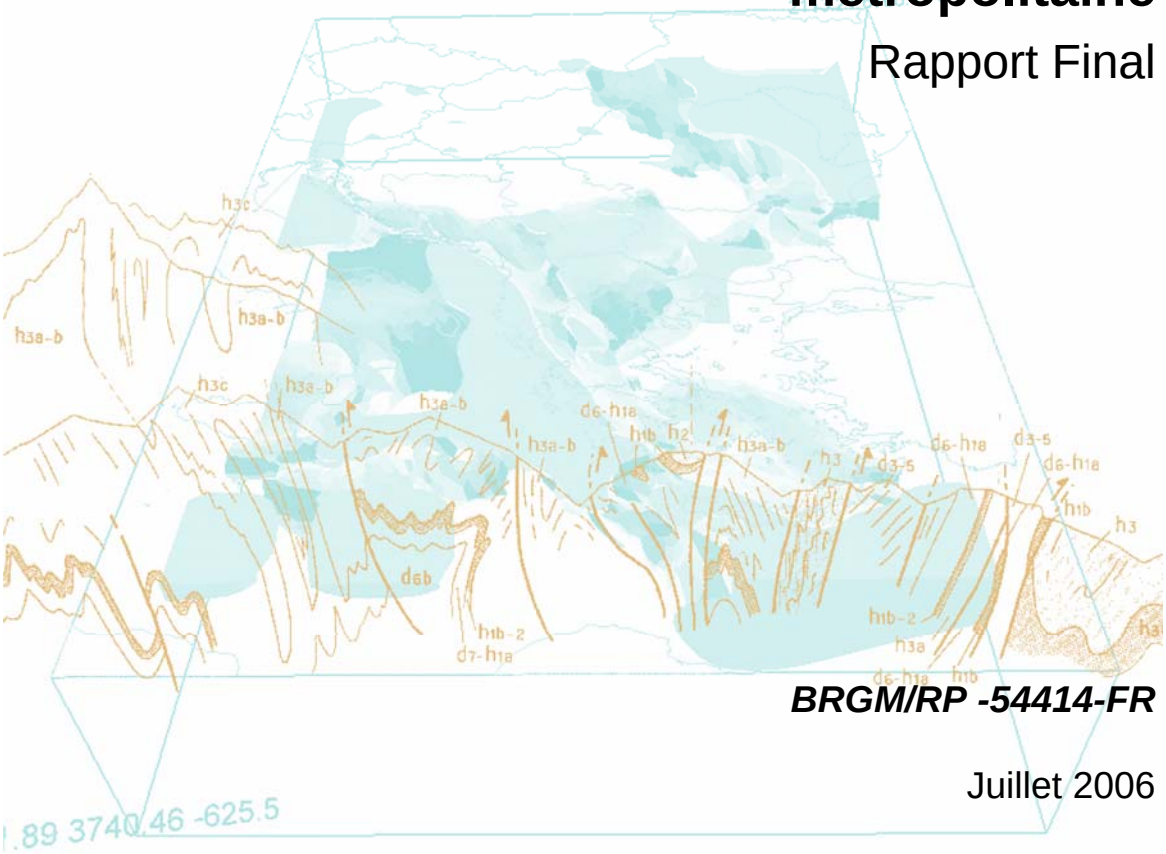
Atlas des remontées de nappes en France métropolitaine

Rapport Final



BRGM/RP -54414-FR

Juillet 2006

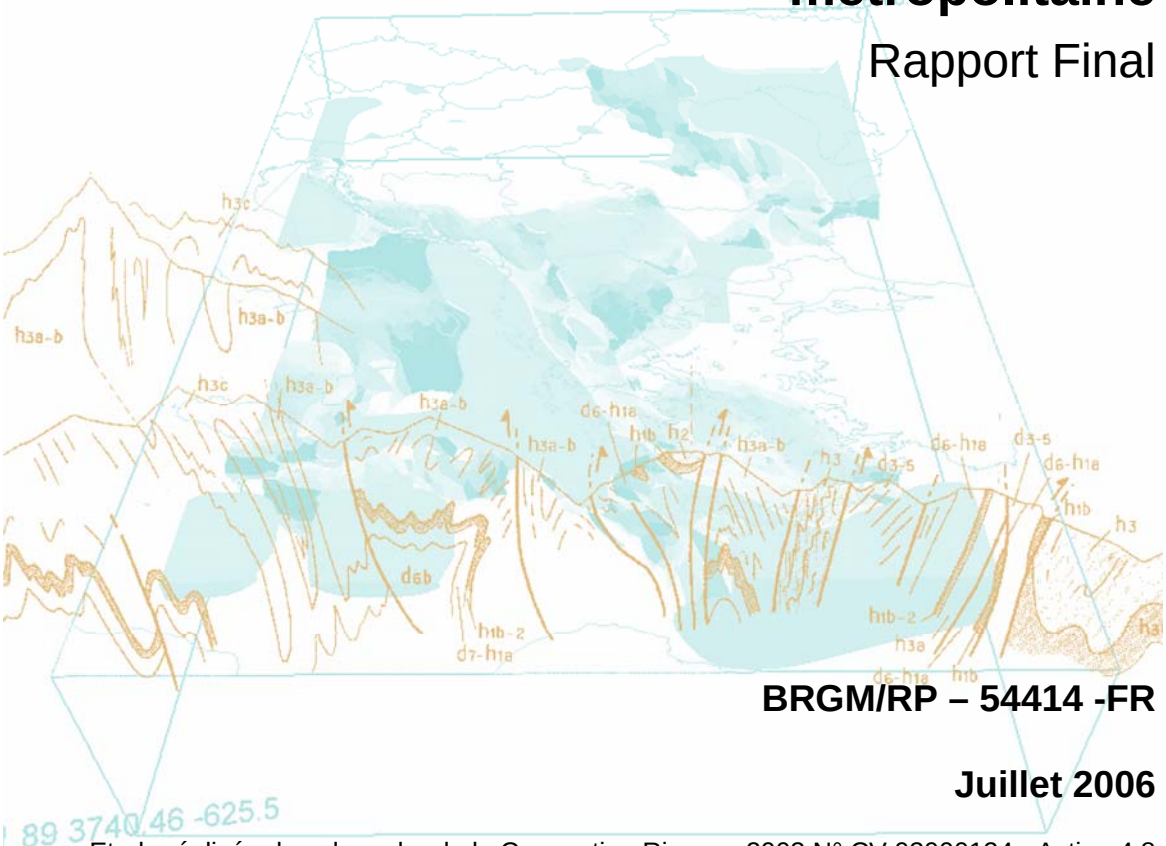
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Atlas des remontées de nappes en France métropolitaine

Rapport Final



BRGM/RP – 54414 -FR

Juillet 2006

Etude réalisée dans le cadre de la Convention Risques 2003 N° CV 03000124 - Action 4.8 "Remontées de Nappes"

Machard de Gramont H., Mardhel V.,
avec la collaboration de Caous J.Y., Arnaud L., Chabart M., Lamotte C., Martin J.C.,
Nguyen-The D., Noël Y., Seguin J.J., Vernoux J.F.

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Introduction

A la suite des inondations par remontées de nappe qui ont eu lieu en 2001 en particulier dans le nord de la France, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques) a confié au BRGM une étude dont l'objectif principal était de localiser les secteurs de France métropolitaine qui pourraient être menacés par un tel phénomène.

L'Etude a été réalisée par le Service EAU du BRGM dans le cadre de la Convention « Risques » 2003, n° CV 03000124 – Action 4.8 « Remontées de Nappes ». En raisons de retards dans le processus de validation de la méthode, l'échéance normale de l'étude a été prolongée jusqu'au 31 juillet 2006.

Les objectifs de l'étude comprennent :

1. la cartographie départementale de la sensibilité aux remontées de nappes dans le domaine sédimentaire non plissé du territoire métropolitain ; la cartographie demandée devait être disponible à deux échelles : au 1/1000 000ème de façon à permettre de saisir l'ampleur du phénomène sur l'intégralité du territoire métropolitain, et à une échelle maximale du 1/50 000ème de façon à le rendre utilisable au niveau d'une commune ou un groupe de communes ; la validation par les DIREN et les services régionaux du BRGM était demandée ;

2. La recherche d'une méthode permettant d'aller plus dans le détail, de façon à disposer d'un outil pour réaliser des Plans de Préventions de Risque Inondation par Remontée de nappes, à l'instar de ce qui se fait pour les crues de ruissellement ;

3. la recherche d'une méthodologie adaptée à la détermination de cette sensibilité dans les secteurs de socle ; un essai de cartographie de sensibilité des secteurs de socle de France métropolitaine ;

4. la réalisation d'un site web sur les remontées de nappes, comprenant la mise à disposition pour le public des cartes de sensibilité, en conformité avec les principes de contenu et de présentation définis pour l'ensemble des sites web à thématique « risque » confiés par le MEDD au BRGM ;

5. des propositions de systèmes d'alerte pour concernant ce phénomène, assorties de conseils au public sur les précautions à prendre, de façon préventive ou lors de l'occurrence de cet aléa.

Synthèse

Le présent rapport est divisé en huit chapitres :

- 1. Un rappel de la méthodologie utilisée pour définir la sensibilité en domaine sédimentaire ;
- 2. Les conditions de validation de cette partie de l'étude, et ses difficultés ; les textes de validation eux-mêmes sont intégrés aux annexes de cartographie départementale pour le domaine sédimentaire (Annexe 1) ;
- 3. La méthodologie utilisée pour définir la sensibilité en domaine de socle ;
- 4. La description du site internet et de ses fonctionnalités ;
- 5. Un chapitre sur la typologie des fluctuations des nappes en France, en particulier dans les secteurs de remontées de nappes, d'après les données disponibles par le serveur ADES
- 6. Un chapitre sur un essai de zonage de l'aléa pouvant servir de guide dans le cadre de l'établissement e PPRI ;
- 7. Quelques propositions de systèmes d'alerte ;
- Un dernier chapitre sur des préconisations de mesures préventives.

A la suite de la réalisation d'une première étude-test (2002-2003) dont l'objectif était de définir et tester une méthode pour cartographier la sensibilité aux remontées de nappes sur quelques secteurs du territoire français, la présente étude permet de disposer d'une cartographie de cette sensibilité, validée sur l'ensemble du domaine sédimentaire non plissé métropolitain. Les résultats de cette partie de l'étude sont probants. Il ne faut cependant pas les utiliser à une échelle trop détaillée (au dessous du 1/100 000ème ou 1/50 000ème), en raison de la relativement faible densité des points d'observation qui ont servi à bâtir la méthode, de la faible précision des données elles-mêmes, des méthodes d'interpolation, et de la faible précision que fournissent les outils fondamentaux de la méthode (le Modèle Numérique de Terrain – MNT en particulier).

Malgré des erreurs de détail dus à l'imprécision des données-sources cette cartographie en domaine sédimentaire reflète assez bien la réalité du terrain. Les cartes de la fluctuation annuelle de la nappe ont été difficiles à bâtir, et surtout à comparer aux enregistrements des piézomètres, en particulier dans les secteurs où ces remontées ont eu lieu. Ces difficultés sont imputables à la superposition des amplitudes annuelles et interannuelles de la nappe dans ces secteurs, qui rend délicat le calcul –et la signification- d'une fluctuation moyenne. Des progrès sont envisageables localement en utilisant des cartes géologiques à plus grande échelle (1/50 000ème au lieu de 1/1000 000ème) mais surtout la vectorisation nationale des masses d'eau, ce qui est d'ailleurs en cours dans le département de l'Oise.

Basée sur une évolution de la connaissance du fonctionnement des nappes de fissures en domaine de sole, et sur les activités de recherche du BRGM sur ce sujet, une méthodologie a été proposée pour cartographier la sensibilité des nappes particulières du socle. Bien que pour les spécialistes les risques principaux d'inondation en zone de socle soient majoritairement imputables au ruissellement, la méthode proposée met en évidence des zones sensibles en particulier dans la multitude de petites têtes de bassins versants où la nappe contenue dans les altérites montre une fluctuation annuelle appréciable. La présente étude a permis de finaliser cette cartographie de la sensibilité en domaine de socle sur le Massif Armoricain, le Massif Central et le Massif des Vosges. Cette partie a finalement

acquis un développement qui n'était pas attendu au démarrage de l'étude, et peut déboucher sur d'autres applications.

En revanche la cartographie de détail qui était souhaitée afin d'appuyer la mise en place des PPRI de remontées de nappes par les collectivités locales, est un échec relatif. Un échec car il n'est pas possible de quantifier avec précision l'aléa calculé : en particulier les indicateurs colorés utilisés pour le graduer ne correspondent pas partout à de mêmes variations absolues de la nappe. Ils correspondent en effet aux mêmes **rapports** entre la profondeur à la nappe et l'amplitude de sa variation, ce qui n'est pas la même chose. La méthode est actuellement assez précise à l'échelle des quelques 75 000 polygones qui divisent le territoire où elle a pu être appliquée (60% environ) : cela signifie qu'elle parvient à caractériser une « parcelle » de taille moyenne de 400 hectares. Passer à l'échelle cadastrale de quelques hectares est impossible, les investissements scientifiques et techniques étant trop lourds pour être envisagés. En revanche cette cartographie permet d'identifier le « danger » d'un secteur relativement à un secteur voisin, et donc permet tout de même de guider la décision des utilisateurs dans certaines limites.

C'est donc volontairement que l'échelle de consultation des cartes de risque sur le site web construit par le BRGM pour le MEDD a été limitée au 1/50 000ème. Cette décision se veut éducative pour que les utilisateurs réalisent qu'une échelle plus détaillée n'est pas pertinente.

Des systèmes d'alerte peuvent être mis en place en utilisant dans une première phase certains des piézomètres actuels sous quelques conditions préalables de fonctionnement. Il sera probablement nécessaire d'en construire de nouveaux. Il faudra les équiper d'enregistreurs connectés aux réseaux actuels de données. Mais il est aussi urgent de faire faire les enquêtes nécessaires sur la localisation précise des remontées (coordonnées géographiques et cote altimétrique), car les documents officiels enregistrés alors ne citaient souvent que la commune, et la mémoire des habitants -qui permettra la reconstitution des faits- n'est pas éternelle.

Les conseils prodigués en fin de rapport sont issus des constatations faites lors des événements de 2001, et sont souvent très similaires à ceux qui sont donnés pour prévenir autant que possible les dégâts lors de crues de ruissellement.

Mots clés : Hydrogéologie, Nappe libre, Remontée de nappes, Inondation, Catastrophe Naturelle, Analyse Multicritères, SIG, Sensibilité aux remontées, Fluctuation piézométrique, Niveau moyen des nappes, Battement de la nappe, Epaisseur de la Zone Non Saturée, Unités Fonctionnelles, Indice de persistance des réseaux, Socle, Massif armoricain, Massif Central, Massif des Vosges, Systèmes d'alerte.

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

Machard de Gramont H., Mardhel V., (2006) – Atlas des remontées de nappes en France métropolitaine. BRGM/RP 54414-FR, 105p, 89 figures, 5 documents d'annexes, 1 carte format A0 en pochette dans le rapport principal, 1 CD.

© BRGM, 2006, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Table des Matières

1. RAPPEL D'ÉLÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE EN TERRAINS SÉDIMENTAIRES 10

1.1. LES CRITÈRES DE DÉPART. 10
1.2. LES BASES DE LA MÉTHODE. 10
1.2. SÉLECTION ET TRAITEMENT DES DONNÉES DE POINTS D'EAU 11
2.2. LA DÉTERMINATION DE LA VALEUR DES PARAMÈTRES CLÉS. 14
2.3. INDICE DE DÉVELOPPEMENT ET PERSISTANCE DES RÉSEAUX 16

2. LA VALIDATION DES CARTES DE SENSIBILITÉ EN TERRAINS SÉDIMENTAIRES 18

2.1. LES PRINCIPALES DIFFICULTÉS DE L'ÉTUDE. 18
2.2. LES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE. 18
2.3. UN CONSTAT 21
2.4. LES DIFFICULTÉS DE LA VALIDATION 21

3. ELÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE POUR LES SECTEURS DE SOCLE 22

3.1. PRINCIPAUX TYPES DE NAPPES 22
3.2. APPROCHE SPATIALE DE L'HYDROGÉOLOGIE DE DOMAINE DE SOCLE 23
3.3. MODÈLE CONCEPTUEL DES AQUIFÈRES DE SOCLE 27
3.4. LA MODÉLISATION 30
3.5. EXEMPLES DE CARTES DE SENSIBILITÉ. 41

4. LE SITE INTERNET 50

4.1. LES PRINCIPALES ATTENTES DU MEDD 50
4.2. FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL DU SITE 50
4.2. LES ÉCHELLES DE CONSULTATION DES CARTES. 54

5. TYPOLOGIE DE LA PIÉZOMÉTRIE EN SECTEUR DE REMONTÉES DE NAPPE 56

5.1. AQUIFÈRE DE LA CRAIE EN PICARDIE 56
5.2. AQUIFÈRES DE LA RÉGION CENTRE 59
5.3. AQUIFÈRE DE LA CRAIE EN NORD PAS DE CALAIS 62
5.4. AQUIFÈRE DE NORMANDIE 64
5.5. AQUIFÈRE DE CHAMPAGNE 68
5.5. EXEMPLES EN ILE DE FRANCE 70
5.6. EXEMPLES DE PIÉZOMÈTRES EN POITOU-CHARENTES 70
5.6. EXEMPLES EN BOURGOGNE 72
5.7. EXEMPLES DE SECTEURS N'AYANT PAS CONNU DE REMONTÉES 73

6. ELÉMENTS POUR UNE INTÉGRATION DES RÉSULTATS DANS UN PPRI 75

6.1. LES CONTRAINTES LIÉES AUX DONNÉES. 75
6.2. UNE TENTATIVE D'AMÉLIORATION. 76
6.3. UNE TENTATIVE PAR « ZONAGE » DE L'ALÉA 78

7. LES MESURES DE PRÉVENTION ET D'ALERTE 81

7.1. LES PRINCIPES D'UN SYSTÈME D'ALERTE 81
7.2. PROPOSITIONS DE LOCALISATIONS DE TESTS 85

8. PRÉCONISATIONS DE PRÉVENTION 92

8.1. TYPOLOGIE SOMMAIRE DES DÉGÂTS 92
8.2. CONSEILS EN SECTEUR D'INONDATION PAR REMONTÉES DE NAPPES 95

9. CONCLUSION 100

10. BIBLIOGRAPHIE 102

11. LISTE DES ANNEXES 105

ANNEXE 1 – FICHES DÉPARTEMENTALES ET COMMENTAIRES DE VALIDATION, TOME 1. RÉGIONS ALSACE À FRANCHE COMTÉ 105
ANNEXE 1 – FICHES DÉPARTEMENTALES ET COMMENTAIRES DE VALIDATION, TOME 2. RÉGIONS ILE-DE-FRANCE À RHÔNE-ALPES 105
ANNEXE 2 – MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE 105
ANNEXE 3 – CARTES DÉPARTEMENTALES DE SENSIBILITÉ EN DOMAINE DE SOCLE – MASSIF ARMORICAIN ET MASSIF DES VOSGES 105
ANNEXE 4 – CARTES DÉPARTEMENTALES DE SENSIBILITÉ EN DOMAINE DE SOCLE – MASSIF CENTRAL 105

Table des Figures

Figure 1: principe du découpage des unités fonctionnelles par tranche d'altitude 11
Figure 2 : à droite réticule des unités fonctionnelles en France métropolitaine. 12
Figure 3 : en bleu, répartition des points d'eau en France métropolitaine. 13
Figure 4 : répartition des points densifiés sur le territoire métropolitain. 14
Figure 5 : schéma conceptuel du calcul de l'amplitude dans chaque unité. 15
Figure 6 : Schéma de circulation d'eau proposé (Martelat et Lachassagne, 1995) 26
Figure 7 : ancienne représentation conceptuelle d'un réservoir de socle 27
Figure 8 :modèle conceptuel moderne d'un aquifère de socle 29
Figure 9 : représentation de la méthode de Wyns 31
Figure 10 : Droites de corrélation altitude rivières-piézo, d'après Wyns 32
Figure 11 : Surface piézométrique « minimale » 33
Figure 12 : Droites de corrélation conduisant au calcul de R^2 34
Figure 13 : Estimation du coefficient R2 pour les masses d'eau du socle armoricain. 36
Figure 14 : tentative pour distinguer une variation piézométrique 37
Figure 15 : résultat du traitement sur le socle du massif armoricain. 38
Figure 16 : résultat du traitement sur le socle du Massif Central 39
Figure 17 : résultat du traitement sur le socle des Vosges 40
Figure 18 : Carte de sensibilité en domaine de socle (le Calvados) 42
Figure 19 : Carte du battement de la nappe en zone de socle (secteur du Calvados) 43
Figure 20 : Carte de sensibilité du département des Vosges (secteur de socle) 44
Figure 21 : Carte de l'épaisseur de la ZNS en secteur de socle (département des Vosges) 45
Figure 22 : Carte de sensibilité du département de la Corrèze (secteur de socle) 46
Figure 23 : Carte de l'épaisseur de la ZNS (département de la Corrèze) 47
Figure 24 : Carte de sensibilité du département du Cantal (secteur de socle) 48
Figure 25 : Carte de l'épaisseur de la ZNS en zone de socle (département du Cantal) 49
Figure 26 : Page d'accueil du site-maître 51
Figure 27: Page d'accueil du site, ouvert par un lien à partir de Prim.net 51
Figure 28 : Onglets de sélection 52
Figure 29 : Phases de sélection d'une carte communale 52
Figure 30 : Première fenêtre de sensibilité affichée lors de la consultation 53
Figure 31 : Consultation à l'échelle de 1/200 000. Les noms des communes apparaissent 54
Figure 32 : Carte au 1 / 30 000 ème au niveau de Warloy-Baillon (Somme) 55
Figure 33 : Piézomètre d'Autheux (Somme) 56
Figure 34 : Piézomètre de Senlis-le-Sec (Somme) 56
Figure 35 : Piézomètre de Lignières-Chatelain (Somme) 57
Figure 36 : Piézomètre de Morvillers Saint Saturnin (Somme) 57
Figure 37 : Piézomètre de Cuvilly (Oise) 57
Figure 38 : Piézomètre d'Etaves-et-Bocquiaux (Aisne) 58
Figure 39 : Piézomètre de Bouglainval (Eure-et-Loir), près de Saint Laurent la Gâtine 59
Figure 40 : Piézomètre de Bu (Eure-et-Loir) 59
Figure 41 : Piézomètre de Chuelles en Gâtinais (Loiret) 60
Figure 42 : Piézomètre de Parçay-Meslay 60

Figure 43 : Piézomètre de Bonneval *61*
Figure 44 : Piézomètre de Levet (Cher) *61*
Figure 45 : Piézomètre de Saint Loup des Chaumes. *62*
Figure 46 : Piézomètre de Tincques (Pas de Calais) *62*
Figure 47 : Piézomètre de Marcoing (Nord) *63*
Figure 48 : Piézomètre de Lieu Saint Amand (craie) *63*
Figure 49 : Piézomètre de Bourgbourg (sables landéniens) *64*
Figure 50 : Piézomètre de Bézancourt (Craie franche) *64*
Figure 51 : Piézomètre de Claville-Motteville (craie altérée) *65*
Figure 52 : Piézomètre de Vierville (Bathonien-Bajocien de Caen) *65*
Figure 53 : Piézomètre de Mathieu (Bathonien-Bajocien de Caen) *66*
Figure 54 : Piezométre de Sannerville (Bathonien Bajocien de Caen) *66*
Figure 55 : Piézomètre d'Asnières en Bessin (Bathonien-Bajocien de Caen) *66*
Figure 56 : Piézomètre de Louvigny (Bathonien-Bajocien de Caen, en position basse) *67*
Figure 57 : Piézomètre de Saint-Loyer des Champs (Bathonien-Bajocien de l'Orne) *67*
Figure 58 : Piézomètre des Grandes Loges (Marne) *68*
Figure 59 : Piézomètre de Fresnes les Reims (Marne) *68*
Figure 60 : Piézomètre d'Asfeld (Ardennes - Alluvions de l'Aisne) *69*
Figure 61 : Piézomètre de Chalons-sur-Marne (Alluvions de la Marne sur Craie) *69*
Figure 62 : Piézomètre de Saint Martin Chénetron (Calcaire de Brie) *70*
Figure 63 : Piézomètre de Saint Pierre de Juilliers (Charente Maritime) *70*
Figure 64 : Piézomètre de Ballans (Charente Maritime). *71*
Figure 65 : Piézomètre de Balzac (Charente) *71*
Figure 66 : Piézomètre de Saint Saturnin (Charente) *71*
Figure 67 : Piézomètre d'Arquian (sables de l'Albien) *72*
Figure 68 : Piézomètre de Saint-Privé dans la craie du Gâtinais (Yonne) *73*
Figure 69 : Piézomètre de Chéroy dans la craie du Gâtinais (Yonne) *73*
Figure 70 : Piézomètre d'Izeure dans les alluvions de la plaine de Saône (Côte d'Or) *74*
Figure 71 : Piézomètre de Biganos dans les sables plio-quaternaires des Landes (Gironde) *74*
Figure 72 : Piézomètre de Celles-sur-Plaine, dans l'aquifère libre des Grès vosgiens (Vosges) *74*
Figure 73 : Amélioration des détails de sensibilité (en haut) en utilisant les contours des masses d'eau *77*
Figure 74 : Secteur de Fagnières au 1/30 000 (Marne). *79*
Figure 75 : secteur de Warloy-Baillon au 1 / 30 000 (Somme). *80*
Figure 76 : Piézomètre de Tincques (Pas de Calais). Utilisation de l'effet mémoire de l'aquifère. *83*
Figure 77 : Localisation du nouveau piézomètre de Warloy-Baillon (Projet Interreg FLOOD-1) *85*
Figure 78 : situation géographique et hydrogéologique du piézomètre de Tincques *87*
Figure 79 : situation des événements de remontées de nappes par rapport au piézomètre de Tincques. *88*
Figure 80 : situation générale du site de Saint-Laurent-la-Gâtine (d'après rapport SGR Centre) *89*
Figure 81 : environnement hydrogéologique de Saint Laurent La Gâtine. *89*
Figure 82 : localisation du piézomètre de Croisilles et du village de Saint-Laurent-la-Gâtine. *90*
Figure 83 : Localisation de St Loup en Champagne - extrait de la carte géologique d'Asfeld. *91*
Figure 84 : Fonches (10 juillet 2001). Un ponceau sous-dimensionné fait barrage *93*
Figure 85 : Chouy. Dégradation de la chaussée après l'inondation. *93*
Figure 86 : Tartigny – inondation de plateau *93*
Figure 87 : Inondation de la D24 à Montaigu. *94*
Figure 88 : Inondation de sous-sol à Haisnes (Nord Pas de Calais) *94*
Figure 89 : Daours. Fissures dans une maison ancienne. *94*

1. Rappel d'éléments de méthodologie en terrains sédimentaires

Le phénomène recherché (Remontées de nappes) demande de connaître d'une part un niveau d'eau moyen, et d'autre part l'amplitude du battement de la nappe. L'importance de cette dernière peut amener la nappe à atteindre le niveau du sol et provoquer une inondation.

1.1. les critères de départ.

Il fallait donc :

- Ne considérer que les nappes libres. Les nappes captives ne pouvant pas, par définition, déborder. Il a donc fallu élaborer des critères pour trier les points d'eau et ne conserver que ceux des nappes libres (il n'existe pas de champ pour cela dans la BSS)
- Pouvoir en tout lieu déterminer le niveau moyen de la nappe la plus superficielle (nappe phréatique), afin de définir en tout lieu l'épaisseur moyenne de la zone non saturée (= distance moyenne du sol au toit de la nappe) ;
- proposer une méthode qui permette d'estimer en tout lieu l'amplitude du battement de la nappe afin de calculer le rapport "épaisseur de la zone saturée / amplitude du battement de la nappe », et classer les secteurs sensibles au phénomène selon une échelle relative.

De même il n'était pas possible de ne travailler que sur les points disposant de chroniques de niveau (piézomètres), ceux-ci étant trop peu nombreux, et pas nécessairement bien répartis sur le territoire.

1.2. les bases de la méthode.

Pour ce faire la méthodologie finalement adoptée consista :

- à comparer et analyser toutes les données de niveau d'eau entre elles trouvées dans la BSS ;
- à définir des secteurs homogènes du point de vue de la **lithologie** : on a adopté la référence de la carte géologique au 1/50000, qui était l'échelle vectorisée commune à l'ensemble de la France (localement on pourra utiliser une géologie vectorisée au 1/50 000ème, mais elle n'existe pas encore sur l'ensemble du territoire, ou la digitalisation récente des masses d'eau) ;
- à considérer les bassins versants de surface, les points considérés devant se trouver dans les mêmes bassins versants (même si parfois les bassins hydrologiques ne correspondent pas toujours aux bassins hydrogéologiques) ; on a donc tracé des polygones de bassins versants d'après la BD Carthage ;

- enfin, pour éviter qu'un effet d'altitude ne rende les niveaux d'eau difficilement comparables entre eux, on a découpé le territoire en tranches d'altitude de 5 mètres (*Figure 1*).

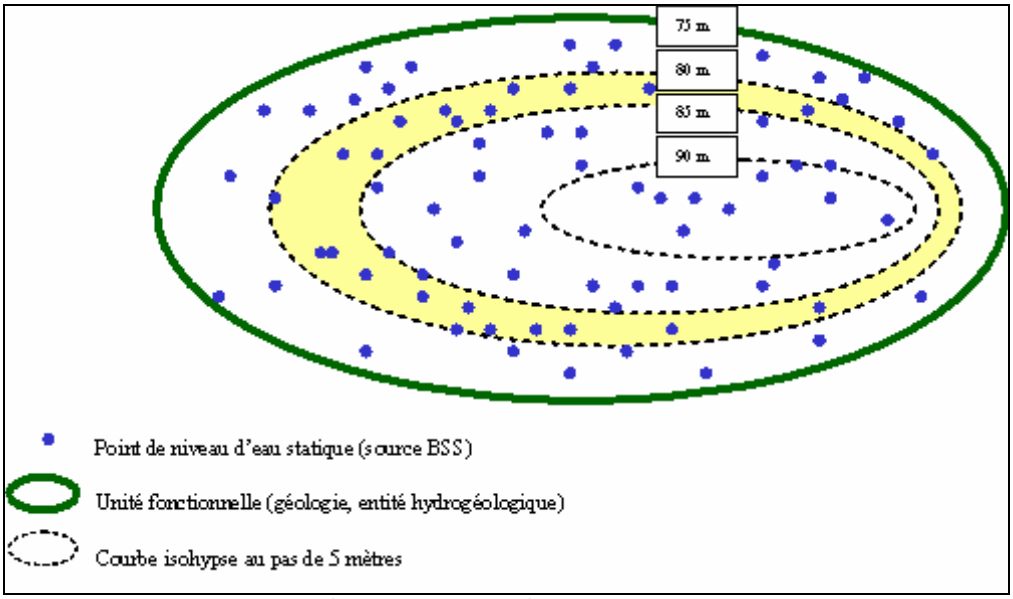


Figure 1: principe du découpage des unités fonctionnelles par tranche d'altitude

On a obtenu une mosaïque de petits polygones élémentaires (76 133 exactement), découpant le territoire sédimentaire de la France, qui ont été désignées sous le nom "d'unités fonctionnelles" (*Figure 2*). Ces unités sont homogènes du point de vue de la lithologie, de l'hydrogéologie, et les différences de niveaux d'eau n'y sont pas dues à des différences d'altitude du lieu.

A l'intérieur de chacun de ces petits polygones élémentaires, un SIG a fait l'inventaire de toutes les données de la BSS, géoréférencées et dotées d'altitude du lieu de mesure[1]**, ayant fourni une valeur de niveau d'eau à un moment quelconque**, pourvu qu'il soit muni d'une date (mois-année au minimum)[2].

1.2. sélection et traitement des données de points d'eau.

Les points d'eau et les piézomètres : ces données sont extraites de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) sous forme de fichier de points géoréférencés dans le système de projection Lambert 2 étendu.

Chaque point d'eau est identifié par ses coordonnées en X et Y et Z (cote altimétrique des terrains naturels) ainsi que par une profondeur d'eau à laquelle est adjointe la date de mesure de cette profondeur.

[1] Il faut préciser que, dans les bases de données, les niveaux du sol n'étaient pas toujours renseignés, ou les différentes informations concernant cette origine étaient contradictoires. On a donc décidé d'affecter à chaque point d'eau utilisé l'altitude du lieu fourni par le MNT. En faisant cela, on acceptait une erreur d'altitude de l'ordre de +-2.5m environ.

[2] La méthodologie détaillée de l'étude pour les terrains sédimentaires est reportée en Annexe 5.

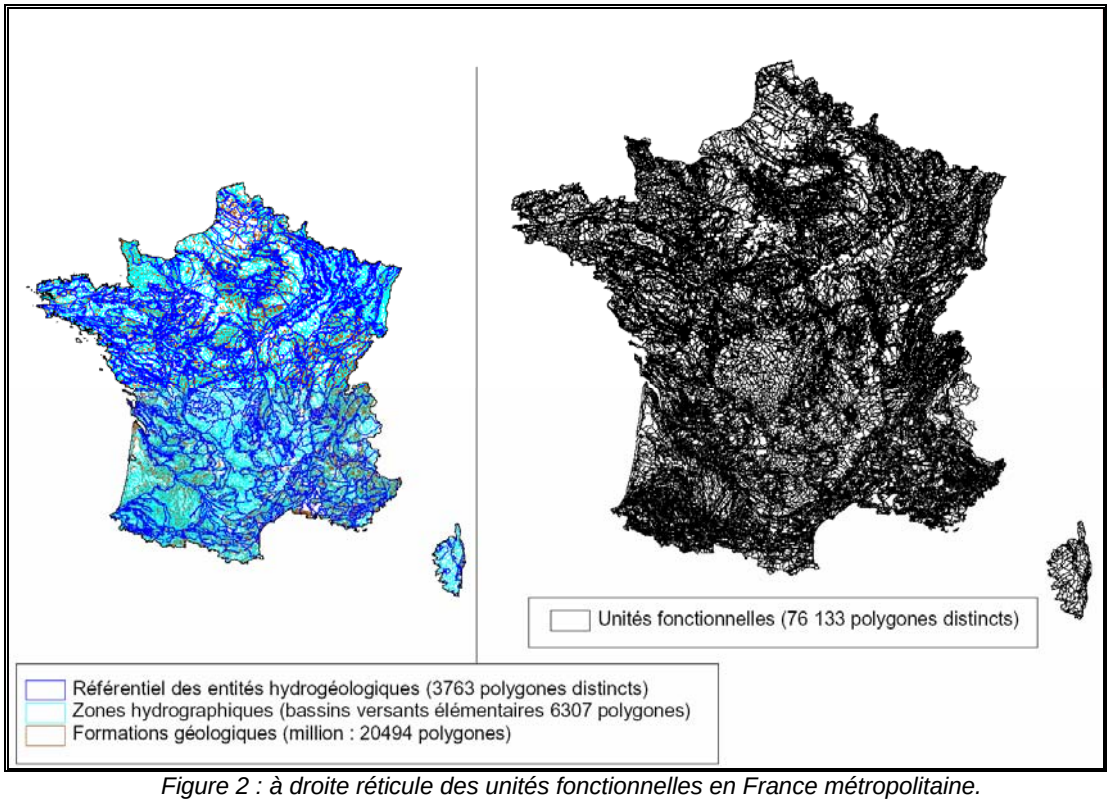


Figure 2 : à droite réticule des unités fonctionnelles en France métropolitaine.

Il a été ainsi extrait 146 611 « points d'eau statique » de la BSS (*Figure 3*). Ces points possèdent en général une seule valeur de profondeur d'eau établie à la date d'exécution de l'ouvrage. Il s'agit de forages, puits et sondages, qui ne sont pas répartis de façon homogène sur le territoire. On y a ajouté 16 289 piézomètres pour lesquels une profondeur moyenne a été calculée à partir des chroniques disponibles.

La distinction libre-captif : afin de restreindre l'étude au premier aquifère (libre) rencontré, un filtrage des données est effectué, sur des critères malheureusement souvent subjectifs :

- exclusion des points possédant un niveau d'eau statique à une profondeur excédant 90 mètres (13 % des points sont ainsi éliminés);
- exclusion des points décrivant des phénomènes d'artésianisme qui correspondent à des nappes captives (niveaux d'eau négatifs);
- exclusion des points associés à des nappes captives de faible profondeur (à l'image de l'Aquitaine où existent des nappes captives et sont peu profondes). Pour déterminer quels points appartiennent à cette catégorie, l'analyse des coupes techniques est entreprise afin de rechercher les niveaux statiques mesurés supérieurs de plus de 10 mètres au niveau des crépines.

Le filtrage des points a permis d'exclure 19466 points.

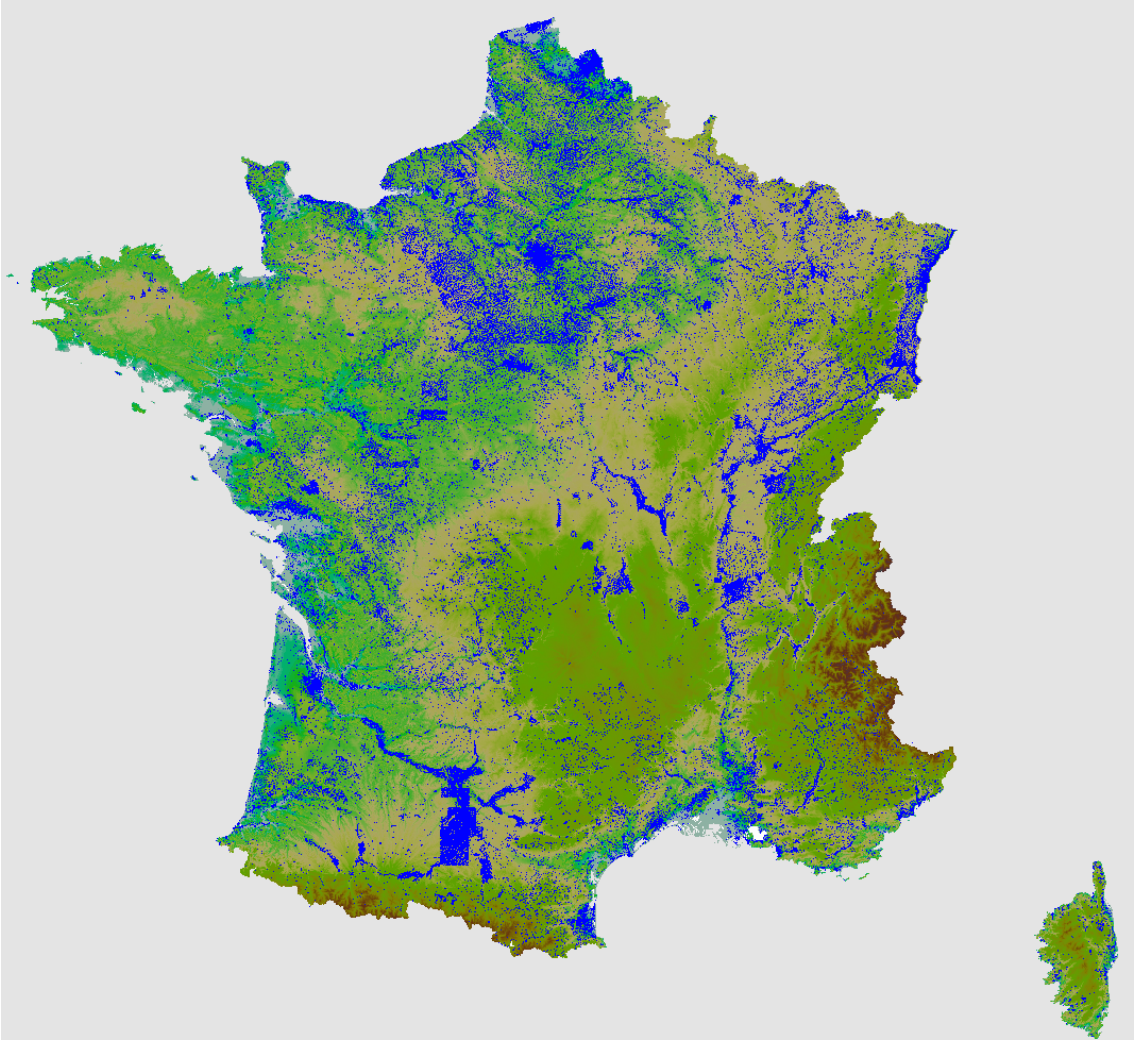


Figure 3 : en bleu, répartition des points d'eau en France métropolitaine.

La densification des points de mesure : la densification du semis de point (*Figure 4*) a pour objectif de limiter (autant que possible) les effets d'une interpolation automatique des valeurs piézométriques dans des zones de faible densité d'information. Elle est fondée sur l'hypothèse d'un comportement hydrogéologique homogène des unités fonctionnelle décrites auparavant.

Les unités fonctionnelles sont subdivisés par sections altimétriques au pas de 2.5 mètres (comme sur la *Figure 2*). Chaque surface élémentaire est décrite par les valeurs de niveau d'eau statique qu'elle contient.

La détermination du niveau moyen de la nappe : au sein de chacune de ces surfaces d'altitude homogène, la profondeur moyenne est calculée **lorsque sont contenus au moins 5 points contenant des niveau statiques** (*Figure 2*). Par la suite seuls les points dont la mesure de niveau est de l'ordre de la moyenne obtenue, plus ou moins la demi-valeur du pas d'analyse altimétrique (soit 1.25m) seront conservés pour recalculer une valeur de profondeur moyenne.

Au sein de chaque unité spatiale, une matrice de points est ensuite générée au pas de 100 mètres, elle hérite de la valeur altimétrique du modèle numérique de terrain à

laquelle est soustraite la profondeur moyenne décrite ci-dessus. Cette matrice de points est ajoutée aux points existants.

Cette opération est ensuite recomposée pour des sections altimétriques au pas de 5 mètres. La densification à permit d'accroître de 23 % le nombre de points du semis initial, mais en fait **elle n'accroît le nombre de points que dans les secteurs où ils sont déjà assez nombreux, et d'une façon générale dans les secteurs altimétriques les moins élevés.**

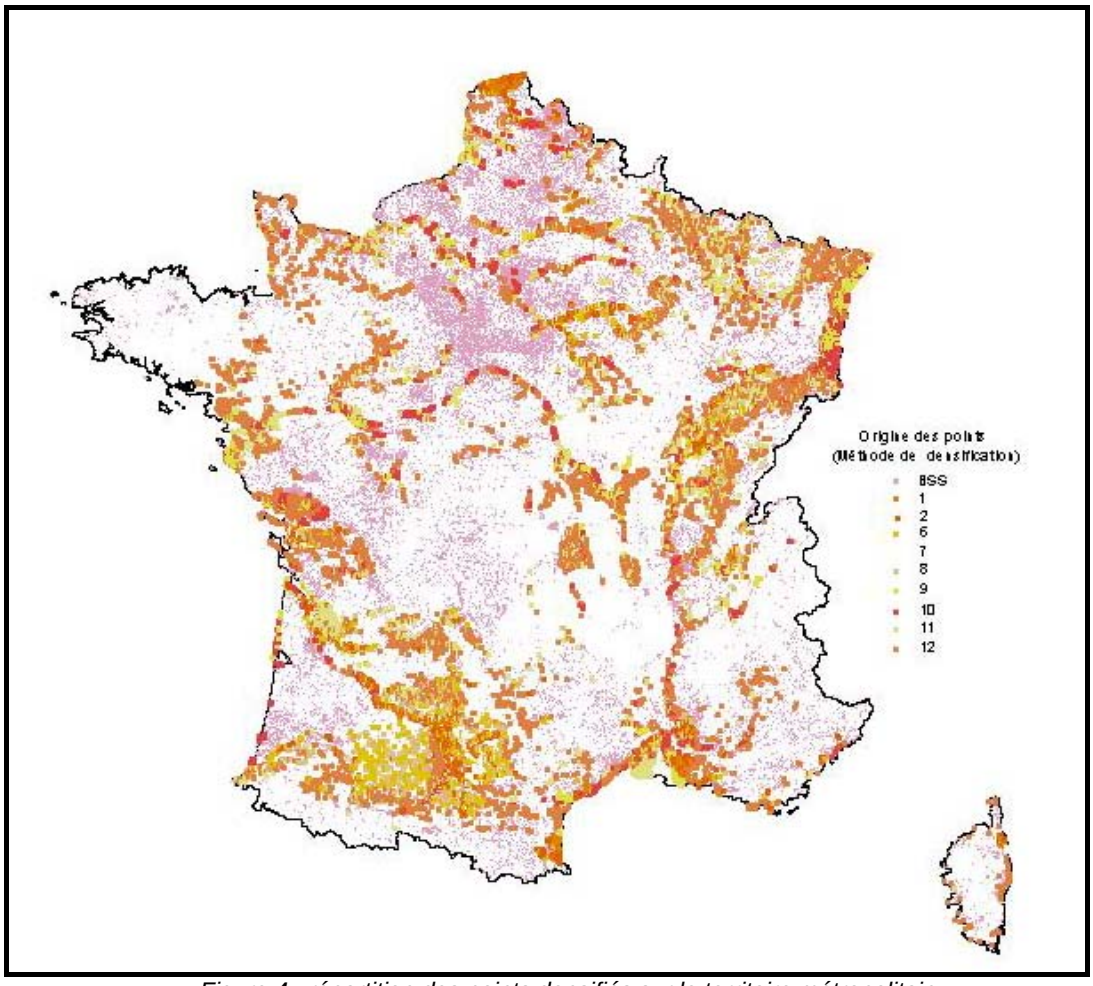


Figure 4 : répartition des points densifiés sur le territoire métropolitain.

2.2. La détermination de la valeur des paramètres clés.

Les paramètres clés de la méthode sont :

- le niveau d'eau moyen de l'aquifère (premier paramètre), qui détermine également l'épaisseur de la Zone Non Saturée (second paramètre) ;
- la fluctuation annuelle de l'aquifère (troisième paramètre, appelé aussi « battement »).

Le calcul du niveau d'eau moyen : calculé précédemment en 2.1, à partir des valeurs des profondeurs de niveaux d'eau dans les polygones d'unités fonctionnelles.

L'épaisseur de la Zone Non Saturée : simplement calculée à partir du niveau d'eau moyen et du modèle numérique de terrain (différence entre la cote altimétrique et la profondeur du niveau d'eau).

L'amplitude de la fluctuation de l'aquifère : on a vu qu'on faisait l'hypothèse que la courbe enveloppe des valeurs de niveau d'eau de tous les points contenus dans une unité fonctionnelle décrivait l'amplitude saisonnière de la nappe dans un unique point d'eau (fictif) contenu dans cette cellule, au cours de l'intervalle de temps d'observation de ces points.

La moyenne des valeurs de profondeur d'eau dans chaque unité fonctionnelle représente **la profondeur moyenne de la nappe pour l'unique point d'eau fictif** de cette unité.

En additionnant à cette moyenne la valeur d'1 écart-type de l'échantillon de la cellule, **on obtient une amplitude de la nappe pour 95% de la population** de l'échantillon de la cellule (*Figure 5*). On élimine ainsi les valeurs extrêmes qui peuvent représenter des erreurs de mesure, ou des situations extrêmes.

En fait on considère que cette variation se rapproche plutôt d'un demi-battement (différence entre les hautes eaux et le niveau moyen, et non entre hautes eaux et basses eaux).

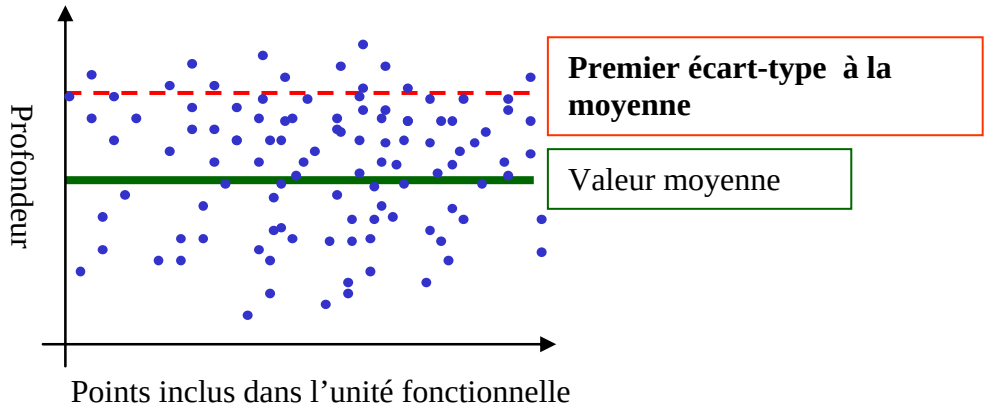


Figure 5 : schéma conceptuel du calcul de l'amplitude dans chaque unité.

Lorsque des polygones ne contiennent pas assez de points avec des valeurs de niveau d'eau, (au moins 5 dans une cellule) ou bien si ces valeurs sont trop hétérogènes, les polygones sont "masqués" et les résultats du calcul ne sont pas fournis, car considérés comme trop imprécis.

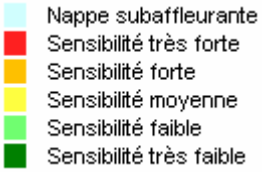
La détermination de la sensibilité aux remontées de nappes : découle naturellement de l'épaisseur de la zone non saturée et de la valeur du demi-battement, calculé statistiquement. On considère en effet qu'un secteur est d'autant plus propice à une remontée de nappes, que le ratio « épaisseur de la ZNS/demi battement » est fort.

Le coefficient qui caractérise la sensibilité aux remontées e nappes est finalement :

$$Indice-de-Sensibilité = \frac{Demi_battement_moyen}{Epaisseur_de_ZNS} = \frac{\Delta}{E}$$

Ce coefficient caractérise chaque unité fonctionnelle, qui est ensuite découpée selon une grille de 250 mètres de côté.

Le tableau suivant explicite les bornes qui ont été choisies pour caractériser les 5 couleurs de la carte de sensibilité (à l'exception du bleu, qui correspond à une valeur de l'IDPR) :



Indice de sensibilité	Nombre de fois où le battement est contenu dans la ZNS		Couleur
	Valeur supérieure de classe	Valeur inférieure de classe	
de 0.000 à 0.160	infini	6.25	Vert foncé
de 0.160 à 0.250	6.25	4.00	Vert clair
de 0.250 à 0.330	4.00	3.03	Jaune
de 0.330 à 0.600	3.03	1.67	Orangé
de 0.600 à 1.200	1.67	0.83	Rouge

Tableau 1 : schéma conceptuel du calcul de l'amplitude dans chaque unité.

On s'aperçoit que le battement de la nappe peut être plus important que l'épaisseur de la zone non saturée. C'est un phénomène qui se rencontre fréquemment dans les zones alluviales.

2.3. Indice de Développement et Persistance des Réseaux

La notion de capacité d'infiltration est intéressante dans l'élaboration d'une carte de potentiel de remontée de nappe. D'autre part il est très difficile de répertorier l'ensemble des paramètres intrinsèques d'un aquifère tels que la perméabilité, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement. Dans ces conditions, ce que l'on appelle l'indice de développement/persistance des réseaux (IDPR), traduit indirectement ces notions, en permettant une approche indirecte de la perméabilité de surface.

Cet IDPR compare tout point du réseau hydrographique réel au point le plus proche du réseau de thalwegs calculé à partir du MNT. Il correspond aussi à un critère physique du milieu naturel : l'IDPR fournit une indication sur la localisation des vallées sèches, où le processus d'infiltration est majoritaire sur celui de ruissellement.

En tout point, le rapport de la distance au thalweg du réseau calculé par MNT sur la distance au cours d'eau du réseau réel est calculé. Le résultat est inférieur à 1 quand le réseau théorique est sec (pas de cours d'eau). Ce rapport indique alors que le terrain est infiltrant.

Inversement, quand le réseau réel est plus dense que le réseau calculé, on est en zone de ruissellement majoritaire. Le rapport est supérieur à 1.

L'IDPR varie selon une échelle comprise entre 0 et n. Par souci de simplification du critère, n est arbitrairement limité à 4. **Un IDPR supérieur ou égal à 2 traduit une stagnation permanente des eaux**, menant à deux interprétations différentes :

- quand la ZNS est faible, par exemple au niveau des cours d'eau et des zones humides, l'eau ne s'infiltre pas car le terrain est saturé.
- dans le cas d'une ZNS plus importante, le refus d'infiltration semble montrer une imperméabilité des terrains naturels.

On pose l'hypothèse que des valeurs d'IPR supérieures à 2 sont majoritairement assimilables à des milieux humides. Les unités fonctionnelles pour lesquelles l'IDPR présente des valeurs >=2 seront donc traitées comme zones de milieux humides (très vulnérables aux phénomènes d'inondation de surface) ou très peu perméables (hors des zones de remontée potentielle des nappes).

Dans la représentation des cartes de sensibilité, c'est l'IDPR qui a permis l'identification des zones bleues qui figurent l'affleurement de la nappe.

2. La validation des cartes de sensibilité en terrains sédimentaires

La méthode de calcul de la sensibilité aux remontées a été soumise à l'arbitrage d'un comité de pilotage lors de sa phase d'élaboration.

Le MEDD/DPPR a ensuite déclenché une réunion d'information en mars 2004, à destination de l'ensemble des DIREN et des SGR, afin d'expliquer les méthodes employées, et de susciter des travaux de validation. La DPPR souhaitait que ces validations se fassent en commun entre les SGR et DIREN de chaque région.

Dans les faits, la plupart des DIREN se sont déclarées incompétentes pour effectuer cette validation, et ont dévolu ce travail aux SGR. Dans un nombre réduit de cas cependant la validation s'est effectuée de manière concertée.

Les résultats ont été consignés en Annexe 1 au présent rapport, qui comprend l'ensemble des cartes de sensibilité des départements de France métropolitaine. En effet il est apparu sans doute plus pratique pour le lecteur de comparer directement ces commentaires aux cartes de sensibilité.

2.1. Les principales difficultés de l'étude.

Il faut réaliser que, au départ de l'étude, lorsqu'il a fallu utiliser les banques de données, des difficultés sont apparues :

- Certains paramètres étaient peu disponibles : le coefficient d'emmagasinement d'un aquifère pouvait notamment permettre de guider l'étude, puisque pour de faibles valeurs de ce coefficient correspond une amplitude plus grande pour une même valeur de recharge. Or les bases ne contiennent qu'un très petit nombre de valeurs de ce paramètre
- Les historiques piézomètriques fournissent des valeurs réelles de l'amplitude des nappes, mais ponctuelles. Les piézomètres sont très irrégulièrement implantés en France, et surtout pas assez nombreux pour permettre une couverture représentative et homogène
- Les informations qualitatives contenues dans les bases de données sont souvent insuffisantes, ne permettant généralement pas de savoir si le point d'eau considéré correspond à une nappe libre ou captive. Il a donc fallu trier les données avec des critères subjectifs par définition imparfaits.

2.2. Les résultats de l'étude.

La première surprise fut de constater que les zones les plus sensibles n'étaient pas toujours –ni souvent- superposées aux déclarations de catastrophe naturelle.

La méthode avait prévu de comparer de façon globale les résultats de l'analyse SIG aux amplitudes piézomètriques, et dans environ 70% des cas, les résultats du terrain confirmaient la méthode.

Dans 30% des cas, les résultats de la méthode ne correspondent pas aux observations faites sur les piézomètres, ce qui a été mis en évidence par les remarques des hydrogéologues chargés de valider à partir des données courantes en leur disposition. Les écarts peuvent être importants.

Tout d'abord on observa que cette dissemblance ne concernait que les secteurs de craie. Dans les autres contextes hydrogéologiques, la méthode est fiable et robuste.

Une analyse rapide a suivi, et a conduit à confirmer que :

- 1. Ordre de grandeur : l'amplitude de battement de la nappe calculée dans la cellule "unité fonctionnelle", est souvent 2 à 3 fois supérieure à la valeur observée dans le piézomètre contenu dans la cellule.
- 2. L'inverse est beaucoup moins souvent rencontré, mais les cas se présentent.
- 3. Des valeurs semblables se rencontrent soit dans des milieux très poreux, soit dans des milieux où le nombre de points est très élevé (l'un étant d'ailleurs probablement la conséquence de l'autre). On rappellera qu'une différence de l'ordre de 5 mètres n'est pas forcément synonyme de différence significative, car l'erreur absolue sur l'altitude peut atteindre cet ordre de grandeur.

2.2.1. Explication proposée.

L'anomalie relevée tient en des amplitudes calculées par polygones supérieures aux amplitudes observées sur des piézomètres. D'abord il faut bien comprendre que les deux valeurs ne proviennent pas du même mode de calcul :

La valeur calculée sur la base de la chronique piézométrique au puits d'observation, ne correspond qu'à ce point particulier

La valeur qui lui est comparée, provient de l'analyse des valeurs de tous les points contenus dans la cellule où se situe ce piézomètre (qui n'est qu'un point parmi d'autres).

En domaine de craie, le coefficient d'emmagasinement et la perméabilité sont des paramètres très variables dans l'espace, car la circulation de l'eau y est largement favorisée par les zones fracturées qui jouent le rôle de drains naturels.

Cette fracturation joue un rôle fondamental dans la productivité des ouvrages, et réciproquement, les forages d'exploitation en secteur de craie sont préférentiellement installés dans des zones de fractures. Les ouvrages d'exploitation sont aussi le plus souvent localisés dans des points assez bas, où les cours d'eau se surimposent aux couloirs fracturés, ce qui permet d'améliorer encore la productivité des ouvrages sans avoir à trop approfondir les captages. Cette bonne perméabilité va évidemment de pair avec d'assez faibles amplitudes de la nappe.

Bien souvent les piézomètres ne sont que d'anciens ouvrages de production déclassés, donc situés dans des zones plutôt basses, et de préférence fracturées.

S'ils sont de vrais piézomètres, ils ont souvent pour rôle de contrôler des champs captants. Ils sont alors influencés par les exploitations, ce qui va "écraser" l'amplitude observée dans leurs chroniques.

A l'inverse, hors des zones fracturées et en particulier sur les secteurs de plateaux crayeux, la perméabilité est à son minimum (la porosité de la craie y reste importante mais les pores y sont très petits), les ouvrages de production sont rares ou inexistants,

car peu productifs. Les rares ouvrages rencontrées montrent des variations de niveau beaucoup plus importantes que dans les zones fracturées et perméables (souvent zones basses). Ce sont aussi des zones de recharge, éloignées des cours d'eau, qui par principe offrent des amplitudes de battement plus importantes que les zones proches des cours d'eau. Un même épisode pluvieux y fait monter le niveau de la nappe de manière plus importante que dans les zones basses.

Les moyens de contrôle possibles consisteraient à rechercher les valeurs de "doublets" les plus hétérogènes, pour des zones comportant plus de un ouvrage, et d'analyser les caractéristiques hydrogéologiques au voisinage du piézomètre de référence incriminé (situation topographique par rapport aux reliefs voisins, influence de champs de captage, fracturation locale, proximité de cours d'eau), pour les confronter aux paramètres homologues des autres ouvrages.

2.2.2. La situation inverse : fortes amplitudes sur les piézomètres par rapport à celle des polygones.

Cette situation se rencontre parfois. Elle semble à priori plus difficile à expliquer, mais on peut penser que :

- Comme la couche géologique/lithologique utilisée dans l'analyse multicritères est à grande échelle (millionième), on a dans certains cas omis de considérer des placages de Tertiaire **sur la craie** qui forment des buttes en relief, ou subsistent en remplissage dans des ondulations de la craie. Elles contiennent généralement des nappes. Ces niveaux aquifères sont généralement limités en épaisseur, leur variation d'amplitude est donc généralement faible
- Les points d'eau qui captent ces niveaux pourraient être nombreux car leur niveau d'eau serait proche de la surface et donc économiques et simples à réaliser (nombreux en BSS). Il en découle que dans l'analyse statistique effectuée sur le polygone, le poids de ces points serait fort, en raison de leur nombre, ce qui expliquerait la valeur faible de l'amplitude calculée dans la cellule
- Mais il existerait peut-être aussi dans ce même polygone un piézomètre qui capterait plus profondément la nappe la craie, à plus forte amplitude.

La nature géologique de la cellule est donc dans ce cas hétérogène, mais l'analyse multicritères n'a pas la possibilité de distinguer l'hétérogénéité en raison de la précision de la carte.

Les moyens de contrôle possibles consisteraient à recommencer l'analyse à partir de cartes géologiques à plus petite échelle, pouvant mettre en évidence ces aquifères "perchés" sur la nappe de la craie.

Les piézomètres de références sont quant à eux choisis parmi des points d'eau pérennes. Il conviendrait donc de repérer sur le terrain, dans ces cas de figure, la présence simultanée de points d'eau réalisés dans des nappes locales, et de piézomètres réalisés dans les grande nappes régionales, telle la craie.

2.3. Un constat

La commande la DPPR porte explicitement sur la recherche des zones qui, à titre exceptionnel, et suite à des épisodes répétés de pluie excédentaires, pourraient manifester des remontées de nappes de nature à engendrer des crues. Pour les zones qui n'ont pas connu ce phénomène il ne peut s'agir que d'événements rares ou d'amplitude exceptionnelle. Ce fut précisément le cas de la Somme en 2001 où la plupart des crues historiques furent des crues d'hiver, de durée rarement supérieures à 8 jours, consécutives à pluies faisant suite à des épisodes froids.

Les crues de plateau observées dans la Somme et entre BV de la Somme et de l'Oise en juillet 2001, suite à de fortes pluies, elles même succédant à des années consécutives excédentaires, se sont présentées dans des zones éloignées des cours d'eau, de faible perméabilité, dans lesquelles la zone non saturée tend à évoluer massivement vers la saturation. Il s'agit bien du cas analysé ci-dessus au § 3.1.

Nous admettrons donc que les valeurs élevées d'amplitudes, offertes par la méthode de calcul par polygones, sont réalistes et représentatives d'un phénomène exceptionnel, tandis que les valeurs d'amplitude moindre, issues d'ouvrages majoritairement implantés en zones perméables, toues réalistes qu'elle soient, correspondent à des zones « non déclenchantes ». La dissemblance est normale dans la mesure où les phénomènes mesurés sont différents.

Vu sous cet angle, les secondes ne peuvent être utilisées pour valider les premières. Nous proposons donc de retenir les valeurs d'amplitude issues des calculs par polygones comme élément objectif d'appréciation des situations exceptionnelles éventuelles.

2.4. Les difficultés de la validation

Une des principales difficultés de la validation de l'étude consistait à effectuer une appréciation convenable de l'amplitude de la variation de niveau de la nappe sur le terrain. Elle nécessitait d'être réalisée par des hydrogéologue connaissant très bien le terrain, dans le détail.

Même dans un tel cas il est difficile de caractériser un niveau moyen, et une amplitude moyenne, en particulier au sein d'aquifères comme la craie. Et ce sont bien dans les secteurs de craie que les résultats du calcul de l'étude, et les mesures des piézomètres, diffèrent.

Généralement, l'appréciation globale satisfait l'objectif de l'étude, du moins dans les secteurs où les remontées de nappes se sont manifestées. Il semble en effet admis que les cartes reproduisent globalement les secteurs où on a pu constater des remontées.

Unanimement il a également été dit qu'à grande échelle les écarts entre cette méthode et la réalité était parfois importants, et que des études de détail devaient prendre le relais, lorsque des enjeux importants existaient.

3. Eléments de méthodologie pour les secteurs de socle

La Convention prévoyait de s'intéresser également aux phénomènes de remontées en zone de socle, si elles existaient, et de savoir s'il était possible d'en déterminer les secteurs sur la base du même type de méthode que celle employée pour les secteurs sédimentaires. Il existe en effet des zones de socle où sous l'effet d'une pluviométrie importante la nappe de fissure peut déborder.

L'étude y a été plus délicate que dans le sédimentaire, et ses résultats sont beaucoup moins probants. Il y a pour cela plusieurs raisons :

- Pendant longtemps il a été considéré que le socle ne contenait pas de nappe aquifère au sens propre, mais que l'eau était stockée et circulait par un réseau de fissures. Les piézomètres qui avaient été installés dans les secteurs sédimentaires étaient donc assez rares. Les historiques de niveaux sont donc récents.
- Surtout, la méthode développée pour le sédimentaire faisait l'hypothèse que des polygones homogènes étaient déterminés par la géologie, les systèmes hydrogéologiques, et les bassins versants ; dans le domaine de socle la fissuration et la couverture d'altérites jouent un rôle prépondérant, et la géologie/lithologie y varie très rapidement. Si le même type de polygones que dans le sédimentaire avait du guider la méthodologie, chaque polygone n'aurait probablement pas contenu assez de données sur les niveaux de points d'eau pour donner des résultats satisfaisants.
- En raison de ce qui précède, il a été impossible de déterminer des battements dans des polygones homogènes, et il a fallu chercher une méthodologie différente. Pour la tester, l'étude s'est dans un premier temps concentré sur le socle du Massif Armoricain.

3.1. Principaux types de nappes

En France, il y a plusieurs types de nappes selon les roches-magasins et selon la nature du réservoir :

Les grandes nappes libres des formations sédimentaires

Il s'agit de roches poreuses (sable, craie, calcaire) jadis déposées en vastes couches. Ces nappes sont dites libres parce que la surface supérieure de l'eau fluctue sans contrainte sous l'effet des précipitations. Il n'y a pas de « couvercle » imperméable au toit de leur réservoir et la « pluie efficace » peut les alimenter par toute leur surface. Ce type de nappes a été traité dans la première partie de cette étude, et donne lieu aux cartes de sensibilité en domaine sédimentaire (annexe 1).

Les nappes captives

Elles sont constituées à peu près des mêmes types de roche, mais sont recouvertes par une autre couche géologique imperméable qui confine l'eau. Celle-ci est alors

sous pression et peut jaillir dans des forages dits artésiens. Les nappes captives sont souvent profondes, on peut alors les exploiter pour la géothermie haute température. Ces nappes échappent au contexte de la présente étude, car leur niveau « confiné par un toit imperméable, ne peut pas atteindre le sol.

Les nappes alluviales

Elles constituent un type particulier de nappes sédimentaires, formées par les grands épandages de sables et graviers des fleuves et des rivières. Ces nappes fournissent 60 % des eaux souterraines captées en France grâce à leur facilité d'accès et leur bon débit. Elles sont le lieu privilégié des échanges entre les cours d'eau et les autres grandes nappes libres des coteaux. C'est à travers ces nappes alluviales que les grands flux issus des nappes libres rejoignent les rivières. En règle générale ces nappes affleurent la surface des terrains naturels (à +- 5m) ce qui les situe d'emblée comme des entités susceptibles de provoquer des désordres par remontée des niveaux statiques.

Les aquifères des roches dures fissurées de socle

Ces aquifères sont contenus dans des roches dures anciennes dites « de socle ». Ces roches sont présentes en France dans tout le Massif armoricain mais également dans le Massif central, le Morvan, les Alpes, les Pyrénées, les Ardennes et en Corse. Ce type de sous-sol est très différent de celui des autres régions de France qui sont constituées de roches dites sédimentaires.

La présente étude s'applique à ces aquifères qui, en Bretagne par exemple, constituent un type de **réservoir de petite dimension aux capacités modestes** mais appréciables pour les petites collectivités et les agriculteurs. Leur répartition, supposée quasi-générale dans le domaine de socle en climat tempéré, constitue la cause probable des remontées de nappes observées dans le domaine cristallin. Il ne faut cependant pas la confondre avec des phénomènes de débordement constatés dans des nappes de formations sédimentaires tertiaires reposant sur le socle (sous l'effet de pluies abondantes, ces aquifères sédimentaires débordent, d'autant plus que leur substratum est moins poreux que leur propre réservoir)

Ainsi il n'existe pas en Bretagne d'aquifères étendus, mais une mosaïque de petits systèmes imbriqués (la surface au sol de chacun d'eux n'excède pas en général quelques dizaines d'hectares) indépendants les uns des autres, du moins dans les conditions actuelles de l'exploitation qui en est faite.

A l'image des phénomènes de remontée de nappe qui ont été identifiés dans le bassin de la Somme des phénomènes similaires ont été également observés en Bretagne (Naizin dans le Morbihan, et Pleine Fougères en Ille-et-Vilaine). Ils se traduisent souvent par l'apparition de lignes de sources, dans les parties amont des thalwegs, et sur les versants aux ruptures de pentes. À l'extrême, au niveau du sous-sol, le niveau de nappe remonte jusqu'à la surface du sol entraînant une imperméabilisation totale du sol et provoquant des ruissellements et par conséquent des inondations.

3.2. Approche spatiale de l'hydrogéologie de domaine de socle

Les réservoirs d'eau souterraine en domaine de socle, étroitement liés aux limites des bassins versants de surface, en partagent les limites et héritent en grande partie de leurs caractéristiques.

Capacité d'infiltration

Le **bassin versant** constitue la principale unité de surface sur laquelle les investigations en matière d'hydrogéologie ont été menées. En effet, l'approche de la sensibilité du sous-sol au ruissellement et à l'infiltration peut être faite sur un bassin versant en caractérisant la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration. Cette capacité est obtenue en croisant la perméabilité des roches et la profondeur de la nappe.

Cette capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration est d'autant plus forte que :

- l'épaisseur de la zone non saturée est importante (la nappe est profonde donc la possibilité d'emmagasinement est importante)
- et que la perméabilité des formations géologiques est notable (les débits souterrains permettant de reconstituer la capacité d'accueil de l'aquifère entre deux périodes de recharge).

Volumes d'eau contenus

Le calcul des volumes d'eau souterraine est une méthode complexe basée sur la modélisation de la géométrie des aquifères (altérites et milieu fissuré), et sur la caractérisation de leurs teneurs en eau.

Relations des eaux souterraines avec les eaux de surface

La participation des eaux souterraines à l'écoulement total d'un cours d'eau peut être calculée sur un bassin versant au droit d'une station hydrométrique. Le débit journalier mesuré est décomposé en débit rapide et débit lent, grâce à un travail de modélisation. Ceci permet de connaître la quantité d'eau souterraine sortant annuellement et mensuellement du bassin grâce à la rivière. On démontre alors qu'en été la participation des eaux souterraines au débit de la rivière atteint 100 %.

A titre d'illustration, la connaissance du fonctionnement des écoulements souterrains a permis d'apporter des explications à des variations d'analyses chimiques mesurées dans un cours d'eau. Concernant les teneurs en nitrates par exemple, le cycle le plus fréquemment rencontré sur les bassins versants bretons est le suivant : teneurs élevées en hiver et teneurs plus faibles en été. Ceci peut s'expliquer de la façon suivante : le bassin versant est très sensible au ruissellement et à l'écoulement du réservoir souterrain supérieur (altérites) qui entraînent une augmentation des teneurs en nitrates, tandis que le réservoir souterrain inférieur (milieu fissuré) moins chargé en nitrates apporte à chaque étiage une diminution de la valeur mesurée. Cette teneur plus faible s'explique parfois par l'existence d'une dénitrification dans les aquifères du sous-sol.

En l'état actuel des connaissances, un système aquifère en domaine de socle est à la fois **un réservoir** capable d'emmagasiner des volumes plus ou moins importants d'eau provenant des pluies infiltrées, et **un conducteur** permettant les écoulements souterrains et la vidange progressive du réservoir vers ses exutoires naturels que sont les rivières. En domaine de socle breton ces deux fonctions sont le plus souvent séparées :

- le rôle de réservoir (fonction « capacitive ») est assuré principalement par les produits de l'altération de la roche en place, développée depuis le niveau du sol jusqu'à parfois plusieurs dizaines de mètres de profondeur (les altérites) ;

- L'eau souterraine circule surtout (en termes de volume relatif à l'échelle du bassin) par le réseau de fissures et de fractures existant plus bas, dans la roche « saine » ou moins atteinte par l'altération.

Les eaux souterraines sont donc situées au sein de deux unités aquifères superposées, en contact permanent : celui des altérites et celui du milieu fissuré.

3.2.2. Géologie et hydrogéologie du domaine de socle

La lithologie de ce domaine est essentiellement composée de roches granitiques, métamorphiques, et quelquefois mais rarement d'origine volcanique. L'eau souterraine y est présente dans les fissures ainsi que dans les altérations ou arénisations de surface. Ces zones fissurées ou arénisées sont généralement d'extension limitée, ce qui donne donc un ensemble de nappes discontinues.

Sur ce socle, certains bassins ont été comblés à l'ère primaire par des sédiments calcaires ou gréseux. Ces formations calcaires ou gréseuses contiennent des nappes localement intéressantes pour l'AEP (Alimentation en Eau Potable). Enfin, à l'ère tertiaire, quelques petits bassins d'extension très limitée ont été comblés par des sédiments généralement calcaires ou sableux.

L'investigation dans le domaine de socle est donc complexe, chaque point d'observation n'est en règle générale représentatif que de lui-même. Un ouvrage particulier ne réagit pas en fonction de paramètres généraux mais en fonction de facteurs quasi ponctuels.

En termes qualitatifs, on a constaté qu'il suffit que quelques hectares de terres agricoles changent d'affectation (passent par exemple d'une culture de maïs à de la prairie), pour que la qualité de l'eau souterraine évolue, sans que la qualité de l'eau correspondant aux parcelles voisines en soit affectée. Ainsi les eaux souterraines peu profondes (0-10 m) contenues dans les altérites, sont directement affectées par les pollutions issues du sol. Les concentrations qui y sont mesurées reflètent la pression polluante locale. Les eaux souterraines « profondes » (10 à 200 m) circulant dans les réseaux de fissures sont très souvent le siège de phénomènes de dénitrification

En termes quantitatifs, au travers de nombreux travaux, des mesures de débits instantanés au sein d'ouvrages ont été menées au cours des opérations de forage, il en résulte que :

- Les altérites et/ou le substratum altéré, apparaissent comme peu productives.
- Les premières venues d'eau significatives sont rencontrées soit au niveau de leur contact avec la roche saine, soit, plus fréquemment, au cœur de celle-ci.

Ces informations renforcent l'hypothèse du modèle conceptuel selon lequel (à l'échelle d'un bassin versant) le comportement hydrogéologique global de l'aquifère de socle correspond à celui des altérites : c'est-à-dire globalement peu perméable mais capacitif, et reposant sur un substrat sain à vocation transmissive. Le caractère discontinu des venues d'eau en son sein suggère qu'il s'agit d'une perméabilité de fractures.

Le cycle de l'eau dans le milieu souterrain en domaine de socle

En période de hautes eaux, les roches saines du socle, qui présentent une perméabilité de fissures et de fractures et une faible porosité à l'échelle de l'ensemble

du massif, assurent une fonction essentiellement transmissive vis à vis des eaux souterraines captées au sein des forages.

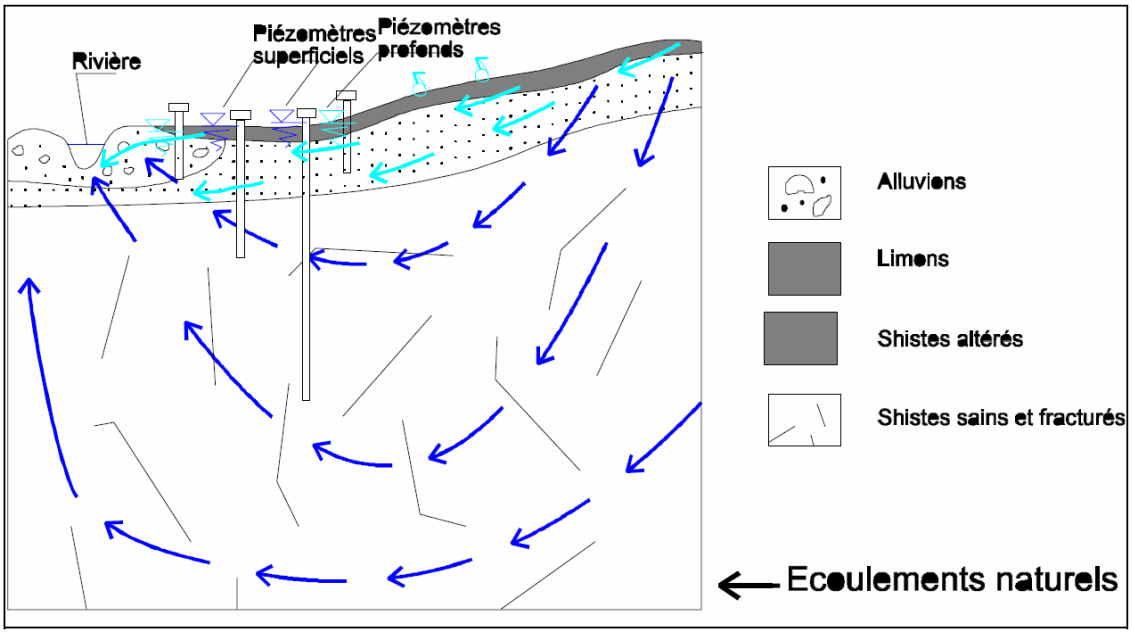


Figure 6 : Schéma de circulation d'eau proposé (Martelat et Lachassagne, 1995)

Leurs propriétés hydrauliques sont variables dans l'espace. Au contraire des précédentes les altérites ont une vocation capacitive qui se traduit par l'apparition de phénomènes de drainance[3] au cours des pompages.

3.2.3. Composantes de base de l'écoulement dans le bassin versant

Composante dans le temps

Le mode d'écoulement général des bassins versant en domaine de socle provient de deux types de nappes, situées respectivement dans les formations cristallines saines et dans les altérites qui les surmontent :

- En été, les sources sont manifestement alimentées essentiellement par les horizons profonds (socle sain).
- En hiver, l'écoulement de base est assuré principalement par la nappe profonde. Par contre, il est possible que pendant les événements pluvieux, cette contribution s'efface devant celle de la nappe située dans les altérites, expliquant ainsi la proportion peu importante des apports de cette nappe dans le volume écoulé annuel.

Composante dans l'espace

Les études menées à l'échelle d'un bassin versant[4] ont conduit à la formulation du modèle suivant :

[3] Phénomène de passage d'eau à travers une formation semi-perméable et échange entre celle-ci et un aquifère contigu, généralement captif

- En haut de bassin, l'écoulement est sub-vertical, s'il y a du ruissellement, il se ré-infiltre plus bas, sauf à être auparavant intercepté par un fossé ou un talus qui favorise également la ré-infiltration. L'eau percole à travers les altérites jusqu'à la nappe des roches saines du socle.
- Plus bas, la nappe des altérites se développe : l'écoulement latéral sub-surfacique est plus important. Là encore, il peut y avoir interception par des fossés, exfiltration de cet écoulement subsurfacique dans certaines zones, alimentation des zones de bas-fond.
- En bas de versant, les talwegs constituent une zone quasi-saturée.

De ces études découle une re-formulation du modèle conceptuel du socle ou la présence d'aquifère devient une règle générale. Le concept prévalant jusqu'à la fin des années 1990 était que les domaines de socle (*Figure 7*) ne contenaient que de petits aquifères isolés les uns des autres, limités pour l'essentiel à des fractures d'origine tectonique principalement verticales. Ces fractures étaient alimentées par l'intermédiaire d'une couverture meuble considérée comme peu épaisse (sol et arènes) qui recevait l'infiltration efficace.

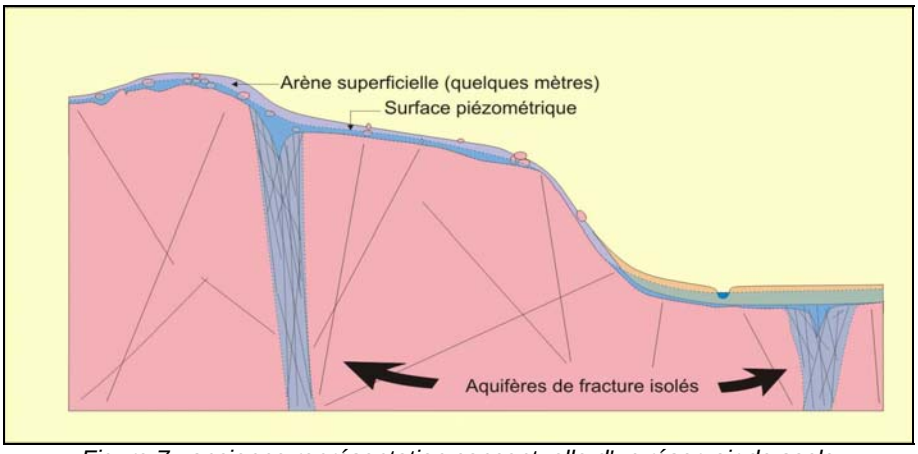


Figure 7 : ancienne représentation conceptuelle d'un réservoir de socle

3.3. Modèle conceptuel des aquifères de socle

Dans les socles anciens comme le Massif armoricain, les roches, généralement métamorphiques ou intrusives, sont massives et imperméables. La présence éventuelle d'eau souterraine dépend des modifications physiques subies par ces massifs rocheux postérieurement à leur formation, et notamment de la fracturation et de l'altération.

La fracturation favorise la circulation des eaux lorsque ces fractures sont ouvertes. C'est le cas des couloirs de fracturation, souvent sub-verticaux, dont le degré d'ouverture est lié d'une part à leur mécanisme de formation, et d'autre part à leur orientation par rapport au champ de contraintes actuelles. L'altération météorique a eu pour effet de développer une couverture meuble plus ou moins poreuse en fonction de

[4] Vers une modélisation hydrologique adaptée à l'évaluation des pollutions diffuses. Application au bassin versant de Naizin (Morbihan). These présentée par Nadia CARLUER décembre 1998 Université Pierre et Marie Curie

la minéralogie de la roche mère, et, sous cette couverture meuble, une fissuration intense permettant le drainage des formations meubles sus-jacentes.

Les zones où préexistaient des réseaux de fracture d'origine tectonique permettant la circulation de l'eau ont constitué, par la multiplication des surfaces de contact entre eau et roche, des lieux privilégiés où l'action de l'altération a été décuplée. Cette addition de phénomènes (fracturation tectonique, altération et fissuration) a particulièrement fragilisé les lieux où elle s'appliquait, conduisant à la formation de couloirs fracturés et fissurés où l'altération a pénétré plus profondément. Ces couloirs constituent des drains privilégiés pour l'eau souterraine, alimentés par les horizons altérés et fissurés plus superficiels. Comme ils constituent des zones de faiblesse, ils ont été fréquemment empruntés par l'érosion lors du creusement des vallées, et se présentent dans le paysage actuel sous la forme de dépressions allongées gouvernant souvent les écoulements visibles en surface (thalwegs, vallées).

Les manteaux d'altération épais (plusieurs dizaines de mètres) ont été élaborés lors de longues périodes d'émersion sous des climats chauds et humides analogues aux climats de la zone intertropicale actuelle. Les périodes les plus favorables ont été le Crétacé inférieur ainsi que le début du Tertiaire (Paléocène à Eocène supérieur), d'une durée de 20 à 35 millions d'années chacune. La période récente (Miocène à Quaternaire) n'a donné que des altérations d'épaisseur négligeable par rapport aux altérations antérieures

L'élaboration des manteaux d'altération suppose lors de leur formation un paysage aplani et en relief, de façon à ce que l'érosion soit incapable d'évacuer les altérites au fur et à mesure de leur formation (pente faible), et que le front d'altération puisse progresser rapidement vers le bas (écart altimétrique entre sol et niveau de base). A l'échelle régionale, pour une lithologie homogène donnée, la base des altérites est globalement parallèle à l'ancienne surface topographique.

Un nouveau modèle conceptuel des propriétés physiques des roches en contexte de socle altéré a été élabore ces dernières années, dans le cadre de projets de Recherche du BRGM. Il est représente de manière schématique sur la *Figure 8*.

Ainsi, au concept antérieur de petits aquifères isolés et non connectés, de géométrie principalement verticale, se substitue un concept d'aquifère continu, multicouche, principalement horizontal. Cet aquifère multicouche résulte des modifications de propriétés physiques acquises par les roches lors de l'altération météorique au cours de longues périodes d'émersion.

La description de ce modèle permet de distinguer :

- Un profil d'altération type comprenant de haut en bas sous les sédiments continentaux pénécontemporains de l'altération les horizons suivants
- une cuirasse latéritique (de zéro a quelques mètres} rarement préservée, par suite de la troncature du profil par l'érosion ou de sa destruction par évolution vers un latosol (non représentée sur la figure)

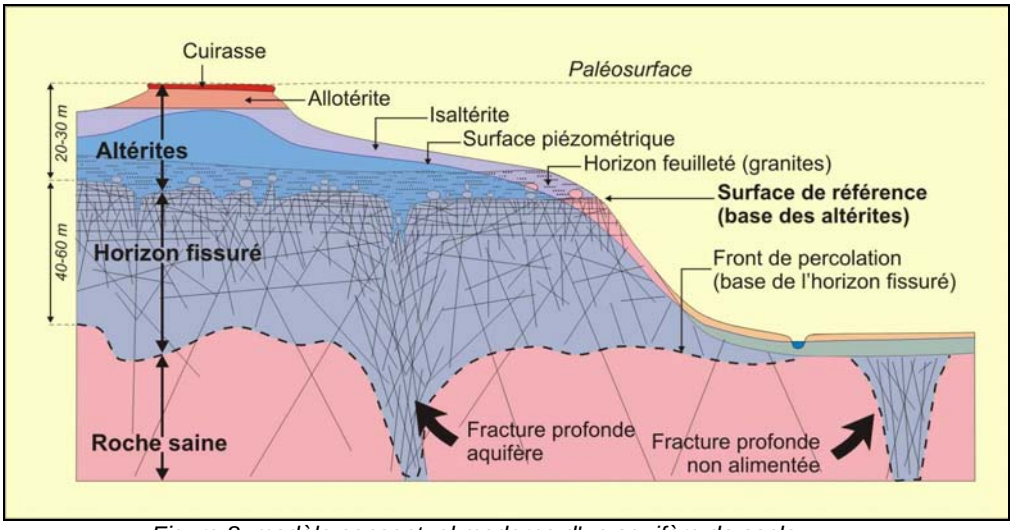


Figure 8 :modèle conceptuel moderne d'un aquifère de socle

- Des allotérites (quelques mètres a une dizaine de mètres), altérites caractérisées par une réduction de volume par rapport a la roche mère initiale ; la texture de la roche mère n'est pas préservée :
  - en contexte schisteux il s'agit d'une argile imperméable
  - en contexte granitique, il s'agit d une arène argileuse à faible perméabilité et faible porosité efficace
- des isaltérites (plusieurs dizaines de mètres) : altérite iso volumique où la texture de la roche initiale est préservée. Les éléments chimiques évacués par dissolution sont remplacés par des vides. Il en résulte une porosité importante permettant à cet horizon de jouer un rôle capacitif vis à vis des eaux d'infiltration. En contexte schisteux cet horizon à dominante silto-argileuse est faiblement perméable bien que très poreux. En contexte granitique, il correspond à une arène sableuse beaucoup plus perméable. A la base des isaltérites se rencontrent fréquemment des boules granitiques résiduelles de diamètre souvent pluri métrique. Lorsqu'elles sont en place elles sont en généralement isolées dans leur matrice d'arène. Lorsque les arènes ont été évacuées par l'érosion ces boules deviennent affleurantes et peuvent être plus ou moins remaniées sur les versants, par gravité.
- Une zone fissurée (40 a 70 m). Cet horizon situé dans la partie supérieure du substratum, est caractérisé par une très forte fissuration, dont l'intensité décroit vers le bas. Cette fissuration résulte de l'éclatement de la roche sous l'effet des contraintes générées par des changements de phase minéralogique (principalement l'hydratation de la biotite qui se transforme avec augmentation de volume en chlorite, puis vermiculite, avant d'évoluer vers des minéraux argileux). Dans les 15 premiers mètres, la distance moyenne entre fissures est décimétrique et celles-ci sont ouvertes. L'espacement entre fissures (et donc leur probabilité d'interconnexion) diminue au fur et à mesure que l'on descend dans le profil. La partie supérieure de cet horizon fissuré (en moyenne les 15 premiers mètres) constitue un aquifère à perméabilité significative, alimenté par les isaltérites sus-jacentes lorsqu'elles sont conservées Dans le Massif armoricain, la majorité des puits fermiers sont alimentés par cet aquifère, et une partie des sources de versant se situe également dans cet horizon. Lorsque la

roche mère est isotrope (cas des granites) cet horizon est caractérisé par une fissuration horizontale caractéristique. Le même phénomène s'applique à la base des arènes qui présentent un feuilletage horizontal caractéristique. Ce feuilletage traduit un resserrement centimétrique à millimétrique entre joints. Cet espacement étant du même ordre de grandeur que celui du grain de la roche, tous les grains sont atteints par l'altération, il s'agit du début de l'arénisation.

Dans la partie intérieure de l'horizon fissuré la densité de fissures diminue progressivement, de même que la porosité et la perméabilité

Ce modèle de répartition verticale des porosités et des perméabilités en contexte de socle altéré a été validé dans de nombreuses régions de socle, non seulement en France (Bretagne, Massif Central, Vosges, mais aussi ailleurs dans le monde (Afrique. Guyane. Inde. Corée du sud). Ainsi, dans le Finistère nord une étude (Wyns et al., 2004) a montré que 80% de la réserve en eau souterraine était contenue dans l'horizon fissuré. En Corée, les données de forage montrent que l'essentiel de la productivité des forages est fourni par horizon fissure (50 à 100 premiers mètres sous la base des altérites).

Ainsi, à la différence du concept classique d'aquifères discontinus de socle contrôlés par des fractures verticales d'origine tectonique on peut maintenant utiliser un concept d'aquifère continu multicouches contrôlé par l'altération : (Lachassagne et Al, 2001)

- les altérites meubles, à porosité importante et faible perméabilité, ont un rôle d'emmagasinement de l'eau de pluie
- l'horizon fissuré, à porosité plus faible mais cependant significative (1 à 5 %) et à perméabilité plus importante, joue un rôle capacitif et transmissif en collectant et en distribuant les eaux issues de l'horizon d'altération sus-jacent. A l'échelle régionale ces horizons d'altération sont parallèles à la paléo-surface contemporaine de l'altération.

3.4. La Modélisation

En l'absence de carte piézométrique sur la zone d'étude, l'altitude du toit de la nappe a été modélisée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT au pas de 50 mètres provenant de l'Institut Géographique National). Les niveaux d'eau correspondent à des mesures de la profondeur du niveau de nappe en forage et à la tarière.

La méthode mise en œuvre a été mise au point et validée pour les contextes de socle altéré (Wyns et al, 2004) Son principe est rappelé ci-dessous (*Figure 9*).

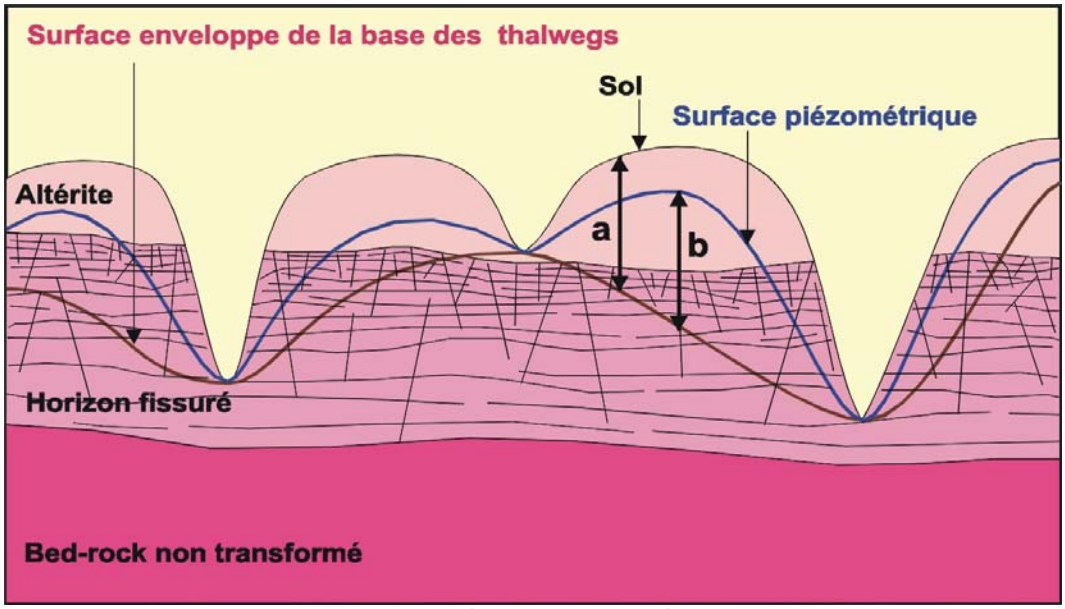


Figure 9 : représentation de la méthode de Wyns

En contexte de nappe libre où les débits d'étiage des rivières sont fournis par la nappe, on peut considérer que les rivières pérennes représentent des zones d'affleurement de la surface piézométrique.

Les rivières représentant les exutoires de la nappe, la surface piézométrique remonte donc sous les plateaux lorsque l'on s'écarte des vallées. La surface piézométrique est donc toujours comprise entre la surface topographique et la « surface enveloppe des rivières pérennes » (aussi dénommée « enveloppe de la base des thalwegs »).

Une corrélation linéaire relie d'une part la différence entre l'attitude du sol et celle de la surface enveloppe des rivières (distance «a» sur la *Figure 9*) et d'autre part la différence entre l'altitude de la surface piézométrique et celle de la surface enveloppe des rivières (distance «b» sur la *Figure 9*).

L'équation de la droite de régression reliant les valeurs a et b (*Figure 10*) permet en tout point de calculer l'altitude de la piézométrie, à partir d'une grille représentant le MNT et d'une grille représentant l'altitude de la surface enveloppe des rivières.

L'ordonnée à l'origine de cette droite représente l'encaissement moyen des rivières par rapport à leurs berges.

La pente de la droite de régression est inversement proportionnelle à la perméabilité en grand du massif.

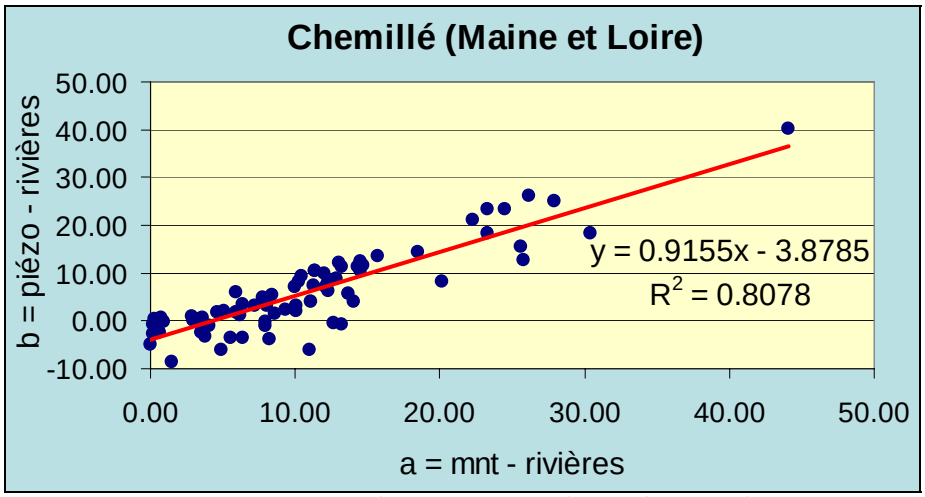


Figure 10 : Droites de corrélation altitude rivières-piézo, d'après Wyns

Ainsi dans le cadre de l'étude en domaine de socle, pour l'ensemble du massif Cadomien breton, sur chaque bassin versant la surface enveloppe des rivières pérennes a été obtenue de la manière suivante :

- à partir du réseau hydrographique pérenne issu de la BD Carthage , par échantillonnage d'un point tous les 50 mètres linéaires,
- par croisement du semis de points avec le MNT pour obtenir l'altitude des points représentatifs du réseau hydrographique pérenne,
- par analyse variographique et krigeage de l'altitude de ce semis de points : on obtient une grille représentant l'altitude de la surface-enveloppe du réseau hydrographique pérenne.

Cette méthode permet d'obtenir un niveau « piézométrique » moyen, mais en aucun cas une fluctuation de la nappe.

3.4.1. Exploitation du modèle conceptuel dans le cadre des remontées de nappes

Afin de mettre en place, avec les données existantes, une méthodologie indirecte d'évaluation de la piézométrie moyenne en domaine de socle, une grande partie les travaux précédents ont été repris et simplifiés.

Estimation d'un niveau piézométrique minimal

La première hypothèse simplificatrice utilisée suppose, à l'échelle du territoire armoricain, un modèle conceptuel de type « altérites sur socle fissuré » homogène.

Le concept d'aquifère continu multicouches contrôlé par l'altération sous-tend l'hypothèse d'un mur de l'aquifère des altérites (non imperméable, composé d'un horizon fissuré, à porosité plus faible que les altérites).

On a dit qu'à l'échelle régionale ce mur est supposé parallèle à la paléosurface contemporaine de l'altération. On considère que les rivières pérennes qui représentent des zones d'affleurement de la surface piézométrique sont également les exutoires de la nappe et le contact avec l'aquifère en milieu fissuré. La surface piézométrique qui remonte sous les plateaux lorsque l'on s'écarte des vallées est toujours comprise entre

la surface topographique et la surface enveloppe des rivières pérennes (ou enveloppe de la base des thalwegs).

La seconde hypothèse simplificatrice utilisée suppose que la surface piézométrique recherchée, en contexte de nappe libre perchée, est sub-parallèle au mur des altérites. Elle serait aussi de morphologie similaire (elle suit le relief émoussé du relief pénéplané breton) et confondue, au droit des rivières pérennes, avec la cote des terrains naturels.

Ces hypothèses, à l'échelle d'une entité de masse d'eau souterraine sont conformes à la corrélation linéaire observée entre l'altitude du sol et celle de la surface piézométrique observée au niveau des ouvrages. Dans le graphique précédent, la corrélation observée entre la cote des points d'eau mesurée en BSS et la surface topographique décrit une enveloppe que l'on suppose parallèle au mur des altérites.

La paléosurface contemporaine de l'altération (le mur des altérites, *Figure 11*) est donc supposé passer par les rivières : il doit avoir la même forme que la surface décrite par la piézométrie (ou bien son altitude maximale n'excède pas la piézométrie).

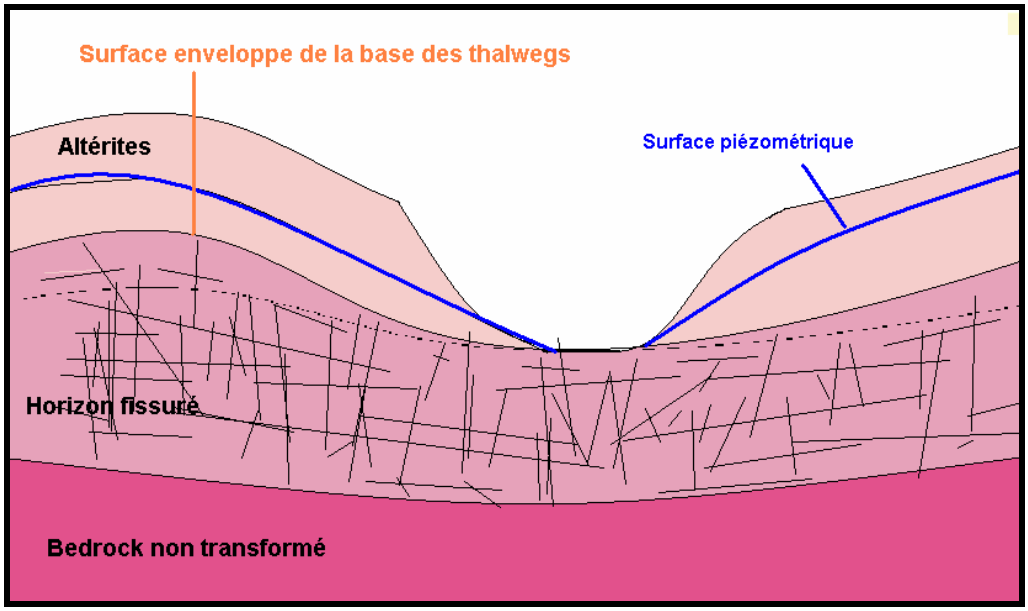


Figure 11 : Surface piézométrique « minimale »

Dans la suite de l'application de cette étude au domaine de socle. Le niveau de base de la nappe sera donc ainsi considéré comme équivalent à cette surface, donc à fortiori minimisé de l'écart observé entre les deux droites de corrélation.

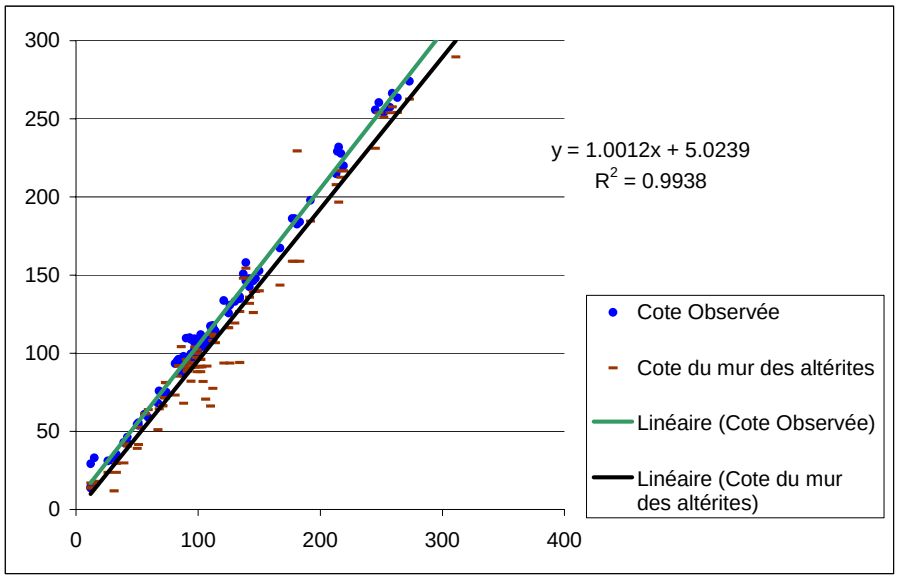


Figure 12 : Droites de corrélation conduisant au calcul de R^2

Pour les masses d'eau du socle breton, le calcul de la droite de régression passant par la cote des points d'eau observés et l'altitude des terrains naturels (*Figure 12*) à permis la composition du tableau suivant :

Code	Nom	a	b	R²	nombre de points
4015	Vilaine	0.942	-2.541	0.978	1030
4030	Socle du BV du marais poitevin	0.999	-5.363	0.980	767
4027	Sèvre Nantaise	1.000	-4.699	1.000	507
3507	Socle du bassin versant des cours d'eau côtiers	0.960	-1.757	0.993	478
4022	Estuaire - Loire	0.997	-2.396	1.000	434
4018	Mayenne	0.988	-3.531	0.997	278
3503	Socle du bassin versant de la Douve et de la Vire	1.002	-3.540	0.995	226
3502	Socle du bassin versant de la Seulles et de l'Orne	0.990	-4.168	0.994	215
3506	Socle du bassin versant de la Sienne	1.001	-4.898	0.995	196
4020	Sarthe Aval	0.991	-2.613	0.988	152
3504	Socle du bassin versant de la Sélune	0.985	-4.032	0.995	122
4032	Le Thoué	0.897	9.520	0.919	115
4026	Logne - Boulogne - Ognon - Grand Lieu	0.979	-1.559	0.994	112
4023	Romme et Evre	0.971	-2.364	0.992	107
4014	Rance - Frémur	1.119	-22.637	0.830	101
4039	Trieux-Leff	1.002	-2.898	0.999	97
4001	Le Léon	0.986	-4.883	0.946	91
4016	Couesnon	1.054	-20.253	0.927	88
4021	Oudon	0.969	-2.341	0.991	88
4028	Vie - Jaunay	0.960	-2.838	0.925	85
3505	Socle du bassin versant de la Sée	1.003	-3.560	0.999	84
4024	Layon - Aubance	1.000	-4.191	0.992	76

4029	Auzance - Vertonne - petits côtiers	0.968	-1.369	0.987	62
4009	Golfe de Saint-Brieuc	1.011	-6.317	0.993	62
4007	Aulne	1.048	-15.271	0.998	49
4025	Baie de Bourgneuf - Marais Breton	0.984	-3.258	0.952	37
4019	Sarthe Amont	0.962	0.710	0.988	35
4105	Maine	0.996	-5.881	0.902	34
4008	Baie de Morlaix	0.900	-5.371	0.689	31
4123	Marais de Dol	0.976	-18.679	0.949	30
4010	Blavet	0.989	-0.512	0.997	26
4002	Baie de Douarnenez	1.158	-20.866	0.884	24
4112	Elorn	1.009	-6.407	0.997	23
4004	Odet	0.892	-5.044	0.877	22
4040	Guindy-Jaudy-Bizien	1.046	-7.461	0.993	18
4012	Golfe du Morbihan	0.874	-2.338	0.968	17
4003	Baie d'Audierne	1.063	-6.956	0.989	16
4035	Ile d'Yeu	0.972	-1.214	0.992	16
4005	Baie de Concarneau - Aven	0.985	-11.665	0.990	12

Tableau 2 : Coefficients a, b, et R^2 pour les masses d'eau de Bretagne.

Au final, la carte de la (*Figure 13*) représente la distribution par masse d'eau du coefficient de corrélation R^2 (relation entre les facteurs a et b) calculé en Bretagne.

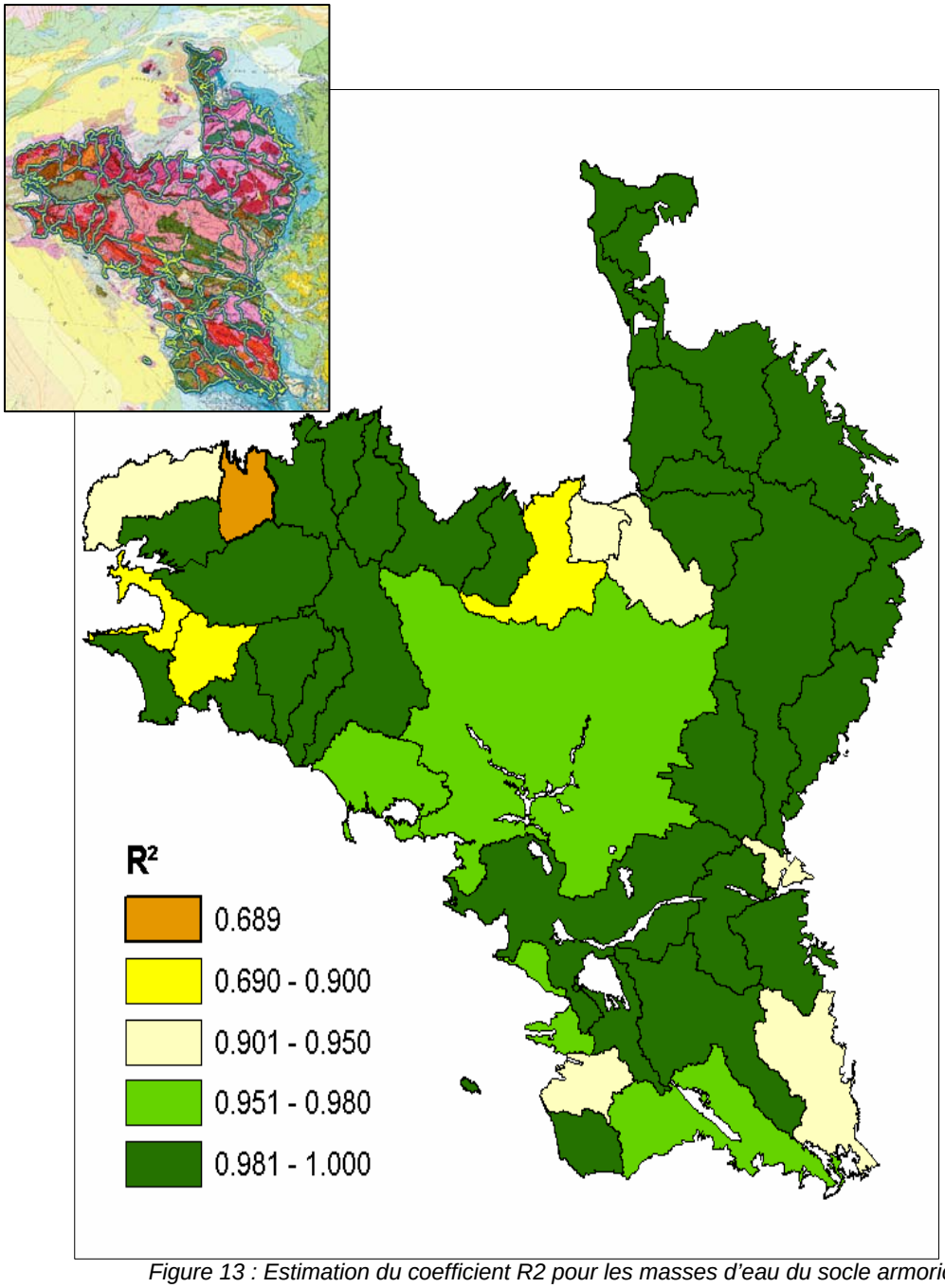


Figure 13 : Estimation du coefficient R2 pour les masses d'eau du socle armoricain.

Estimation d'un battement minimal

Pour calculer un indice de sensibilité à une remontée de nappe (résultat sur l'ensemble du Massif Armoricain en *Figure 15*, du Massif Central en *Figure 16* et du Massif des Vosges en *Figure 17*), l'estimation de la fluctuation des aquifère est nécessaire. En l'absence de chroniques en nombre suffisant, une approche indirecte est nécessaire. L'hypothèse directrice de cette approche découle d'une observation liée au fonctionnement en haute eaux des bassins versants :

- en période de hautes eaux, on assiste à la mise en eaux de thalwegs dans la partie amont des bassins, habituellement aux endroits où les cours d'eau ne sont pas pérennes. La surface piézométrique décrivant le phénomène des hautes eaux n'est donc plus limitée aux seules rivières pérennes. Sur les cartes topographiques les tracés des rivières non pérennes sont indiqués par un figuré en pointillé.

L'écart observé entre la surface piézométrique de hautes eaux et celle calculée précédemment pour les seules rivières pérennes, doit correspondre à un battement minimal de l'aquifère de socle (*Figure 14*). Malheureusement il n'est appréciable qu'en tête de cours d'eau.

Il n'est possible de l'apprécier par cette méthode qu'à partir de cartographie vectorisée qui identifie précisément les parties temporaires des cours d'eau en tête de bassin[5].

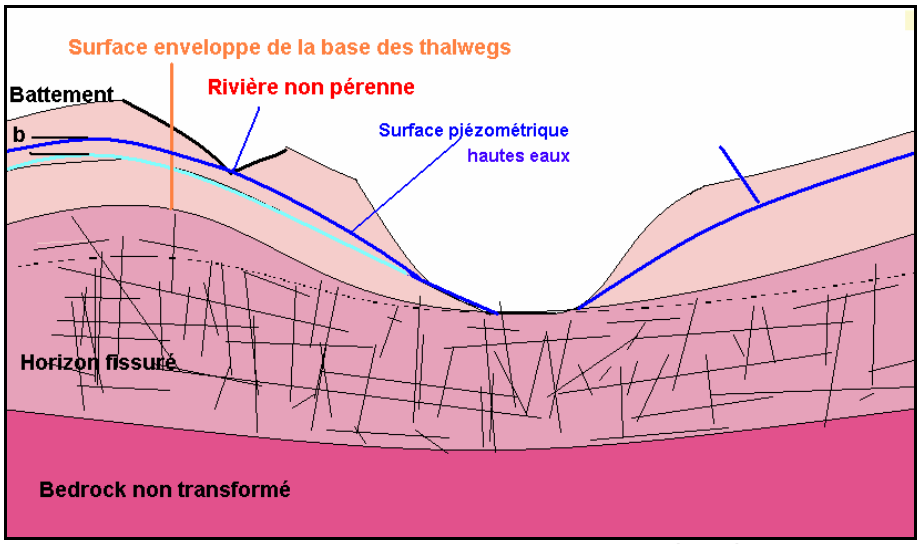


Figure 14 : tentative pour distinguer une variation piézométrique

[5] On soulignera que si la méthode a pu s'appliquer au Massif armoricain, cela n'a pas été possible pour les secteurs du Massif Central et du Massif des Vosges.

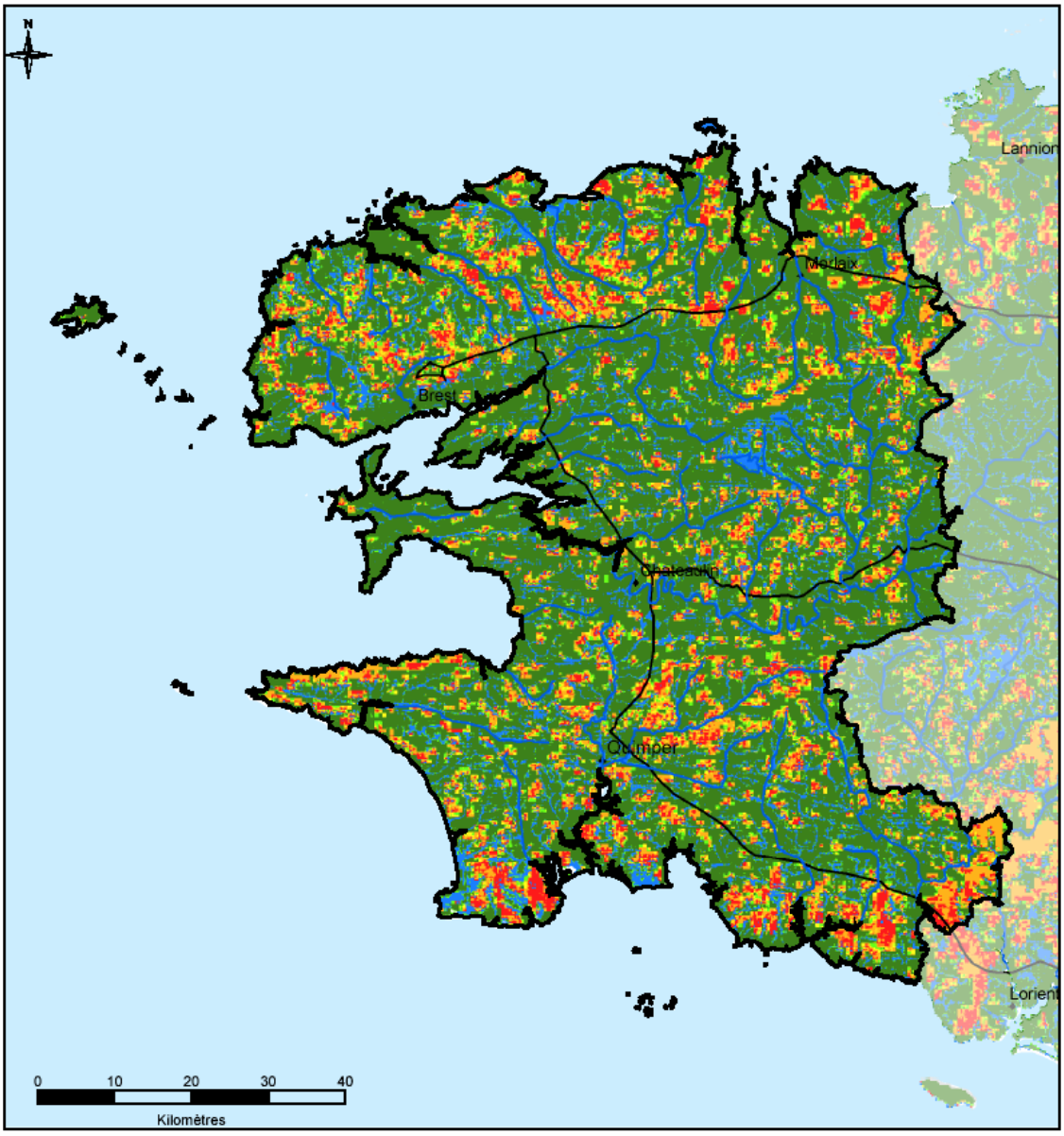


Figure 15 : résultat du traitement sur le socle du massif armoricain.

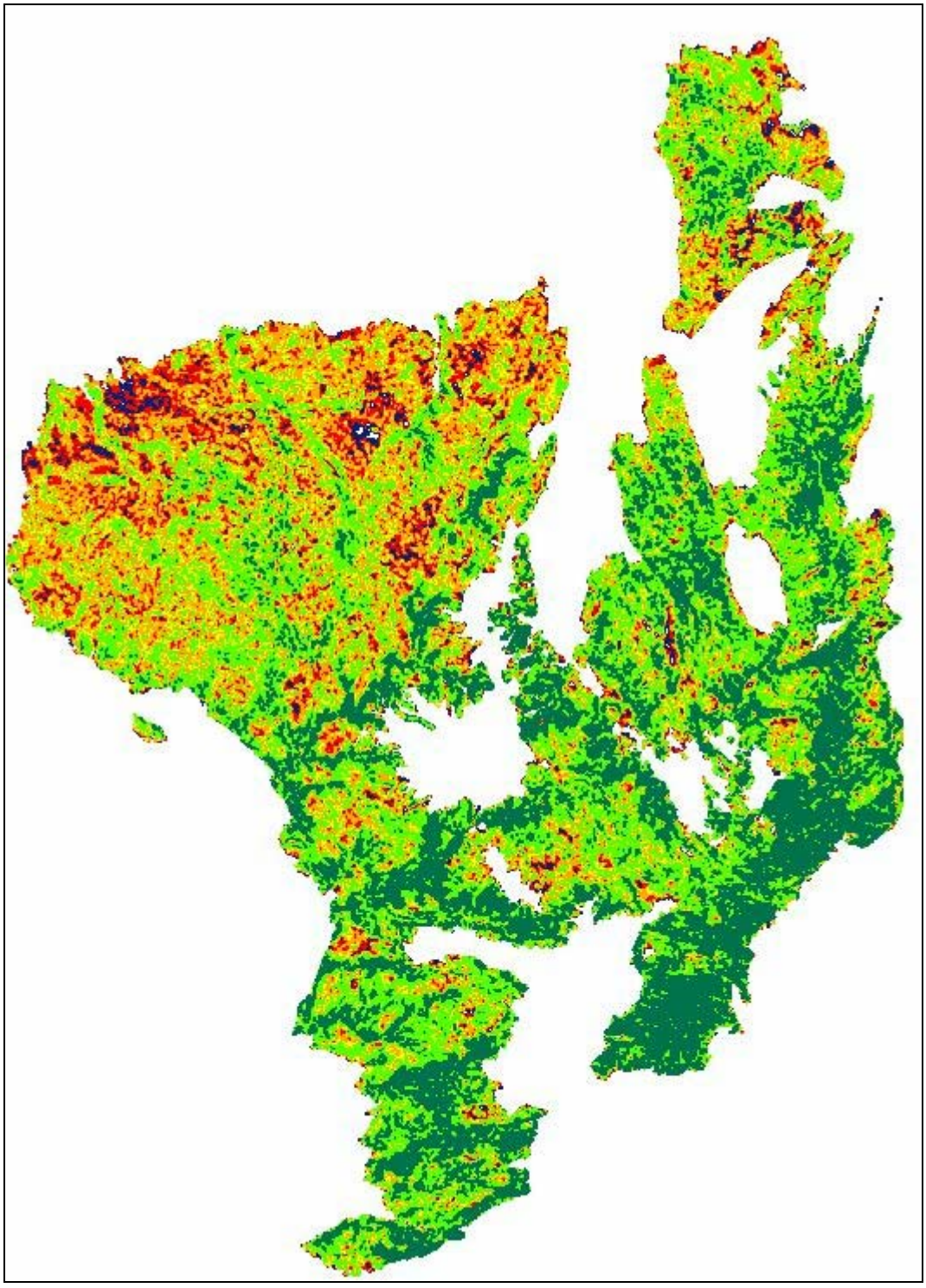


Figure 16 : résultat du traitement sur le socle du Massif Central

Figure 17 : résultat du traitement sur le socle des Vosges

3.5. Exemples de cartes de sensibilité.

Les cartes de sensibilité du Massif Central, Massif Armoricain et Massif des Vosges, principales structures de socle de France métropolitaine ont pu être calculées, mais ne sont pas toutes validées. Elles représentent une tentative pour estimer cette sensibilité.

Les valeurs de battements n'ont pas pu être calculées pour le Massif Central et le Massif des Vosges, faute de certains paramètres vectorisés sur les cartes IGN (parties amont des cours d'eau notamment). Pour ces secteurs des tentatives de cartes d'épaisseur de la ZNS ont été fournies, et qu'il convient encore de valider.

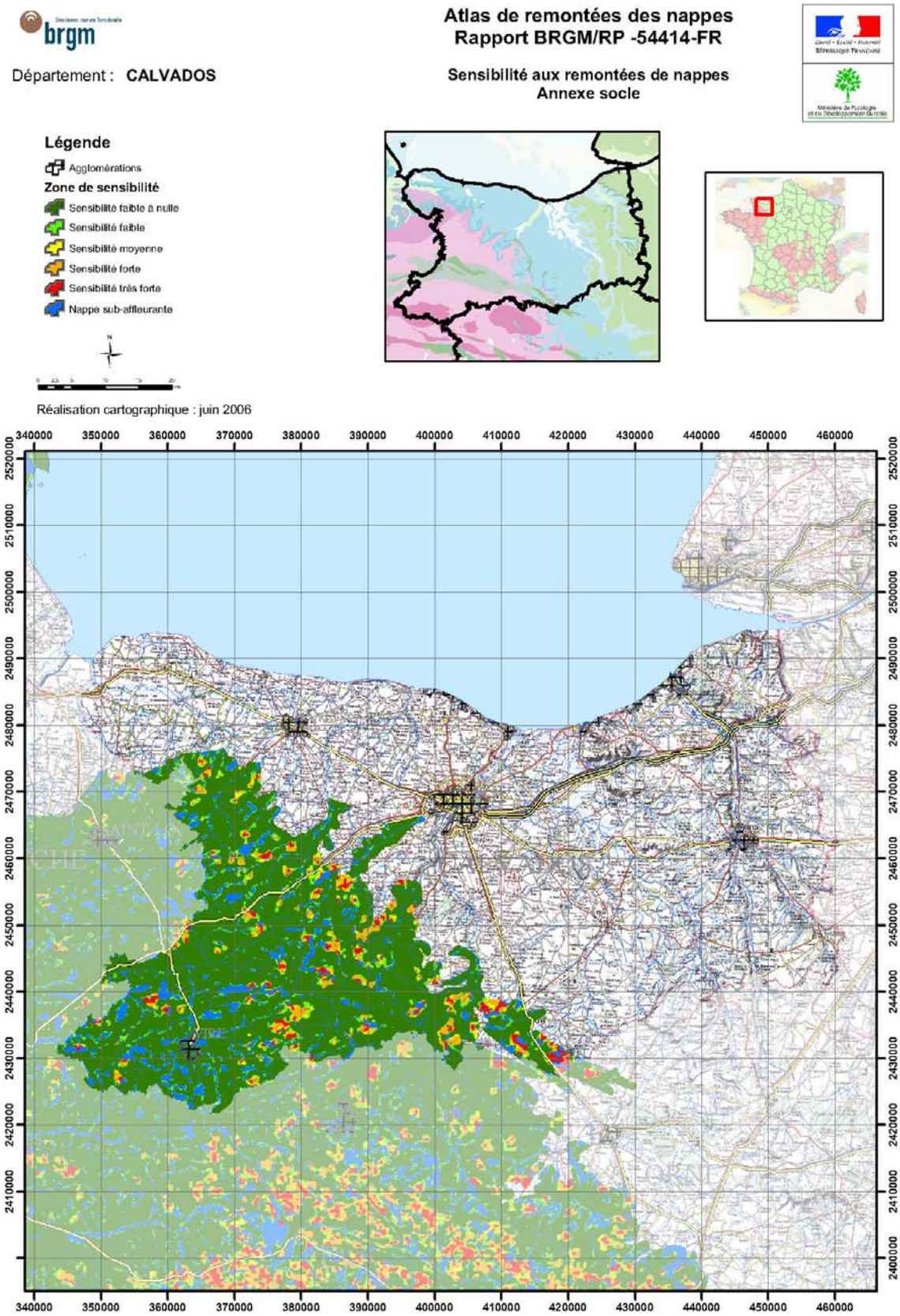


Figure 18 : Carte de sensibilité en domaine de socle (le Calvados)

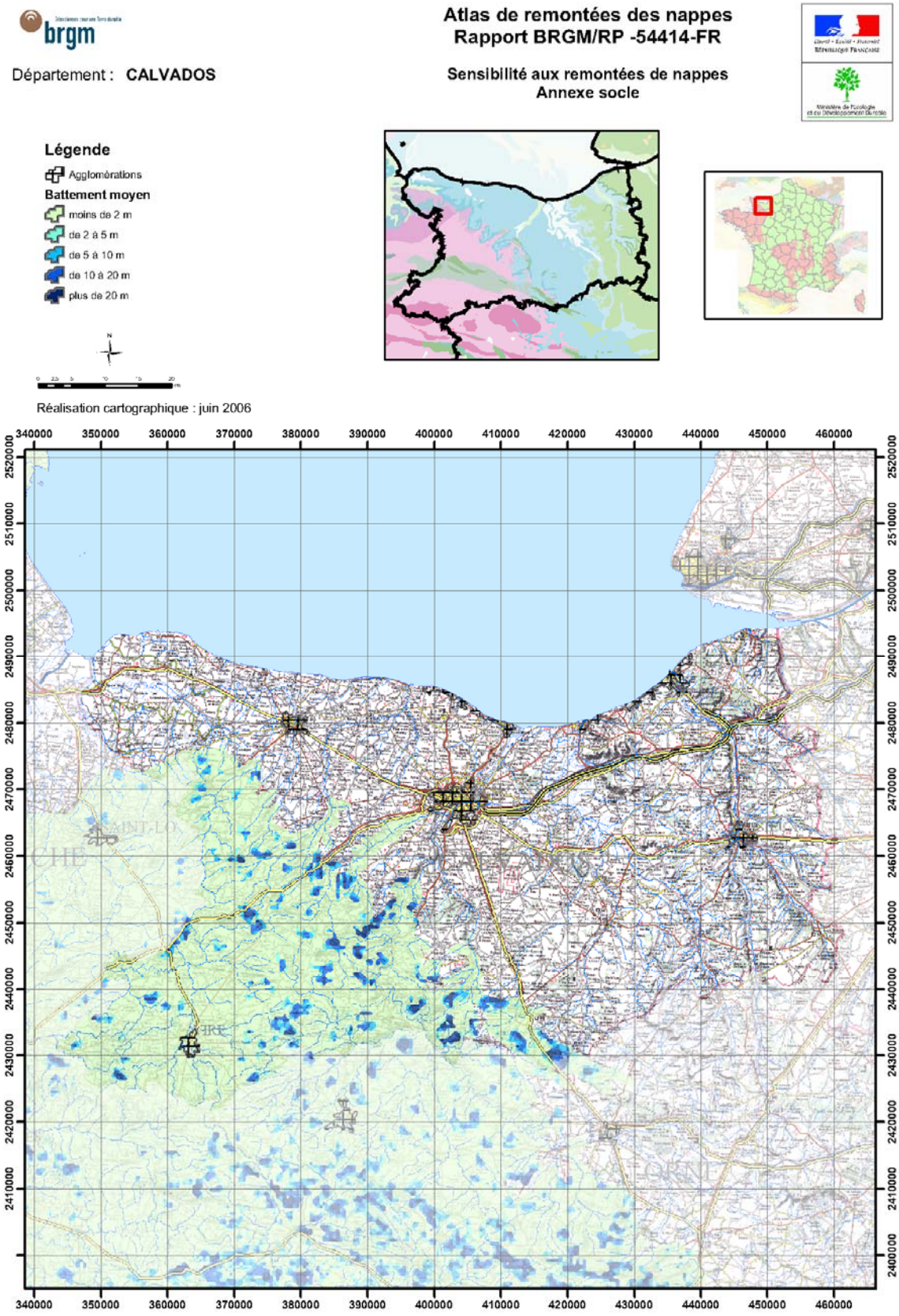


Figure 19 : Carte du battement de la nappe en zone de socle (secteur du Calvados)

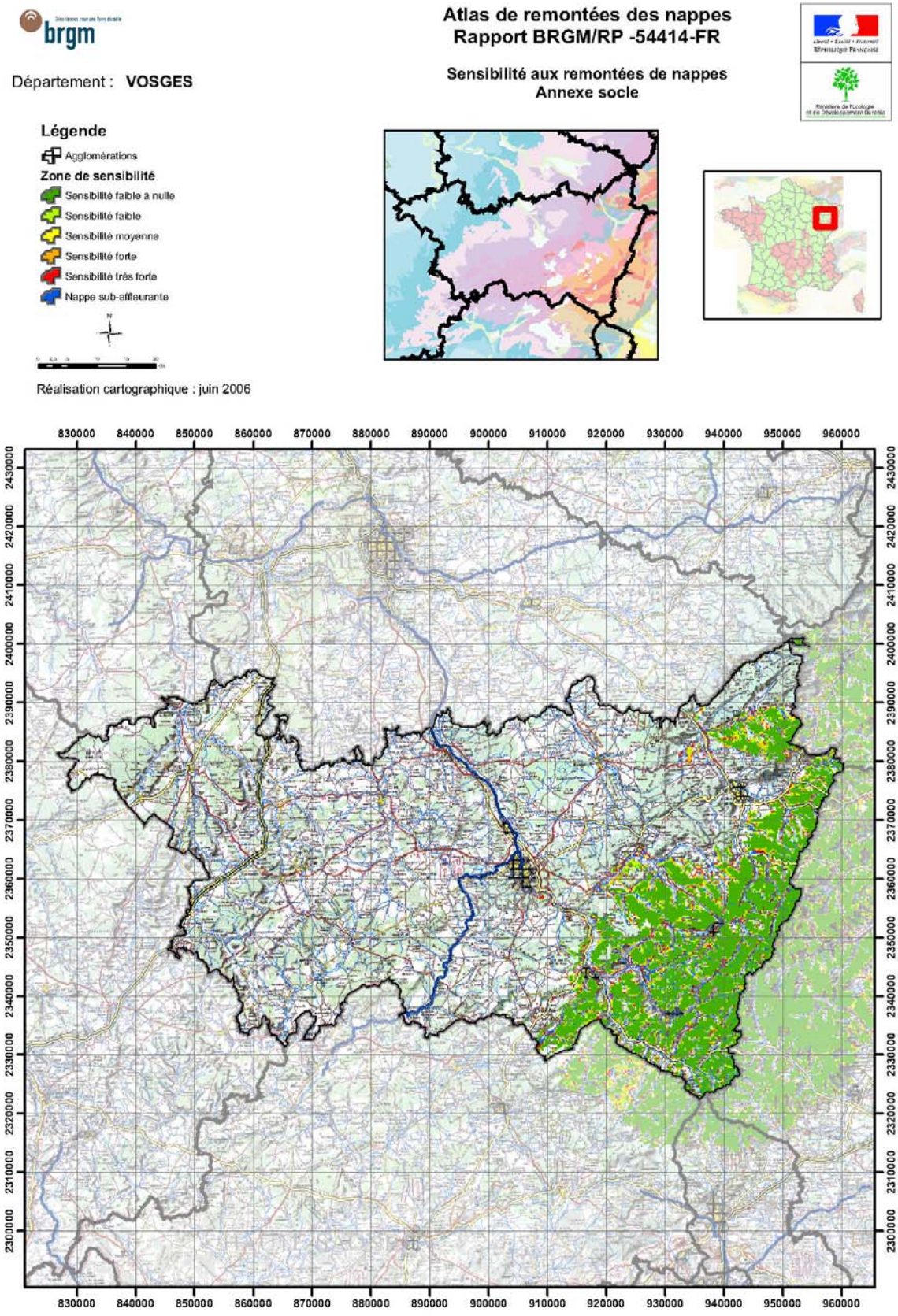


Figure 20 : Carte de sensibilité du département des Vosges (secteur de socle)

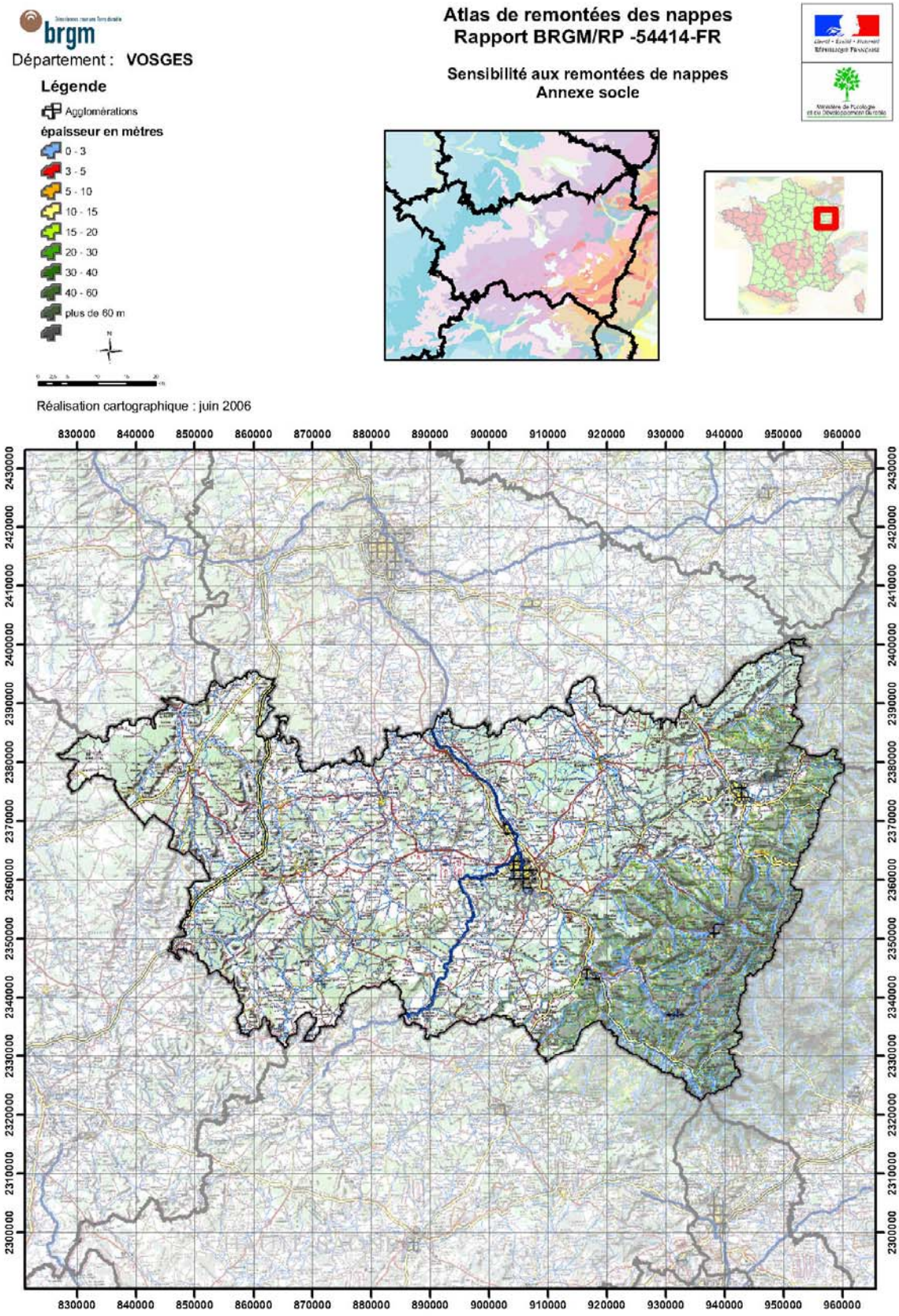


Figure 21 : Carte de l'épaisseur de la ZNS en secteur de socle (département des Vosges)

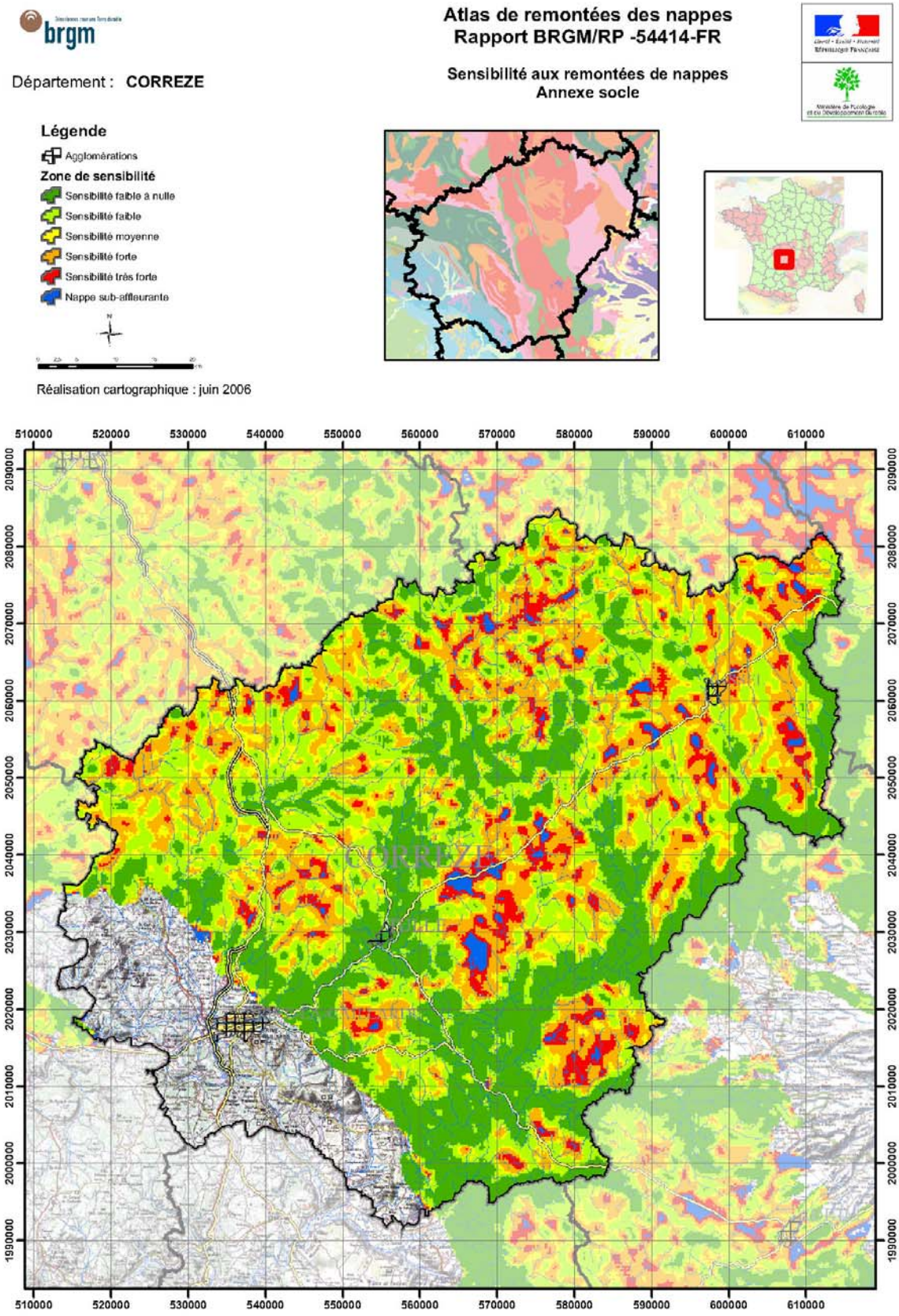


Figure 22 : Carte de sensibilité du département de la Corrèze (secteur de socle)

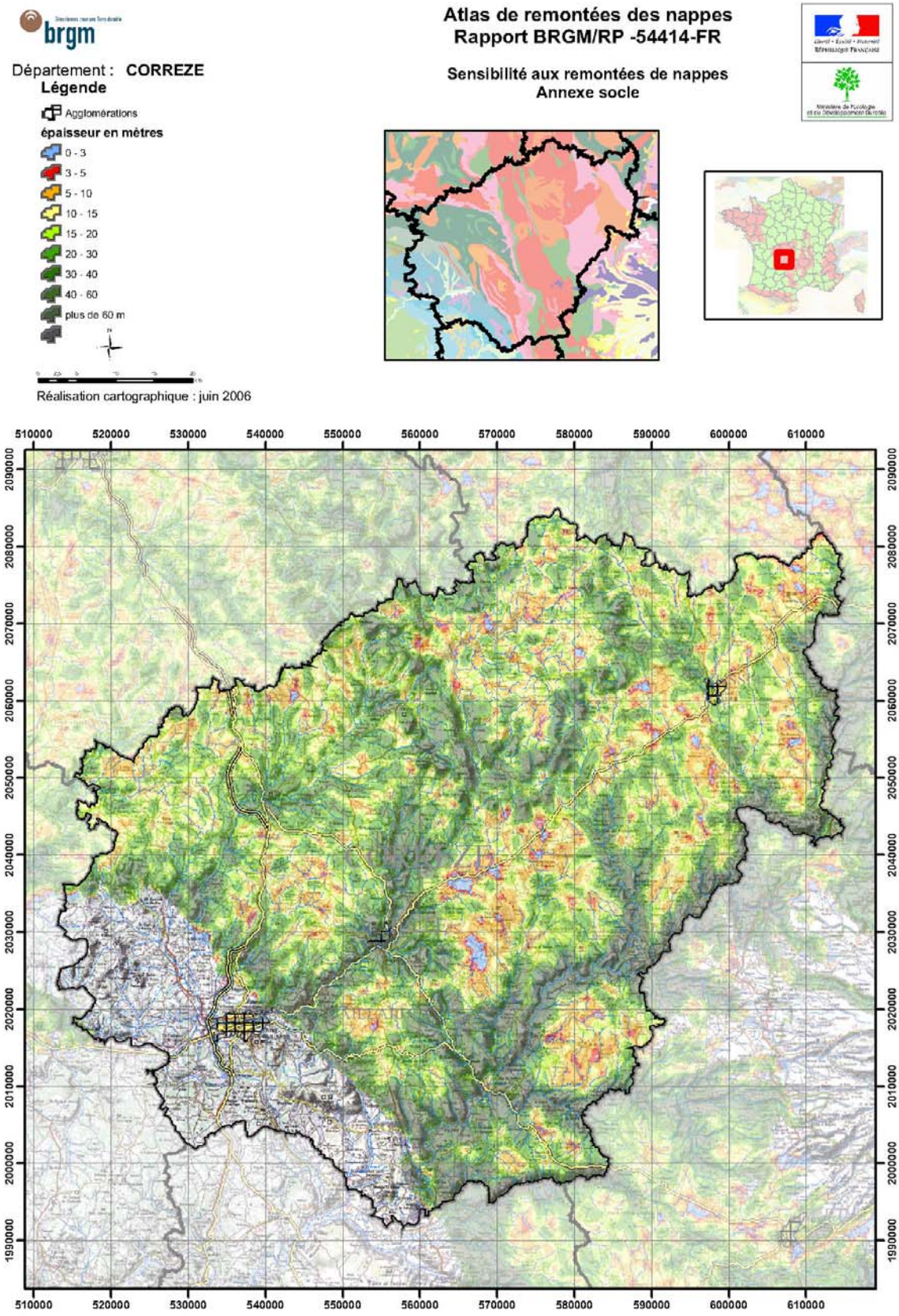


Figure 23 : Carte de l'épaisseur de la ZNS (département de la Corrèze)

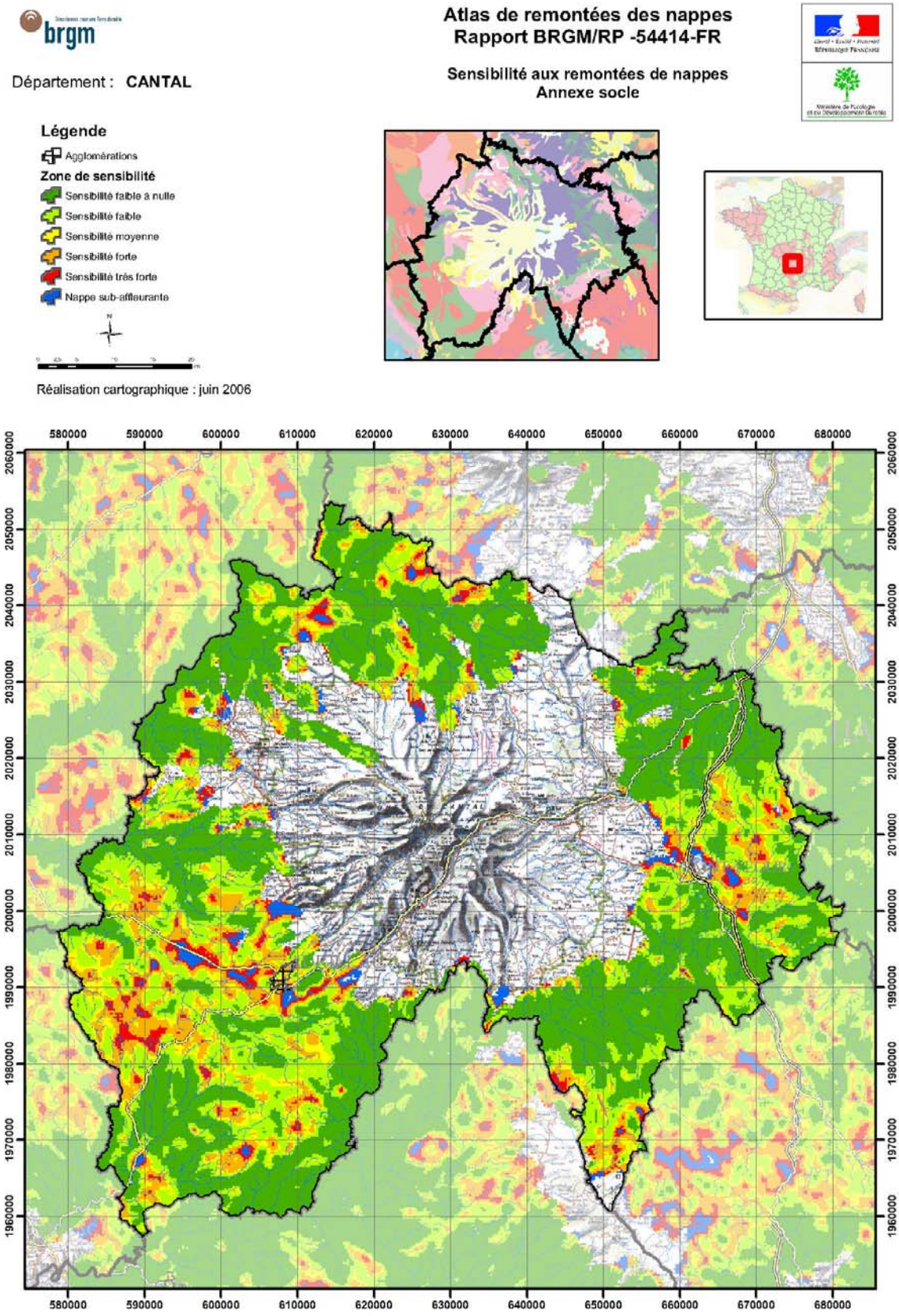


Figure 24 : Carte de sensibilité du département du Cantal (secteur de socle)

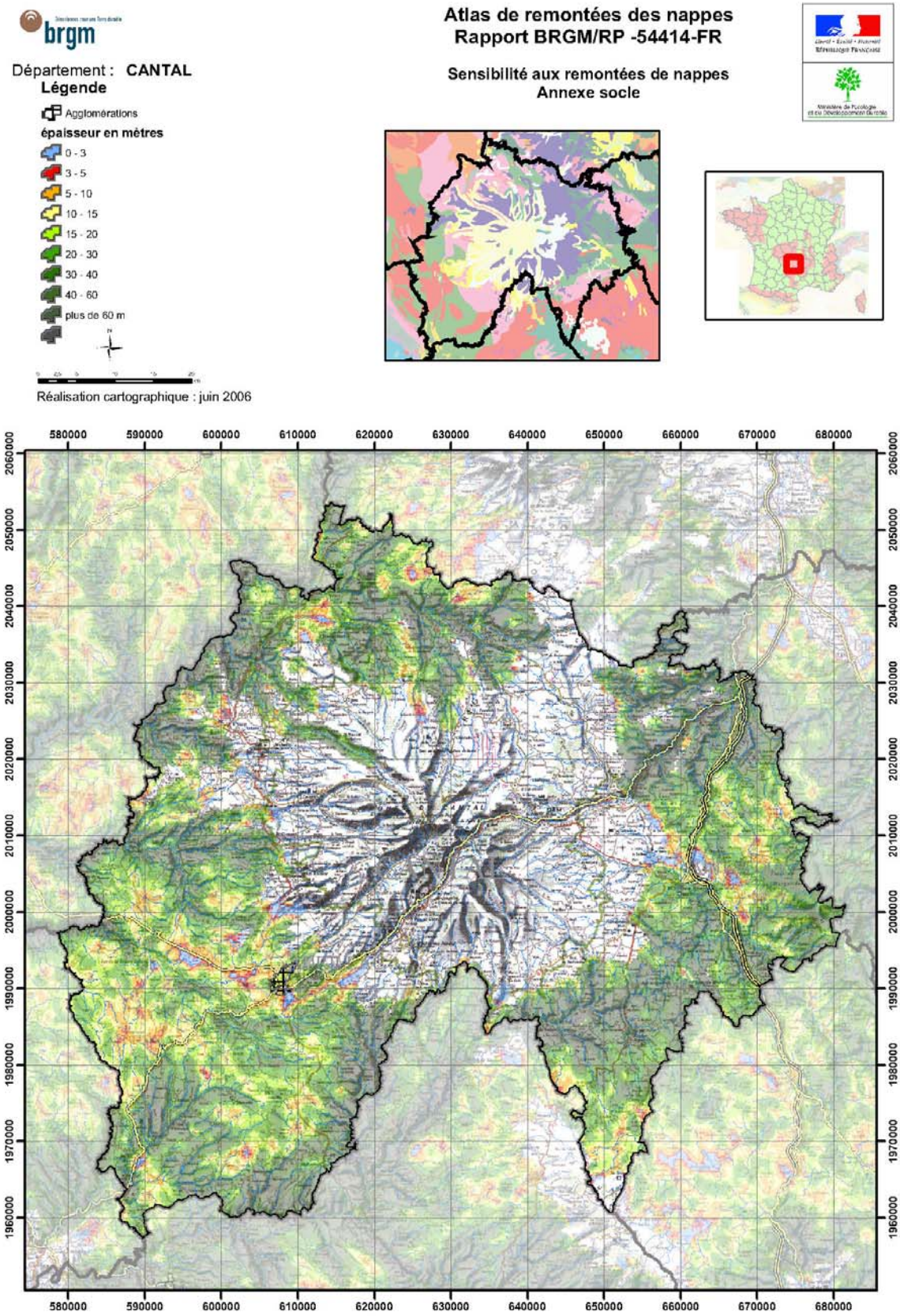


Figure 25 : Carte de l'épaisseur de la ZNS en zone de socle (département du Cantal)

4. Le site Internet

A la demande du MEDD et conformément à l'une des dispositions de la Convention, un site internet spécialement dédié aux remontées de nappes a été bâti. Il doit assurer un porté à connaissance en direction du public sur l'aléa "Remontées de nappes". Le présent chapitre donne des informations sur son fonctionnement, et sur les limites des informations qu'il fournit.

4.1. Les principales attentes du MEDD

Développé au BRGM à partir d'avril 2004, le site a été officiellement déclaré ouvert en février 2005. Les consignes du MEDD le concernant étaient les suivantes :

- Le principal niveau d'accès pour les sites "risques" de la DPPR doit rester la commune;
- L'approche DPPR est de bien séparer les types d'utilisateurs grand public et spécialiste. Les téléchargements étant en principe réservés à des spécialistes ; cette fonction ne doit donc être accessible qu'en marge de la page principale sous forme d'un onglet;
- La représentation de la sensibilité sera exprimée en pixels au maillage de 250 mètres;
- L'utilisateur doit passer par une page d'information spécifique à chacun des thèmes avec les précautions minimales de lecture;
- Un lien avec Prim.net doit être réalisé. A partir de ce site l'utilisateur sera dirigé vers le site dédié (remontées de nappes en l'occurrence), et pourra examiner le détail et l'intensité de la sensibilité.

4.2. Fonctionnement général du site

L'adresse choisie à la fin de 2004 par le MEDD a été la suivante :

http://www.inondationsnappes.fr

Le site permet la consultation de cartes de zones sensibles aux remontées de nappes. Dans un premier temps seuls 20 départements-tests pouvaient être consultés. En Novembre 2005, l'ensemble des départements de France métropolitaine (secteurs sédimentaires seulement) ont été ajoutés au site après réception des commentaires de validation et des avis des services régionaux du BRGM et des DIREN.

Le site est actuellement consultable :

- soit directement à partir de l'adresse du site-maître, dont la page d'accueil est reproduite ci-après;
- soit à partir du site du MEDD **Prim.net** (http://www.prim.net) à partir de l'onglet de recherche "Ma commune face au risque majeur".

Sur le site-maître, la page d'accueil représente l'ensemble des secteurs du territoire français métropolitain où à été calculée et représentée la cartographie que l'étude a réalisée. Selon des discussions qui ont eu lieu en juin 2006 entre le MEDD et le BRGM, la présentation des

sites de risques naturels élaborés par le BRGM doit être rendue homogène. Le site « Remontées » subira donc certaines modifications.

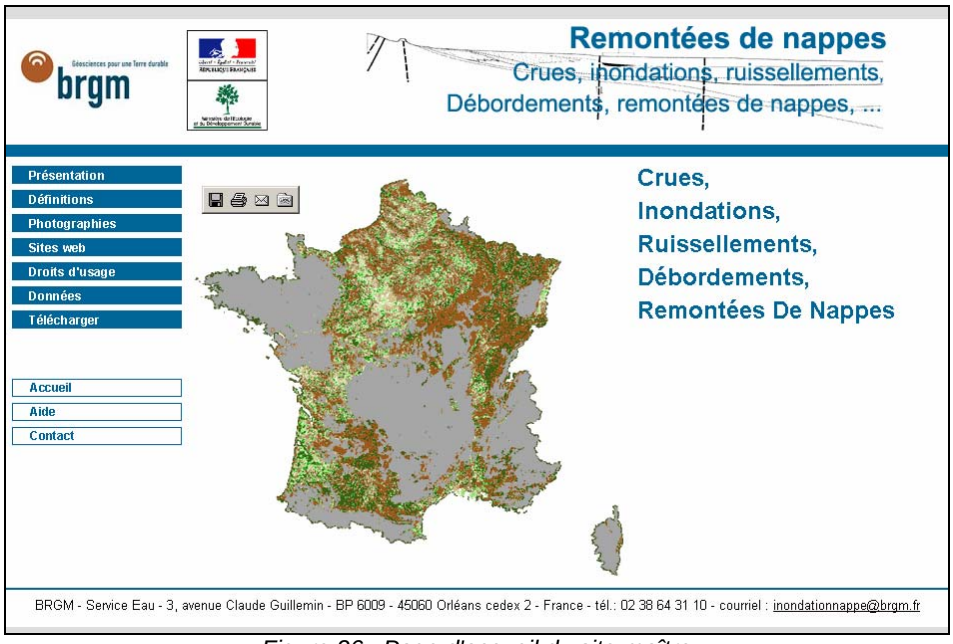


Figure 26 : Page d'accueil du site-maître

La page d'accueil (*Figure 26*) représente l'étendue des secteurs de France pour lesquels l'indice de sensibilité a été calculé. Les zones en gris sont exclues de l'étude et correspondent ❶ aux zones volcaniques ou de socle, ❷ aux zones intensément plissées (Alpes, Pyrénées par exemple), ❸ mais aussi aux secteurs où les données n'ont pas été jugées suffisantes ou assez bien réparties pour effectuer les calculs de sensibilité.

A partir de Prim.net (*Figure 27*), le lien hypertexte **"Accès à la cartographie du risque "remontées de nappes phréatiques"** sur la commune sélectionnée, donne accès au site précédent http://www.inondationsnappes.fr centré sur la commune recherchée :

Figure 27: Page d'accueil du site, ouvert par un lien à partir de Prim.net

4.1.1. Les onglets de consultation.

Les principaux onglets (*Figure 28*) de la page d'accueil sont les suivants :

Le premier onglet **"Présentation",** explique la formation du phénomène des remontées de nappes, ses origines, les conditions qui favorisent son déclenchement, ses conséquences. L'onglet **"Définitions"** explique ce qu'est une crue et un aquifère, et donne une typologie des remontées de nappes.

L'onglet **"Droits d'usages"** est un onglet par lequel l'utilisateur doit nécessairement passer lorsqu'il veut consulter ou télécharger les données. Il correspond à une reconnaissance par l'utilisateur de dispositions légales.

L'onglet **"Données"** permet la consultation des cartes. L'onglet **"Télécharger"** permet de récupérer les fichiers de cartes au format Shapefile d'ESRI ou MID/MIF pour Mapinfo.

Il existe aussi deux autres onglets **"Photographies",** et **"Sites web"** ce dernier représentant les liens et les logos des autres sites "Risques" élaborés pour le MEDD.

Figure 28 : Onglets de sélection

Les autres onglets correspondent ❶au retour à la page d'Accueil, ❷au renvoi à une adresse mail pour établir un contact avec le webmaster du site (Contact), et ❸à une rubrique d'Aide qui explique l'utilisation des boutons de la fenêtre de navigation de la cartographie, et donne une définition des couches utilisées par la méthode, et de certains termes hydrogéologiques utiles pour la méthode.

Onglet Données.

La consultation d'une carte (*Figure 29*) passe obligatoirement par la sélection préalable d'un département, puis d'une commune de ce département :

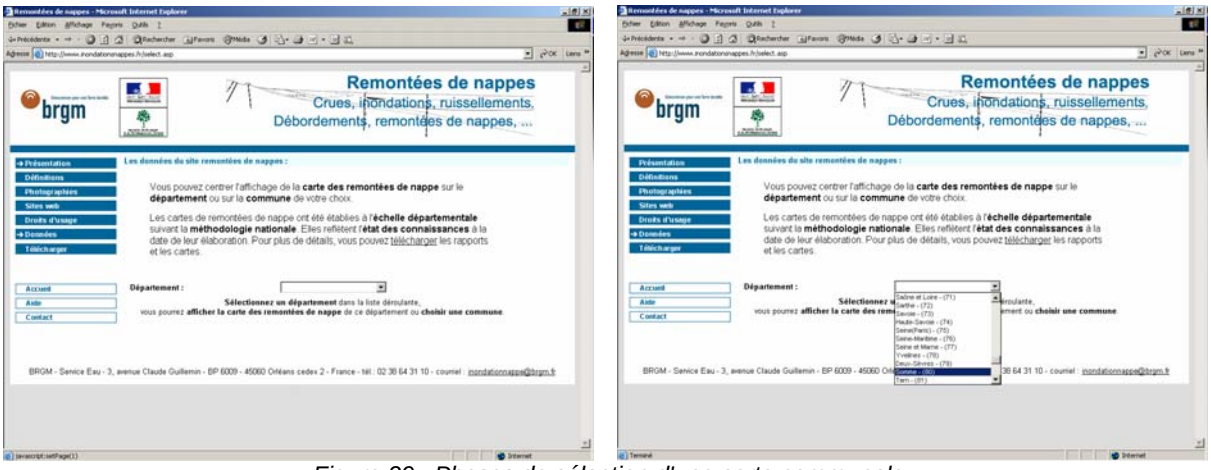


Figure 29 : Phases de sélection d'une carte communale

Elle aboutit à la visualisation de la commune sélectionnée, sous la forme dune plage de pixels de différentes couleurs (bleu-rouge-orangé-jaune-vert clair-vert foncé, *Figure 30*) correspondant à la hiérarchisation de la sensibilité aux remontées de nappes, et centrée sur la commune demandée

La hiérarchisation colorée de l'aléa est la suivante :

- bleu : nappe affleurant la surface
- rouge : très forte sensibilité
- orangé : forte sensibilité

- jaune : sensibilité moyenne
- vert-pâle : faible sensibilité
- vert-foncé : sensibilité quasi nulle.

La dimension de la fenêtre, modifiable, est par défaut de 550 x 500 pixels, chaque pixel représentant un carré de 250 mètres de côté sur le terrain.

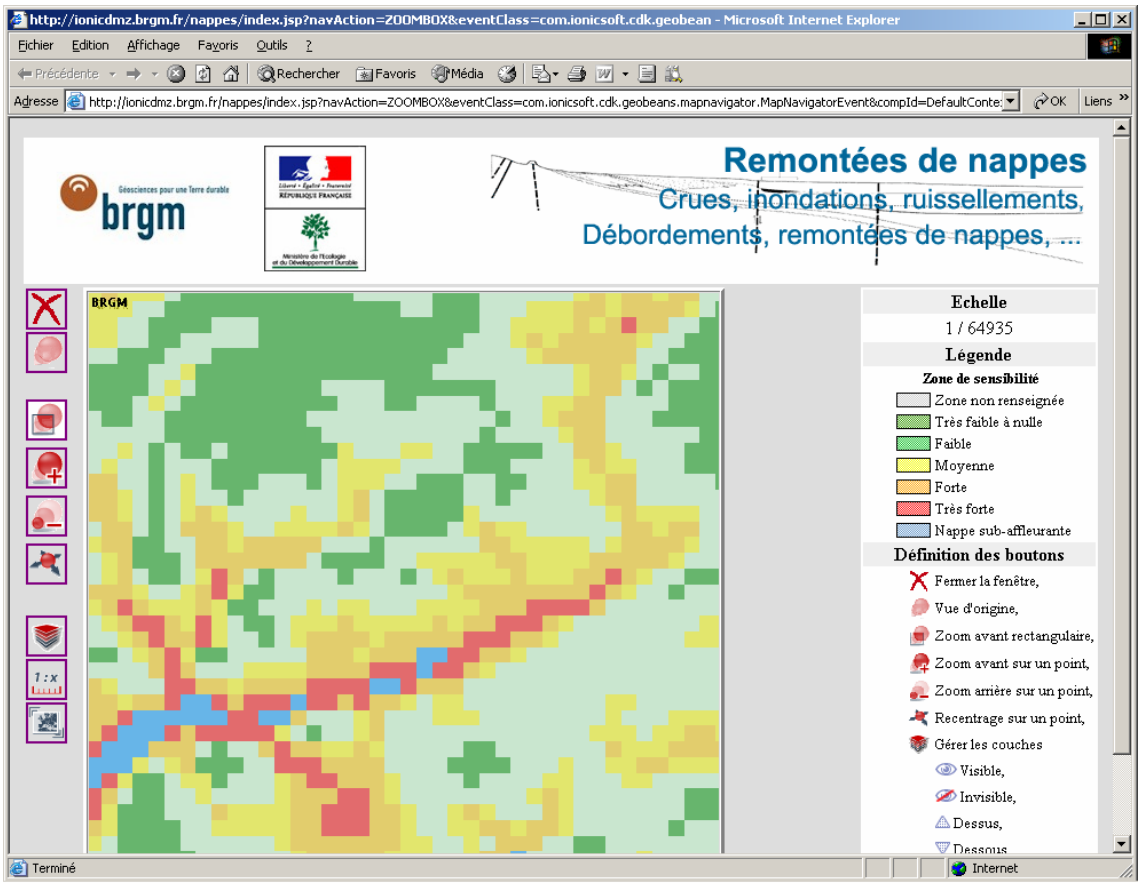
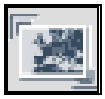


Figure 30 : Première fenêtre de sensibilité affichée lors de la consultation

Les outils de consultation des cartes.

permet de fixer une nouvelle échelle à la fenêtre de visualisation;


permet de réduire ou d'agrandir la fenêtre de visualisation (en nombre de pixels);

permet de visualiser les couches actives, de les rendre visibles/invisibles, et de les hiérarchiser;

et

permettent respectivement de zoomer et dé-zoomer sur la fenêtre.

le "zoom élastique" permet de zoomer sur un secteur particulier, le cadre sélectionné représentant l'espace total de la fenêtre;

permet de revenir à la fenêtre de la commune initiale;

permet de recentrer l'image sur une partie de la fenêtre (c'est le seul moyen de faire "glisser" l'image dans toutes les directions et remplace la "main" d'autres applications);

ferme la fenêtre de visualisation et permet de revenir à la sélection d'un département et d'une commune.

4.2. Les échelles de consultation des cartes.

La cartographie est consultable depuis l'échelle du 1:500 000ème jusqu'au 1:50000ème, afin de permettre à l'internaute de pouvoir se situer tant à petite échelle (au niveau d'un département par exemple), qu'à grande échelle à un endroit particulier d'une commune.

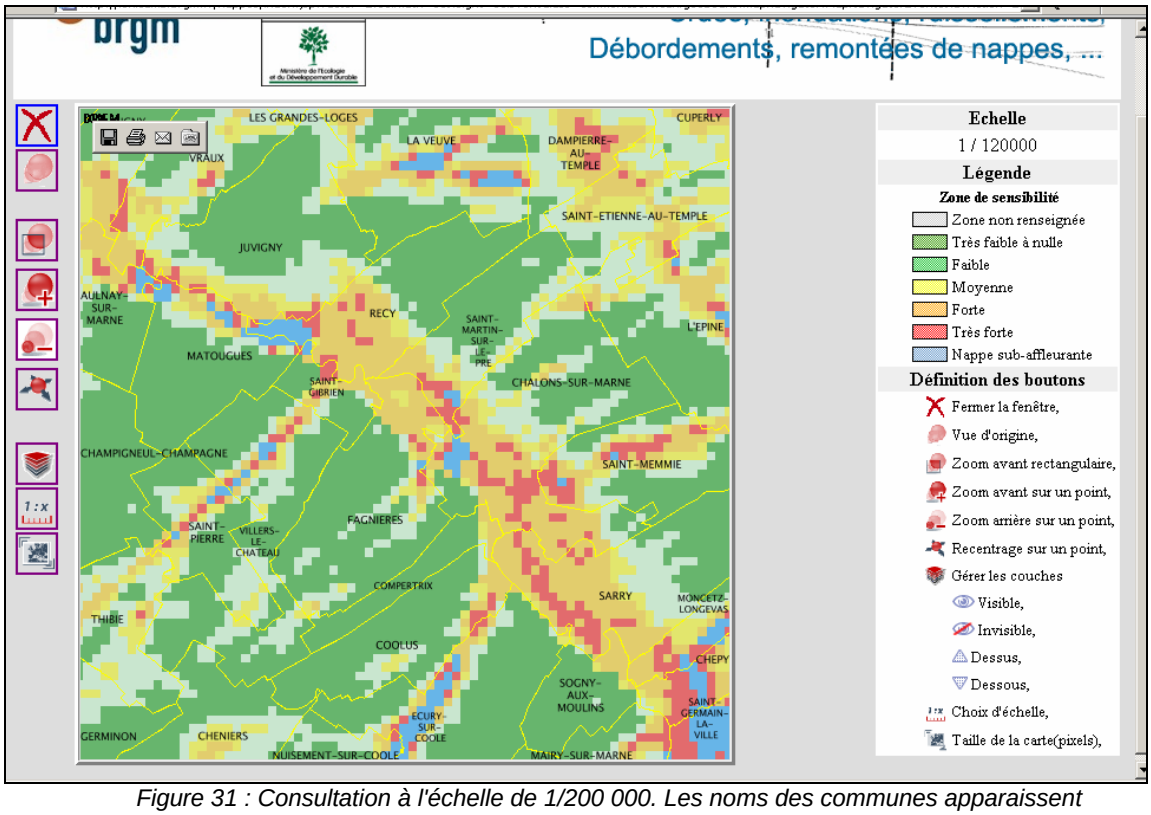


Figure 31 : Consultation à l'échelle de 1/200 000. Les noms des communes apparaissent

Aux grandes échelles le scan 25 de l'IGN apparaît en transparence, pour plus de commodité. La *Figure 32* montre la commune de Warloy-Baillon (Somme – haut bassin de l'Hallue) à l'échelle du 1/30 000ème. Mais actuellement l'échelle de consultation ne dépasse pas le 1/50000éme, les échelles plus précises n'étant pas pertinentes. Le village se situe sur la gauche de l'écran, et la source normale de l'Hallue se trouve au niveau du village.

La zone rouge correspond effectivement à la vallée sèche de l'Hallue, qui a été totalement inondée jusqu'à Senlis-le-Sec en 2001.

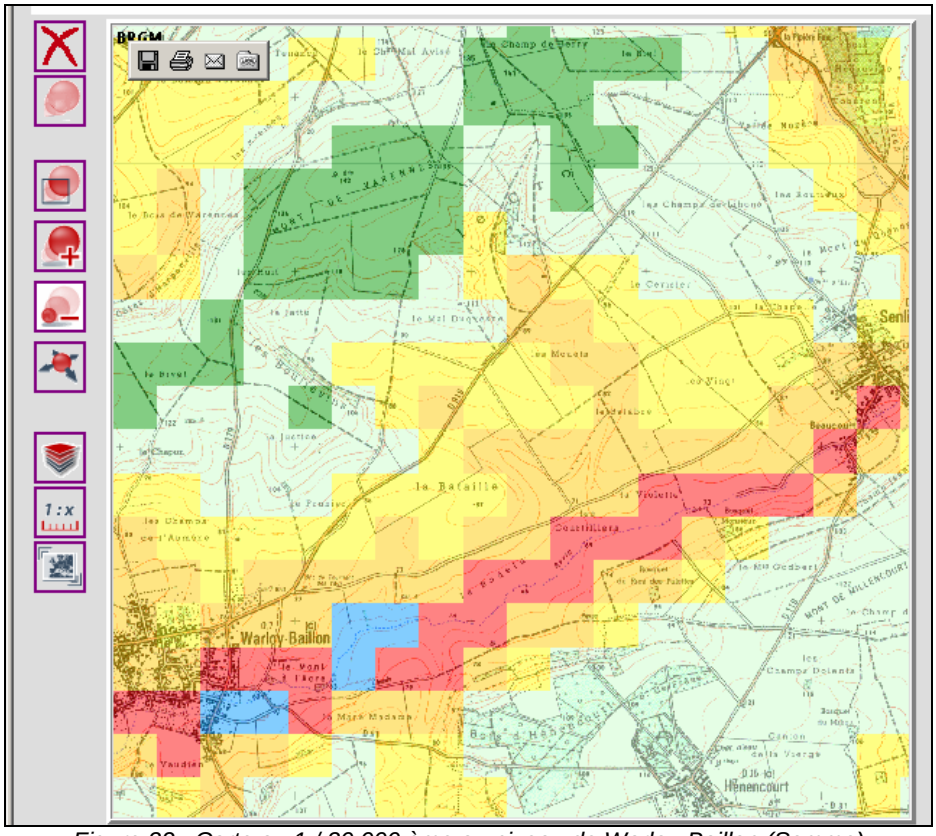


Figure 32 : Carte au 1 / 30 000 ème au niveau de Warloy-Baillon (Somme)

4.2.1. Les limites de l'utilisation de ces cartes

Mais en raison même de la possibilité de se situer à grande échelle, il convient de mettre en garde les utilisateurs sur les limites de l'utilisation de cet outil**. Il faut rappeler que l'objectif de cette cartographie est avant tout** :

- de repérer à l'échelle du 1:1 000 000ème les zones sensibles aux remontées de nappes sur le territoire national –donc à grande échelle- , et de pouvoir repérer à cette échelle les zones les plus sensibles;
- éventuellement de comparer entre elles – de manière qualitative- les sensibilités des différents secteurs d'une commune;
- *mais non d'établir des limites précises entre les différentes classes de sensibilité au niveau de la commune.* Les données de base utilisées dans cette méthodologie ne permettent pas une telle finesse de diagnostic.

Il n'est donc pas possible – cela sera expliqué plus loin – **d'utiliser cet outil pour définir avec précision les limites de l'aléa**, par exemple pour définir le périmètre d'un Plan de Prévention Inondation par Remontées.

Pour éviter la tentation naturelle de repérer les variations de sensibilité sur des points de détail à petite échelle, il eût été possible de ne représenter par exemple **que la sensibilité moyenne d'une commune**. Mais l'information n'eût pas paru tenir compte de la variabilité spatiale de cette sensibilité. La sensibilité varie en effet en fonction du relief, du type d'aquifère, de sa masse, et de l'amplitude annuelle des niveaux des nappes. La cartographie telle qu'elle est actuellement représentée a donc l'avantage de permettre à celui qui la consulte de constater cette diversité, **mais n'autorise cependant pas à s'en servir à des fins réglementaires**. Il est toujours possible de revenir à une représentation à plus grande échelle, si on s'aperçoit que l'utilisation de l'information conduit à des abus.

5. Typologie de la piézométrie en secteur de remontées de nappe

Ce chapitre tente d'expliquer l'occurrence des remontées de nappes de façon préférentielle dans certains aquifères. La forme et l'amplitude des hydrogrammes de certains piézomètres semblent être une piste pour déceler les secteurs sensibles aux remontées de nappes.

5.1. Aquifère de la Craie en Picardie

Si on compare les chroniques des piézomètres d'Autheux, de Senlis le Sec, de Lignières Chatelain, de Cuvilly, et de Morvillers-Saint Saturnin (*Figure 33* à *Figure 37*), tous installés dans la craie de Picardie, on constate qu'ils possèdent tous le même type d'amplitude interanuelle (20 mètres environ), et que l'amplitude annuelle varie entre 5 et 10 mètres, sauf dans les années très sèches.

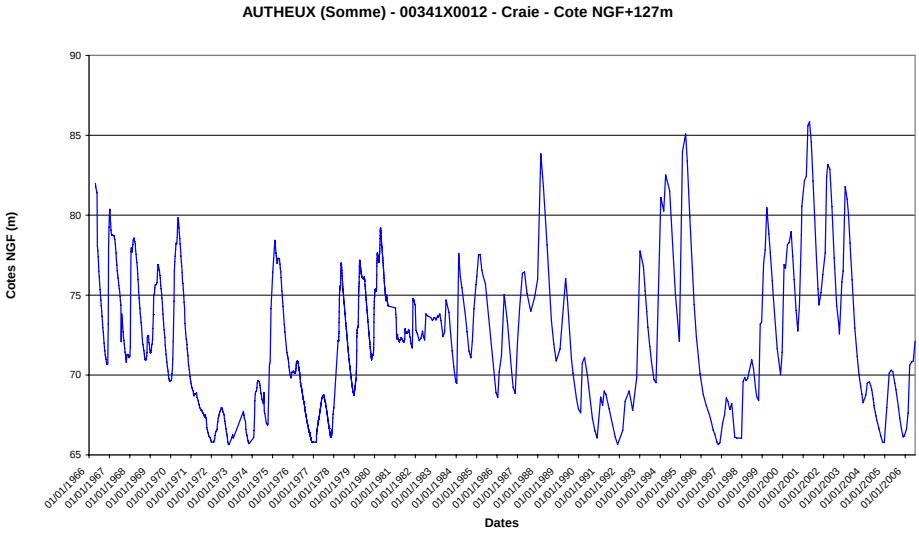


Figure 33 : Piézomètre d'Autheux (Somme)

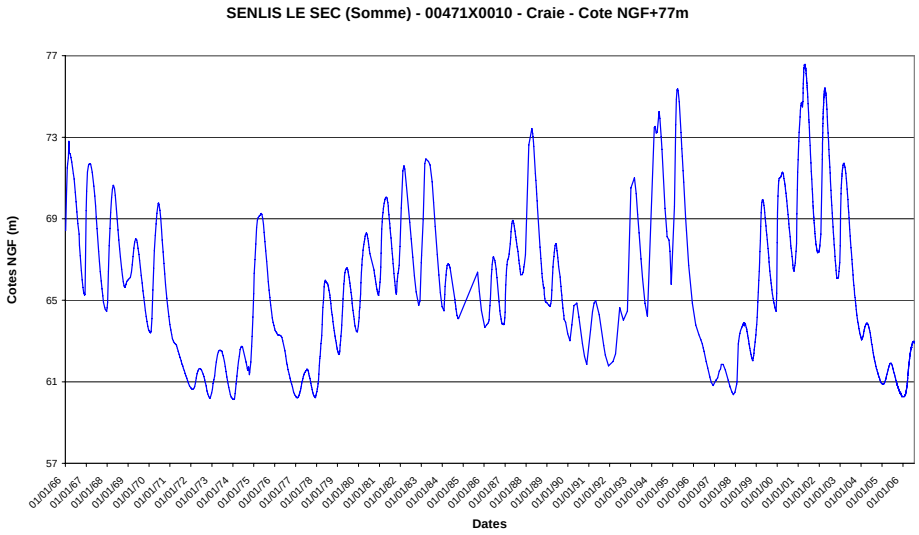


Figure 34 : Piézomètre de Senlis-le-Sec (Somme)

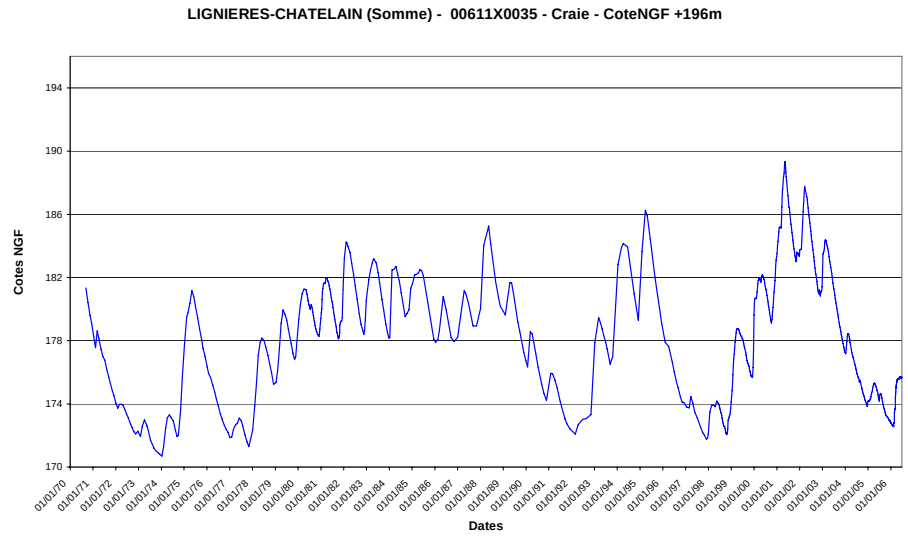


Figure 35 : Piézomètre de Lignières-Chatelain (Somme)

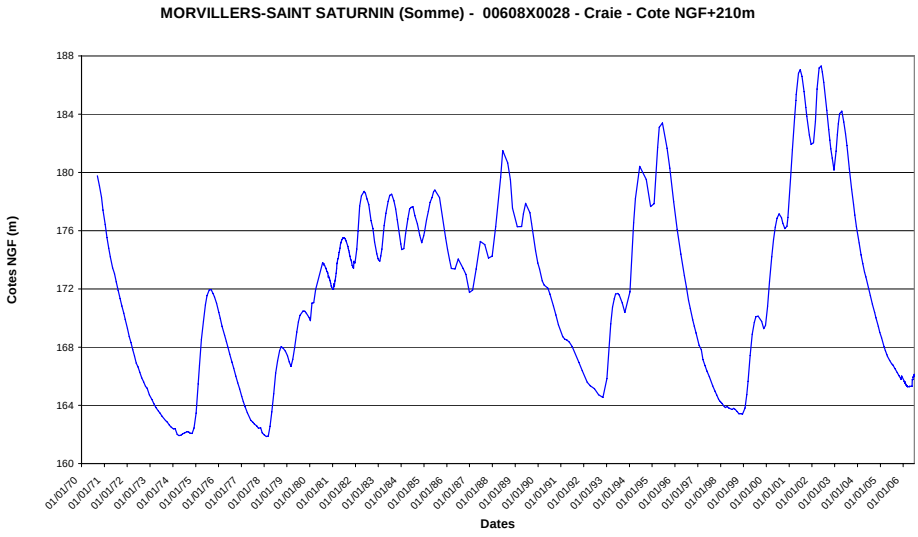


Figure 36 : Piézomètre de Morvillers Saint Saturnin (Somme)

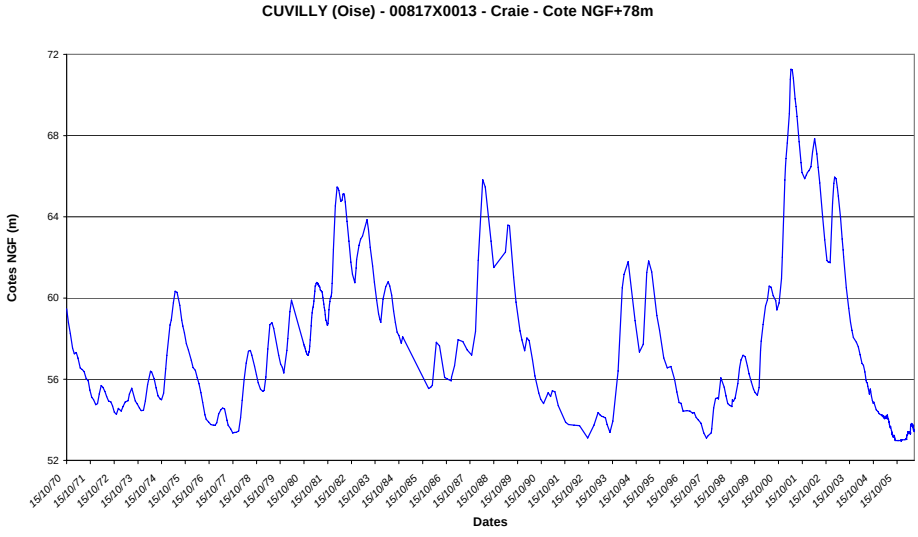


Figure 37 : Piézomètre de Cuvilly (Oise)

Ces hydrogrammes sont très analogues. On constate deux choses principales : le décalage des étiages par rapport à la saison sèche, qui peut atteindre six mois, et qui est caractéristique des grands aquifères à forte inertie ; on constate aussi qu'avant les pics de hautes eaux de 1982, 1988, 1995 et 2001, les étiages précédant ces années atteignaient une cote chaque année plus élevée, pour finalement terminer par une amplitude anormalement importante :

- à Cuvilly (Oise) par exemple, à l'étiage de 78 (janvier 1978 à 53.45m) succède l'étiage de 79 (février 79 à 55.45), puis l'étiage de « 1980 » en décembre 79 (cote 56.31), puis l'étiage de janvier 81 (57.35), l'étiage d'octobre 81 (58.75), puis le déclenchement des hautes eaux de mars 82 (cote maximum 65.42, avec 6 mètres d'amplitude dans la dernière année).
- à Senlis-le-Sec (Somme), à l'étiage de décembre 97 (60.5m) succède l'étiage de novembre 98 (62.2m), puis celui de décembre 99 (54.5m), puis d'octobre 2000 (66.6m), puis le déclenchement des hautes eaux jusqu'en mai 2001 (cote maximum atteinte à 76.4m, avec 10 mètres d'amplitude dans la dernière année).

Le point important à retenir est que lorsqu'on constate ainsi pendant plusieurs années de suite une augmentation de la valeur des étiages consécutifs, cela signifie que l'aquifère est très proche d'avoir constitué le maximum de ses réserves. Une année de plus de ce régime excédentaire peut mener à une remontée de nappe.

Ce type d'hydrogramme semble également indiquer que le piézomètre est éloigné d'axes importants de drainage, qui autrement contribueraient à abaisser le niveau de la nappe.

L'influence de ces drainages éventuels peut même masquer le phénomène : dans l'optique de créer de nouveaux piézomètres d'observation il sera préférable de les installer au cœur du système et à l'écart des grands systèmes de drainage.

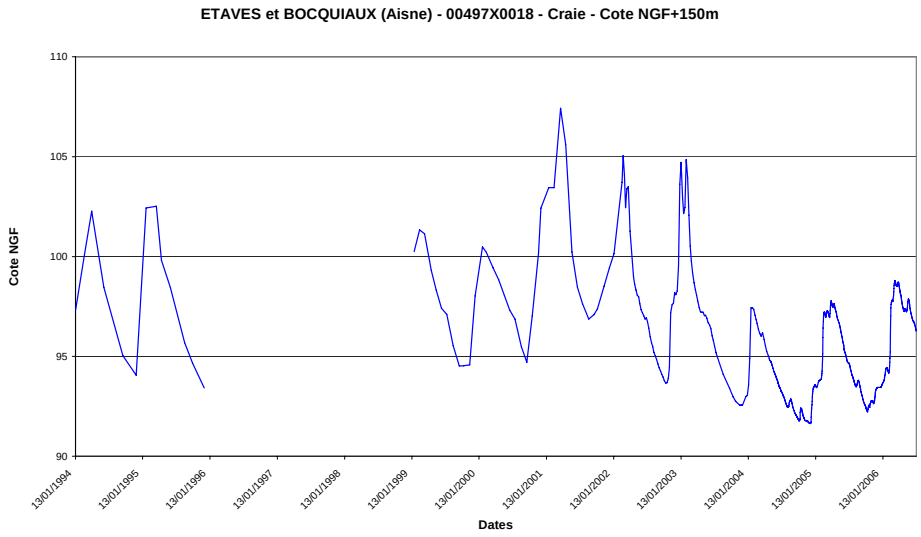


Figure 38 : Piézomètre d'Etaves-et-Bocquiaux (Aisne)

En revanche si on examine le piézomètre d'Etaves et Bocquiaux (*Figure 38*), on constate que si globalement ses caractéristiques sont voisines des précédents, les étiages successifs d'avant l'épisode de remontée de 2001 ne montrent pas d'augmentation flagrante de leurs cotes. Cet exemple montre que d'autres faits peuvent avoir une influence sur l'hydrogramme, et que dans le cas d'aquifère de cette taille, la vigilance doit être régionale.

5.2. Aquifères de la région Centre

La *Figure 39* montre, à la même échelle que précédemment, le piézomètre de Bouglainval, un des plus proches de Saint-Laurent-la-Gâtine, **dans la nappe de la craie**, où s'est produit une remontée de nappe en 2001. On remarque que l'amplitude interanuelle est plus faible qu'en Picardie à Bouglainal (de l'ordre de 7 mètres au lieu de près de 20), avec des fluctuations annuelles qui peuvent être très faibles (de l'ordre du mètre). Mais « l'ascension » des étiages successifs est encore bien visible et caractéristique de l'aquifère de la craie.

Le piézomètre de Bu (Eure et Loir) montre des variations interannuelles (*Figure 40*) très similaires à celles de la craie de Picardie (de l'ordre de 15 mètres), et des variations annuelles de l'ordre de 4 mètres.

Chuelles (Loiret) montre le même type de fluctuation, quoique atténué, (*Figure 41*) interannuelle (8 m) et 2 à 3 m d'amplitude annuelle, mais les pics de remontées se situent en 2002 et 2003.

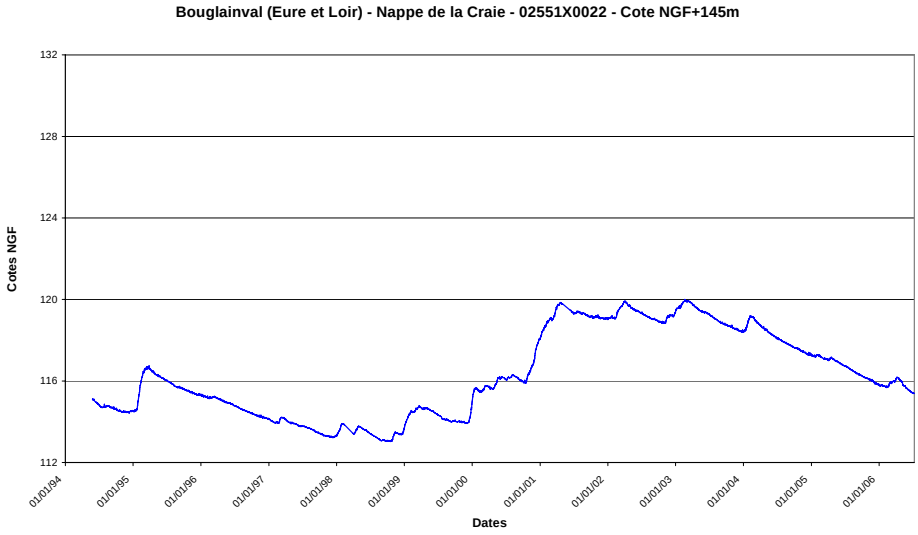


Figure 39 : Piézomètre de Bouglainval (Eure-et-Loir), près de Saint Laurent la Gâtine

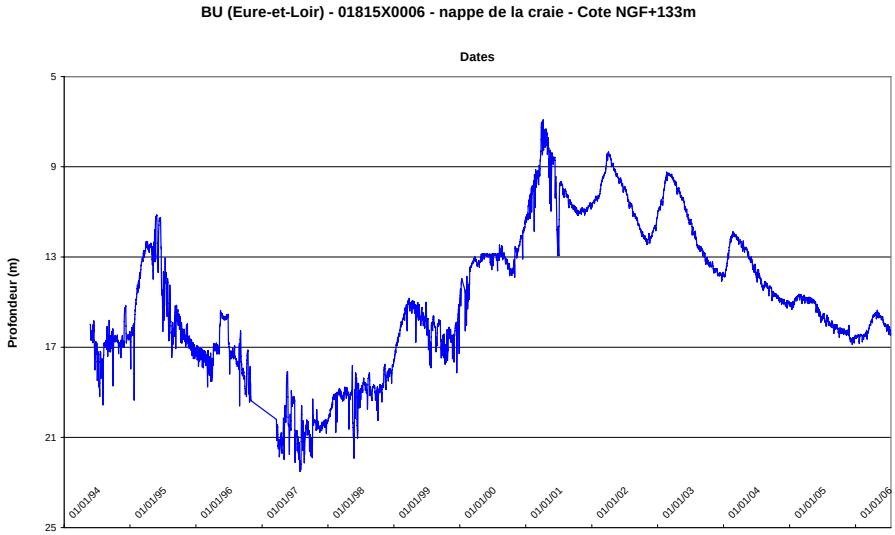


Figure 40 : Piézomètre de Bu (Eure-et-Loir)

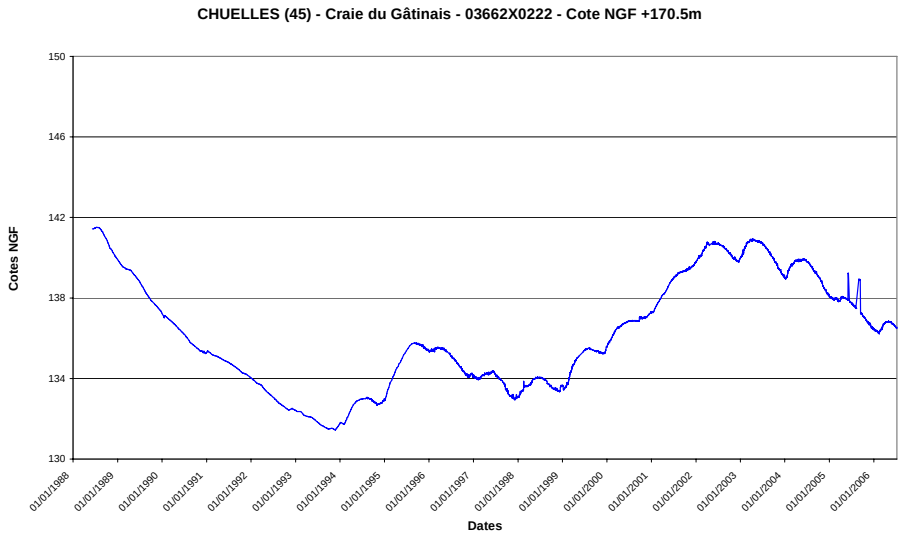


Figure 41 : Piézomètre de Chuelles en Gâtinais (Loiret)

Le piézomètre de Santenay (Loir-et-Cher) montre le même type de caractéristiques que les deux précédents, mais les autres piézomètres installés dans la craie en Région Centre (Parçay-Meslay et Ballan-Miré en Indre-et-Loire, Logron et Bonneval en Eure-et-Loir) montrent des amplitude bien moindres (de l'ordre de 3 à 4 mètres interannuel, et de l'ordre de 1 à 2 mètres de fluctuations annuelles). C'est probablement parce qu'ils se situent plus près des principaux axes de drainage (*Figure 42* et *Figure 43*).

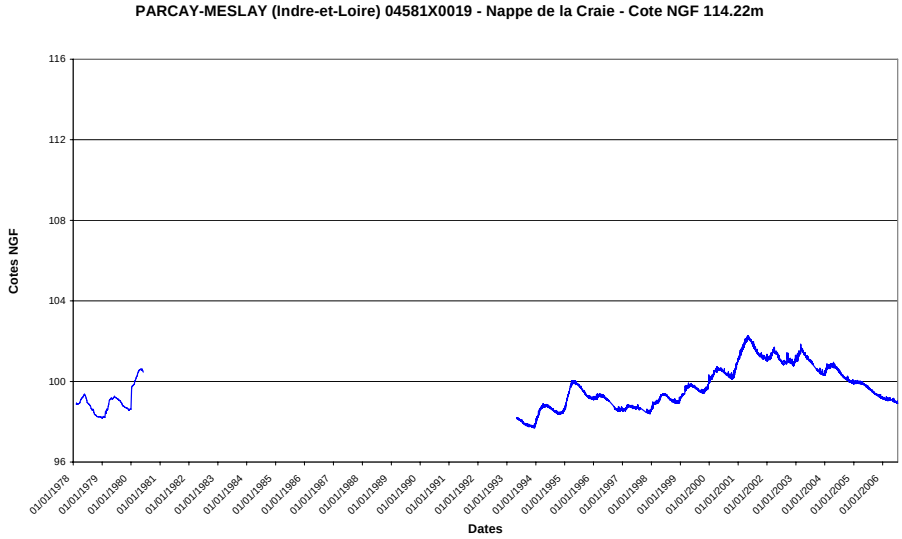


Figure 42 : Piézomètre de Parçay-Meslay

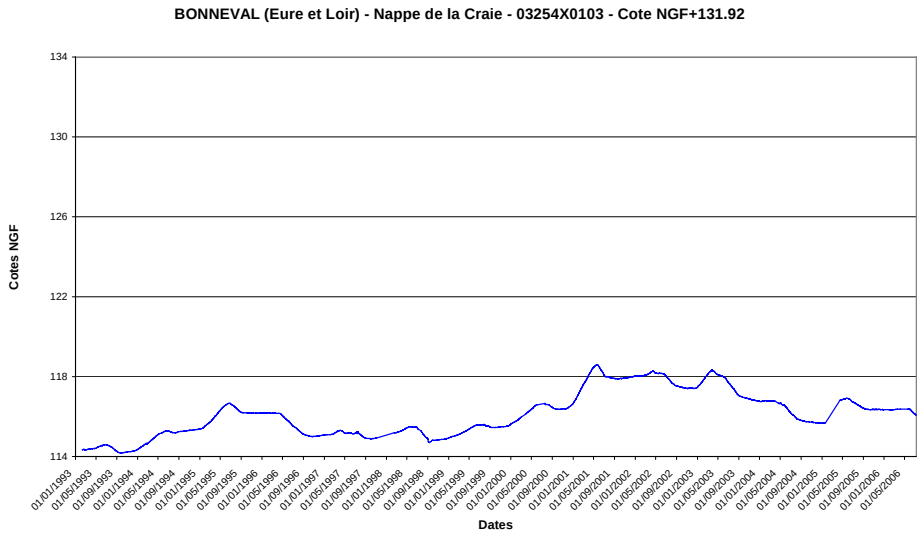


Figure 43 : Piézomètre de Bonneval

La *Figure 44* montre l'hydrogramme du piézomètre de Levet (Cher), proche de Saint Germain des Bois et de La Guerche sur l'Aubois, où ont été rapportés des épisodes de remontées de nappes en mai 2001. Ce piézomètre contrôle l'aquifère calcaire du Jurassique supérieur, donc à l'est des auréoles de la craie et du Cénomanien.

On distingue dans ce type d'aquifère - comme dans la craie quoique sous une forme plus atténuée - l'évolution croissante des étiages.

La « montée en puissance » des réserves de l'aquifère est cependant moins importante que dans la craie. Ce caractère semble confirmé par des pics mutiples de hautes eaux que l'on peut interpréter comme des vidanges rapides après recharge, et qui pourraient indiquer qu'un drainage de l'aquifère assez rapide fonctionne.

A priori, l'inertie d'un tel aquifère serait donc moins importante que celle de la craie, et représenterait donc un danger moindre (passage plus rapide de la crue de remontée). L'aquifère des calcaires de l'Oxfordien est d'ailleurs connu pour être peu épais, mais très transmissif.

L'évolution des étiages doit cependant pour chaque cas être confronté à l'évolution des prélèvements au voisinage du piézomètre utilisé pour l'observation.

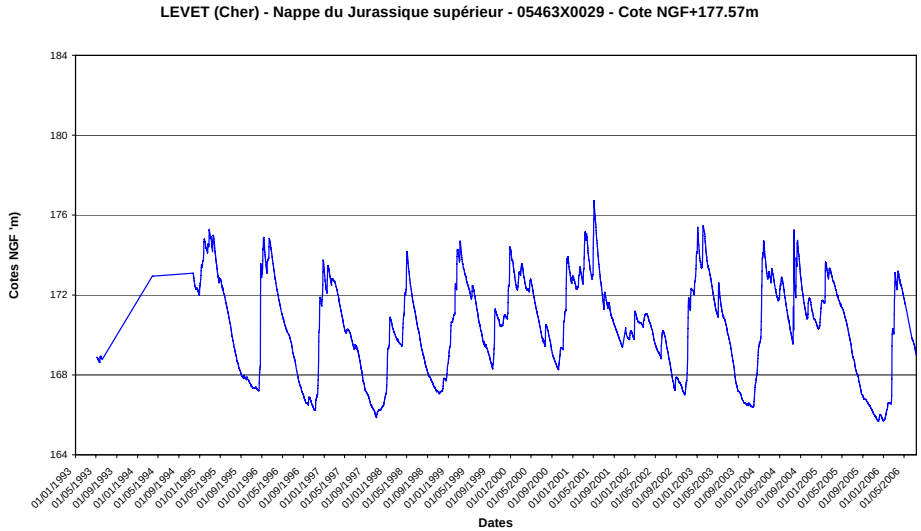


Figure 44 : Piézomètre de Levet (Cher)

Dans le Cher, le piézomètre de Saint-Loup des Chaumes (*Figure 45*) contrôle les calcaires du Berry, qui sont des formations tertiaires incrustées dans les formations du Secondaire. La montée en puissance n'existe quasiment plus. La variation interannuelle est difficile à apprécier, et même les variations annuelles sont faibles (de l'ordre du mètre). Il est vrai qu'il est très proche d'un axe majeur de drainage.

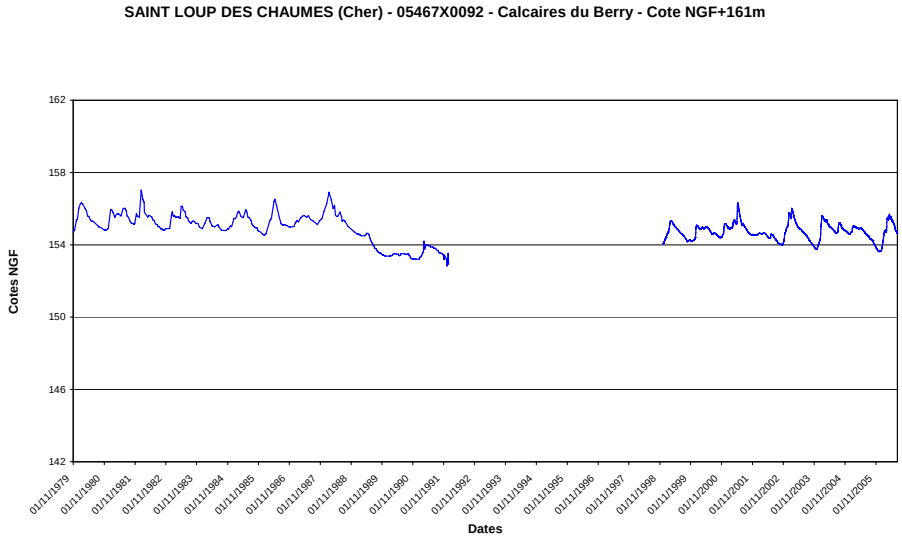


Figure 45 : Piézomètre de Saint Loup des Chaumes

5.3. Aquifère de la Craie en Nord Pas de Calais

Les figures suivantes montrent des piézomètres situés en Nord - Pas de Calais dans différents contextes. Celui de Tincques (Pas de Calais, *Figure 46*), situé au centre du massif crayeux (cote NGF 116.5 m) en plateau, montre une amplitude interannuelle très comparable à celle qui est constatée en Picardie (10 à 15 mètres) et une amplitude annuelle de l'ordre de 5 à 7 mètres. Il montre aussi qu'en 1937 des hautes eaux très proches de la cote atteinte en 2001 se sont produites. Les piézomètres de Marcoing et surtout de Lieu Saint Amand (Nord, *Figure 47* et *Figure 48*) situés plus bas, montrent des fluctuations beaucoup plus faibles. Là encore la proximité des axes de drainage est influente.

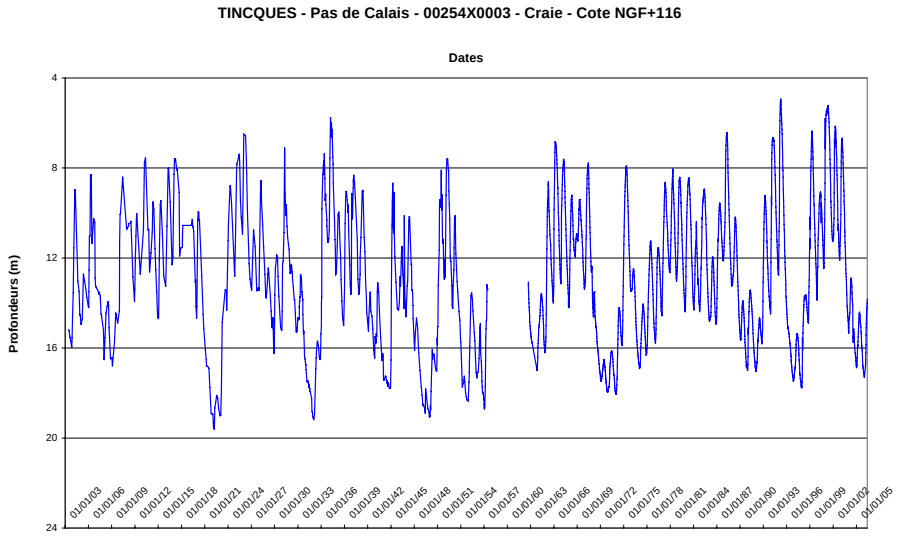


Figure 46 : Piézomètre de Tincques (Pas de Calais)

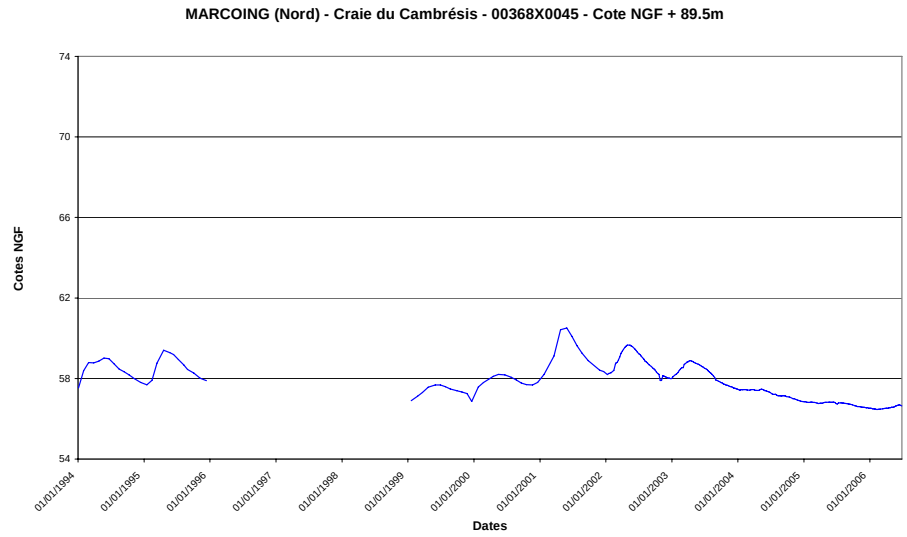


Figure 47 : Piézomètre de Marcoing (Nord)

En comparaison avec les variations classiques de la craie, les piézomètres contrôlant l'aquifère des sables du Landénien montrent des variations très différentes, tel celui de Bourbourg (sables « pissards », *Figure 49*). On peut expliquer pour les raisons suivantes :

- d'un côté, par une plus grande réactivité de cette dernière nappe à la pluviométrie et à l'infiltration, en raison, à la fois, de sa très faible profondeur et de son bon drainage spécifique,
- de l'autre, par une sensibilité moindre de celle de la craie aux précipitations, à cause de sa profondeur moyenne plus forte et de son inertie plus importante (grande extension du réservoir et drainage moins rapide).

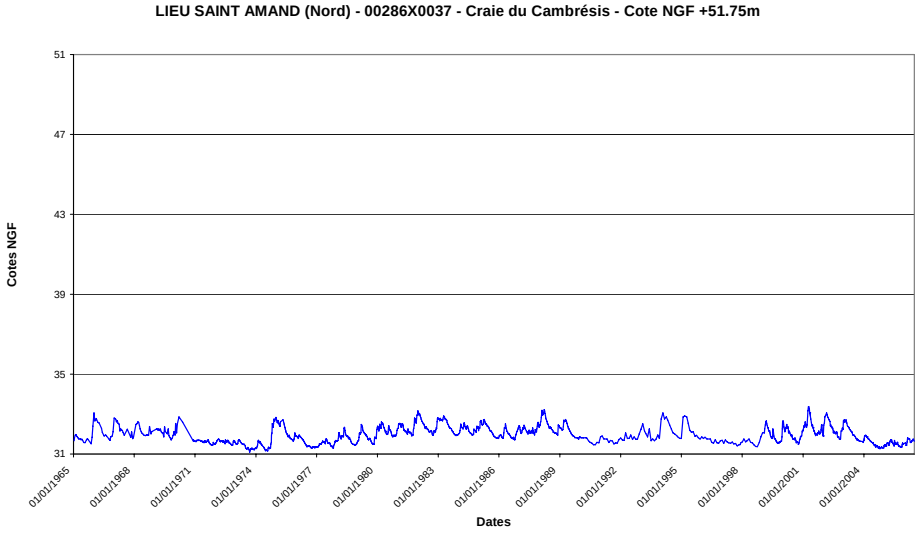


Figure 48 : Piézomètre de Lieu Saint Amand (craie)

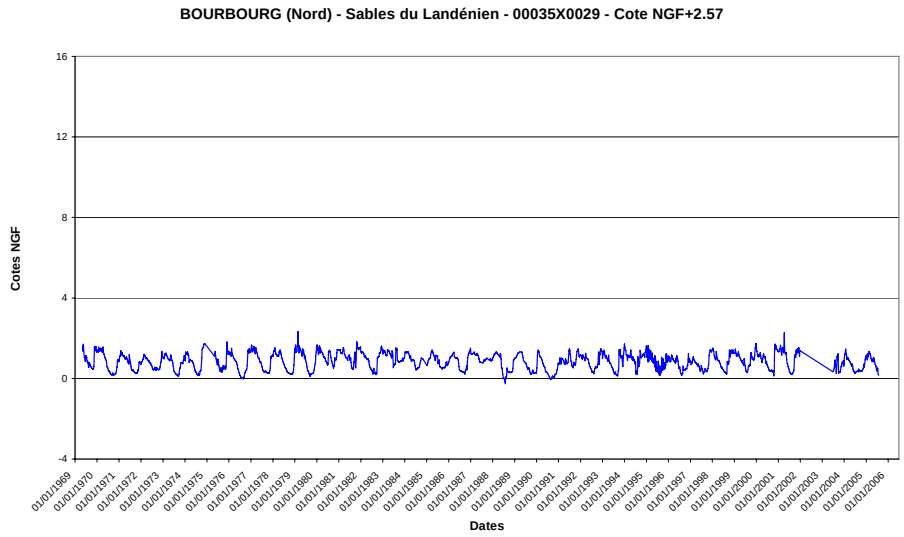


Figure 49 : Piézomètre de Bourgbourg (sables landéniens)

5.4. Aquifère de Normandie

Les deux piézomètres suivants sont assez caractéristiques des formations crayeuses de Normandie : la craie franche du piézomètre de Bézancourt (*Figure 50*) réagit de façon identique à la craie de Picardie : forte variation interannuelle de l'ordre de 10 mètres, et fortes variations annuelles de l'ordre de 5 à 6 mètres.

En contraste celui de Claville-Motteville (*Figure 51*) dans la craie altérée montre de très faibles amplitudes interanuelles (de l'ordre de 2 à 3 mètres) ou même annuelles (de l'ordre du mètre).

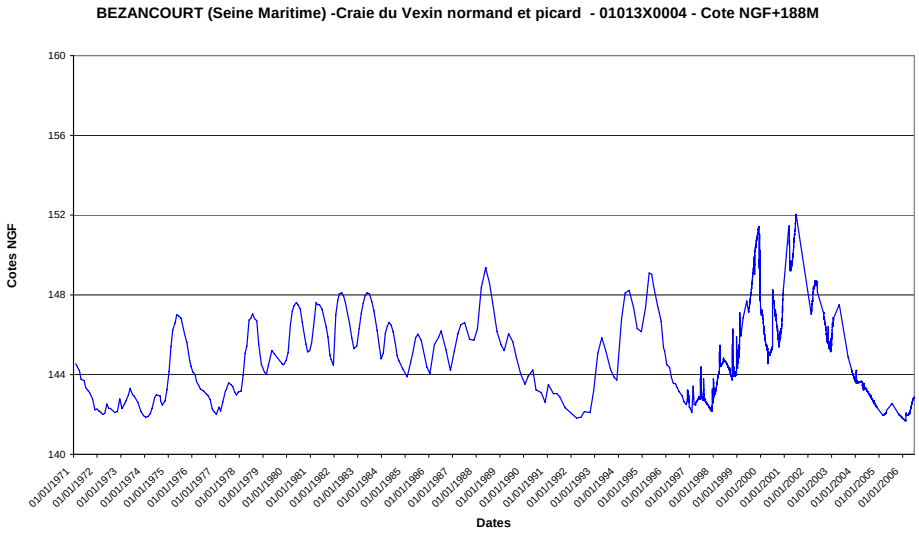


Figure 50 : Piézomètre de Bézancourt (Craie franche)

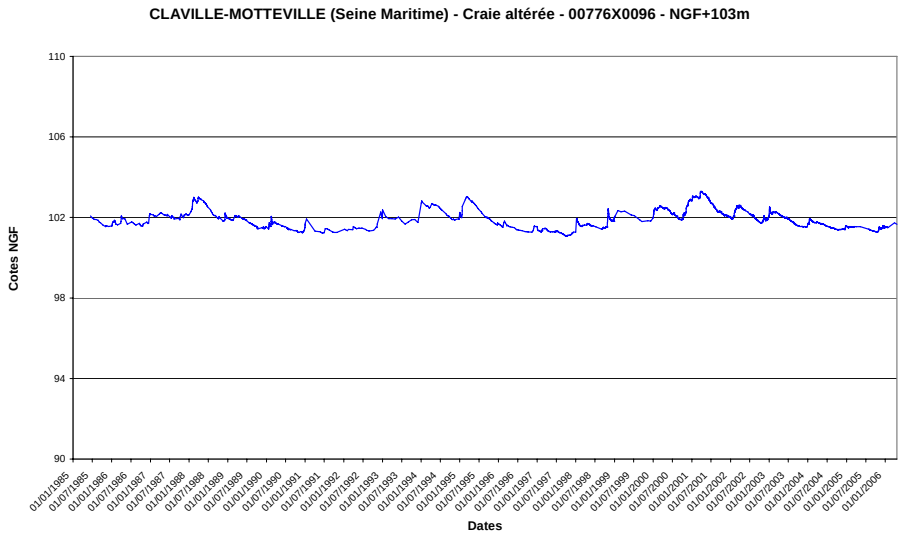


Figure 51 : Piézomètre de Claville-Motteville (craie altérée)

Par comparaison avec l'aquifère de la craie, celui du Bajocien-Bathonien de Caen possède sa signature particulière : il présente d'ailleurs des analogies avec la réponse des calcaires du Jurassique supérieur de la région Centre. Il a été le siège d'épisodes importants de remontées lors des épisodes pluvieux de 2001.

La montée en puissance de l'aquifère lors des étiages successifs précédant 2001 est visible sur les piézomètres de Vierville, Mathieu Sannerville et Asnières-en-Bessin (*Figure 52* à *Figure 55*).

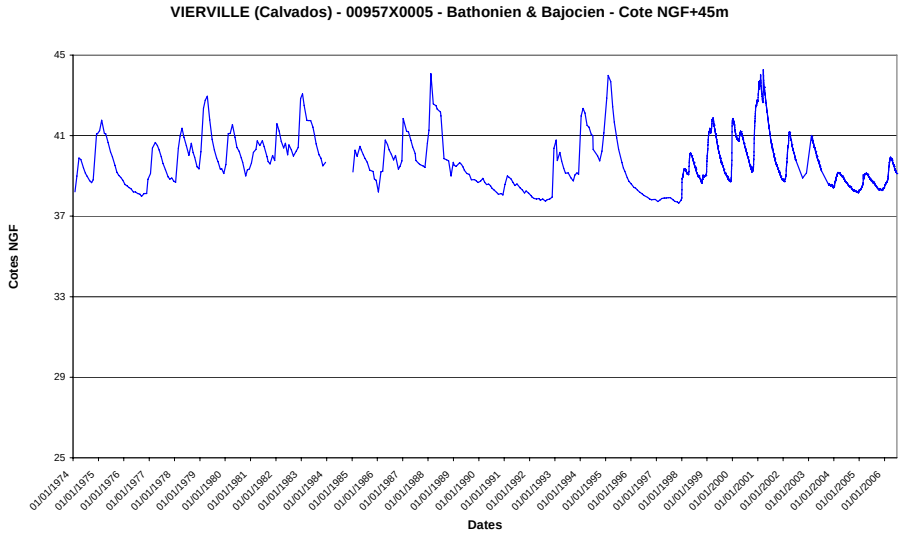


Figure 52 : Piézomètre de Vierville (Bathonien-Bajocien de Caen)

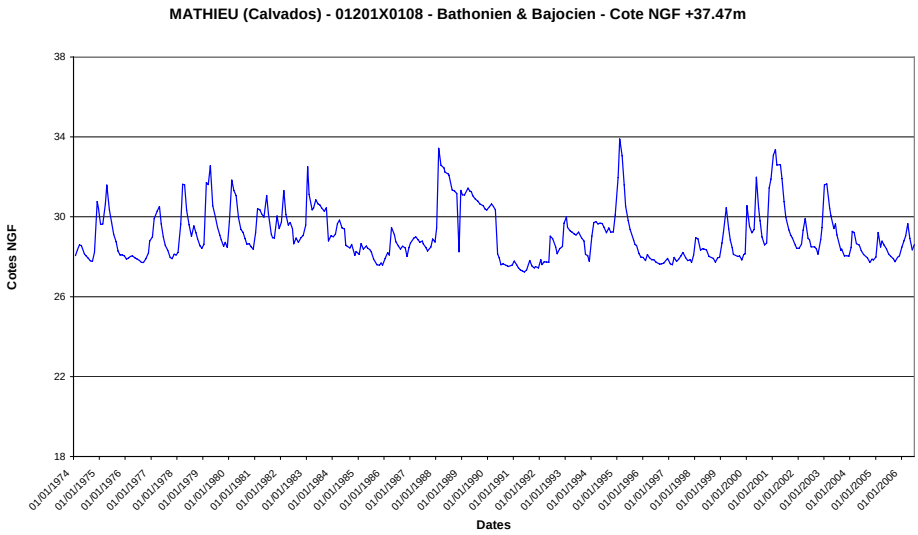


Figure 53 : Piézomètre de Mathieu (Bathonien-Bajocien de Caen)

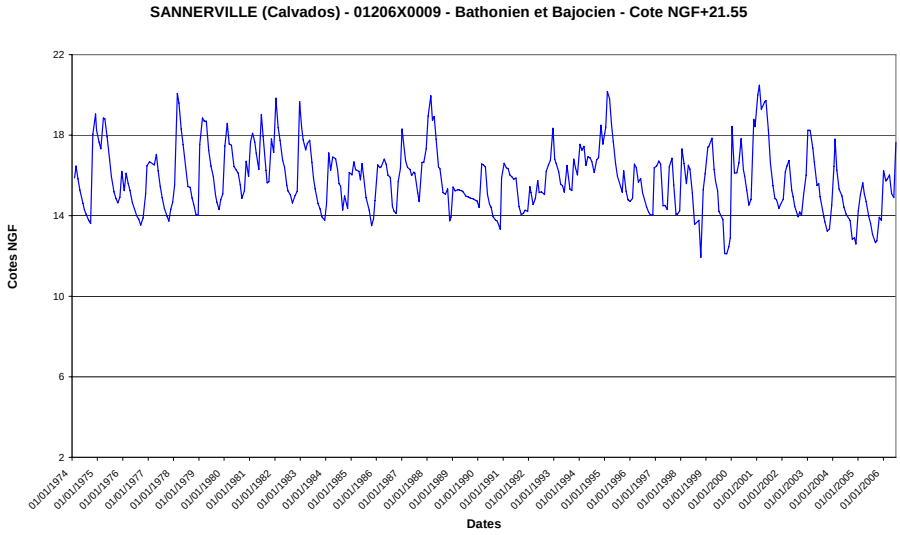


Figure 54 : Piezométre de Sannerville (Bathonien Bajocien de Caen)

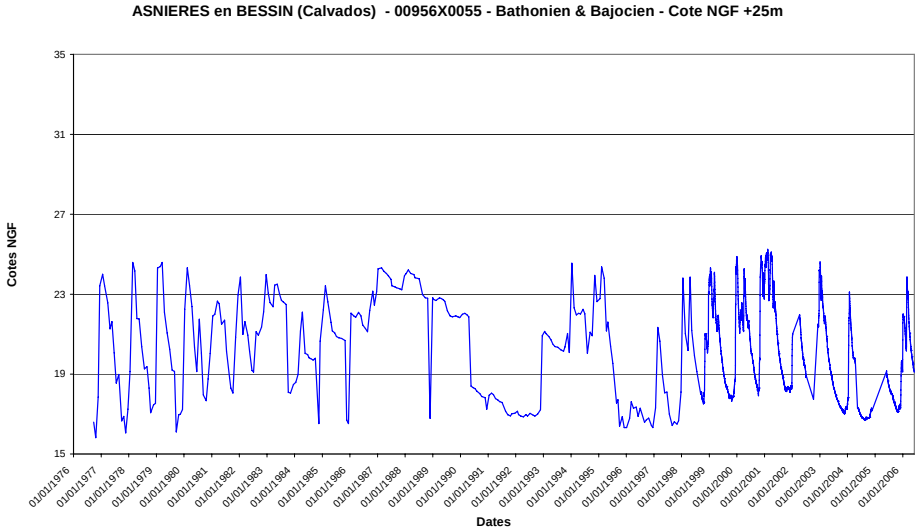


Figure 55 : Piézomètre d'Asnières en Bessin (Bathonien-Bajocien de Caen)

Le piézomètre de Louvigny (*Figure 56*), situé à une altitude plus basse, montre en revanche des amplitudes beaucoup plus faibles, très probablement dues à la proximité d'un axe de drainage de la nappe (niveau de base très proche).

Celui de Saint Loyer des Champs (Orne, *Figure 57*) montre également des amplitudes plus faibles que dans le Calvados, ce qui peut être du à la proximité d'un axe de drainage important, ou à un comportement plus réactif de l'aquifère

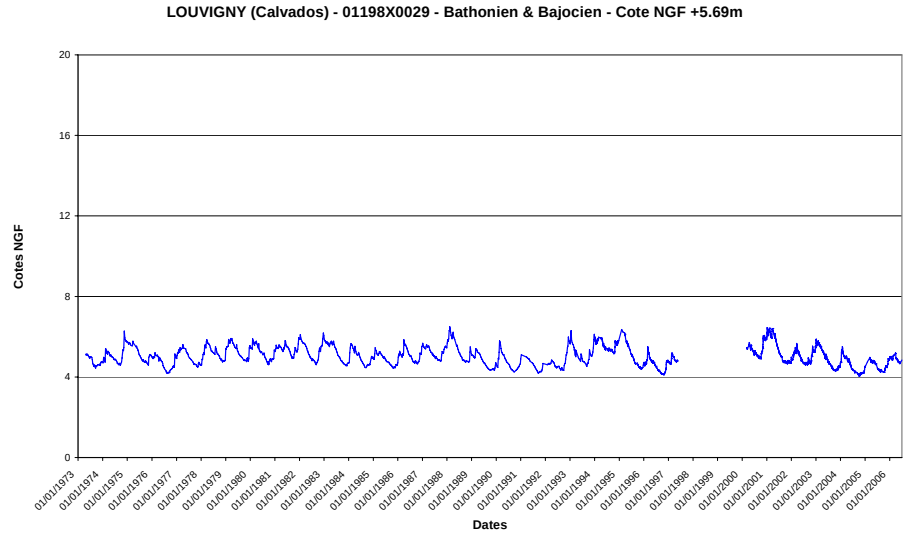


Figure 56 : Piézomètre de Louvigny (Bathonien-Bajocien de Caen, en position basse)

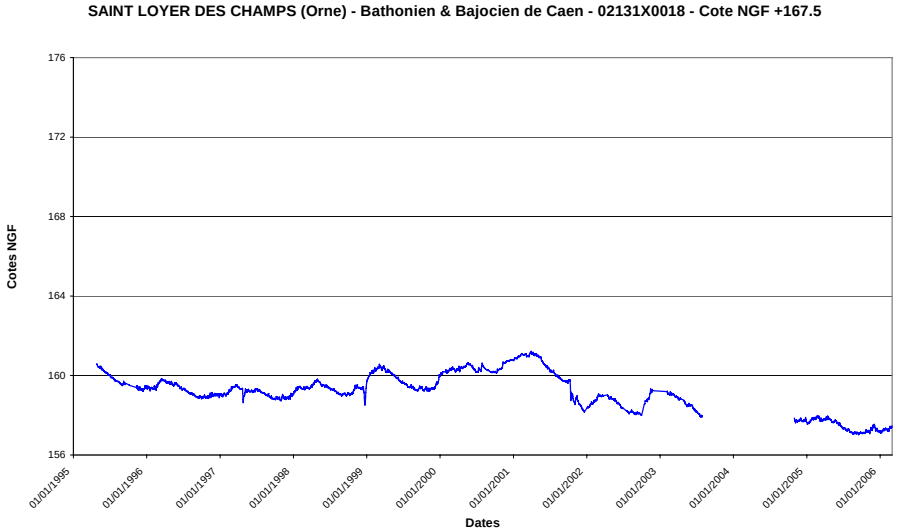


Figure 57 : Piézomètre de Saint-Loyer des Champs (Bathonien-Bajocien de l'Orne)

5.5. Aquifère de Champagne

Les piézomètres suivants (*Figure 58* et *Figure 59*) contrôlant la craie de Champagne, montrent à la fois les caractéristiques classiques de la craie de Picardie, du Nord et du Vexin (variations interanuelles de l'ordre de 20 mètres), mais aussi des caractères propres avec de très brutales hausses et baisses de leur niveau, très régulières en amplitude chaque année et presque aussi fortes que les variations interanuelles (de l'ordre de 10 à 15 mètres), tant lors de la recharge que lors de la courbe de tarissement.

De nombreux cas d'inondations par remontées de nappes se sont déclarés en Champagne en 2001, mais beaucoup moins nombreux qu'en Picardie. Il est probable que la Craie de Champagne ait une moins grande inertie que celle du Nord de la France. Le drainage de la nappe devrait se faire de façon plus rapide

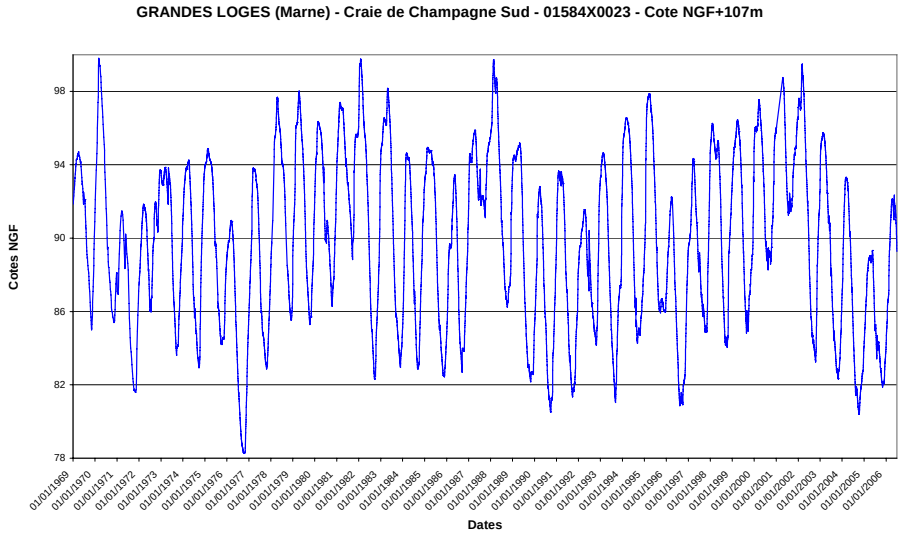


Figure 58 : Piézomètre des Grandes Loges (Marne)

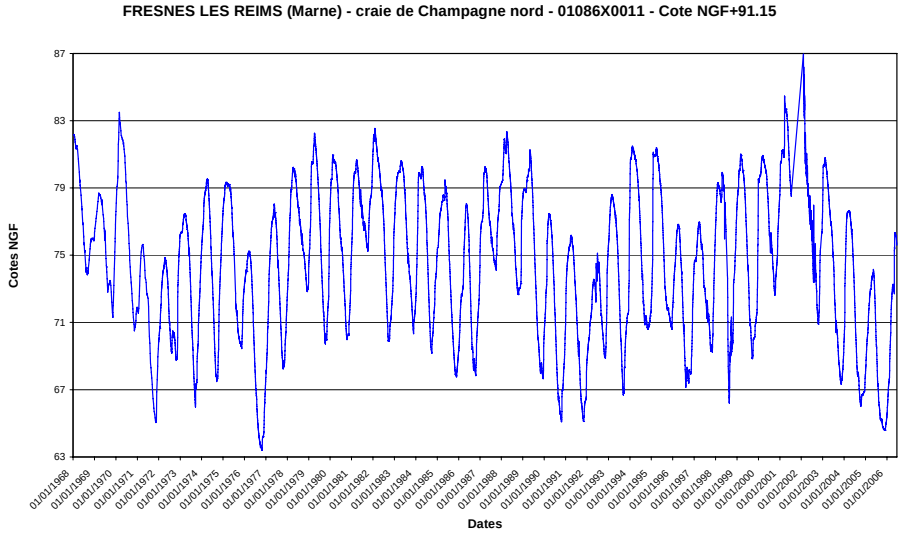


Figure 59 : Piézomètre de Fresnes les Reims (Marne)

Les deux piézomètres suivants (*Figure 60* et *Figure 61*) montrent des variations dans des formations alluvionnaires surmontant la craie. La réaction des niveaux est typique de milieux très influencés par les cours d'eau, réagissant à chaque crue des fleuves ou rivières voisines. C'est le cas du piézomètre de Chalons, influencé par la Marne, et voisin de Fagnières, une localité qui figure au nombre de celles qui ont été déclarées sinistrées par remontée de nappe.

En fait l'hydrogramme montre bien sous les alluvions les caractéristiques de la craie

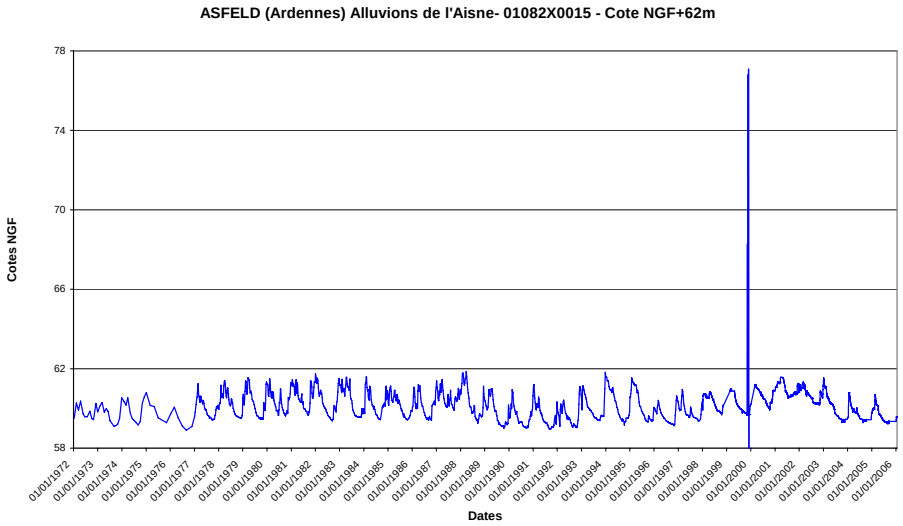


Figure 60 : Piézomètre d'Asfeld (Ardennes - Alluvions de l'Aisne)

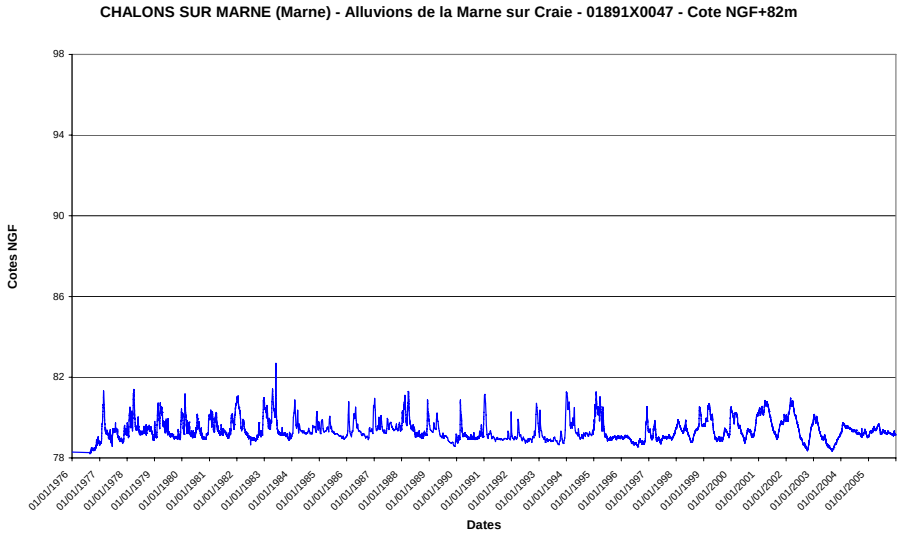


Figure 61 : Piézomètre de Chalons-sur-Marne (Alluvions de la Marne sur Craie)

5.5. Exemples en Ile de France

En Ile de France, le Calcaire de Brie montre des caractéristiques tout à fait identiques à celle de la craie (Piézomètre de Saint-Martin Chenetron, *Figure 62*), avec des amplitudes interanuelles de l'ordre de 25 mètres, et des variations annuelles de l'ordre de 4 à 10 mètres. Il est évident que ce type d'hydrogramme corresponde à une zone très sensible au déclenchement de remontées.

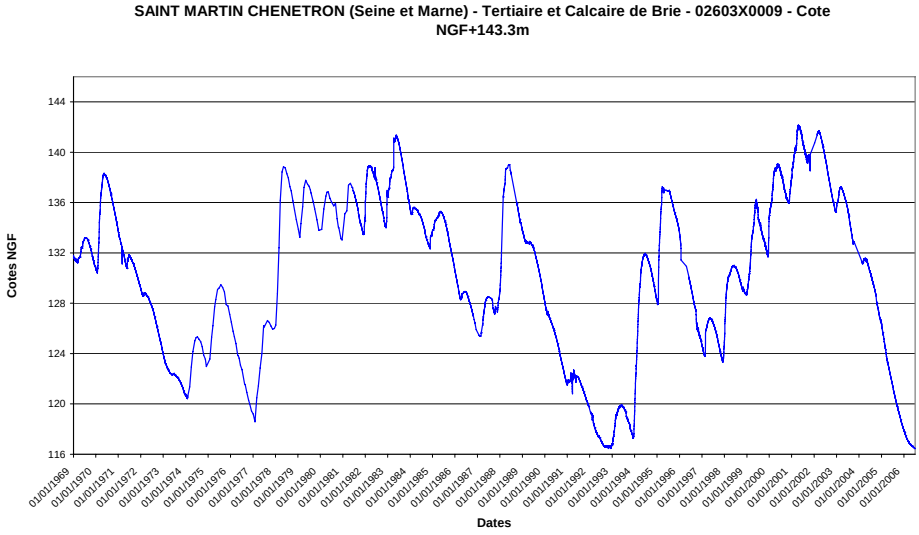


Figure 62 : Piézomètre de Saint Martin Chénetron (Calcaire de Brie)

5.6. Exemples de piézomètres en Poitou-Charentes

Les piézomètres suivants (*Figure 64* et *Figure 63* pour Ballans et Saint-Pierre de Juilliers) contrôlent la nappe du Jurassique. Les étiages successifs montrent une très faible élévation de niveau. En revanche les variations annuelles sont très importantes (souvent plus de 10 mètres), avec en saison humide de très fortes variations.

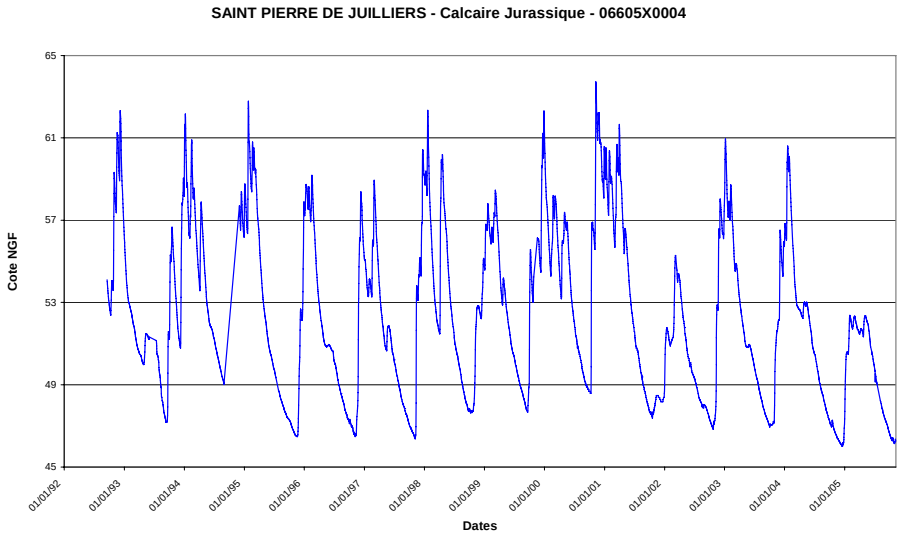


Figure 63 : Piézomètre de Saint Pierre de Juilliers (Charente Maritime)

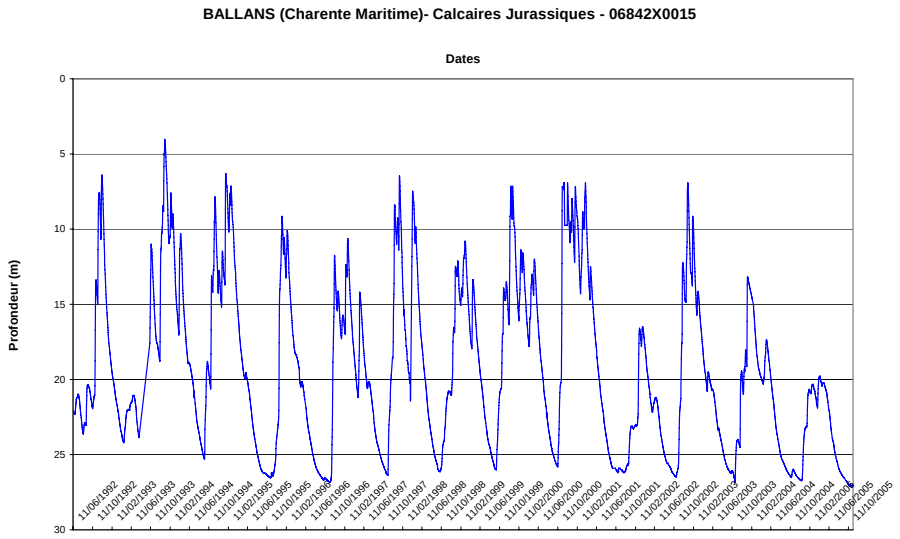


Figure 64 : Piézomètre de Ballans (Charente Maritime).

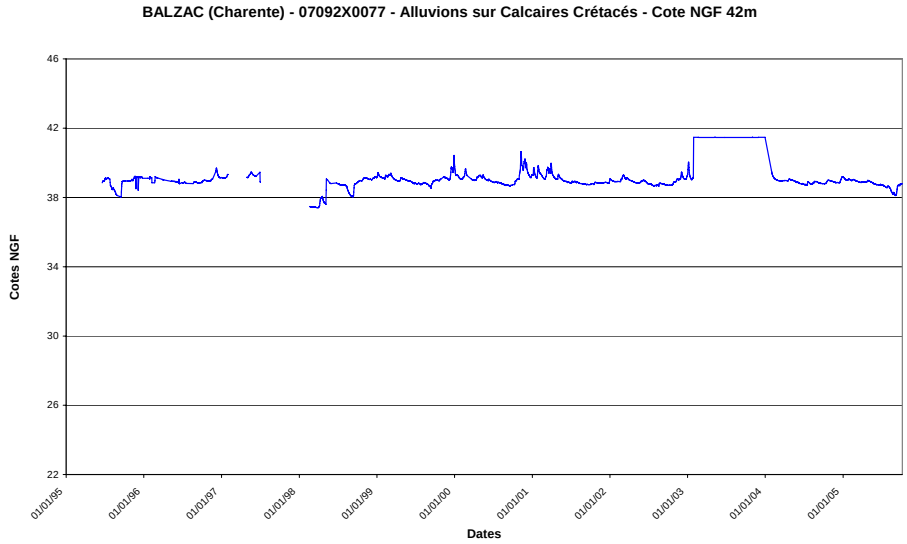


Figure 65 : Piézomètre de Balzac (Charente)

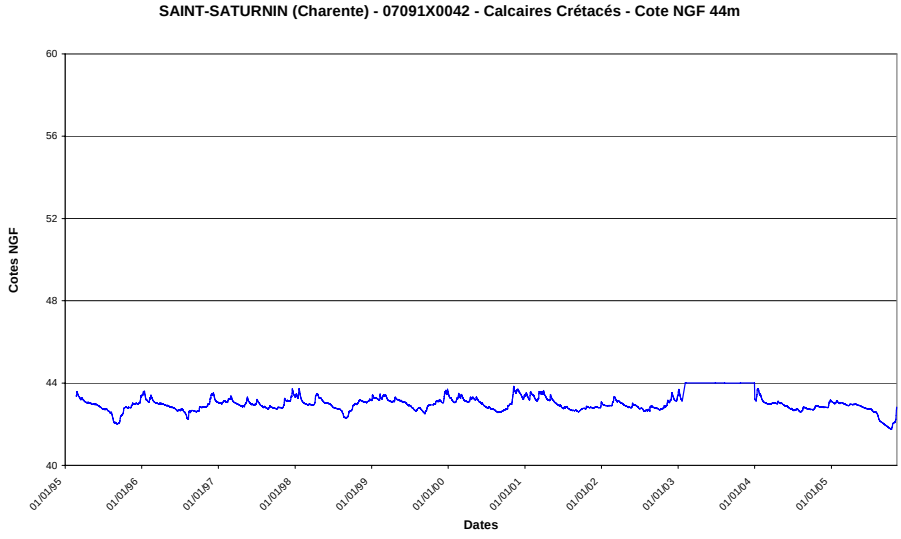


Figure 66 : Piézomètre de Saint Saturnin (Charente)

Les piézomètres précédents (*Figure 65* et *Figure 66*) représentent les fluctuations des alluvions de la Charente sur les Calcaires crétacés. On observe que leurs variations sont seulement de l'ordre de 1 à 2 mètres, et que les variations interannnuelles sont à peine plus élevées. Ces piézomètres sont régis par le niveau de base de la Charente. On peut voir que leurs niveaux sont la plupart du temps très proches du sol et qu'ils ont débordé en 2003 (crue de la Charente probablement). Si des remontées de nappes se sont produites dans le secteur, elles ne sont probablement pas rares, mais de faible amplitude.

On notera qu'en Poitou-Charentes une des principales zones où ont été signalées des remontées de nappes est le secteur de Saintes, et correspond au Crétacé. **Or aucun piézomètre ne contrôle cet aquifère dans le voisinage de Saintes**.

5.6. Exemples en Bourgogne

A l'inverse, le piézomètre d'Arquian (*Figure 67*), dans l'Albien libre de la Nièvre, ne montre quasiment aucune variation, en raison du caractère très transmissif de l'aquifère. Le piézomètre de Saint Loup (Nièvre) dans les mêmes terrains montre des caractéristiques identiques.

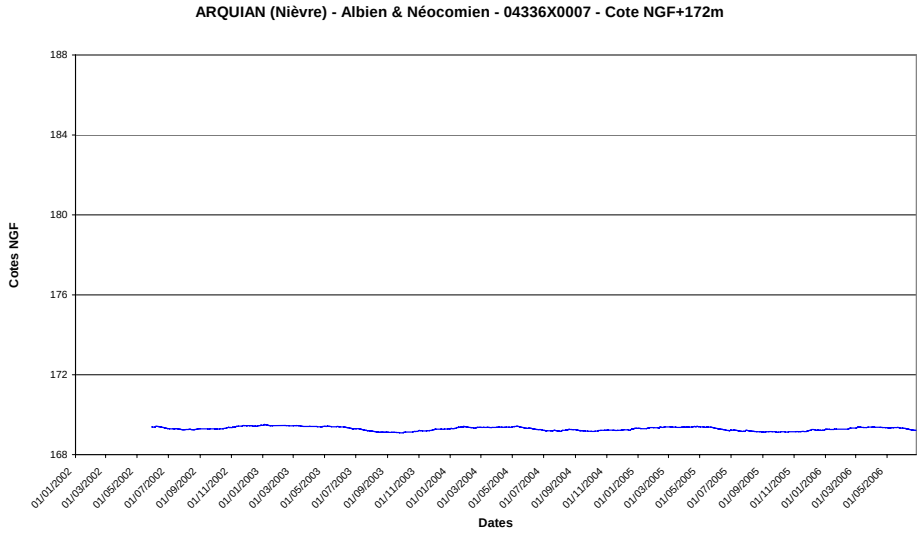


Figure 67 : Piézomètre d'Arquian (sables de l'Albien)

Les piézomètres de Saint Privé (*Figure 68*) et de Chéroy (*Figure 69*) contrôlent la craie du Gâtinais de l'Yonne. Celui de Chéroy montre bien entendu des caractéristiques voisines de celles de Chuelles (Loiret), avec des amplitudes interanuelles importantes, mais des amplitude annuelles souvent assez limitées.

Le piézomètre de Saint Privé est très particulier : ses étiages les plus importants sont très constants, et ses pics de hautes eaux sont très limités. Il est en fait installé dans un interfluve, et ses basses et hautes eaux sont contrôlées par les cours d'eaux qui drainent la formation. L'amplitude représente probablement uniquement celle des cours d'eau voisins.

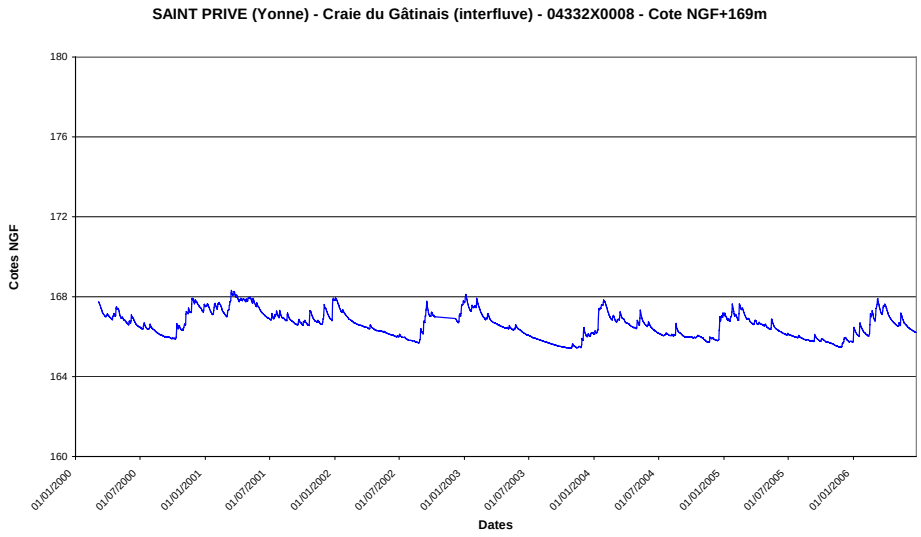


Figure 68 : Piézomètre de Saint-Privé dans la craie du Gâtinais (Yonne)

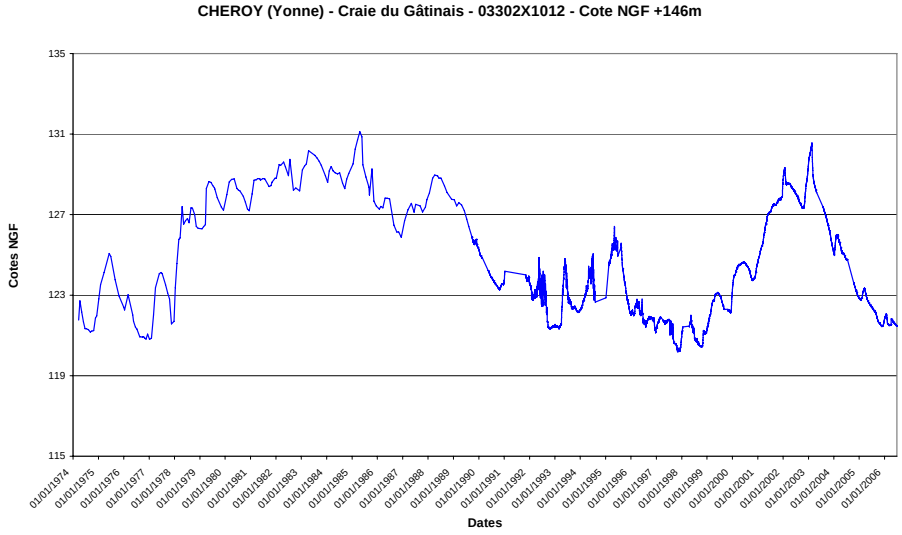


Figure 69 : Piézomètre de Chéroy dans la craie du Gâtinais (Yonne)

En conclusion on retiendra que les secteurs à remontées de nappes sont très souvent caractérisées par des piézomètres dont les niveaux présente ce que l'on appelle un « effet mémoire ».

5.7. Exemples de secteurs n'ayant pas connu de remontées

Les trois piézomètres suivants correspondent à des formations drainantes, non susceptibles d'être favorables à des remontées de nappes (alluvions des Tilles en plaine de Saône, sables plio-quaternaires des Landes, et grès Vosgiens en Alsace.

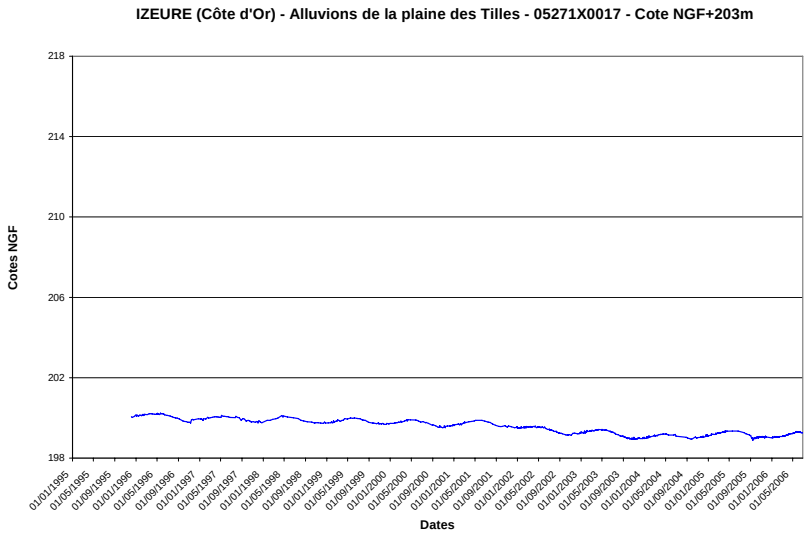


Figure 70 : Piézomètre d'Izeure dans les alluvions de la plaine de Saône (Côte d'Or)

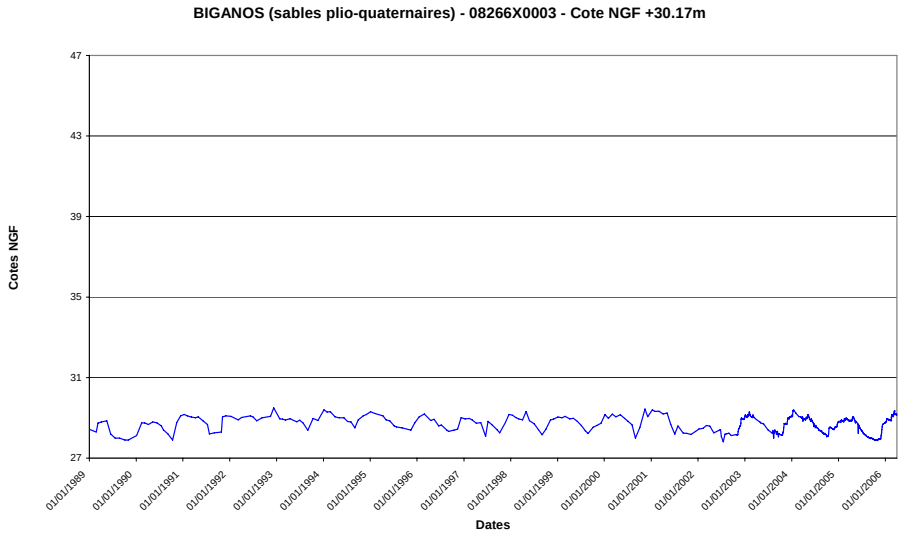


Figure 71 : Piézomètre de Biganos dans les sables plio-quaternaires des Landes (Gironde)

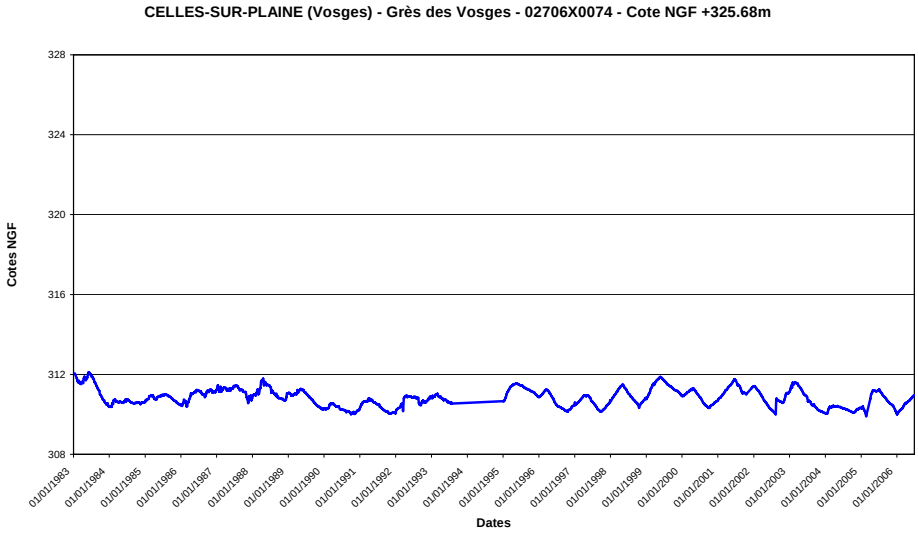


Figure 72 : Piézomètre de Celles-sur-Plaine, dans l'aquifère libre des Grès vosgiens (Vosges)

6. Eléments pour une intégration des résultats dans un PPRI

Une des attentes du MEDD concernait la possibilité, en utilisant les données déjà disponibles, de détailler le niveau d'aléa à une échelle plus fine que le 1/50 000ème.

Il s'agissait bien de savoir si ce type d'étude pouvait venir en aide aux autorités locales pour la définition des Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) dont ils sont chargés.

On rappellera donc que ces deux objectifs ne correspondent pas aux mêmes impératifs d'échelle. En effet :

- l'étude nationale sur la sensibilité devait être à l'origine permettre de repérer les principaux secteurs sensibles du territoire métropolitain à l'échelle du millionième, puis d'en effectuer la cartographie pour qu'elle soit consultable jusqu'au 1/50 000ème. Or, compte tenu de la nature des données nécessaires, l'ambition du projet s'est réduite au fur et à mesure de l'élaboration de la méthode, et il a été admis que la limite de représentation de résultats fiables ne pouvait être plus précise que l'échelle du 100 000ème. Pour des questions ayant trait surtout à des facilités de repérage, les représentations cartographiques - en particulier sur le site internet – ont été poussées jusqu'à l'échelle du 1/50 000ème.
- un PPRI doit être élaboré à une échelle variant du 25 000 au 10 000ème, puisqu'il correspond à l'échelle cadastrale.

6.1. Les contraintes liées aux données.

Or dans les conditions actuelles de précision des outils et des données de base indispensables, il n'est pas possible de simuler plus précisément que cela n'a été fait la sensibilité aux inondations par remontées.

En effet, parmi les outils indispensable figure en effet le MNT qui sert à discrétiser l'altitude de chaque point de la topographie, à servir d'origine aux mesures de niveau d'eau donc à calculer l'épaisseur de la ZNS, à calculer les distances entre points d'eau suivis. Celui qui a été utilisé permet d'obtenir une précision en altitude de +-2.5. Il faudrait pouvoir disposer d'un MNT fournissant une précision de l'ordre de 1 mètre d'altitude. Cet outil n'existe pas à l'échelle de la France.

Quant aux données de base, simuler à une échelle plus fine nécessiterait de disposer d'une lithologie vectorisée à l'échelle du 1/25 000 (alors que celle du 1/50 000 n'est pas encore totalement disponible), de disposer d'un nombre de points d'eau renseignés sur les niveaux et les variations de la nappe considérablement plus important qu'actuellement.

On rappelle que déjà l'étude actuelle donne des résultats sur environ 300 000 km^2, divisés en quelque 75000 unités fonctionnelles, dont la superficie moyenne est donc de 4 km^2, ce qui correspond à une « parcelle » moyenne de 400 hectares. On est loin de la taille moyenne d'une parcelle cadastrale.

Par ailleurs il existe environ 35 000 communes en France : à l'heure actuelle chaque commune est loin de posséder un seul piézomètre de référence sur lequel on pourrait effectuer des mesures régulières, ou caler les résultats de la méthode.

Si l'on se proposait de vraiment entreprendre un plan de prévention des risques "Inondations par Remontées", il faudra alors analyser le phénomène très en détail et confier à des organismes spécialisés des études locales détaillées lorsque l'aléa est déjà bien identifié à

une échelle départementale, ou à celle d'un ensemble de communes, et confirmé sur le terrain.

L'outil actuel hiérarchise les secteurs de sensibilité de façon relative les uns aux autres, mais il est très contraint par des calculs d'interpolation, dont les résultats sont d'autant moins précis que les points qui ont servi de base à la méthode sont éloignés.

Des études locales plus fines permettraient de préciser –par exemple à l'intérieur d'une commune- les limites des secteurs de différentes sensibilités. Ces études devront nécessairement reposer sur des données très précises qui n'existaient pas lors de la réalisation de l'étude actuelle. Il faut encore insister sur le fait que ces données n'existent encore que très rarement dans le pays à ce niveau de détail, parce qu'elles représentent des investissements coûteux, et parce qu'elles sont longues à acquérir :

- les points d'eau doivent être répartis régulièrement et de façon assez dense sur la superficie du secteur à étudier (pour donner une idée, à l'échelle de la dizaine d'hectares, ce qui implique souvent que de très nombreux points d'eau seraient à réaliser). Une autre approche consiste à utiliser les points d'eau privés et publics, et de procéder à des campagnes de mesures périodiques, ce qui est long et coûteux;
- les niveaux d'eau doivent être régulièrement suivis, sur un nombre suffisant d'années, afin de permettre d'apprécier le niveau moyen et l'amplitude de la nappe en ces points. Là encore un facteur temps intervient, ce qui augmente les coûts;
- les points doivent être géo-référencés et nivelés en altitude, afin d'analyser la piézométrie du lieu, autre facteur important de coût. L'alternative serait de disposer d'un MNT garantissant une précision de l'ordre du mètre.
- L'altitude du terrain lui-même de la commune doit être connue avec une meilleure estimation : là encore un MNT plus précis que le pas de 50 mètres doit être disponible. On rappellera à ce sujet qu'un MNT au pas de 25 mètres ne permettra pas d'estimer une altitude avec une erreur inférieure à +-1.5 mètre (delta environ 3 mètres), dans le meilleur des cas.

6.2. Une tentative d'amélioration.

Une tentative d'amélioration récente de cette méthode est en cours, dans le cadre d'une étude confiée au BRGM concernant le département de l'Oise (Atlas des Risques du Département de l'Oise), qui a conduit à préciser la sensibilité aux remontées de nappes dans ce département, parmi différents « risques ».

6.2.1. L'exemple de l'étude de risques dans le département de l'Oise

Cette étude est parvenue à améliorer assez sensiblement la précision des résultats de sensibilité, mais surtout des contours des unités fonctionnelles, avec les moyens suivants :

- en utilisant des cartes géologiques à plus grande échelle (1:50 000ème vectorisé qui était disponible sur ce département, au lieu de 1:100000ème)
- en reconstituant les valeurs des « piézométries » à partir des contours des masses d'eaux (elles aussi depuis peu vectorisées), et non plus des systèmes aquifères,

En revanche cette nouvelle méthodologie d'étude, très proche de celle de la présente étude, n'a pas été en mesure de produire des résultats suffisamment détaillés permettant de satisfaire aux besoins d'un PPRI. La *Figure 73* montre la comparaison de la précision des deux méthodes sur le département de l'Oise : en haut de la figure par la nouvelle méthode qui respecte mieux les contours des « objets » piézométriques, en bas par la méthode utilisée lors de la présente étude.

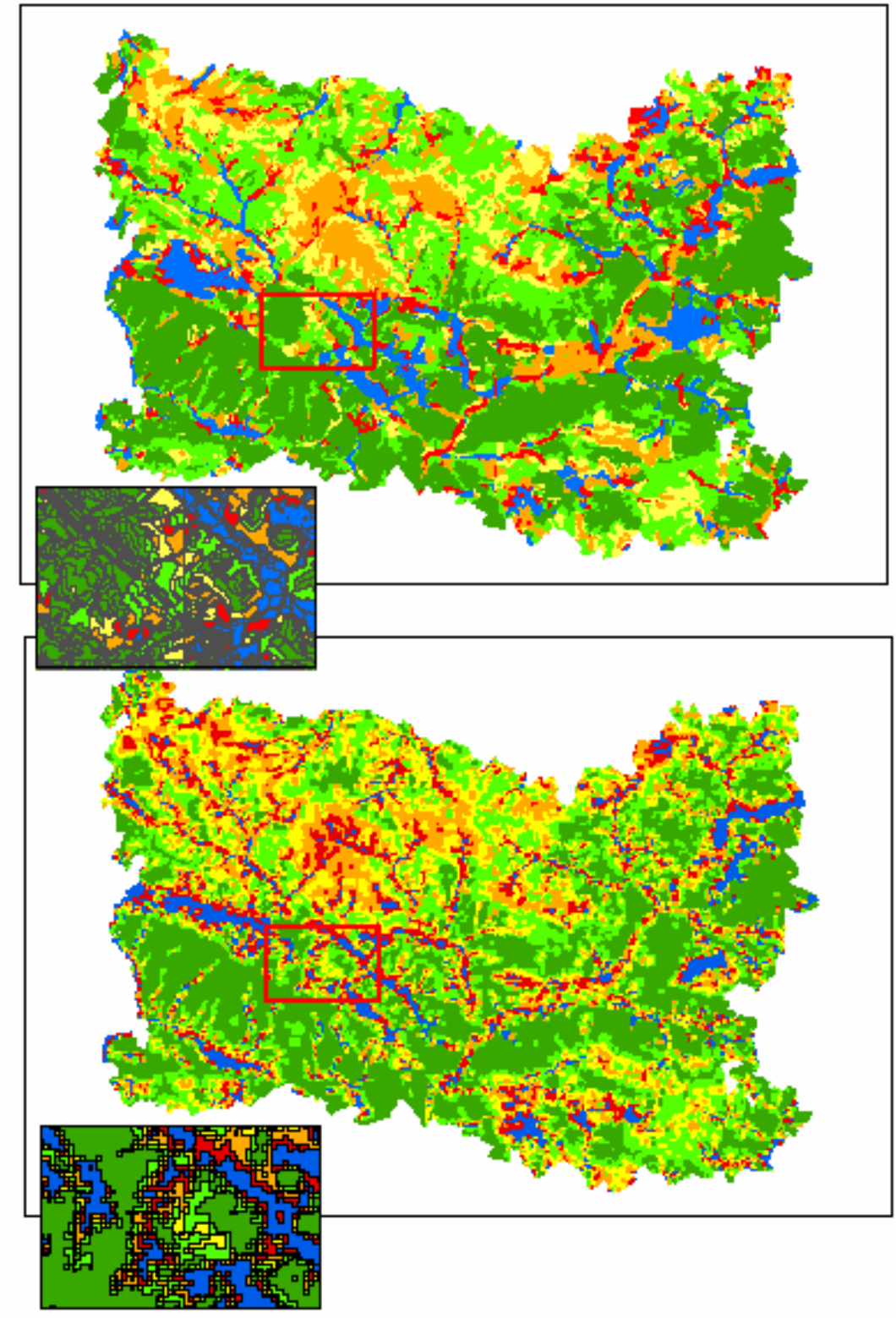


Figure 73 : Amélioration des détails de sensibilité (en haut) en utilisant les contours des masses d'eau

6.3. Une tentative par « zonage » de l'aléa

A priori, en utilisant les gammes de sensibilité construites au cours de l'étude, on pouvait établir un zonage de l'aléa pour permettre à des responsables locaux de donner une information à leurs administrés.

6.3.1. Le principe.

La méthode pouvait par exemple être la suivante :

- en regroupant les signaux « bleu » (nappe affleurante) et « rouge » (épaisseur ZNS sensiblement égale à l'amplitude annuelle de la nappe) au sein d'une nouvelle zone de **sensibilité maximale**. Au sein de cette zone il eût été déconseillé de laisser se construire de nouveaux édifices ;
- en regroupant les signaux « orangé » (forte sensibilité) et « jaune » (sensibilité moyenne) au sein d'une seconde zone de **sensibilité intermédiaire**. Là, il eût par exemple été déconseillé de laisser se construire des sous-sols, ou seulement en imposant de fortes restrictions sur ce qui eût été installé sous le niveau du sol ;
- enfin en regroupant les deux autres signaux « vert-clair » (sensibilité faible) et « vert-foncé » (sensibilité quasi nulle) en une troisième nouvelle zone de **sensibilité** faible, au sein de laquelle aucune contrainte particulière n'eût été imposée.

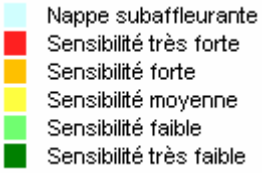
A priori au sein d'un même secteur, par exemple au sein d'une même commune, on doit pouvoir appliquer cette méthode.

6.3.2. Les inconvénients.

Mais la comparaison de la sensibilité de deux secteurs éloignés rencontre des difficultés.

En effet si on tente d'appliquer cette méthode et qu'on choisisse par exemple pour la tester les communes de **Fagnières** (Département de la Marne) et de **Warloy-Baillon** (Département de la Somme) qui ont toutes deux subi des inondations par remontées de nappe en 2001, on s'aperçoit que les **mêmes** signaux (couleurs) de base (rouge-orangé-jaune, etc) n'ont en fait pas la même valeur d'information dans les deux cas.

On rappelle le tableau du paragraphe 2.2 :



Indice de sensibilité	Nombre de fois où le battement est contenu dans la ZNS		Couleur
	Valeur supérieure de classe	Valeur inférieure de classe	
de 0.000 à 0.160	infini	6.25	Vert foncé
de 0.160 à 0.250	6.25	4.00	Vert clair
de 0.250 à 0.330	4.00	3.03	Jaune
de 0.330 à 0.600	3.03	1.67	Orangé
de 0.600 à 1.200	1.67	0.83	Rouge

Les particularités morphologiques des deux communes sont très différentes, bien que toutes deux situées en aquifère de craie :

- la commune de Fagnières se situe en effet en bordure immédiate du cours de la Marne. Les variations de relief de la commune restent très modérées, et les

profondeurs à la nappe sont généralement très faibles, avec par exemple une profondeur moyenne à la nappe (**e**) de l'ordre de 3 à 4 mètres (voir l'enregistrement du piézomètre de Chalons, le plus proche de cette commune) ;

- celle de Warloy-Baillon se situe en tête du bassin de l'Hallue, affluent de la Somme mais une grande partie de la commune est sur un plateau crayeux où la profondeur à la nappe (**e**) est en moyenne d'une quinzaine de mètres (voir l'enregistrement du piézomètre de Senlis-le-Sec, le plus proche de cette commune ;

La méthodologie adoptée pour évaluer la sensibilité consiste à calculer le rapport de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée (soit **e**) à l'amplitude de la nappe (soit **a**). D'après le tableau de la page précédente, une couleur jaune correspondra à un indice de sensibilité compris entre 0.250 et 0.330, ce qui signifie que le battement de la nappe doit être compris entre 4 et 3 fois dans la ZNS.

- Dans le cas de Fagnières (*Figure 74*) une couleur jaune cela correspond à un battement d'1 mètre ;
- Dans le cas de Warloy Baillon (*Figure 75*) la même couleur correspondra à un battement de 4 à 5 mètres.

On s'aperçoit ainsi que les intervalles de battements correspondant à chacune des couleurs utilisées (vert-jaune-orangé) représentent des valeurs plus importantes dans les secteurs à forte amplitude (plus proches des plateaux à Warloy-Baillon) que dans les secteurs à faible amplitude (plus proches des exutoires comme à Fagnières).

Il est donc difficile de proposer une échelle simplifiée de l'aléa, valable en tout point du territoire, et surtout permettant de comparer ces secteurs entre eux.

De plus il est intuitif qu'à proximité d'une nappe alluviale (Cas de Fagnières,) le niveau de la nappe puisse très souvent monter rapidement de quelques mètres en quelques jours, alors que dans des secteurs de craie à forte épaisseur de zone non saturée, comme à Senlis-le-Sec ou à Warloy-Baillon (Somme) le phénomène de remontée jusqu'à la surface du sol n'est ni rapide ni fréquent, et correspond à une évolution que l'on peut suivre pendant plusieurs années. Pour reprendre notre exemple, la fréquence du phénomène qui correspond à la couleur « jaune » à Fagnères et à Warloy-Baillon n'est certainement pas la même.

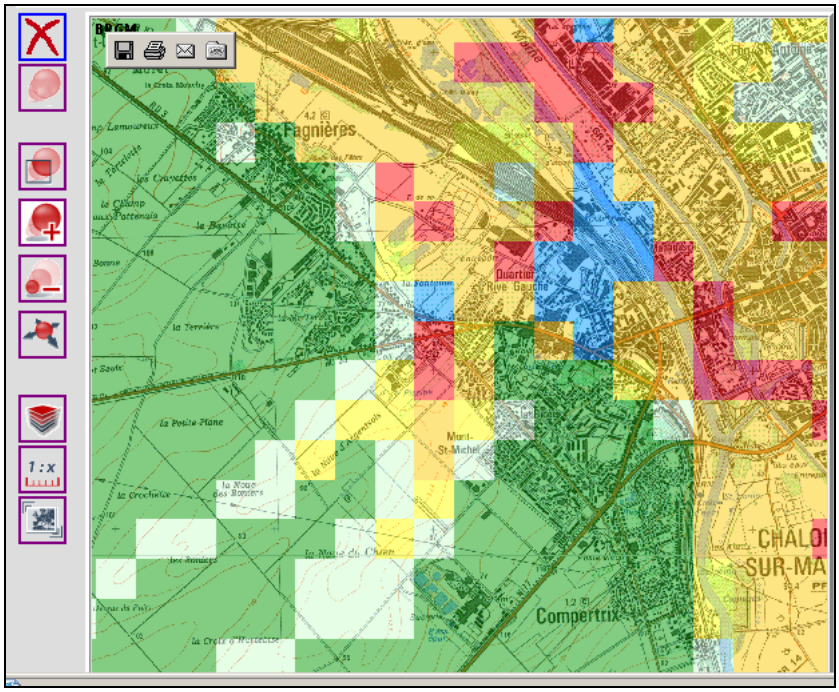


Figure 74 : Secteur de Fagnières au 1/30 000 (Marne)

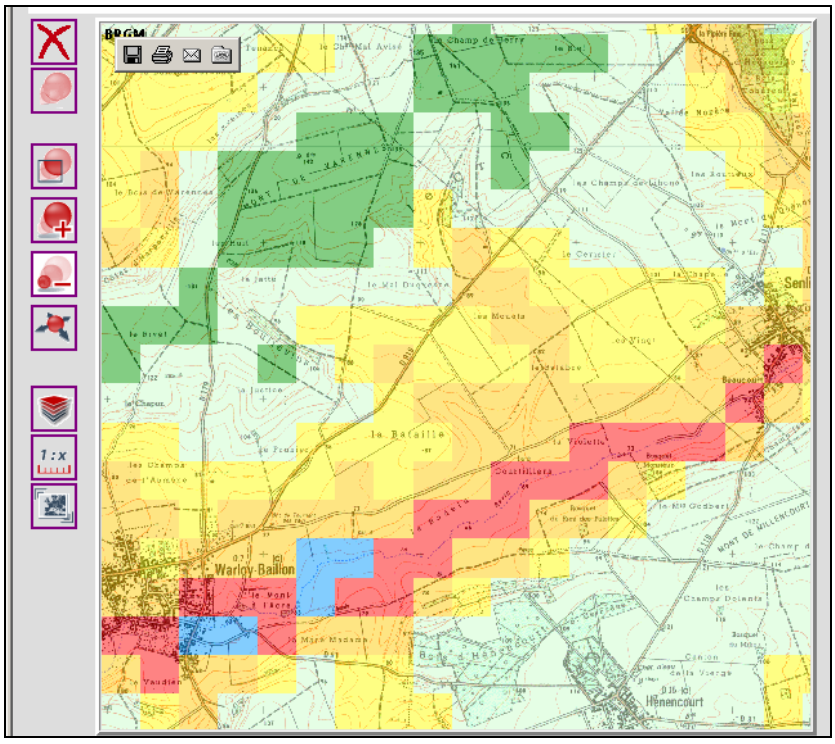


Figure 75 : secteur de Warloy-Baillon au 1 / 30 000 (Somme)

Dans les secteurs de craie la remontée de nappe correspond pratiquement toujours à une remontée progressive du niveau de l'étiage annuel : le phénomène d'inondation se déclenche après plusieurs années de remontée où les étiages annuels sont chaque fois à une plus haute cote altimétrique. C'est ce qui s'est passé entre 1997 et 2001 où la nappe n'a atteint le sol qu'après 5 années de remontée. Ensuite on a pu suivre la décroissance de la courbe d'étiage jusqu'en 2006.

En conclusion, il ne serait donc pas équitable d'imposer des contraintes identiques à ces deux populations pour lesquelles la fréquence d'occurrence de l'aléa n'est probablement pas la même.

On touche donc là au cœur du problème : la sensibilité évaluée dans la présente étude est **relative, très liée à l'environnement local,** car elle dépend fortement de la valeur du **battement** qui est **fort sur les plateaux** et **devient beaucoup plus faible sur les versants d'un même secteur.**

Un tel zonage n'est donc envisageable ni de façon globale sur l'ensemble du territoire, ni de façon automatique. Une étude locale doit la préciser lorsque les enjeux l'exigent.

En conclusion ce **type de zonage n'est pas utilisable dans le cadre d'un PPRI :** mais il peut être fourni à titre indicatif pour donner au public la plus large information sur les données dont on dispose. Il faut bien préciser au public que ces différents niveaux de sensibilité **sont relatifs les uns par rapport aux autres.** Il n'existe pas de méthode permettant de calculer une fréquence pour ce type d'aléa.

6.3.3. Un exemple de la relative imprécision des données

Afin d'illustrer que les résultats de l'étude ne sont pas utilisables aux échelles trop détaillées, et que le procédé d'interpolation ne peut pas donner de résultat très précis, on remarquera sur les figures précédentes que sur le site de Fagnières le cours de la Marne (rivière pourtant bien pérenne) se traduit des plages bleues discontinues. De même à Warloy-Baillon des plages bleues apparaissent en amont de la source de l'Hallue, dans un secteur où la rivière n'est pourtant qu'intermittente et disparaît sous la surface de la craie.

7. Les mesures de prévention et d'alerte

Avec à l'esprit le devoir d'informer le public et de lui fournir un système d'alerte suffisant pour prendre les dispositions nécessaires, il semble qui faille disposer d'un système :

- permettant un zonage de l'aléa
- et disposant d'indicateurs pour déclencher des alertes.

7.1. Les principes d'un système d'alerte

7.1.1. Identification des secteurs les plus favorables aux remontées

Les systèmes d'alerte à mettre en place doivent reposer sur des constats. Depuis le début de cette étude on s'est aperçu :

- que la plus grande majorité des cas déclarés l'ont été dans des aquifères de type craie ou simplement calcaire (Charentes, Région Parisienne, Champagne, Nord-Pas de Calais, Picardie, Normandie). C'est le cas de la craie, du Bathonien-Bajocien, des calcaires de Brie ;
- qu'une autre partie moins fréquente était en relation avec des placages d'aquifères tertiaire, le plus souvent perchés au-dessus de la craie, dont ils sont séparés par un niveau imperméable;
- que les suivis piézométriques enregistrés dans les aquifères de craie sont caractéristiques : les spécialistes disent que l'aquifère possède une "mémoire". Cela traduit le fait qu'une variation saisonnière se superpose à une variation interannuelle très marquée. L'aquifère engrange des réserves souvent considérables lors d'années successives excédentaires. Cela se traduit par des niveaux d'étiage d'été-automne de plus en plus hauts (*Figure 76*). Lors d'années successives déficitaires, la décrue est également très lente.
- Qu'en aquifère sensible (par exemple de craie), certains piézomètres n'ont pas varié significativement pendant les remontées de nappe, ou pas suffisamment pour permettre une alerte. Il est possible que ces points de mesure soient défectueux (piézomètres bouchés)
- A contrario certains secteurs, comme celui des sables des Landes, sont très sensibles aux remontées de nappes, les niveaux d'eau étant proches du sol., Cependant aucune déclaration n'a été enregistrée : il n'y a pas d'effet "mémoire", et les niveaux baissent vite.

7.1.2. Propositions de systèmes d'alerte

A partir des constats précédents on peut imaginer différents types de systèmes d'alerte à mettre en place, qu'il est d'ailleurs possible de combiner :.

a) Type 1

Un premier système d'alerte pourrait consister dans son principe à utiliser les niveaux d'eau de certains piézomètres disposant d'une chronique importante comme

indicateurs **locaux** de stade de vigilance ou de niveau d'alerte. Ils devront être sélectionnés en **s'assurant que les événements de remontées de 1995, 2001 et 2002 sont compris** dans ces chroniques. Il faudra pouvoir corréler les cotes atteintes dans ces piézomètres aux cotes topographiques d'événements de remontées avérées en des lieux connus et à des dates connues. Les étapes de mise en place de ce premier système pourraient être :

1. Définir la localisation de tous les piézomètres du territoire français qui ont une signature **"d'effet mémoire".** On rappelle que cela traduit le fait que l'aquifère qu'ils contrôlent est de grande capacité et de grande inertie, et que la masse d'eau qui peut être libérée sous certaines conditions peut représenter un danger local ou régional. Cette étape peut être remplacée par une localisation régionale de ces piézomètres (Picardie par exemple, ou même bassin de la Somme).

2. A partir de la cartographie de la présente étude, précisée sur le terrain par des enquêtes de terrain (mairies au minimum, agriculteurs) sur l'expérience vécue par les populations en 1995, 2000, 2001 et 2002 selon les secteurs, croisé des informations du fichier GASPAR de savoir le plus précisément possible :

- quels étaient les secteurs des communes où ont eu lieu des inondations (prendre les positions GPS)
- entre quelles dates ont eu lieu ces événements (la précision de la semaine suffit),
- étaient-ce vraiment des remontées (cela peut avoir été du simple ruissellement sur un sol détrempé – consulter les rapports d'expertises)
- ne pas se fier uniquement au classement GASPAR de la commune, qui ne répertorie que si l'événement est rare (durée de retour 10 ans au moins)
- noter les cotes NGF des lieux inondés (par rapport à la carte IGN au 1/25000ème par exemple).

3. de noter à quelles cotes altimétriques se trouvaient les niveaux de l'eau **dans les piézomètres de contrôle aux dates d'inondations rapportées par ces enquêtes**. Ces niveaux seront considérés comme étant équivalents aux cotes de débordement dans les secteurs sinistrés. Par exemple la cote de l'eau à 115 mètres NGF dans un piézomètre peut correspondre à une inondation qui s'est réellement produite plus bas à la cote 90 mètres NGF

5. de définir pour plusieurs cotes moindres dans ce piézomètre (par exemple 110, 112, et 114 m NGF), des niveaux de vigilance et d'alerte hiérarchisés (qui correspondront à des dangers croissants dans les secteurs de débordement), et qui peuvent correspondre par exemple aux niveaux d'étiage atteints certaines années (cercles rouge sur l'hydrogramme de la *Figure 76*).

On rappelle qu'il conviendra de sélectionner (et de tester) :

- un ou plusieurs piézomètres locaux **qui ait fonctionné en 2001 et fourni des mesures**
- qui fonctionne **encore** ou puisse être remis en état de marche
- et qui puisse **être accessible lors d'événements identiques**.
- Qui soient éloignés des grands axes de drainage.

Dans certains cas des piézomètres complémentaires devront être réalisés et leurs enregistrements corrélés avec ceux de piézomètres disposant de longues chroniques (c'est par exemple le cas du piézomètre de Senlis-le-sec (Somme) et des piézomètres qui ont été créés à Warloy Baillon (Somme) dans le cadre d'un projet de recherche sur les mécanismes des remontées de nappe.

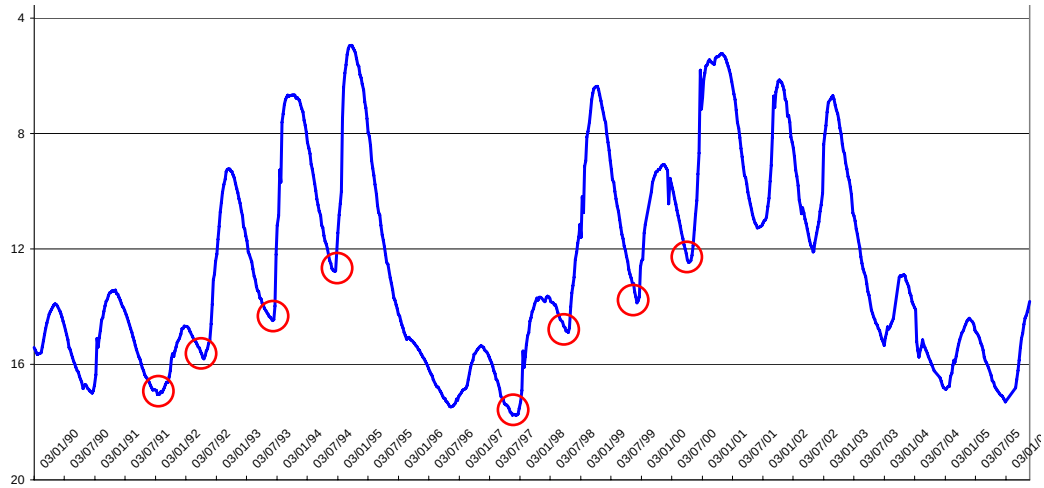


Figure 76 : Piézomètre de Tincques (Pas de Calais). Utilisation de l'effet mémoire de l'aquifère.

Une cellule de suivi devrait être créée pour assurer la vigilance. Elle sera en relation avec les services de la Sécurité Civile.

Le suivi d'un tel système ne devrait pas exiger de moyens financiers très importants, après que les secteurs cibles aient été correctement repérés. En effet il suffit de connecter le système d'alerte local sur le suivi déjà existant du niveau des nappes (à partir de tout réseau « producteur de données» local, ou à partir de la base de données ADES/BDES par exemple).

Seules les enquêtes qui permettront de sélectionner les piézomètres et d'en corréler le niveau aux secteurs-cibles entraîneront des coûts.

b) Type 2.

Un modèle identique au précédent pourrait être mis en œuvre, en lui adjoignant un module de « prévision ». Le principe serait de prévoir l'accroissement du niveau de la nappe en fonction des conditions climatiques (crues et décrues de nappes). Ce système pourrait s'appuyer :

- Sur l'historique des niveaux du piézomètre lors des événements de remontées de nappes
- Et sur les historiques de « pluies efficaces » appliquées à la superficie du bassin aux mêmes périodes.

Il a l'inconvénient d'être au départ plus difficile à mettre en œuvre car nécessitant des travaux de modélisation.

c) Type 3.

Un troisième système consisterait à repérer les têtes de rivières ou de petits rus, situés sur les versants ou juste au dessous des plateaux où ont eu lieu les remontées. L'entrée en fonctionnement des griffons de ces petits cours d'eau intermittents, par

exemple la source de l'Hallue à Warloy-Baillon – Somme pourraient être utilisés comme indicateurs d'un niveau de vigilance. Le système consisterait à :

- repérer ces griffons en coordonnées géographiques et en cote altimétrique ;
- forer un piézomètre à quelques centaines de mètres en amont du griffon, près du thalweg du cours d'eau intermittent
- équiper ce piézomètre en enregistreur de niveau : le dépassement de la cote normale du griffon déclenchera un état de **vigilance**. Le piézomètre devra être équipé contre les crues, ou réalisé latéralement au thalweg pour éviter l'inondation. La progression de l'activité du griffon vers l'amont du thalweg correspondra à une hausse de niveau dans le piézomètre, et certains niveaux successifs de cette hausse pourront être utilisés comme étapes du dispositif d'alerte, et être directement liée à une inondation passée dont les habitants gardent encore le souvenir.
- l'observation des niveaux atteints par un piézomètre situé plus haut en position de plateau, permettra de corréler les indications du piézomètre du griffon avec d'autres localisations de sources, et de confirmer les mesures à une échelle plus large (plusieurs communes par exemple). Ce dispositif est une variante du type 1.

c) Type 3.

On peut aussi imaginer la mise en œuvre d'une modélisation 3D du massif hydrogéologique concerné : calcaires Bathonien-Bajocien de Caen, Craie de Picardie ou du Pas-de-Calais, Calcaire de Brie par exemple.

Il s'agirait de simuler au sein d'une enveloppe formée par la surface topographique, l'évolution du niveau atteint par l'aquifère. Ce niveau serait contraint :

- en reportant les cotes **synchrones** des piézomètres fournies par les producteurs de données pour le même aquifère
- en utilisant comme drains de débordement les thalwegs et les rivières
- en simulant une cote de l'aquifère **entre les points connus** (par exemple sur les plateaux) par la méthode de Wyns (méthode des courbes enveloppes des rivières).

Normalement mis au point pour le socle, ce système exige qu'il existe un niveau imperméable contraignant la nappe en sa partie inférieure (dans la Somme ce sont les Dièves du Turonien).

Sur ce modèle seraient reportées la position géographique et les cotes altimétriques des localités où ont été remarquées les remontées de nappes. Les cotes des piézomètres aux mêmes dates que les occurrences de l'aléa servent d'indicateur d'alerte.

La topographie comporte des ressauts naturels de terrain : replats par exemple, ou contre cuestas dus à des différentiels d'érosion. En cas de remontée importante de la nappe c'est sur le côté amont de ces replats que les griffons apparaissent puisqu'ils entaillent la topographie vers la nappe.

Ces points doivent donc être spécialement repérés par le SIG du système, qui doit donc disposer d'un MNT très précis.

7.2. Propositions de localisations de tests

7.2.1. Picardie, bassin de la Somme.

Dans ce secteur pourrait tester un système d'alerte en jumelant les informations du nouveau piézomètre réalisé par le BRGM à Warloy-Baillon (n° BSS 00471X0080, cf. localisation sur la Figure 77) dans le cadre du projet de recherche Interreg FLOOD-1, et l'ancien piézomètre de Senlis-le Sec (n° BSS 00471X0010).

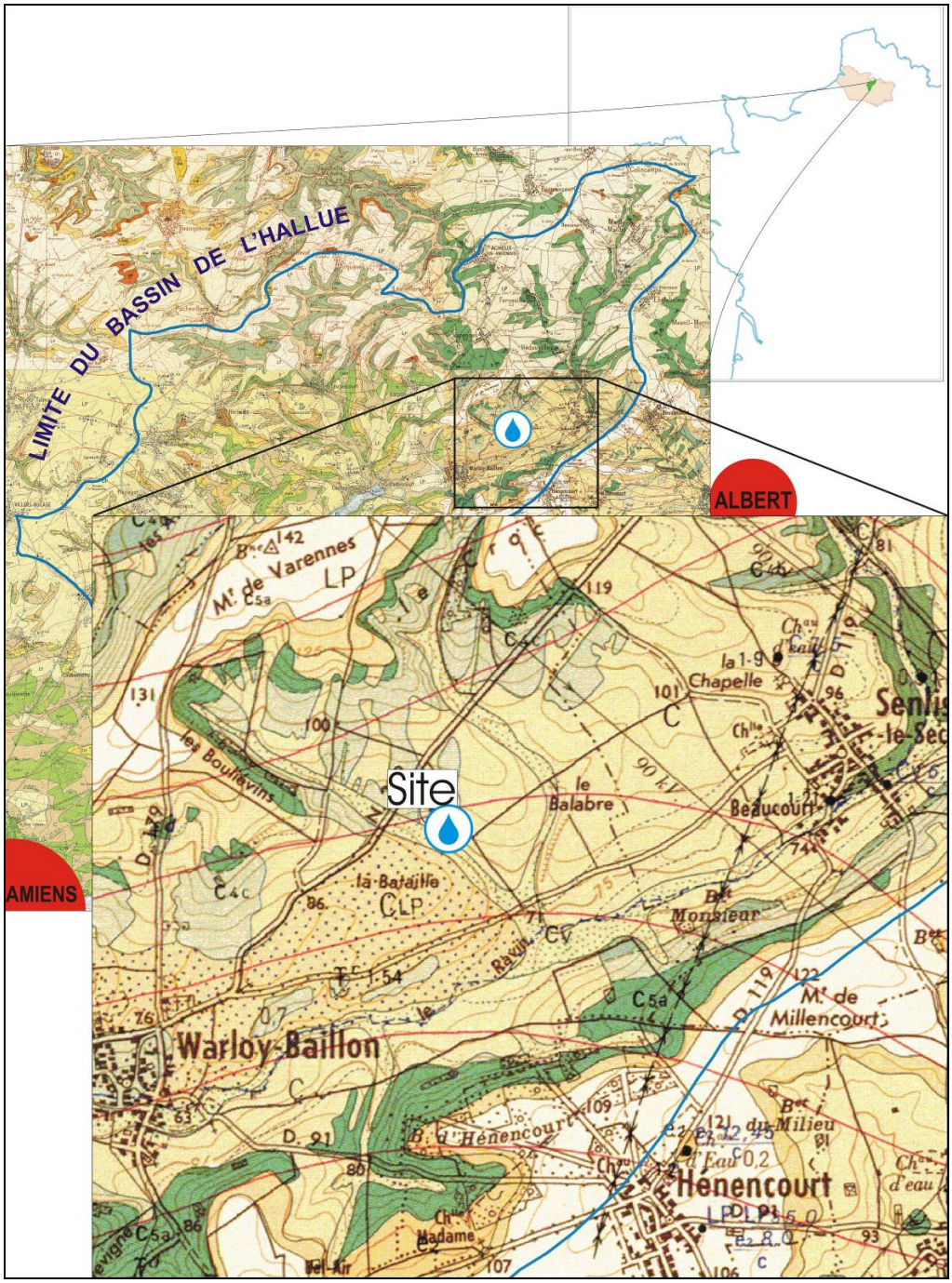


Figure 77 : Localisation du nouveau piézomètre de Warloy-Baillon (Projet Interreg FLOOD-1)

7.2.2. Nord Pas de Calais.

Un des plus anciens piézomètres avec les chroniques les plus anciennes est celui de Tincques (n° BSS 00254X0003), situé au centre du plateau crayeux dans le département du Pas-de-Calais (Figure 78).

7.2.3. Région Centre.

Concernant la région Centre les piézomètres de Bu (n° BSS 01815X0006) et de Croisilles (n° BSS 02171X0008), dans le secteur de Saint-Laurent-la-Gâtine (Eure-et-Loir), où se sont produites des remontées, pourraient être utilisés pour tester un système d'alerte.

7.2.4. Région Champagne Ardennes

Concernant la région de Champagne-Ardennes, une des crues les plus importantes s'est déclarée à Saint-Loup-en-Champagne (Ardennes), dans un environnement de craie. Malheureusement cet endroit ne dispose pas d'un piézomètre à proximité. Le plus proche est celui d'Asfeld (n° BSS 01082X0015). Il faudrait sans doute prévoir d'en construire un, ou d'équiper un ouvrage existant d'un enregistreur de niveau.

7.2.5. Région Normandie

Pour ce qui concerne la Normandie, il serait intéressant de sélectionner un site d'essai dans les calcaires du Bathonien-Bajocien à proximité de la ville de Caen (sites à déterminer avec la DIREN Basse Normandie).

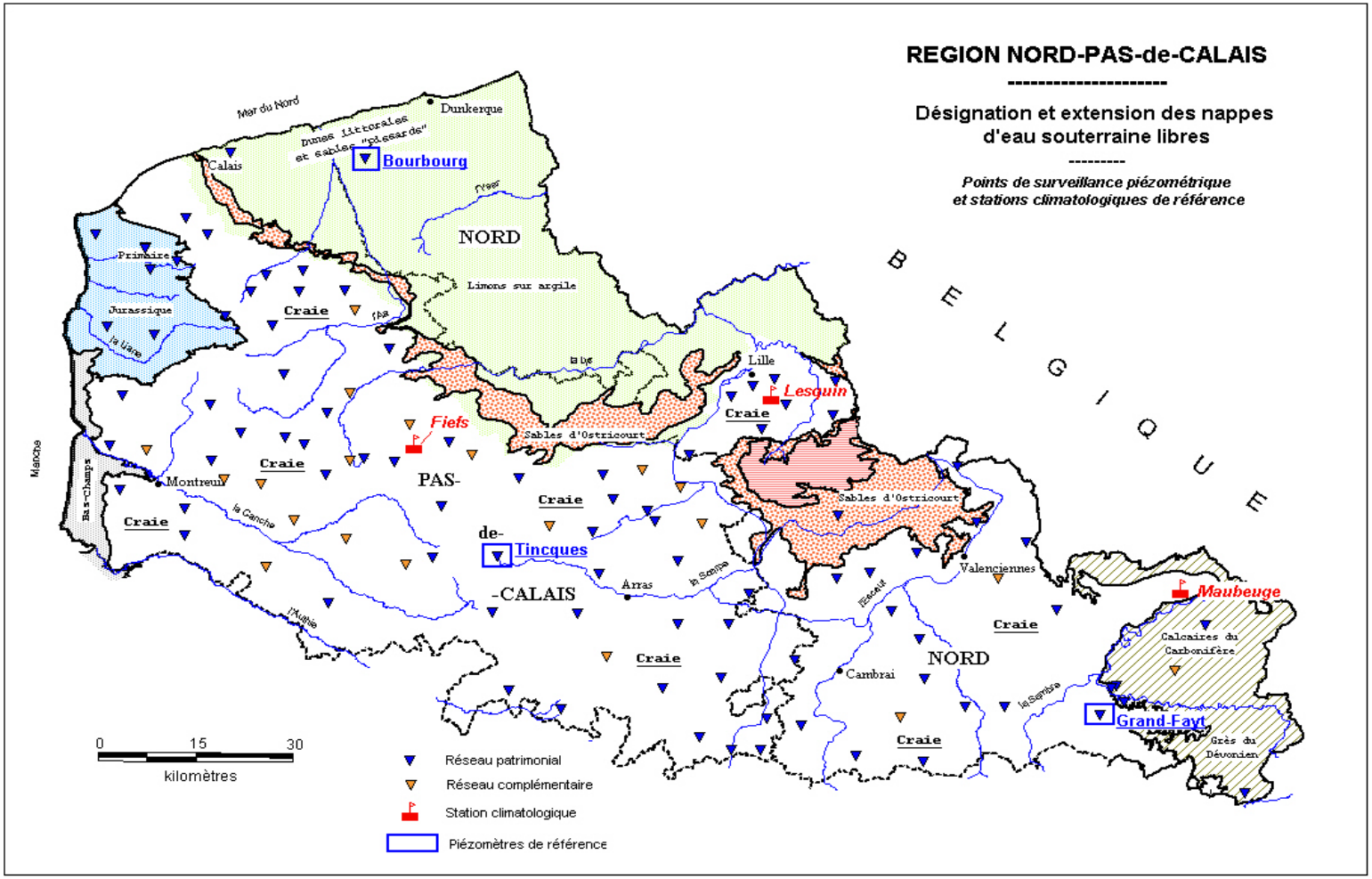


Figure 78 : situation géographique et hydrogéologique du piézomètre de Tincques

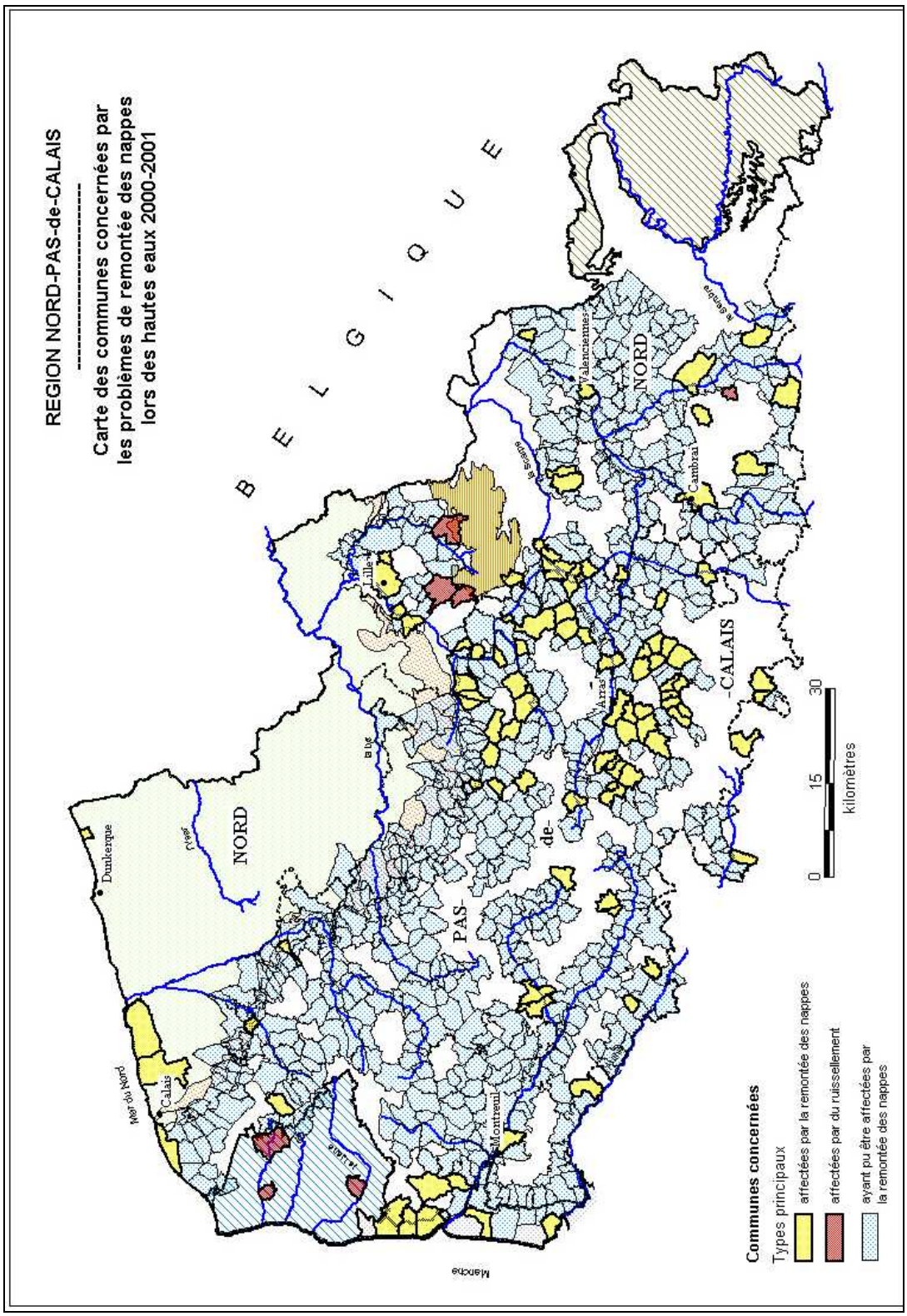


Figure 79 : situation des événements de remontées de nappes par rapport au piézomètre de Tincques.

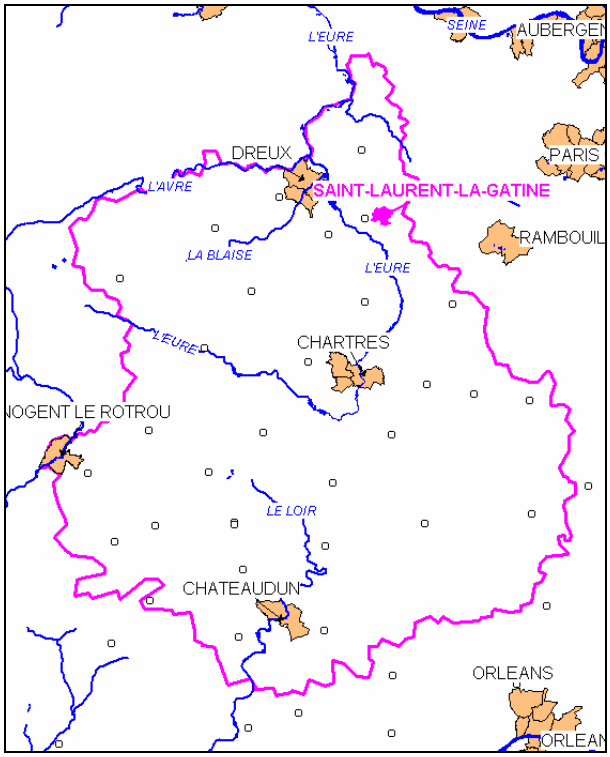


Figure 80 : situation générale du site de Saint-Laurent-la-Gâtine (d'après rapport SGR Centre)

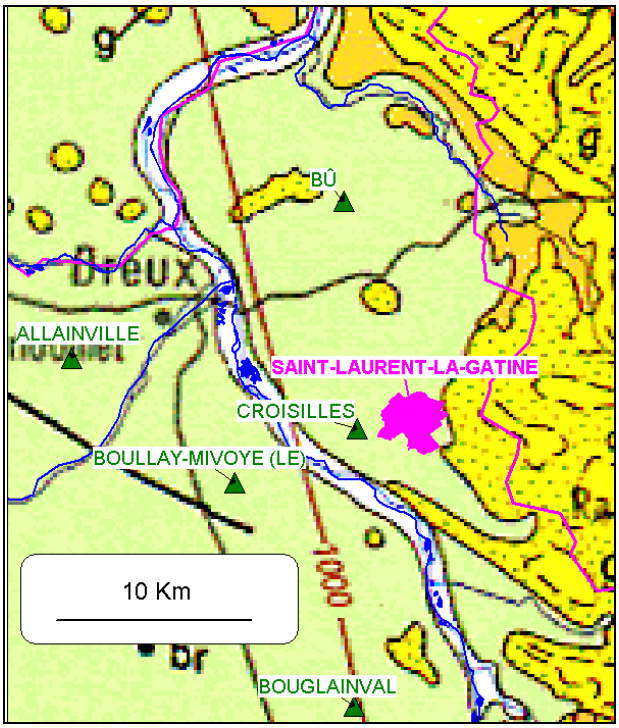


Figure 81 : environnement hydrogéologique de Saint Laurent La Gâtine.

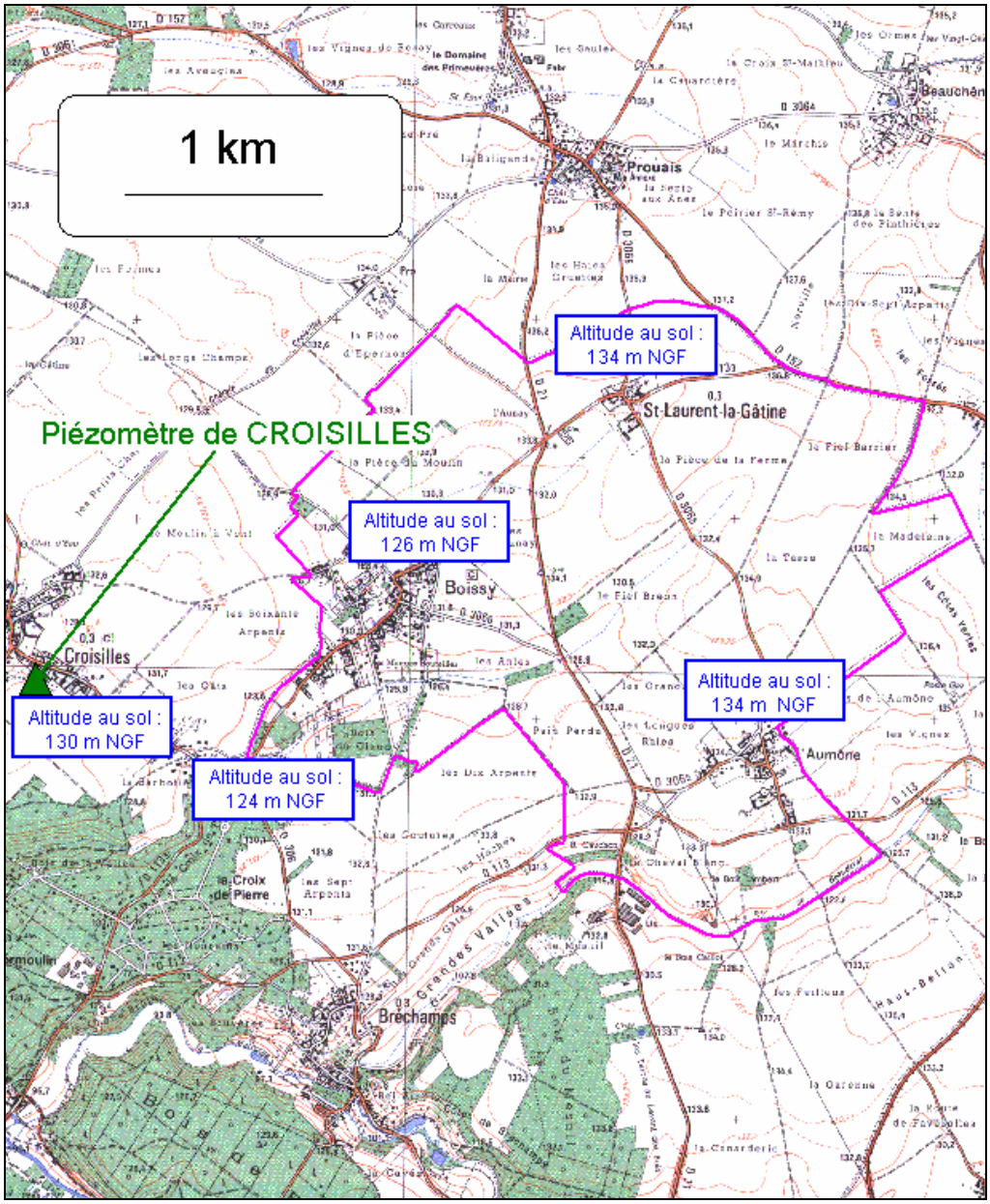


Figure 82 : localisation du piézomètre de Croisilles et du village de Saint-Laurent-la-Gâtine.

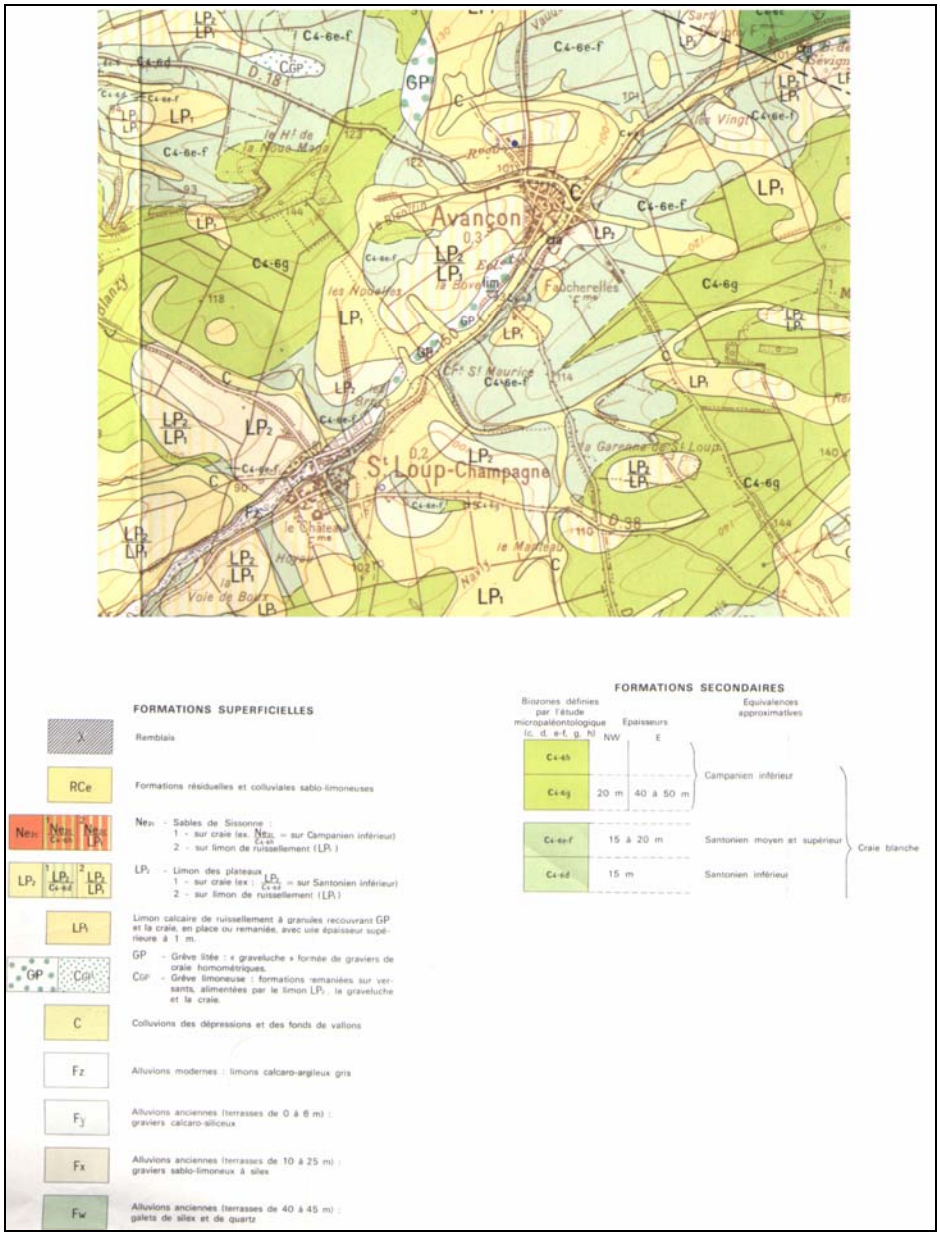


Figure 83 : Localisation de St Loup en Champagne - extrait de la carte géologique d'Asfeld.

8. Préconisations de prévention

8.1. Typologie sommaire des dégâts.

Les dégâts imputables aux remontées de nappes sont similaires à celles qui sont provoquées par les inondations classiques de ruissellement liées au débordement des cours d'eau en crue. Les plus classiques sont :

- les submersions en fond de vallées (*Figure 86*) avec destruction des cultures et « gel » des terres pendant parfois plusieurs mois
- l'ennoyage de caves, sous-sols (*Figure 88*), parkings souterrains dans les agglomérations ou les maisons isolées (cas avérés très fréquents en 2001).

Contrairement aux crues de surface, l'inertie des aquifères qui en sont responsables provoque une durée très importante du phénomène, souvent de plusieurs semaines ou de plusieurs mois. En grande partie à cause de ce facteur temps, on peut citer certaines conséquences maintenant classiques de ce type d'inondations sur les infrastructures :

- La dégradation, par sous-pression, de la voirie (*Figure 85* et *Figure 87*), souvent plus ou moins imperméable, ou des voies ferrées,
- la déstabilisation d'édifices par tassement du sol après ressuiement (*Figure 89*),
- le glissement de talus ou de versants de coteaux à pente forte, constitués de terrains meubles (limons, sables, argiles…),
- l'affaissement ou l'effondrement de cavités souterraines, naturelles ou d'origine anthropique (carrières, souterrains, sapes de guerre…), par ennoyage et affaiblissement des piliers ou des parois,
- La dégradation de voies de communication due à l'effet de barrage d' ouvrages de franchissement sous-dimensionnés (*Figure 84*) pour de tels débits peu fréquents.

D'autres types de désordres peuvent affecter les ressources en eau, et la nappe elle-même, telle :

- la contamination de la nappe par submersion de substances polluantes (citernes à carburants, citernes particulières à fuel, stocks de produits chimiques, stations d'épuration, fosses septiques)
- ou mise en contact de l'eau avec des substances contaminantes diverses (décharges, épandages, stations d'épuration, cimetières, etc.…).

Figure 84 : Fonches (10 juillet 2001). Un ponceau sous-dimensionné fait barrage.

Figure 85 : Chouy. Dégradation de la chaussée après l'inondation.

Figure 86 : Tartigny – inondation de plateau

Figure 87 : Inondation de la D24 à Montaigu.

Figure 88 : Inondation de sous-sol à Haisnes (Nord Pas de Calais)

Figure 89 : Daours. Fissures dans une maison ancienne.

8.2. Conseils en secteur d'inondation par remontées de nappes

Lorsqu'une remontée de nappe se produit et inonde des logements, il faut savoir que sa durée pourra être de plusieurs semaines et même dans certains cas de plusieurs mois. Elle aura donc les mêmes effets qu'une inondation par crue de rivière, avec un facteur temps en plus. La macération du mobilier et des matériaux de construction conduira souvent à des dégâts irréversibles. Il faut savoir aussi que l'eau de l'extérieur, mais même des conduites d'eau potable, se contaminera par mélange avec le contenu des égouts et des fosses septiques.

8.2.1. Comment se renseigner avant une décision d'acquisition

Lorsqu'on veut prendre une décision d'acquisition d'un bien immobilier, il convient de se renseigner sur les éventualités d'inondations par remontées de nappes auprès de la mairie du lieu, auprès de la DIREN de la région, sans oublier de faire une enquête de voisinage chez les gens qui y habitent déjà. Le site internet donnera une indication, mais rien ne remplacera une bonne enquête de voisinage.

Ceci est particulièrement nécessaire dans les régions du Nord Pas de Calais, de Picardie, de Haute et Basse Normandie, de Champagne-Ardennes, d'Ile de France, de Poitou-Charentes et du Centre, qui sont les principaux secteurs où des remontées de nappes se sont produites en 2001 et 2002.

8.2.2. Que faire de façon préventive ?

Les premiers conseils à donner reposent sur un fait : il est impossible d'empêcher l'eau d'envahir les bâtiments lors d'une crue de remontée, beaucoup plus difficilement d'ailleurs que pour une crue de ruissellement puisque l'eau monte par le terrain et commence à inonder les sous-sols.

Les moyens de retarder l'eau. Il est toujours possible de se renseigner sur les moyens qui permettent de retarder la progression de l'eau (sacs de sable, batardeau par exemple), mais il faut savoir que ces dispositifs ne sont pas longtemps efficaces en cas de remontées de nappes.

Le pompage en sous-sol pour protéger des installations. Si vous possédez un bien dans un secteur connu pour ce type d'aléa, il est possible d'installer en sous-sol de petites pompes d'épuisement, lorsque les remontées sont fréquentes mais de peu d'amplitude, de façon à conserver le niveau de l'eau le plus bas possible. Si vous avez un sous-sol, ménagez y dans l'endroit le plus bas un puisard, et installez-y une pompe de reprise. Gardez à proximité une longueur suffisante de tuyaux d'évacuation pour mener jusqu'à une bouche d'égout. Ce système vous protégera efficacement d'une inondation si la remontée de nappe n'est pas trop importante, à condition que le débit de votre pompe soit suffisant.

En revanche il faut savoir que des pompages trop énergiques augmentent la pression différentielle entre l'intérieur du sous-sol (niveau d'eau déprimé par le pompage) et l'extérieur. Cette différence de pression arrive à détruire les joints de maçonnerie et peut provoquer des dégâts importants.

Si les sous-sols ne comportent pas d'équipements coûteux à protéger (chaudières par exemple, qu'il faudrait éviter d'installer en sous-sol dans les secteurs concernés) Il est souvent préférable de laisser le niveau de l'eau monter, après avoir mis en sécurité ce

qui pouvait être déplacé. Si vous le pouvez, installez plutôt votre chaudière et votre réserve de carburant au dessus du niveau du sol.

Le nettoyage des abords et le drainage. Un des principes fondamentaux est de faciliter le plus possible la circulation de l'eau et le drainage. Si votre propriété comprend un ruisseau ou des fossés d'évacuation, faites attention à ce qu'ils soient toujours nettoyés (évacuation de déchets ou de végétation envahissante), et qu'ils ne soient pas obstrués sur leur cours. Si c'est le cas, faites en part à votre mairie.

Vérifiez que votre maison dispose de drains efficaces installés tout autour du bâtiment (en particulier autour du niveau du sous-sol) et dirigés vers un point de moindre altitude, susceptibles d'évacuer rapidement l'eau d'une remontée de nappe, et de soulager les murs d'un excès de pression.

Les circuits électriques. Il est conseillé de revoir son système électrique dans les parties basses du logement, de manière à placer les prises et les appareils au dessus du niveau attendu de l'eau.

Communication avec les égouts ou les fosses septiques : il est conseillé de munir les tuyaux d'évacuation d'eaux usées de clapets anti-retour, pour éviter que les eaux des fosses septique et surtout celles des égouts (qui peuvent avoir une forte pression) n'envahisse votre maison.

Events de toute sorte : de la même manière les divers évents et grilles de ventilation donnant sur l'extérieur doivent préférentiellement être placées en hauteur.

Piscine : si vous avez une piscine enterrée, pensez à la remplir le plus possible. Si elle restait vide la pression de l'eau la ferait remonter à la surface et détruirait les tuyauteries de pompage et de refoulement.

Les dispositions d'ordre général. Elles sont multiples et de divers ordres. Du point de vue de l'assurance de vos biens, il convient de savoir si vous pouvez être assuré et à quelles conditions contre des dégâts de remontées de nappes. Certains assureurs refuseront peut-être en raison d'événements passés, ou bien fixeront des primes d'assurance qui en décourageront beaucoup. De toute manière c'est un bon principe de faire des photos détaillées des biens les plus précieux, et même de l'état intérieur et extérieur de la maison, si possible avec un appareil photo électronique qui indique la date sur la photo. Ces précautions seront indispensables en cas d'indemnisation.

Il vous faudra aussi mettre sur pied un plan familial de prévention et d'évacuation, qui vous permettra de ne rien oublier lorsque l'événement surviendra.

8.2.3. Comment savoir si une remontée peut se produire et dans quels délais ?

Les remontées de nappes se produisent surtout dans les secteurs où la variation annuelle de la nappe peut être importante (de l'ordre de la dizaine de mètres pour fixer les idées, même si ce n'est pas le cas en saison sèche), et surtout là où cette variation se surimpose à une fluctuation interannuelle (c'est ce que les spécialistes appellent « l'effet mémoire » de l'aquifère).

Cette fluctuation interannuelle n'apparaît pas sur tous les enregistrements de piézomètres. Elles correspondent à l'alternance de cycles pluriannuels de périodes sèches ou humides. Il faut se renseigner (auprès de la DIREN ou du SGR du BRGM) si c'est le cas pour votre secteur. Il est aussi possible de se renseigner sur le numéro national du piézomètre le plus proche du lieu, et de suivre l'évolution de son niveau en

consultant le site public ades sur www.eaufrance.fr. C'est lui qui sert aux professionnels à évaluer la situation, et les enregistrements de niveau sont souvent à fréquence de mise à jour hebdomadaire.

Si vous constatez que le niveau des plus basses eaux de la nappe qu'il mesure (et qui est généralement atteint dans la période août à octobre de chaque année) augmente régulièrement depuis quelques années, c'est que la nappe reconstitue ses réserves.

Si le niveau que vous constatez a déjà été atteint dans des périodes où des inondations par remontées ont eu lieu (1995, 2001, 2002 par exemple), et que les conditions atmosphériques sont exceptionnellement pluvieuses, il existe un risque qu'une remontée se produise si les conditions climatiques persistent. Il est alors possible de demander à la DIREN ou en préfecture quel est l'avis des spécialistes.

D'autres indications plus simples peuvent vous renseigner :

- dans des lieux situés au voisinage de votre domicile, vous constatez que certaines sources temporaires sont entrées en activité après avoir disparu pendant des mois ou des années, en particulier dans des vallons ordinairement secs. Vous pouvez aussi remarquer que les griffons de sources qui existent toute l'année se sont déplacés vers l'amont de plusieurs centaines de mètres, et que leur débit augmente (c'est un indice que le niveau de la nappe monte et se rapproche du sol). Vous disposez probablement alors de quelques mois encore avant que le phénomène ne se déclenche, selon le régime pluviométrique qui se révélera lors de l'automne, de l'hiver, et du printemps qui suivent.

8.2.4. Ce qu'il faut faire quand l'inondation survient

Si la remontée de nappe est de faible amplitude et n'affecte que le sous-sol: si vous disposez d'une pompe disposez vos tuyaux de refoulement jusqu'au caniveau le plus proche, et vers un dénivelé, et mettez en route votre pompe d'épuisement dans votre sous-sol. Dans ce cas il est probable que cette seule mesure suffira.

Si la remontée est trop importante pour être combattue par une pompe d'épuisement, il peut être dangereux de pomper. Dans ce cas précis :

- il ne faut pas pomper dans la cave ou le sous-sol, car la baisse du niveau de l'eau à l'intérieur entraîne une mise en pression de l'eau sur la face extérieure des murs, qui peut conduire le bâtiment à s'effondrer. En général on observe de petits jets d'eau à l'intérieur du local, entre les joints de maçonnerie. Il vaut mieux abandonner le local en emmenant tout ce qui peut avoir de la valeur.

Mais le processus est relativement lent avant de devenir catastrophique. Vous avez donc le temps de prendre quelques précautions :

- Déplacez tous les meubles et objets de valeur dans les étages, et transportez y de la nourriture et de l'eau potable, car l'eau sera probablement coupée dans quelque temps, ou il est fort probable qu'elle sera vite contaminée. Abstenez vous dans la mesure du possible de consommer l'eau du réseau pendant l'inondation. Stockez par exemple de l'eau en bouteille ou remplissez des bouteilles et des bidons d'eau potable.
- Rechargez vos appareils de communication et d'information tant que le réseau électrique fonctionne (téléphones mobiles, appareils de radio portables). Restez

régulièrement à l'écoute de fréquences conseillées par la Préfecture ou la Sécurité Civile pour consulter les bulletins d'information

- Préparez des vêtements de rechange et des vêtements imperméables, ainsi que des moyens d'éclairage et d'information autonome (torches électriques, batteries, appareils radio portatifs, téléphones mobiles rechargés)
- Vérifiez que vos voisins ont été avertis des annonces officielles sur ce qu'il convient de faire, en particulier si ce sont des personnes âgées, malades ou handicapées.
- Dans le cas où vous êtes situés en contrebas d'un secteur de remontée, ce seront les eaux de ruissellement qui vont vous envahir. Dans ce cas vous pouvez utiliser les armes de défense conseillées contre les crues de surface : sacs de sables et batardeaux. Remplissez et installez des sacs de sable pour boucher les issues, notamment les portes. Ne remplissez pas trop les sacs, environ aux deux tiers, de manière à ce que leurs formes s'épousent parfaitement entre elles (autrement, trop remplis, il risque d'y avoir des espaces aux bordures des sacs). N'oubliez pas de bloquer toutes les ouvertures (aérations, tuyaux donnant sur l'extérieur), et notamment toutes les ouvertures situées assez bas sur les murs. Si vous n'avez pas de sable, utilisez de la terre, ce sera toujours mieux que rien.

Lors de l'inondation, l'électricité et le gaz seront sans doute coupés. De toute manière il vous faudra couper l'électricité au compteur avant que l'eau n'envahisse tout pour éviter les électrocutions lorsque l'eau parviendra au niveau des prises électriques. Assurez-vous que vous sachiez comment couper votre compteur de gaz, d'électricité ou d'eau.

8.2.5. Lorsque l'inondation est là.

Si vous constatez autour de vous que des personnes paniquent, aidez les mais appelez aussi les numéros de téléphone que vous aurez noté pour ces instants, en particulier si des personnes âgées ou handicapées ne peuvent prendre les dispositions nécessaires

Si vous estimez que la situation ne présente pas de danger particulier, il vaut mieux que vous demeuriez le plus longtemps possible chez vous, si nécessaire en vous déplaçant à l'étage. Autrement si votre logement est devenu inhabitable vous tenterez de joindre le logement d'amis ou de personnes de votre famille. Faites de façon autonome tout ce que vous pouvez faire, pour éviter dans la mesure du possible de surcharger les services de secours.

Déplacez les personnes et les animaux en lieu sûr, dans les étages si c'est possible. Prévoyez des litières pour les animaux de compagnie.

En dernier ressort, si la situation devient telle que vous deviez quitter votre logement et que ne l'avez pas déjà fait, coupez le gaz, l'eau et l'électricité, et essayez d'emporter des vêtements chauds et des couvertures, des médicaments de base, des moyens d'éclairage, des piles électriques, de la nourriture pour bébés si c'est nécessaire dans votre cas, sans oublier vos animaux domestiques.

8.2.6. Quand vous reviendrez après l'inondation.

Faites attention aux systèmes électriques. L'eau les a certainement détériorés, et remettre le circuit en marche peut provoquer de graves incidents. Appelez plutôt un spécialiste.

Ne tentez pas de réparer tout de suite ce qui est endommagé et assure, au risqué de vous priver d'une indemnisation. Avertissez votre assureur et attendez sa visite, tout sera plus clair pour lui.

Dispose of damaged goods until your insurance company has had the opportunity to inspect them.

N'utilisez pas tout de suite le réseau d'eau potable, avant d'avoir l'assurance que sa qualité est revenue à la normale
Mais aérez le plus possible votre logement, et commencez à nettoyez les abords.

9. Conclusion

L'estimation de la sensibilité aux remontées de nappes en zone sédimentaire par la méthode développée dans la présente étude semble avoir donné satisfaction à petite échelle. De ce point de vue l'objectif de cerner le phénomène à l'échelle de la France a été atteint. D'une façon globale elle reproduit en effet dans chaque secteur les tendances vérifiées sur le terrain par les hydrogéologues, et permet de disposer d'un outil d'évaluation du phénomène sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Certains secteurs souffrent cependant de l'imprécision des données de base (notamment absence de discrimination entre aquifères libres et captifs dans les bases de données utilisées comme source, en particulier en Aquitaine). **C'est une des raisons pour lesquelles elle n'est pas utilisable dans le cadre de l'établissement d'un PPRI**.

Il est possible d'affiner davantage les contours des objets SIG dans le cadre de la même méthode ; c'est ce qui est en cours de réalisation dans le cadre de l'étude sur l'Atlas des risques dans le département de l'Oise. Mais parvenir à une définition à l'échelle cadastrale (1/25000ème par exemple) pour une utilisation dans le cadre d'un PPRI **est aujourd'hui hors de portée.** En effet les investissements qu'il faudrait réaliser (forage de nombreux ouvrages de référence, développement d'un Modèle Numérique de Terrain de haute définition), et le temps nécessaire à l'acquisition de nouvelles chroniques de données, ne le permettent pas à moyen terme.

Compte tenu de ces limitations, les cartes élaborées peuvent parfaitement servir d'indicateurs aux preneurs de décision, élus locaux, professionnels ou grand public, à la condition qu'il soit bien compris :

- Que les valeurs de sensibilité sont relatives entre elles et ne reposent sur aucune fréquence de l'aléa de remontée ;
- Qu'aucun enjeu particulier n'a été pris en considération lors de leur réalisation, et qu'il ne s'agit donc pas d'une carte de risque au sens propre, mais plutôt d'une tendance **intrinsèque** de l'environnement hydrogéologique ;
- Que les données utilisées –les seules d'ailleurs disponibles à l'échelle de toute la France- sont très hétérogènes et diversement réparties, et que les méthodes d'interpolation ne permettent pas d'atteindre une précision de détail ; l'échelle du 1/50000ème ne peut en aucun cas être dépassée ;
- que pour une utilisation à grande échelle elles doivent être soigneusement vérifiées par des enquêtes sur le terrain, basées sur des événements d'inondation dues à des crues de surface, ou sur les événements de remontées de nappes qui ont eu lieu en 1995, 2001, et 2002.

Pour aller plus loin afin d'élaborer une cartographie précise du risque sur des zones qui ont été concernées par ces remontées, lorsque par exemple des enjeux importants en justifierait la mise en œuvre, il conviendrait d'utiliser des données locales (d'extension géographique limitée) et des outils beaucoup plus précis.

Les termes de référence de l'étude demandaient de tester une méthode sur certaines zones du socle. L'étude a donc appliqué une méthode différente de celle du domaine sédimentaire sur les secteurs de socle (Massif Armoricain, Massif Central, Massif des Vosges). Elle a abouti à une cartographie de la sensibilité des domaines de socle des départements de ces massifs. Les résultats n'ont pas été officiellement validés et ne sont pas aussi probants que ceux de l'étude en domaine sédimentaire, mais ils permettent de distinguer des secteurs particuliers où des remontées semblent pouvoir se produire.

Lorsqu'on examine les hydrogrammes des piézomètres qui contrôlent les aquifères de France, on constate que les remontées de nappes se sont produites sur les secteurs où leur variation montre ce qu'on appelle un « effet mémoire ». Les systèmes d'alerte que l'on pourra mettre en place dans les secteurs les plus sensibles (Normandie, Picardie, Nord-Pas de Calais, Champagne, Ile-de-France, devront exploiter cette caractéristique.

Pour ce faire il conviendra d'utiliser les ouvrages **situés en position de plateau**, éloignés des grands axes de drainage, qui montrent mieux l'augmentation de la cote des niveaux d'étiage en liaison avec cet effet mémoire, et permettent donc de mieux surveiller la progression du phénomène par rapport aux ouvrages situés plus bas**. Au besoin de nouveaux piézomètres devront être forés** dans des points particuliers pour seuiller les différents niveaux de vigilance et d'alerte.

Le site internet ouvert lors de l'étude www.inondationsnappes.fr qui met les cartes à disposition montre une fréquentation croissante. Celle-ci est très probablement en rapport avec l'obligation de renseigner les acquéreurs de biens immobiliers sur l'occurrence de risques. Ce site doit maintenant vivre, c'est-à-dire s'enrichir des questions posées par les utilisateurs et de la réflexion des professionnels sur les mécanismes physiques du déclenchement du phénomène, qui n'est encore que très imparfaitement compris.

10. Bibliographie

1. Atlas des risques du département de l'Oise (en cours).

2. Etude de sensibilité aux remontées de nappes – Méthodologie et application à 20 secteurs tests de France métropolitaine. Machard de Gramont H., Mardhel V., Pointet T., Schomburgk S. et al. BRGM/RP 52340-FR Avril 2003, 185p, 99 figures, 6 tableaux., 1 annexe.

3. Vers une modélisation hydrologique adaptée à l'évaluation des pollutions diffuses. Application au bassin versant de Naizin (Morbihan). Thèse présentée par Nadia CARLUER Décembre 1998 Université Pierre et Marie Curie.

4. Première analyse des composantes des écoulements souterrains du bassin versant de la Somme en période de crues. Rapport BRGM/RP-51030-FR de juillet 2001.

5. Réseau patrimonial de surveillance du Bassin Artois-Picardie :analyse et synthèse des données pluviométriques et piézométriques du 1er semestre 2001. Rapport BRGM/RP-51048-FR

6. Réseau patrimonial de surveillance du Bassin Artois-Picardie : analyse et synthèse des données pluviométriques et piézométriques du 2ème semestre 2001. Rapport BRGM/RP-51320-FR

7. Inondation par les eaux souterraines. Printemps 2001 : synthèse des constats effectués dans le département de l'Eure. Août 2001. E. EQUILBEY, avec la collaboration de B.BONHOMME et P. LEBRET. Rapport BRGM/RP-51154-FR.

8. Inondation par les eaux souterraines. Printemps 2001 : synthèse des constats effectués en Seine-Maritime. Avril 2001. E. EQUILBEY, P. LEBRET. Rapport BRGM/RP-50959–FR. Rapport BRGM complémentaire 51131-FR

9. Inondations par débordement des eaux souterraines. Synthèse des constats de l'hiver et du printemps 2001 (Calvados). juillet 2001. E.EQUILBEY, avec la participation technique de P. LEBRET, J.-C. MARTIN et P. VIGOUROUX. Rapport BRGM/RP-51122–FR.

10. Inondations par remontée des nappes phréatiques observées au cours du dernier trimestre 2000 et du premier semestre 2001 dans le Nord-Pas-de-Calais. Causes et conséquences du phénomène. Analyse et synthèse cartographique des évènements. Tendance prévisionnelle à court terme. J.Y. CAOUS. février 2002. BRGM/RP-51529-FR

11. Département de l'Oise, inondations 2001 : Constat des remontées exceptionnelles du niveau des nappes phréatiques, troisième rapport.. NAIL.C., BERTHIER.F., CAUDRON.M., HEDE.A., HURIEZ.L. 2001/11/01. BRGM/RP-51225-FR.

12. Bassin Seine-Normandie. Picardie - Nappe de la craie. Carte piézométrique "hautes eaux" 2001. NAIL.C., BATKOWSKI.D., BESANCON.S., GAUDEFROY.M.J., KIEFFER.C., PINSON.S., BRINON.P., SAINT.OMER.P. BRGM/RP-51150-FR, 2001

13. Département de l'Oise, inondations 2001 : Constat des remontées exceptionnelles du niveau des nappes phréatiques, deuxième rapport. NAIL.C., BERTHIER.F., CAUDRON.M., HEDE.A., HURIEZ.L. BRGM/RP-50903-FR, 2001.

14. Département de l'Oise - Inondations 2001 - Constat des remontées exceptionnelles du niveau des nappes phréatiques. Communes de Fontaine-Saint-Lucien, Hénonville, Montataire, Rémy, Rosoy, Saint-Vaast-de-Longmont, Enencourt-Leage, Liancourt, Rochy-Condé, La-Bosse, Vendeuil - Caply, Plainville. NAIL.C. BRGM/RP-50722-FR, 2001.

15. Analyse des situations d'inondation de nappe phréatique dans le département du Rhône – Printemps 2001. P.VIGOUROUX. Juillet 2001. Rapport BRGM/RP-50987-FR.

16. Analyse des situations d'inondation de la nappe phréatique de Lyon en mars 2001. P.VIGOUROUX. Octobre 2001. BRGM/RP-51160-FR.

17. Appui à la Police de l'Eau. Inondation par remontées des nappes phréatiques sur la commune de Saint Laurent-la-Gâtine (Eure-et-Loir). Rapport d'expertise Inondations CATNAT N° 7-2002 –BRGM Centre. Rapport 2002 de bilan des activités de police de l'eau. J-C. MARTIN. BRGM/RP 52 202-FR

18. Appui à la Police de l'Eau. Inondations par remontées des nappes phréatiques. Rapport 2002 de bilan des activités de police de l'eau. J-C. MARTIN. BRGM/RP 51 548-FR.

19. LACHASSAGNE P., WYNS R. (2003).- Structure et fonctionnement des aquifères de socle.- In *Eaux souterraines de la France*, monographie Comité National Français de l'Association Internationale des Hydrogéologues

LACHASSAGNE P., C. GOLAZ, D. THIERY, S. AHMED, J.C. MARECHAL, F. TOUCHARD, R. WYNS (2001).- A methodology for the mathematical modelling of hard-rock aquifers at catchment scale based on the geological structure and the hydrogeological functioning of the aquifer.- Proceedings of the *XXXI International Association of Hydrogeologists Congress, Munich, Germany, 10- 14 September 2001.* "New approaches characterising groundwater flow". Edited by K.-P. Seiler and S. Wohnlich, A.A. Balkema Publishers, pp.367-370

20. Analyse des situations d'inondation de nappe phréatique dans le département de l'allier – mai et juillet 2001. P.VIGOUROUX. Septembre 2001. BRGM/RP-51125-FR.

21. Commune de Bezannes (Marne). Demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle lié à une remontée de nappe phréatique. Rapport d'expertise hydrogéologique. E. ROUXEL-DAVID, avec la collaboration de O. LEJEUNE. Septembre 2001. Rapport BRGM/RP-51163-FR.

22. Commune de La Rivière-de-Corps (Aube). Demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle lié à une remontée de nappe phréatique. Rapport d'expertise hydrogéologique. E. ROUXEL-DAVID. Novembre 2001. Rapport BRGM/RP-51284-FR.

23. Commune de Loivre (Marne). Demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle lié à une remontée de nappe phréatique. Rapport d'expertise hydrogéologique. E. ROUXEL-DAVID, *avec la collaboration de* O. LEJEUNE. Septembre 2001. BRGM/RP-51164-FR.

24. Commune de Reims (Marne) Société Agrofleurs. Demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle lié à une remontée de nappe phréatique.Rapport d'expertise hydrogéologique. E. ROUXEL-DAVID. Octobre 2001. Rapport BRGM/RP-51231-FR.

25. Commune de Saint-Thibault (Aube). Demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle lié à une remontée de nappe phréatique. Rapport d'expertise hydrogéologique. E.ROUXEL-DAVID. Novembre 2001.Rapport BRGM/RP-51285-FR.

26. Commune de Taissy (Marne). Demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle lié à une remontée de nappe phréatique. Rapport d'expertise hydrogéologique. E. ROUXEL-DAVID. Novembre 2001. Rapport BRGM/RP-51162-FR.

27. Commune de Tinqueux (Marne). Demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle lié à une remontée de nappe phréatique. Rapport d'expertise hydrogéologique. E. ROUXEL-DAVID. Octobre 2001. Rapport BRGM/RP-51162-FR.

28. Commune de Vertus (Marne). Examen des désordres liés aux infiltrations d'eau souterraine rue du Général Koenig (n°30, 31, 33, 35). E. DAVID, avec la collaboration de O. LEJEUNE. Février 2001. Rapport BRGM/RP-50801-FR.

29. Commune d'Avançon (Ardennes). Demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle lié à une remontée de nappe phréatique. Rapport d'expertise hydrogéologique. J. DAGAIN, E. DAVID, O. LEJEUNE, S. DACHY. Juillet 2001. Rapport BRGM/RP-51074-FR.

30. Commune de Saint-Loup-en-Champagne (Ardennes). Demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle lié à une remontée de nappe phréatique. Rapport d'expertise hydrogéologique. J. DAGAIN, E. DAVID, O. LEJEUNE, S. DACHY. Juillet 2001. Rapport BRGM/RP-51075-FR.

31. Commune de Vieux-les-Asfeld (Ardennes). Demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle lié à une remontée de nappe phréatique. Rapport d'expertise hydrogéologique. J. DAGAIN, E. DAVID, O. LEJEUNE, S. DACHY. Juillet 2001. Rapport BRGM/RP-51073-FR.

32. Constat d'inondation de Betheny (Marne). E. DAVID. Rapport BRGM/RP-50954-FR.

33. Constat d'inondation de Boult-sur-Suippe (Marne). E. DAVID. Rapport BRGM/RP-50893-FR.

34. Constat d'inondation de Fagnières (Marne). E. DAVID. Rapport BRGM/RP-50920-FR.

35. Constat d'inondation de Flavigny (Marne). E. DAVID. Rapport BRGM/RP-50977-FR.

11. Liste des Annexes

Annexe 1 – Fiches départementales et commentaires de validation, Tome 1. Régions Alsace à Franche Comté

Annexe 1 – Fiches départementales et commentaires de validation, Tome 2. Régions Ile-de-France à Rhône-Alpes

Annexe 2 – Méthodologie de l'étude

Annexe 3 – Cartes départementales de sensibilité en domaine de socle – Massif Armoricain et Massif des Vosges

Annexe 4 – Cartes départementales de sensibilité en domaine de socle – Massif Central

Centre scientifique et technique
Service EAU
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34