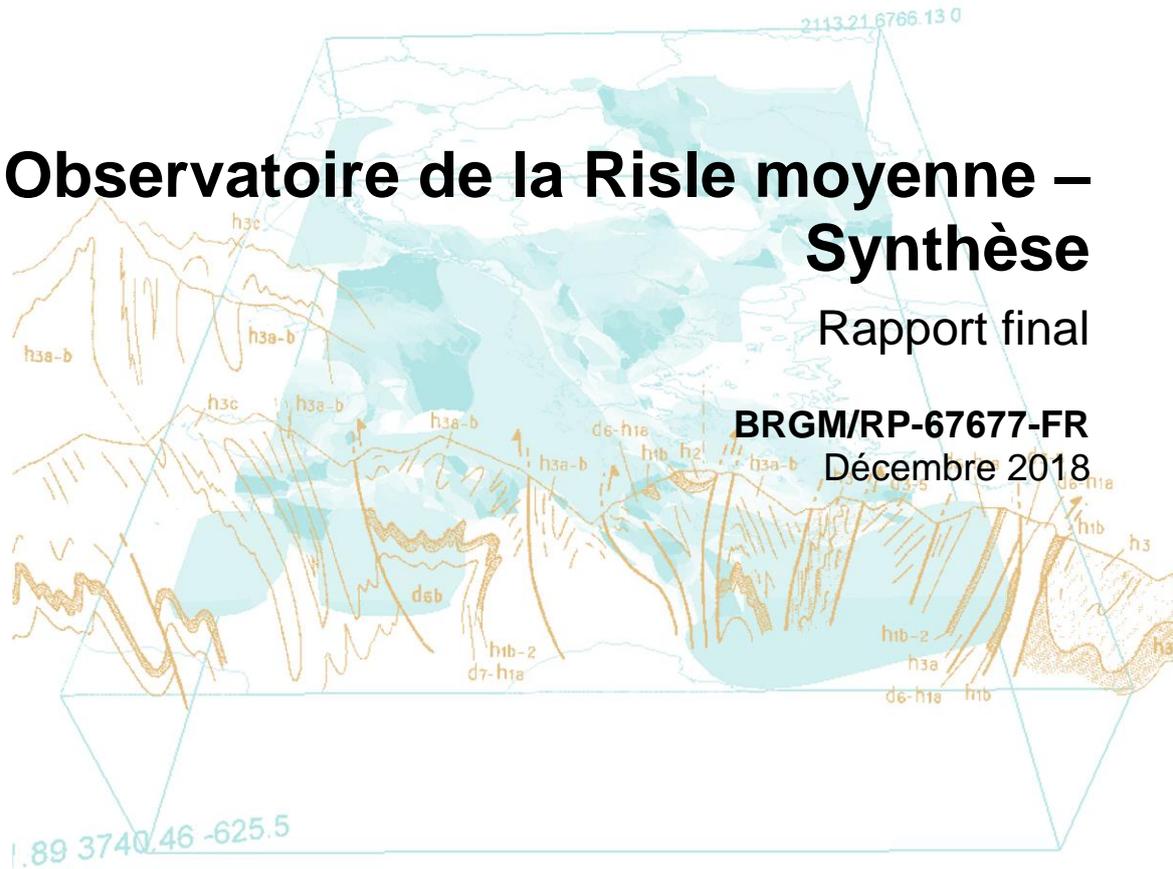




Observatoire de la Risle moyenne – Synthèse

Rapport final

BRGM/RP-67677-FR
Décembre 2018



Observatoire de la Risle moyenne – synthèse

Rapport final

BRGM/RP-67677-FR

Décembre 2018

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2013-RSE-14

P.-Y. David

Avec la collaboration de

**Hugot V., Charlier J.-B., Ladouche B., Cary L., Pennequin D., Meire B., Schaefer I. (BRGM),
Le Tinevez D., Helouin S., Feeny V., Giannetti M.-L. (DREAL Normandie), Riviere C., Cantayre
C. (AFB – ex-ONEMA), Barault A., Sanson G. (FDPPMA27), Maurey E., Lheritier R.,
Leboulanger Th., (CDS27), Fournier M., Niepceron F., Jardani A. (Université de Rouen),
Julien D. (ARS), Royer R. (ASA RM)**

Vérificateur :

Nom : P. Vigouroux

Fonction : Hydrogéologue D3E/NRE

Date : 16/01/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : C. Carnec

Fonction : Directrice adjointe DAT

Date : 14/02/2019

Signature :



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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

NB : Le 1er janvier 2017, l'Agence des aires marines protégées, l'Atelier technique des espaces naturels, l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA) et Parcs nationaux de France ont regroupé leurs compétences pour créer l'Agence française pour la biodiversité. Certains rapports produits dans le cadre de l'observatoire de la Risle ont été rédigés par l'ONEMA aujourd'hui devenu l'Agence française pour la biodiversité. Le présent rapport mentionne l'ONEMA car se rapporte à des documents rédigés avant 2017.

Mots-clés : relation nappes-rivières ; karst ; perte ; assec ; bétoire; restitution ; jaugeage ; traçage ; carte piézométrique ; modélisation ; gardenia, tempo ; suivi piézométrique ; conductivité ; turbidité ; température; végétation aquatique ; suivi hydrobiologique ; poissons ; population piscicole ; Hydrogéologie, géologie, géologie structurale, thermie; craie ; Risle ; Risle moyenne, Risle mediane, Eure; Normandie

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

David P.-Y., Hugot V., Charlier J.-B., Ladouche B., Cary L., Pennequin D., Meire B., Schaefer I. (BRGM), Le Tinevez D., Helouin S., Feeny V., Giannetti M.-L. (DREAL Normandie), Riviere C., Cantayre C. (AFB – ex-ONEMA), Barault A., Sanson G. (FDPPMA27), Maurey E., Lheritier R., Leboulanger Th. (CDS27), Fournier M., Niepceron F., Jardani A. (Université de Rouen), Julien D. (ARS), Royer R. (ASA RM) (2018) – Observatoire de la Risle moyenne – Synthèse. Rapport final. BRGM/RP-67677-FR, 79 p., 41 ill., 2 tabl., 2 ann.

Synthèse

Le secteur de la Risle moyenne, situé entre l'entrée de la rivière dans le département de l'Eure à hauteur de la commune de Ray et sa confluence avec la Charentonne, est caractérisé par un fonctionnement hydrogéologique particulier : en effet, de nombreuses pertes affectent sa partie amont, provoquant une diminution de son débit, qui est ensuite restitué plus à l'aval, au droit de résurgences qui apparaissent à partir de Beaumont-le-Roger.

Ce secteur connaît régulièrement sur certains tronçons des pertes totales en période d'étiage liées à la formation de bétoires qui peuvent entraîner un assec du lit mineur sur plusieurs kilomètres en aval. Ceci s'est notamment produit en 2005 et 2012 produisant des assècs sur 6 km et 12 km respectivement.

La méconnaissance des conséquences de la formation de bétoires et la complexité des écoulements karstiques peuvent mettre en péril non seulement les usages de l'eau dans la moyenne Risle, comme l'alimentation en eau potable, la pisciculture et les activités de loisirs, mais peuvent également conduire au non-respect de la législation, notamment de la Directive Cadre Européenne sur l'eau ou encore de la Directive Habitat, avec des conséquences en termes économiques qui peuvent être importantes.

Le manque de connaissance du fonctionnement système Risle-Nappe de la craie empêchait également de prendre des décisions éclairées en cas d'évènements naturels extrêmes comme une crue ou un étiage, mais aussi concernant l'aménagement ou non des bétoires, là aussi avec des conséquences économiques qui peuvent être importantes.

Face à ces enjeux un Observatoire de la Risle moyenne a été mis en place, avec pour objectif d'approfondir la connaissance du fonctionnement hydrogéologique et écologique de cet hydrosystème par un suivi du milieu durant deux périodes hivernales et estivales. Cette acquisition de connaissances visait à apporter des éléments nécessaires pour orienter la prise de décisions futures au niveau des aménagements et interventions à réaliser dans le bassin versant de la Risle.

L'Observatoire de la Risle a été mis en place dans une approche multi partenariale et a regroupé de nombreux partenaires scientifiques : DREAL, FDPPMA27, CDS27, ONEMA (devenu AFB), Université de Rouen et BRGM. Les résultats des travaux menés par chacun de ces organismes ont été présentés dans différents rapports dont le présent rapport constitue la synthèse. Ces différents travaux ont permis de réaliser des avancées significatives dans la connaissance du fonctionnement de l'hydrosystème Risle – nappe de la craie et de son impact sur les écosystèmes. Ils ont en particulier permis de répondre aux nombreuses questions qui avaient été posées à l'Observatoire. En particulier, ce projet multi partenarial a permis d'apporter des réponses opérationnelles concernant la connaissance (1) des relations nappe-rivière et des secteurs où la Risle est perchée au-dessus de la nappe, (2) en terme d'adaptation et de temps de recolonisation du vivant (végétation, macro-invertébrés, populations piscicoles) dans les secteurs ayant connu un assec, (3) des secteurs de perte de débit de la Risle et de leurs variations dans le temps et dans l'espace, (4) de la dimension, de la répartition et de l'organisation des vides karstiques, (5) des circulations et des transferts d'eaux souterraines au sein du karst de la Risle, (6) des facteurs déclencheurs de l'apparition des bétoires en rivière, (7) de la connexion ou non des captages AEP de la vallée de la Risle au karst et du risque que cela représente pour la qualité de la ressource en eau, (8) et l'amélioration de la gestion de l'hydrosystème notamment en cas d'apparition de nouvelles pertes karstiques dans la rivière.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Rappel des investigations	15
3. Identification spatiale et temporelle des zones de connexion/déconnexion de la nappe et de la rivière.....	19
3.1. APPORTS DES DONNEES HISTORIQUES.....	19
3.2. APPORTS DE LA GEOLOGIE	21
3.3. COMPARAISON DES NIVEAUX DE NAPPE ET DE RIVIERE	21
3.4. ANALYSE DES VARIATIONS DE DEBIT DE LA RIVIERE	21
3.5. ANALYSE DES VARIATIONS DE TEMPERATURE DE LA RIVIERE.....	25
3.6. ANALYSE DU TYPE DE VEGETATION AQUATIQUE.....	27
4. Etude de la restauration de la vie aquatique sur le tronçon ayant connu l'assec de 2012	33
4.1. ETUDE DES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX DE LA RISLE MOYENNE CONTROLANT LE DEVELOPPEMENT DE LA VIE PISCICOLE	33
4.2. ETUDE DE LA RESTAURATION DE LA VIE AQUATIQUE SUR LE TRONÇON AYANT CONNU L'ASSEC DE 2012	34
4.2.1. Suivi hydrobiologique.....	37
4.2.2. Suivi piscicole	38
4.2.3. Suivi de la végétation aquatique	43
5. Étude de la dynamique spatiale et temporelle des pertes en rivière	45
6. Identification des vides karstiques	47
7. Dynamique de l'hydrosystème et schéma conceptuel de fonctionnement.....	51
8. Étude des facteurs déclencheurs des bétoires en rivières	57
9. Impact pour l'usage AEP de la ressource en eaux souterraines	61
10. Traitement des bétoires en rivière	63
11. Conclusion.....	65
12. Bibliographie	71
12.1. RAPPORT PRODUITS DANS LE CADRE DE L'OBSERVATOIRE	71

12.2.	AUTRES RAPPORTS.....	71
13.	Annexes	75
13.1.	ANNEXE 1 : COUPE LONGITUDINALE DE SYNTHESE : IDENTIFICATION DES ZONES DE CONNEXION/DECONNEXION DE LA NAPPE ET DE LA RIVIERE EN PERIODE DE HAUTES-EAUX.....	77
13.2.	ANNEXE 2 : COUPE LONGITUDINALE DE SYNTHESE : IDENTIFICATION DES ZONES DE CONNEXION/DECONNEXION DE LA NAPPE ET DE LA RIVIERE EN PERIODE DE BASSES-EAUX.....	79

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation de la Risle moyenne au sein du bassin parisien	11
Illustration 2 : Bétoire B18262 ouverte dans le lit de la Risle dans la commune d'Ajou en 2012	12
Illustration 3 : Planning des acquisitions de données 2014/2015	16
Illustration 4 : Récapitulatif des suivis mis en place au cours de l'Observatoire de la Risle	17
Illustration 5 : Carte scolaire du 19ème siècle, mentionnant la perte de la Risle au lieu-dit le Noyer-en-Ouche et représentant la Risle comme un cours d'eau temporaire entre la Noyer-en-Ouche et La Fontaine Roger.....	20
Illustration 6 : Carte du diocèse de « l'évesché d'Evreux en Normandie » par P. Du Val d'Abbeville (de 1654 - XVIIIème siècle).	20
Illustration 7 : Coupe géologique longitudinale de la Risle moyenne réalisée dans le cadre de l'Observatoire de la Risle (extraite du rapport BRGM/RP-66861-FR)	23
Illustration 8 : Coupes longitudinales de la Risle Moyenne - Comparaison des campagnes de nivellement de la nappe et de la rivière et des campagnes de jaugeage au printemps et à l'automne 2014.....	23
Illustration 9 : Coupe longitudinale de la Risle moyenne – Localisation et quantification des zones de perte en rivière - Comparaison des campagnes de jaugeage de 1894 (Ferray), 2012, 2013, 2014 (DREAL) et des campagnes de nivellement de la nappe et de la rivière de octobre-novembre 2014	23
Illustration 10 : Nombre de jours par station sur la période de suivi où la température a été supérieure à 20°C, 25°C et inférieure à 4°C.....	26
Illustration 11 : Variations des températures moyennes mensuelles le long de la Risle moyenne.	27
Illustration 12 : Photo du site de Beaumont-le-Roger : zoom sur le fond colonisé par Hildembrandia, une algue rouge qui semble être indicatrice d'eaux dont la température est tamponnée par des apports phréatiques	28
Illustration 13 : Part des végétaux indicateurs au sein de chaque station et par période, selon la trophie de l'habitat cours d'eau, en référence à l'habitat 3260 de la Directive Habitat Faune Flore.	29
Illustration 14 : Evolution de la richesse spécifique selon le gradient longitudinal de la Risle sur le secteur étudié (amont à gauche) et sur la Bave, aux différentes périodes d'observation et richesse spécifique globale	30
Illustration 15 : Coupe longitudinale de synthèse : identification des zones de connexion/déconnexion de la nappe et de la rivière en période de hautes-eaux	31
Illustration 16 : Classification de Magnuson (températures moyennes journalières des mois de juillet et d'août) à chaque station sur la période 2013/2015	34
Illustration 17 : Station d'inventaire piscicole en 2014 (A) et durant l'été 2012 durant l'assec (B, C, D, E) (extrait du rapport de la FDPPMA - volet 6)	35
Illustration 18 : Suivis hydrobiologique, piscicole et végétation de l'Observatoire de la Risle 2013-2015..	36
Illustration 19 : Répartition des effectifs par ordre mesurés en 2013 et 2014.....	37
Illustration 20 : Récapitulatif de l'indice d'équilibre des abondances, de l'indice de Shannon-Weaver et de l'indice de pullulation	37
Illustration 21 : Inventaire par pêche électrique (photos FDPPMA27)	39
Illustration 22 : Chabot commun (à gauche) et Vairon (à droite) - Espèces dites d'accompagnement de la truite.....	40
Illustration 23 : Biométrie du brochet capturé en 2013 (FDAAPPMA27)	41
Illustration 24 : Synthèse de la présence des espèces de poissons en fonction des stations et de l'année d'inventaire (FDAAPPMA27).....	41

Illustration 25 : Répartition des effectifs par espèce pour les trois stations de suivis aux deux campagnes	42
Illustration 26 : Répartition et localisation des pertes de débits le long de la Risle moyenne (David et al., 2017).....	45
Illustration 27 : (a) Simulation des échanges latéraux sur le tronçon Ajou-Grosley lors du passage de la crue de décembre 2013; (b) comparaison des échanges latéraux simulés sur le tronçon Ajou-Grosley (en rouge) et du niveau piézométrique mesuré dans le karst à Ajou sur le piézomètre 01495X0064 (David et al., 2017).....	46
Illustration 28 : Synthèse des observations du karst de la Risle qui tendent à confirmer l'hypothèse de la géométrie type des réseaux karstiques de la craie proposée Calba (Calba et al., 1979) et (Rodet, 1981).....	48
Illustration 29 : Vides ou indices de vides identifiés dans les forages entre Champignolles et la source Fontaine Roger et relation avec la surface piézométrique mesurée en 2014 et la limite craie / formations de surface (extrait du rapport BRGM/RP-66861-FR).....	49
Illustration 30 : Examen des évolutions des niveaux, de la minéralisation et de la température de l'eau souterraine au voisinage des ouvrages 01495X0067 (amont hydraulique de la Bétoire d'Ajou) et 01495X0064 (piézomètre à proximité de la Bétoire d'Ajou) (David et al., 2017)	52
Illustration 31 : Approche fonctionnelle utilisée pour décrire les évolutions de la conductivité électrique mesurée à la Fontaine Roger	53
Illustration 32 : Contribution des composantes de l'approche fonctionnelle utilisée pour décrire les évolutions de la conductivité électrique mesurée à la Fontaine Roger	53
Illustration 33 : Part moyenne (1994-2014) de la composante lente du débit simulée de la Risle à Rai, Ajou, Grosley et Beaumontel sur la période simulée	54
Illustration 34 : Eléments du bilan hydrologique de la Risle moyenne pour le cycle 2004/2005 d'après les résultats de modélisation globale GARDENIA pluie-débit-niveaux.....	55
Illustration 35 : Situation hydrogéologique, hydrologique et météorologique sur le bassin versant de la Risle moyenne lors de la formation des bétoires	58
Illustration 36 : Identification des périodes de débordement de la Risle au-dessus des berges sur le site pilote de la bétoire d'Ajou	59
Illustration 37 : Identification des périodes de débordement de la Risle au-dessus des berges sur le site pilote de la bétoire d'Ajou – zoom sur le débordement du 29/12/2013.....	59
Illustration 38 : Forte remontée de la nappe de la craie (>12 m) au-dessus du toit de la craie observée au moment de l'apparition de la bétoire B18367.....	60
Illustration 39 : 4 captages AEP équipés d'un suivi turbidité et conductivité suite à l'ouverture de la bétoire de 2012 (décision ARS).....	62
Illustration 40 : Captage AEP d'Ajou : turbidité mesurée (vert) et simulée (rouge) (modélisation réalisée par le BRGM) (figure extraite du rapport BRGM/RP-67480-FR).....	62
Illustration 41 : Exemple d'un aménagement d'une bétoire par mise en place d'enrochements.....	64

Liste des tableaux

Tableau 1 : Volets d'étude du projet.....	13
Tableau 2 : Récapitulatif des interventions des différents partenaires de l'Observatoire	15

1. Introduction

La rivière de la Risle (Normandie), dans sa partie moyenne (Illustration 1), est caractérisée par un fonctionnement hydrogéologique particulier : de nombreuses pertes provoquent une diminution de son débit, qui est ensuite restitué plus à l'aval, au droit de résurgences.

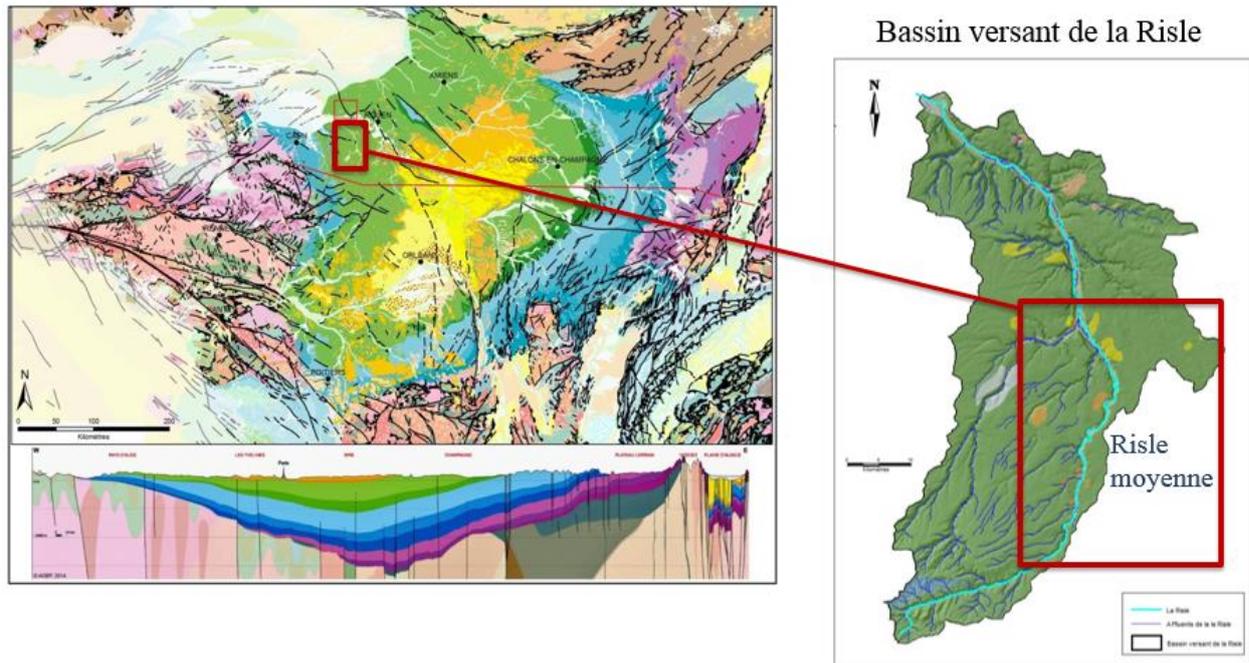


Illustration 1 : Localisation de la Risle moyenne au sein du bassin parisien

Ce secteur connaît régulièrement sur certains tronçons des pertes totales en période d'étiage, liées à la formation de bétoires¹ qui peuvent entraîner un assec du lit mineur sur plusieurs kilomètres en aval. Ceci s'est notamment produit ces dernières années en 2005, 2012, 2016 et 2017 produisant des assecs sur 6 à 12 km (Illustration 2). En 2005 le cours d'eau s'était asséché sur environ 6 km entre le Val Gallerand et Beaumont-le-Roger. En 2012, une bétoire s'est ouverte le 28 juillet sur la commune d'Ajou provoquant un assèchement total du cours d'eau sur un linéaire de 12 km environ.

¹ Terme normand désignant un point naturel d'engouffrement rapide des eaux de surface vers les eaux souterraines dans la craie karstique. Le terme « bétoire » regroupe des formes variées de l'exokarst qui ont pour origine des processus génétiques divers



Illustration 2 : Bétoire B18262 ouverte dans le lit de la Risle dans la commune d'Ajou en 2012

Suite à l'épisode d'assec de l'été 2012 et dans un contexte où d'autres épisodes étaient à prévoir, il est apparu nécessaire d'approfondir la connaissance du fonctionnement du secteur perché de la Risle du point de vue hydrogéologique et écologique dans le cadre d'un Observatoire.

La méconnaissance des conséquences de la formation de bétoires et la complexité des écoulements karstiques peuvent mettre en péril non seulement les usages de l'eau dans la Risle moyenne, comme l'alimentation en eau potable, la pisciculture et les activités de loisirs, mais peuvent également conduire au non-respect de la législation, notamment de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) ou encore de la Directive Habitat, avec des conséquences en termes économiques qui peuvent être importantes.

Le manque de connaissance du fonctionnement du système Risle-Nappe de la craie empêche également de prendre des décisions éclairées en cas d'évènements naturels extrêmes comme une crue ou un étiage, mais aussi concernant l'aménagement ou non des bétoires, là aussi avec des conséquences économiques qui peuvent être importantes.

L'objectif de cet Observatoire vise donc à approfondir la connaissance du fonctionnement hydrogéologique et écologique de la Risle moyenne par un suivi du milieu en continu sur la période 2013/2015, et durant deux périodes hivernales et estivales. Cette acquisition de connaissance vise à apporter des éléments nécessaires pour orienter la prise de décision dans le futur au niveau des aménagements et interventions à réaliser dans le bassin versant de la Risle.

Six volets d'études ont été définis dans le cadre de l'Observatoire faisant intervenir différents partenaires (cf. tableau 1 ci-après) :

1	Volet géologique	Exploration spéléo (CDS27) Campagnes géophysiques (Université Rouen)
2	Bétoire d'Ajou	Travaux d'aménagement de la bétoire (ASA) Suivi des débits d'engouffrement (DREAL) Instrumentation du site de la bétoire (BRGM)
3	Volet hydrologie	Suivi des débits de la Risle (DREAL) Identification et jaugeage des résurgences de la Risle moyenne (BRGM) Etablissement de la ligne d'eau de la Risle (BRGM)
4	Volet hydrogéologie	Réseau de suivi des eaux souterraines (BRGM) Campagne quantitative Hautes-Eaux et Basses Eaux (BRGM + DREAL) Campagnes de traçages (Université de Rouen)
5	Volet qualité	Suivi de la turbidité sur les AEP de la vallée (ARS/Collectivités AEP) Suivi DCE réalisé par l'AESN
6	Volet biologie	Suivi hydrobiologique de la Risle (DREAL SRE/UHBIO) Suivi des populations piscicoles (FDDPMA27) Suivi température de l'eau de la Risle (ONEMA) Suivi végétation (ONEMA)

Tableau 1 : Volets d'étude du projet

Les résultats de cet Observatoire ont donné lieu à 7 rapports d'études rassemblés dans un coffret diffusé aux partenaires du projet :

- Rapport du volet n°1 : synthèse géologique et structurale (rapport BRGM/RP-66861-FR) ;
- Rapport des volets n°2, 3, 4 et 5 : étude de l'hydrosystème Risle – Nappe de la craie (BRGM/RP-67480-FR) ;
- Rapports du volet n°6 :
 - Rapport du suivi des populations piscicoles (rapport FDPPMA 27)
 - Rapport du suivi hydrobiologique (rapport DREAL)
 - Rapport du suivi thermique de la rivière (rapport ONEMA – devenu AFB)
 - Rapport du suivi de la végétation aquatique (rapport ONEMA – devenu AFB)
- Rapport général de synthèse (le présent rapport BRGM/RP-67677-FR).

Par ailleurs, 4 notes annexes sont également présentes dans le coffret :

- Note concernant les investigations géophysiques (volet 1) – Université de Rouen
- Note concernant les investigations spéléologiques (volet 1) – Comité Départementale de Spéléologie 27
- Note concernant les données quantitatives des eaux superficielles (volet 2) – DREAL Normandie
- Note concernant les investigations par traçage (volet 4) – Université de Rouen

Les résultats présentés dans ces notes sont repris dans les rapports de synthèse du BRGM listés ci-dessus.

Le BRGM a par ailleurs été missionné pour piloter, coordonner et gérer l'ensemble du projet, mais également pour réaliser les volets Géologie et Hydro-système.

Le présent rapport est le rapport de synthèse de l'ensemble des 6 volets. L'objectif de ce rapport est de présenter de façon la plus synthétique possible les principaux résultats de l'Observatoire. Nous invitons le lecteur à se reporter vers les rapports spécifiques à chaque volet pour connaître les résultats plus détaillés et les méthodologies employées.

2. Rappel des investigations

Les principaux partenaires engagés dans ce projet ont été la DREAL, l'AESN, Le Conseil Départemental de l'Eure, l'Université de Rouen (Département de Géologie), l'ONEMA (devenu AFB), la Fédération Départementale de Pêche et Protection des Milieux Aquatiques (FDPPMA) de l'Eure, le Comité départemental de spéléologie de l'Eure (CDS 27), le SAGE de la Risle-Charentonne, l'ASA (Association Syndicale Autorisée) de la Risle Moyenne et le BRGM.

Le BRGM, outre la réalisation de certains volets techniques (géologie et hydro-système), a été missionné pour piloter et coordonner l'Observatoire.

Le récapitulatif des interventions et contributions des différents partenaires est présenté dans le Tableau 2 ci-dessous :

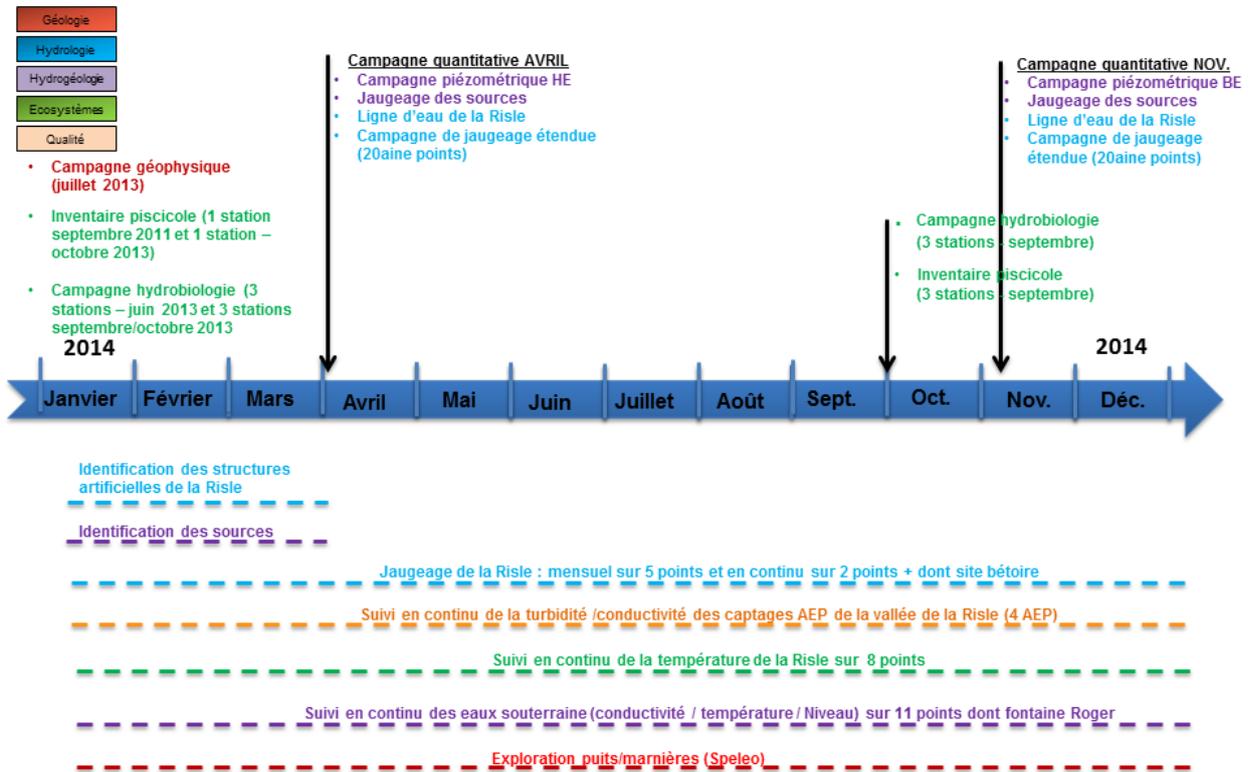
Volet Géologie	Explorations spéléologiques (CDS27) Campagnes géophysiques (Université de Rouen)
Aménagement et suivi de la bétoire d'Ajou	Travaux d'aménagement de la bétoire (ASA) Suivi des débits d'engouffrement (DREAL) Instrumentation du site de la bétoire (BRGM)
Volet Hydrologie	Suivi des débits de la Risle (DREAL) Identification et jaugeage des résurgences de la Risle moyenne (BRGM) Etablissement de la ligne d'eau de la Risle (BRGM)
Volet Hydrogéologie	Réseau de suivi des eaux souterraines (BRGM) Campagne quantitative Hautes-Eaux et Basses Eaux (BRGM + DREAL) Campagnes de traçages (Université de Rouen)
Volet Ecosystèmes	Suivi hydrobiologique de la Risle (DREAL SRE/UHBIO) Suivi des populations piscicoles (FDDPMA27) Suivi température de l'eau de la Risle (ONEMA)
Volet Qualité	Suivi de la turbidité sur les AEP de la vallée (ARS/Collectivités AEP) Suivi DCE réalisé par l'AESN

Tableau 2 : Récapitulatif des interventions des différents partenaires de l'Observatoire

Les acquisitions de données ont consisté à la réalisation des campagnes de mesures ponctuelles (campagnes piézométriques, lignes d'eau, jaugeage de sources et de rivières, suivi de la végétation aquatique, suivi des populations piscicoles et des macro-invertébrés, traçages hydrogéologiques, explorations spéléologiques,) mais également à la mise en place de dispositifs d'acquisition en continu (température des rivières, température, conductivité et niveaux des eaux souterraines, turbidité et conductivité de captages AEP,...).

Le récapitulatif du planning des acquisitions des données réalisées sur la période 2013/2015 est présenté dans l'illustration 3 ci-dessous. La localisation des points de mesures et des suivis effectués est présentée dans l'illustration 4.

Planning des acquisitions de données en 2014



Planning des acquisitions de données en 2015

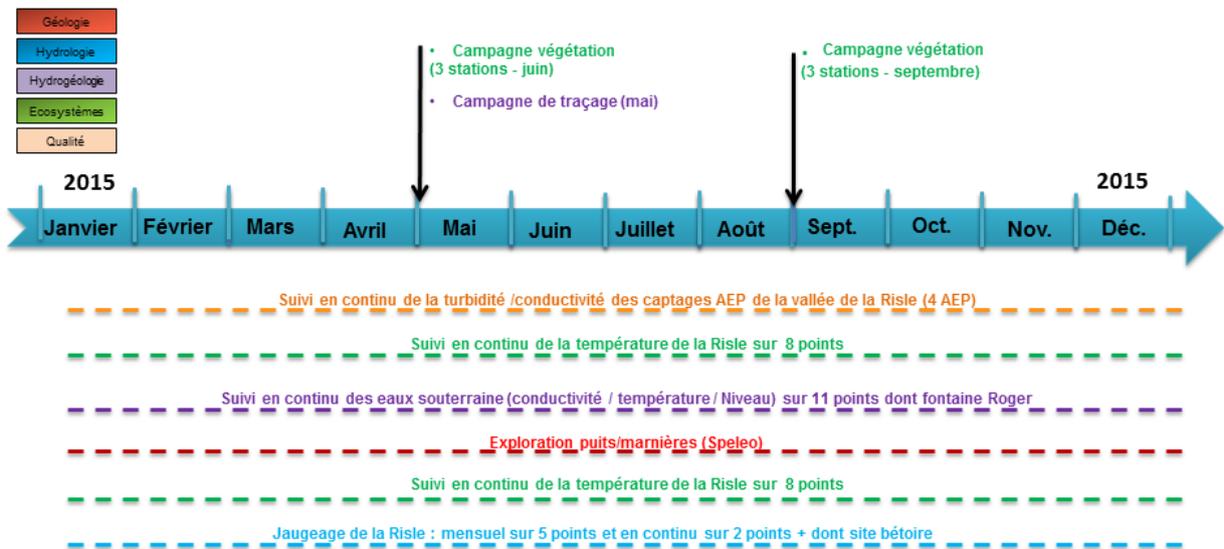


Illustration 3 : Planning des acquisitions de données 2014/2015

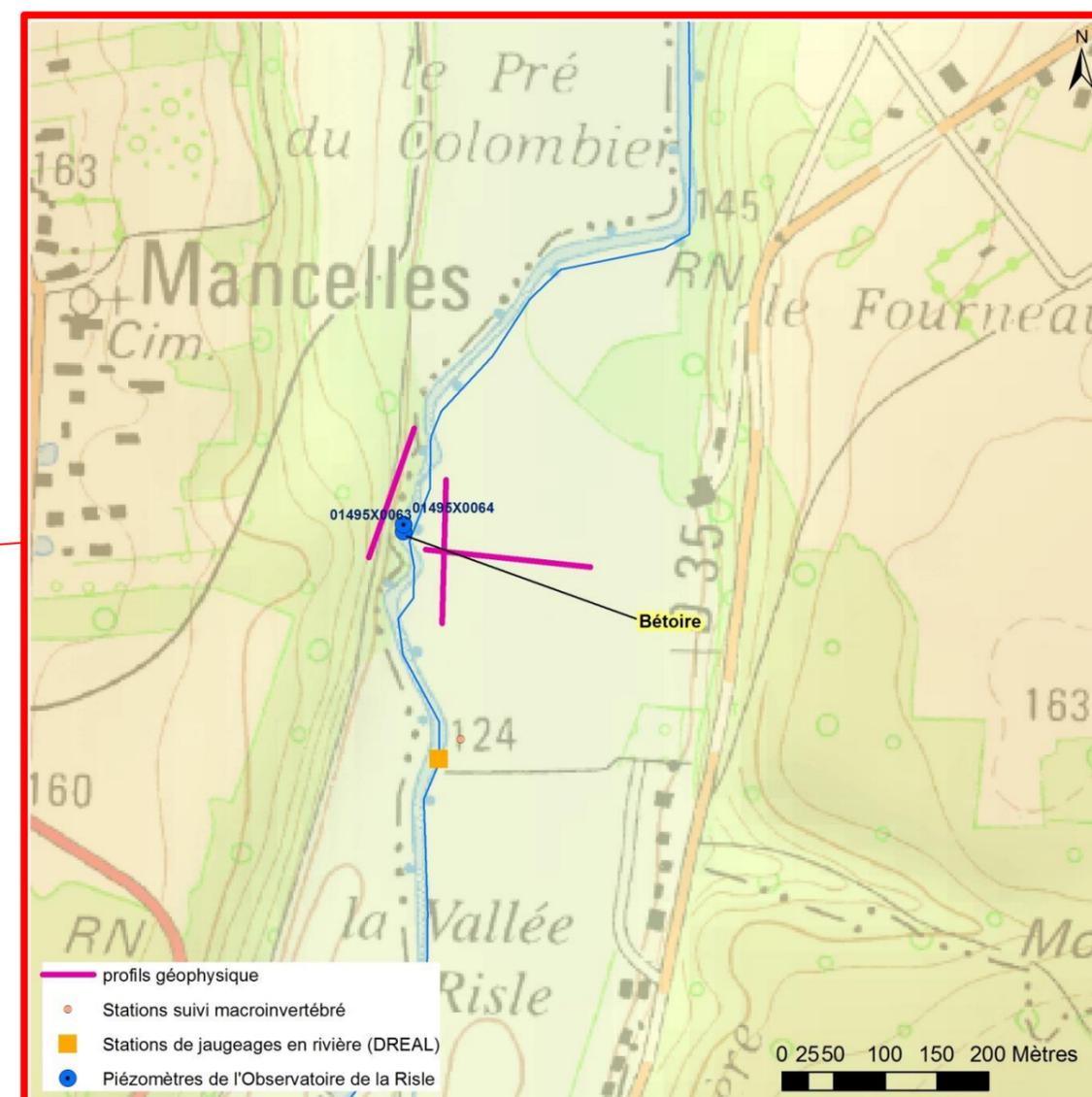
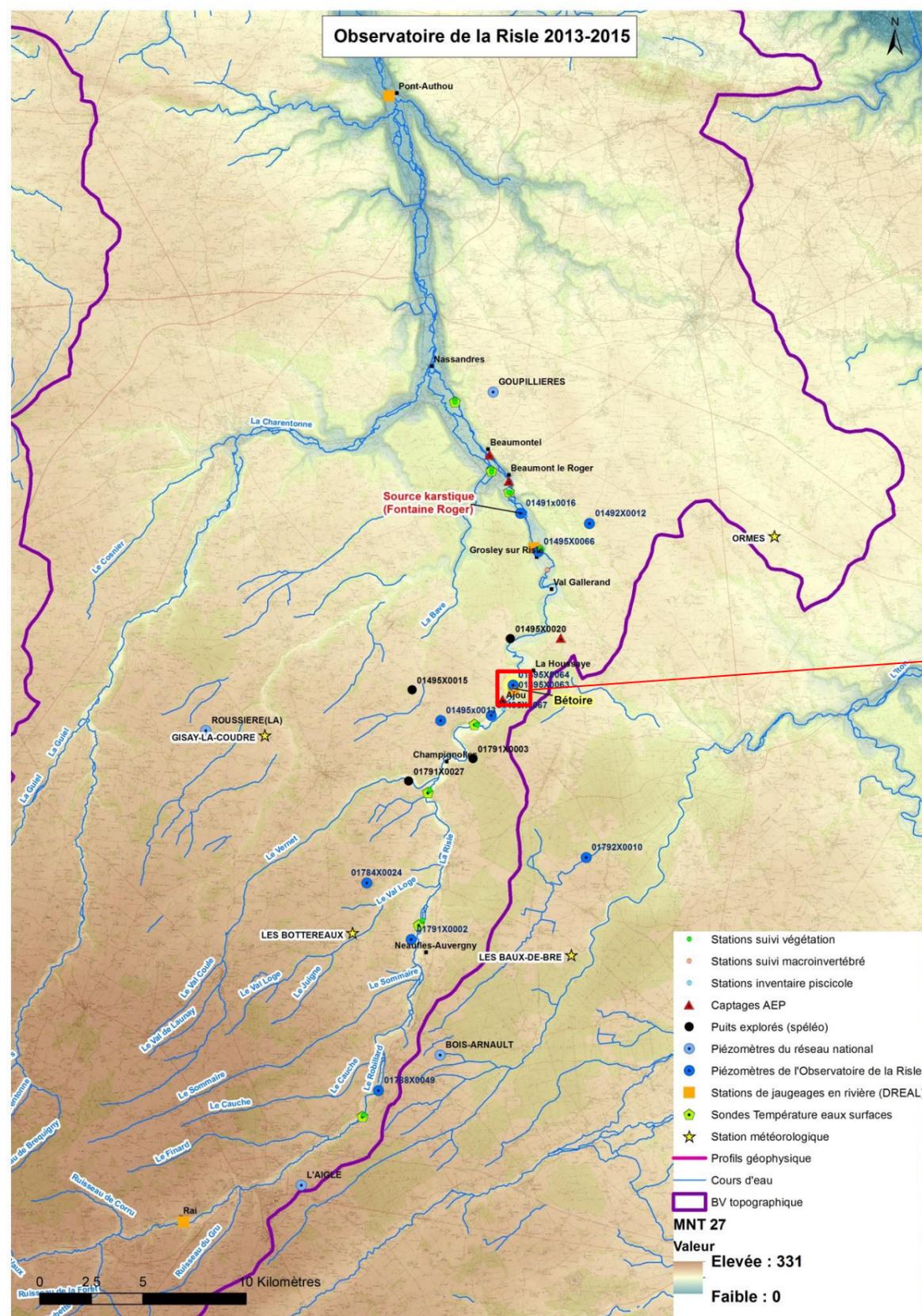


Illustration 4 : Récapitulatif des suivis mis en place au cours de l'Observatoire de la Risle

3. Identification spatiale et temporelle des zones de connexion/déconnexion de la nappe et de la rivière

Question posée à l'Observatoire :

« Sur quel secteur la Risle est-elle perchée au-dessus de la nappe phréatique ? »

Un des objectifs de l'Observatoire était de mieux connaître le secteur de la Risle moyenne où la nappe et la rivière ne sont pas directement connectées et où la rivière est en perte. Une approche pluridisciplinaire a été mise en œuvre et a permis de répondre à ces questions ; celle-ci a consisté à croiser les résultats acquis par différentes approches : recherche de données historiques sur les zones d'assec, analyses géologiques, investigations hydrodynamiques, comparaison des niveaux de la nappe et de la Risle, analyse différentielle des débits de la rivière, analyse des variations de température de la rivière, analyse du type de végétation aquatique.

Les résultats présentés ci-dessous sont une synthèse des éléments présentés dans les rapports suivants de l'Observatoire :

- Rapport du volet n°1 : synthèse géologique et structurale (rapport BRGM/RP-66861-FR)
- Rapport des volets n°2, 3, 4 et 5 : étude de l'hydrosystème Risle – Nappe de la craie (BRGM/RP-67480-FR)
- Rapports du volet n°6 :
 - Rapport du suivi des populations piscicoles (rapport FDPPMA 27)
 - Rapport du suivi hydrobiologique (rapport DREAL)
 - Rapport du suivi thermique de la rivière (rapport ONEMA – devenu AFB)
 - Rapport du suivi de la végétation aquatique (rapport ONEMA – devenu AFB)

3.1. APPORTS DES DONNEES HISTORIQUES

Une recherche des données historiques a montré que les épisodes d'assec sont observés depuis plusieurs siècles. Des cartes scolaires du 19^{ème} siècle (Illustration 5) ou même des cartes du 17^{ème} (Illustration 6), mentionnaient la perte de la Risle au lieu-dit le Noyer-en-Ouche et représentaient la Risle comme un cours d'eau temporaire entre le Noyer-en-Ouche et La Fontaine Roger.



Illustration 5 : Carte scolaire du 19ème siècle, mentionnant la perte de la Risle au lieu-dit le Noyer-en-Ouche et représentant la Risle comme un cours d'eau temporaire entre la Noyer-en-Ouche et La Fontaine Roger



Illustration 6 : Carte du diocèse de « l'évêché d'Evreux en Normandie » par P. Du Val d'Abbeville (de 1654 - XVIIIème siècle).

Nota : Sur l'illustration précédente, l'encadré rouge sur la carte indique où s'est produite une rupture de l'écoulement de la Risle

3.2. APPORTS DE LA GEOLOGIE

L'analyse stratigraphique des logs géologiques et l'interpolation de ces données ont permis la réalisation de coupes longitudinales et transversales dans le secteur de la Risle Moyenne (cf. rapport BRGM/RP-66861-FR).

Ces coupes mettent en évidence que la Risle coule sur les craies Turoniennes de l'amont de l'Aigle jusque Beaumont-le-Roger puis sur la craie du Cénomaniens au-delà à l'aval. La comparaison de ces résultats avec ceux des autres approches (cf. § ci-après) a montré que la zone de déconnexion de la nappe et de la rivière semble préférentiellement située dans le secteur où est présente la craie du Turonien supérieur (de la faille située vers la confluence du sommaire jusqu'à Beaumont-le-Roger où la craie se biseaute, cf. Illustration 7).

3.3. COMPARAISON DES NIVEAUX DE NAPPE ET DE RIVIERE

L'Observatoire de la Risle moyenne a permis de localiser plus précisément le secteur dans lequel la Risle et la nappe phréatique sont déconnectées par une analyse comparative des niveaux de la nappe et des rivières mesurés en 2014. Les résultats des campagnes de mesures piézométriques et des lignes d'eau de la Risle d'avril et d'octobre 2014, montrent que la déconnexion est constatée de Neauffles-Auvergny jusqu'à l'aval de Grosley-sur-Risle (Illustration 9, Illustration 15 et Annexe 1 et 2).

3.4. ANALYSE DES VARIATIONS DE DEBIT DE LA RIVIERE

Toutefois, l'analyse des variations de débits sur des campagnes de mesures datant de 1894, 2013 et 2014 (Illustration 9, Illustration 15 et Annexe 1 et 2) montre que l'extension du tronçon de la Risle concerné par des pertes de débit peut varier dans le temps : ainsi l'amont de ce tronçon démarrait à Rugles en 1894, à Ambenay en 2013 et à Neauffles-Auvergny en 2014. Concernant le point de reconnexion nappe-Risle, il peut se situer selon les années entre l'aval du Val Gallerand et l'amont du moulin de la Bigottière à Grosley-sur-Risle. Des reconnections temporaires sur quelques jours lors de la mise en charge du karst sont également possibles en période de hautes-eaux dans le secteur aval de la vallée de Risle moyenne où la nappe est très réactive. Une cartographie de ces secteurs est présentée dans l'illustration 50 du rapport BRGM/RP-67480-FR.

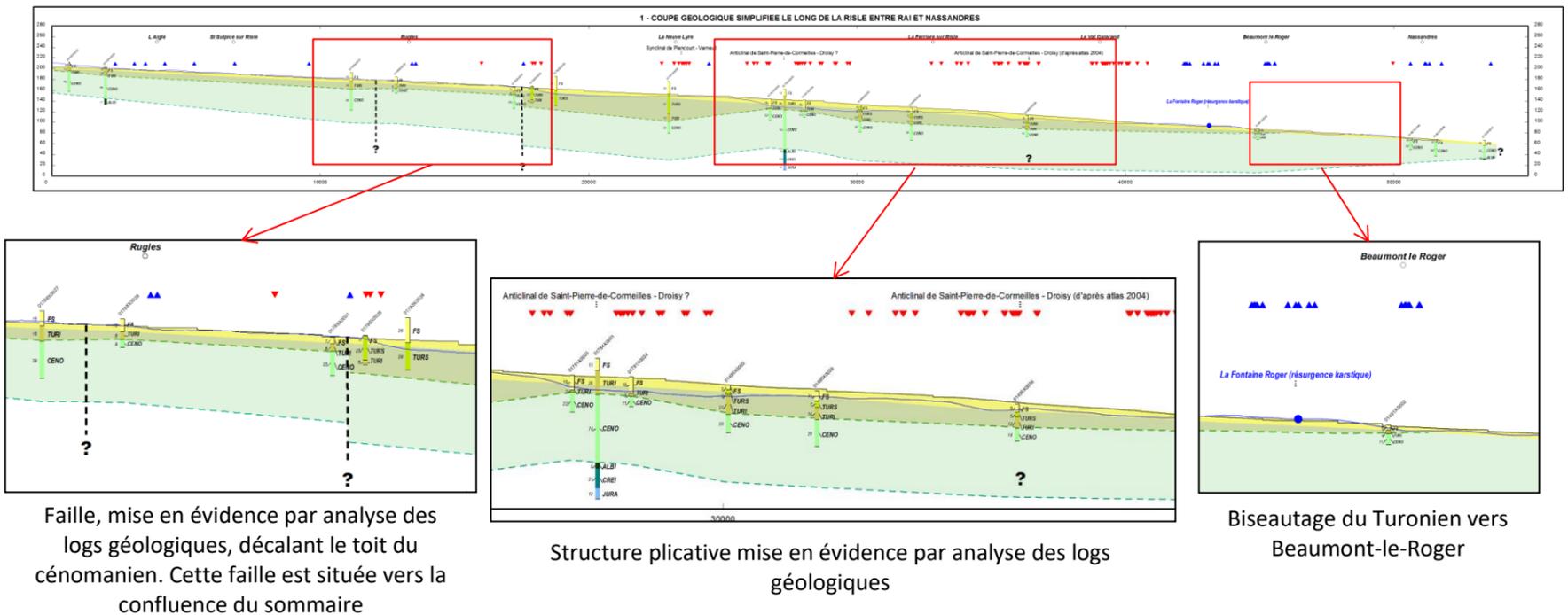


Illustration 7 : Coupe géologique longitudinale de la Risle moyenne réalisée dans le cadre de l'Observatoire de la Risle (extraite du rapport BRGM/RP-66861-FR)

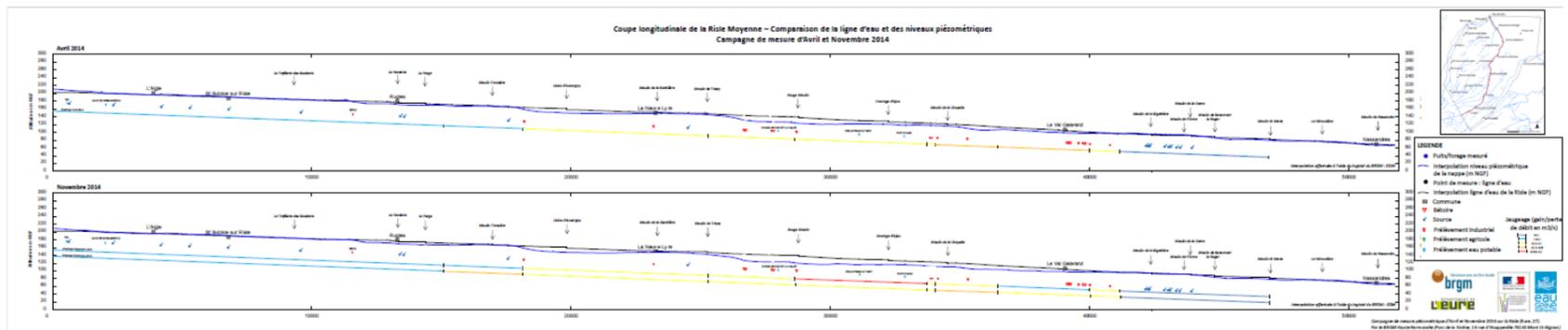


Illustration 8 : Coupes longitudinales de la Risle Moyenne - Comparaison des campagnes de nivellement de la nappe et de la rivière et des campagnes de jaugeage au printemps et à l'automne 2014

Nota : Cette illustration 8 est présentée en grand format à l'Annexe 10 du rapport BRGM/RP-67480-FR

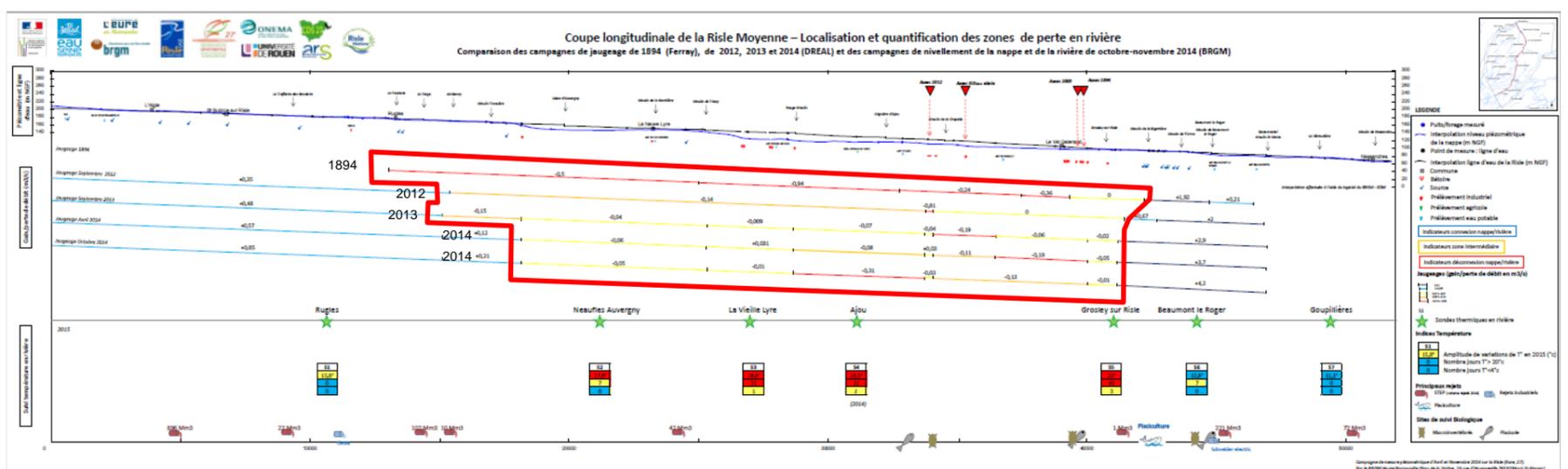


Illustration 9 : Coupe longitudinale de la Risle moyenne – Localisation et quantification des zones de perte en rivière - Comparaison des campagnes de jaugeage de 1894 (Ferray), 2012, 2013, 2014 (DREAL) et des campagnes de nivellement de la nappe et de la rivière de octobre-novembre 2014

Nota : dans l'illustration 9 ci-dessus la zone de déconnexion est cerclée en rouge, et varie selon les années. Cette coupe est disponible en grand format en Annexe 10 du rapport BRGM/RP-67480-FR

3.5. ANALYSE DES VARIATIONS DE TEMPERATURE DE LA RIVIERE

L'analyse de la température enregistrée par les 7 sondes thermiques mises en place par l'ONEMA le long de la Risle moyenne a permis de mettre en évidence les secteurs où la rivière ne bénéficie pas d'un apport de débit provenant de la nappe. Le détail du protocole et des résultats du suivi thermique des cours d'eau sont présentés dans le rapport de l'ONEMA (Volet n°6 – suivi thermique de la rivière).

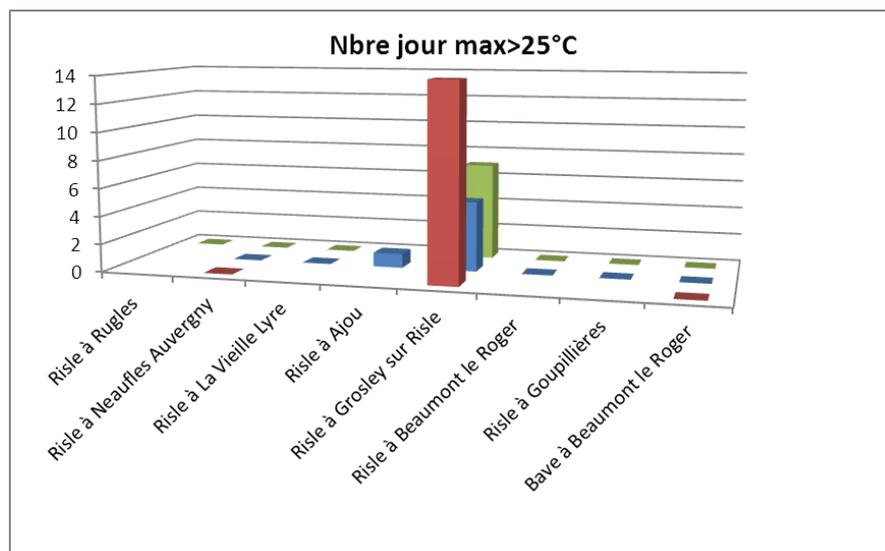
Pour chacune des 7 stations, 4 indicateurs ont été calculés :

- les amplitudes de températures ;
- le nombre de jours où la température est supérieure à 20°C ;
- le nombre de jours où la température est supérieure à 25°C ;
- le nombre de jours où la température est inférieure à 4°C².

Les résultats sont présentés sur l'illustration 10 et en bas de l'illustration 9. Ces résultats montrent que ces 4 indicateurs augmentent de Rugles à Grosley et puis chutent à partir de Beaumont le Roger. On observe en particulier que la station de Grosley-sur-Risle (station située la plus en aval du tronçon de la rivière deconnectée de la nappe) est caractérisée par des situations de températures extrêmes, à la fois chaudes et froides suivant la saison.

Par ailleurs, les moyennes mensuelles de température ont également été calculées pour chacune des 7 stations de mesure. Puis en prenant pour référence la station située le plus en amont (station de Rugles), les écarts des moyennes mensuelles de température entre chaque station et celle de Rugles ont été calculées.

Les résultats sont présentés à l'illustration 11. Cette illustration montre que durant les mois d'été (bâtons de couleur rouge sur l'illustration 11), la température de la rivière augmente progressivement de Rugles à Grosley puis chute brusquement à partir de Beaumont le Roger. A l'inverse, durant les mois d'hiver (bâtons de couleur bleue sur l'illustration 11), la température de la rivière diminue progressivement de Rugles à Grosley puis augmente brusquement à partir de Beaumont le Roger.



² Le nombre de jours montrant une température supérieure à 25°C (soit la température létale de nombreuses espèces de poissons) et inférieure à 4°C, représente le nombre de jours de stress pour l'animal voir de risque de mortalité

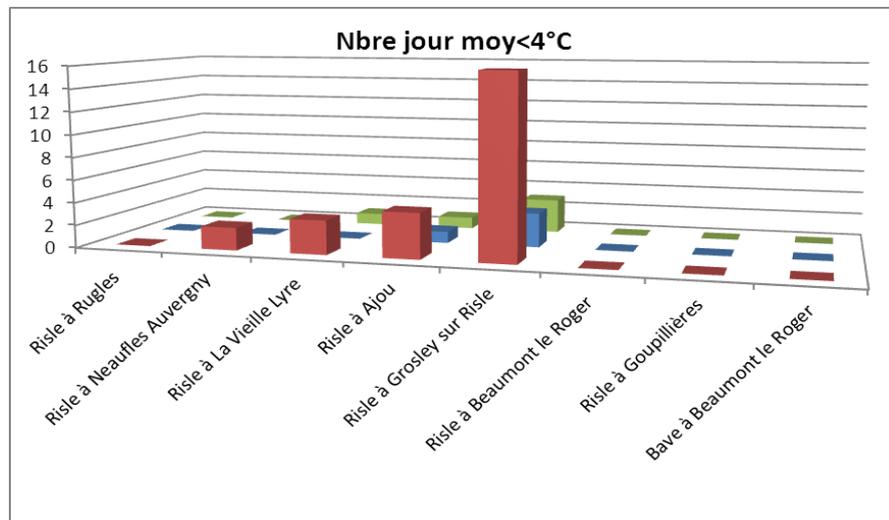
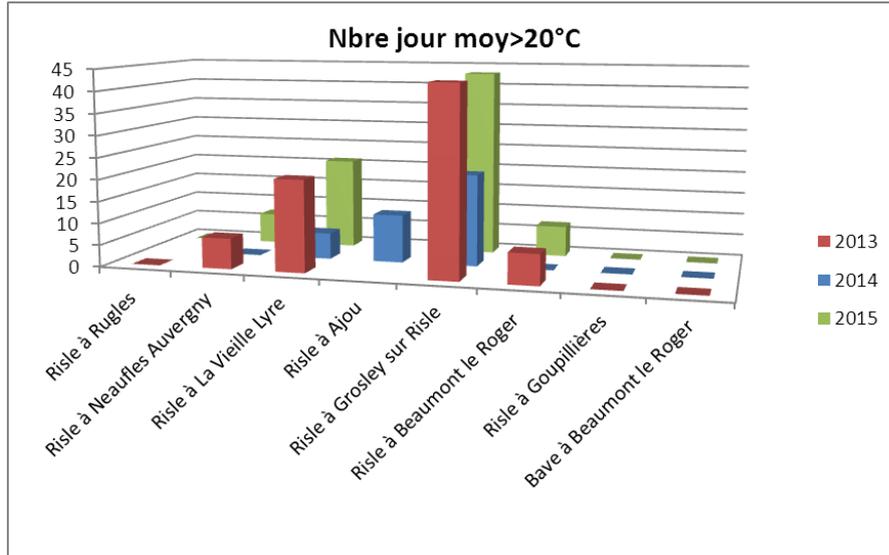


Illustration 10 : Nombre de jours par station sur la période de suivi où la température a été supérieure à 20°C, 25°C et inférieure à 4°C

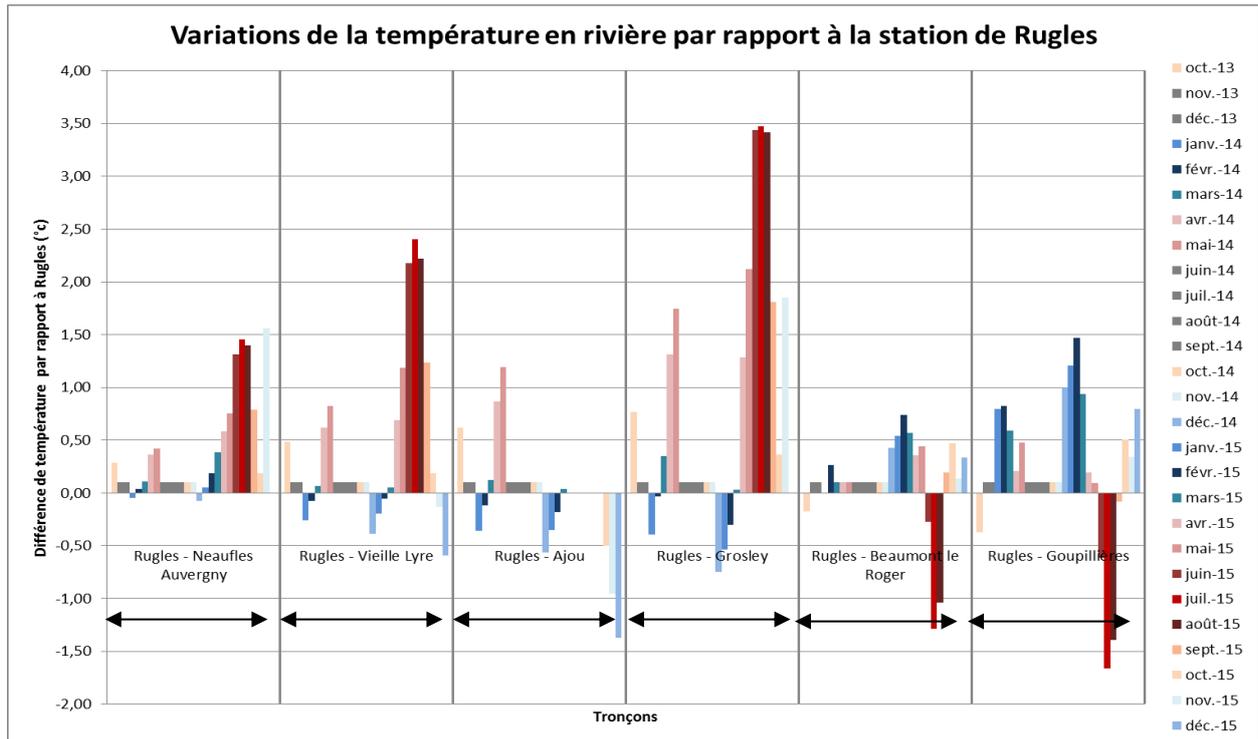


Illustration 11 : Variations des températures moyennes mensuelles le long de la Risle moyenne.

Nota : sur l'illustration précédente sont présentés les écarts de températures entre d'une part les stations de Neaufles Auvergny, la Vieille Lyre, Ajou, Grosley, Beaumont le Roger, Goupillères et d'autre part la station de Rugles située le plus en amont.

La température de la nappe est relativement stable dans la partie matricielle de la nappe de la craie (entre 11°C et 12°C). Ainsi lorsque la nappe et la rivière sont connectées, les apports de débit de la nappe viennent tamponner la température de la rivière : ils refroidissent la rivière en été et la réchauffent en hiver. En revanche, dans le secteur où la nappe ne contribue pas au débit de la rivière (secteur « perché »), la rivière est soumise uniquement aux influences de la température atmosphérique. Cette influence atmosphérique augmente avec l'éloignement du point de déconnexion (le temps de contact rivière atmosphère augmente). C'est ce qui est observé de Neaufles-Auvergny jusqu'à Grosley. Lorsque la nappe réalimente de nouveau la rivière, la température de la rivière est de nouveau tamponnée. C'est ce qui est observé à partir de Beaumont le Roger.

Ces résultats de suivi de température viennent ainsi confirmer la localisation des secteurs déconnectés mis en évidence par les autres méthodes.

3.6. ANALYSE DU TYPE DE VEGETATION AQUATIQUE

Enfin, le suivi de la végétation aquatique réalisé par l'ONEMA a permis de tester le compartiment végétal comme indicateur d'enjeux thermiques, ou d'apports en eaux souterraines, ceci afin de déterminer l'opportunité de développer un outil en vue d'une utilisation sur d'autres bassins des plateaux calcaires ayant potentiellement un fonctionnement karstique. Le détail du protocole et

des résultats du suivi de la végétation aquatique sont présentés dans le rapport de l'ONEMA (volet n°6 – volet biologie – Suivi de la végétation aquatique).

Les végétaux aquatiques encore peu utilisés donnent de précieuses indications, en utilisant leurs traits de vie. Une fois le problème de la détermination levé, ils sont relativement faciles à suivre du fait de l'accessibilité des habitats visés et de leur caractère fixé.

En ce qui concerne la connaissance du lien nappe / rivière, la végétation a pu apporter des éléments de caractérisation des échanges nappe / rivières de 3 façons :

1. Par la mise en évidence de végétaux indicateurs d'apports phréatiques : certains végétaux (algues rouges, berle dressée, callitriches par exemple) semblent pouvoir être utilisés sur les cours d'eau de plaine calcaire (craie pour le cas de la Risle). En effet ces végétaux n'ont été observés que sur les stations de suivi où la nappe apporte une forte contribution à la rivière (Beaumont le Roger, Goupillères) (Illustration 12) et n'ont pas été observés dans les secteurs déconnectés sans apport de nappe (Neaufles-Auvergny, La Vieille Lyre, Ajou, Grosley-sur-Risle). Une étude plus approfondie, construite avec des spécialistes tels que le Conservatoire Botanique National sur le sujet pourrait définir plus précisément ces éléments.



Couleur rouge du fond du cours d'eau liée à
Hildembrandia.sp

Illustration 12 : Photo du site de Beaumont-le-Roger : zoom sur le fond colonisé par Hildembrandia, une algue rouge qui semble être indicatrice d'eaux dont la température est tamponnée par des apports phréatiques

2. Par l'étude de la corrélation de la trophie avec les apports phréatiques : Les espèces de végétation recensées sur les trois stations de suivi ont été regroupées en fonction de leur affinité trophique. Pour rappel, une espèce eutrophe est une espèce qui se développe avec beaucoup de nutriments, une espèce mésotrophe se développe dans un milieu moyennement riche en nutriment, et une espèce oligotrophe dans un milieu avec peu de nutriments. Les résultats de cette analyse sont présentés à l'illustration 13. On observe une nette augmentation de la trophie depuis Rugles jusqu'à Grosley, puis une inversion de la tendance à partir de Beaumont-le-Roger. On constate que les stations mésotrophes (entourées en bleu sur l'illustration 13) sont situées dans les secteurs de la rivière

bénéficiant d'apport en eaux souterraines. Les débits provenant des eaux souterraines apporteraient ainsi des eaux de meilleure qualité permettant à des espèces oligotrophes de se développer.

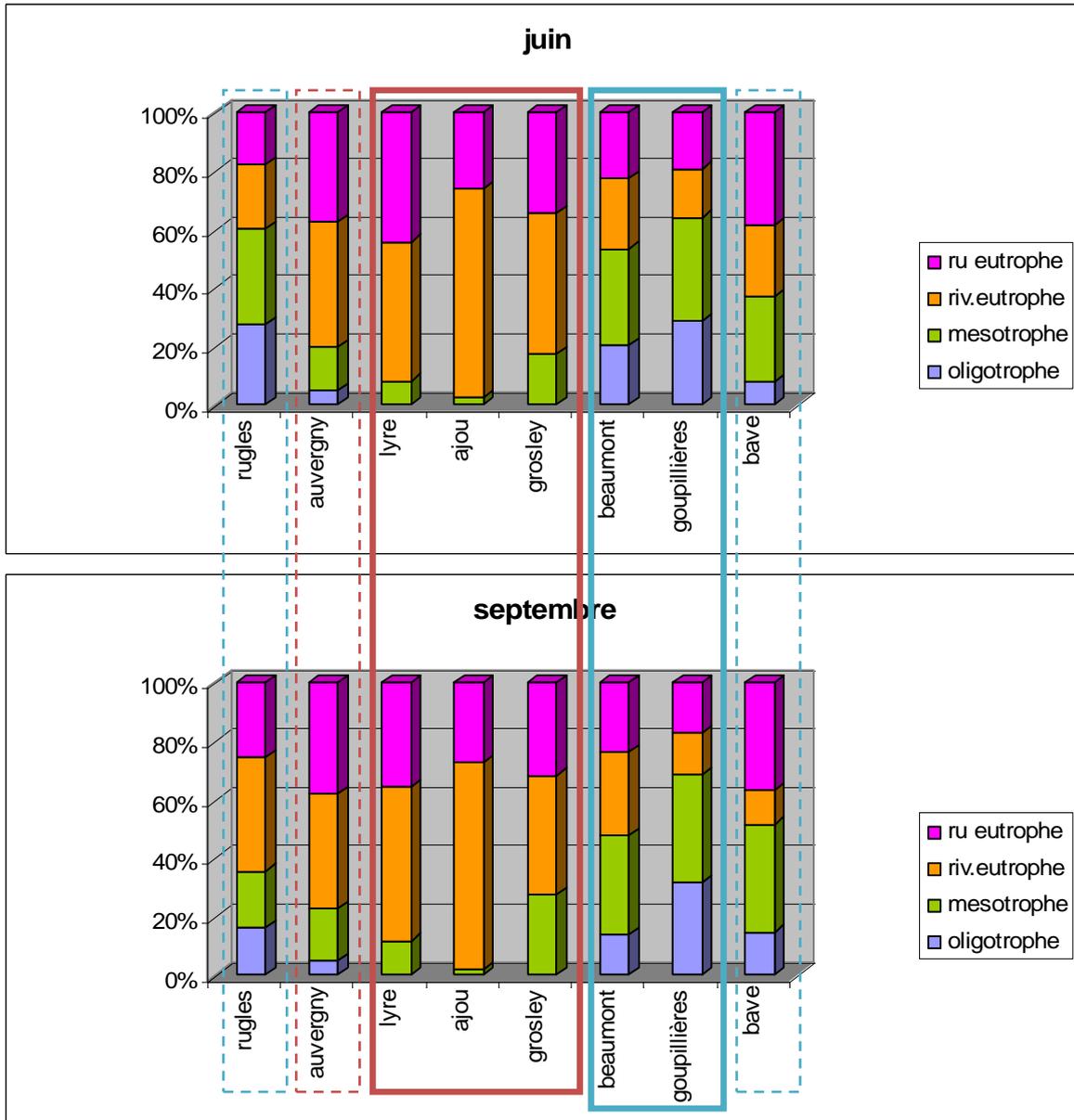


Illustration 13 : Part des végétaux indicateurs au sein de chaque station et par période, selon la trophie de l'habitat cours d'eau, en référence à l'habitat 3260 de la Directive Habitat Faune Flore.

Nota : sur l'illustration 13 précédente, les stations sont classées d'amont en aval sur la Risle, suivies de la Bave. Détermination de 2 ensembles : eutrophes (bordeau) ; mésotrophes (bleu), les pointillés marquant des sites ayant des marqueurs (faibles) du groupe opposé.

3. Par l'analyse de la richesse spécifique de la végétation dont un des facteurs explicatifs serait la thermie et donc les apports phréatiques : la comparaison de la richesse spécifique des

différentes stations (Illustration 14) montre que la richesse spécifique semble chuter dans le secteur « perché » de la Risle. Un premier facteur explicatif peut être la trophie : les stations présentant la trophie la plus forte sont celles qui présentent le moins de richesse spécifique (4-11), avec le site d'Ajou très eutrophe et présentant une faible richesse (4-6). Mais d'autres facteurs explicatifs sont à rechercher, comme la diversité de l'habitat ou encore la thermie dont les apports phréatiques sont l'un des forçages. Pour exemple, la Bave est la station la plus diversifiée en termes d'écoulement et la plus fraîche.

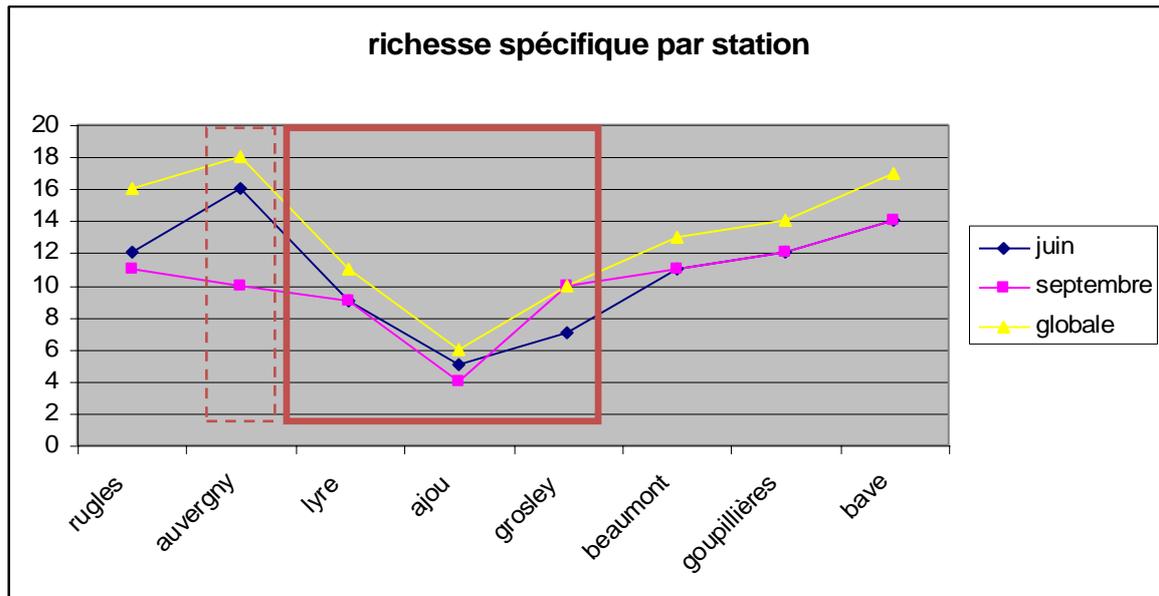


Illustration 14 : Evolution de la richesse spécifique selon le gradient longitudinal de la Risle sur le secteur étudié (amont à gauche) et sur la Bave, aux différentes périodes d'observation et richesse spécifique globale

Des coupes de synthèses reprenant l'ensemble des résultats présentés au §3 ont été établies dans le cadre de l'Observatoire et sont présentées à l'illustration 15 ainsi qu'en grand format en Annexes 1 et 2.

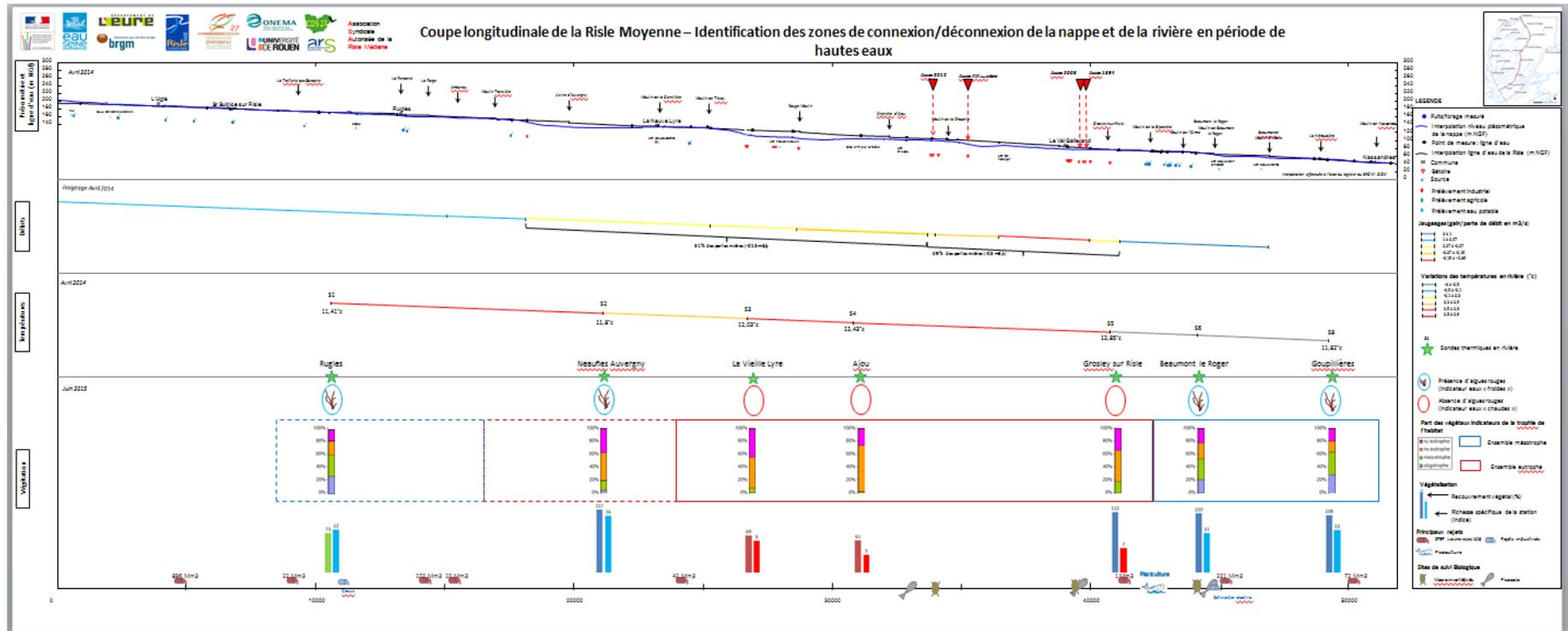


Illustration 15 : Coupe longitudinale de synthèse : identification des zones de connexion/déconnexion de la nappe et de la rivière en période de hautes-eaux

Nota : La coupe de synthèse de l'illustration 15 établie en période de hautes eaux, ainsi que celle établie en période de basses eaux sont disponibles en grand format en Annexes 1 et 2

4. Etude de la restauration de la vie aquatique sur le tronçon ayant connu l'assec de 2012

Questions posées à l'Observatoire :

« Le vivant a-t-il recolonisé le tronçon qui a connu l'assec en 2012 ? En combien de temps ? »

Les résultats présentés ci-dessous sont une synthèse des éléments présentés dans les rapports du volet n°6 de l'Observatoire :

- Rapport du suivi des populations piscicoles (rapport FDPPMA 27)
- Rapport du suivi hydrobiologique (rapport DREAL)
- Rapport du suivi thermique de la rivière (rapport ONEMA)
- Rapport du suivi de la végétation aquatique (rapport ONEMA)

4.1. ETUDE DES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX DE LA RISLE MOYENNE CONTROLANT LE DEVELOPPEMENT DE LA VIE PISCICOLE

Le facteur thermique est l'un des paramètres environnementaux les plus importants pour le développement des espèces piscicoles au sein des hydrosystèmes. En effet, la température intervient d'une part sur la régulation du comportement des individus (migration, reproduction...) mais régule également l'écophysiologie des poissons (taux de fécondité, durée d'incubation, métabolisme respiratoire, croissance...).

Chaque espèce de poisson possède ses propres exigences thermiques caractérisées par la température létale et l'optimum thermique. La température de l'eau intervient également de manière indirecte pour les espèces piscicoles en modifiant la teneur en oxygène dissous et la quantité de nourriture disponible en favorisant ou non le développement des végétaux ou la croissance des invertébrés aquatiques.

Le suivi des températures en rivière réalisé par l'ONEMA et la FDPPMA27 sur la Risle et la Bave sur la période 2013-2015 (cf. résultats présentés au §0) a montré que le nombre de jours de stress pour l'animal voir de risque de mortalité (nombre de jours montrant une température supérieure à 25°C³ et inférieure à 4°C) sont observés essentiellement sur les secteurs où la nappe ne contribue pas directement au débit de la rivière, et augmente avec l'éloignement du point de déconnexion (plus le temps de contact entre la rivière et l'atmosphère est important, plus l'onfluence de la température atmosphérique sur la température de la rivière est important).

Par ailleurs les enregistrements de la température sur les 7 sites de la Risle et un site de la Bave ont permis de classer les 7 stations selon la classification de Magnuson (1979). Cette dernière apparaît selon la littérature la mieux adaptée aux cours d'eau français car elle est basée sur un préférendum thermique de 10 familles de poissons d'Amérique du Nord caractéristiques des cours d'eau de zones tempérées. Cette classification est réalisée à partir des températures

³ soit la température létale de nombreuses espèces de poissons

moyennes journalières des mois de juillet et d'août. Les résultats observés sur la Risle et la Bave sur les trois années de suivi montrent que (Illustration 16) :

- les stations situées sur les tronçons de rivières bénéficiant des apports phréatiques sont classées en cours d'eau « froid » (La Bave) ou en « sub-frais » limite « froid » (Beaumont-le-Roger et Goupillière) en fonction de la part de la contribution de la nappe.
- les stations situées sur le tronçon « perché » ne bénéficiant pas d'apport phréatique direct sont classées en « sub-frais » se rapprochant d'autant plus de la classe « frais » que l'on s'éloigne du point de déconnexion nappe/rivière.

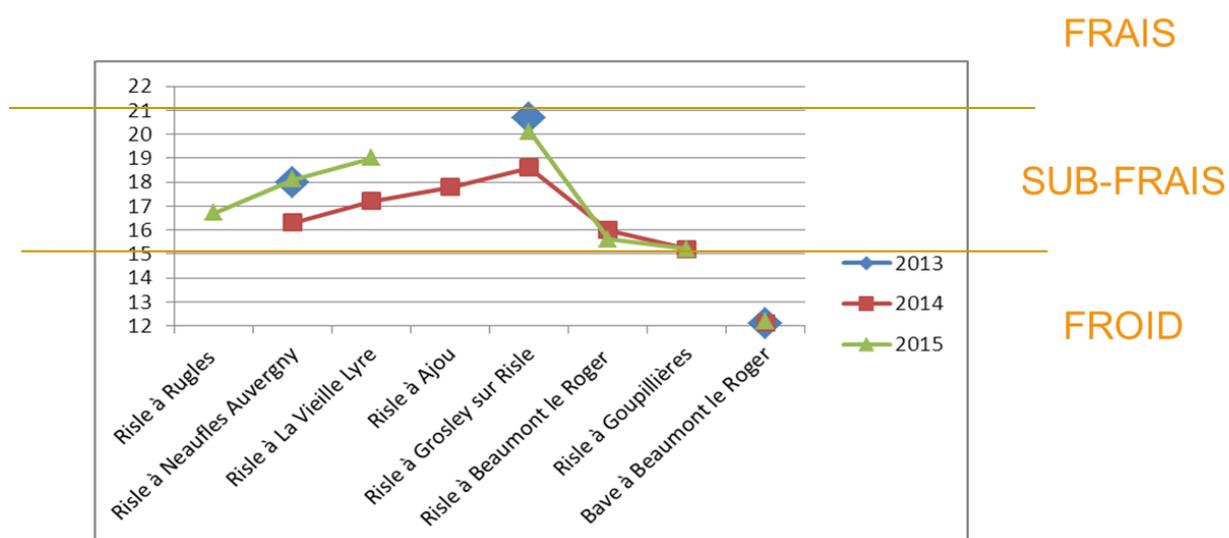


Illustration 16 : Classification de Magnuson (températures moyennes journalières des mois de juillet et d'août) à chaque station sur la période 2013/2015

Ainsi il apparaît qu'en dehors des épisodes d'assec, le tronçon « perché » (et notamment sa portion la plus aval) de la Risle peut représenter un habitat impliquant des stress pour certaines espèces piscicoles (fonction des variations de la température atmosphérique).

4.2. ETUDE DE LA RESTAURATION DE LA VIE AQUATIQUE SUR LE TRONÇON AYANT CONNU L'ASSEC DE 2012

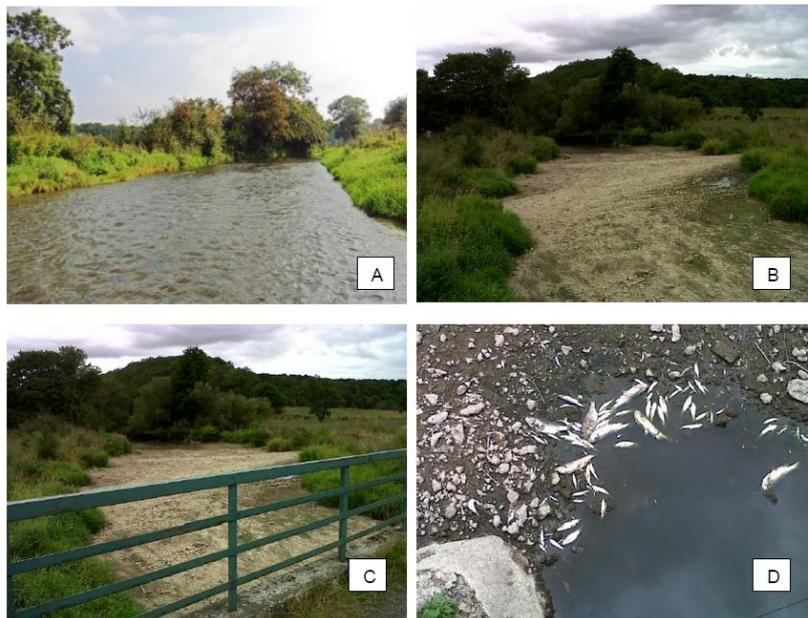
L'ouverture de la bétoire à Ajou en 2012 avait fait disparaître tous les poissons sur environ 12 km en aval dans la Risle (Illustration 17). Un des objectifs de l'Observatoire était d'étudier l'impact lié à l'évolution du système Risle/nappe de la craie en termes de quantité et de qualité des eaux sur l'écosystème de la Risle et de la nappe et notamment de répondre aux questions suivantes :

- Est-ce que la vie est revenue sur le tronçon en assec en 2012 ?
- En combien de temps la recolonisation s'est-elle déroulée ?
- Est-ce que la recolonisation est totale ?

La localisation des suivis hydrobiologiques, piscicole et de végétation mis en place dans le cadre de l'Observatoire de la Risle est présentée dans l'illustration 18 ci-dessous. La qualité biologique et les populations piscicoles de la Risle moyenne ont été évaluées sur trois stations :

- station amont : située dans le secteur « perché » de la Risle mais à l'amont de la zone d'assec de 2012 à la Ferrière sur Risle ;
- station intermédiaire : située dans la zone d'assec de 2012 au Val Gallerand ;
- station aval : située à l'aval de la zone d'assec à Beaumont le Roger dans le secteur de reconnexion nappe/Risle.

Il convient de noter que la station de suivi amont est située dans un secteur qui n'a pas été en assec en 2012. Toutefois, comme la station intermédiaire, la station amont est localisée dans un secteur où la rivière n'est pas connectée à la nappe ; la température de la rivière n'est donc pas tamponnée par l'apport des eaux souterraines, et la rivière connaît des amplitudes de température importantes avec notamment des pics de température en été, défavorables au maintien de certaines espèces de poisson (cf. § 4.1).



*Illustration 17 : Station d'inventaire piscicole en 2014 (A) et durant l'été 2012 durant l'assec (B, C, D, E)
(extrait du rapport de la FDPPMA - volet 6)*

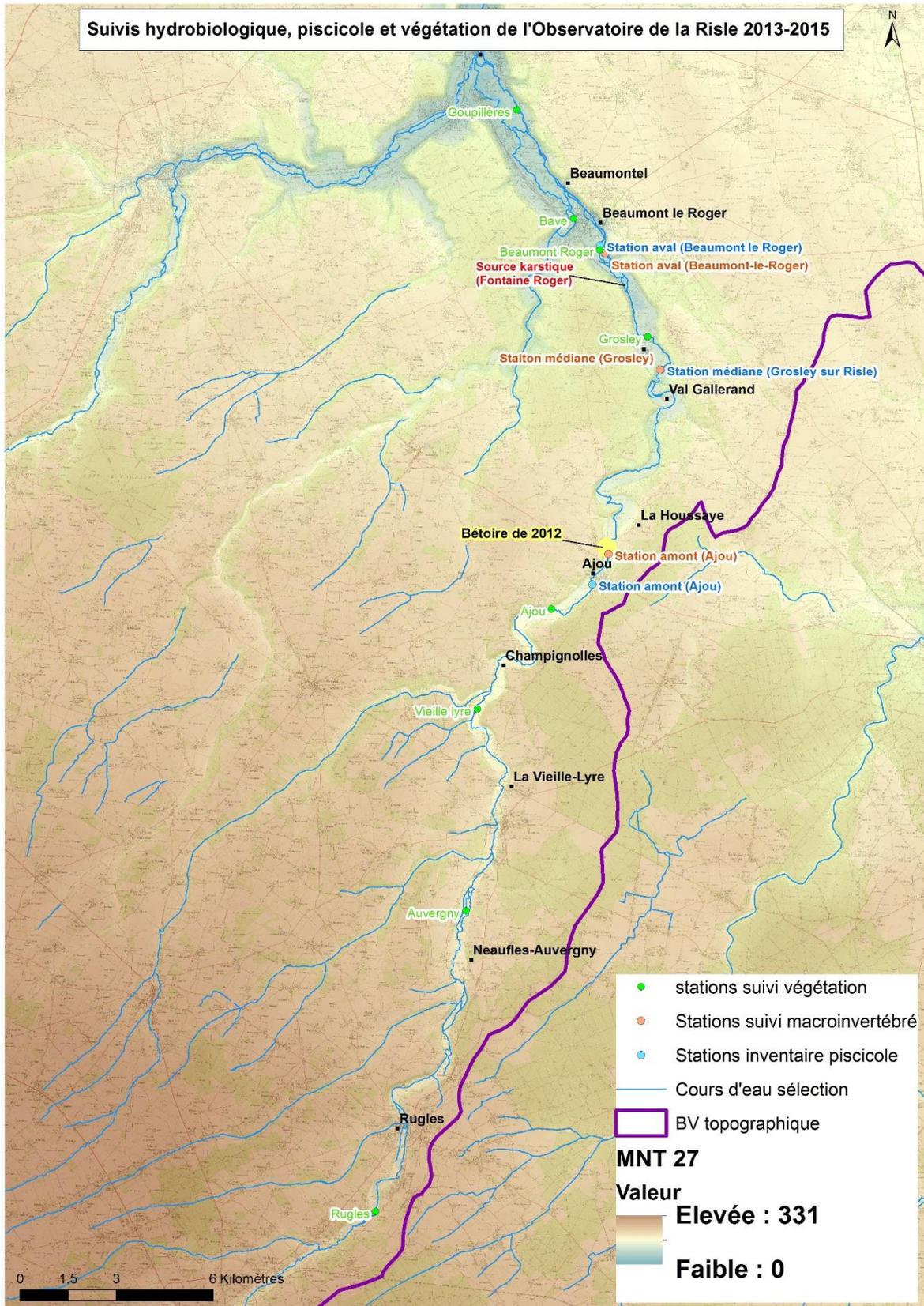


Illustration 18 : Suivis hydrobiologique, piscicole et végétation de l'Observatoire de la Risle 2013-2015

4.2.1. Suivi hydrobiologique

La qualité biologique de la Risle a été évaluée à partir du suivi de populations de macro-invertébrés sur les trois stations présentées précédemment (Illustration 18). Les prélèvements effectués sur deux ans lors de trois campagnes (juin 2013, septembre 2013 et septembre 2014) ont permis d'évaluer la dynamique de recolonisation. Le déroulement des campagnes, la méthodologie et les résultats détaillés de l'étude sont présentés dans le rapport de la DREAL (Volet n°6 – volet biologie : suivi hydrobiologique).

Les macro-invertébrés ont rapidement reconquis la zone asséchée avec une densité globale identique aux situations amont et aval. De plus, l'assec n'a pas été l'occasion d'une modification du peuplement. Les peuplements sont restés très stables en composition, seules les proportions relatives de chaque taxon par rapport aux autres changent. Ils sont majoritairement mésotrophes et bétamesosaprobés.

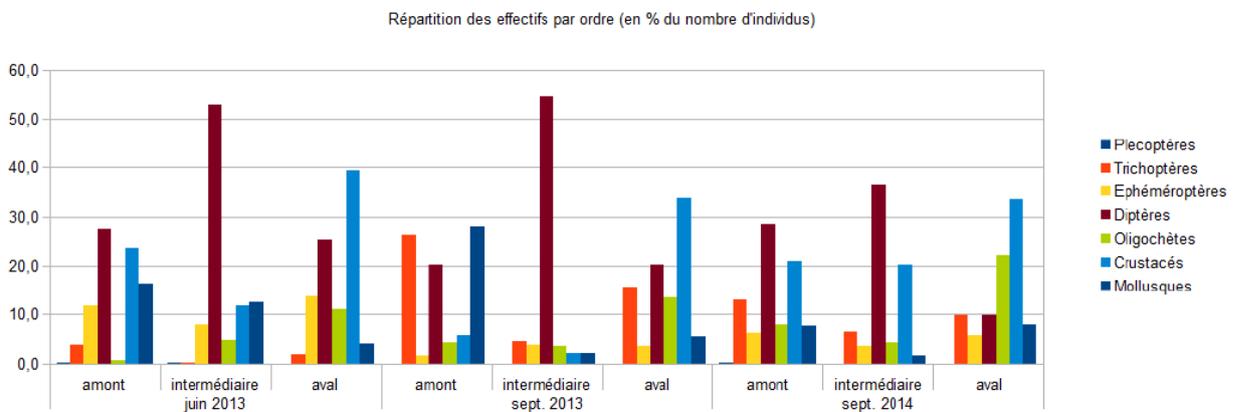


Illustration 19 : Répartition des effectifs par ordre mesurés en 2013 et 2014

Six mois après l'assec, les taxons qui ont eu une dynamique de reconquête plus importante sont les diptères chironomidae et les moins dynamiques sont les taxons les plus polluosensibles collectés à savoir les trichoptères. La prolifération de diptères sur la station intermédiaire a été, semble-t-il, favorisée par le développement très important d'algues filamenteuses.

Après deux ans, le retour à une situation comparable aux stations amont et aval pour la zone asséchée est presque accompli : la diversité (indice de shannon-weaver) et l'équilibre entre les taxons polluo-sensibles et polluo-tolérants (indice d'équilibre abondance) sont un peu moindre que les stations amont et aval en septembre 2014 (Illustration 20).

Tableau Indice de pullulation

	amont	intermédiaire	aval
juin 2013	4,6	18,7	6,8
sept. 2013	8,5	19,4	7,0
sept.2014	5,5	10,8	9,7

Tableau Indice d'équilibre des abondances

	amont	intermédiaire	aval
juin 2013	4,38	1,72	6,52
sept. 2013	8,49	3,88	7,11
sept.2014	3,13	4,44	5,99

Tableau Indice de Shannon-Weaver

	amont	intermédiaire	aval
juin 2013	3,68	2,59	3,19
sept. 2013	3,87	2,59	3,72
sept.2014	3,85	3,38	3,48

Illustration 20 : Récapitulatif de l'indice d'équilibre des abondances, de l'indice de Shannon-Weaver et de l'indice de pullulation

Par ailleurs, Il n'y a jamais eu de perturbation notable du peuplement de macro-invertébrés à l'aval de la résurgence (station aval).

L'assec de la Risle, phénomène naturel, a eu donc un impact moindre sur le peuplement des macro-invertébrés sur ce tronçon asséché. La recolonisation s'est faite essentiellement par dérive sur un temps relativement court.

Toutefois, il faut remarquer que la seule valeur de l'IBGN traduit mal la situation écologique perturbée de la Risle. Les pullulations de certains taxons de macro-invertébrés sont fréquentes et la structure du peuplement est déséquilibrée mais cohérent avec l'état de la Risle plus en amont. Le peuplement est essentiellement composé de taxons peu exigeants comme les mollusques, diptères, achètes et triclades. Les plécoptères, les plus polluo-sensibles, sont absents et les familles d'éphémères et de trichoptères présentes sont ubiquistes.

Si l'habitat physique est de bonne qualité (nature du substrat, vitesse d'écoulement...), il faut chercher du côté de la qualité de l'eau les raisons de ces déséquilibres.

4.2.2. Suivi piscicole

Les trois stations d'inventaires piscicoles ont été implantées dans un périmètre proche des stations de suivi des macro-invertébrés afin d'obtenir des informations comparables concernant les différents écosystèmes. Deux stations à l'amont et à l'aval de la zone de déconnexion ont été retenues, correspondant à des stations de référence, et une station dans la zone de l'assec de 2012 (Illustration 18).

Deux campagnes de mesures ont été effectuées aux trois stations en octobre 2013 et septembre 2014 (excepté à la station amont qui n'a pas été inventoriée en 2013, mais des données de septembre 2011 ont pu être exploitées).



Anguille européenne (*Anguilla anguilla*)



Chevesne (*Leuciscus cephalus*)



Breme (*Abramis brama*)



Brochet (*Esox lucius*)



Biométrie

Illustration 21 : Inventaire par pêche électrique (photos FDPPMA27)

Le déroulement des campagnes, la méthodologie et les résultats détaillés de l'étude sont présentés dans le rapport de la FDPPMA27 (Volet n°6 – volet biologie : suivi des populations piscicoles).

L'étude de la recolonisation de la zone d'assec a été menée à partir de l'analyse de différents indicateurs tels que les espèces observées, la biométrie des espèces capturées, l'abondance relative, mais également l'IPR (Indice Poissons Rivière).

Les résultats montrent que la Risle présente une liste d'espèces conforme à celle attendue et correspondant bien à un peuplement salmonicole. Les effectifs et surtout les biomasses capturées montrent des dysfonctionnements plus ou moins importants en fonction des stations, mais visibles sur les stations qui n'ont pas connu l'assec. En effet, outre les problèmes d'hydro morphologie ou de qualité d'eau pouvant affecter le peuplement, la position perchée de la moyenne Risle semble influencer sur les communautés de poissons, notamment à cause des températures élevées en été (cf. résultats du suivi des températures de la rivière présentés aux §0 et §4.1).

L'assec de 2012 a entraîné la disparition complète du peuplement piscicole sur environ 12 km de Risle.

Le suivi des peuplements piscicoles réalisé par la Fédération en 2013 et 2014, soit un et deux ans après l'ouverture de cette bétoire, a permis de mettre en évidence une recolonisation assez rapide par la quasi-totalité des espèces du cours d'eau (Illustration 22 à Illustration 25).

Les espèces rencontrées et la taille des individus retrouvés semblent montrer que la recolonisation se fait a priori majoritairement par une dérive de juvéniles des espèces rencontrées en amont. Les espèces les plus à même de recoloniser sont les espèces les plus mobiles et dont les densités sont assez importantes sur la Risle (secteurs qui n'ont pas été hors d'eau) : Chevaine, Goujon, Loche franche, Vairon et dans une moindre mesure Vandoise et Gardon. Les espèces les plus mobiles ont probablement pu également recoloniser la Risle depuis l'aval.

Par contre la reconquête de la Risle est plus complexe pour des espèces dont les effectifs sont plus faibles : Truite fario, Brochet, Perche, Anguille européenne ou moins mobile comme le Chabot (absence de vessie natatoire, limitant ses déplacements).

Cette recolonisation plus difficile pour certaines espèces dont des espèces de référence pour la Risle comme la Truite fario ou le Chabot entraîne une fragilité du nouveau peuplement. Cette fragilité ne semble pas levée au bout de deux ans car les densités de ces espèces ne progressent pas.

Toutes ces conclusions mériteraient d'être confirmées avec un suivi plus long dans le temps. Il persiste des incertitudes liées au protocole de pêche (inventaire non exhaustif) ainsi qu'à l'absence de données sur un état antérieur à l'ouverture de la bétoire. Ainsi, un suivi sur un plus long terme serait nécessaire pour confirmer les tendances déjà observées.



Illustration 22 : Chabot commun (à gauche) et Vairon (à droite) - Espèces dites d'accompagnement de la truite.

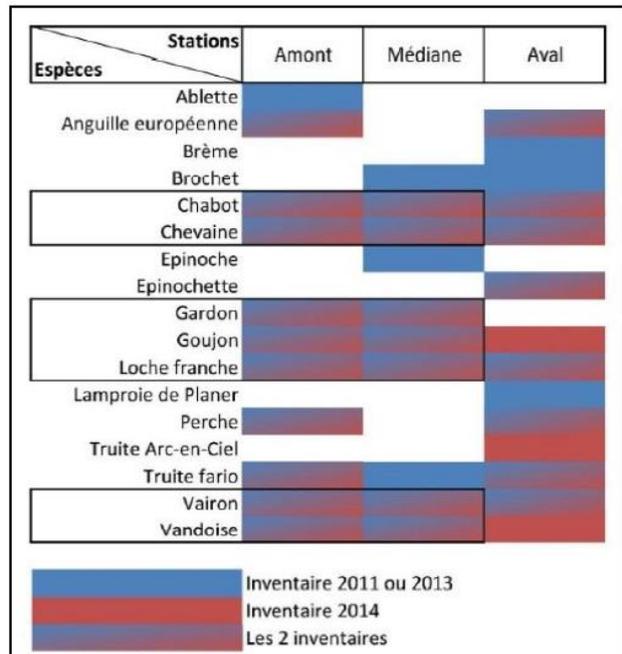
Nota : les espèces présentées par l'illustration 22 représentent plus de 95% des effectifs observés sur la station de Beaumont-le-Roger (G. Samson, FDAAPPMA27)



Illustration 23 : Biométrie du brochet capturé en 2013 (FDAAPPMA27)



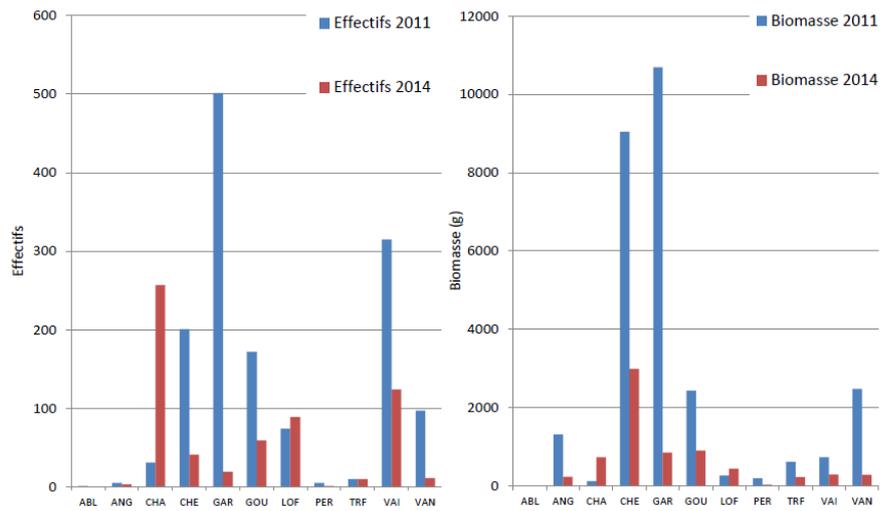
Goujon (en haut) et Truite fario capturée en 2013 (en bas)



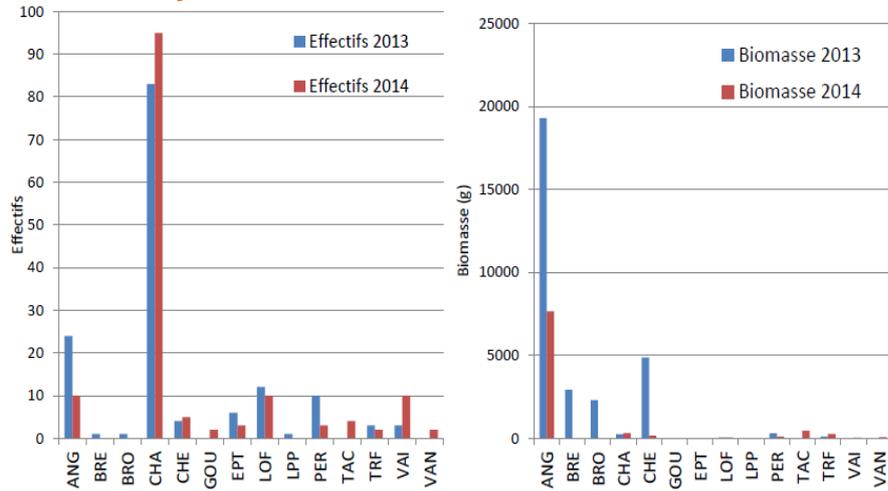
Synthèse de la présence des espèces de poissons en fonction des stations et de l'année d'inventaire

Illustration 24 : Synthèse de la présence des espèces de poissons en fonction des stations et de l'année d'inventaire (FDAAPPMA27)

Station amont



Station moyenne



Station aval

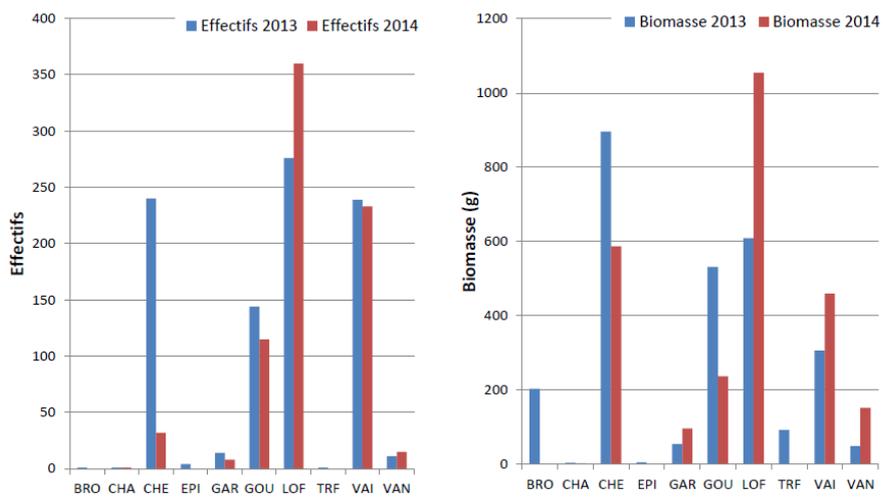


Illustration 25 : Répartition des effectifs par espèce pour les trois stations de suivis aux deux campagnes

4.2.3. Suivi de la végétation aquatique

Les résultats du suivi de la végétation aquatique présentés en détails dans le rapport de l'ONEMA (Volet 6 – volet biologie : suivi de la végétation aquatique) ont montré un déséquilibre du recouvrement végétal composé uniquement de macrophytes sur la station d'Ajou ayant subi l'assec. Mais également des disparités au niveau de la trophie et de la richesse spécifique le long de la Risle. Plus précisément, sur la zone impactée par l'assec de 2012, les macrophytes, la renoncule flottante et la renoncule en épi semblent avoir été fortement touchés ; dans une moindre mesure le potamot pectiné est également en régression. Sur les autres secteurs de la Risle moyenne, les recouvrements sont meilleurs.

5. Étude de la dynamique spatiale et temporelle des pertes en rivière

Question posée à l'Observatoire :

« Sur quel secteur la Risle perd elle le plus de débit ? » « Est-ce toujours au même endroit ? »

Les résultats présentés ci-dessous sont une synthèse des éléments présentés dans le rapport des volets n°2, 3, 4 et 5 : étude de l'hydrosystème Risle – Nappe de la craie (BRGM/RP-67480-FR).

Une analyse fine des variations de débits le long de la Risle moyenne a mis en évidence que la répartition des pertes variait dans le temps et dans l'espace. En octobre 2014 ou en 1894 par exemple, 70% environ du débit perdu sur la Risle moyenne l'a été entre Ambenay et Ajou, alors qu'en avril 2014, 68% du débit était perdu plus en aval, entre Ajou et Grosley (voir Illustration 26).

La partie la plus aval du secteur « perché » de la Risle (partie située à l'aval d'Ajou) qui connaît régulièrement les assecs n'est pas toujours le secteur où la rivière perd le plus de débit. A certaines périodes, l'essentiel des pertes d'eau de la Risle prend place plus en amont.

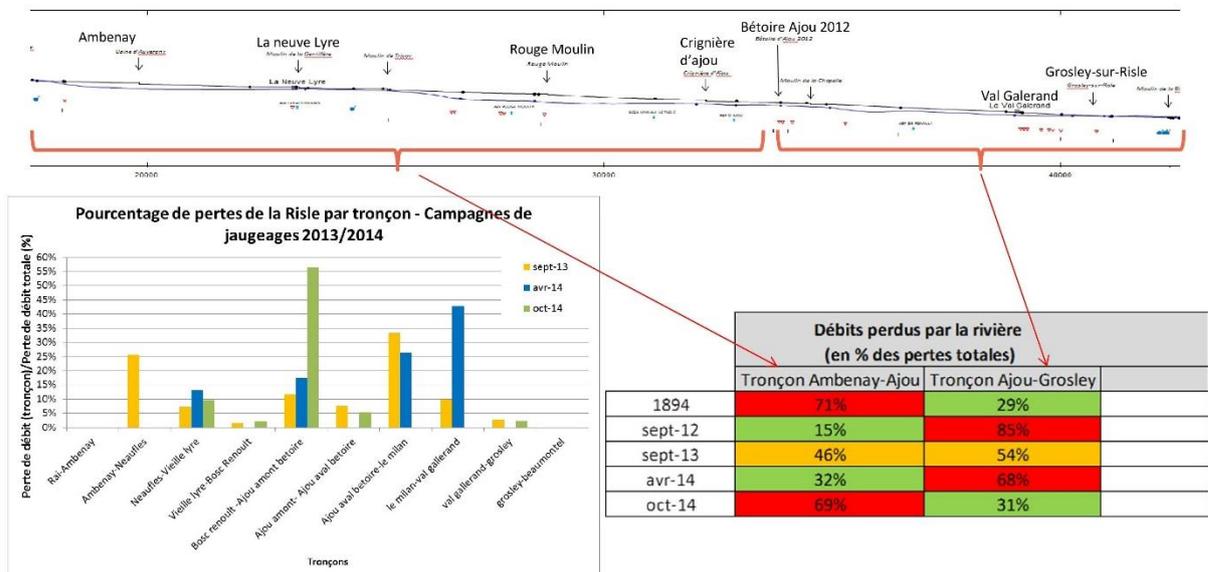


Illustration 26 : Répartition et localisation des pertes de débits le long de la Risle moyenne (David et al., 2017)

Les résultats présentés ci-dessus sont issus des résultats de jaugeages réalisés à l'étiage ou du moins en-dehors des périodes de crues.

Pour aller plus loin dans la compréhension des variations des pertes de débit de cette rivière et notamment pour évaluer les pertes de débit de la Risle en période de crue, le BRGM a réalisé une modélisation des échanges latéraux entre deux stations hydrométriques du cours d'eau (approche inverse du modèle de l'onde diffusante d'Hayami avec échanges latéraux appliqués aux bassins karstiques (Charlier et al., 2015) afin de mieux comprendre les interactions surface-souterrain. Cette modélisation a confirmé la forte variabilité temporelle et spatiale des pertes le long de la Risle moyenne. Elle a également montré que la variabilité temporelle des pertes est d'une part expliquée par la connectivité de la rivière à l'aquifère karstique (i.e. activité des bétoures), mais qu'elle était d'autre part corrélée au débit de la rivière. **Ainsi des pertes vers le karst atteignant jusqu'à 7 m³/s ont pu être estimées par le modèle lors de l'épisode de crue de décembre 2013 sur le tronçon compris entre Ajou et Grosley-sur-Risle (Illustration 27a).** De plus, la comparaison de ces simulations avec la piézométrie mesurée à proximité du tronçon (Illustration 27b) montre une bonne cohérence entre la dynamique des pertes et la recharge de l'aquifère. **Sur la base des simulations, on suppose que le karst joue le rôle d'atténuation des pics de crues, réduisant alors le risque d'inondation tant que l'aquifère est suffisamment désaturé.**

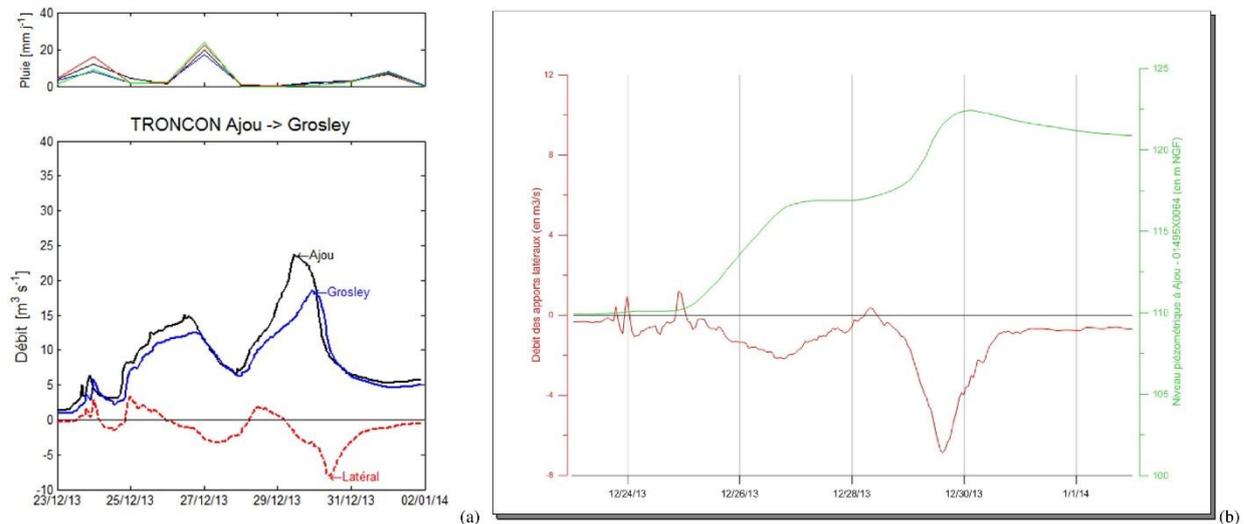


Illustration 27 : (a) Simulation des échanges latéraux sur le tronçon Ajou-Grosley lors du passage de la crue de décembre 2013; (b) comparaison des échanges latéraux simulés sur le tronçon Ajou-Grosley (en rouge) et du niveau piézométrique mesuré dans le karst à Ajou sur le piézomètre 01495X0064 (David et al., 2017)

Nota : sur l'illustration 27 (a) ci-dessus, les valeurs de débit négatif illustrent des pertes, et les valeurs positives des apports latéraux.

6. Identification des vides karstiques

Question posée à l'Observatoire :

« A quoi ressemble le karst de la Risle : y-a-t-il de gros vides dans le sous-sol ? »

Afin de tenter de connaître la géométrie des vides karstiques, les spéléologues sont descendus dans les puits de la région pour tenter d'observer directement ces vides. Malheureusement les difficultés d'accès ne leur ont pas permis d'observer directement ces conduits. Des observations indirectes ont en revanche été menées par l'Université de Rouen (investigations géophysiques) et le BRGM (analyses des vides rencontrés par forages).

Les résultats présentés ci-dessous sont une synthèse des éléments présentés dans le rapport du volet n°1 : synthèse géologique et structurale (rapport BRGM/RP-66861-FR).

Les résultats de ces travaux ont montré que :

- plusieurs niveaux de conduits (vides) karstiques étaient présents, en particulier dans la vallée sous la rivière (étagement des drains karstiques) ;
- des conduits parfois métriques ont été observés au droit de certains forages, mais les dimensions peuvent être variables ;
- des indices de vides sont observés à plusieurs endroits dans les zones saturées (nappe phréatique) et non-saturées (au-dessus du niveau de la nappe) (Illustration 29).

Même s'il n'est pas possible d'observer directement ces vides, une estimation de leur importance a été tentée par calcul indirect : la surface cumulée de la section des vides souterrains, par lesquels l'eau de Risle a transité d'Ajou à Grosley en 2012 lors de l'engouffrement total de la Risle dans la bétoire, est estimée entre 12 et 17m² (estimation sous toute réserve). Une telle surface correspondrait à un conduit d'environ 2 mètres de rayon ; dans la réalité, il ne s'agit vraisemblablement pas d'un conduit unique, mais plus probablement d'un réseau de conduits plus ou moins connectés.

Un schéma d'organisation de ces vides ou conduits de l'amont vers l'aval a été proposé par le groupe de travail de l'Observatoire. Ce schéma reprend celui proposé par Rodet (Rodet, 1981) et Calba (Calba et al., 1979) à savoir un karst de concentration et de restitution. Ce type de karst se forme par érosion régressive à partir des émergences situées dans la zone où la surface piézométrique rencontre la surface topographique. 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 deltaïsme⁴ (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 ;

⁴ Emergence constituée de plusieurs conduits dont la géométrie est analogue à une embouchure de fleuve en delta

- 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.

Les observations faites par les spéléologues, les résultats des mesures géophysiques réalisées par l'Université de Rouen et le type de vides observés en forage semblent conforter ce type de schéma pour le karst de la Risle comme le montre l'illustration 28.

Le schéma de concentration a par ailleurs été confirmé et complété par les mesures en continu de la température et de la conductivité de la nappe. Ainsi il apparait que certains bras des réseaux karstiques situés en profondeur dans la vallée de la Risle, reçoivent uniquement les eaux de surface qui s'infiltrent dans les bêtouilles sur les plateaux, alors que d'autres bras reçoivent en plus les eaux issues des pertes de la Risle, voire dans certains cas, les eaux des remontées de la nappe lors de périodes humides prolongées (cf. §6).

Petits conduits centimétriques repérés fréquemment par CDS (surtout en plateau)



Vides décimétriques voire métriques rencontrés en forage dans la vallée

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
1.00	Sol (terre végétale)		Terre végétale.	Quaternaire	127.00
	Argiles à silex		Argile à silex. Alluvions et Formations résiduelles à silex ?	Cénozoïque	
11.00	Craie marseuse à Inoceramus labiatus		Craie altérée.	Turonien	117.00
12.10			Craie indurée.		115.90
15.00			Cavité.		113.00
16.50					111.50
17.50	Craie marseuse sans silex à Inoceramus labiatus (Craie blanche)		Craie tendre.	Turonien inférieur	110.50
31.00					97.00

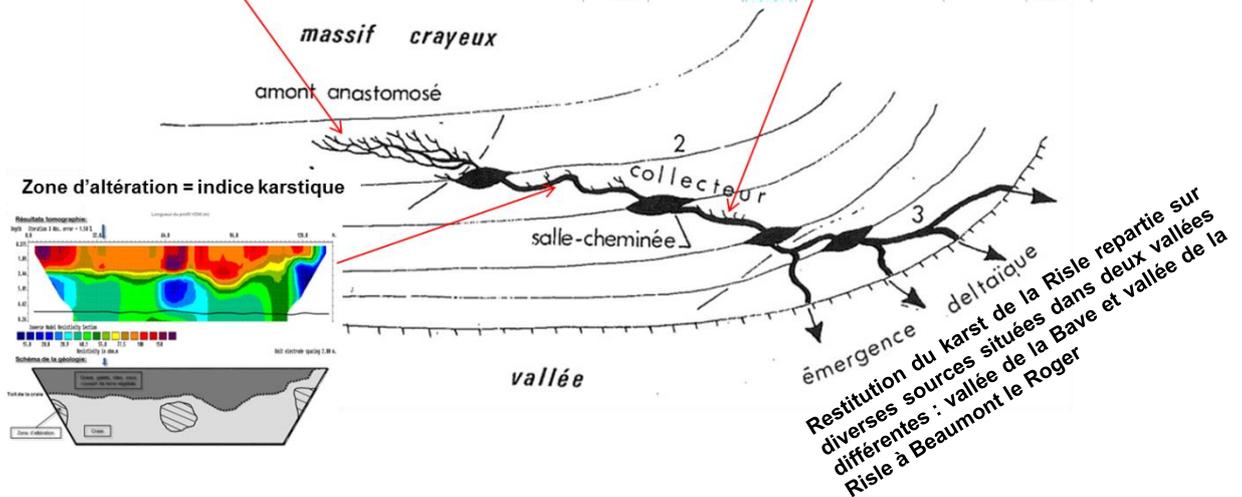


Illustration 28 : Synthèse des observations du karst de la Risle qui tendent à confirmer l'hypothèse de la géométrie type des réseaux karstiques de la craie proposée Calba (Calba et al., 1979) et (Rodet, 1981)

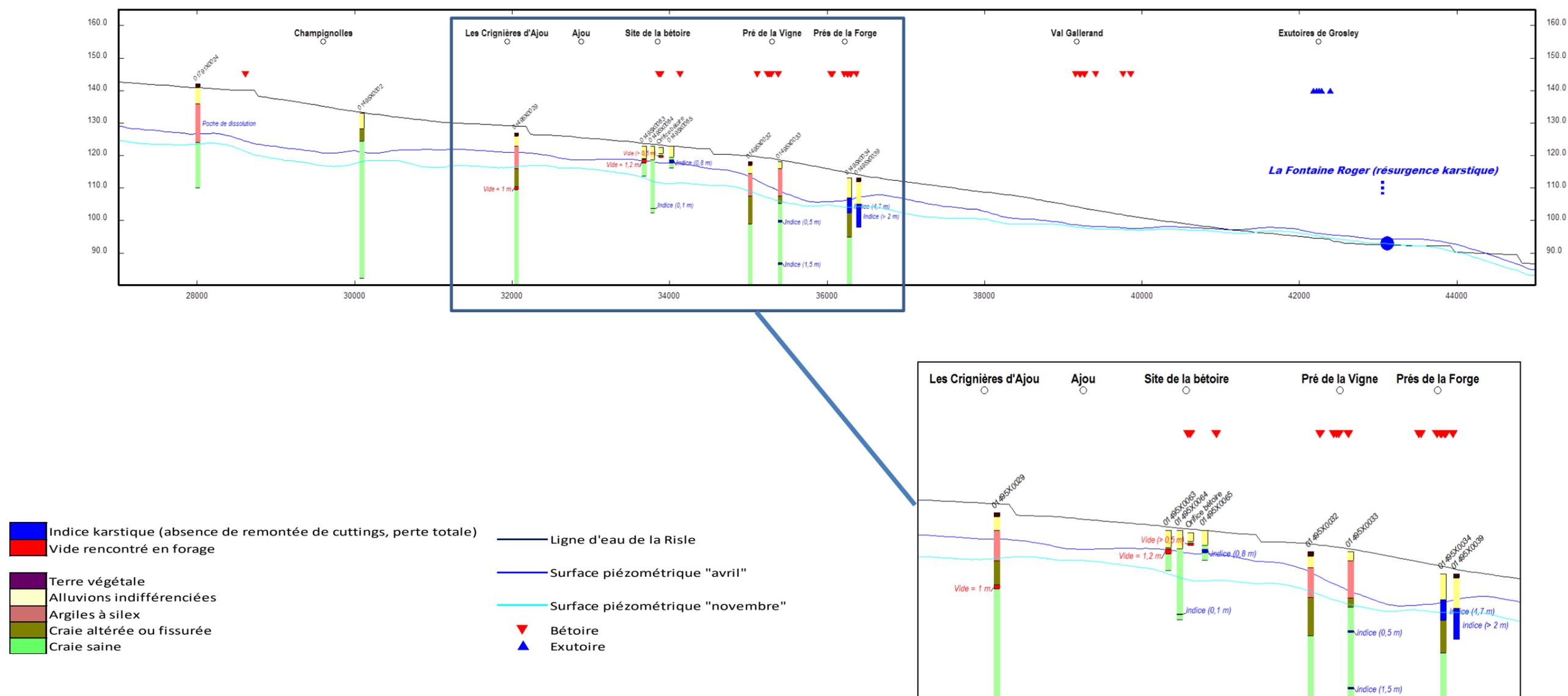


Illustration 29 : Vides ou indices de vides identifiés dans les forages entre Champagnolles et la source Fontaine Roger et relation avec la surface piézométrique mesurée en 2014 et la limite craie / formations de surface (extrait du rapport BRGM/RP-66861-FR)

7. Dynamique de l'hydrosystème et schéma conceptuel de fonctionnement

Questions posées à l'Observatoire :

« Comment fonctionne cet hydrosystème ? », « Quelles sont les dynamiques des transferts de masse, de pression au sein de l'aquifère ? », « Quelles quantités d'eau circulent en souterrain ? »

Les résultats présentés ci-dessous sont une synthèse des éléments présentés dans le rapport des volets n°2, 3, 4 et 5 : étude de l'hydrosystème Risle – Nappe de la craie (BRGM/RP-67480-FR).

L'examen des chroniques de débit, piézométrie, température, conductivité, turbidité et nitrate dans le secteur Ajou-Fontaine Roger, par des analyses corrélatoires et spectrales (logiciel TEMPO) a permis de mieux caractériser les échanges eaux de surface / eaux souterraines et les transferts au sein du karst.

Par exemple, l'examen des chroniques des ouvrages 01495X0067 et 01495X0064, forages de 32m et 20m de profondeurs respectivement, situés tous deux dans la vallée de la Risle à Ajou mais distants de 1.8 km, indique que le transfert de pression entre ces 2 points se produit dans un réseau karstique en charge car aucun décalage temporel n'est observé dans les chroniques piézométriques (Illustration 30).

L'examen des chroniques de conductivité et de température sur ces deux points a montré en revanche des types de transferts différents sur ces deux ouvrages. Des transferts de masse depuis la rivière ont en effet été mis en évidence sur le piézomètre 01495X0064. En revanche sur le piézomètre 01495X0067 situé plus à l'amont, les variations de température et de conductivité observées mettent en évidence des transferts de masse provenant de l'exokarst drainant le ruissellement du plateau.

Ainsi, si ces deux ouvrages sont en connexion hydraulique dans un réseau karstique en charge, l'ouvrage aval 01495X0064 semble situé sur un drain principal recevant les pertes de la rivière, tandis que le piézomètre 01495X0067 semble situé sur un drain annexe connecté au drain principal, ne recevant pas les pertes de la rivière mais plutôt les eaux de ruissellement du plateau drainé par l'exokarst.

L'étude du transfert au sein de l'aquifère entre la zone de pertes de la Bétoire d'ajou (01495X0063) et le principal exutoire (source Fontaine Roger - 01491X0016) a ensuite pu être abordée à l'aide des chroniques de température et de conductivité des eaux, le débit de cette source n'étant pas suivi en continu. Les dynamiques d'évolution mesurées à l'exutoire apparaissent très comparables à celles mesurées en entrée, les amplitudes des températures et de la conductivité apparaissent néanmoins plus faibles. L'analyse spectrale réalisée sur les eaux de la Fontaine Roger permet de mettre en évidence l'existence de phénomènes périodiques à 24 et 12 h. Le spectre croisé indique que les pics à 24 h sont assez cohérents (0.6) pour la température et la conductivité ce qui témoigne globalement du lien de causalité entre les variables, les variations périodiques des signaux de sortie apparaissent fortement atténuées. L'analyse spectrale permet de corroborer les informations de l'essai de traçage, réalisé par

l'Université de Rouen (Fournier, 2015), qui démontre l'existence du lien hydraulique entre la zone des pertes d'Ajou et l'exutoire.

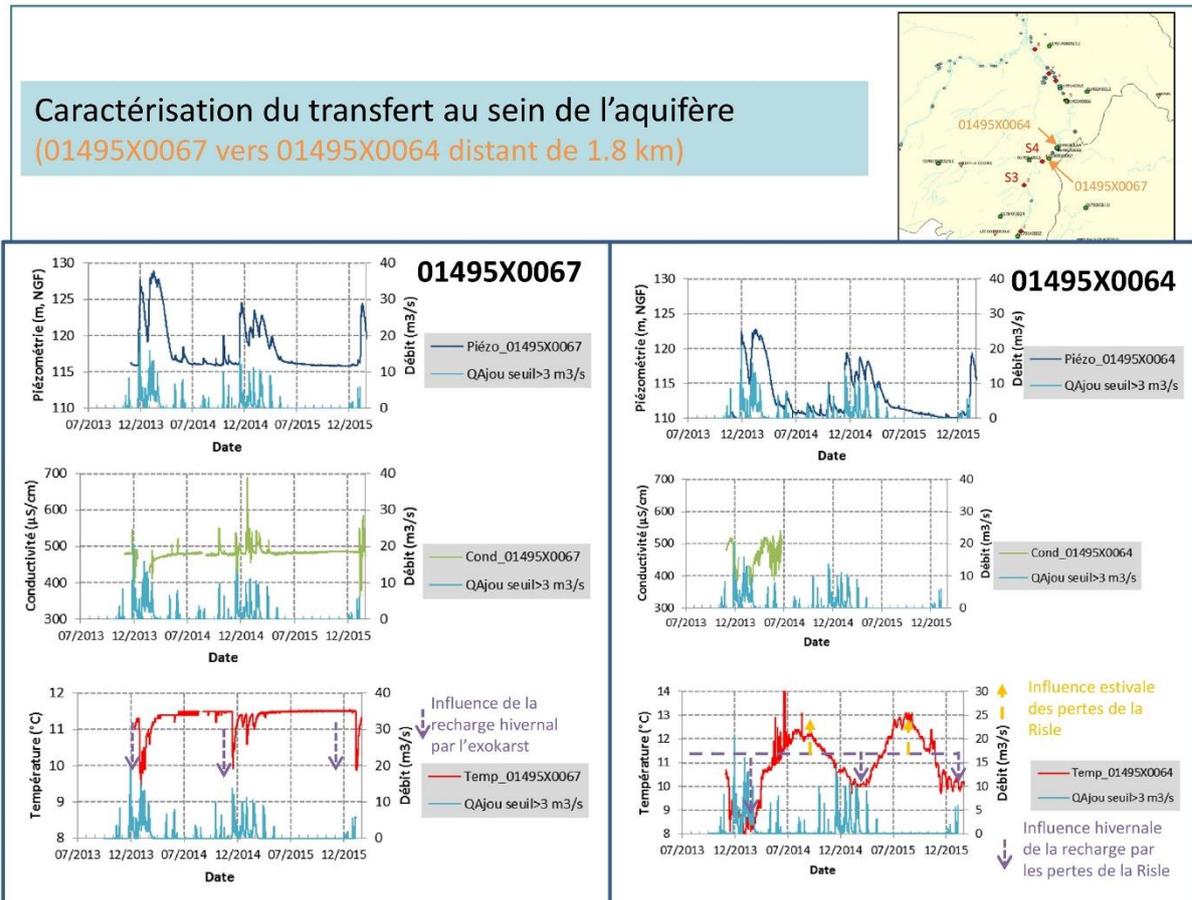


Illustration 30 : Examen des évolutions des niveaux, de la minéralisation et de la température de l'eau souterraine au voisinage des ouvrages 01495X0067 (amont hydraulique de la Bétoire d'Ajou) et 01495X0064 (piézomètre à proximité de la Bétoire d'Ajou) (David et al., 2017)

A partir des analyses fonctionnelles, il a ensuite été tenté d'établir un schéma conceptuel de représentation du fonctionnement du karst et d'essayer de comprendre comment l'eau de l'exutoire pourrait être expliquée par le mélange d'eau de diverses composantes qualifiées au sein de l'aquifère. Les résultats de ces analyses du signal indiquent que les composantes d'écoulement liées aux pertes semblent globalement expliquer près de 65% de la variance totale observée à l'exutoire, les 35 % restants sont attribués à la composante inertielle des plateaux qui apparaît ici plus minéralisée que l'eau des pertes de la Risle (Illustration 31 et Illustration 32).

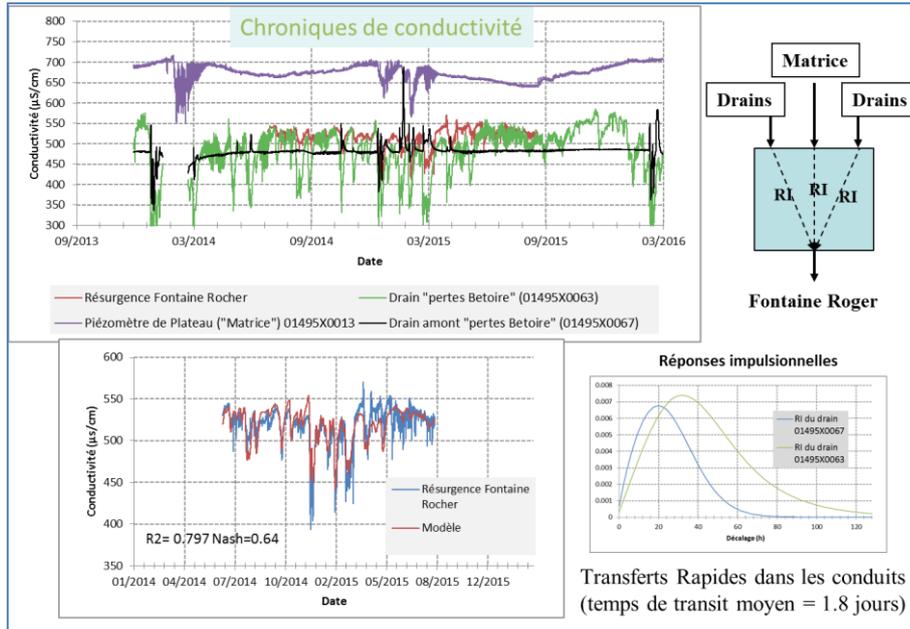


Illustration 31 : Approche fonctionnelle utilisée pour décrire les évolutions de la conductivité électrique mesurée à la Fontaine Roger

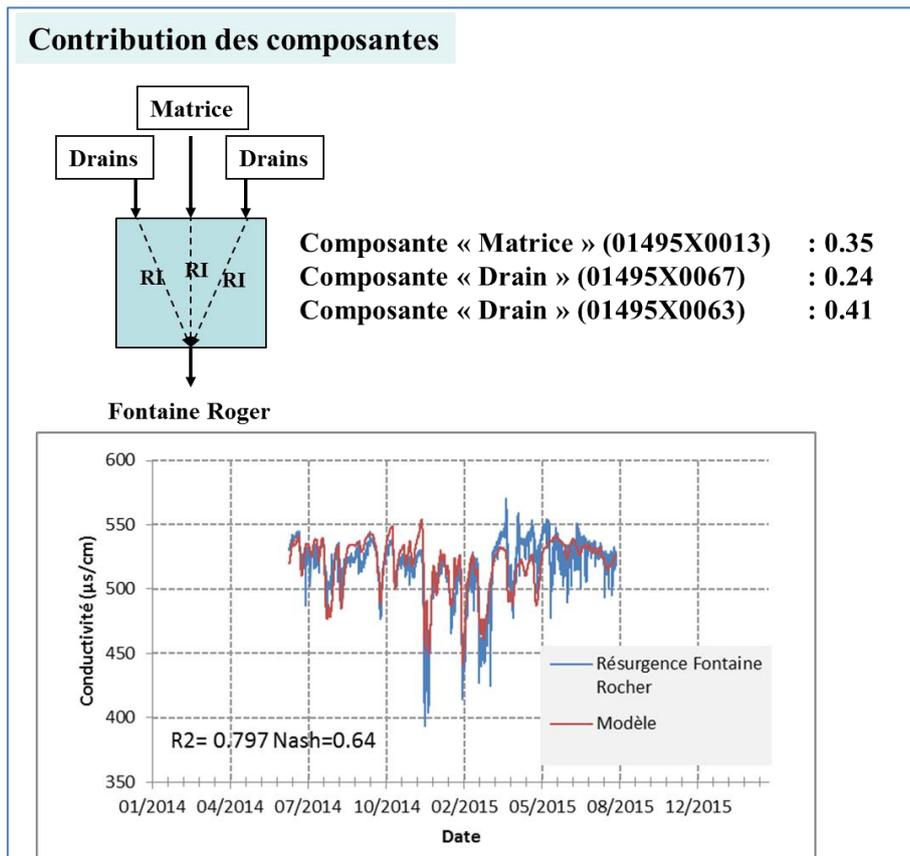


Illustration 32 : Contribution des composantes de l'approche fonctionnelle utilisée pour décrire les évolutions de la conductivité électrique mesurée à la Fontaine Roger

Enfin, des modélisations globales réalisées à l'aide du logiciel GARDENIA ont permis d'estimer les composantes (lente et rapide) des débits de la Risle aux différentes stations, de réaliser des bilans quantitatifs et d'estimer les flux souterrains, notamment karstiques, dans la vallée de la Risle (Illustration 34).

Le modèle GARDENIA a permis 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. **L'illustration 33 représente la part des contributions des écoulements lents au débit de l'Itton à Rai, Ajou, Grosley et Beaumontel estimées par le modèle sur la période 1994-2014. En moyenne, on observe une diminution progressive de la part de la composante souterraine lente de Rai à Grosley, puis augmentation forte à Beaumontel (Illustration 33).**

Parmi les deux stations où la nappe et la rivière sont connectées (Rai et Beaumontel), la contribution souterraine est plus forte dans le secteur aval de Beaumontel (Illustration 33). Ceci vient confirmer les différences en termes de végétation et de comportement thermique sur ces deux stations (présence non permanente d'algues rouges et recouvrement végétal inférieur à Rai).

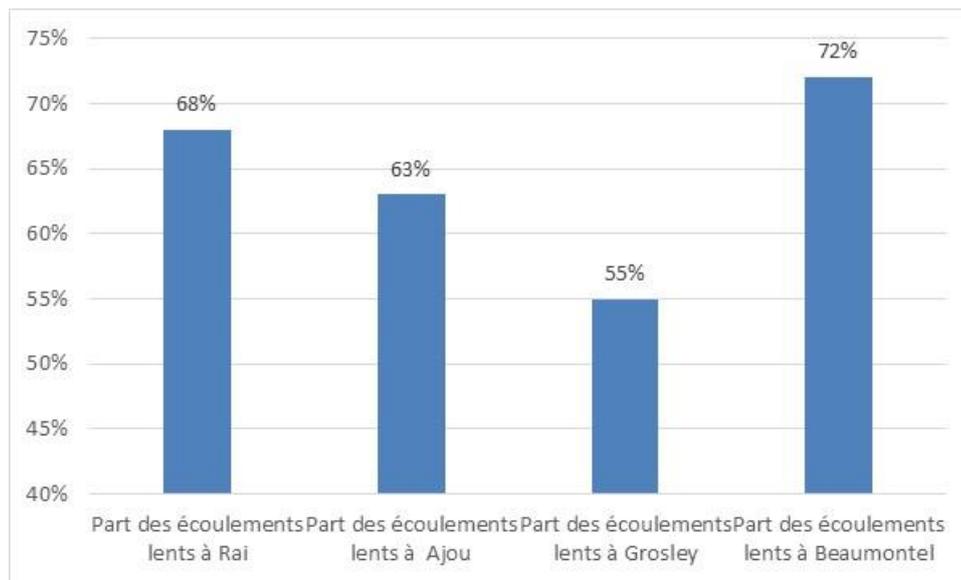


Illustration 33 : Part moyenne (1994-2014) de la composante lente du débit simulée de la Risle à Rai, Ajou, Grosley et Beaumontel sur la période simulée

L'illustration 34 ci-dessous présente le bilan hydrique quantitatif établi à partir des résultats des quatre modèles Gardenia respectivement pour le cycle 2004/2005 (les bilans établis pour les cycles 2009/2010 et 2000/2001 sont disponibles dans le rapport BRGM/RP-67480-FR).

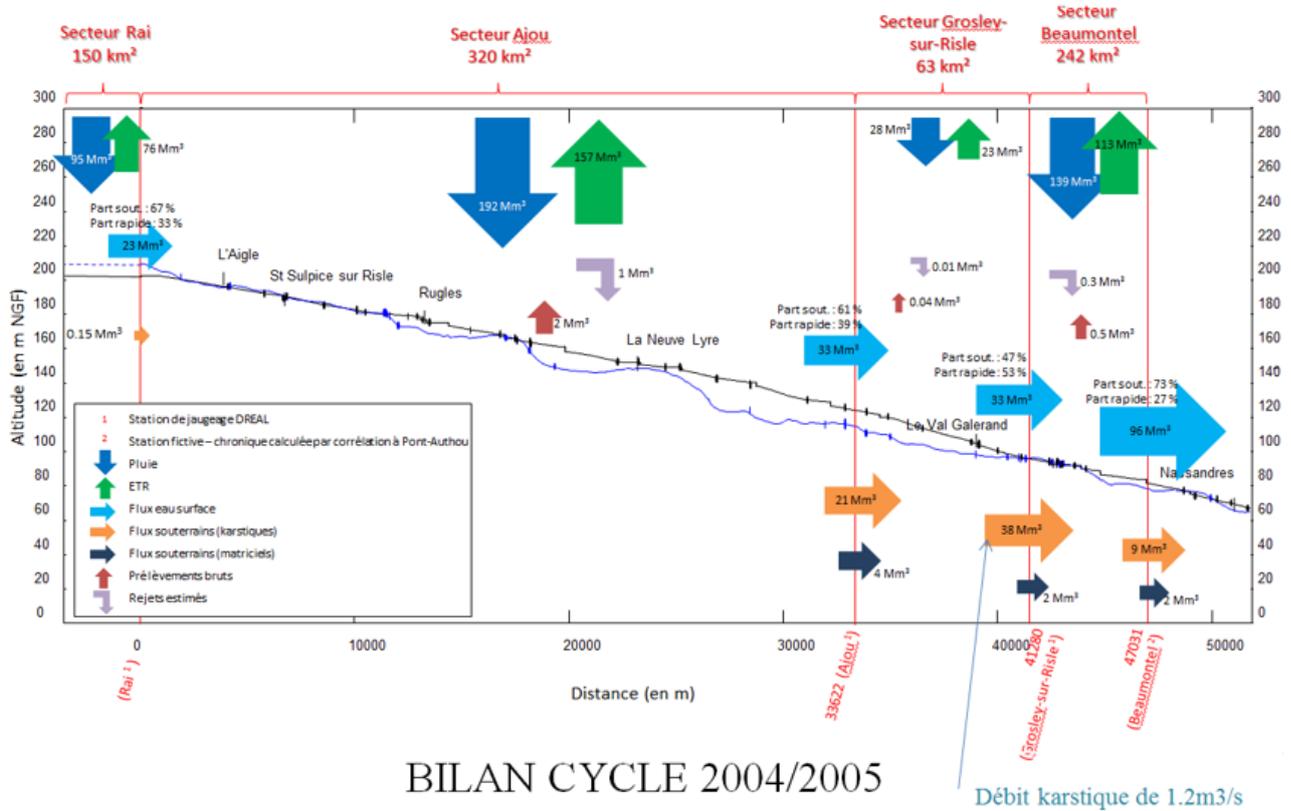


Illustration 34 : Eléments du bilan hydrologique de la Risle moyenne pour le cycle 2004/2005 d'après les résultats de modélisation globale GARDENIA pluie-débit-niveaux

Le bilan schématise la répartition moyenne des circulations de l'eau dans les différents compartiments du bassin versant. Il se résume selon le schéma suivant :

- Flèche bleu-foncé : les entrées d'eaux dans le bassin versant (volume de pluie) (résultat du modèle GARDENIA),
- Flèche verte : volume de l'évapotranspiration réelle (résultat du modèle GARDENIA),
- Flèche bleu-clair : volume de la Risle,
- Flèche rouge : prélèvements bruts (base de données AESN),
- Flèche violette : rejets estimés (stations d'épuration et éventuels rejets industriels),
- Flèche noire : volume souterrain correspondant à l'écoulement matriciel de la vallée au droit de la station de jaugeage. Le calcul a été réalisé à partir des cartes piézométriques et des données de transmissivité existantes à proximité de chaque station de jaugeage en utilisant la formule : $Q_{\text{écoulement souterrain}} = T.i.L$, avec T = Transmissivité ; i = gradient hydraulique de la nappe et L = largeur du front d'écoulement estimée à partir des isopièzes,
- Flèche orange : ce volume est interprété en première approximation comme le flux souterrain karstique sortant de chaque zone bilan. Il s'agit du facteur d'échange souterrain calculé par le modèle auquel a été soustrait l'écoulement matriciel estimé précédemment.

Les flux karstiques estimés s'échappant des sous-bassins, sont résumés dans le tableau ci-dessous :

	Flux karstique (en Mm3) s'échappant vers l'aval au droit	
	d'Ajou	de Grosley
cycle 2004/2005	21	38
cycle 2009/2010	30	52
cycle 2000/2001	63	103

Ces flux karstiques estimés par modélisation, varient à Grosley entre 38 Mm³ et 103 Mm³ selon le cycle étudié ce qui représente un débit 1,2m³/s à 3,3 m³/s. Il s'agit de valeurs tout à fait réalistes ; pour mémoire, le débit des résurgences de ce système karstique situées à Beaumont-le-Roger (dans les vallées de la Risle et de la Bave) ont été estimées par jaugeage à un peu plus de 2m³/s en 2014 (cf. §2.2.3 du rapport BRGM/RP-67480-FR).

Le tableau ci-dessous présente, pour chaque cycle considéré, la part respective de chaque type de flux de sortie (en % du flux total de sortie de l'hydrosystème) à Grosley-sur-Risle :

	2000/2001	2004/2005	20009/2010
Flux eau de surface	64%	45%	52%
Flux souterrains karstique	35%	52%	46%
Flux souterrain matriciel	1%	3%	2%

Il apparait ainsi que l'eau évacuée du bassin versant par la Risle à Grosley, ne représente que 45% et 64% des sorties totales. Une grande partie des sorties s'effectue en souterrain.

Les résultats détaillés des éléments présentés dans le présent § 6 sont disponibles dans le rapport BRGM/RP-67480-FR (David et al., 2017).

8. Étude des facteurs déclencheurs des bétoires en rivières

Question posée à l'Observatoire :

« Quels sont les facteurs déclencheurs de l'apparition des bétoires en rivière? »

Les résultats présentés ci-dessous sont une synthèse des éléments présentés dans le rapport des volets n°2, 3, 4 et 5 : étude de l'hydrosystème Risle – Nappe de la craie (BRGM/RP-67480-FR).

L'instrumentation et le suivi de la bétoire B18262 à Ajou a permis d'étudier les facteurs déclencheurs de l'apparition de bétoires dans la vallée de la Risle. En effet, l'ouverture de la bétoire B18367 sur une berge de la Risle fin 2013 s'est produite à proximité de la bétoire B18262 et a permis de bénéficier des dispositifs de mesures en place.

Les causes de l'apparition des bétoires sont souvent le résultat d'effondrements liés à l'érosion interne des voutes instables des conduits karstiques (lorsque ceux-ci atteignent une poche d'argile ou de la craie altérée) ou à l'érosion de leur remplissage en profondeur. Une fois l'affaissement du sol initié, le phénomène peut être accentué par les eaux de la rivière qui se perdent vers la nappe. Le suivi réalisé pendant ces deux années a d'ores-et-déjà permis de distinguer 2 cas.

Cas n°1 : Ouverture des bétoires en période d'étiage, sans pluie significative

Des conditions hydrogéologiques de basses eaux couplées à des périodes sans précipitations ont été observées lors de l'ouverture des bétoires de 2005 au Val Gallerand et de 2012 à Ajou à l'origine d'assec de la Risle. En effet, la comparaison de la chronique piézométrique à L'Aigle (courbe bleu), avec les variations de débit à Ajou (courbe verte) et les précipitations à la station Météo-France des Bottereaux (courbe grise) (Illustration 35) reflète une période d'étiage, avec de faibles précipitations et des niveaux de nappe bas au moment de la formation des bétoires de 2005 et 2012.

Dans ce cas, le dessèchement progressif des terrains en profondeur entraîne une désorganisation des alluvions et donc une portance moindre. L'état de sécheresse hydrogéologique (très basses eaux dans les nappes) peut donc être un facteur aggravant en termes de connectivité de la rivière au réseau endokarstique. Il faut cependant garder à l'esprit que ces effondrements soudains font suite à une érosion lente et progressive.

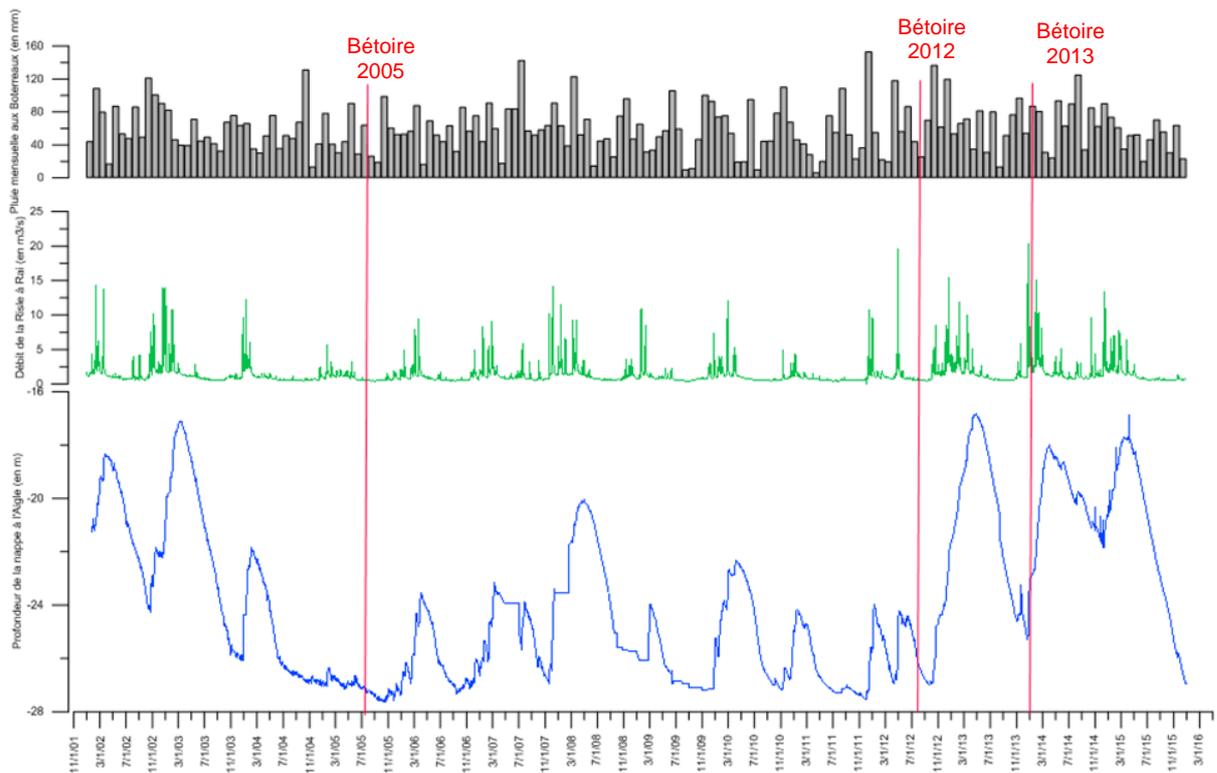


Illustration 35 : Situation hydrogéologique, hydrologique et météorologique sur le bassin versant de la Risle moyenne lors de la formation des bétoires

Cas n°2 : Ouverture des bétoires suite à une remontée de nappe, un pic de crue et de fortes pluies

Le second contexte favorable à l'ouverture de bétoire, qui a pu être identifié correspond à un contexte de fortes pluies, de pic de crue et de remontée de nappe. C'est le contexte observé lors de l'ouverture de la bétoire B18367 sur la berge à Ajou fin décembre 2013. Ici, un double phénomène est sans doute en jeu : l'apparition de cette bétoire à 1 mètre de la berge de la rivière, est vraisemblablement liée, d'une part, à un débordement de la Risle au-dessus de la berge et à un arrachement consécutif de matériaux entraînés ensuite en profondeur (Illustration 36 et Illustration 37) et, d'autre part, à la forte remontée de la nappe de la craie sur cette période (remontée de 12 mètres en quelques jours au-dessus du toit de la craie), avec la mise en eau des formations superficielles (alluvions) et un effet piston associé qui a conduit probablement à déstabiliser les formations de surface présentes au-dessus des vides karstiques (Illustration 38).

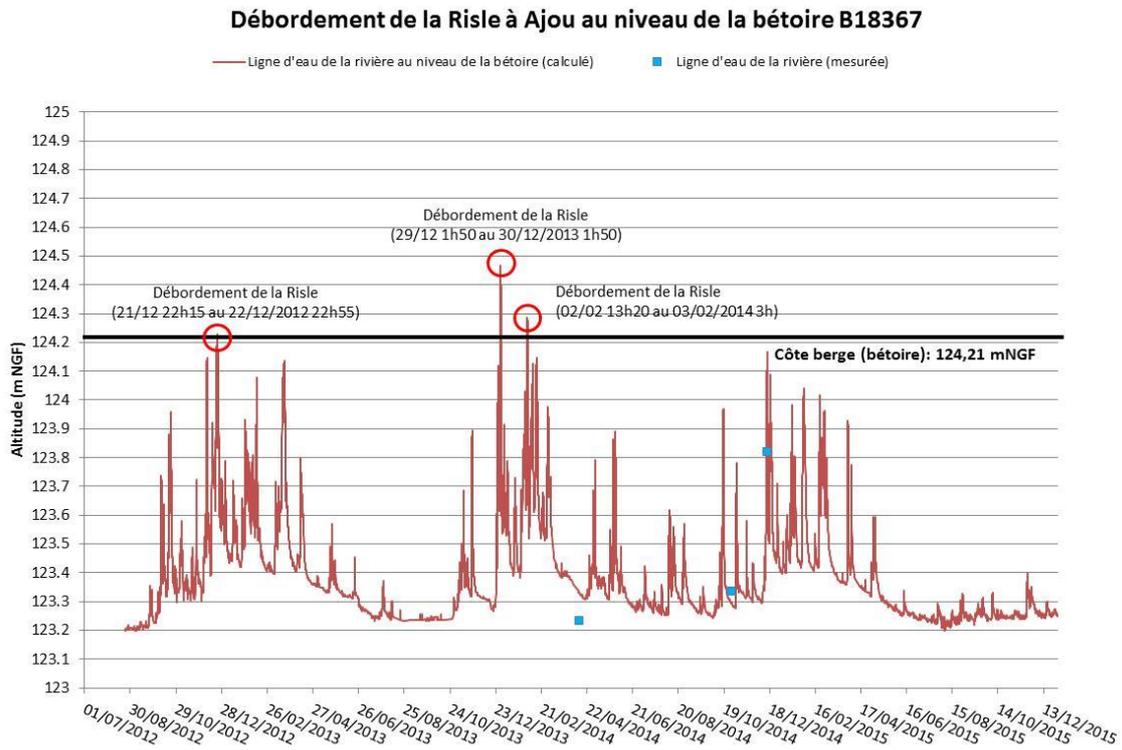


Illustration 36 : Identification des périodes de débordement de la Risle au-dessus des berges sur le site pilote de la bétoire d’Ajou

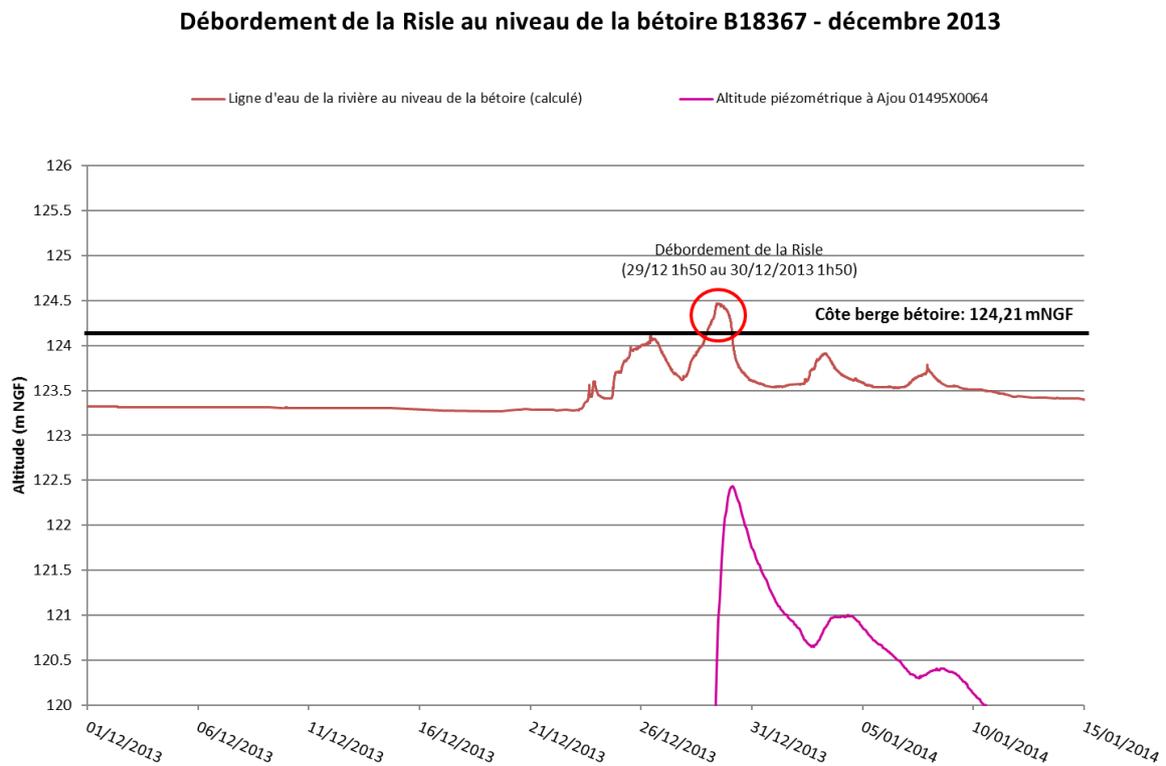


Illustration 37 : Identification des périodes de débordement de la Risle au-dessus des berges sur le site pilote de la bétoire d’Ajou – zoom sur le débordement du 29/12/2013

Variations des niveaux à Ajou sur le site bétoires (B18262 et B18367)

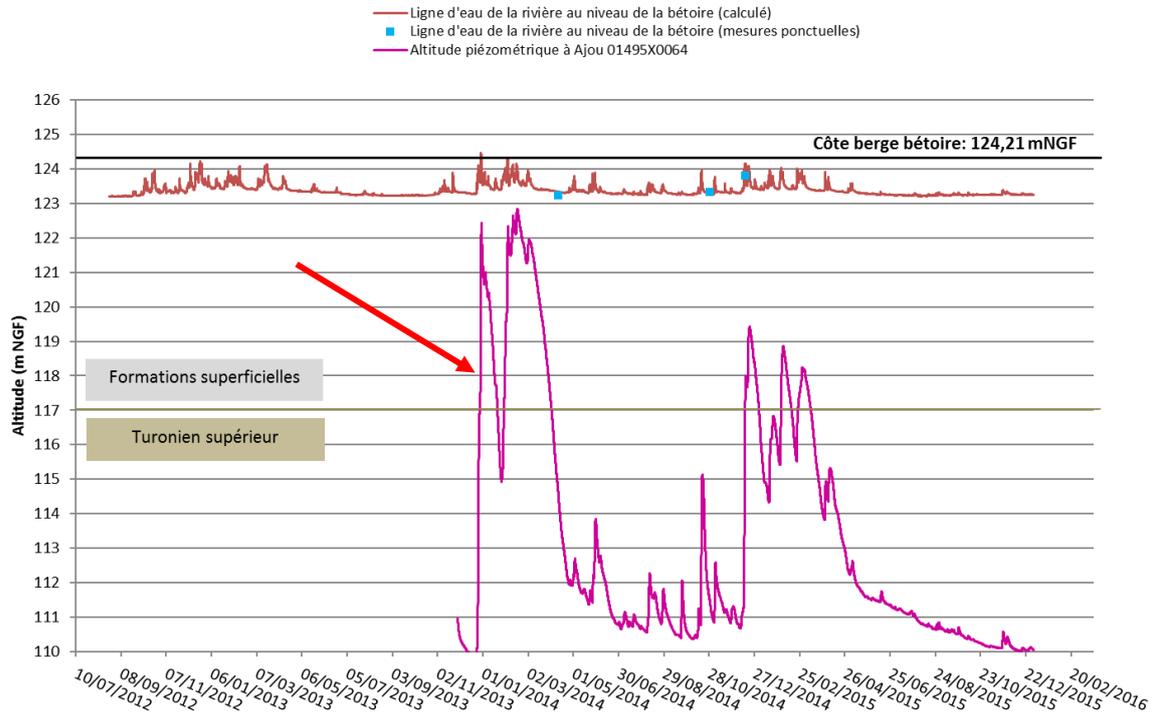


Illustration 38 : Forte remontée de la nappe de la craie (>12 m) au-dessus du toit de la craie observée au moment de l'apparition de la bétoire B18367

D'une manière générale, l'ouverture d'une bétoire se déclenche dans des conditions climatiques extrêmes, pendant des périodes de fortes pluies, par l'arrachement de matériaux entraînés en profondeur ; ou pendant des périodes d'étiage, par le dessèchement progressif des terrains en profondeur. Les facteurs d'ouverture de bétoire en rivière demeurent cependant encore insuffisamment connus et mériteraient la mise en place d'un dispositif de suivi sur de plus longues années.

9. Impact pour l'usage AEP de la ressource en eaux souterraines

Questions posées à l'Observatoire :

« Les captages AEP de la vallée sont-ils connectés au karst ? », « Quels risques pour la qualité de l'eau captée ? »

Les résultats présentés ci-dessous sont une synthèse des éléments présentés dans le rapport des volets n°2, 3, 4 et 5 : étude de l'hydrosystème Risle – Nappe de la craie (BRGM/RP-67480-FR).

Des traçages hydrogéologiques ont été réalisés en 2012 et 2015 par l'Université de Rouen afin de tester la connexion entre la béttoire d'Ajou et les captages AEP (Alimentation en Eau Potable) d'Ajou, Romilly-la-Puthenaye, Beaumont-le-Roger et Beaumontel. Aucune restitution du traceur n'a été observée sur ces captages AEP dans les conditions de réalisation. Ces résultats sont à prendre avec précaution d'une part parce que les conditions de suivi sur certains captages ne sont pas optimum du fait des contraintes d'exploitation des captages et d'autre part parce qu'un ancien traçage (dont les méthodes analytiques n'étaient pas optimum) réalisé depuis la rivière avait montré une connexion entre les eaux de la rivière et les captages AEP de la vallée de la Risle moyenne.

En effet, dans le but de vérifier la connexion éventuelle de ces quatre captages AEP aux réseaux karstiques, l'ARS les a fait équiper d'un suivi en continu de la turbidité et de la conductivité. Les résultats ont alors clairement montré qu'au moins deux des quatre captages suivis (Ajou et Romilly) sont vulnérables aux pics de turbidité et doivent donc fort probablement être connectés aux réseaux karstiques.

Enfin le schéma conceptuel d'organisation du karst de la Risle (§6) ainsi que l'analyse des transferts au sein du karst (§1) ont montré que certains bras des réseaux karstiques situés en profondeur dans la vallée de la Risle, reçoivent uniquement les eaux de surface qui s'infiltrent dans les béttoires sur les plateaux, alors que d'autres bras reçoivent en plus les eaux issues des pertes de la Risle, voire dans certains cas, les eaux des remontées de la nappe lors de périodes humides prolongées (cf. §1). Ainsi la qualité des eaux souterraines et leurs vulnérabilités peuvent être très différentes au sein de ce même réseau karstique. Cela peut avoir une implication directe sur les dispositifs à mettre en place pour la protection des captages d'eau potable, lorsque ceux-ci sont connectés au réseau karstique. C'est également vrai pour les activités piscicoles.

Afin de connaître et protéger au mieux les captages AEP de la vallée de la Risle, l'Observatoire recommande ainsi d'étendre le suivi de la turbidité à tous les captages AEP situés dans le tronçon perché de la Risle moyenne.



Illustration 39 : 4 captages AEP équipés d'un suivi turbidité et conductivité suite à l'ouverture de la bétoire de 2012 (décision ARS)

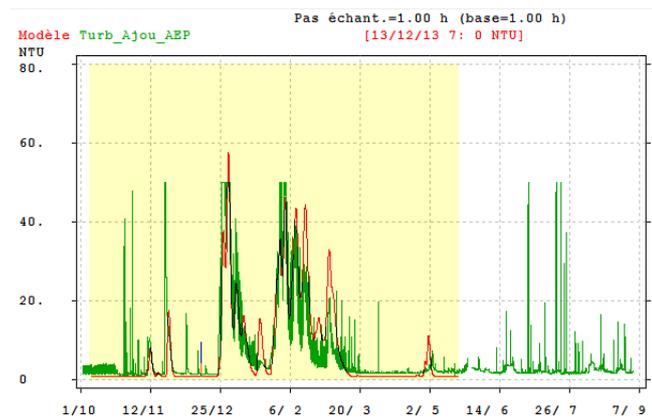


Illustration 40 : Captage AEP d'Ajou : turbidité mesurée (vert) et simulée (rouge) (modélisation réalisée par le BRGM) (figure extraite du rapport BRGM/RP-67480-FR)

10. Traitement des bétoires en rivière

Questions posées à l'Observatoire :

« Lorsqu'une bétoire s'ouvre dans la rivière, faut-il l'aménager ? La combler ? Ne rien faire ? »

Il convient d'être très prudent avant d'intervenir sur une bétoire. En effet, les aménagements de bétoires (de type comblement par exemple) peuvent créer des dysfonctionnements hydrologiques à l'échelle du bassin versant :

- baisse du débit des sources situées à la sortie du réseau karstique (sources parfois utilisées pour des usages piscicoles, eau potable,...) (cf. rapports BRGM/RP-554124-FR et BRGM/RP-58795-FR),
- baisse de la productivité de certains captages d'eau potable qui captent les réseaux karstiques (cf. rapport BRGM/RP-58795-FR),
- aggravation des inondations : les bétoires en rivière participent en effet à l'écrêtement des ondes de crue. Les combler limite leur rôle d'écrêtement des crues (cf. §5).

Les usages perdus du fait de l'assèchement de la rivière (pêche, agrément, baignade, abreuvement des troupeaux et des animaux sauvages, présence de populations piscicoles,...) pourraient appuyer le choix de la mise en place d'un dispositif étanche (type colmatage ou dérivation des flux) afin de rétablir l'écoulement de la rivière. Toutefois, les résultats de l'Observatoire ont montré que le secteur situé à l'aval d'Ajou qui connaît régulièrement les assècs n'est pas toujours le secteur où la rivière perd le plus de son débit. A certaines périodes, l'essentiel des pertes d'eau de la Risle prennent place plus en amont (cf. §5). Ainsi combler la bétoire qui reçoit le dernier filet d'eau de la rivière en été, ne permettra pas de restituer l'essentiel du débit de la rivière qui est parfois perdu beaucoup plus en amont. Par ailleurs, le lit de la Risle compte de nombreuses bétoires visibles et probablement plus encore de pertes non visibles. L'assurance de maintenir un débit minimum de la Risle en étiage nécessiterait d'intervenir également sur toutes les bétoires et pertes situées dans le lit de la rivière. Par ailleurs, la formation de bétoire est un phénomène évolutif dans le temps ; il n'est donc pas exclu que le colmatage d'une bétoire pourra être suivi de l'ouverture d'une nouvelle bétoire plus à l'aval. Il n'est ainsi pas envisageable de venir combler de façon étanche tout le lit de la rivière sur plusieurs dizaines de kilomètres.

Toutefois, lorsque les effondrements liés à la présence de bétoire sont importants (comme cela était le cas en 2012) et afin d'éviter tout risque de chute ou de noyade, il peut parfois être envisagé de mettre en place un dispositif de type massif autobloquant. Ce dispositif n'empêchera pas l'écoulement de l'eau dans la bétoire mais empêchera tout risque de chute en comblant le volume de la doline (trou) créée suite à l'effondrement. Il permettra par ailleurs de limiter l'évolution de la suffosion de la bétoire. Ce dispositif consiste à combler la bétoire de matériaux grossiers (enrochement) (cf. exemple à l'illustration 41).



Illustration 41 : Exemple d'un aménagement d'une bétoire par mise en place d'enrochements

En définitive, il apparaît que sur le tronçon « perché » entre Ambenay et Grosley-sur-Risle, la Risle a naturellement vocation à avoir un écoulement saisonnier du fait des nombreuses pertes existantes dans son lit (cf. exemples de pertes totales observées en période estivale : en 1752, 1894, carte scolaire géographique du XIX^e siècle, en 2005, en 2012, en 2016). La formation de ces bétoires est un phénomène naturel existant du fait de la déconnexion entre les niveaux de la rivière et ceux de la nappe phréatique sur ce secteur.

11. Conclusion

L'Observatoire de la Risle a été mis en place dans une approche multi partenariale et a regroupé de nombreux partenaires scientifiques : DREAL, FDPMA27, CDS27, ONEMA, Université de Rouen et BRGM. Les résultats des travaux menés par chacun de ces organismes ont été présentés dans différents rapports dont le présent rapport constitue la synthèse. Ces différents travaux ont permis de réaliser des avancées significatives dans la connaissance du fonctionnement de l'hydrosystème Risle – nappe de la craie et de son impact sur les écosystèmes. Ils ont en particulier permis de répondre aux nombreuses questions qui avaient été posées à l'Observatoire.

« Sur quel secteur la Risle est-elle perchée au-dessus de la nappe phréatique ? »

Un des objectifs de l'Observatoire était de mieux connaître le secteur de la Risle moyenne où la nappe et la rivière ne sont pas directement connectées et où la rivière est en perte. Une approche pluridisciplinaire a été mise en œuvre et a permis de répondre à ces questions ; celle-ci a consisté à croiser les résultats acquis avec différentes techniques (analyses géologiques, investigations hydrodynamiques, comparaison des niveaux de la nappe et de la Risle, recherche de données historiques sur les zones d'assec, analyse différentielle des débits de la rivière, analyse des variations de température de la rivière).

Une analyse historique a montré que ces épisodes d'assec sont observés depuis plusieurs siècles. Des cartes scolaires du 19^{ème} siècle ou même des cartes du 17^{ème}, mentionnaient la perte de la Risle au lieu-dit le Noyer-en-Ouche et représentaient la Risle comme un cours d'eau temporaire entre le Noyer-en-Ouche et La Fontaine Roger.

L'Observatoire de la Risle moyenne a permis de localiser plus précisément le secteur dans lequel la Risle et la nappe phréatique sont déconnectées : une analyse comparative des niveaux de la nappe et des rivières mesurés en 2014, montre que la déconnexion est constatée de Neaufles-Auvergny jusqu'à l'aval de Grosley-sur-Risle. Toutefois, l'analyse des variations de débits sur des campagnes de mesures datant de 1894, 2013 et 2014 montre que l'extension du tronçon de la Risle concerné par des pertes de débit peut varier dans le temps : ainsi l'amont de ce tronçon démarrait à Rugles en 1894, à Ambenay en 2013 et à Neaufles-Auvergny en 2014. Concernant le point de reconnexion nappe-Risle, il peut se situer selon les années entre l'aval du Val Gallerand et l'amont du moulin de la Bigottière à Grosley-sur-Risle. Des reconnections temporaires sont également possibles en période de hautes-eaux dans le secteur aval de la vallée de Risle moyenne où la nappe est très réactive.

L'analyse géologique a montré par ailleurs que l'existence de ce tronçon déconnecté de la Risle trouverait une explication dans la géologie ; en effet ce tronçon correspond à un secteur dont le sous-sol est composé de la craie du Turonien supérieur, bordé en amont par une faille mise en évidence dans le secteur de la confluence entre la Risle et le Sommaire. Le Turonien est observé depuis cette faille et affleure jusqu'à Beaumont-le-Roger.

Cette sectorisation a également été confirmée par l'étude des variations longitudinales des températures de la rivière. Ces profils thermiques montrent que dans le secteur où la nappe et la rivière sont déconnectées, la Risle est beaucoup plus sensible aux variations de température de l'air. Ainsi la rivière se refroidit beaucoup plus en hiver et se réchauffe beaucoup plus en été. Ce secteur déconnecté représente par ailleurs un milieu de vie naturellement dégradé car ces fluctuations thermiques peuvent conduire à des niveaux de températures parfois létales à certaines espèces, notamment en été. Ces suivis thermiques ont en revanche montré que dans

les secteurs où la nappe alimente la rivière, les températures de celle-ci restent beaucoup plus stables tout au long de l'année. En effet, la température de la nappe autour de 12°C rafraîchit la rivière en été et la réchauffe en hiver.

« Le vivant a-t-il recolonisé le tronçon qui a connu l'assec en 2012 ? En combien de temps ? »

L'ouverture de la bétoire avait fait disparaître tous les poissons sur environ 12 km en aval dans la Risle. Les inventaires piscicoles ont permis de montrer que la recolonisation du tronçon à sec a été relativement rapide : il a fallu moins d'un an pour retrouver un peuplement conforme à la station amont. Cette recolonisation s'est faite majoritairement par dérive des juvéniles depuis l'amont et par les espèces les plus mobiles et les plus abondantes comme la chevaine, le goujon, la loche franche, le vairon, la vandoise et le gardon. La reconquête a été plus difficile pour les espèces dont les effectifs sont plus réduits comme la truite, le brochet, la perche, et l'anguille ou moins mobile comme le chabot.

Les macroinvertébrés (petits animaux vivant au fond de la rivière, sur et dans les sédiments) ont rapidement reconquis la zone asséchée avec une densité globale identique aux situations amont et aval. Les peuplements sont restés très stables en composition, seules les proportions relatives de chaque taxon par rapport aux autres changent. Après deux ans, dans la zone ayant connu l'assec, la diversité (indice de shannon-weaver) et l'équilibre entre les taxons polluo-sensibles et polluo-tolérants (indice d'équilibre abondance) n'ont pas encore tout-à-fait atteint le niveau affiché dans les stations amont et aval. Comme pour les poissons, la recolonisation s'est faite essentiellement par dérive sur un temps relativement court, mais un peu moins rapide que pour les poissons.

« Sur quel secteur la Risle perd elle le plus de débit ? » « Est-ce toujours au même endroit ? »

Une analyse fine des variations de débit le long de la Risle moyenne a mis en évidence que la répartition des pertes variait dans le temps et dans l'espace. En octobre 2014 ou en 1894 par exemple, 70% environ du débit perdu sur la Risle moyenne l'a été entre Ambenay et Ajou, alors qu'en avril 2014, 68% du débit était perdu plus en aval, entre Ajou et Grosley.

Ainsi, le secteur situé à l'aval d'Ajou qui connaît régulièrement les assecs n'est pas toujours le secteur où la rivière perd le plus de son débit. A certaines périodes, l'essentiel des pertes d'eau de la Risle prennent place plus en amont.

Pour aller plus loin dans la compréhension des variations des pertes de débits de cette rivière, le BRGM a réalisé une modélisation des échanges latéraux entre deux stations hydrométriques du cours d'eau afin de mieux comprendre les interactions surface-souterrain. Cette modélisation a confirmé la forte variabilité temporelle et spatiale des pertes le long de la Risle moyenne. Elle a également montré que la variabilité temporelle des pertes est d'une part expliquée par la connectivité de la rivière à l'aquifère karstique (i.e. activité des bétoires), mais qu'elle était d'autre part corrélée au débit de la rivière. Ainsi des pertes vers le karst atteignant jusqu'à 7 m³/s ont pu être estimées par le modèle lors de l'épisode de crue de décembre 2013 sur le tronçon compris entre Ajou et Grosley-sur-Risle. De plus, la comparaison de ces simulations avec la piézométrie mesurée à proximité du tronçon montre une bonne cohérence entre la dynamique des pertes et la recharge de l'aquifère. Sur la base des simulations, on suppose que le karst joue le rôle d'atténuation des pics de crues, réduisant alors le risque d'inondation tant que l'aquifère est suffisamment désaturé.

« A quoi ressemble le karst de la Risle : y-a-t-il de gros vides dans le sous-sol ? »

Afin de tenter de connaître la géométrie de ces vides karstiques, les spéléologues sont descendus dans les puits de la région pour tenter d'observer directement ces vides. Malheureusement les difficultés d'accès ne leur ont pas permis d'observer directement ces conduits. Des observations indirectes ont en revanche été menées par l'Université de Rouen (investigations géophysiques) et le BRGM (analyses des vides rencontrés par forages).

Les résultats de ces travaux ont montré que :

- plusieurs niveaux de conduits (vides) karstiques étaient présents, en particulier dans la vallée sous la rivière (étagement des drains karstiques),
- des conduits parfois métriques ont été observés au droit de certains forages, mais les dimensions peuvent être variables,
- des indices de vides sont observés à plusieurs endroits dans les zones saturées (nappe phréatique) et non-saturées (au-dessus du niveau de la nappe).

Même s'il n'est pas possible d'observer directement ces vides, une estimation de leur importance a été tentée par calcul indirect ; la surface ainsi cumulée de la section des vides souterrains, par lesquels l'eau de Risle a transité d'Ajou à Grosley en 2012, est estimée entre 12 et 17m² (estimation sous toute réserve). Une telle surface correspondrait à un conduit d'environ 2 mètres de rayon ; dans la réalité, il ne s'agit vraisemblablement pas d'un conduit unique, mais plus probablement d'un réseau de conduits plus ou moins connectés.

Un schéma d'organisation de ces vides ou conduits de l'amont vers l'aval a été proposé par le groupe de travail de l'Observatoire. Ce schéma a par la suite été confirmé et complété par les mesures en continu de la conductivité de la nappe.

« Comment fonctionne cet hydrosystème ? », « Quelles sont les dynamiques des transferts de masse, de pression au sein de l'aquifère ? », « Quelles quantités d'eau circulent en souterrain ? »

L'examen des chroniques de débit, piézométrie, température, conductivité, turbidité et nitrate dans le secteur Ajou-Fontaine Roger, par des analyses corrélatoires et spectrales (logiciel TEMPO) a permis de mieux caractériser les échanges eaux de surface / eaux souterraines et les transferts au sein du karst.

Les résultats de ces analyses ont montré que certains bras des réseaux karstiques situés en profondeur dans la vallée de la Risle, reçoivent uniquement les eaux de surface qui s'infiltrent dans les bétoires sur les plateaux, alors que d'autres bras reçoivent en plus les eaux issues des pertes de la Risle, voire dans certains cas, les eaux des remontées de la nappe lors de périodes humides prolongées. Ainsi la qualité des eaux souterraines et leurs vulnérabilités peuvent être très différentes au sein de ce même réseau karstique. Cela peut avoir une implication directe sur la protection des captages d'eau potable, lorsque ceux-ci sont connectés au réseau karstique. C'est également vrai pour les activités piscicoles.

L'étude du transfert au sein de l'aquifère entre la zone de pertes de la Bétoire d'Ajou (01495X0063) et le principal exutoire (source Fontaine Roger - 01491X0016) a ensuite pu être menée à l'aide des chroniques de température et de conductivité des eaux, le débit de cette source n'étant pas suivi en continu. Les dynamiques d'évolution mesurées à l'exutoire apparaissent très comparables à celles mesurées en entrée, les amplitudes des températures et de la conductivité apparaissent néanmoins plus faibles. Ces résultats ont confirmé les essais de

traçages réalisés par l'Université de Rouen. A partir des analyses fonctionnelles, il a ensuite été tenté d'établir un schéma conceptuel de représentation du fonctionnement du karst et d'essayer de comprendre comment l'eau de l'exutoire pourrait être expliquée par le mélange d'eau de diverses composantes qualifiées au sein de l'aquifère. Les résultats de ces analyses du signal indiquent que les composantes d'écoulement liées aux pertes semblent globalement expliquer près de 65% de la variance totale observée à l'exutoire, les 35 % restants sont attribués à la composante inertielle des plateaux qui apparaît ici plus minéralisée que l'eau des pertes de la Risle.

Enfin, des modélisations globales réalisées à l'aide du logiciel GARDENIA ont permis d'estimer les composantes (lente et rapide) des débits de la Risle aux différentes stations, de réaliser des bilans quantitatifs et d'estimer les flux souterrains, notamment karstiques, dans la vallée de la Risle. Ainsi il apparaît que l'eau évacuée du bassin versant par la rivière Risle à Grosley, ne représente que 45% et 64% des sorties totales. Une grande partie des sorties s'effectue en souterrain. Les flux karstiques souterrains estimés par modélisation, varieraient à Grosley selon le cycle étudié entre 1,2m³/s à 3,3 m³/s. Il s'agit de valeurs tout à fait réalistes ; pour mémoire, le débit des résurgences de ce système karstique situées à Beaumont-le-Roger (dans les vallées de la Risle et de la Bave) ont été estimées par jaugeage à un peu plus de 2m³/s en 2014.

« *Quels sont les facteurs déclencheurs de l'apparition des bétoires en rivière?* »

Les causes de l'apparition des bétoires sont souvent le résultat d'effondrements liés à l'érosion interne des voutes instables des conduits karstiques (lorsque ceux-ci atteignent une poche d'argile ou de la craie altérée) ou à l'érosion de leur remplissage en profondeur. Une fois l'affaissement du sol initié, le phénomène peut être accentué par les eaux de la rivière qui se perdent vers la nappe. Le suivi réalisé pendant ces deux années a d'ores-et-déjà permis de distinguer 2 cas :

- cas n°1 : ouverture des bétoires en rivière période d'étiage sans pluie significative (cas des bétoires ayant provoqué les assècs en 2005 au Val Galerand et en 2012 à Ajou). Dans ce cas, le dessèchement progressif des terrains en profondeur entraîne une désorganisation des alluvions et donc une portance moindre. L'état de sécheresse hydrogéologique (très basses eaux dans les nappes) peut donc être un facteur aggravant en termes de connectivité de la rivière au réseau endokarstique. Il faut cependant garder à l'esprit que ces effondrements soudains font suite à une érosion lente et progressive.
- cas n°2 : ouverture des bétoires après de fortes pluies, pic de crue et remontée de nappe (cas de la bétoire ouverte sur la berge à Ajou fin décembre 2013 à proximité de la bétoire de 2012). Ici, un double phénomène est sans doute en jeu : l'apparition de cette bétoire à 1 mètre de la berge de la rivière, est vraisemblablement liée, d'une part, à un débordement de la Risle au-dessus de la berge et à un arrachement consécutif de matériaux entraînés ensuite en profondeur et, d'autre part, à la forte remontée de la nappe de la craie sur cette période (remontée de 12 mètres en quelques jours au-dessus du toit de la craie), avec la mise en eau des formations superficielles (alluvions) et un effet piston associé qui a conduit à déstabiliser les formations de surface présentes au-dessus des vides karstiques.

« Les captages AEP de la vallée sont-ils connectés au karst ? », « Quels risques pour la qualité de l'eau captée ? »

Des traçages hydrogéologiques ont été réalisés en 2012 et 2015 par l'Université de Rouen afin de tester la connexion entre la bétoire d'Ajou et les captages AEP (Alimentation en Eau Potable) d'Ajou, Romilly-la-Puthenaye, Beaumont-le-Roger et Beaumontel. Aucune restitution du traceur n'a été observée sur ces captages AEP dans les conditions de réalisation. Ces résultats sont à prendre avec précaution d'une part parce que les conditions de suivi sur certains captages ne sont pas optimum du fait des contraintes d'exploitation des captages et d'autre part parce qu'un ancien traçage (dont les méthodes analytiques n'étaient optimum) réalisé depuis la rivière avait montré une connexion entre les eaux de la rivière et les captages AEP de la vallée de la Risle médiane.

En effet, dans le but de vérifier la connexion éventuelle de ces quatre captages AEP aux réseaux karstiques, l'ARS les a fait équiper d'un suivi en continu de la turbidité et de la conductivité. Les résultats ont alors clairement montré qu'au moins deux des quatre captages suivis (Ajou et Romilly) sont vulnérables aux pics de turbidité et donc doivent fort probablement être connectés aux réseaux karstiques.

L'Observatoire a montré que la qualité des eaux souterraines dans les réseaux karstiques peut différer au sein de ce même réseau karstique. En effet, certains bras des réseaux karstiques reçoivent uniquement les eaux de surface qui s'infiltrent dans les bétoires sur les plateaux, alors que d'autres bras reçoivent en plus les eaux issues des pertes de la Risle. Cela peut avoir une implication directe sur la protection des captages d'eau potable.

Afin de connaître et protéger au mieux les captages AEP de la vallée de la Risle, l'Observatoire recommande ainsi d'étendre le suivi de la turbidité à tous les captages AEP situés dans le tronçon perché de la Risle médiane.

« Lorsqu'une bétoire s'ouvre dans la rivière, faut-il l'aménager ? La combler ? Ne rien faire ? »

Il convient d'être très prudent avant d'intervenir sur une bétoire. En effet, les aménagements de bétoires (de type comblement par exemple) peuvent créer des dysfonctionnements hydrologiques à l'échelle du bassin versant :

- baisse du débit des sources situées à la sortie du réseau karstique (sources parfois utilisées pour des usages piscicoles, eau potable,...),
- baisse de la productivité de certains captages d'eau potable qui captent les réseaux karstiques,
- aggravation des inondations : les bétoires en rivière participent en effet à l'écrêtement des ondes de crue. Les combler limite leur rôle d'écrêtement des crues.

Les usages perdus du fait de l'assèchement de la rivière (pêche, agrément, baignade, abreuvement des troupeaux et des animaux sauvages, présence de populations piscicoles,) pourraient appuyer le choix de la mise en place d'un dispositif étanche (type colmatage ou dérivation des flux) afin de rétablir l'écoulement de la rivière. Toutefois, les résultats de l'Observatoire ont montré que le secteur situé à l'aval d'Ajou qui connaît régulièrement les assecs n'est pas toujours le secteur où la rivière perd le plus de son débit. A certaines périodes, l'essentiel des pertes d'eau de la Risle prennent place plus en amont. Ainsi combler la bétoire qui reçoit le dernier filet d'eau de la rivière en été, ne permettra pas de restituer l'essentiel du débit de la rivière qui est parfois perdu beaucoup plus en amont. Par ailleurs, le lit de la Risle compte de nombreuses bétoires

visibles et probablement plus encore de pertes non visibles. L'assurance de maintenir un débit minimum de la Risle en étiage nécessiterait d'intervenir également sur toutes les bétoires et pertes situées dans le lit de la rivière. Par ailleurs, la formation de bétoire est un phénomène évolutif dans le temps ; il n'est donc pas exclu que le colmatage d'une bétoire pourra être suivi de l'ouverture d'une nouvelle bétoire plus à l'aval. Il n'est ainsi pas envisageable de venir combler de façon étanche tout le lit de la rivière sur plusieurs dizaines de kilomètres.

Toutefois, lorsque les effondrements liés à la présence de bétoires sont importants (comme cela était le cas en 2012) et afin d'éviter tout risque de chute ou de noyade, il peut parfois être envisagé de mettre en place un dispositif de type massif autobloquant. Ce dispositif n'empêchera pas l'écoulement de l'eau dans la bétoire mais empêchera tout risque de chute en comblant le volume de la doline (trou) créée suite à l'effondrement. Il permettra par ailleurs de limiter l'évolution de la suffosion de la bétoire. Ce dispositif consiste à combler la bétoire de matériaux grossiers (enrochement).

En définitive, il apparaît que sur le tronçon perché entre Ambenay et Grosley-sur-Risle, la Risle a naturellement vocation à avoir un écoulement saisonnier du fait des nombreuses pertes existantes dans son lit (cf. exemples de pertes totales observées en période estivale : en 1752, 1894, carte scolaire géographique du XIX^e siècle, en 2005, en 2012, en 2016). La formation de ces bétoires est un phénomène naturel existant du fait de la déconnexion entre les niveaux de la rivière et ceux de la nappe phréatique sur ce secteur.

12. Bibliographie

12.1. RAPPORT PRODUITS DANS LE CADRE DE L'OBSERVATOIRE

CDS27, 2015. Contribution à l'observatoire de la Risle – Bilan de la prospection et des explorations d'ouvrages – Comité départementale de spéléologie de l'Eure

David P.-Y., 2018. Observatoire de la Risle moyenne – Synthèse. Rapport final. BRGM/RP-67677-FR

David P.-Y., Charlier J.-B., Ladouche B., Cary L., Pennequin D., Meire B., Schaefer I., Hugot V., 2017. Observatoire de la Risle moyenne – Volets n°2, 3, 4 et 5 : Etude de l'hydro-système Risle-Nappe de la craie. Rapport final. BRGM/RP-67480-FR

DREAL, 2015. Suivi hydrobiologique de la Risle – Rapport d'interprétation des résultats. Rédacteur : Davy Le Tinevez – DREAL SRE/BEMA/LHBIO

DREAL, 2016. Observatoire de la Risle – Données quantitatives des eaux superficielles. Rédacteur : Stephane Helouin – DREAL Service Ressources Naturelles / B2HPC

FDAAPPMA27, 2015. Inventaires piscicoles – Observatoires de la bétouille de la Risle – 2013 & 2014. 38p. Barault A. Sanson G.

Fournier M., 2015. Apport d'une campagne de multitraçage artificiel à la connaissance des relations surface-souterrain sur la Risle moyenne- Université de Rouen – M2C UMR CNRS 6143 – décembre 2015.

Meire B., David P.Y., 2017. Observatoire de la Risle moyenne – volet 1 : synthèse géologique et structurale Rapport final. BRGM/RP-66861-FR, 81 p., 27 ill., 1 tabl., 2 ann.

Niepceron F., 2013. Prospections géophysiques sur le cours moyen de la Risle – Mémoire de stage de Master 2 Sciences des Environnements Continentaux et Côtiers. Spécialités ESEB. Tuteur Universitaire : Abderrahim Jardani

ONEMA, 2015. Suivi ponctuel de la végétation aquatique – Observatoire de la Risle Moyenne – Rapport d'étude. Auteurs : Cyrille Cantayre (ONEMA-SD27) et Camille Rivière (ONEMA-DIR1)

12.2. AUTRES RAPPORTS

ARNAUD L. (2005) – Pertes de la Risle au lieu-dit « Le Val Gallerand » – Commune de Grosley-sur-Risle (Eure). Avis hydrogéologique du brgm. – Rapport BRGM/RP-54124-FR. Septembre 2005, 25 p., 3 fig., 4 ph

Charlier J.-B., David P.-Y., Lanini S. et Desprats J.-F. (2015a) – Appui au SCHAPI 2015 – Module 1 - Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues des bassins normands de l'Iton et de l'Orbiquet. Rapport final. BRGM/RP-65570-FR, 84p.

Charlier J.-B., Moussa R., Bailly-Comte V., Danneville L., Desprats J.-F., Ladouche B., and Marchandise A. (2015b). Use of a flood-routing model to assess lateral flows in a karstic stream:

implications to the hydrogeological functioning of the Grands Causses area (Tarn River, Southern France), *Environmental Earth Sciences*, 74: 7605–7616, DOI 10.1007/s12665-015-4704-0.

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, 4^e trim.

DAVID P.-Y., MOISAN J., NACHBAUR A., DORFLIGER N. (2010) – Aménagement des bétoires en Haute-Normandie – Etat de l'art et préconisations de bonnes pratiques – Rapport final. BRGM/RP-58795-FR, 218 p., 39 ill., 10 ann.

DAVID P.-Y., EQUILBREY E. (2012) – Perte totale de la Risle, commune de LA HOUSSAYE, Avis hydrogéologique du BRGM, Rapport final. Rapport BRGM/RP-61446-FR. 96 p., 42 ill., 7 ann.

DAVID P.-Y. (2013) – Dossier de déclaration pour la réalisation de 2 piézomètres à Ajou (27) (rubrique 1.1.1.0 du décret n° 93-743- du 29 mars 1993 modifié). Rapport final. BRGM/RP-62605-FR, 38 p., 6 ill., 2 ann.

DE LA QUERIERE Ph., SOURIMANT J.C. (1993) – Implantation d'un forage d'alimentation en eau potable dans la vallée de la Risle – BRGM 93HNO043 – Juin 1993

FERRAY R. (1894) – Rapport – L'Eure souterraine – Tome IV – 1894

FOURNIER M. (2012) – Engouffrement de la Risle – NOTE DE SYNTHESE – 08/08/2012

GALMOT H., FOUUCU R. (XIX^{ème} siècle) – Carte physique, agricole et industrielle du département de l'Eure

GUETTARD J.-E. (1758) – Mémoire sur plusieurs Rivières de Normandie, qui entrent en terre et qui reparoissent ensuite, et sur quelques autres de la France, in *Mémoires de l'Académie des Sciences* (1758), pp. 271-317

Hayami S. (1951). On the propagation of flood waves. *Disaster Prevention Research Institute Bulletin* 1–16.

Helouin S., (2016). Observatoire de la Risle. Données quantitatives des eaux superficielles. Rapport du Service Ressources Naturelles. Bureau Hydrologie Hydrométrie et Prévision des crues du 25/04/2016

HYDROEXPERT (1998) – Expériences de traçage sur le territoire de l'ASAD de la Risle amont – Rapport – juin 1998

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 – BRGM/RP-59301-FR - 102 p., 51 ill., 2 ann., 1 CD.

S. Lanini, Y. Caballero, J.-J. Seguin, J.-C. Maréchal (2015). ESPERE, a multiple-method Microsoft Excel application for estimating aquifer recharge. *Groundwater*.

Moussa R. (1996). Analytical Hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow. *Hydrological Processes*:10, 1209–1227.

Moussa R., Bocquillon C. (1996). Algorithms for solving the diffusive wave flood routing equation. *Hydrological Processes* :10, 105–123.

RODET J. (1981) – Contribution à l'étude du karst de la craie : l'exemple normand et quelques comparaisons. Thèse de 3^{ème} cycle, Institut géographie, Université Paris I « Pantheon – Sorbonne » 427 p

RODET J. (1981) – Les percées hydrogéologiques de ka craie en Haute-Normandie – janvier 1981

SAGE de la Risle (2005) – Etat des Lieux I « Caractéristiques générales du bassin versant » – Décembre 2007

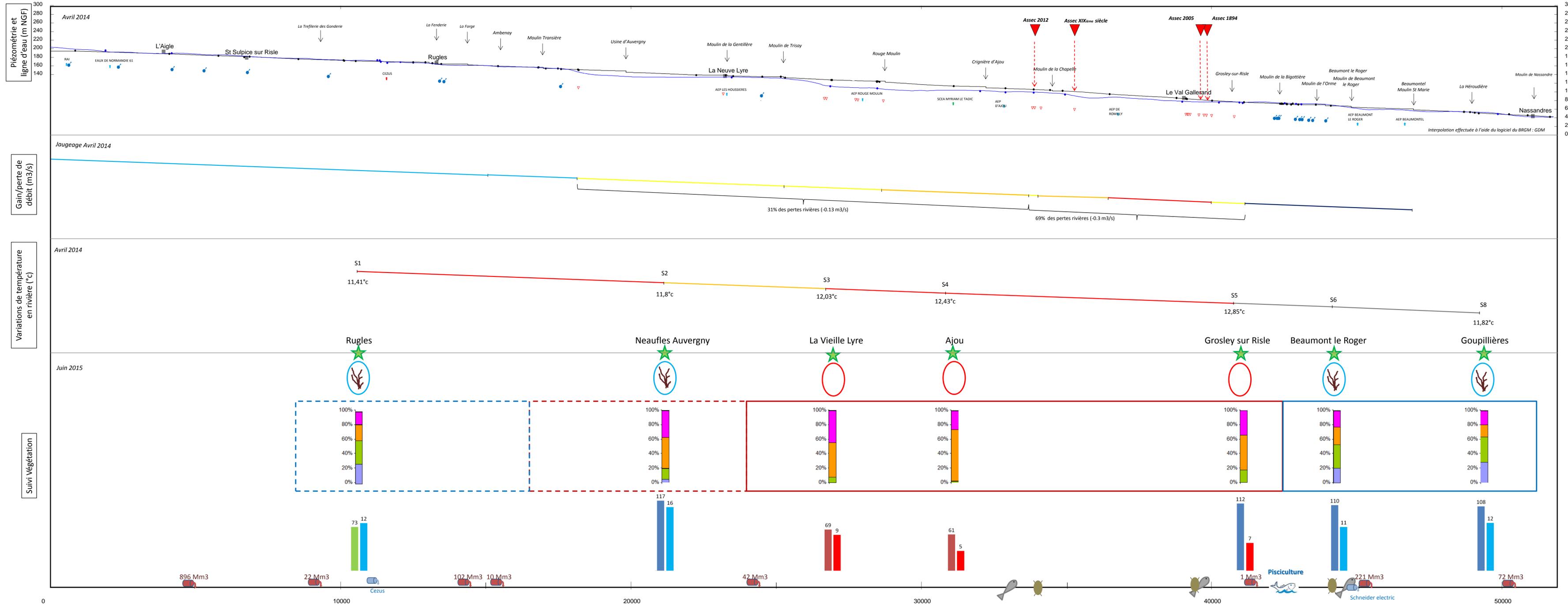
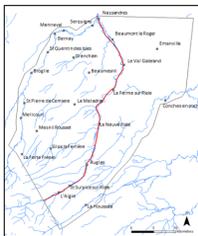
SAGE de la Risle (2005) – Etat des Lieux II «L'eau et les milieux naturels et aquatiques » – Novembre 2005

Todini E. (1996). The ARNO rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*:175, 339-382.

13. Annexes

13.1. ANNEXE 1 : COUPE LONGITUDINALE DE SYNTHÈSE : IDENTIFICATION DES ZONES DE CONNEXION/DECONNEXION DE LA NAPPE ET DE LA RIVIÈRE EN PÉRIODE DE HAUTES-EAUX

Coupe longitudinale de la Risle Moyenne – Identification des zones de connexion/déconnexion de la nappe et de la rivière en période de hautes eaux



LEGENDE

- Puits/forage mesuré
- Interpolation niveau piézométrique de la nappe (m NGF)
- Point de mesure : ligne d'eau
- Interpolation ligne d'eau de la Risle (m NGF)
- Commune
- Bétoire
- Source
- Prélèvement industriel
- Prélèvement agricole
- Prélèvement eau potable
- Indicateurs connexion nappe/rivière
- Indicateurs zone intermédiaire
- Indicateurs déconnexion nappe/rivière

Jaugeages (gain/perte de débit en m3/s)

- 3 à 1
- 1 à 0,07
- 0,07 à -0,07
- 0,07 à -0,15
- 0,15 à -0,85

Variations des températures en rivière (°C)

- 0,5 à -0,1
- 3 à -0,5
- 0,1 à 0,3
- 0,3 à 0,5
- 0,5 à 0,6
- 0,6 à 0,9
- Pas de mesure

Sondes thermiques en rivière

- Présence d'algues rouges (indicateur eaux « froides »)
- Absence d'algues rouges (indicateur eaux « chaudes »)

Part des végétaux indicateurs de la trophie de l'habitat

- ru eutrophe
- riv. eutrophe
- mesotrophe
- oligotrophe
- Ensemble mésotrophe
- Ensemble eutrophe

Végétalisation

- Recouvrement végétal (%)
- Richesse spécifique de la station (indice)

Principaux rejets

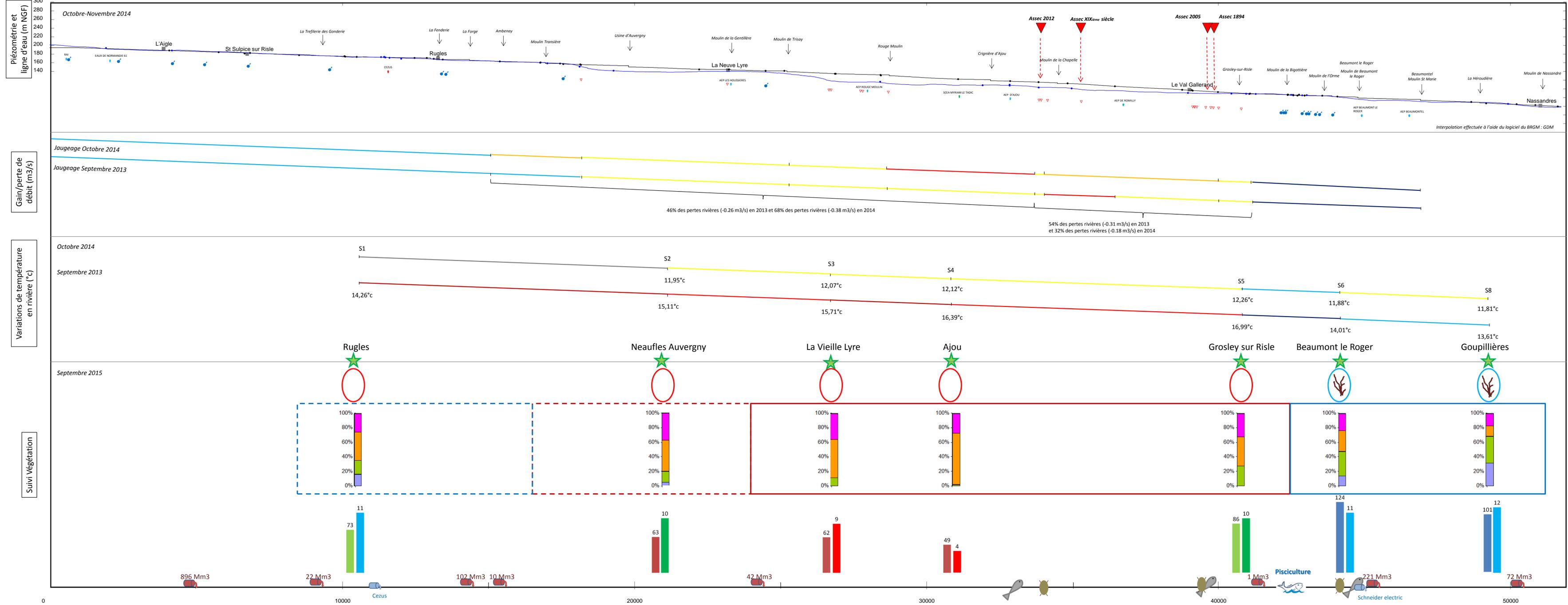
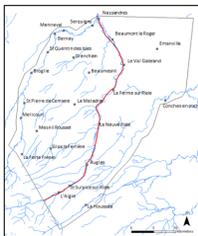
- STEP (volume rejeté 2014)
- Rejets industriels
- Pisciculture

Sites de suivi Biologique

- Macroinvertébrés
- Piscicole

13.2. ANNEXE 2 : COUPE LONGITUDINALE DE SYNTHESE : IDENTIFICATION DES ZONES DE CONNEXION/DECONNEXION DE LA NAPPE ET DE LA RIVIERE EN PERIODE DE BASSES-EAUX

Coupe longitudinale de la Risle Moyenne – Identification des zones de connexion/déconnexion de la nappe et de la rivière en période de basses eaux



LEGENDE

- Puits/forage mesuré
- Interpolation niveau piézométrique de la nappe (m NGF)
- Point de mesure : ligne d'eau
- Interpolation ligne d'eau de la Risle (m NGF)
- Commune
- ▽ Bétoire
- Source
- Prélèvement industriel
- Prélèvement agricole
- Prélèvement eau potable
- Indicateurs connexion nappe/rivière
- Indicateurs zone intermédiaire
- Indicateurs déconnexion nappe/rivière

Jaugeages (gain/perte de débit en m3/s)

- 3 à 1
- 1 à 0,07
- 0,07 à -0,07
- 0,07 à -0,15
- 0,15 à -0,85

Variations des températures en rivière (°C)

- 0,5 à -0,1
- 3 à -0,5
- 0,1 à 0,3
- 0,3 à 0,5
- 0,5 à 0,6
- 0,6 à 0,9
- Pas de mesure

Part des végétaux indicateurs de la trophie de l'habitat

- ru eutrophe
- riv eutrophe
- mesotrophe
- oligotrophe
- Ensemble mésotrophe
- Ensemble eutrophe

Végétalisation

- Recouvrement végétal (%)
- Richesse spécifique de la station (indice)

Principaux rejets

- STEP (volume rejeté 2014)
- Rejets industriels
- Pisciculture

Sites de suivi Biologique

- Macroinvertébrés
- Piscicole



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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 Normandie

Parc de la Vatinee

14, route d'Houpeville

76130 – Mont Saint Aignan – France

Tél. : 02 35 60 12 00