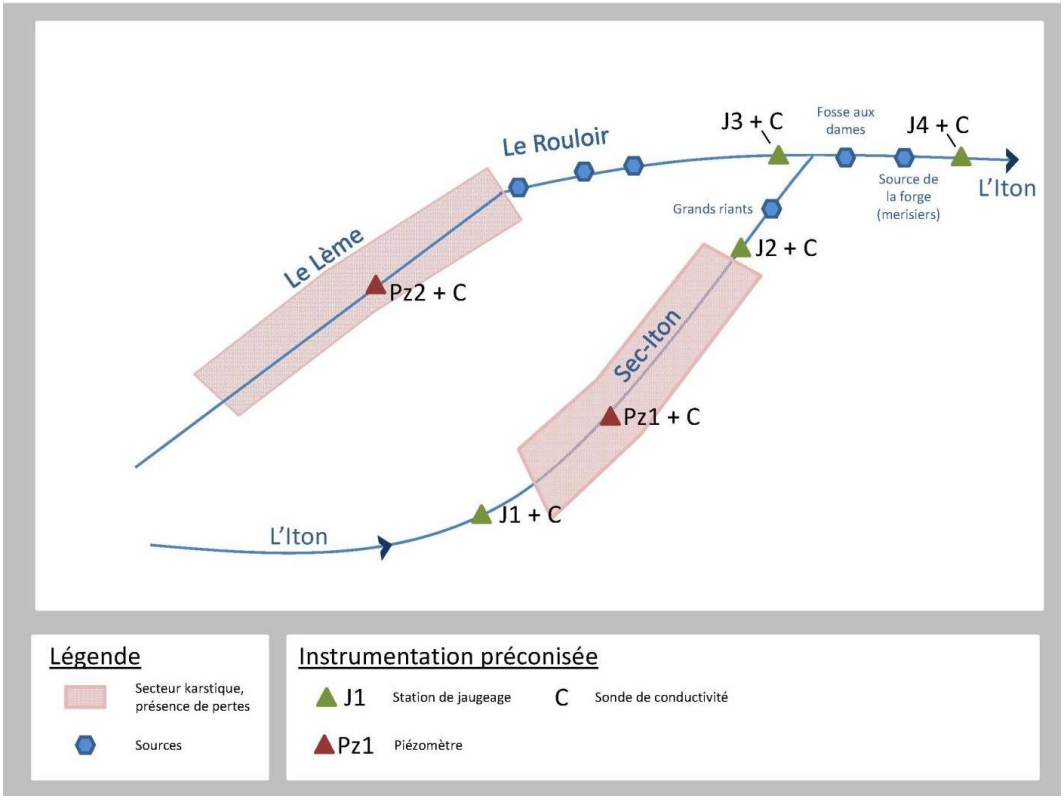
16. Recommandations

Toutes les conclusions présentées dans le paragraphe précédent ont été formulées sur la base des données disponibles. L'étude a par ailleurs mis en évidence certaines lacunes ou incertitudes dans ces données. Ainsi, beaucoup de ces résultats devront encore être confirmés par les investigations complémentaires et à terme par la réalisation d'un modèle maillé exploratoire qui permettra de tester des hypothèses et de réaliser une synthèse du fonctionnement de l'hydro-système de l'Iton (nappe + rivières).

Plus particulièrement nous préconisons les actions suivantes dans un premier temps:

- **Concernant l'extension des sables du perche au Nord de la faille de Senonches** : la réalisation de sondages suffisamment profonds pour vérifier que les sables du perche ne sont pas présents au Nord de la faille de Senonche ;
- **Afin d'améliorer la connaissance du rôle des failles majeures de l'Iton (connaissance de leurs rôles hydrogéologiques et de leurs rejets)** : la réalisation de campagnes géophysiques calées par des sondages géologiques (entre autres pour les failles de Saint-André-de-l'Eure, de l'Iton-Rouloir, le prolongement supposé à l'Est et à l'Ouest de la faille Aulnay-sur-Iton,…) ;
- **Concernant l'hypothèse d'un drainage du bassin de l'Iton amont par l'Avre en période de basses eaux :** la poursuite du suivi piézométrique dans le secteur situé entre Breteuil et Verneuil afin de voir si le niveau piézométrique au niveau de la crête passe sous le niveau de l'Iton en période de basses eaux ;
- **Afin de confirmer l'extension et les limites du bassin hydrogéologique de l'Iton et notamment les relations trans-bassins :**
    - la réalisation de cartes piézométriques fines avec une densité de points de mesure suffisante pour bien décrire les crêtes piézomètriques délimitant le bassin versant de l'Iton ;
    - la réalisation de traçages pour confirmer les traçages douteux réalisés dans le passé et vérifier les connexions karstiques trans-bassins supposées ;
- **Concernant la piézométrie au niveau du plateau séparant l'Iton de l'Eure, afin de confirmer l'existence d'un dôme piézométrique et de vérifier sa pérennité dans le temps**, il serait nécessaire de réaliser trois piézomètres sur le plateau (1- à la chapelle du bois des faulx, 2- dans le bourg d'Emalville, et 3- au Boulay-Morin sur le plateau) avec au moins un des deux premiers piézomètres suivi en continu et les deux autres suivis manuellement périodiquement ;
- **La mise en place d'une station de jaugeage en continu (J0) sur le bras forcé de Verneuil** afin de connaitre les débits perdus par le bassin versant de l'Iton ; **La mise en place de cette station en continu est très importante. Ce suivi en continu permettra de vérifier beaucoup de résultats de ce rapport qui s'appuient sur une estimation des débits de ce bras forcé (cf. § 7.3.4.b) ;**
- **La mise en place de 4 stations de jaugeage en continu dans le secteur du sec-iton et du Rouloir** selon les implantations définies sur le schéma ci-dessous (mesure du débit et de la conductivité sur chacune de ces 4 stations J1, J2, J3 et J4).
  La mise en place de ce réseau de suivi permettrait :
    - de quantifier les pertes de débits liées à l'écrêtement par le karst du Sec-Iton (comparaison des débits aux stations J1 et J2) et de les mettre en relation avec la hauteur de charge (suivi piézométrique réalisé à Coulonges)

- de quantifier les apports de nappe dans le secteur de la Bonneville-sur-Iton (débits des sources de la Fosse-aux-dame et de la Forge) (comparaison des débits de stations J2, J3 et J4) ;
- de quantifier les pertes subies entre Evreux et Normanville (comparaison des débits de la station de J4 à ceux de la station de Normanville)
- de mieux connaitre la contribution du bassin versant du Rouloir notamment lors des épisodes de crues exceptionnelles (débit à la station J3) ;
- de mieux comprendre les dynamiques de stockage et de restitution des karsts au droit du sec-Iton et du Rouloir (comparaison de J2 – J1 d'une part et de J4-J3-J2 d'autre part) ;



- **La mise en place de 2 stations de jaugeage en continu :** une sur l'Iton à l'aval des sources d'Hondouville (J5) et une spécifiquement dédiée au suivi de la source d'Hondouville (N°1501X0006/S) (J6). Ces 2 nouvelles stations permettraient de
  - connaitre les gains de débits liés aux apports des sources du secteur de Brosville/Hondouville (par comparaison des débits de la station existante de Normanville à ceux de la station J5) ;
  - de mieux connaitre le fonctionnement hydrodynamique du système karstique développé sous les plateaux du Neubourg et dont la source n°1501X0006 serait le principal exutoire (débit à la station J6).
- **La mise en place d'un suivi en continu des débits des différents rejets** (stations d'épurations et rejets industriels) dans l'Iton ;
- **La réalisation de traçages hydrogéologiques à partir de certaines bétoires du Neubourg afin d'améliorer la connaissance** de l'extension du bassin versant

karstique de la source d'Hondouville n°1501X0006 et par la même, la connaissance de l'extension du bassin hydrogéologique de l'Iton encore mal connu ;

- **La réalisation de traçages hydrogéologiques dans le sous-bassin versant du Leme/Rouloir** afin de tester la continuité du Leme et du Rouloir, de déterminer les temps de transfert des eaux souterraines dans ce sous-bassin, et de déterminer les liens hydrauliques entre les 3 groupes de sources présents sur le Rouloir ;
- **La réalisation de campagne de jaugeages différentiels synchrones en périodes de basses eaux et de hautes eaux** afin de confirmer les différentes tentatives de quantification de relations nappe/rivière faites dans ce rapport sur les différents tronçons de l'Iton ;
- Afin de réellement quantifier les interactions entre la nappe et les eaux de surface, une approche géochimique plus fine nécessiterait de mettre en place une méthodologie d'échantillonnage aux périodes de hautes-eaux et basses-eaux sur l'ensemble du bassin versant, en intégrant l'analyse des éléments majeurs mineurs et traces, ainsi que les isotopes stables de l'eau qui permettent classiquement de distinguer, dans les eaux souterraines, la présence d'eaux ayant subi une évaporation, telle que des eaux de surface ;
- **De mieux connaitre l'impact (quantitatif et qualitatif) du drainage agricole** par l'instrumentation d'un ou plusieurs sous-bassins versants ayant fait l'objet de la mise en place d'un réseau de drainage dense ;
- **D'un point de vue de la qualité, nous préconisons également :**
- De valider dans plusieurs points d'eau par des mesures de terrain, la dénitrification locale des eaux de nappe qui semble exister dans certains secteurs du bassin versant. Des mesures du potentiel d'oxydo-réduction, de teneurs en oxygène dissous et en nitrates pourraient être réalisées, couplées à une étude isotopique (d15N et d18O des nitrates).
- La mesure des teneurs en nitrates et autres éléments à enjeu, à une fréquence plus haute que les fréquences de mesure actuelles.
    - Il s'agit là d'une condition importante pour une meilleure compréhension du fonctionnement de ce système très réactif. Il est actuellement très difficile de réellement bien interpréter les sources de nitrates et de les comparer par exemple aux fluctuations piézométriques.
    - Le bilan réalisé pour les produits phytosanitaires et leurs résidus, ainsi que pour les résidus pharmaceutiques, montre que leur occurrence et comportement dans le karst varient suivant la molécule considérée selon les saisons et conditions climatiques, mais une approche plus fine est nécessaire pour mieux prendre en compte les facteurs importants tels que les capacités de stockage et déstockage de la molécule par le système, c'est-à-dire le pouvoir d'adsorption sol/sédiment de la molécule, son taux de dégradation dans les stations d'épuration (pour les pharmaceutiques) et dans les eaux naturelles, et le mélange avec des eaux résiduelles karstiques plus ou moins chargées en produits que les eaux de surface de l'Iton.
- La modélisation avec le modèle BICHE afin d'affiner la compréhension des processus gouvernant la mobilité des éléments dans l'aquifère et dans le karst (prise en compte des capacités de stockage et déstockage du système).

Concernant l'amélioration de la prévision des crues, le rapport BRGM/RP-65570-FR (Charlier et al. 2015) a également établi des préconisations.

17. Bibliographie

Amraoui, N. et al., 2002. Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme. BRGM/RP-51827-FR report, 184 p.

Antea - 1997 – A010261 – Captage de la Frileuse (179-8X-006) – commune de ROMAN-BLANDEY (Eure) – Etude d'environnement préalable à l'établissement des périmètres de protection. Aout 1997

Antea, 2005. Diagnostic des phénomènes d'inondations et de ruissellements sur le bassin versant de l'Iton – Phase 1 : Bibliographie et recueil de données. Rap. *A38087* Version B

Anus S. (2000) – HYDROEXPERT RP00H016 – Etude hydrogéologiques en vallée de l'Iton secteur de Damville – Phase I : Etat des lieux – Volume II : Planches et annexe

Anus S. (2000) – HYDROEXPERT RP00H016 – Etude hydrogéologiques en vallée de l'Iton secteur de Damville – Phase I : Etat des lieux – Volume I : Rapport

AQUA-SOL PROJETS - 2004 – Communauté de communes du canton de conches en ouche – Bassin versant du Lème – Recensement des phénomènes lié aux ruissellements – Janvier 2004

Arbonnier G., Equilbey E., Hanot F., Mardhel V., Pointet T., Quesnel F., Robelin C., Schomburgk S., Tourlière B., 2004. - Atlas hydrogéologique numérique de l'Eure. Volet cartographique de l'aquifère de la craie. Rap. BRGM/RP-52989-FR, 90 p., 38 fig., 2 tabl., 1 ann.

Arnaud L., 2008. Assec du Rouloir, Commune de Conche-en-Ouche (Eure), avis du BRGM – Rapport BRGM/RP-56189-FR

Arnaud L., Baran N. (2009) – Détermination des vitesses de transfert de l'eau et des nitrates dans la zone non saturée de l'aquifère crayeux en Haute-Normandie. Rapport BRGM/RP-57828-FR, 136 p., 54 ill., 3 ann.

Artis H., Martin P., Roux J-C., 1971. Etude hydrogéologique du Sec-Iton (Eure). Rap. BRGM/71-SGN-127-PNO, 22 p., 12 ill.

Barhoum, S. et al., 2014. Spatial heterogeneity of high-resolution Chalk groundwater geochemistry – Underground quarry at Saint Martin-le-Noeud, France. Journal of Hydrology, 519, Part A(0): 756-768.

Bassompierre P., Monciardini C., 1972. Carte géologique de la France à 1/50 000, Elbeuf (123).

Bassompierre P., 1967. Carte géologique de la France à 1/50 000, Les Andelys (124).

Bénichou P., Le Breton O., 1987 - AURELHY : une méthode d'analyse utilisant le relief pour les besoins de l'hydrométéorologie. In : Deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Paris : ORSTOM, 1987, p. 299-304. (Colloques et Séminaires). Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier, 2., Montpellier (FRA), 1986/09/16-17. ISBN 2-7099-0865-4

Brenot, A., Baran, N., Petelet-Giraud, E. and Négrel, P., 2008. Interaction between different water bodies in a small catchment in the Paris basin (Brévilles, France): Tracing of multiple Sr sources through Sr isotopes coupled with Mg/Sr and Ca/Sr ratios. Applied Geochemistry, 23(1): 58-75.

Bulletins de spéléologie de Dieppe, 1983 – Le puits merveilleux – Bulletins n°1 et 2

Caballero Y., Lanini.S., Seguin J.J., Charlier J.B., Ollivier C., 2015. Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse. Rapport de 1ère année (BRGM/RP-64779-FR)

Calba F., Charriere G., Conrad G., Lefebvre D., Rodet J., 1979 – Relations entre le développement du karst de la craie, la dynamique et la qualité des eaux souterraines du Pays de Caux. Bull. trim. Soc. Géol. Normandie et Amis Muséum Havre, t. LXVI, fasc 4, 1979, 4e trim.

Carn-Dheilly A. (2010) - Définition d'indicateurs piézométriques pour la prévision d'étiage dans les rivières de Haute Normandie. Rapport final BRGM/RP-59136-FR, 35 p., 25 ill., 8 ann.

Cary, L. et al., 2014. Tracking selenium in the Chalk aquifer of northern France: Sr isotope constraints. Applied Geochemistry, 48(0): 70-82.

CE3E, 2010. Etude de définition d'un programme pluriannuel de restauration et d'entretien de l'Iton – PHASE 2

Chapman TG, Maxwell AI, 1996. Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments. Institute Engineers Australia National Conference. Publ. 96/05, 539-545.

Charlier J.-B., David P.-Y., Lanini S. et Desprats J.-F. (2015) – Appui au SCHAPI 2015 – Module 1 - Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues des bassins de l'Iton et de l'Orbiquet. Rapport final. BRGM/RP-65570-FR

Chemin J., Hole J-P., Pernel F., Peckre M., 1989. Atlas hydrogéologique de l'Eure. 62 p., 2 cartes

Corbonnois J., Francois D., Arts I., Sary M., Devos A., Decloux J.P., Gille E., Gamez P., 1999. *Répartition des écoulements en basses eaux. Aspects méthodologiques et applications*. À paraître dans Rapport quadriennal CNFSH.

David P-Y., 2009. Inventaire régional Haute-Normandie des bétoires, itinéraires souterrains des eaux (traçages) et exutoires. Rap. BRGM/RP-57188-FR, 130 p., 71 ill., 3 ann.

David P-Y., 2012. Elaboration d'un outil de gestion des prélèvements d'eau sur le bassin de l'Avre : phase 1 : Etat de la connaissance et phase 2 : Analyse des données – Rapport final. Rap. BRGM/RP60458-FR, 204 p., 122 ill., 7ann.

David P-Y., Loiselet C., Lasseur E., Matthieu F., Pannet P., Servière M. (2015) - Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Avre - Phase 3 : Acquisition de données complémentaires - Phase 4a : Construction du modèle géologique - Rapport BRGM/RP-64817-FR. 135 pages, 53 ill., 6 annexes.

De La Querriere Ph., 1986. CAPACITE DE PRODUCTION DES AQUIFERES PROFONDS DE HAUTE-NORMANDIE -ETUDE PRELIMINAIRE – BRGM/86-SGN-664-HNO

De La Querriere Ph., 1992. Définition des périmètres de protection des forages de Coulonges (SIAEP de Manthelon) Sylvains-les-Moulins (SIAEP de Thomer-la-Sôgne). Rap. NT-92-GA-017, 39 p.

De La Querriere Ph. (1992) – BRGM – 92GA17 – Définition des périmètres de protection des forages de coulonges 180.01.43 (SIAEP de Manthelon) et Sylvains-les-moulins 180.1.42 (SIAEP de Thomer) – Additifs aux rapports de C. Pareyn (1975) et de P. de la Queriere (1989) – Avis de l'hydrogéologue agréé

Dewolf Y., Pomerol B., Renard M. (1976) – Influence de la néotectonique sur l'hydrographie de la Seine et de l'Eure dans la région d'Evreux. Bull. Inf. Géol. Bass. Paris. Vol. 13, N°4, p. 49-52.

Eckhardt K., 2005 - How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrology Processes 19(2), 507-515

Edmunds, W.M. et al., 1987. Baseline geochemical conditions in the Chalk aquifer, Berkshire, UK: a basis for groundwater quality management. Applied Geochemistry, 2(3): 251-274.

Edmunds, W.M., Shand, P., Hart, P. and Ward, R.S., 2003. The natural (baseline) quality of groundwater: a UK pilot study. Science of The Total Environment, 310(1-3): 25-35.

Edmunds, W.M. and Smedley, P.L., 2000. Residence time indicators in groundwater: the East Midlands Triassic sandstone aquifer. Applied Geochemistry, 15(6): 737-752.

Equilbey E., 2002. Débordement phréatique durable de l'aquifère crayeux sur la commune de Glisolles (Eure). Rap. BRGM/RP-52071-FR, 40 p., 3 fig., 1ph., 3 ann.

Equilbey E., Normand M., Schomburgk S., 2004. - Atlas hydrogéologique numérique de l'Eure. Volet bilan quantitatif de l'aquifère de la craie. Rap. BRGM/RP-52988-FR, 148 p., 44 fig., 17 tabl., 3 ann.

Feast, N.A., Hiscock, K.M., Dennis, P.F. and Andrews, J.N., 1998. Nitrogen isotope hydrochemistry and denitrification within the Chalk aquifer system of north Norfolk, UK. Journal of Hydrology, 211(1–4): 233-252.

Ferray, E. (1882) : *Les pertes de l'Iton*, in *Congrès des Sociétés savantes*, Sorbonne (Paris), avril 1882, 1883, 15 pages, Édition Ernest Quettier (Évreux), reprint in *L'Eure souterraine* (3), 1984, pages 46-56, Édition Fareu (Évreux).

Geo-log Conseil (1999) - etude de la vulnérabilité et d'environnement préalable à la définition des périmètres de protection – Captage de Chandai « Le Hamel » forage BSS n°02151X1019

Gourcy, L. and Brenot, A., 2011. Multiple environmental tracers for a better understanding of water flux in a wetland area (La Bassée, France). Applied Geochemistry, 26(12): 2147-2158.

Gustard et al., IHR Report n°108, 1992

Hole J.-P., 1987. Recherche de relations karstiques entre les captages d'AEP et les points de pollution présumés – Rapport BRGM 87-SGN-124-HNO. 7p.

HYDROEXPERT, 1999. Etudes hydrogéologique en vallée de l'Iton, secteur de Damville. Phase 1 – Compte-rendu et interprétation des investigations complémentaires. Rap. RP00H016

HYDROEXPERT, 1999. Etudes hydrogéologique en vallée de l'Iton, secteur de Damville. Phase 1 – Etat des lieux. Volume II : Planches et annexes. Rap. RP00H016

Juignet P., 1974 – La transgression crétacée sur la bordure orientale du Massif Armoricain. Aptien, Albien, Cénomanien de Normandie et du Maile. Le stratotype du Cénomanien. Thèse

Kharroubi O., 2013. Prévision des crues par modèle de réseau de neurones artificiels : application au bassin versant de l'Eure. Thèse soutenue le 28/06/2013 – Université de lille 1

Kloppmann, W., Dever, L. and Edmunds, W.M., 1996. Redox zones in the chalk aquifer of the Paris and North German basins. Hydrological Sciences Journal, 41(3): 311-326.

Kloppmann, W., Dever, L. and Edmunds, W.M., 1998. Residence time of chalk groundwaters in the Paris Basin and the North German Basin: a geochemical approach. Applied Geochemistry, 13(5): 593-606.

Kuntz G., 1982. Carte géologique de la France à 1/50 000, Breteuil-sur-Iton (179)

Kuntz G., 1982. Carte géologique de la France à 1/50 000, Saint-André-de-l'Eure (180)

Kuntz G., Dewolf Y., Monciardini C. 1981 – Carte géologique de la France à 1/50.000, feuille de Beaumont-le-Roger (n°149) et notice associée. Ed. BRGM

Laignel B. – 1997. Les altérites à silex de l'Ouest du Bassin de Paris. Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats. Thèse. 219 p.

Patrick Le Moigne , 2002. Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. Technical report, Centre national de recherches météorologiques, Météo-France, 2002

Mardhel V., Gravier A. – 2005. Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie. Rapport BRGM/RP-51148-FR

Ménillet F., Lebret P., Béguin P., 1998. Carte géologique de la France à 1/50 000, L'Aigle (214)

Moguedet G., 1998. Carte géologique de la France à 1/50 000, Mortagne-au-Perche (252)

Mougin B., Branellec M., David P-Y., Zammit C., Bourgine B., 2011. Atlas hydrogéologique régional de Haute-Normandie - Cartes piézométriques de l'aquifère crayeux. Rapport final. Rap. BRGM/RP-59301-FR., 102 p., 2 ann.

Laignel B., 1997. Les altérites à silex de l'Ouest du Bassin de Paris : Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats. Thèse de l'Université de Rouen, 532 p.

Lasseur E., 2008 – La Craie du Bassin de Paris (Cénomanien-Campanien, Crétacé supérieur). Sédimentologie de faciès, stratigraphie séquentielle et géométrie 3D. Thèse de l'université de Rennes 1. 410 p.

Lebret P., Ménillet F., Béguin P., 1996. Carte géologique de la France à 1/50 000, Verneuil-sur-Avre (215)

Ledun J. (AREAS), David P.-Y., Morel O., Husson F. (BRGM) (2016) – Parcelles drainées et réseaux publics de drainage de Haute-Normandie - Recensement, cartographie, bancarisation et mise en ligne sur le SIGES Seine-Normandie - Phase 1 : étude de faisabilité. Rapport final. BRGM/BRGM/RP-65533-FR, 133 p., 51 ill., 1 tabl., 5 ann.

Le Mesnil M., Pennequin D., Servière M., David P-Y. et Cary L. avec la collaboration de **B . Bourgine , Koch F., Leconte S., Raymond L., Hugot V., Branellec M. Jallais N.** Etablissement du cadre général des écoulements souterrains, des interactions avec les eaux de surface et état de la pollution en aval d'Evreux. Rapport final BRGM/RP-64420-FR

Lithologic, 2003. Synthèse géologique et prospection géophysique réalisée dans le cadre d'une meilleure compréhension de l'architecture d'un milieu aquifère. Site dit « Le Percher », commune des Aspres (Orne). Rapport R/YG/03.087 d'octobre 2003.

Lopez B., Baran N., Bourgine B., Brugeron A., Gourcy L., 2012. Pollution diffuse des aquifères du bassin Seine-Normandie par les nitrates et les produits phytosanitaires : temps de transfert et tendances. Rapport final BRGM/RP-60402-FR ; 326p.

Morel J.C., Costil J., 1998. BURGEAP – NC953/A.5854/297276 - Puits de Coulonges et de Sainte Cécile (27) – Analyse des résultats des essais de pompage d'octobre 1997

Négrel, P. and Petelet-Giraud, E., 2005. Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study (France). Journal of Hydrology, 305(1–4): 99-119.

Oolite, 2012. Syndicat départemental de l'Eau (Orne) – restitution de la coupe géologique du forage d'essai 510-2011-Fe1 (02144X0051) – Le moulin de Rolin – Vitrai sous l'aigle (61-Orne)

Pinson S., Allier D., Stollsteiner P., Mardhel V., Wuilleumier A., 2010. Etude de la contribution des eaux souterraines aux écoulements totaux des Masses d'eau de surface sur le bassin Loire-Bretagne. Rapport final. Rapport BRGM/RP-57608-FR, 164 p, 135 illustrations, 3 annexes

Pommerol C. Wyns R., Dewolf Y., **1977** – Carte géologique de la France au 1/50.000, feuille d'Evreux (n°150) et notice associée. Ed. BRGM

Quesnel F., 1997. Cartographie numérique en géologie de surface. Application aux altérites de l'Ouest du Bassin de Paris. Thèse de l'Université de Rouen, 2 tomes, 420 p., 92 fig., 6 tabl., 10 ann.

Rodet J., 1975 – Le karst de la craie en Haute-Normandie. Mémoire de maitrise, géographie physique, Rouen, 216 p. in Spéléodrack

Rodet J., 1981. Contribution à l'étude du karst de la craie L'exemple normand et quelques comparaisons. Thèse de doctorat de géographie, université Paris 1, 426 p.

Rodet J., 1991. La craie et ses karsts – ouvrage publié avec le concours des Conseil général de l'Eure et Entreprise Tinel

Roy, S., Gaillardet, J. and Allègre, C.J., 1999. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine river, France: Anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 63(9): 1277-1292.

SAGE Iton, 2005. Etat des lieux du SAGE de l'Iton. Rap. SAGE3008, 147 p.

SAGE de l'Iton, 2010. Plan d'Aménagement et de Gestion Durable & Règlement, 102 p.

SERDA (Service d'Economie Régionale et de Développement Agricole) - Chambres d'agriculture de Haute-Normandie, 1988. Carte des sols de Haute-Normandie – N°ISBN 2-9502806-0-9

Setegue, juillet 2006. Etudes hydraulique et réglementaire de la rivière Iton à Francheville – Rapport de phase 2. v04E133 – Phase 2-rev2.doc/Version 1

SOBESOL (2000) – Campagne de sondages - Vallée de l'Iton (27) – Damville. Dossier 14561

Valdes, D. et al., 2007. A spatial analysis of structural controls on Karst groundwater geochemistry at a regional scale. Journal of Hydrology, 340(3–4): 244-255.

Valdes, D., Dupont, J.-P., Laignel, B., Slimani, S. and Delbart, C., 2014. Infiltration processes in karstic chalk investigated through a spatial analysis of the geochemical properties of the groundwater: The effect of the superficial layer of clay-with-flints. Journal of Hydrology, 519, Part A(0): 23-33.

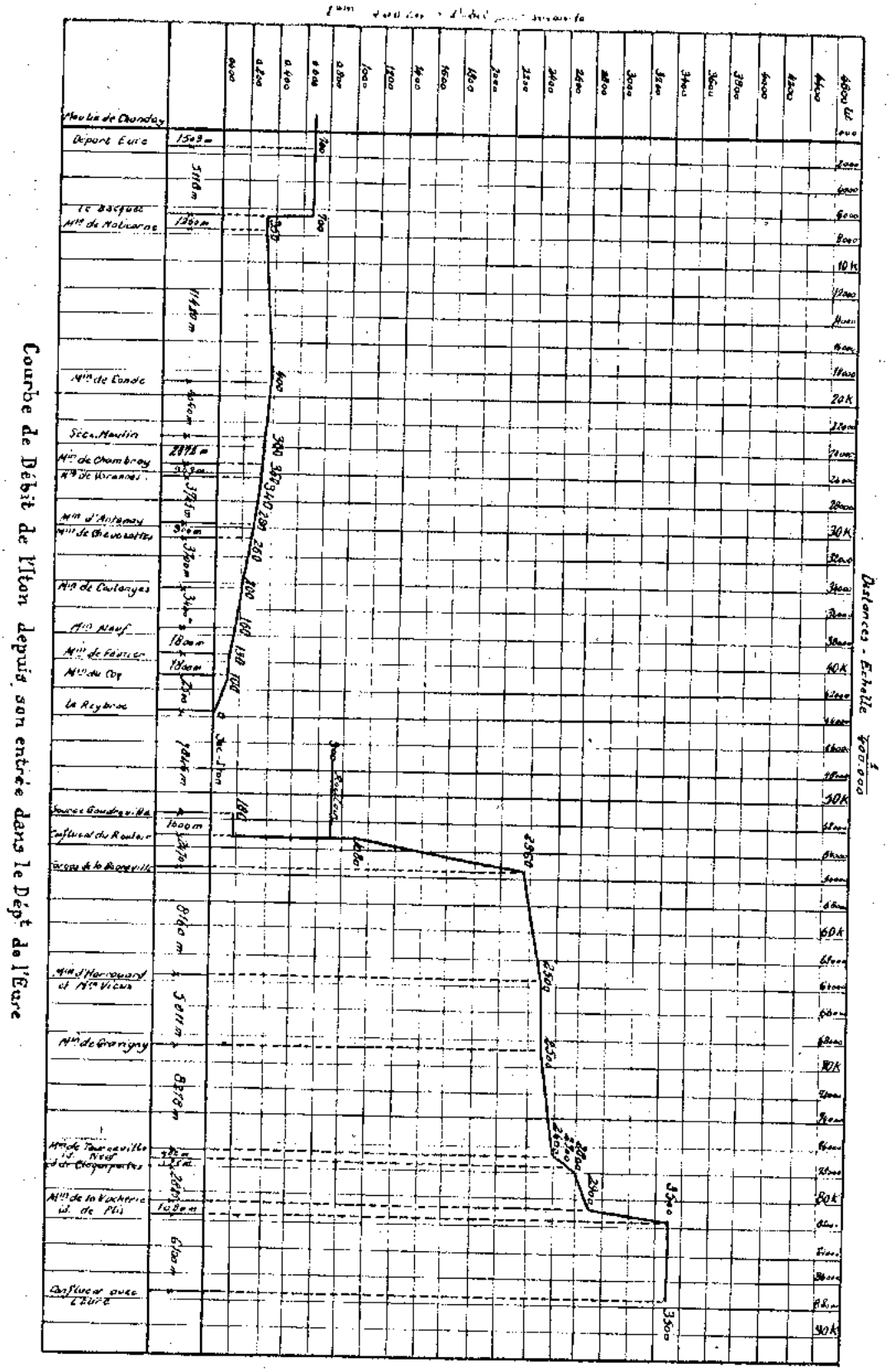
Zaniolo et Piney , juillet 2015 -Étude sur le Rouloir, station de Glisolles

Annexe 1
-
Tableau récapitulatif des piézomètres suivis en continu dans la zone d'étude

INDICE	Formation(s) captée(s)	Pas de temps	Date de début du suivi	Date de fin du suivi	Contexte géomorphologique	Pronfondeur de l'ouvrage (m)
01501X0046	Craie Coniacienne	Mensuel (8 mesures pour 7mois)	10/05/1985	13/12/1985	Vallée	4.4
01498X0031	Craie Turonienne	Journalière puis hebdomadaires	10/07/1969	31/12/1981	Vallée	9.55
01501X0002	Craie Coniacienne	Journalière depuis 1988	02/04/1967	10/12/2008	Vallée	16
01801X0013	Craie à Silex du Coniacien	Quasi journalière	08/01/1971	02/05/1978	Vallée	17.65
01794X0003	Craie Turonienne	Journalier	22/01/1968	15/11/1970	Vallée	17.9
01801X0010	Craie à Silex du Coniacien sous alluvions grossières	Mensuel puis journalière (+6000 mesures pour 320 mois)	09/05/1985		Vallée	19.4
01796X0028	Craie Turonienne	Mensuel (127 mesures pour 144mois)	09/11/1972	29/11/1984	Plateau	26.9
01798X0036	Craie Sénonienne	Mensuel (126 mesures pour 144mois)	09/11/1972	29/11/1984	Plateau	28.15
01792X0020	Craie Turonienne	Quasijournalière (23 mesures par mois)	23/01/2003		Vallée	30.6
01795X0011	Craie Turonienne	Hebdomadaire (2143 mesures pour 480 mois)	09/11/1972		Vallée sèche	32
01794X0035	Craie Coniancienne	Mensuel puis journalière (+6000 mesures pour 320 mois)	23/04/1985		Plateau	37.2
01792X0005	Craie Turonienne	Mensuel (133 mesures pour 140 mois)	09/11/1972	29/11/1984	Plateau	40
01496X0011	Craie Turonienne	Mensuel (40 mesures pour 42mois)	08/11/1972	11/05/1976	Plateau	41.4
01801X0004	Craie Coniacienne	Mensuel (117 mesures pour 128mois)	27/02/1968	26/10/1978	Plateau	42.25
01493X0001	Craie Coniacienne	Plurihebdomadaire (3 mesures par semaine)	10/12/1968		Plateau	43.3
01237X0012	Craie Coniacienne	Mensuel (18 mesures pour 18mois)	27/01/1971	25/07/1972	Plateau	52.7
01245X0016	Craie Sénonienne	Mensuel (53 mesures pour 54mois)	30/01/1968	26/07/1972	Plateau	55.2
01245X0030	Craie Coniacienne	Mensuel (154 mesure pour 156 mois)	30/01/1968	24/12/1981	Vallée sèche	61.05
01237X0004	Craie Turonienne/Coniacienne	Mensuel (150 mesures pour 166mois)	27/01/1971	29/11/1984	Plateau	71.8
01506X0016	Craie Coniacienne/Campanienne inf	Journalier	22/11/2001		Plateau	71.95
01506X0013	Craie Sénonienne inf. ou Coniacien	Journalier entre 1968 et 1972 et entre 1999 et 200	06/12/1968	16/10/2001	Plateau	77
01501X0037	Craie Sénonienne	Mensuel (153 mesures pour 165mois)	27/03/1968	24/12/1981	Plateau	90
01494X0004	Craie Santonienne et Coniacienne	Mensuel (184 mesures pour 192mois)	22/02/1968	29/11/1984	Plateau	127.6
01798X0036	Argiles à silex (sur craie)	Mensuel	09/11/1972	29/11/1984		28.15
02151X0008	Craie turonienne	Journalier	21/03/2013			28.87

Annexe 2
-
Graphique et tableaux des anciennes données de jaugeage disponibles en bibliographie

Campagne de 1882



Campagne de mai 1968 (localisation des points de jaugeage à l'Illustration 104)

Localité	Débit en L/s	Pertes/Gains (L/sec)	Pertes/Gains spécifiques (L/sec/km)
La Mesangère	1275		
Ferme de Villalet	936	-339	-74,1
Le Rebrac - Passerelle	537	-399	-449,9
Côte du Fourneau	351	-186	-45,3
Les Haisettes	277	-74	-56,1
Source Bois des Carrières	507	230	338
Source des Grands Riants	507	0	0
Source des Grands Riants	982	472	1180
Ferme de Gaudreville	1087	105	275,8
Glisolles - Passerelle	975	-112	-52,4
Fosse aux Dames	1423	448	3880,3
Bérengeville	3161	1738	377,4
Normanville	4169	1008	66,8
Les Planches	3793	-376	23,8

Campagne d'octobre 1968 (localisation des points de jaugeage à l'Illustration 104)

Localité	Débit en L/s	Pertes/Gains (L/sec)	Pertes/Gains spécifiques (L/sec/km)
Bourth	720		
Condé-sur-Iton	0	-720	-38,1
Mé Gremesnil	483	483	70,1
Gébert-les-Chérottes	518	35	8,2
Coulonges	565	47	12,1
Le Petit Sacq	409	-156	-62,4
La Mesangère	499	90	29,3

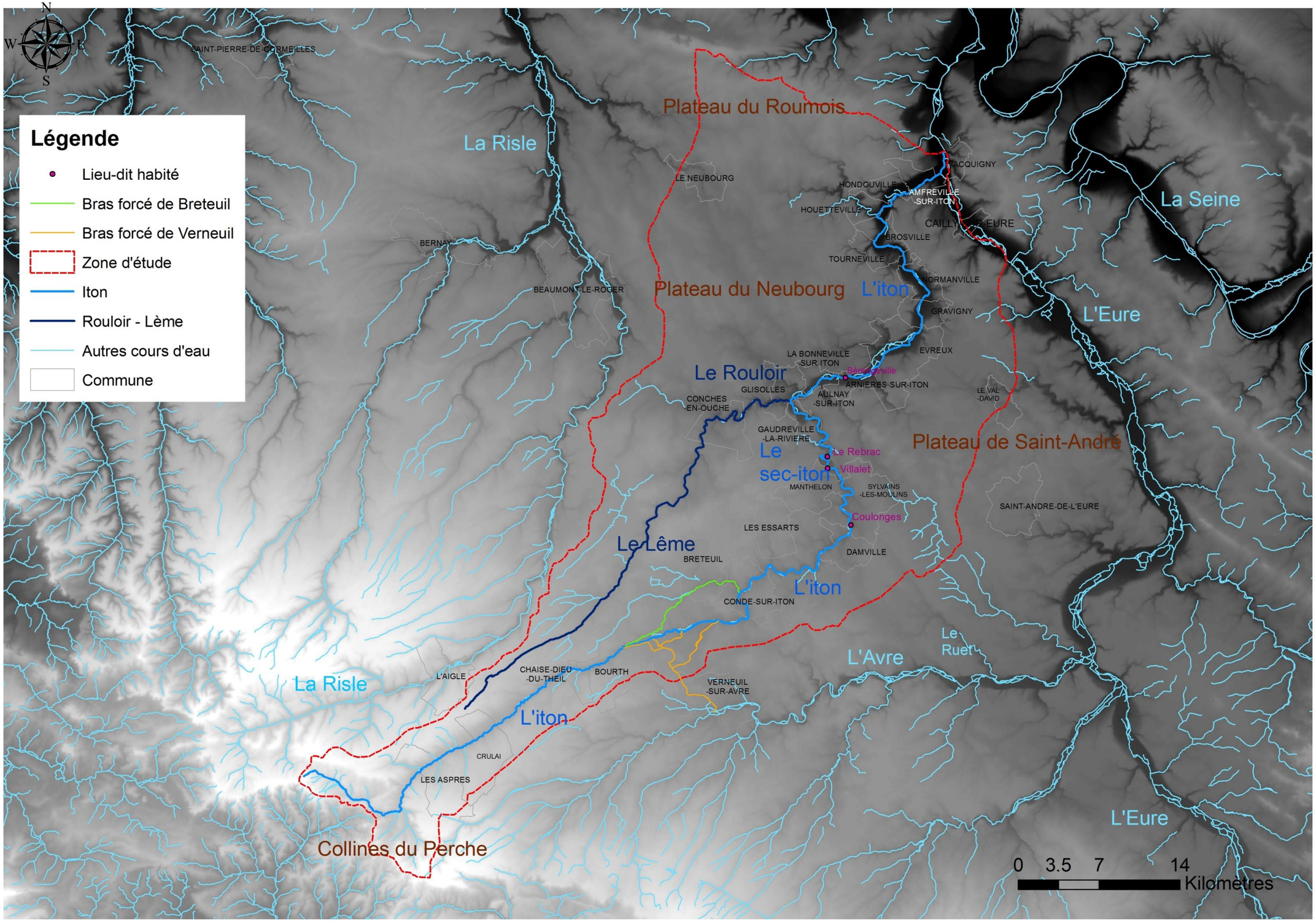
L'église	418	-81	-38,3
Ferme de Villalet	393	-25	-10,1
Le Rebrac - Passerelle	49	-344	-387,9
Le Pré Seigneur (Aval)	0	-49	-65,9
Le Pré Seigneur (Aval)	0	0	0
Les Longs Champs (Amont)	0	0	0
Les Longs Champs (Aval)	40	40	257,4
La Biocherie	A Sec	A Sec	A Sec
Côte du Fourneau	A Sec	A Sec	A Sec
Les Haisettes	A Sec	A Sec	A Sec
Source Bois des Carrières	2	2	2,9
Ferme de Gaudreville	341	339	179,5
Glisolles - Passerelle	222	-177	-54,8
Fosse aux Dames (Aval)	541	319	2766,8
La Bonneville - Pont D74	1988	1447	819,3
Bérengeville	2107	119	41,9
Normanville	2649	542	35,9
Les Planches	4461	1812	114,8

Campagne d'octobre 1970 (localisation des points de jaugeage à l'Illustration 104)

Localité	Débit en L/sec	Pertes/Gains (L/sec)	Pertes/Gains spécifiques (L/sec/km)
Le Gard -Perte	507		
Le Petit Sacq	351	-156	-129,2
La Mesangère	327	-24	-7,8
L'église	166	-161	-76,1
Ferme de Villalet	85	-81	-32,9
Le Rebrac - Passerelle	0	-85	-95,8

Le Pré Seigneur (Amont)	0	0	0
Le Pré Seigneur (Aval)	0	0	0
Les Longs Champs (Amont)	5,7	5,7	6,6
Les Longs Champs (Aval)	0	-5,7	0
Côte du Fourneau	A Sec	A Sec	A Sec
Les Haisettes	A Sec	A Sec	A Sec
Source Bois des Carrières	A Sec	A Sec	A Sec
Source des Hautes Côtes	A Sec	A Sec	A Sec
Source des Grands Riants (Amont)	A Sec	A Sec	A Sec
Source des Grands Riants (Aval)	220	220	546,8
Ferme de Gaudreville	380	160	420,3
Glisolles - Passerelle	380	0	0
Fosse aux Dames (Aval)	733	353	3092
La Bonneville - Pont D74	1912	1179	667,1
Bérengeville	1957	45	15
Les Planches	4010	2053	66,5

Annexe 3
-
Carte des localités


N
W
E
S
Légende
Lieu-dit habité
Bras forcé de Breteuil
Bras forcé de Verneuil
Zone d'étude
Iton
Rouloir - Lème
Autres cours d'eau
Commune
SAINT-PIERRE-DE-CORMEILLES
La Risle
Plateau du Roumois
LE NEUBOURG
HONDOUVILLE
ACQUIGNY
AMFREVILLE SUR-ITON
HOUETTEVILLE
CAILLY-SUR-EURE
La Seine
BROSVILLE
BERNAY
TOURNEVILLE
ORMANVILLE
BEAUMONT-LE-ROGER
Plateau du Neubourg
L'iton
GRAVIGNY
L'Eure
EVREUX
LA BONNEVILLE SUR-ITON
Le Rouloir
Barc-la-ville
ARNIERES-SUR-ITON
GLISOLLES
AULNAY SUR-ITON
LE VAL-DAVID
CONCHES EN-OUCHE
GAUDREVILLE -LA-RIVIERE
Plateau de Saint-André
Le sec-iton
Le Rebrac
Villalet
MANTHELON
SYLVAINS -LES-MOULINS
SAINT-ANDRE-DE-L'EURE
Coulonges
LES ESSARTS
Le Lême
DAMVILLE
BRETEUIL
L'iton
CONDE-SUR-ITON
Le Ruel
L'Avre
L'AIGLE
CHAISE-DIEU -DU-THEIL
BOURTH
VERNEUIL -SUR-AVRE
La Risle
L'iton
CRULAI
LES ASPRES
L'Eure
Collines du Perche
0 3.5 7 14
Kilometres

Annexe 4
-
Coefficients g des profils hydrologiques de l'Iton et du Rouloir

Coefficients g des profils hydrologiques de l'Iton :

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Les Aspres à Bourth	De Bourth à Condé	De condé à Damville	De Damville à Manthelon	De Manthelin à La bonneville	De la Bonneville à Arnière	De Arnière à Normanville	De Normanville à Amfreville
sept-89		0.3					0.7	2.7
août-00	1.2			-0.1	1.8	1.6	-0.4	1.6
sept-02	0.2	0.8	0.04	-0.7	1.9	1.4	0.3	1.3
août-03	0.9	0.2	0.9	-0.2	2.5	2.2	0.1	1.9
sept-03	0.9	0.2	1.2	-1.2	3.2	0.048	0.2	2
sept-04	0.7	-0.12	0.8	-1.4	3.4	1.2	-0.3	2.2
MOYENNE	0.78	0.276	0.735	-0.72	2.56	1.2896	0.1	1.95
MIN	0.2	-0.12	0.04	-1.4	1.8	0.048	-0.4	1.3
MAX	1.2	0.8	1.2	-0.1	3.4	2.2	0.7	2.7
CLASSE	B - C	D	B - C	E	A	B	D	A

Coefficients g des profils hydrologiques du Rouloir :

		9	10	11
	De l'amont de l'étang à l'aval de l'étang	De l'aval de l'étang au pont de la D840	Du pont de la D840 au ld La croisille	Du ld la Croisile à Glisolle
sept-89			66.0	-0.7
août-00		-0.2	19.0	
sept-02	149.8	-0.1	16.8	
août-03			17.6	
sept-03	148.5	0.2	18.5	
sept-04	143.7	-0.1		
MOYENNE	147.3	-0.1	66.0	-0.7
MIN	143.7	-0.2	66.0	-0.7
MAX	149.8	0.2	66.0	-0.7
CLASSE	A	D	A	E

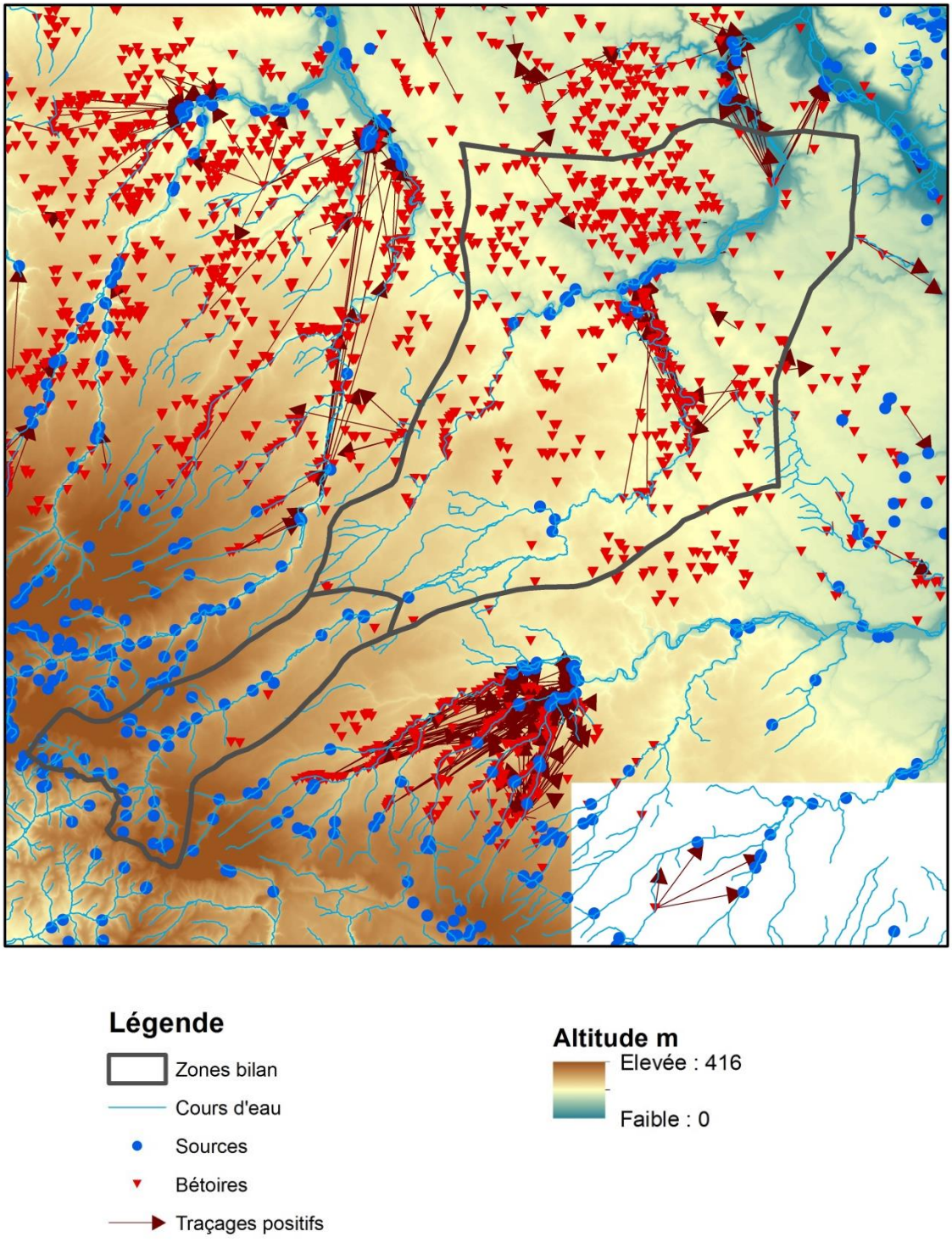
Annexe 5
-
Coefficients culturaux utilisés pour le calcul de l'ETM

Période	Blé tendre	Orge	Protéagineux (Pois)	Maïs
5-janv.	1	0.5	0.5	0.5
15-janv.	1	0.5	0.5	0.5
25-janv.	1	0.5	0.5	0.5
5-févr.	1	0.5	0.5	0.5
15-févr.	1	0.5	0.5	0.5
25-févr.	1	0.5	0.5	0.5
5-mars	1	0.5	0.5	0.5
15-mars	1	0.5	0.5	0.5
25-mars	1	0.5	0.5	0.5
5-avr.	1	1	0.5	0.5
15-avr.	1	1	0.5	0.5
25-avr.	1.2	1.2	0.5	0.5
5-mai	1.2	1.2	0.5	0.5
15-mai	1.2	1.2	1	0.5
25-mai	1.2	1.2	1.2	0.5
5-juin	1.2	1.2	1.2	0.6
15-juin	1.2	1.2	1.2	0.6
25-juin	1	1	0.5	0.8
5-juil.	0.7	1	0.5	1.15
15-juil.	0.6	0.5	0.5	1.15
25-juil.	0.6	0.5	0.5	1.15
5-août	0.5	0.5	0.5	1.15
15-août	0.5	0.5	0.5	1.15
25-août	0.5	0.5	0.5	0.9
5-sept.	0.5	0.5	0.5	0.9
15-sept.	0.5	0.5	0.5	0.9
25-sept.	0.5	0.5	0.5	0.9
5-oct.	0.5	0.5	0.5	0.9
15-oct.	0.5	0.5	0.5	0.9
25-oct.	0.5	0.5	0.5	0.5
5-nov.	0.85	0.5	0.5	0.5
15-nov.	0.9	0.5	0.5	0.5
25-nov.	1	0.5	0.5	0.5
5-déc.	1	0.5	0.5	0.5
15-déc.	1	0.5	0.5	0.5
25-déc.	1	0.5	0.5	0.5

Annexe 6
-
Pluie efficace mensuelle calculée pour chaque zone bilan pour les 2 cycles hydrologiques étudiés

Date	Pluie efficace mensuelle Secteur A	Pluie efficace mensuelle Secteur B
sept-00	0.00	0.00
oct-00	56.54	20.25
nov-00	109.83	54.48
déc-00	105.35	81.27
janv-01	82.47	63.65
févr-01	48.47	34.80
mars-01	110.12	104.69
avr-01	28.73	13.67
mai-01	2.27	7.15
juin-01	0.00	0.00
juil-01	0.00	0.00
août-01	0.00	0.00
sept-11	2.83	2.64
oct-11	0.00	0.00
nov-11	0.00	0.00
déc-11	80.83	45.36
janv-12	31.61	15.24
févr-12	1.19	0.92
mars-12	0.11	0.00
avr-12	35.29	0.14
mai-12	17.68	0.00
juin-12	6.36	0.05
juil-12	0.00	0.00
août-12	0.00	000

Annexe 7
-
Bétoires sources et traçages positifs dans la zone d'étude


Légende
Zones bilan
Cours d'eau
Sources
Bétoires
Traçages positifs
Altitude m
Elevée : 416
Faible : 0

Annexe 8
-
Observation d'assecs sur le Rouloir et l'Iton source : réseaux ONDE (2012-2015) et ROCA (2005-2011)

Observation d'assecs sur le Rouloir et l'Iton
source : réseaux ONDE (2012-2015) et ROCA (2005-2011)

Localité	Date	Ecoulement
Conches-en-Ouche	25/05/2012	Assec
	25/06/2012	Assec
	25/07/2012	Assec
	24/08/2012	Assec
	27/09/2012	Assec
Gaudreville-la-Rivière	22/08/2005	Ecoulement non visible
	18/10/2005	Ecoulement non visible
	08/09/2006	Ecoulement non visible
	11/09/2006	Ecoulement non visible
	18/09/2006	Ecoulement non visible
	28/09/2006	Ecoulement non visible
	03/10/2006	Ecoulement non visible
	25/09/2008	Ecoulement non visible
	03/10/2008	Ecoulement non visible
	13/07/2009	Ecoulement non visible
	28/07/2009	Ecoulement non visible
	04/08/2009	Assec
	20/08/2009	Assec
	24/08/2009	Assec
	03/09/2009	Ecoulement non visible
	05/10/2009	Assec
	06/07/2010	Ecoulement non visible
	20/07/2010	Ecoulement non visible
	03/08/2010	Ecoulement non visible
	17/08/2010	Ecoulement non visible
	26/05/2011	Ecoulement non visible
	24/06/2011	Ecoulement non visible
	04/07/2011	Ecoulement non visible
	12/08/2011	Ecoulement non visible
	30/08/2011	Ecoulement non visible
	09/09/2011	Ecoulement non visible
	21/09/2011	Ecoulement non visible
	25/10/2011	Ecoulement non visible
	24/08/2012	Ecoulement non visible
Villalet	25/07/2011	Ecoulement non visible

Annexe 9
-
Les fonctions de transfert sous TEMPO

Comment agit la fonction de transfert ?

Dans TEMPO, la fonction de transfert peut prendre une forme mathématique donnée (par exemple, dans des cas très simples, une fonction exponentielle) ou bien être représentée directement par une suite continue de valeurs sur les intervalles de temps (le jour ou la décade) découpant la période de modélisation considérée :

- g_0, sur l'intervalle t= 0 à Δt
- g_1, sur l'intervalle t= Δt à 2Δt
- g_2, sur l'intervalle t= 2Δt à 3Δt
- g_3, sur l'intervalle t= 3Δt à 4Δt
- …

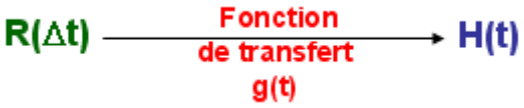
Si la fonction se présente sous une certaine forme mathématique, il est bien sûr possible d'obtenir aussi sur les intervalles de temps, la suite de valeurs g_0, g_1, g_2, g_3, g_4, ...

La fonction de transfert agit comme un « modulateur » : elle module le signal d'entrée de façon à ce que les valeurs calculées de la variable de sortie (débit ou niveau) s'ajustent le mieux possible aux mesures.

Les deux exemples qui suivent illustrent l'action de la fonction de transfert.

Premier exemple

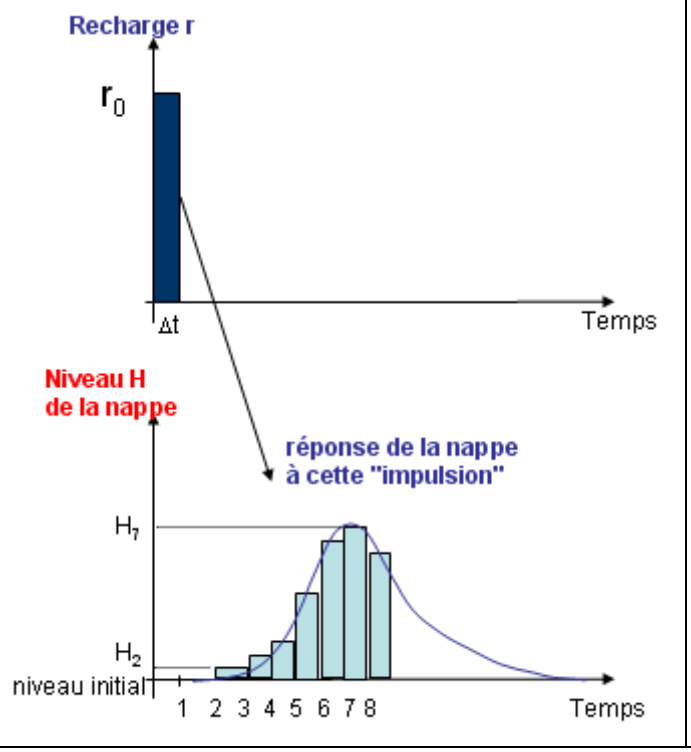
Pour comprendre comment la fonction de transfert permet de passer de l'entrée du système à la sortie, considérons l'exemple simple d'un aquifère avec une entrée constituée par une recharge brève R de la nappe sur un seul intervalle de temps Δt (on parle d'impulsion). La sortie est le niveau de la nappe H(t).



Supposons la fonction de transfert connue, par exemple une fonction exponentielle. Sur la période de temps considérée, subdivisée en intervalles Δt (le jour ou la décade), la fonction de transfert prend les valeurs g0, g1, g2, g3, g4, ...

Par l'intermédiaire de cette fonction, la recharge R sera convertie en une suite de réponses de la nappe : H0, H1, H2, H3, H4, …

Dans ce cas très simple, les niveaux de la nappe aux dates successives t0, t1, t2, t3, t4, ne sont donc qu'une simple pondération de la recharge initiale par les valeurs de la fonction de transfert.



Dans cet exemple, la recharge brève de la nappe par la fraction infiltrée de la pluie efficace provoque une élévation différée et « étalée » dans le temps du niveau de la nappe.

Ce temps retard et le temps au bout duquel la nappe revient à son niveau initial dépendent des caractéristiques de l'aquifère.

La modulation du signal d'entrée consiste ici en une simple pondération de la recharge r_0: r_0

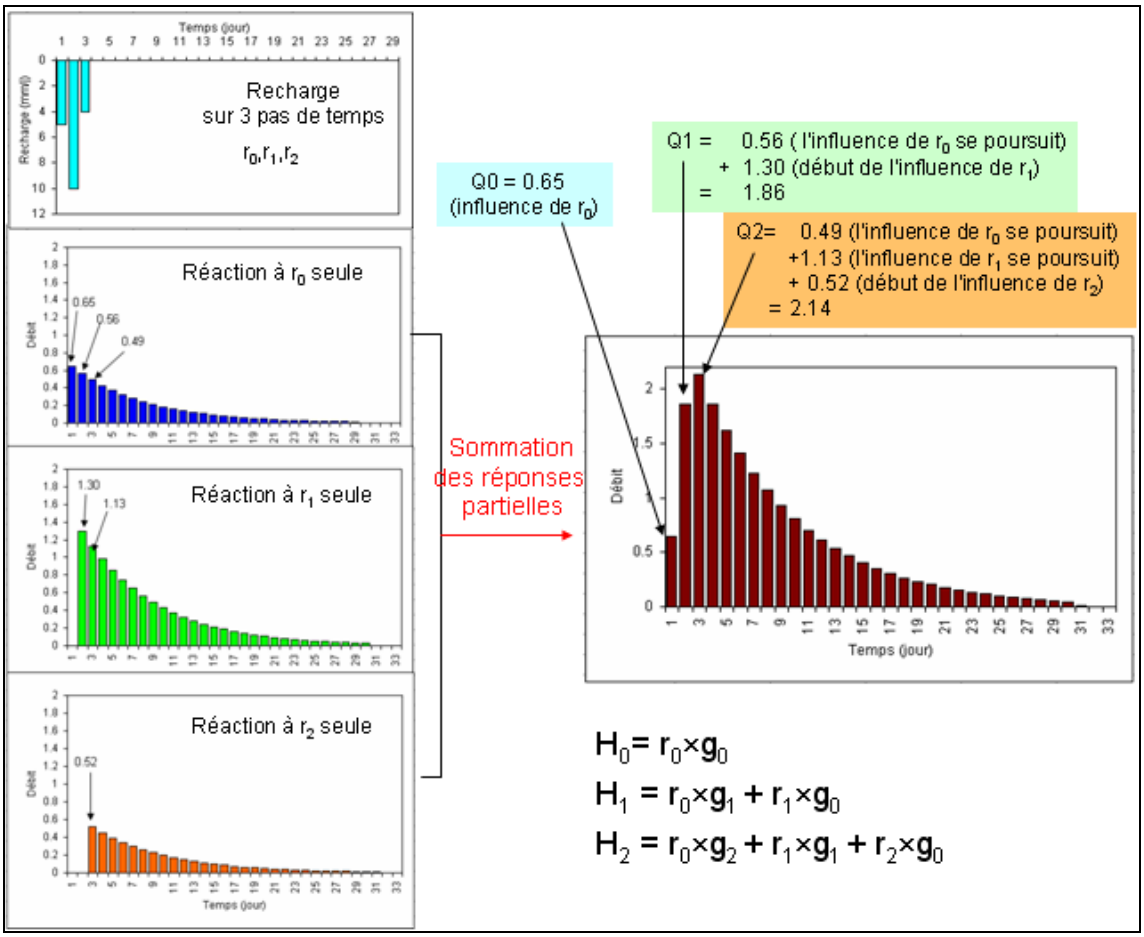
$H_0 = r_0.g_0$	t = 0 à Δt
$H_1 = r_0.g_1$	t = Δt à 2Δt
$H_2 = r_0.g_2$	t = 2Δt à 3Δt
$H_3 = r_0.g_3$	t = 3Δt à 4Δt
…..	

La réaction différée de la nappe implique ici g_0=0 et g_1=0

Exemple illustrant l'action de la fonction de transfert.

Deuxième exemple

Que se passe-t-il dans le cas d'une succession de recharges ? La figure ci-dessous illustre l'action de la fonction de transfert dans le cas de 3 épisodes de recharge successifs.



Autre exemple illustrant l'action de la fonction de transfert.

Chaque épisode de recharge, considéré isolément, provoque une réaction de la nappe. Dans l'exemple traité, la nappe réagit rapidement sans « temps retard ». Il y a une hausse rapide du niveau, puis une décroissance progressive qui se poursuit sur une vingtaine de jours.

Au premier pas de temps, comme dans l'exemple précédent, la hausse de niveau est : $H_0 = r_0.g_0$.

Au deuxième pas de temps, il faut tenir compte non seulement de l'influence de la recharge r_1, mais aussi de la poursuite de l'influence de la recharge r_0 : $H_1 = r_0.g_1 + r_1.g_0$

Au troisième pas de temps, il faut tenir compte non seulement de l'influence de la recharge r_2, mais aussi de la poursuite de l'influence des recharge r_0 et r_1 : $H_2 = r_0.g_2 + r_1.g_1 + r_2.g_0$

Et ainsi de suite…

Généralisation

A chaque pas de temps, pour obtenir la sortie s du système (par exemple le débit à l'exutoire du bassin), on superpose donc, via la fonction de transfert, les effets des « entrées » du système (par exemple la succession des recharges dans le temps), chacun de ces effets se prolongeant, en s'atténuant plus ou moins rapidement suivant l'inertie du système, au-delà de sa période de survenue. D'une façon générale, sur une période de temps où :

- le signal d'entrée est décomposé en une suite e_0, e_1, e_2, e_3, …
- et la fonction de transfert en une suite g_0, g_1, g_2, g_3, …

La sortie du système est construite comme suit:

- $s_0 = e_0.g_0$ t= 0 à Δt
- $s_1 = e_0. g_1 + e_1. g_0$ t= Δt à $2\Delta t$
- $s_2 = e_0. g_2 + e_1. g_1 + e_2. g_0$ t= $2\Delta t$ à $3\Delta t$
- $s_3 = e_0. g_3 + e_1. g_2 + e_2. g_1 + e_3. g_0$ t= $3\Delta t$ à $4\Delta t$
- $s_4 = e_0. g_4 + e_1. g_3 + e_2. g_2 + e_3. g_1 + e_4. g_0$ t= $4\Delta t$ à $5\Delta t$
- etc…

<u>Une seule fonction de transfert peut-elle suffire ?</u>

En fait, les processus étant plus complexes (coexistence d'écoulements « lents » et « rapides ») et parfois non linéaires (effets de seuils, débordements), plusieurs fonctions de transfert sont en général nécessaires pour simuler au mieux un système hydrologique.

De même, plusieurs entrées peuvent être introduites dans le processus de modélisation : ainsi, un débit à l'exutoire d'un bassin peut être reproduit à partir d'une séquence de pluies et d'ETP et à partir d'une chronique de niveaux piézométriques, permettant par exemple de prendre en compte un soutien des débits d'étiage, ou plus généralement des échanges nappe-cours d'eau.

Une fois déterminée les fonctions de transfert, les différentes contributions à l'écoulement global, à l'exutoire, sont calculées par le logiciel.

La prise en compte de plusieurs entrées rend plus complexe le système, mais les principes de modélisation restent identiques.

Comment la fonction de transfert est-elle calculée ?

Pour obtenir les valeurs g_0, g_1, g_2, g_3,… inconnues, Tempo propose deux possibilités :

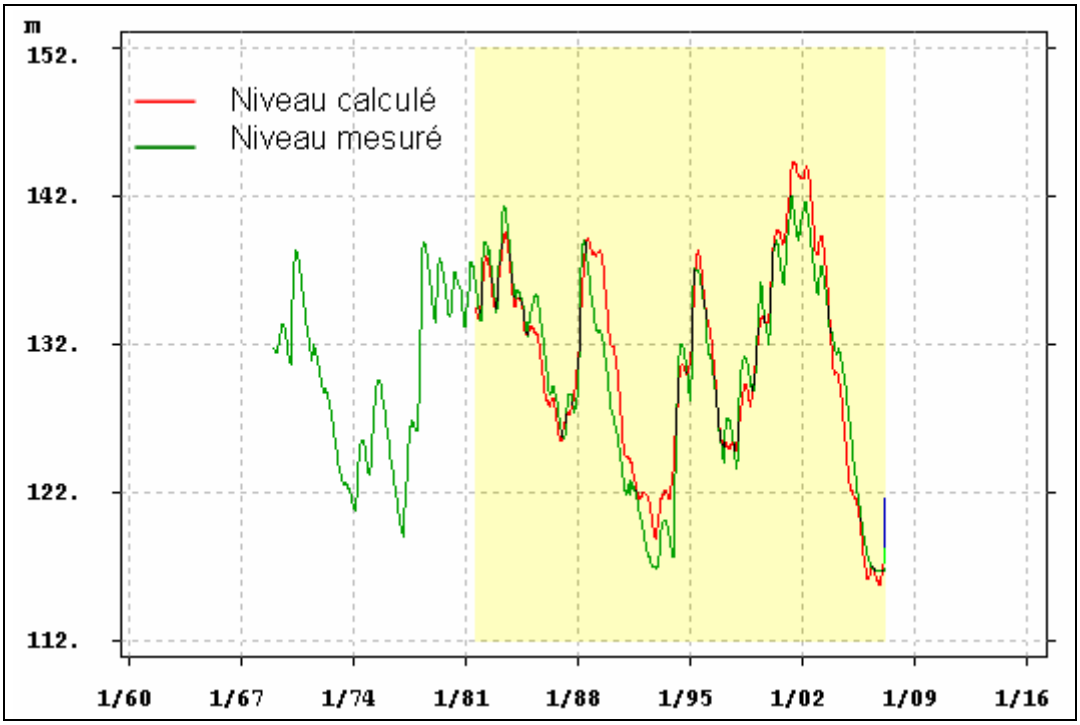
- on donne à la fonction de transfert une forme générale a priori avec des paramètres inconnus. Une fois ces paramètres identifiés, on peut calculer g_0, g_1, g_2, g_3,… sur les intervalles de temps considérés ;
- on recherche directement g_0, g_1, g_2, g_3,…

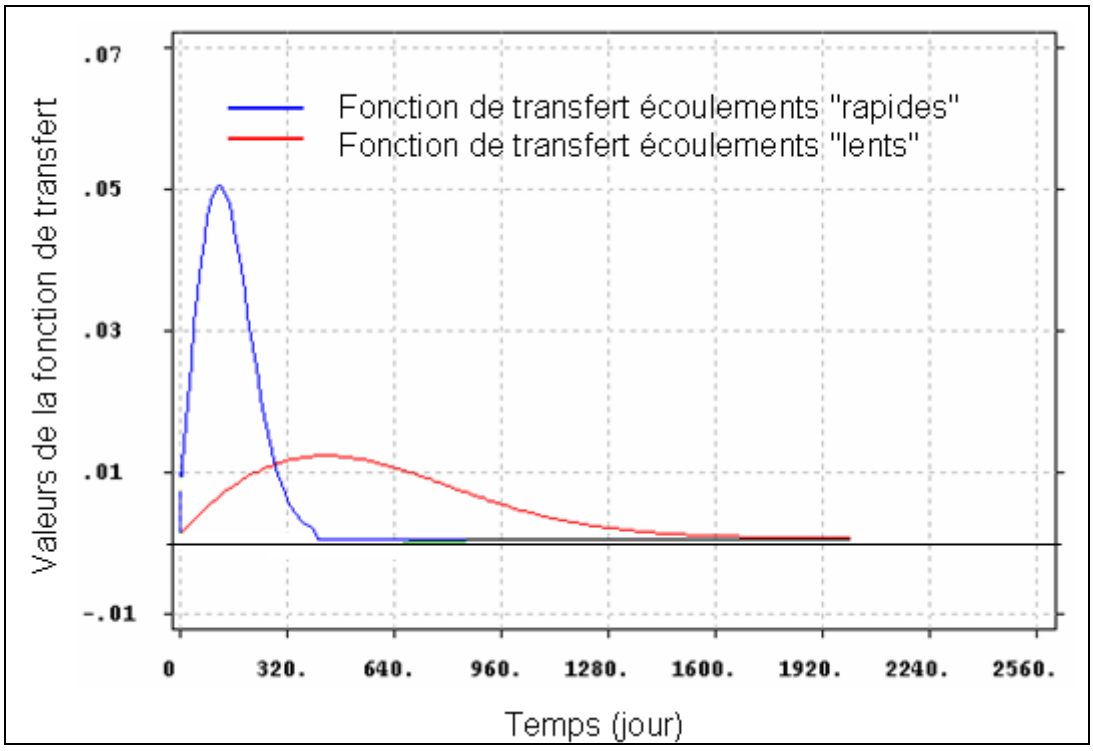
Dans les deux cas, des procédures complexes sont utilisées pour obtenir les valeurs de la fonction de transfert (pour plus de détail, voir l'annexe technique).

C'est la phase de calage (sur les observations) qui permet d'obtenir la fonction de transfert.

L'illustration suivante propose un exemple correspondant à un calage sur des niveaux d'un aquifère présentant une double porosité : porosité de fissure et porosité matricielle.

Cette double porosité conduit à 2 fonctions de transfert correspondant d'une part à un écoulement « rapide » empruntant les fissures et d'autre part à l'écoulement lent au sein de la porosité matricielle.





Exemple de résultats fournis par TEMPO après la phase de calage.

Annexe 10
-
Principe et fonctionnement des générateurs de pluie et d'ETP du logiciel TEMPO

Générateur de pluie de Tempo

L'option « générateur de pluie » du logiciel Tempo a été utilisée dans cette étude afin de générer de manière stochastique des scénarios de pluie (qui ont les mêmes caractéristiques que la pluie observée).

- **Conditions d'application**

Le générateur de pluie de TEMPO permet de générer une ou des séquences de pluie à partir d'une série observée. La séquence générée peut prolonger la série observée si la date du début de la série simulée correspond à la fin de la série observée.

La simulation d'une séquence de pluie doit satisfaire plusieurs conditions, tant au niveau de la distribution des hauteurs de pluie que des propriétés temporelles des divers événements qui se succèdent. Ce sont :

- la probabilité marginale des hauteurs de pluie (sans considération de distribution dans le temps). La loi de distribution empirique peut éventuellement être remplacée par une loi log-normale ou de Gumbel, lorsque le niveau de confiance calculé à partir du test de Kolmogorov le permet (ce niveau doit au moins être égal à 80% pour que la substitution soit possible). Très souvent la loi empirique régissant les précipitations est significativement différente de l'une de ces 2 lois. Ce résultat s'explique en raison de la loi de distribution observée qui est bi-modale
- la fonction d'autocorrélation des événements (Illustration 236), observés et simulés doit être vérifiée,
- la loi d'échelle définie à partir de ses 3 premiers moments. Cette loi d'échelle suppose la validité de la relation suivante, pour chaque k (ordre) :

$$Mj(k.dt)=k^{\lambda.(j)}.Mj(dt)$$

où le moment $M_j(k.dt)$ est la somme, sur le segment de temps k.dt, des hauteurs de pluie élevées à la puissance j. Seules les hauteurs de pluie strictement positives sont comptabilisées de manière à considérer la moyenne des hauteurs de pluie (sinon on aurait un résultat trivial lambda(1)=1 car Mj(dt) représenterait la hauteur de pluie moyenne).

> Chacun des exposants $\lambda(j)$ relatifs aux différents moments j de la série simulée doit être voisin de ceux calculés à partir de la série observée. Cette loi d'échelle est appliquée sur les segments k.dt correspondant à 1, 2, 8, 16 et 32 jours. Elle a pour but de structurer la manière dont les hauteurs de pluie varient sur des segments de temps de longueur variable. La notion de moment appliquée aux séries temporelles peut être rapprochée des moments associés aux variables aléatoires : le premier moment est la moyenne, le second moment centré est caractéristique de la dispersion (variance) et permet la structuration des hauteurs de pluie sur différentes période de temps, le troisième moment est caractéristique de l'asymétrie de la loi de probabilité associée à la variable aléatoire.

- la saisonnalité des pluies doit être reproduite,

- la variabilité de la pluie annuelle cumulée, si les périodes d'observation et de simulation couvrent chacune au moins 5 années

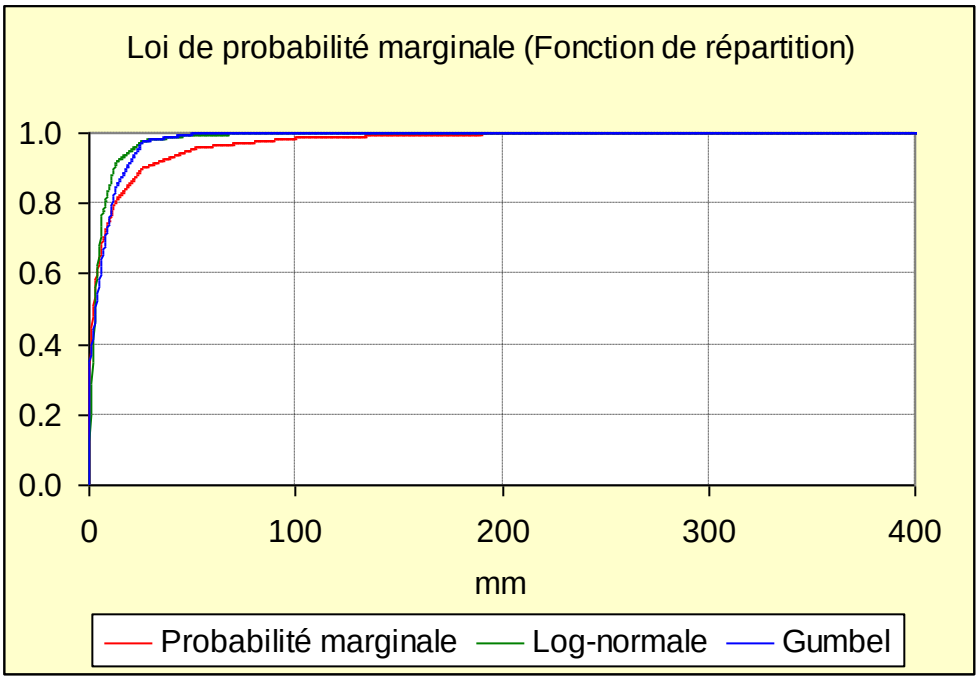


Illustration 234 : Exemple de Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : représention de la loi de probabilité marginale (loi empirique) et des lois Log-Normale et Gumbel de la chronique de pluie de l'impluvium karstique des Cent Fonts.

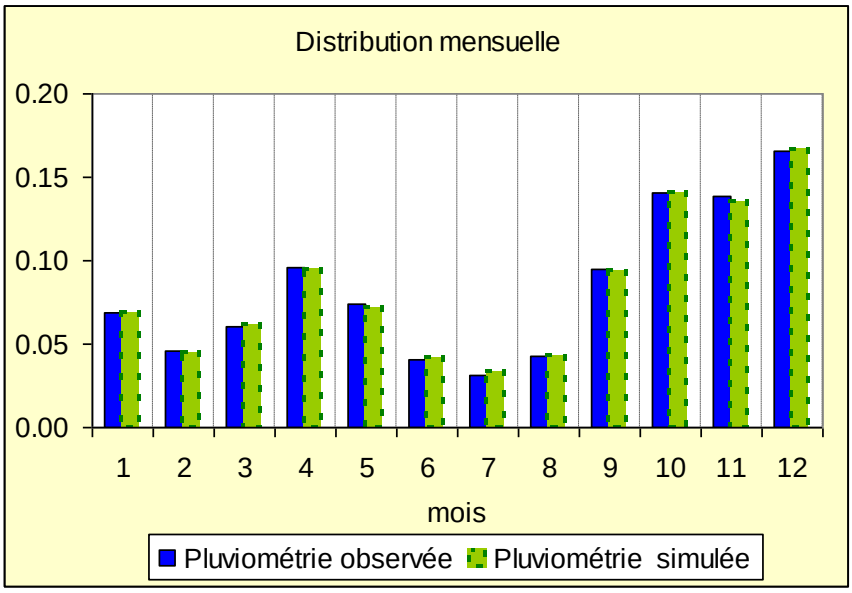


Illustration 235 : Exemple de Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : histogramme de la distribution mensuelle de la pluie déduit des observations et de la simulation.

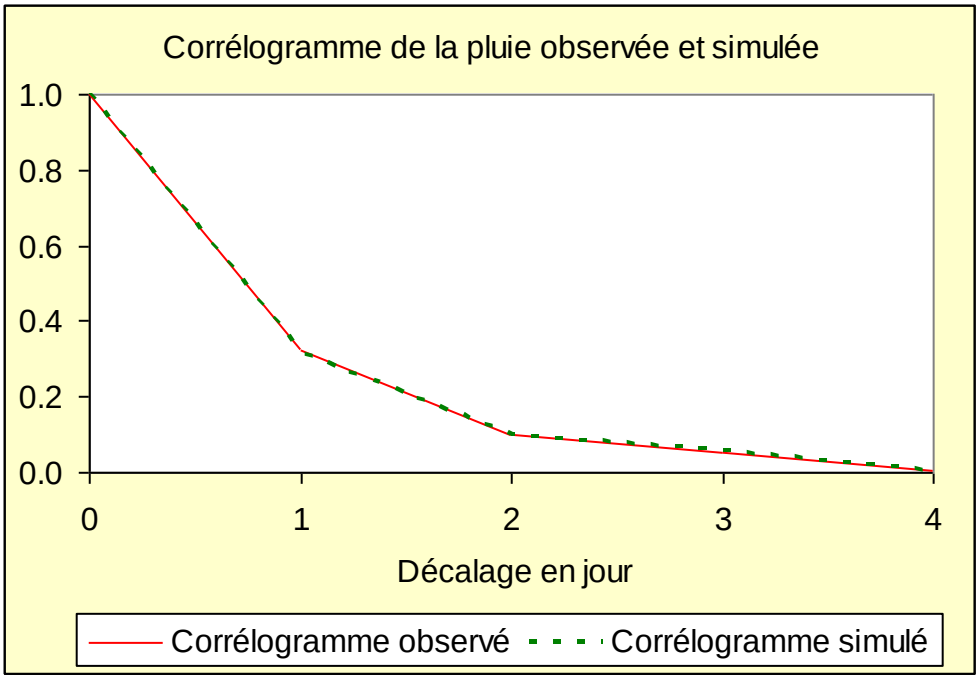


Illustration 236 : Exemple du Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : corrélogramme de la pluie déduit des observations et des simulations.

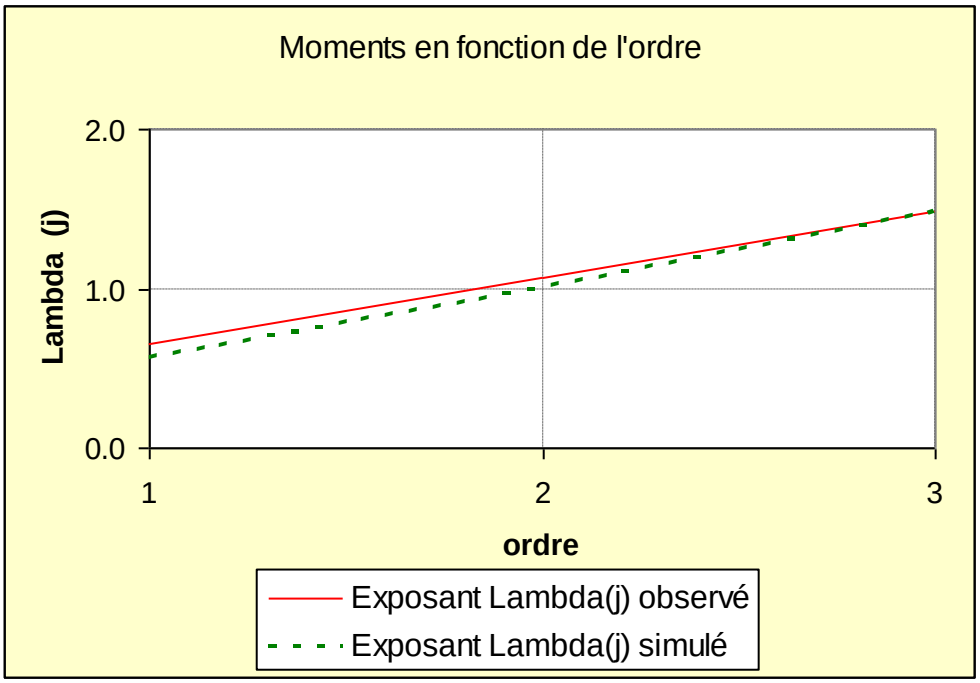


Illustration 237 : Exemple du Générateur de pluie du modèle Cent Fonts: représentation des moments en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations.

- **Principe de la simulation de chronique de pluie.**

La séquence de pluies est générée de la manière suivante. Une période de temps T est définie (la série simulée peut succéder à la séquence observée, mais ce n'est pas obligatoire) :

- à chaque événement est affectée une hauteur de pluie tirée au hasard à partir de la distribution marginale empirique qui résulte des observations. On obtient ainsi une séquence de pluie dont les hauteurs sont distribuées à la manière de la série observée, mais qui ne présente aucune structure temporelle (distribution marginale),
- les événements sont distribués suivant une loi uniforme sur la période T, jusqu'à ce que la moyenne annuelle de la hauteur de pluie simulée soit égale à la moyenne annuelle de la hauteur de pluie observée sur la période T,
- ces événements sont organisés en réalisant des permutations successives (ces permutations affectent de la même manière les 'non événements' correspondant à l'absence de pluie). Ces permutations visent à minimiser une fonction « objectif » choisie de telle sorte que les différents critères qui définissent la structuration temporelle de la série simulée se rapprochent de ceux qui caractérisent la série observée. Toute permutation qui améliore la structure temporelle, ce qui se traduit par une décroissance de la fonction objectif, est entérinée. Dans le cas contraire, la permutation n'est entérinée qu'avec la probabilité :

  exp[(Objectif_0-Objectif)/ « *Température* »]

  où la différence Objectif_0-Objectif mesure la 'dégradation' des propriétés temporelles de la série simulée (différence des fonctions objectif avant et après permutation). La « température » est un nombre qui décroît régulièrement, après que l'équilibre thermodynamique du système ait été constaté (cet équilibre est atteint lorsque les permutations qui se réalisent effectivement, laissent la fonction objectif inchangée). Ce 'refroidissement' permet de minimiser la fonction objectif progressivement, tout en évitant d'atteindre un minimum local, condition qui bloquerait l'évolution du système.

  Cette diminution progressive de la « température » confère à ce générateur une analogie complète avec la technique du recuit bien connue des métallurgistes. Ce générateur est d'autant plus performant que la série à simuler contient un grand nombre d'événements, ce qui autorise un grand nombre de permutations.

En règle générale, plusieurs centaines d'événements sont nécessaires pour assurer un bon accord entre les propriétés temporelles des séries simulées et observées. La longueur de la série observée doit donc couvrir plusieurs années lorsqu'elle présente une saisonnalité marquée. Ceci se vérifie en particulier lors de la génération directe d'une séquence de pluie efficace, sans passer par son calcul à partir de l'ETP.

La technique du recuit[29], basée sur la minimisation d'une fonction objectif (algorithme de Metropolis - Hastings, 1953, 1970) à partir de permutations successives d'événements, se prête particulièrement bien à la génération de chroniques de pluie. Une séquence simulée peut faire suite à une séquence observée, la continuité, entre les 2 séquences résultant de la structure temporelle commune aux séries observées et simulées.

Un exemple de résultat de simulation obtenu par le générateur de pluie est présenté sur l'Illustration 238.

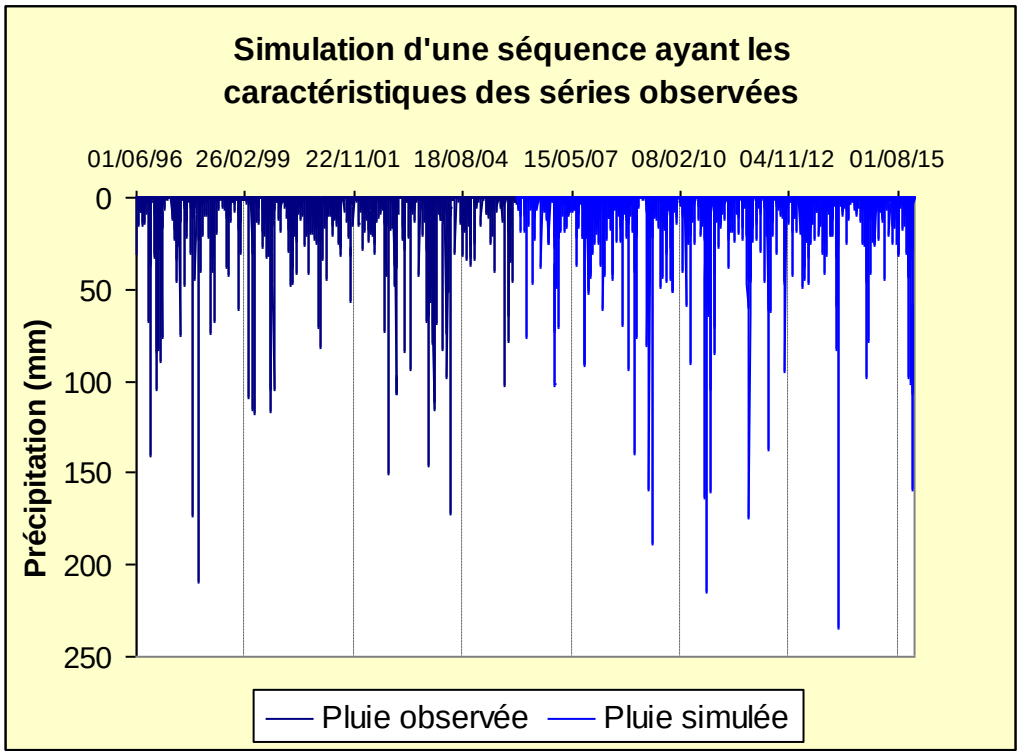


Illustration 238 : Exemple du Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence de pluie (au pas de temps journalier) ayant les caractéristiques de la série observée : Exemple du run 3

Nota :

- [29] La technique du recuit peut toutefois nécessiter des moyens de calcul importants car, pour posséder les caractéristiques de la pluie observée, un nombre relativement important d'événements doit être simulé pour permettre de nombreuses combinaisons de permutation, quelque soit la longueur de la période de temps..

c) Générateur d'ETP de Tempo

Le générateur d'ETP de TEMPO permet de générer une séquence d'ETP à partir d'une série observée. La séquence générée peut prolonger la série observée si la date du début de la série simulée correspond à la fin de la série observée.

- **Condition et principe de la simulation de l'ETP**

De manière similaire au générateur de pluie, c'est la technique du recuit qui est utilisée pour générer des séquences d'ETP. Il s'agit en fait de générer le 'bruit' constitué par les variations autour d'une valeur moyenne mensuelle (Illustration 239). Puisque ces écarts sont toujours structurés temporellement, la technique du recuit permet de faire en sorte que les fonctions d'autocorrélation et de corrélation croisée[30] « Variable climatique – Pluie » des séries observées et simulées soient les plus proches possibles l'une de l'autre (Illustration 240), de même que les variations mensuelles observées et simulées de l'écart - type du bruit (Illustration 241).

De manière similaire au générateur de pluie, les 3 premiers moments sont calculés (Illustration 242) à partir de la valeur absolue du bruit (les écarts de la variable climatique par rapport à la moyenne mensuelle étant positifs ou négatifs, le calcul des moments à partir de la valeur algébrique du bruit conduirait à des valeurs tendant vers 0 lorsque la période d'observation augmente car les écarts ont tendance à s'équilibrer. Le calcul des exposants $\lambda(j)$ perdrait alors tout son sens, car on serait en présence de formes indéterminées, (voir 'Générateur de pluie'). Chacun des exposants λ (j) relatifs aux différents moments j de la série simulée doivent être voisins de ceux calculés à partir de la série observée, ce qui est vérifié dans cette étude (cf. Illustration 242). Cette loi d'échelle est appliquée sur les segments correspondant à 1, 2, 8, 16 et 32 jours. Contrairement à la pluie dont le premier moment est inférieur à 1, l'exposant λ (1) est ici voisin de 1, ce qui signifie que l'ETP peut s'écarter de la moyenne mensuelle aussi longtemps que dure la période d'observation (alors que la pluie cesserait nécessairement).

C'est la loi de probabilité marginale du bruit qui a été utilisée dans cette étude dans la mesure où la loi empirique est significativement différente de la loi normale (Illustration 243).

Un exemple de résultat de simulation obtenu par le générateur d'ETP est présenté sur l'Illustration 244.

- [30] La fonction de corrélation croisée ETP - Pluie est considérée pour des décalages à la fois positifs et négatifs, ce qui permet de simuler aussi bien une relation causale de la température de l'air sur la pluie que de la pluie sur la température.

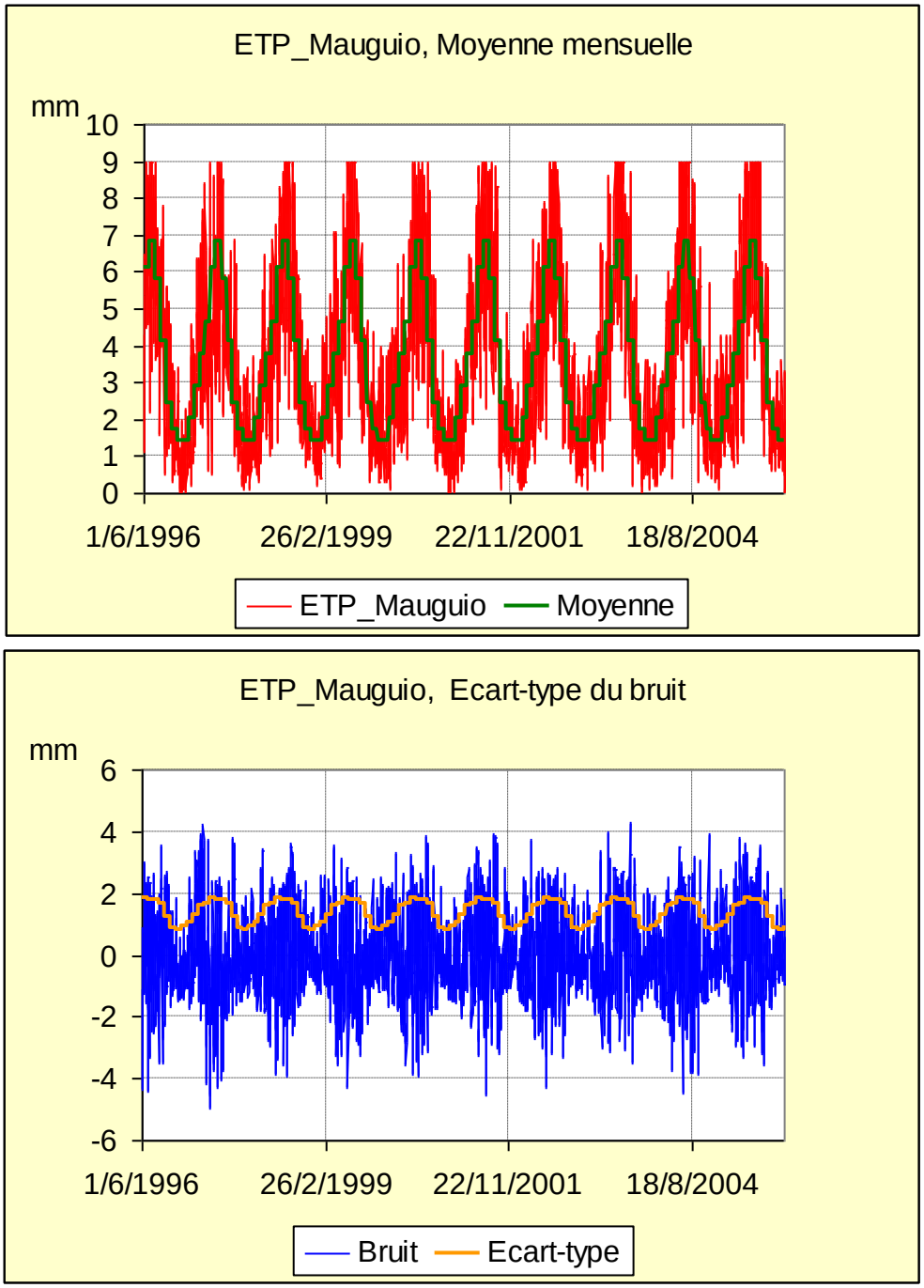


Illustration 239 : Exemple du Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation de l'ETP journalière (Données Météo France, station Montpellier Fréjorgues), de l'ETP moyenne mensuelle, de l'écart-type et du bruit (fonction aléatoire).

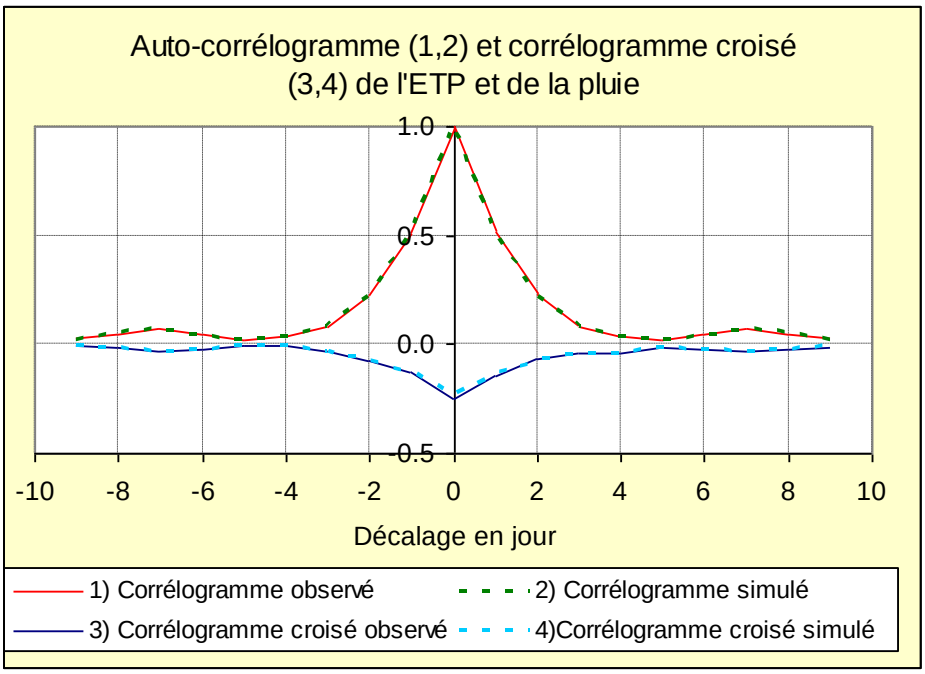


Illustration 240 : Exemple du Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : corrélogramme de l'ETP déduit des observations et des simulations et corrélogramme croisé ETP – Pluie déduit des observations et des simulations

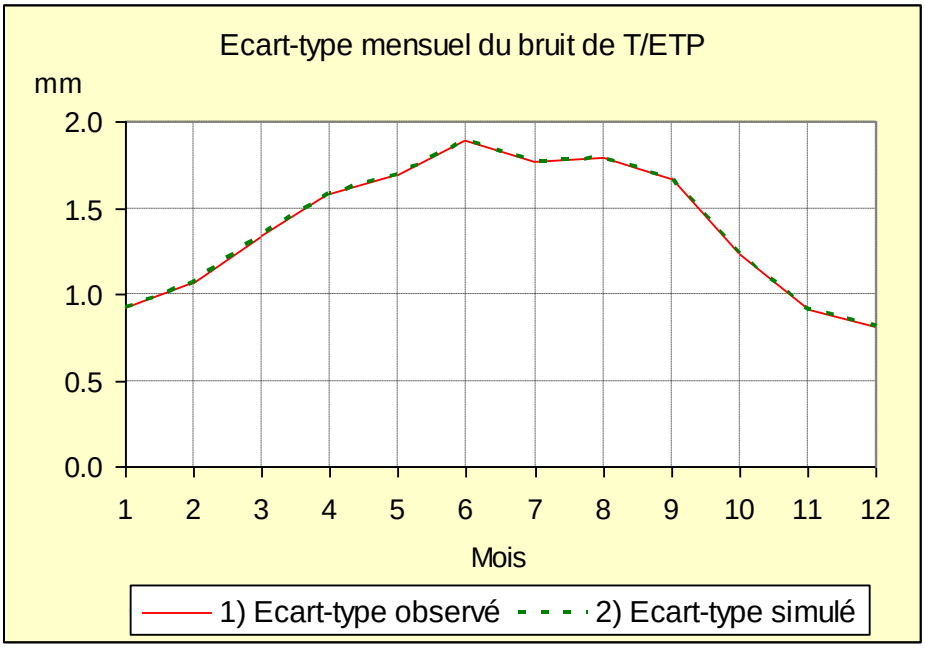


Illustration 241 : Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : écart-type mensuel du buit de l'ETP déduit des observations et des simulations.

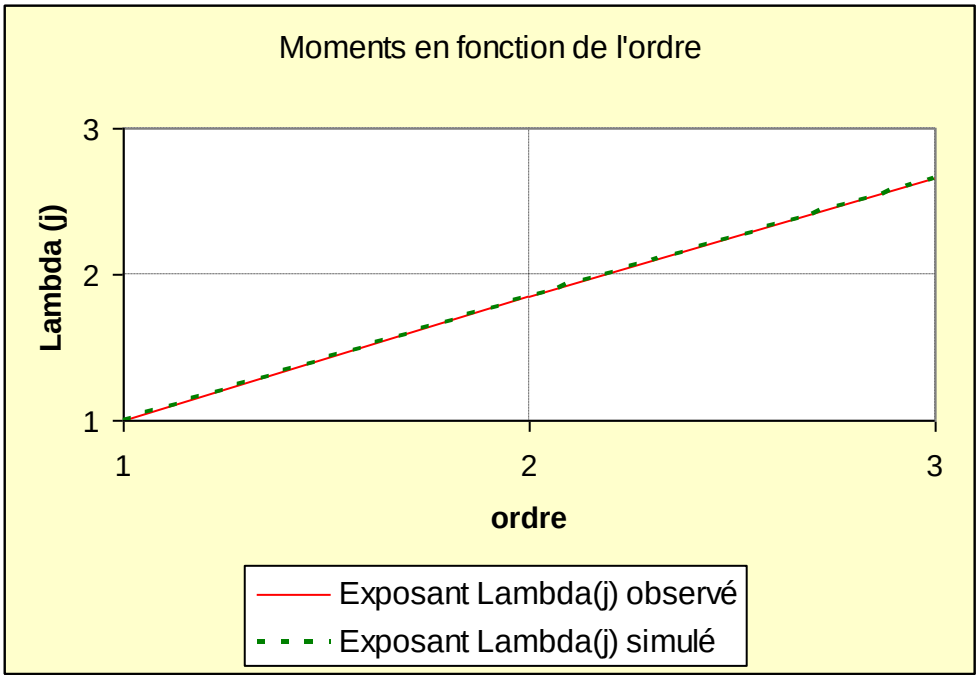


Illustration 242 : Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation des moment en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations.

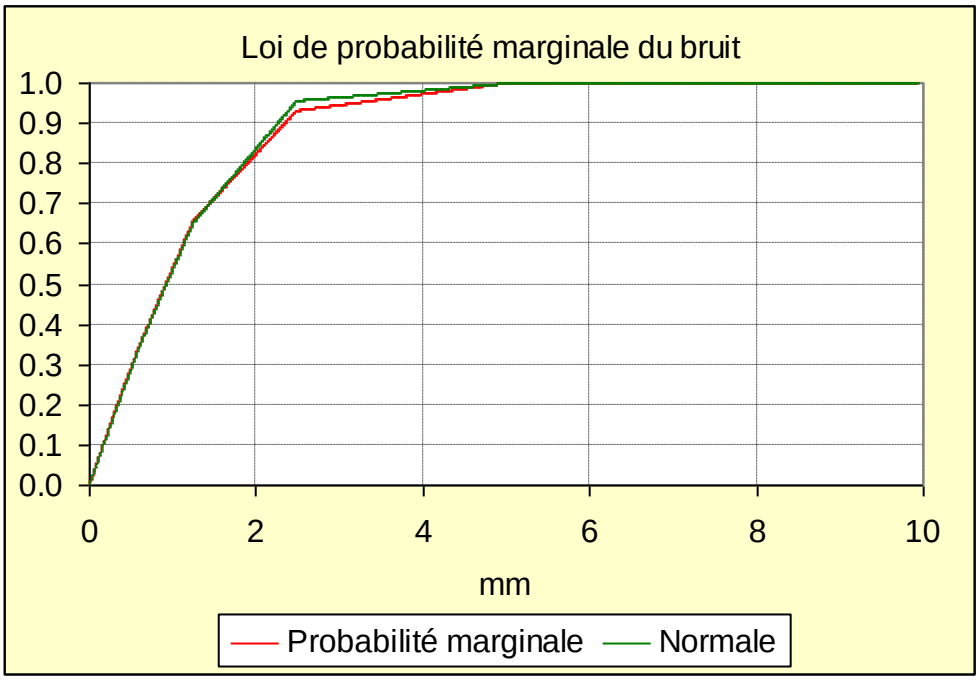


Illustration 243 : Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation de la loi de probabilité marginale (loi empirique) et de la loi Normale.

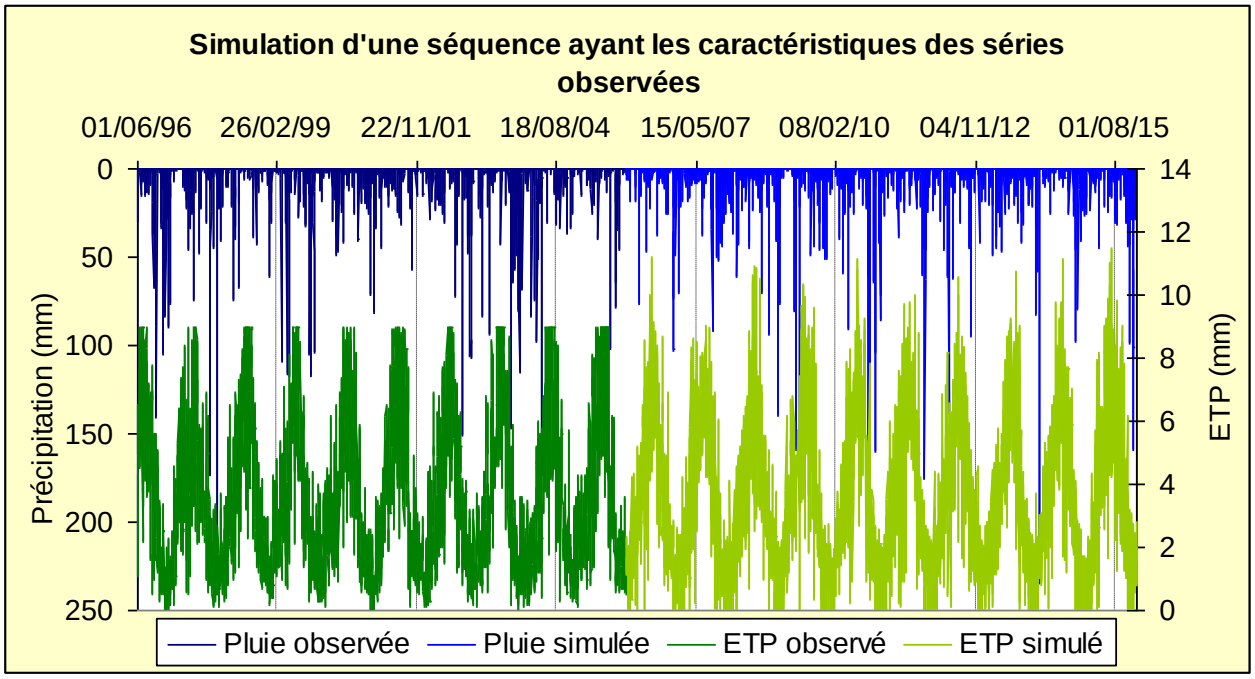


Illustration 244 : Générateur d'ETP et de pluie du modèle Cent Fonts : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence d'ETP et de pluie (au pas de temps journalier) ayant les caractéristiques des séries observées : Exemple du run 3

Annexe 11
-
Présentation du principe du modèle inverse pour estimer les échanges latéraux lors des crues sur un tronçon

MODELE INVERSE POUR ESTIMER LES ECHANGES LATERAUX SUR UN TRONÇON

Problématique

L'approche Débit-Débit entre deux stations hydrométriques sur un cours d'eau permet d'étudier les écoulements latéraux qui peuvent se produire sur le tronçon. A partir des hydrogrammes mesurés à la station amont et à la station aval, il est possible de modéliser l'hydrogramme du bassin intermédiaire, sur lequel se produisent les écoulements latéraux issus des versants situés entre les deux stations. De manière théorique, l'Illustration 245 synthétise trois cas de crues types à l'échelle d'un tronçon de rivière (Charlier et al., 2013) :

- cas 1 : un état hydrique initial saturé (des sols et de l'aquifère) qui engendre une prédominance de ruissellement de surface associé à un drainage de l'aquifère. Dans ce cas, les écoulements latéraux sont des apports issus des versants et de la nappe, ce qui engendre une augmentation du débit du cours d'eau de l'amont à l'aval ;
- cas 2 : un état hydrique initial sec qui favorise l'infiltration limitant alors le ruissellement de surface, et engendrant des pertes au niveau du cours d'eau qui alimente l'aquifère situé à une cote inférieure au radier. Dans ce cas, les écoulements latéraux sont des pertes, ce qui engendre une diminution du débit du cours d'eau de l'amont à l'aval ;
- cas 3 : l'état hydrique initial du bassin passe d'un niveau sec à un niveau saturé au cours de l'épisode pluvieux, engendrant un mixte des deux cas précédents. Des pertes en début de crue font la place à des apports lorsque le bassin est saturé.

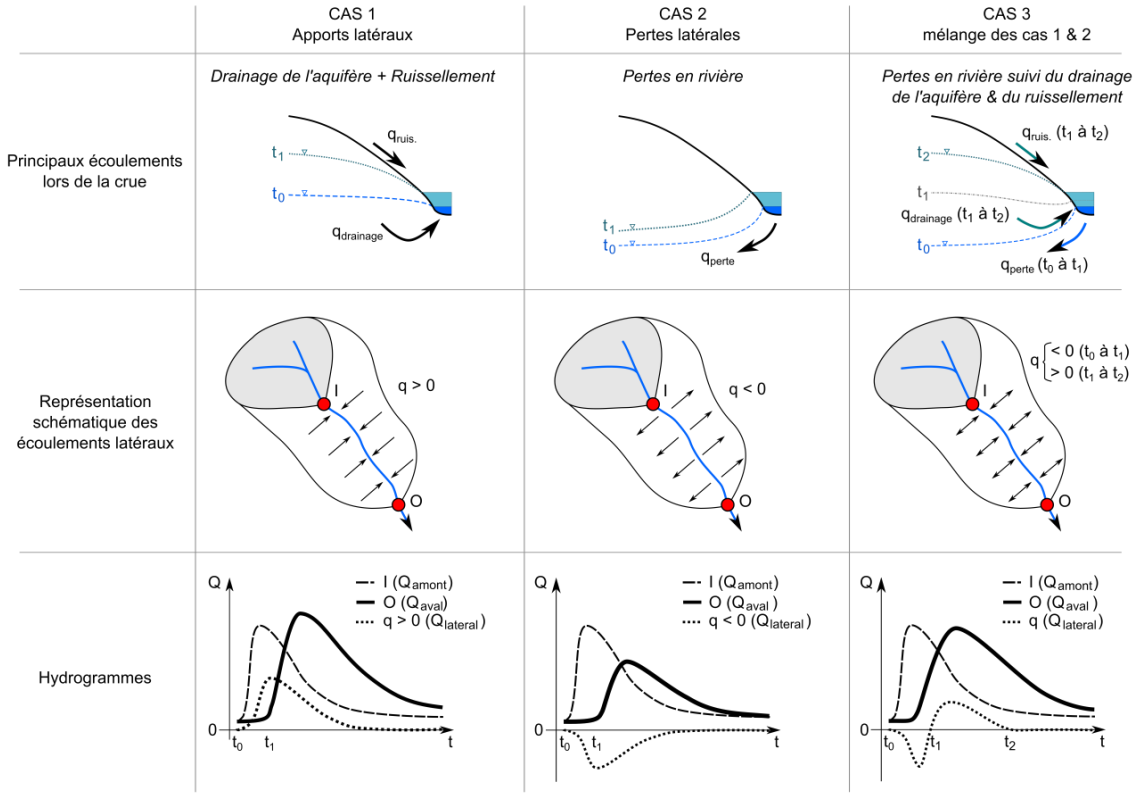


Illustration 245 : Schématisation des processus latéraux dominants lors des crues selon différents états hydriques initiaux sur un tronçon entre deux stations hydrométriques amont I (inflows) et aval O (outflows).(d'après Charlier et al. 2013)

Notons que dans le cas d'un bassin karstique sur lequel on peut négliger le ruissellement sur versant, les écoulements latéraux sont principalement des échanges surface/souterrain avec des contributions du karst à la rivière dans le cas 1, des pertes de rivières qui alimentent le karst dans le cas 2, et un mixte de ces deux cas dans le cas 3.

La simulation de l'hydrogramme des écoulements latéraux (Q latéral) nécessite l'utilisation d'un modèle de propagation de l'onde de crue.

Modèle de l'onde diffusante avec écoulements latéraux

Le modèle de l'onde diffusante avec écoulements latéraux simule la propagation de l'onde de crue entre deux stations en tenant compte d'apports ou de pertes uniformément réparties sur le tronçon. Pour caractériser ces écoulements latéraux, nous utilisons dans cette étude le modèle inverse qui simule le débit latéral à partir des données mesurées au droit des stations amont et aval.

a) Modèle de transfert : simulation du débit à l'exutoire

- Un modèle linéaire d'hydrogramme unitaire, basé sur la méthode du noyau d'Hayami (1951) qui est une résolution de l'équation de l'onde diffusante, a été choisi pour simuler le transfert dans le réseau hydrographique (Moussa et Bocquillon, 1996). Pour tenir compte des écoulements latéraux au débit dans la rivière, nous utilisons la résolution de l'équation de l'onde diffusante qui tient compte d'apports ou de pertes uniformément répartis sur la longueur du tronçon (Moussa, 1996). Le principe est présenté dans l'Illustration 246.

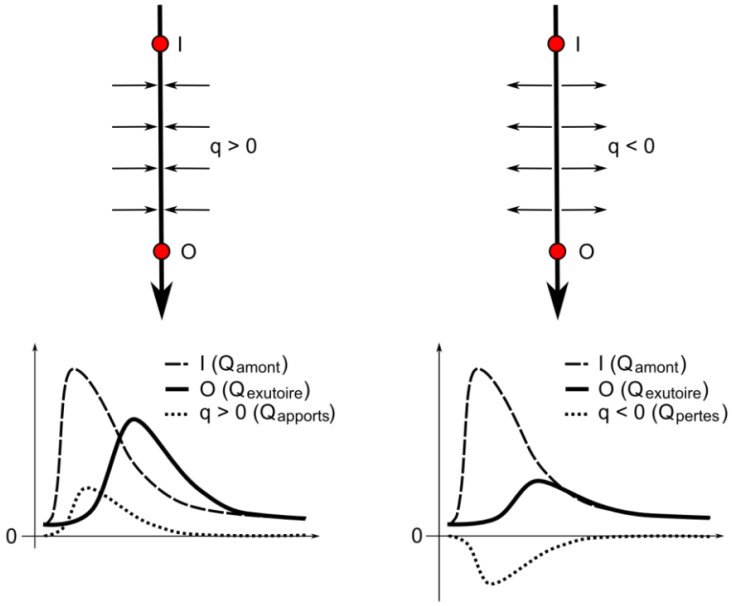


Illustration 246 : Propagation de l'onde de crue entre I (inflows) et O (outflows) avec apports ou pertes répartis de manière uniforme sur la longueur du cours d'eau (d'après Moussa, 1996).

Les deux paramètres sont la célérité *C* [L T^{-1}] et la diffusivité *D* [L^2 T^{-1}] qui représentent respectivement la vitesse de propagation de l'onde et son étalement.

L'équation de l'onde diffusante dépend des conditions initiales à *t* = 0 et aux limites amont et aval, des caractéristiques géométriques et hydrauliques de la rivière (profil en travers, pente et rugosité) exprimées à travers les relations *C*(*Q*) et *D*(*Q*), et de la fonction *q(t)* d'apports ou pertes latéraux selon que *q*(t) est positif ou négatif. Le terme *q(t)* [$L^2.T^{-1}$] représente la distribution latérale des écoulements par unité de longueur.

Dans le cas général où la célérité C et la diffusivité D sont constantes sur un tronçon de rivière de longueur *L*, l'équation de l'onde diffusante admet une solution analytique exacte (Moussa, 1996) :

(1) $$O(t) = \Phi(t) + \left(I(t) - \Phi(t)\right) * K(t)$$

(2) avec $$\Phi(t) = \frac{C}{L}\int_0^t [Q_A(\lambda) - Q_A(0)]d\lambda$$

où le symbole (*) représente le produit de convolution et *I(t)* et *O(t)* sont respectivement l'hydrogramme d'entrée et l'hydrogramme de sortie.

K(t) est la fonction « noyau d'Hayami » :

(3) $$K(t) = \frac{L}{2(\pi D)^{1/2}} \frac{\exp^{\frac{CL}{4D}\left(2 - \frac{L}{Ct} - \frac{Ct}{L}\right)}}{t^{3/2}}$$

$Q_A(t)$ est l'hydrogramme résultant de la composante latérale uniformément répartie par unité de longueur *q(x,t)* [L^2.T-1] :

(4) $$Q_a(t) = \int_0^t q(x,t).dx$$

Selon les conditions hydrologiques, la composante latérale *q(x, t)* peut être négative ou positive s'il y a respectivement une dominante d'apports ou de pertes dans le réseau.

b) Modèle inverse : simulation des écoulements latéraux

Le problème inverse concerne l'identification des écoulements latéraux sur un tronçon sur la base de la connaissance des hydrogrammes aux deux stations amont et aval. Dans ce cas, les deux fonctions *I(t)* et *O(t)* sont connues et le problème est d'identifier $Q_A(t)$. D'après Moussa (1996), de l'équation (1) on obtient:

(5) $$A(t) = O(t) - I(t) * K(t)$$

(6) avec $$\Phi(t) - \Phi(t) * K(t) = A(t)$$

La résolution des Eq.(5) et (6) nécessite tout d'abord d'identifier le noyau d'Hayami *K(t)*, puis de calculer *A(t)* en utilisant l'Eq. (5), ensuite de résoudre l'Eq. 6 afin de calculer la fonction $\Phi(t)$. Le calcul de $Q_A(t)$ se fait alors ainsi :

(7) $$Q_A(t) = Q_A(0) + \frac{L}{C}\frac{d\Phi}{dt}$$

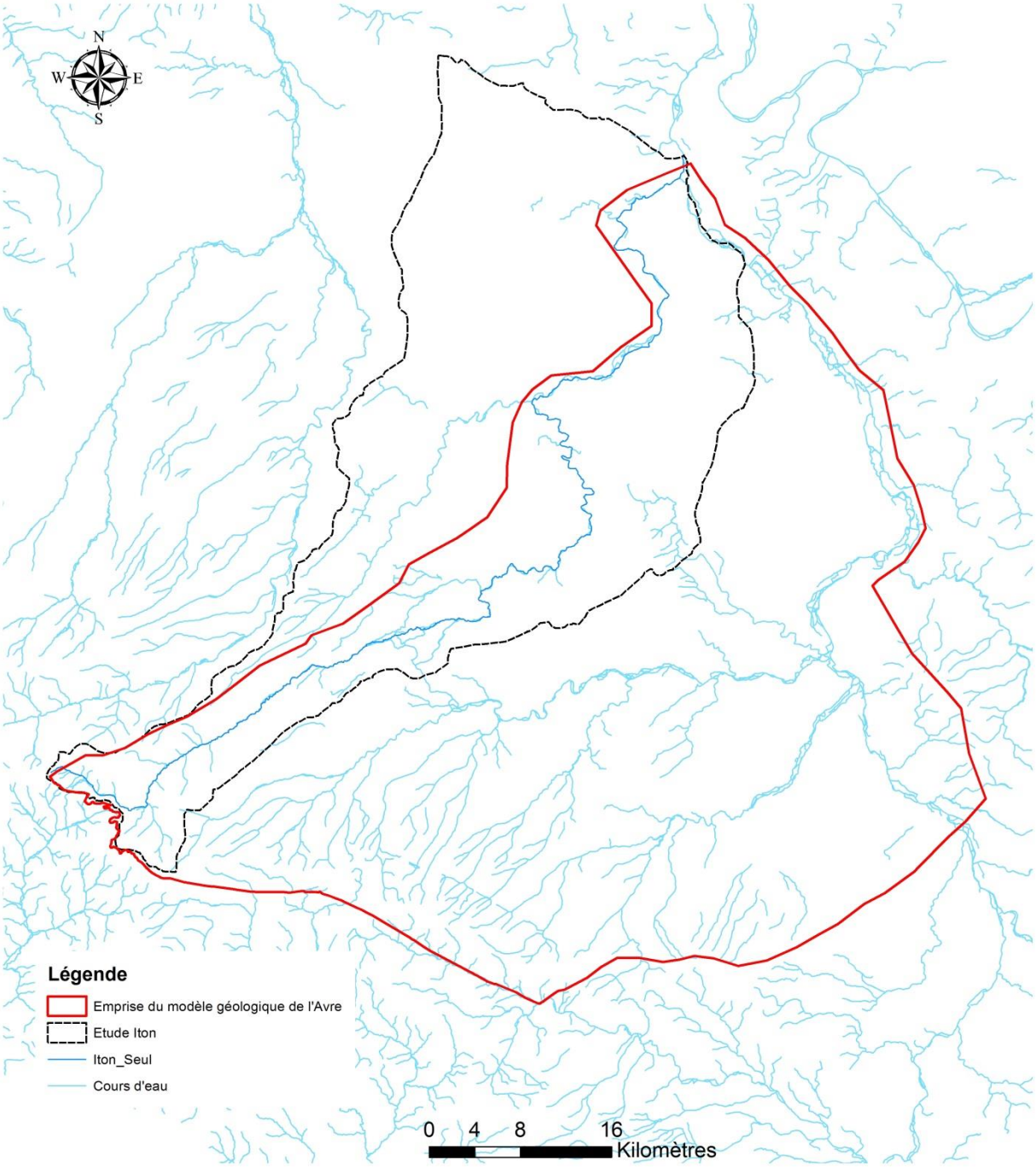
Stratégie de calibration

Le modèle nécessite un calage des deux paramètres C et D, sachant que l'onde diffusante est plus sensible à la célérité C qu'à la diffusivité D.

Le calage de C a été réalisé manuellement en appliquant sur le débit amont le modèle de propagation sans écoulements latéraux. L'objectif est de mettre en phase le pic de crue amont propagé avec le pic aval observé. La valeur de calage est utilisée ensuite dans le modèle inverse. Le paramètre D est très peu sensible et a été fixé à 1000 $m^2\ s^{-1}$ qui est l'ordre de grandeur pour ce type de cours d'eau (Todini, 1986)

Ce modèle a été validé en contexte karstique lors des études BRGM/SCHAPI sous différents climats (Tarn, Provence, Jura, voir pour cela les rapports Appui au SCHAPI depuis 2012 : Charlier et al., 2012 ; 2013 ; 2014 ; 2015).

Annexe 12
-
Emprise du modèle géologique de l'Avre


N
W
E
S
Légende
Emprise du modèle géologique de l'Avre
Etude Iton
Iton_Seul
Cours d'eau
0 4 8 16
Kilomètres



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - **www.brgm.fr**

Direction régionale de Normandie
Parc de la Vatine
14 route d'Houpeville
76130 – Mont-Saint-Aignan – France
Tél. : 02 35 60 12 00