Document public

Bassins versants bretons en contentieux européen : typologie et modélisation de l'évolution des concentrations en nitrates

Rapport d'avancement au 15 octobre

BRGM/RP-55842-FR
octobre 2007

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Bassins versants bretons en contentieux européen : typologie et modélisation de l'évolution des concentrations en nitrates

Rapport d'avancement au 15 octobre

BRGM/RP-55842-FR
octobre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007 EAU B44

B. Mougin, D. Allier, E. Putot, J-J. Seguin, J-M. Schroetter, R. Blanchin
Avec la collaboration de
J-L. Izac, J-P. Jégou

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Thierry POINTET	Nom : Michel LECLERCQ
Date : 22 octobre 2007	Date : 22 octobre 2007
(Original signé)	(Original signé)

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document à accès réservé

« Ce rapport est adressé en communication exclusive aux demandeurs : (MEDAD/DE et Préfecture de Région/MIRE), en 7 exemplaires conformément aux termes de la convention.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial prévus pour la Commission Européenne, le SGAE, le MAP, la DIREN Bretagne, l'INRA.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait, et, des éventuelles conséquences pouvant en résulter ».

Mots clés : logiciel TEMPO, modélisation, concentrations en nitrates, eaux souterraines, hydrogéologie, géologie, socle, agronomie, bassins versants, prises d'eau potable, Bretagne

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : B. MOUGIN, D. ALLIER, E. PUTOT, J-J. SEGUIN, J-M. SCHROETTER, R. BLANCHIN, collaboration : J-L. IZAC, J-P. JEGOU (2007) - Bassins versants bretons en contentieux européen : typologie et modélisation de l'évolution des concentrations en nitrates - Rapport d'avancement au 15 octobre - BRGM/RP-55842-FR – 123 p., 70 ill., 3 ann. dont 60 planches (vol. séparé)

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La directive européenne n°75/440/CEE du 16 juin 1975 exige que les teneurs en nitrates soient inférieures à 50 mg/litre dans les eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire dans les Etats membres. Début 2007, 9 bassins versants situés au Nord de la Bretagne restent concernés par le contentieux européen : les Echelles en Ille-et-Vilaine, l'Horn et l'Aber Wrac'h dans le Finistère, le Guindy, l'Urne, le Gouessant, l'Arguenon, le Bizien et l'Ic dans les Côtes d'Armor.

La Préfecture de la Région Bretagne (Mission Interdépartementale et Régionale de l'Eau) a demandé, au nom de l'Etat, au BRGM de réaliser une étude scientifique, afin de savoir si une réduction de 1/3 des apports azotés (abaissement de 210 à 140 kg N/ha) est suffisante pour que les teneurs en nitrates des eaux des rivières, au droit des prises d'eau pour l'alimentation en eau potable, puissent passer sous le seuil réglementaire des 50 mg/l. L'étude, détaillée dans ce rapport, est rattachée à la ligne « expertise auprès de la Direction de l'Eau » et correspond au thème 4 de la convention 2007-2009 sur « la connaissance, le suivi et la gestion des eaux souterraines » établie entre le BRGM et la Direction de l'Eau du MEDAD. Elle est inscrite dans la convention d'application 2007.

Le BRGM a réalisé une étude en 2 parties :

- une caractérisation géologique, hydrogéologique et hydrochimique des bassins versants débouchant sur une typologie ;
- une modélisation de l'évolution des teneurs en nitrates au droit des prises d'eau, grâce au logiciel TEMPO du BRGM : outil de traitement du signal permettant de respecter les courts délais imposés dans le cadre des engagements de la France auprès de la Commission européenne (besoin de 1ères conclusions à caractère opérationnel à fournir en octobre, puis dans un 2nd temps nécessité d'approfondir les investigations scientifiques avec restitution en juin 2008).

Le présent rapport détaille donc l'avancement du projet à la date du 15 octobre 2007.

1) Une caractérisation des bassins versants a permis :

- de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique de ces bassins,
- de les hiérarchiser suivant certains critères influençant la dynamique de la pollution azotée (perméabilité des formations géologiques, partition infiltration/ruissellement, indicateurs de dénitrification, teneurs en nitrates dans les eaux souterraines),
- de fournir une assise aux modélisations et aux simulations prévisionnelles et d'aider à leur interprétation.

Conformément au cahier des charges, pour 5 des 9 bassins versants (les plus petits en superficie), un travail détaillé a été réalisé :

- reconstitution de l'épaisseur des altérites,
- reconstitution d'un niveau de nappe moyen,
- appréciation de la capacité d'infiltration des formations superficielles.

Les principaux résultats sont :

- la perméabilité des terrains du sous-sol ; Classement des bassins les plus perméables au moins perméables :

+ perméables =====> - perméables

Guindy > Echelles > Ic > Arguenon > Horn > Bizien > Aber Wrac'h > Urne > Gouessant

- l'estimation de la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (sur les 5 plus petits bassins) ; cette capacité est

+ forte =====> + faible

Horn > Echelles > Bizien > Urne > Gouessant

- la participation des eaux souterraines à l'écoulement des rivières ; Classement des bassins, allant de celui qui a la participation la plus forte à celui qui a la plus faible :

+ forte participation =====> + faible participation

Horn ≥ Guindy > Gouessant ≥ Urne > Aber Wrac'h ≥ Echelles > Arguenon

- les teneurs en nitrates des eaux souterraines lors de l'été 2007 (100 points ont été analysés) ; Classement des bassins en fonction de la dégradation de la qualité :

+ pollués =====> - pollués

Horn > Aber Wrac'h > Guindy > Ic > Echelles > Arguenon > Urne

Un tableau rassemblant toutes les caractéristiques des 9 bassins (typologie) a permis de faire une synthèse des acquis.

<u>2) Des modélisations de l'évolution des teneurs en nitrates ont été réalisées sur 6 des 9 bassins en contentieux.</u>

Grâce à une adaptation du logiciel TEMPO (prise en compte des données agronomiques), les concentrations en nitrates au droit des prises d'eau potable ont été reconstituées et, suite à ce travail de calage, des simulations prévisionnelles ont été tentées. La simulation d'une réduction de 1/3 des intrants azotés, montre que :

- sur 2 bassins, les teneurs passent sous les 50 mg/l d'ici 2009 (Gouessant et Arguenon à Pléven) ;
- sur 3 bassins, la probabilité d'atteindre la conformité est forte. On observe des pics de dépassement en cas d'années très humides (Urne, Aber Wrac'h et Guindy) ;
- sur 1 bassin, les teneurs restent au dessus des 50 mg/l (Horn).

Au niveau des 3 bassins restants, les données sont soit absentes (débit du Bizien) soit incomplètes (débit de l'Ic en 2007) soit inutilisables (concentrations en nitrates sur le bassin des Echelles d'octobre 2005 à août 2007).

Le BRGM a utilisé l'ensemble des données disponibles au 15 octobre 2007 pour arriver à ces conclusions. Des compléments d'informations et de données, à fournir notamment par l'INRA, pourraient être disponibles d'ici juin 2008. Ils devraient permettre d'affiner les modélisations que l'on peut encore considérer aujourd'hui comme perfectibles.

Sommaire

1. Contexte et objectifs du projet 13

1.1. CONTEXTE 13

1.2. HISTORIQUE DE L'ETUDE 15

1.3. OBJECTIFS 15

1.4. SOURCE DES DONNEES DISPONIBLES 16

2. Caractérisation des bassins versants (volet 1) 19

2.1. CARACTERISATION GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS 19

2.1.1. Modèle conceptuel des aquifères de socle 19

2.1.2. Caractérisation globale des 4 plus grands bassins 23

2.1.3. Caractérisation détaillée des 5 plus petits bassins 30

2.2. CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES AU DEBIT DES RIVIERES 53

2.2.1. Méthode 53

2.2.2. Résultats 55

2.3. PREMIERE CARACTERISATION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DES BASSINS VERSANTS 57

2.3.1. Utilisation des qualitomètres 57

2.3.2. Recensement et prélèvement des points d'eaux souterraines 60

2.3.3. Résultats de la campagne réalisée 63

2.4. TYPOLOGIE DES BASSINS VERSANTS 68

3. Méthodologie de modélisation (volet 2) 73

3.1. TYPE DE MODÉLISATION 73

3.2. DONNÉES UTILISÉES 74

3.2.1. Les données climatologiques 74

3.2.2. Les données piézométriques 74

3.2.3. Les données hydrométriques 75

3.2.4. Les teneurs en nitrate dans le réseau de surface 75

3.2.5. Les données agronomiques 76

3.3. FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL TEMPO 81

3.3.1. Exemple simple 81
3.3.2. Généralisation 82
3.3.3. Modélisation des écoulements 83
3.3.4. Modélisation des transferts de nitrates 86

3.4. SIMULATIONS PRÉVISIONNELLES 87

4. Modélisation de l'évolution des teneurs en nitrates au droit des prises d'eau (volet 3) 91

4.1. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS 91

4.2. LE GOUESSANT 93
4.2.1. Résultats par quantile 93
4.2.2. Résultats par scénario 93

4.3. L'HORN 97
4.3.1. Résultats par quantile 97
4.3.2. Résultats par scénario 97

4.4. L'URNE 101
4.4.1. Résultats par quantile 101
4.4.2. Résultats par scénario 101

4.5. L'ABER WRAC'H 105
4.5.1. Résultats par quantile 105
4.5.2. Résultats par scénario 105

4.6. LE GUINDY 109
4.6.1. Résultats par quantile 109
4.6.2. Résultats par scénarios 109

4.7. L'ARGUENON A JUGON 112
4.7.1. Résultats par quantile 112
4.7.2. Résultats par scénario 112

4.8. L'ARGUENON A L'EXUTOIRE 114
4.8.1. Résultats par quantile 114
4.8.2. Résultats par scénario 114

4.9. L'IC 116

4.10. LES ECHELLES ET LE BIZIEN 117

5. Conclusion 119

6. Bibliographie 121

Liste des illustrations

Illustration 1 - Localisation des bassins versants étudiés 14
Illustration 2 - Sources des fichiers utilisés dans le cadre du projet 17
Illustration 3 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998) 21
Illustration 4 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité 22
Illustration 5 - Carte géologique à 1/250 000 du bassin de l'Aber Wrac'h 24
Illustration 6 - Carte géologique à 1/250 000 du bassin du Guindy 25
Illustration 7 - Carte géologique à 1/250 000 du bassin de l'Ic 26
Illustration 8 - Carte géologique à 1/250 000 du bassin de l'Arguenon 27
Illustration 9 - Géologie principale et secondaire des roches aquifères des 4 plus grands bassins 29
Illustration 10 - Secteur d'étude, carte géologique et présence altérites sur le bassin des Echelles 32
Illustration 11 - Secteur d'étude, carte géologique et présence altérites sur le bassin du Gouessant 33
Illustration 12 - Secteur d'étude, carte géologique et présence altérites sur le bassin du Bizien 34
Illustration 13 - Secteur d'étude, carte géologique et présence altérites sur le bassin de l'Horn 35
Illustration 14 - Secteur d'étude, carte géologique et présence altérites sur le bassin de l'Urne 36
Illustration 15 - Géologie principale et secondaire des roches aquifères des 5 plus petits bassins 37
Illustration 16 - Répartition des mesures piézométriques 41
Illustration 17 - Principe de modélisation de la surface piézométrique 42
Illustration 18 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin des Echelles) 45
Illustration 19 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin du Gouessant) 45
Illustration 20 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin du Bizien) 46

Illustration 21 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de l'Horn) 46

Illustration 22 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de l'Urne) 47

Illustration 23 - Classement des formations géologiques en fonction de Q/P 51

Illustration 24 - Détail des pôles caractérisant la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration 52

Illustration 25 - Superficie des bassins retenus au droit des stations hydrométriques 53

Illustration 26 - Localisation des bassins étudiés par rapport aux bassins modélisés 54

Illustration 27 - Résultats des modélisations Gardénia 56

Illustration 28 - Localisation des 10 points prélevés sur le bassin versant de l'Ic 62

Illustration 29 - Répartition des points de prélèvement sur les bassins étudiés 64

Illustration 30 - Résultats des analyses des 100 points d'eaux souterraines 66

Illustration 31 - Synthèse des analyses d'eaux souterraines 67

Illustration 32 - Synthèse des caractéristiques des bassins étudiés 70

Illustration 33 : Précipitations prises en compte pour la modélisation sur le bassin de l'Horn (influences des stations : Landivisiau 30%, Sibiril 70%). 74

Illustration 34 : Chroniques incomplètes de NO3 au niveau des AEP sur le bassin de l'Horn 75

Illustration 35 : Chroniques de nitrates reconstituée sur le bassin de l'Horn 76

Illustration 36 - Répartition dans le temps de la fertilisation azotée 76

Illustration 37 : Récapitulatif des données de modélisation 78

Illustration 38 - Schéma récapitulatif du processus de modélisation et de simulation 79

Illustration 39- Exemple de réponse impulsionnelle 81

Illustration 40 - Variables et réponses impulsionnelles dans la modélisation des écoulements 85

Illustration 41- Trois scénarios climatiques pour les simulations prévisionnellles 89

Illustration 42 – Réponses impulsionnelles "Pluie-Débits" pour les bassins du Gouessant et de l'Arguenon 92

Illustration 43- Bassin du Gouessant: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par quantile 94

Illustration 44- Bassin du Gouessant: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile 94

Illustration 45 - Bassin du Gouessant: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario 95

Illustration 46 - Bassin du Gouessant: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario 95

Illustration 47 - Bassin de l'Horn: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile 98
Illustration 48 - Bassin de l'Horn: résultats du calage sur les niveaux piézométriques et simulations prévisionnelles par scénario 98
Illustration 49- Bassin de l'Horn: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario....99
Illustration 50 - Bassin de l'Horn: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario 99
Illustration 51 – Bassin de l'Urne: résultat du calage sur les niveaux piézométriques 102
Illustration 52 – Bassin de l'Urne: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile 102
Illustration 53- Bassin de l'Urne: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario....103
Illustration 54 - Bassin de l'Urne: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario 103
Illustration 55 - Bassin de l'Aber Wrac'h: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile 106
Illustration 56 - Bassin de l'Aber Wrac'h: résultats du calage sur les niveaux piézométriques et simulations prévisionnelles par scénario....106
Illustration 57 - Bassin de l'Aber Wrac'h: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario 107
Illustration 58 – Bassin de l'Aber Wrac'h: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario 107
Illustration 59- Bassin du Guindy: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile 110
Illustration 60 – Bassin du Guindy: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario....111
Illustration 61 - Bassin du Guindy: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario 111
Illustration 62 – L'Arguenon à Jugon: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile 112
Illustration 63 - L'Arguenon à Jugon: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario....113
Illustration 64 - L'Arguenon à Jugon: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario 113
Illustration 65 – Arguenon à l'exutoire: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile 114
Illustration 66 - Arguenon à l'exutoire: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario....115
Illustration 67 - Arguenon à l'exutoire: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario 115
Illustration 68 – Bassin de l'Ic: résultats du calage sur les débits....116

Illustration 69- Bassin de l'Ic: résultats du calage sur les concentrations 116
Illustration 70- Concentrations (en mg/L) sur le bassin des Echelles 117

Liste des annexes (volume séparé)

Annexe 1 - Interpolation par la géostatistique

Annexe 2 - Planches cartographiques

Annexe 3 - Le générateur de pluie et d'ETP du logiciel TEMPO

Liste des planches (volume séparé)

Planche 1 - Image de la perméabilité du sous-sol (bassin de l'Aber Wrac'h)
Planche 2 - Image de la perméabilité du sous-sol (bassin du Guindy)
Planche 3 - Image de la perméabilité du sous-sol (bassin de l'Ic)
Planche 4 - Image de la perméabilité du sous-sol (bassin de l'Arguenon)
Planche 5 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle (bassin des Echelles)
Planche 6 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle (bassin du Gouessant)
Planche 7 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle (bassin du Bizien)
Planche 8 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle (bassin de l'Horn)
Planche 9 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle (bassin de l'Urne)
Planche 10 - Profondeur de la surface piézométrique (bassin des Echelles)
Planche 11 - Profondeur de la surface piézométrique (bassin du Gouessant)
Planche 12 - Profondeur de la surface piézométrique (bassin du Bizien)
Planche 13 - Profondeur de la surface piézométrique (bassin de l'Horn)
Planche 14 - Profondeur de la surface piézométrique (bassin de l'Urne)
Planche 15 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin des Echelles)
Planche 16 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin du Gouessant)
Planche 17 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin du Bizien)
Planche 18 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Horn)
Planche 19 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Urne)
Planche 20 - Epaisseur des altérites en place (bassin des Echelles)

Planche 21 - Epaisseur des altérites en place (bassin du Gouessant)

Planche 22 - Epaisseur des altérites en place (bassin du Bizien)

Planche 23 - Epaisseur des altérites en place (bassin de l'Horn)

Planche 24 - Epaisseur des altérites en place (bassin de l'Urne)

Planche 25 - Incertitude sur l'épaisseur des altérites en place (bassin des Echelles)

Planche 26 - Incertitude sur l'épaisseur des altérites en place (bassin du Gouessant)

Planche 27 - Incertitude sur l'épaisseur des altérites en place (bassin du Bizien)

Planche 28 - Incertitude sur l'épaisseur des altérites en place (bassin de l'Horn)

Planche 29 - Incertitude sur l'épaisseur des altérites en place (bassin de l'Urne)

Planche 30 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin des Echelles)

Planche 31 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Gouessant)

Planche 32 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Bizien)

Planche 33 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin de l'Horn)

Planche 34 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin de l'Urne)

Planche 35 - Localisation des qualitomètres autour du bassin des Echelles

Planche 36 - Localisation des qualitomètres autour du bassin du Gouessant

Planche 37 - Localisation des qualitomètres autour du bassin du Bizien

Planche 38 - Localisation des qualitomètres autour du bassin de l'Horn

Planche 39 - Localisation des qualitomètres autour du bassin de l'Urne

Planche 40 - Localisation des qualitomètres autour du bassin de l'Aber Wrac'h

Planche 41 - Localisation des qualitomètres autour du bassin du Guindy

Planche 42 - Localisation des qualitomètres autour du bassin de l'Ic

Planche 43 - Localisation des qualitomètres autour du bassin de l'Arguenon

Planche 44 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin du Gouessant

Planche 45 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin du Bizien

Planche 46 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin de l'Horn

Planche 47 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin de l'Urne

Planche 48 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin de l'Aber Wrac'h

Planche 49 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin du Guindy

Planche 50 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin de l'Ic

Planche 51 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin de l'Arguenon

Planche 52 - Stations météorologiques, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin des Echelles)

Planche 53 - Stations météorologiques, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin du Gouessant)

Planche 54 - Stations météorologiques et prise d'eau potable retenus (bassin du Bizien)

Planche 55 - Stations météorologiques, piézomètre, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin de l'Horn)

Planche 56 - Stations météorologiques, piézomètre, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin de l'Urne)

Planche 57 - Stations météorologiques, piézomètre, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin de l'Aber Wrac'h)

Planche 58 - Stations météorologiques, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin du Guindy)

Planche 59 - Stations météorologiques, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin de l'Ic)

Planche 60 - Stations météorologiques, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin de l'Arguenon)

1. Contexte et objectifs du projet

1.1. CONTEXTE

La directive européenne n°75/440/CEE du 16 juin 1975 exige que les teneurs en nitrates soient inférieures à 50 mg/litre dans les eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire dans les Etats membres.

Suite à l'arrêt de la Cour de justice des Communautés européennes du 8 mars 2001, relatif à la qualité des eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire en Bretagne, la France a été condamnée pour non respect de la norme communautaire.

Le 13 juillet 2005, la Commission envoyait à la France un avis motivé complémentaire dans lequel elle écrivait : « …la Commission estime que le délai qui s'est écoulé depuis le prononcé du premier arrêt de la Cour de justice en date du 8 mars 2001 constitue un délai suffisant pour prendre les mesures que comporte l'exécution du premier manquement reconnu de l'arrêt de la Cour de justice relatif à la non-conformité de la teneur en nitrates des eaux superficielles alimentaires de certains bassins bretons. C'est pourquoi elle est amenée à adresser le présent avis motivé complémentaire aux autorités françaises. ».

Début 2007, 9 bassins versants situés au Nord de la Bretagne restent concernés par le contentieux européen (cf. illustration 1) :

- 5 bassins ont une évolution positive des teneurs en nitrates :
  - l'Aber Wrac'h à KERNILIS (superficie : 98 km²) dans le Finistère,
  - le Guindy à PLOUGUIEL (122 km²) dans les Côtes d'Armor,
  - l'Urne à TREGUEUX (48 km²) dans les Côtes d'Armor,
  - le Gouessant à ST-TRIMOEL (21 km²) dans les Côtes d'Armor,
  - l'Arguenon à PLEVEN (388 km²) dans les Côtes d'Armor,
- et 4 sont sans évolution favorable :
  - l'Horn à PLOUENAN (44 km²) dans le Finistère,
  - le Bizien à HENGOAT (27 km²) dans les Côtes d'Armor,
  - l'Ic à BINIC (81 km²) dans les Côtes d'Armor,
  - les Echelles à MONTOURS (10 km²) en Ille-et-Vilaine.

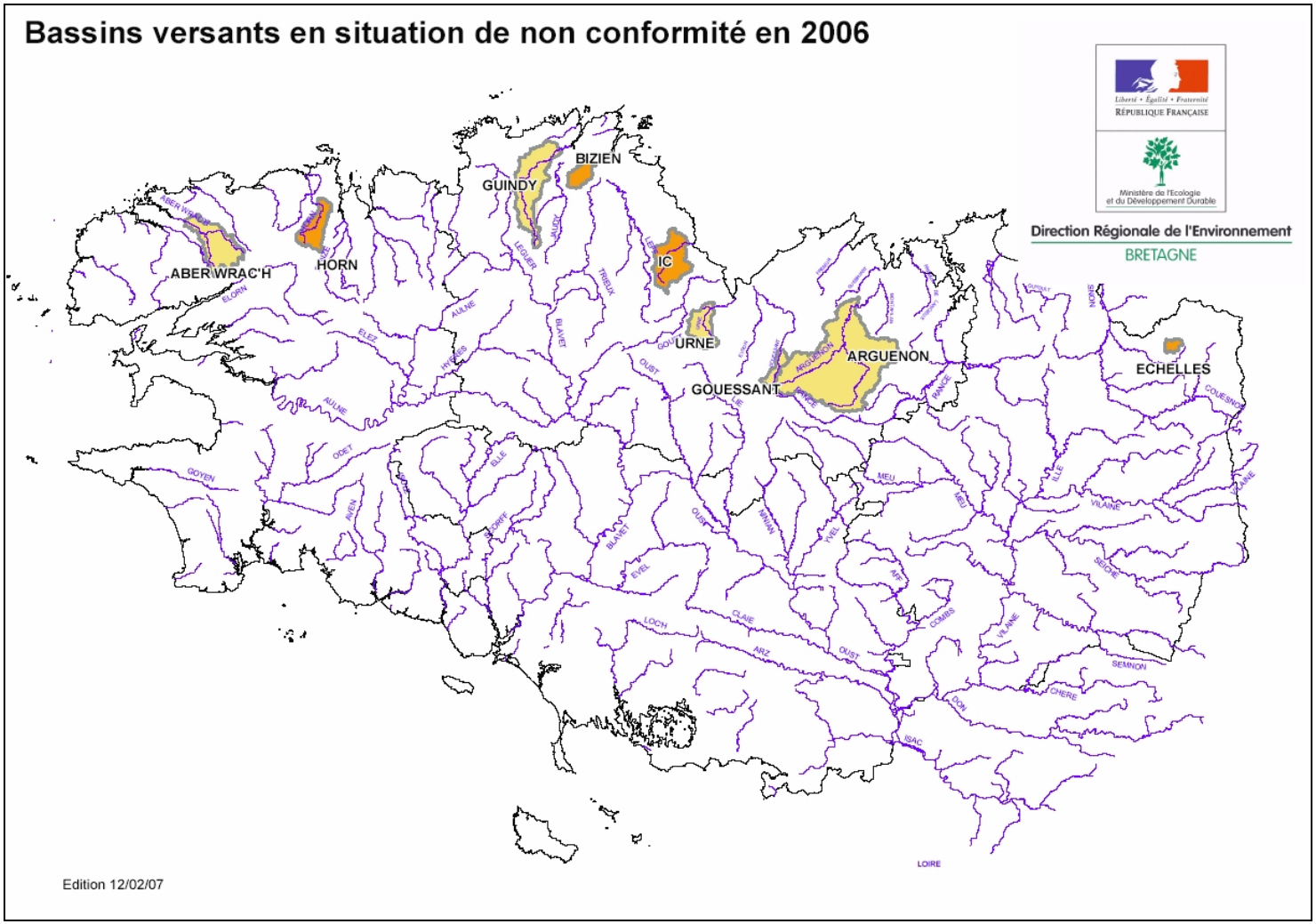


Illustration 1 - Localisation des bassins versants étudiés

1.2. HISTORIQUE DE L'ETUDE

Pour ces 9 bassins, une question importante est celle du temps nécessaire pour qu'il y ait un retour à la conformité des eaux au droit des prises d'eau potable, compte tenu du temps de réponse des milieux et des mesures de réduction des intrants azotés envisagés.

Par courrier en date du 5 février 2007, la Préfecture de la Région Bretagne (Mission Interdépartementale et Régionale de l'Eau : MIRE) a demandé au BRGM Bretagne de faire un état des connaissances scientifiques et techniques sur le comportement des aquifères de socle, et des outils disponibles pour expliquer les phénomènes de transfert de polluants via les eaux souterraines. Des notes synthétiques ont été éditées les 15 et 26 février 2007.

Le courrier de la Préfecture du 13 mars 2007 précisait : « les autorités françaises viennent de s'engager auprès de la Commission européenne à réaliser des études nécessaires à l'ajustement des mesures à prendre pour que les teneurs en nitrates soient conformes d'ici 2009 dans les bassins versants en contentieux » et invitait le BRGM à une réunion des organismes de recherche (BRGM, INRA et CEMAGREF) Lors de cette réunion, qui s'est déroulée le 21 mars, la Préfecture de Région a demandé, au nom de l'Etat, au BRGM de rédiger un cahier des charges précisant les modalités d'exécution pour répondre aux objectifs en collaboration avec l'INRA.

Ces modalités ont été précisées en concertation avec l'INRA et le CEMAGREF lors de la réunion du 23 avril sous l'égide de la MIRE, de la DRAF et de la DIREN qui a permis de définir les complémentarités BRGM/INRA dans le domaine de la modélisation et de préciser quelles pouvaient être les données auxquelles il était possible d'accéder rapidement.

La commande de la Préfecture de Région, au nom de l'Etat, au BRGM et à l'INRA était de réaliser des études permettant d'aboutir à des simulations prévisionnelles de l'évolution des teneurs en nitrates sur les bassins concernés.

Le BRGM a rédigé un cahier des charges qui a été remis le 2 mai 2007 à la Direction de l'Eau du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durable (MEDAD) et à la MIRE. L'étude du BRGM est rattachée au projet « expertise auprès de la Direction de l'Eau » et correspond au thème 4 de la convention 2007-2009 sur « la connaissance, le suivi et la gestion des eaux souterraines » établie entre le BRGM et la Direction de l'Eau du MEDAD. Elle est inscrite dans la convention d'application 2007.

1.3. OBJECTIFS

L'Etat Français s'est engagé auprès de Bruxelles le 12 juin 2007 à contrôler les apports azotés aux sols, grâce à une réduction de 1/3 des intrants azotés organiques

et minéraux (abaissement de 210 à 140 kg N/ha, soit une diminution de 1/3) à partir de janvier 2007, sur la base du volontariat (arrêté « programme d'action volontaire »). Un arrêté préfectoral pourrait ensuite rendre obligatoire la mesure en février 2008.

La Préfecture de Bretagne, au nom de l'Etat, a donc besoin de savoir si cette réduction de 1/3 des apports azotés est suffisante pour que les teneurs en nitrates des eaux des rivières, au droit des prises d'eau, passent sous le seuil des 50 mg/l. Si cela n'est pas le cas, un ratio en kg N/ha devra être proposé.

Les différentes tâches du cahier des charges du projet, adapté aux engagements de l'Etat Français (réduction de 1/3 des intrants), sont :

- Volet 1 - Caractérisation géologique, hydrogéologique et hydrochimique des bassins versants débouchant sur une typologie :
  - première caractérisation chimique des eaux souterraines des bassins versants
  - caractérisation géologique et hydrogéologique des bassins versants (globale, détaillée, fiches signalétiques)
- Volet 2 - Méthodologie pour la prise en compte des données agronomiques dans le cadre de l'approche globale choisie pour répondre aux questions posées (approche traitée avec le code de calcul TEMPO du BRGM)
- Volet 3 - Modélisation de l'évolution des teneurs en nitrates au droit des prises d'eau

Lors de l'établissement du cahier des charges, le logiciel TEMPO, outil de traitement du signal, a été choisi par le BRGM, pour respecter les courts délais imposés dans le cadre des engagements de la France auprès de la Commission européenne : besoin de premières conclusions à caractère opérationnel à fournir en octobre, puis dans un second temps nécessité d'approfondir les investigations scientifiques avec restitution en juin 2008.

Le présent rapport détaille l'état d'avancement de l'étude à la date 15 octobre 2007.

1.4. SOURCE DES DONNEES DISPONIBLES

Ce rapport d'avancement sera largement illustré à l'aide de figures et de tableau. Dans le cadre de ce projet, beaucoup d'informations ont dû être collectées. De façon à ne pas répéter à chaque chapitre l'origine des données disponibles, les différentes sources ont été consignées dans le tableau ci-dessous (illustration 2).

Type de données	Source(s)
Réseau hydrographique	BD CARTHAGE, Bassin Loire-Bretagne version 2.4 - juin 2000 - © IGN, 2000
Bassins versants au droit des prises d'eau potable	DRASS, BD contours BV AEP - eaux brutes superficielles -
Localisation des des prises d'eau potable	DRASS, BD contours BV AEP - eaux brutes superficielles -
Stations de mesure du débit des rivières	Banque HYDRO, MEDAD, juin 2001
Stations météorologiques	METEO-FRANCE, mars 2001
Qualitomètres (localisation et chroniques nitrates)	DRASS, export juillet 2007 de la base SISE-Eaux
Points prélevés pour analyse d'eau souterraine	BRGM, 2007, export de la Banque du Sous-Sol (BSS)
Teneurs en nitrates des eaux souterraines (été 2007)	BRGM, septembre 2007
Piézomètres et caractéristiques associées	BRGM, mars 2006 (données ADES)
MNT (Modèles Numériques de Terrain)	MNT pas de 50 m (BDALTI) - IGN, 2005
Cartes géologiques et failles (échelles 1/50 000 et 1/250 000)	BRGM, Feuilles à 1/50 000, et Carte géologique du Massif Armoricain à 1/250 000. BRGM - 2001
Présence d'altérites	BRGM, 2007, projet SILURES Bretagne, Carte de la Bretagne à 1/250 000
Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle	BRGM, 2007 à partir des cartes géologiques
Altitude de la surface piézométrique	BRGM, 2007
Epaisseur des altérites en place	BRGM, 2007
Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration	BRGM, 2007
Bilans azotés "agronomiques" et "réels"	INRA, 2007, modélisation avec TNT2
Teneurs en nitrates des rivières	DIREN Bretagne, export BEP, mars 2007
Teneurs en nitrates des rivières (Echelles)	Syndicat des eaux du Pays du Coglais
Teneurs en nitrates des rivières (Gouessant)	Lamballe Communauté - Service Eau et Assainissement
Teneurs en nitrates des rivières (Bizien)	Syndicat des eaux du Trégor - Comité du BV du Jaudy-Guindy-Bizien
Teneurs en nitrates des rivières (Horn)	Syndicat Mixte de l'Horn, et DDASS29
Teneurs en nitrates des rivières (Urne)	SIVOM de la Baie, et CG22/DAE
Teneurs en nitrates des rivières (Aber Wrac'h)	Syndicat des eaux du Bas Léon, DDASS29, et Lyonnaise des Eaux
Teneurs en nitrates des rivières (Guindy)	Syndicat des eaux du Trégor - Comité du BV du Jaudy-Guindy-Bizien
Teneurs en nitrates des rivières (Ic)	Syndicat mixte de la Côte du Goëlo, et DDASS22
Teneurs en nitrates des rivières (Arguenon)	Syndicat Mixte Arguenon-Penthièvre

Illustration 2 - Sources des fichiers utilisés dans le cadre du projet

2. Caractérisation des bassins versants (volet 1)

La caractérisation des bassins étudiés aux plans hydrogéologique et hydrochimique, objet de ce chapitre, doit permettre :

1) de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique de ces bassins,
2) de les hiérarchiser suivant certains critères influençant la dynamique de la pollution azotée (perméabilité, partition infiltration/ruissellement, indicateurs de dénitrification),
3) de fournir une assise aux modélisations et aux simulations prévisionnelles et d'aider à leur interprétation.

C'est à cette fin que les travaux décrits ci-après, pour 5 des 9 bassins versants (conformément au cahier des charges), ont été réalisés, en particulier :

- une reconstitution de l'épaisseur des altérites,
- une reconstitution d'un niveau de nappe moyen,
- une appréciation de la capacité d'infiltration des formations superficielles.

Par ailleurs, une campagne de mesures des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines a été menée sur les 9 bassins.

2.1. CARACTERISATION GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS

2.1.1. 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 d'origine tectonique favorise la circulation des eaux lorsque ces fractures sont ouvertes. C'est le cas des couloirs de fracturation souvent subverticaux, 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 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).

Dans cette étude, seules l'altération et la fissuration qui en découle ont été prises en compte : elles concernent globalement des surfaces et des volumes incomparablement plus importants que les couloirs fracturés qui sont, eux, des systèmes locaux, dont chacun peut être un cas particulier et dont l'étude relève de méthodes différentes.

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 : en référence aux données acquises en Anjou et dans la région nantaise, on peut estimer que celles-ci ne dépassent pas quelques décimètres à quelques mètres, car la surface d'érosion qui supporte les dépôts marins miocènes et pliocènes de ces régions n'est pas altérée.

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. Dans le détail cependant (échelle hectométrique), cette surface de base peut s'approfondir de manière considérable le long de certains couloirs de fracturation tectonique jouant le rôle de drains préférentiels (augmentation locale de la vitesse d'altération), ou bien se réduire fortement en fonction des hétérogénéités lithologiques.

Un nouveau modèle conceptuel des propriétés physiques des roches en contexte de socle altéré a été élaboré ces dernières années, dans le cadre de projets de Recherche du BRGM. Il est représenté de manière schématique sur l'illustration 3.

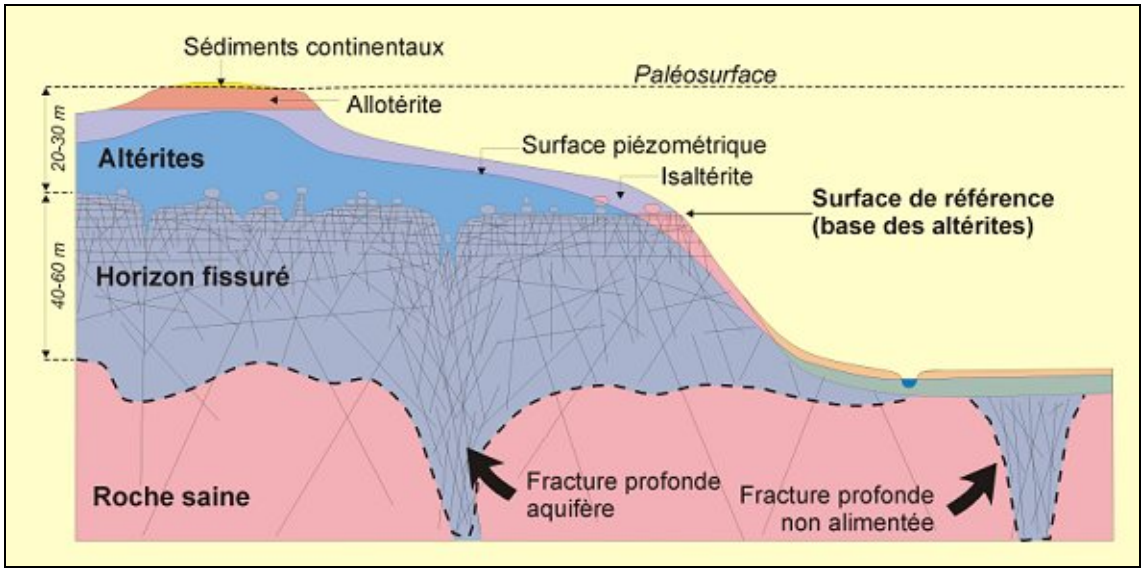


Illustration 3 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998)

Un profil d'altération type comprend ainsi, de haut en bas, sous les sédiments continentaux pénécontemporains de l'altération, les horizons suivants :

- cuirasse latéritique (0 à quelques m) : rarement préservée, par suite de la troncature du profil par l'érosion ou de sa destruction par évolution vers un latosol (non représentée sur l'illustration 3) ;
- allotérites (quelques mètres à une dizaine de mètres) : altérite caractérisée par une réduction de volume par rapport à 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.
- isaltérites (plusieurs dizaines de mètres) : altérite isovolumique 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 plurimétrique. Lorsqu'elles sont en place, elles sont en général isolées dans leur matrice d'arène. Lorsque les arènes ont été évacuées par l'érosion, les boules deviennent affleurantes et peuvent être plus ou moins remaniées sur les versants par gravité.
- zone fissurée (40 à 70 m) : cet horizon, situé dans la partie supérieure du substratum, est caractérisé par une très forte fissuration (illustration 4) dont l'intensité décroît vers le bas. Cette fissuration résulte de l'éclatement de la roche

sous l'effet des contraintes générées par les 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.

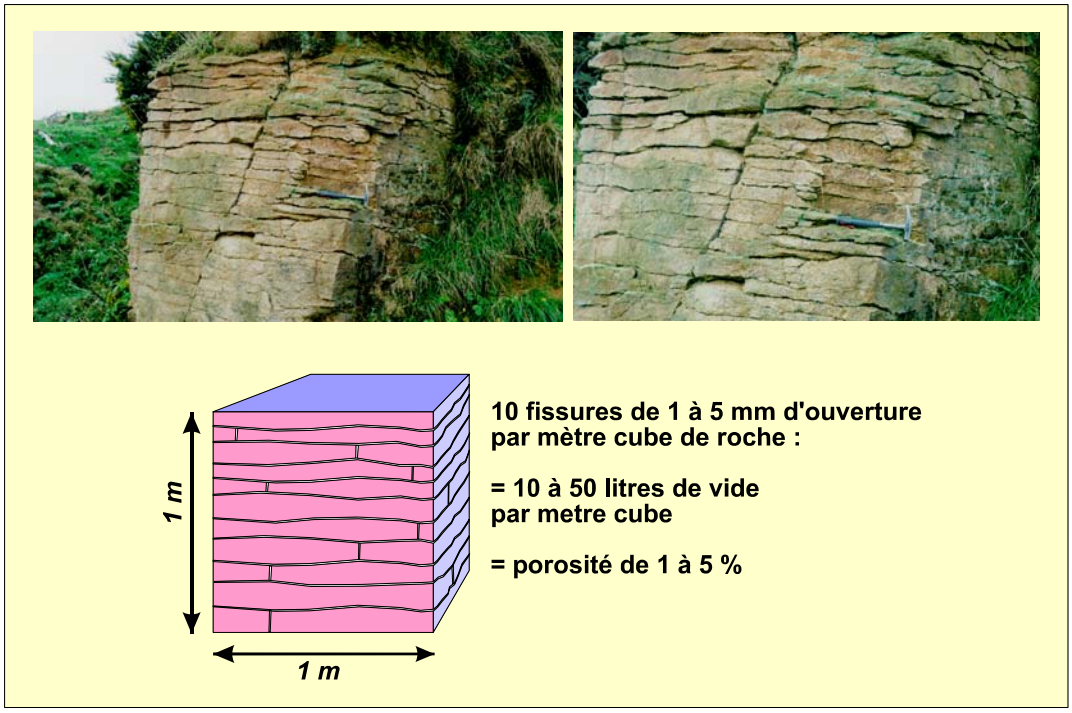


Illustration 4 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité

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 ; une partie des sources de versant se situe également dans cet horizon.

Lorsque la roche-mère est isotrope (cas des granites), l'horizon dit « fissuré » acquiert une fissuration horizontale caractéristique (illustration 4), lors du processus d'altération. Cette orientation préférentielle résulte des caractéristiques du déviateur de contraintes généré par l'altération : la dilatation étant impossible dans le sens horizontal, les 2 composantes principales du tenseur ($\sigma 1$ et $\sigma 2$) sont horizontales, tandis que la composante minimale ($\sigma 3$) est verticale ; dans un tel système de contraintes on ouvre principalement des fentes horizontales. 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 inférieure 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 dans le Monde (Afrique, Guyane, Inde, Corée du sud). Ainsi, dans le Finistère nord, une étude précédente (Wyns et al., 2004) a montré que 80 % de la réserve en eau souterraine était contenue dans l'horizon fissuré.

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 multicouches contrôlé par l'altération supergène. (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 (10^{-4} à 10^{-6} m/s) joue un rôle capacitif et transmissif, en collectant et distribuant les eaux issues de l'horizon d'altération sus-jacent.

Ces horizons d'altération sont parallèles, à l'échelle régionale, à la paléosurface contemporaine de l'altération.

2.1.2. Caractérisation globale des 4 plus grands bassins

En raison du délai imparti, il a été décidé de raisonner à partir des données existantes sur les bassins les plus grands en superficie (par ordre décroissant : Arguenon, Guindy, Aber Wrac'h et Ic) et de fournir un travail détaillé sur les 5 plus petits bassins (Urne, Horn, Bizien, Gouessant et Echelles).

Contexte géologique simplifié

Les cartes géologiques présentées ci-dessous ont été réalisées par une extraction des contours géologiques et des failles de la carte géologique synthétique du Massif Armoricain à l'échelle du 1/250 000 (Rabu D. et al., 2001).

Les illustrations 5-6-7-8 décrivent la répartition géologique simplifiée des formations présentes dans les 4 plus grands bassins, et leurs légendes indiquent les lithologies rencontrées ainsi que les noms usuels des formations rencontrées.

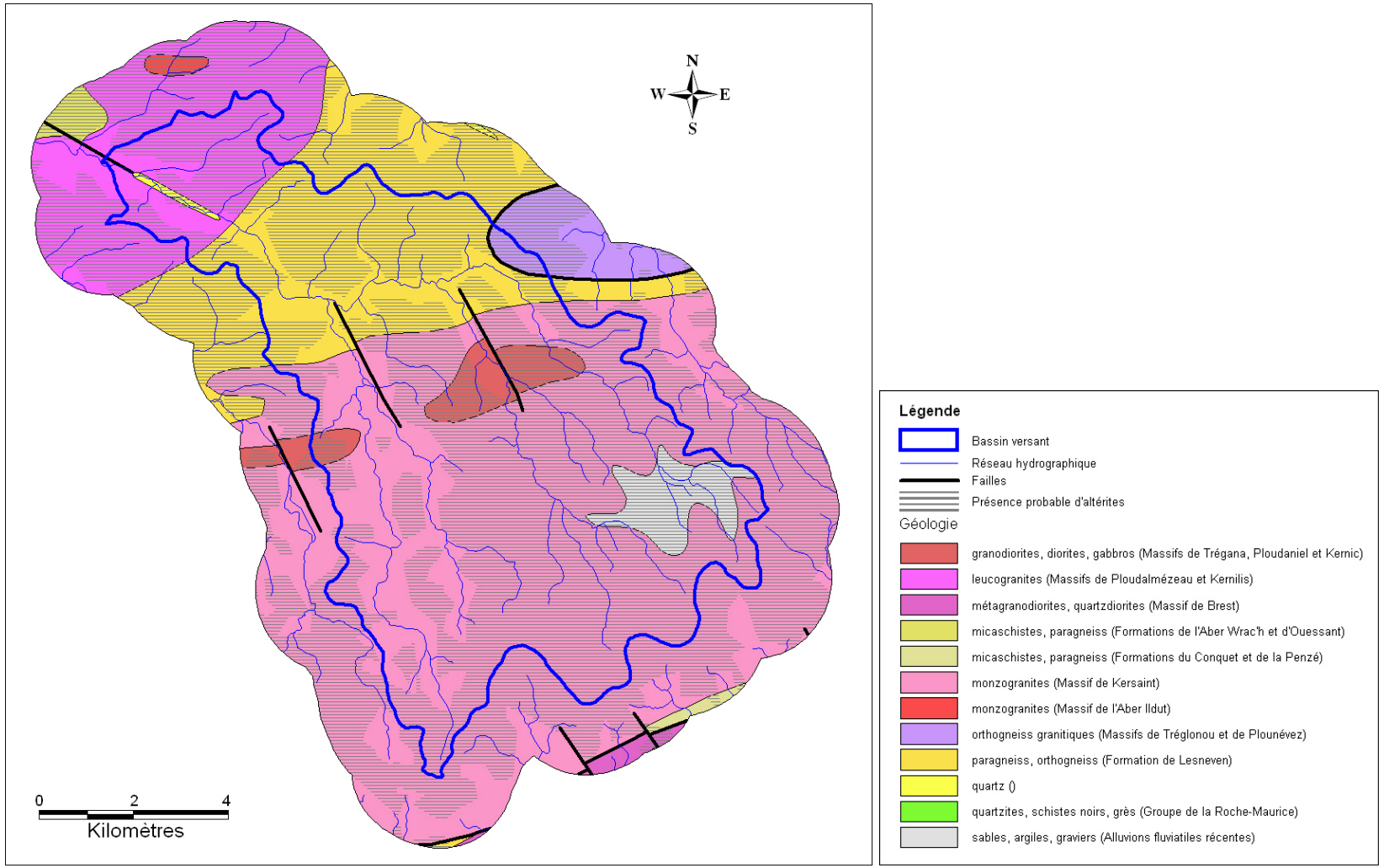


Illustration 5 - Carte géologique à 1/250 000 du bassin de l'Aber Wrac'h

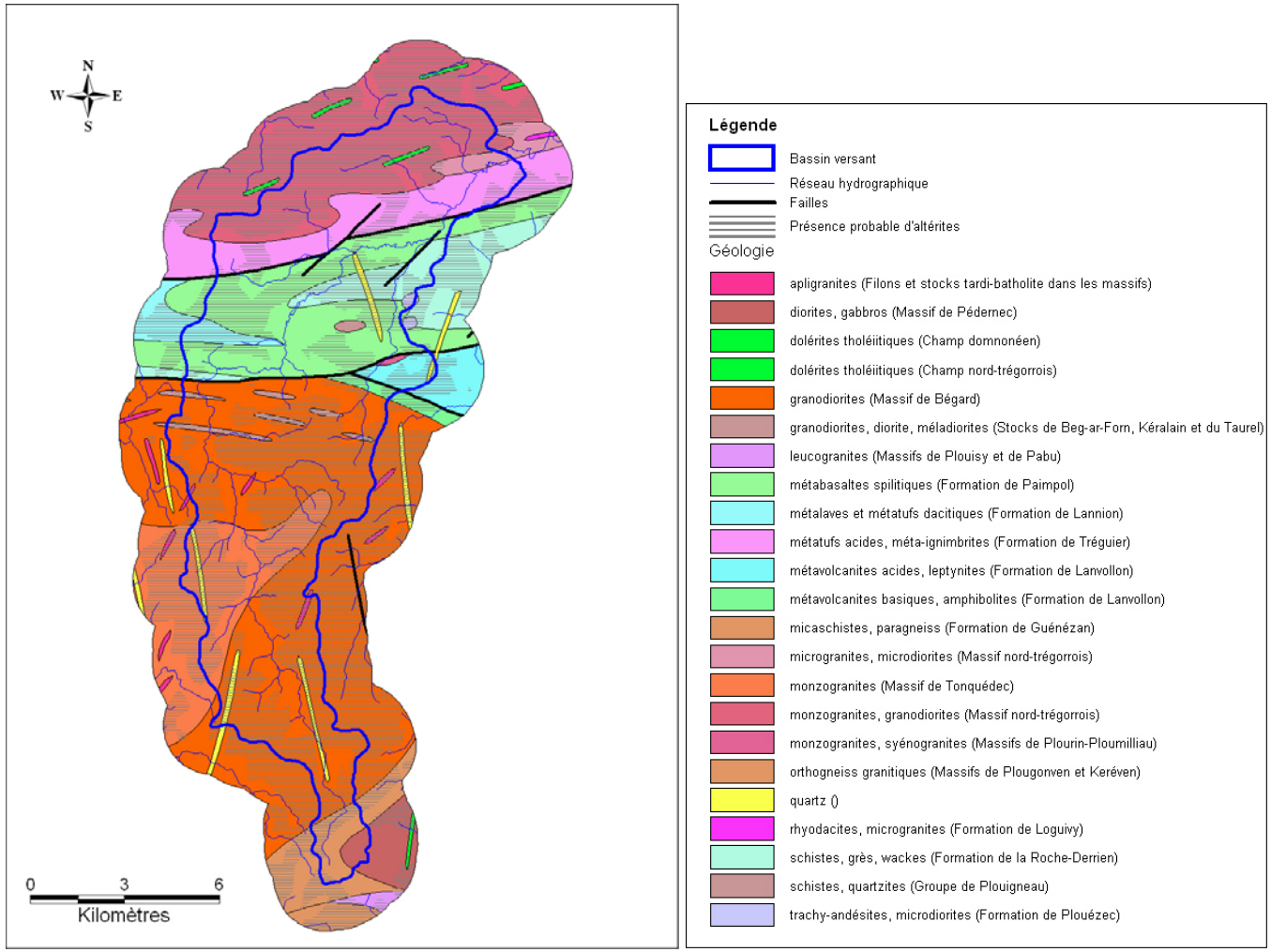


Illustration 6 - Carte géologique à 1/250 000 du bassin du Guindy

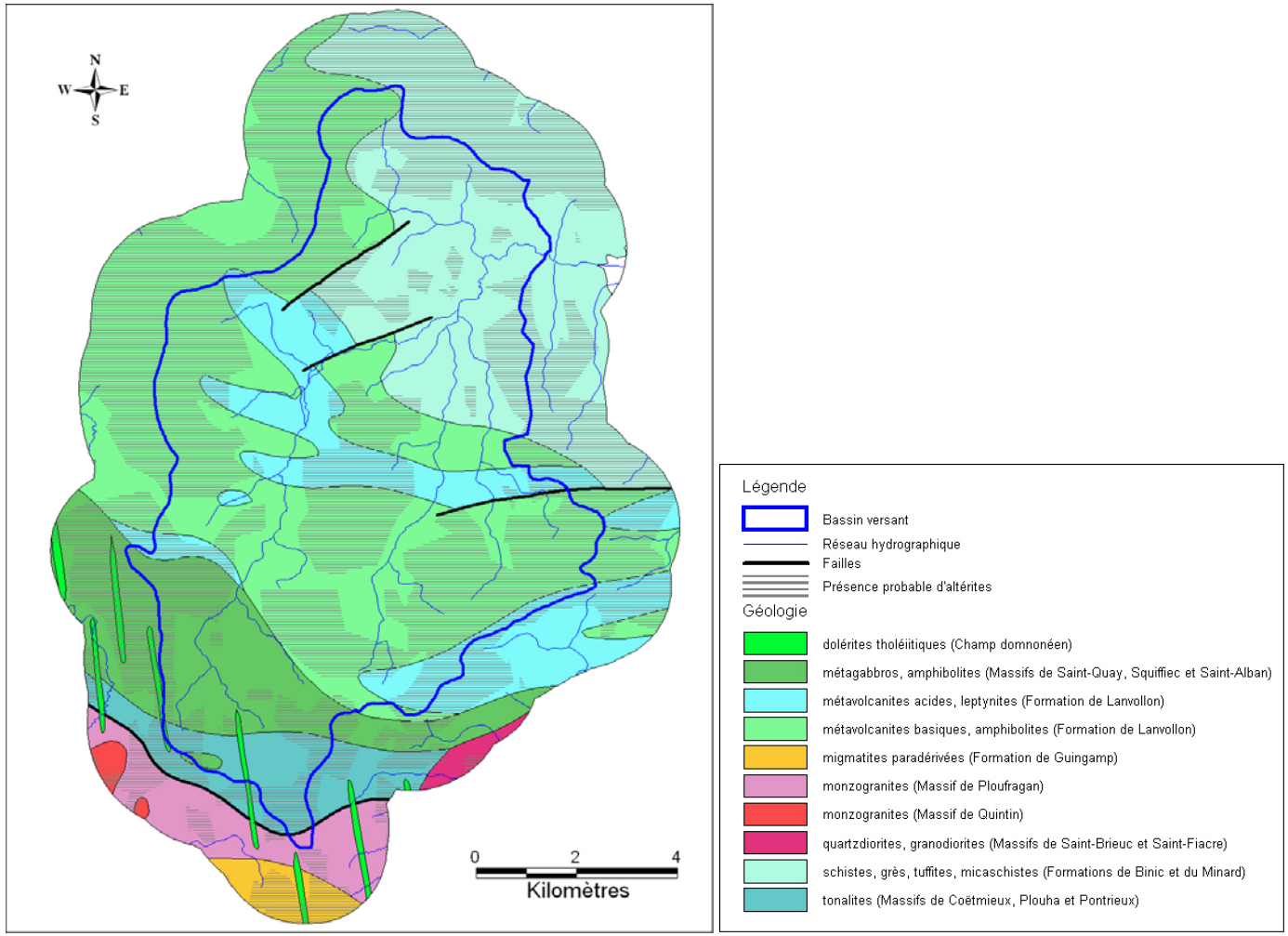


Illustration 7 - Carte géologique à 1/250 000 du bassin de l'Ic

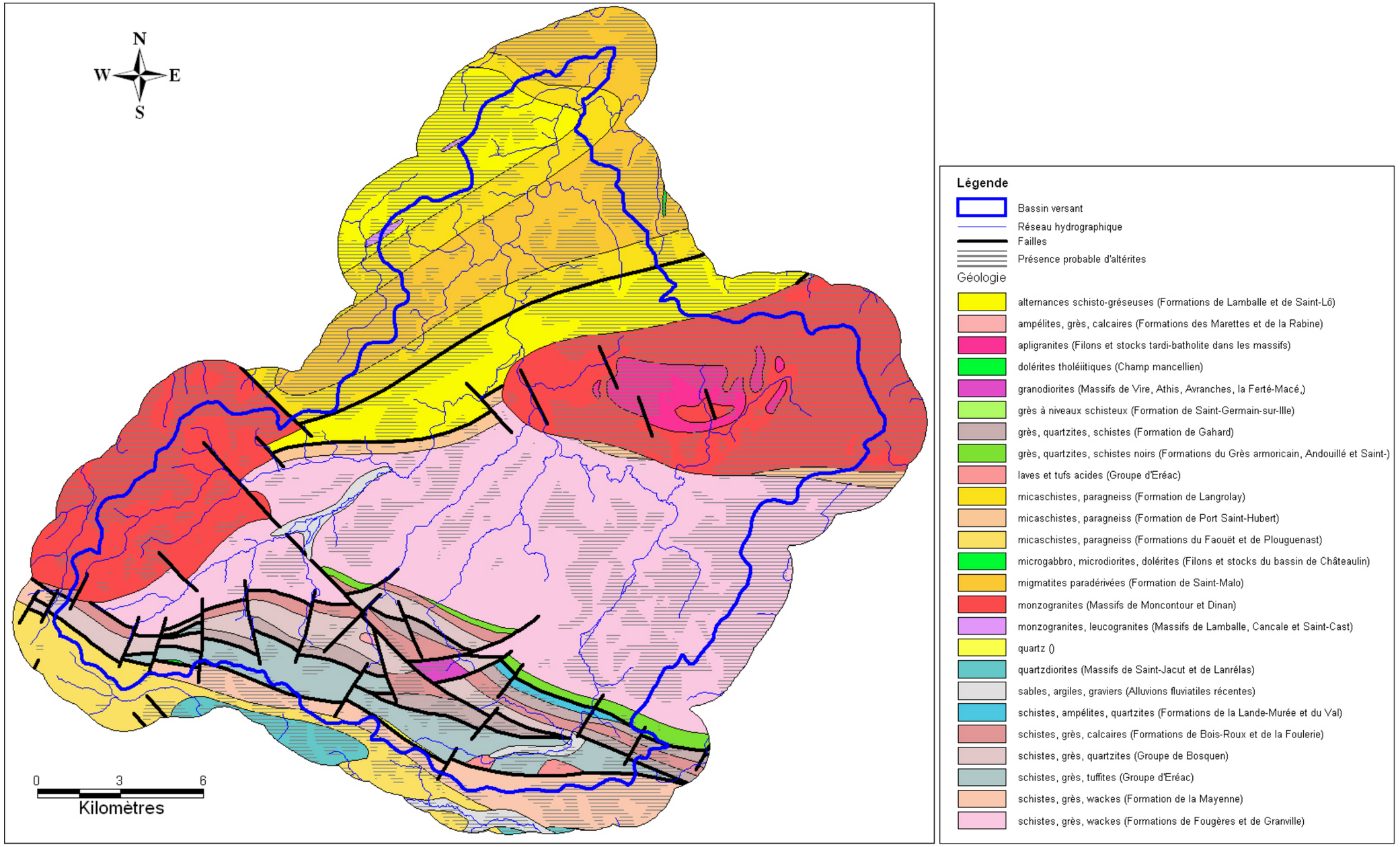


Illustration 8 - Carte géologique à 1/250 000 du bassin de l'Arguenon

Sur les illustrations 5-6-7-8 sont également représentés les secteurs probablement couverts par des altérites. La délimitation de ces secteurs provient du travail effectué dans le cadre du projet SILURES Bretagne (rapport BRGM/RP-55001-FR, 2006) : interprétation des informations géologiques et hydrogéologiques de plus de 7 300 forages en Bretagne traversant le contact altérites/horizon fissuré, krigeage de l'altitude de la base des altérites, calcul de la différence d'altitude entre le Modèle Numérique de Terrain (MNT) et la base des altérites, traitements divers en fonction de la pente du terrain et du réseau hydrographique, et cartographie de la présence probable des altérites sur la Région à l'échelle du 1/250 000.

Le bassin versant de l'Aber Wrac'h (illustration 5) est principalement constitué par des terrains granitiques (Massifs de Kersaint au Sud du bassin, et de Kernilis au Nord) mais également de roches gneissiques (Formation de Lesneven et Tréglonou au Centre). Une grande partie de la superficie du bassin (78%) semble recouverte d'altérites.

Le sous-sol du bassin versant du Guindy est constitué de roches granitiques et volcaniques (illustration 6). L'amont du bassin est granitique (Massifs de Bégard et Tonquédec), tandis que l'aval est volcanique (Formations de Paimpol, Tréguier et Lannion). Une majeure partie de la superficie du bassin (61%) semble recouverte d'altérites.

Le sous-sol du bassin versant de l'Ic est constitué de roches volcaniques à l'amont et de roches schisto-gréseuses à l'aval (illustration 7). La moitié du bassin (51%) semble recouverte d'altérites.

Le bassin versant de l'Arguenon (illustration 8) est principalement constitué par des terrains schisto-gréseux situés au Centre et au Nord, et des terrains granitiques à l'Ouest à l'Est (Massifs de Moncontour et Dinan) et au Nord (Formation de Saint-Malo). Le Sud du bassin, très faillé, est représenté par des schistes et grès Primaire. Une faible superficie du bassin (38%) semble recouverte d'altérites.

Le tableau ci-dessous présente une synthèse de la lithologie des formations géologiques rencontrées sur les bassins.

BV en contentieux	Sup. (km²)	Géologie (synthèse)	Géologie principale	Géologies secondaires					
Aber Wrac'h	98	Granites et gneiss	monzogranites	paragneiss, orthogneiss	leucogranites	granodiorites, diorites, gabbros			
Guindy	122	Granites et roches volcaniques	granodiorites	métabasaltes spilitiques	monzogranites	monzogranites, granodiorites	métatufs acides, méta-ignimbrites	métalaves et métatufs dacitiques	micaschistes, paragneiss
Ic	81	Roches volcaniques et schistes-grès	métavolcanites basiques, amphibolites	schistes, grès, tuffites, micaschistes	métagabbros, amphibolites	métavolcanites acides, leptynites	tonalites		
Arguenon	388	Schistes-grès et granites	schistes, grès, wackes	monzogranites	alternances schisto-gréseuses	migmatites paradérivées	micaschistes, paragneiss	schistes, grès, quartzites	schistes, grès, tuffites

Illustration 9 - Géologie principale et secondaire des roches aquifères des 4 plus grands bassins

Valorisation de la base de données des forages

Dans le cadre du projet SILURES Bretagne (rapport BRGM/RP-55001-FR, 2006), une approche statistique a été menée sur toutes les formations géologiques de socle de Bretagne en fonction du nombre de forages recensés sur celles-ci.

Les informations suivantes ont été ajoutées à la carte géologique à 1/250 000 du Massif Armoricain : nombre de forages recensés et débit moyen du quartile supérieur : moyenne des débits des 25 % « meilleurs forages » de chaque population concernée. Ce paramètre varie de façon très significative en Bretagne : de moins de 10 m^3/h à plus de 40 m^3/h. On peut considérer que cette valeur, atteinte par le quart des forages implantés au hasard, était suffisamment fréquente pour correspondre à des conditions aquifères d'une certaine extension (les débits exploitables devraient s'en rapprocher dans le cas de recherches conduites sur des bases scientifiques). Ce paramètre pourrait être représentatif de la perméabilité des axes de drainage souterrain.

Les planches 1-2-3-4 en annexe 2 de ce rapport (volume séparé) représentent les résultats de l'extraction de la carte régionale au niveau des 4 plus grands bassins. Les planches donnent donc une image de la perméabilité du sous-sol, et leurs légendes indiquent, quand la formation est suffisamment renseignée, la valeur du débit moyen du quartile supérieur de la formation géologique.

Recommandations d'utilisation des données
Il s'agit de résultats statistiques, obtenus pour des populations relativement hétéroclites, composées pour l'essentiel de forages implantés au hasard. Il ne faut exclure ni la possibilité de mettre en évidence des situations favorables dans des secteurs connus comme globalement peu intéressants, ni la possibilité d'échecs relatifs dans des secteurs globalement très favorables.

Au niveau de ces 4 bassins, celui du Guindy semble être le plus perméable (valeur moyenne du débit moyen du quartile supérieur de toutes les formations renseignées : 53 m^3/h). Viennent ensuite, par ordre décroissant, les bassins de l'Ic (25 m^3/h), de l'Arguenon (22 m^3/h) et de l'Aber Wrac'h (18 m^3/h).

La forte perméabilité des roches volcaniques du Guindy s'explique par une porosité particulière des roches : présence de vacuoles. Ceci est lié à la mise en place de ces roches volcaniques (Carn A., 1983, thèse sur les volcanites du Trégor).

2.1.3. Caractérisation détaillée des 5 plus petits bassins

La caractérisation plus détaillée des 5 plus petits bassins en contentieux a nécessité des reconnaissances de terrain : cartographie détaillée sur le terrain des formations altérées, inventaire permettant de définir une épaisseur des altérites, relevés de profondeur de nappe dans les ouvrages accessibles sélectionnés (cf. chapitre 2.3.1).

Les données ainsi recueillies ont permis :

- de reconstituer par krigeage l'épaisseur des altérites ;
- de reconstituer un niveau de nappe moyen ;
- de fournir des indications sur les capacités du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration.

Contexte géologique

Avant la campagne de terrain, les formations géologiques ont été digitalisées à partir des feuilles géologiques à 1/50 000. Un géologue du BRGM, spécialiste des formations superficielles, s'est rendu sur place en juillet 2007 : les contours géologiques ont été affinés et les formations altérées repérées puis cartographiées.

Les illustrations 10-11-12-13-14 représentent les cartes géologiques des secteurs des bassins versants et les formations altérées sont figurées par un hachuré. La présence de ces altérites a été reconnue suite au travail du géologue.

Le bassin versant des Echelles (illustration 10) est entièrement constitué par des terrains granitiques (Granodiorite à biotite au Nord et Granodiorite à biotite et cordiérite au Sud, deux granodiorites à compositions minéralogiques légèrement différentes). La quasi totalité du bassin (86%) est recouverte d'altérites.

Le sous-sol du bassin versant du Gouessant est principalement constitué de roches granitiques (illustration 11). Seule la partie amont du bassin comporte des roches gréseuses. Plus de la moitié du bassin (61%) est recouverte d'altérites, l'altération étant surtout présente au niveau des granites.

Le sous-sol du bassin versant du Bizien est constitué de roches volcaniques à l'amont et de roches schisto-gréseuses à l'aval (illustration 12). Une grande partie de la superficie du bassin (81%) est recouverte d'altérites.

Le bassin versant de l'Horn (illustration 13) est entièrement constitué par des terrains métamorphiques : les micaschistes occupent une grande partie du bassin, tandis que les gneiss sont présents à l'aval en rive gauche et également à l'extrême Sud-Est du bassin versant. Plus de la moitié du bassin (64%) est recouverte d'altérites.

Le bassin versant de l'Urne (illustration 14) est principalement constitué par des terrains granitiques ; les schistes et grès occupant le Nord-Est et le Sud du bassin versant. Une majeure partie de la superficie du bassin (72%) est recouverte d'altérites.

Localement, des buttes isolées de granite et granitoïde non altéré réapparaissent au sein des domaines altérés (bassins des Echelles, du Gouessant et de l'Urne). Ces secteurs ont été pris en compte lors de la modélisation de la base des altérites (cf. chapitre ci-dessous). L'importance des altérites (épaisseurs) sur ces 5 bassins sera développée dans ce chapitre.

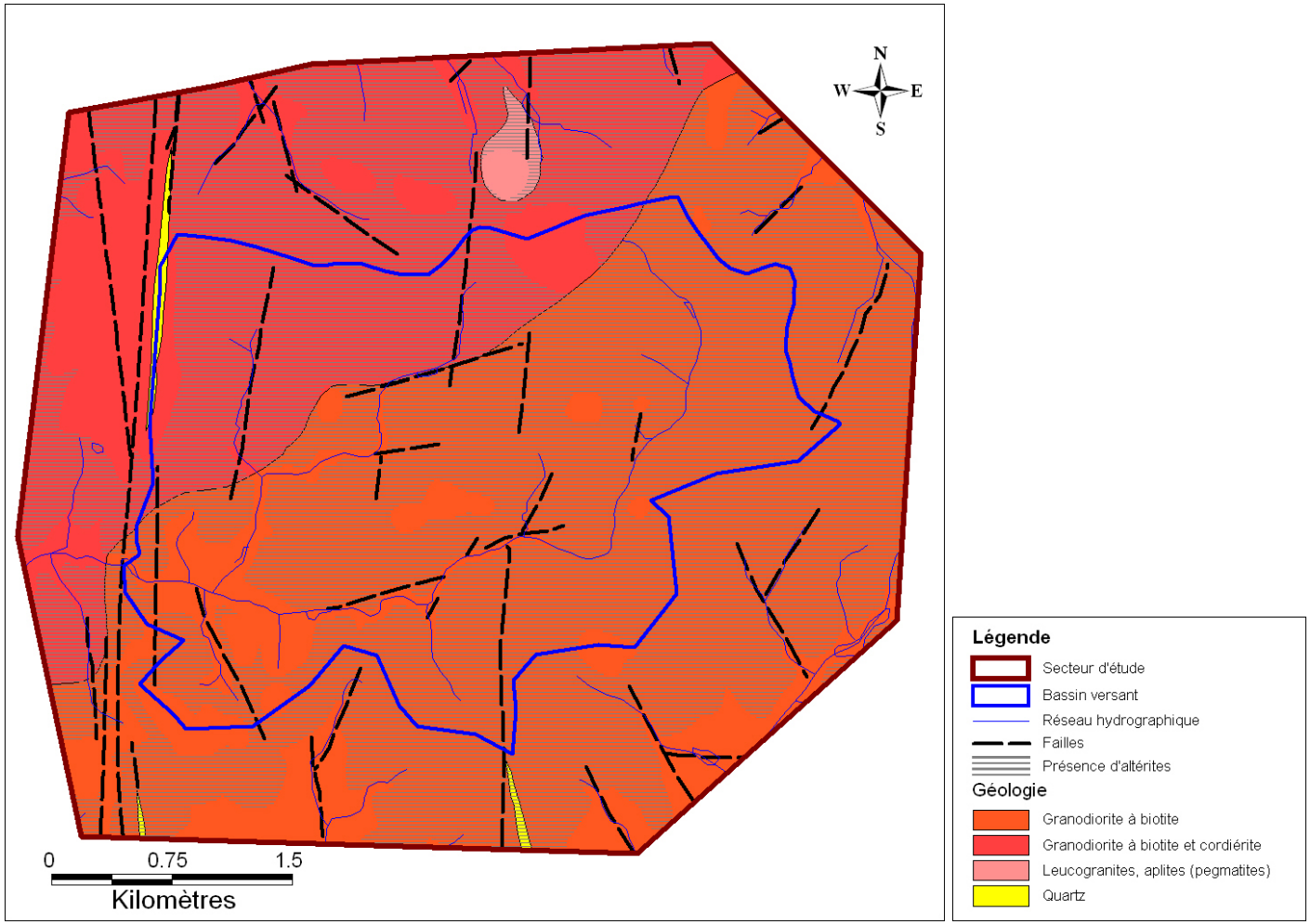


Illustration 10 - Secteur d'étude, carte géologique et présence altérites sur le bassin des Echelles

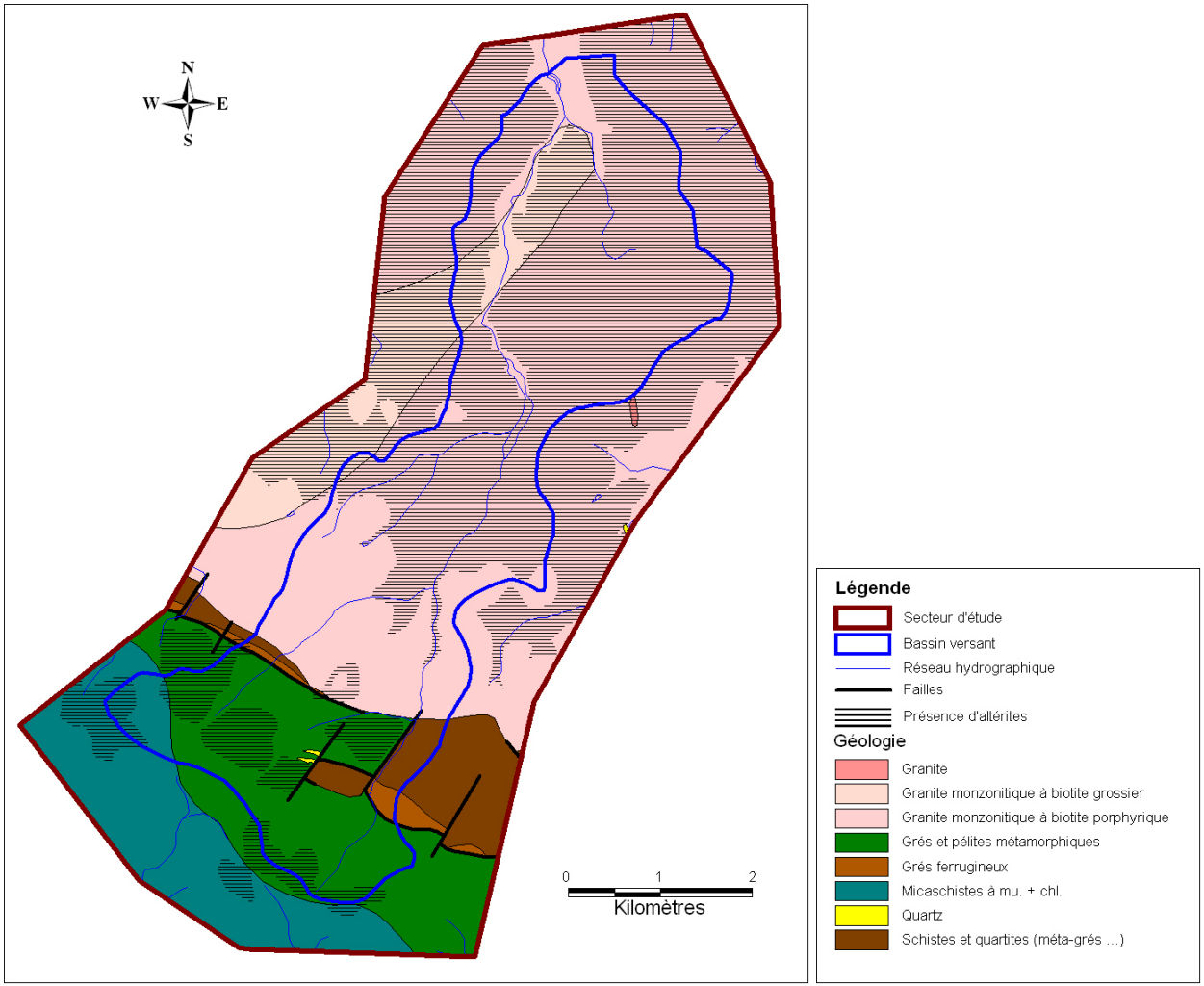


Illustration 11 - Secteur d'étude, carte géologique et présence altérites sur le bassin du Gouessant

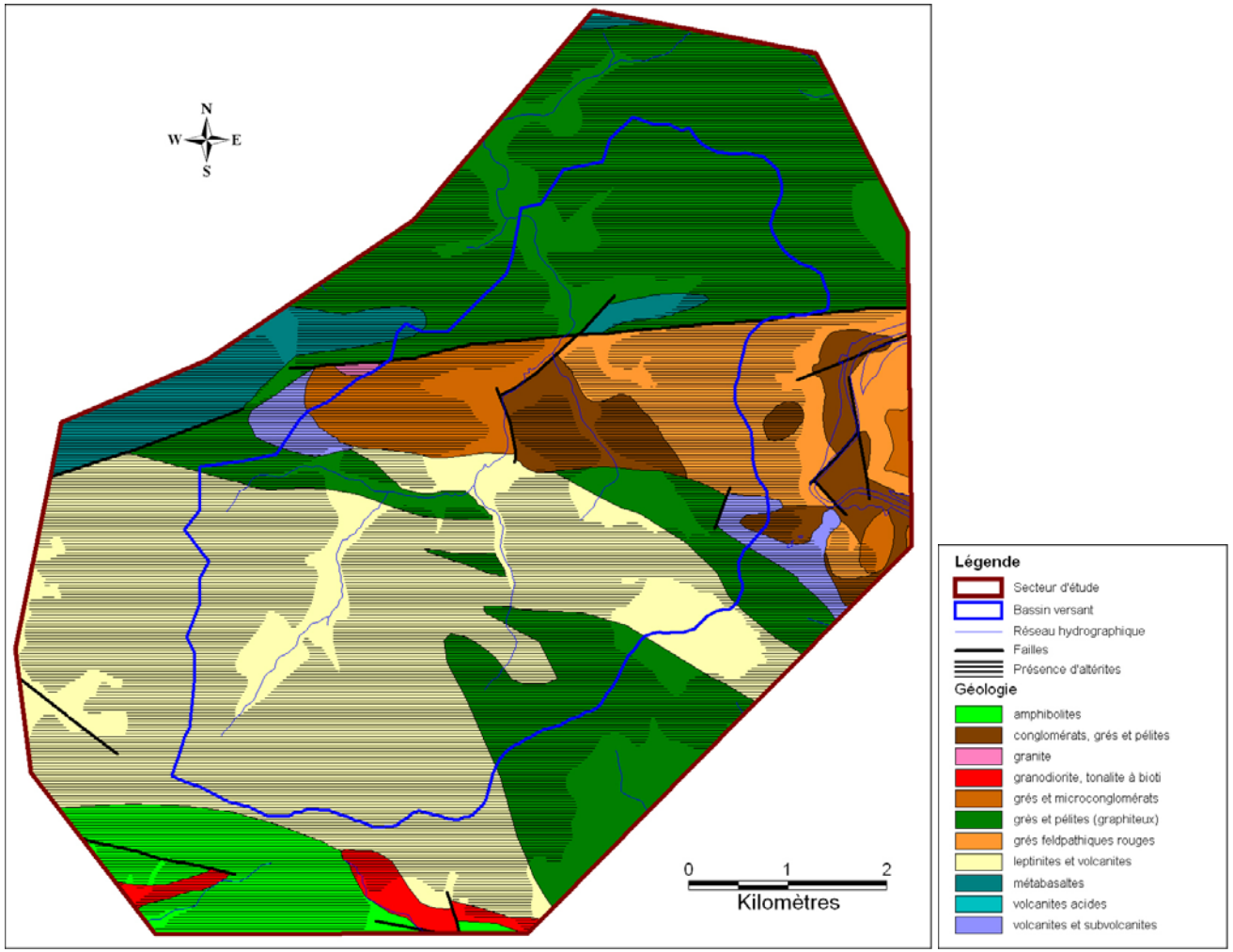


Illustration 12 - Secteur d'étude, carte géologique et présence altérites sur le bassin du Bizien

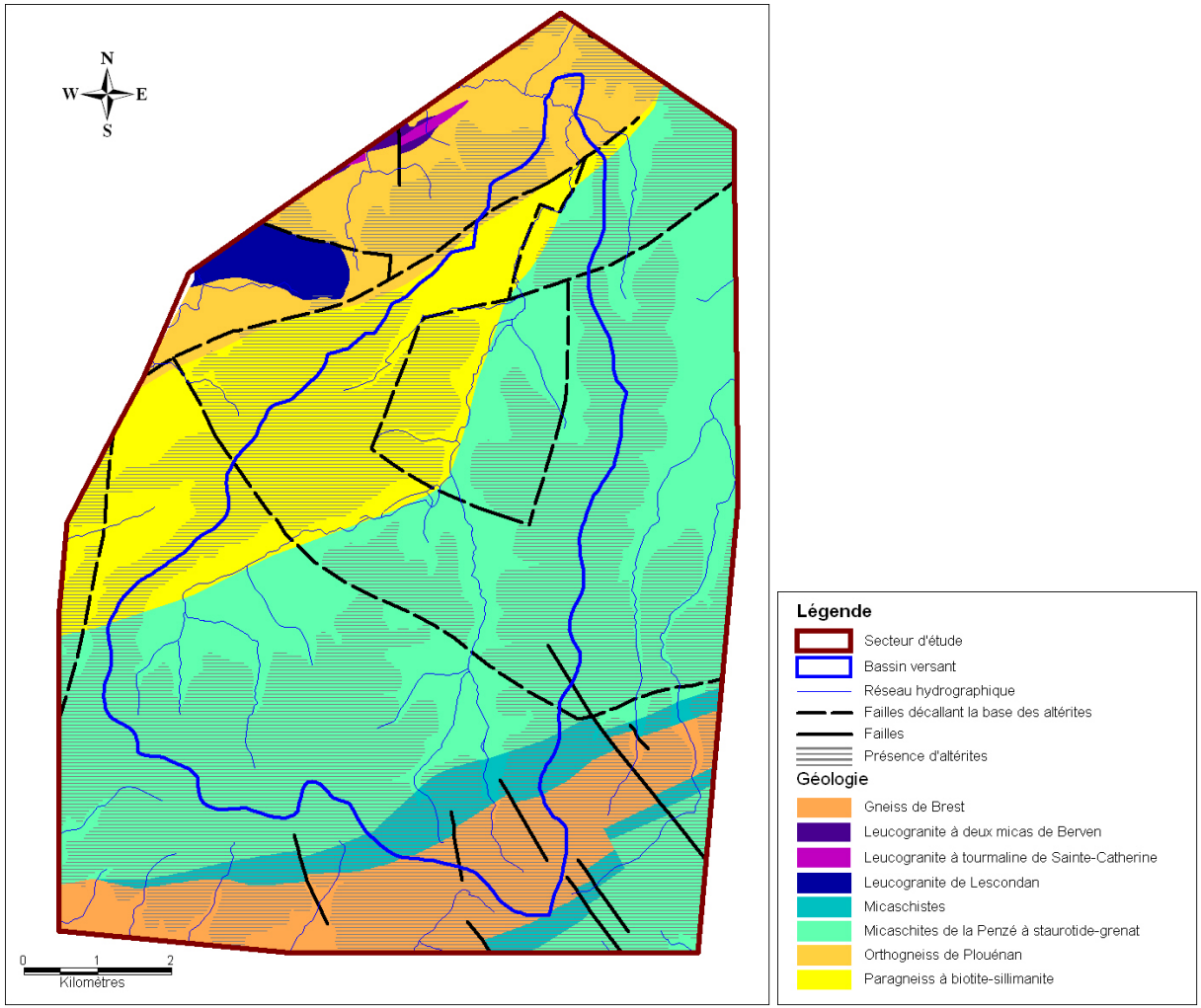


Illustration 13 - Secteur d'étude, carte géologique et présence altérites sur le bassin de l'Horn

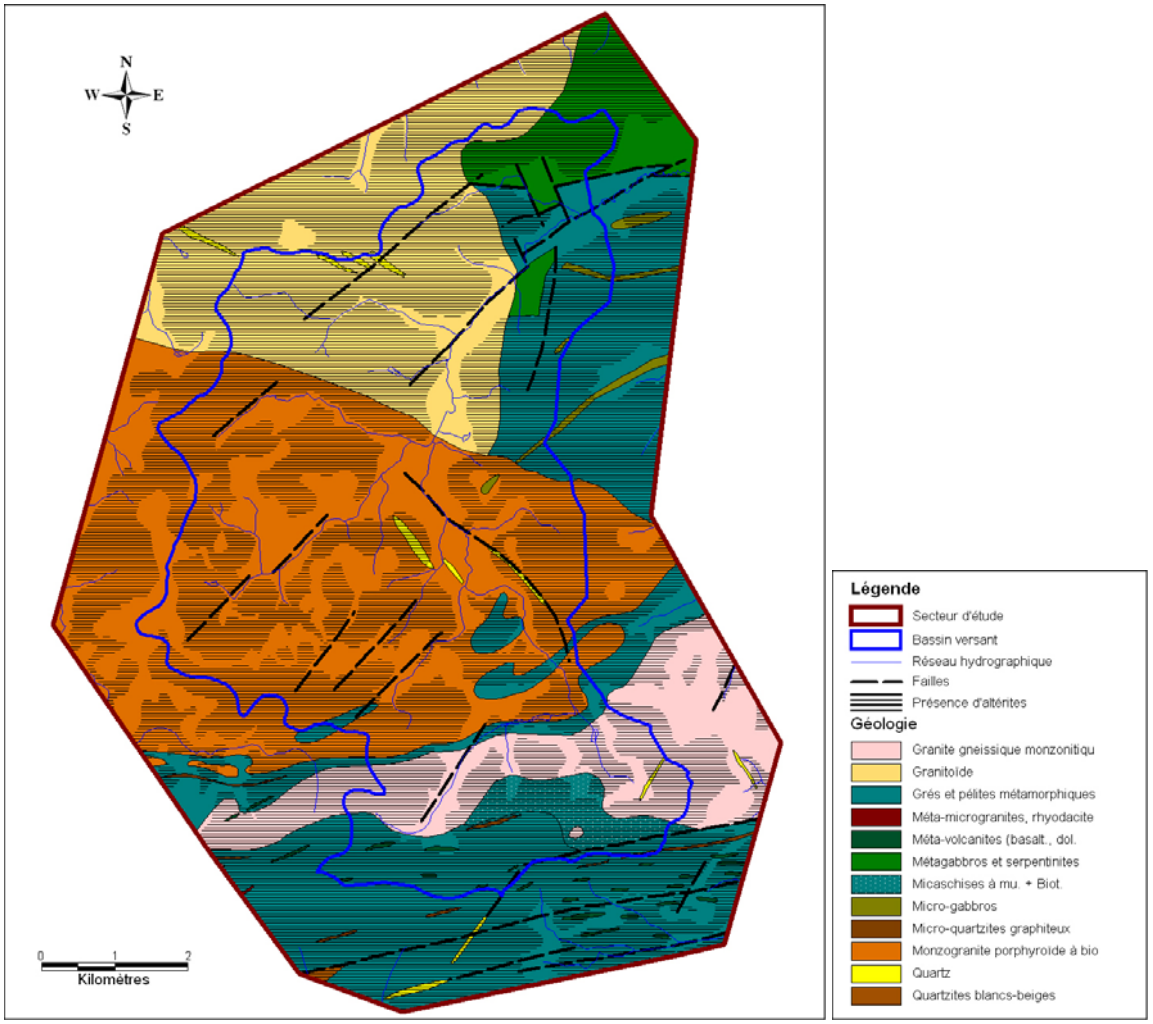


Illustration 14 - Secteur d'étude, carte géologique et présence altérites sur le bassin de l'Urne

Le tableau ci-dessous présente une synthèse de la lithologie des formations géologiques rencontrées sur les bassins.

BV en contentieux	Sup. (km²)	Géologie (synthèse)	Géologie principale	Géologies secondaires		
Les Echelles	10	Granites	granodiorites	granodiorites		
Gouessant	21	Granites et grès	Granite monzonitique	Grés et pélites	Schistes et quartzites	Micaschistes
Bizien	27	Roches volcaniques et grès	leptinites et volcanites	grès et pélites	grés et microconglomérat	grés feldpathiques
Horn	44	Micaschistes et gneiss	Micaschites	Paragneiss	Gneiss	Orthogneiss
Urne	48	Granites et grès	Monzogranite	Granitoïde	Grés et pélites	Granite gneissique

Illustration 15 - Géologie principale et secondaire des roches aquifères des 5 plus petits bassins

Valorisation de la base de données des forages

Une valorisation des données des forages (profondeur, débit, formation géologique) a été réalisée en cartographiant l'intérêt potentiel hydrogéologique des aquifères de socle. Les différentes formations géologiques sont caractérisées et hiérarchisées par un indice global calculé en multipliant :

- le pourcentage de forages (de la formation) ayant fourni un débit instantané au moins égal à 10 m^3/h. Ce critère peut être considéré comme une image des probabilités de succès ;
- et le débit moyen du quartile supérieur (moyenne des débits des 25 % « meilleurs forages »). Ce paramètre peut être représentatif de la perméabilité des axes de drainage souterrain.

Cet indice varie en Bretagne de 0 à 45. L'indice moyen est de 5,4.

Cette approche statistique a été menée sur les formations géologiques des 5 bassins étudiés, à deux niveaux d'échelles :

- sur la zone d'étude du bassin versant : le secteur d'étude est constitué d'un rayon de recherche d'environ 8 km autour du centre du bassin versant,
- et sur l'étendue de la formation géologique à l'échelle de la Bretagne (résultats du projet SILURES Bretagne rapport BRGM/RP-55001-FR, 2006).

Les planches 5-6-7-8-9 en annexe 2 de ce rapport (volume séparé) présentent, en cartographiant les classes d'indice global, les résultats de l'approche statistique. Le mode de représentation des couleurs des formations est détaillé au niveau de la légende. Le tableau situé sous le graphique détaille les résultats de l'approche statistique.

Remarque : dans ce qui suit, on entend par « temps de réponse » de l'aquifère la réaction de celui-ci à un épisode pluvieux significatif (décalage temporel entre le début de l'épisode pluvieux et la montée du niveau de la nappe, décalage fonction des caractéristiques hydrogéologiques du bassin).

a) Bassin des Echelles

Le bassin des Echelles présente des formations plus perméables au Sud et au Sud-Est du bassin (Granodiorite à biotite, indice de 13.1) qu'au Nord et Nord-Ouest (Granodiorite à biotite et cordiérite, indice de 4.2). La circulation des eaux souterraines doit donc être plus rapide à l'amont du cours d'eau. En dehors de ce secteur (au Nord-Ouest du bassin), le renouvellement des réserves souterraines doit être plus lent (temps de réponse plus longs).

Les résultats obtenus localement sont différents des résultats régionaux : la perméabilité locale des Granodiorites à biotite semble plus forte dans la zone d'étude, et celle des Granodiorite à biotite et cordiérite plus faible.

b) Bassin du Gouessant

Le bassin du Gouessant présente des formations plutôt imperméables : granites (indice de 2.4), schistes et quartzites (indice de 3.0) et pélites (indice de 4.1). Seules les muscovites composant le Sud-Ouest du bassin sont perméables (indice de 22.1).

La circulation des eaux souterraines doit donc être assez lente (temps de réponse plus longs).

Les résultats obtenus localement sont différents des résultats régionaux : la perméabilité locale des granites semble plus faible dans la zone d'étude, et celle des muscovites beaucoup plus forte.

c) Bassin du Bizien

Le bassin du Bizien présente des formations plus perméables au Sud et au Nord du bassin (respectivement : Grès et pélites - indice de 8.9, et Leptinites - indice de 9.4) qu'au Centre (Grés et conglomérats, indice de 4.0). La circulation des eaux souterraines doit donc être plus rapide à l'amont du cours d'eau. En dehors de ce secteur, le renouvellement des réserves souterraines doit être plus lent (temps de réponse plus longs).

Les résultats obtenus localement sont différents des résultats régionaux : la perméabilité locale des Grès et pélites semble plus forte dans la zone d'étude, et celle des Leptinites un peu plus faible.

d) Bassin de l'Horn

Le bassin de l'Horn présente des formations plus perméables au Nord-Ouest et à l'extrême Sud-Est du bassin (respectivement : Orthogneiss Paragneiss - indice de 13.7, et Gneiss de Brest - indice de 16.7) qu'au Centre et à l'Est (Micaschistes, indice

de 4.9). La circulation des eaux souterraines doit donc être plus rapide à l'aval du cours d'eau en rive gauche. En dehors de ce secteur, le renouvellement des réserves doit être plus lent (temps de réponse plus longs).

Les résultats obtenus localement sont différents des résultats régionaux : la perméabilité locale des Orthogneiss Paragneiss et Gneiss de Brest semble plus forte dans la zone d'étude, et celle des Micaschistes plus faible.

e) Bassin de l'Urne

Le bassin de l'Urne présente des formations plutôt imperméables : granitoïde (indice de 1.8), monzogranite (indice de 3.0) et granite gneissique (indice de 4.3). Seules les grés et pélites composant les extrémités Sud et Nord-Est du bassin sont un peu plus perméables (indice de 7.3).

La circulation des eaux souterraines doit donc être assez lente (temps de réponse plus longs).

Les résultats obtenus localement sont différents des résultats régionaux : la perméabilité locale des granitoïdes et des grès et pélites semble plus faible dans la zone d'étude, et celle des monzogranites un petit peu plus forte.

f) Synthèse sur la perméabilité relative des formations des bassins étudiés

Les planches 5-6-7-8-9 permettent d'établir un classement des bassins, du plus perméable au moins perméable :

Echelles > Horn > Bizien > Urne > Gouessant

Ce résultat est confirmé par les valeurs moyennes du débit moyen du quartile supérieur de toutes les formations renseignées :

Echelles (28 m3/h) > Horn (21) > Bizien (20) > Urne (16) > Gouessant (15)

Comme ce paramètre a été calculé et utilisé sur les 4 bassins à plus grande superficie, une comparaison peut être tentée avec les 5 plus petits bassins versants. Le classement serait le suivant, des bassins les plus perméables au moins perméables :

+ perméables =====> - perméables

Guindy > Echelles > Ic > Arguenon > Horn > Bizien > Aber Wrac'h > Urne > Gouessant

Recommandations d'utilisation de ce classement
Il faut garder à l'esprit que les valeurs moyennes du débit moyen du quartile supérieur de toutes les formations renseignées de chaque bassin ont été calculées à deux niveaux : sur les 4 bassins à plus grande superficie le calcul est fait à partir des données régionales, et sur les 5 plus petits bassins à partir des données locales (secteur de recherche d'environ 8 km autour du centre du bassin versant). Ce classement est donc susceptible d'évoluer si le paramètre est calculé localement sur les 4 plus grands bassins.

Choix de la méthode d'interpolation

Pour modéliser la géométrie des interfaces : surface piézométrique (niveau de nappe moyen) et épaisseur des altérites, un recours à l'interpolation est nécessaire.

Plusieurs techniques d'interpolation existent parmi lesquelles nous avons choisi le krigeage (un des outils fondamentaux de la géostatistique, cf. détail en annexe 1). Un avantage essentiel du krigeage par rapport aux interpolateurs classiques réside dans la quantification de l'incertitude associée à l'interpolation, rendue possible par l'approche probabiliste qui fonde les méthodes de krigeage. Cette incertitude qui est un indicateur de la qualité d'une interpolation est représentée généralement par la carte d'écart-types de krigeage (ou carte d'iso-incertitudes).

Dans le cadre de cette étude, à partir d'un semis de point caractérisant une altitude, l'approche géostatistique mise en œuvre va permettre :

- de caractériser la variabilité spatiale des paramètres étudiés ; c'est l'objectif de l'analyse variographique ;
- d'interpoler par krigeage les variables de travail aux nœuds d'un maillage régulier.

Pour chaque secteur géographique étudié, la grille interpolée contient, au droit de chaque nœud, les informations suivantes :

- l'altitude krigée,
- et l'écart-type de krigeage (l'erreur associée) (exemple : 100 m $\pm$ 2.5 m).

Une carte d'iso-incertitudes est ensuite établie sur le secteur étudié. Cette carte est un indicateur de la qualité de l'interpolation ; de ce point de vue elle permet de bien identifier les zones peu ou mal reconnues. De manière générale, l'écart-type de krigeage :

- prend des valeurs minimales dans le voisinage des points de mesures et l'estimation est alors de bonne qualité,
- augmente lorsque l'on s'éloigne des données ; cette augmentation est fonction de la variabilité spatiale du phénomène et donc des paramètres d'ajustement du variogramme adopté (cf. planches des deux chapitres suivants).

Modélisation de la surface piézométrique et de la profondeur de la nappe

a) Collecte des données piézométriques

Parmi les forages recensés aux alentours des 5 bassins versants, extraits de la Banque de données du Sous-Sol du BRGM (BSS), 113 mesures de la profondeur du

niveau de nappe avaient été relevées dans des forages d'eau (cf. répartition par bassin dans l'illustration 16).

Nombre de mesures (total)	Bassin des Echelles	Bassin du Gouessant	Bassin de l'Urne	Bassin du Bizien	Bassin de l'Horn
Ouvrages de la BSS (113)	11	7	17	15	63
Relevés sur le terrain (71)	58	1	9	3	0
Total (184)	69	8	26	18	63

Illustration 16 - Répartition des mesures piézométriques

Sur le bassin de l'Horn, une étude spécifique a déjà eu lieu (rapport BRGM/RP-52731-FR, 2004), les données ont donc été récupérées et utilisées.

Dans le cadre de l'étude spécifique menée sur le bassin des Echelles, 58 relevés ont été réalisés, en mai juin et juillet 2007, sur des ouvrages exploités ou pas (principalement des puits).

Durant la campagne de repérage des points d'eau souterraine en juin 2007 puis de prélèvement en juillet août 2007 (cf. chapitre 2.3.1), des mesures piézométriques ont été réalisées afin d'obtenir une meilleure densité d'observation et une répartition plus homogène sur les bassins versants.

Les niveaux relevés varient entre 0 et 12.2 m de profondeur sur le bassin des Echelles, entre 0.6 et 5 m sur le Gouessant, entre 0.1 et 21.3 m sur l'Urne, entre 0.5 et 12.3 m sur le Bizien, et entre 0 et 18 m sur l'Horn.

Les mesures extraites de la BSS sont effectuées par des foreurs ou des bureaux d'étude après réalisation de l'ouvrage. Cependant, il arrive parfois que ces mesures soient effectuées trop rapidement avant la mise en équilibre du niveau de nappe ; les profondeurs mesurées du niveau de nappe sont alors sur-estimées.

L'ensemble de ces 184 points d'observation (cf. illustration 16) représente une densité d'environ 1 point pour 1 km² sur les Echelles, 1 point pour 26 km² sur le Gouessant, 1 point pour 8 km² sur l'Urne, 1 point pour 9 km² sur le Bizien, et 1 point pour 2 km² sur l'Horn.

Remarque
Le bassin du Gouessant apparaît donc comme donc quasiment dépourvu de mesure. Seule une campagne piézométrique ciblée aurait permis d'améliorer cette faible densité ; elle n'a pas pu être menée en raison des délais imposés pour réaliser l'étude. Les résultats obtenus sur ce bassin seront donc à prendre avec réserve.

b) 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) et des mesures de la profondeur du niveau de nappe. Le MNT au pas de 50 m provient de l'Institut Géographique National.

La méthode apliquée a été mise au point et validée pour les contextes de socle altéré (Wyns et al., 2004) ; son principe est rappelé ci-dessous (illustration 17).

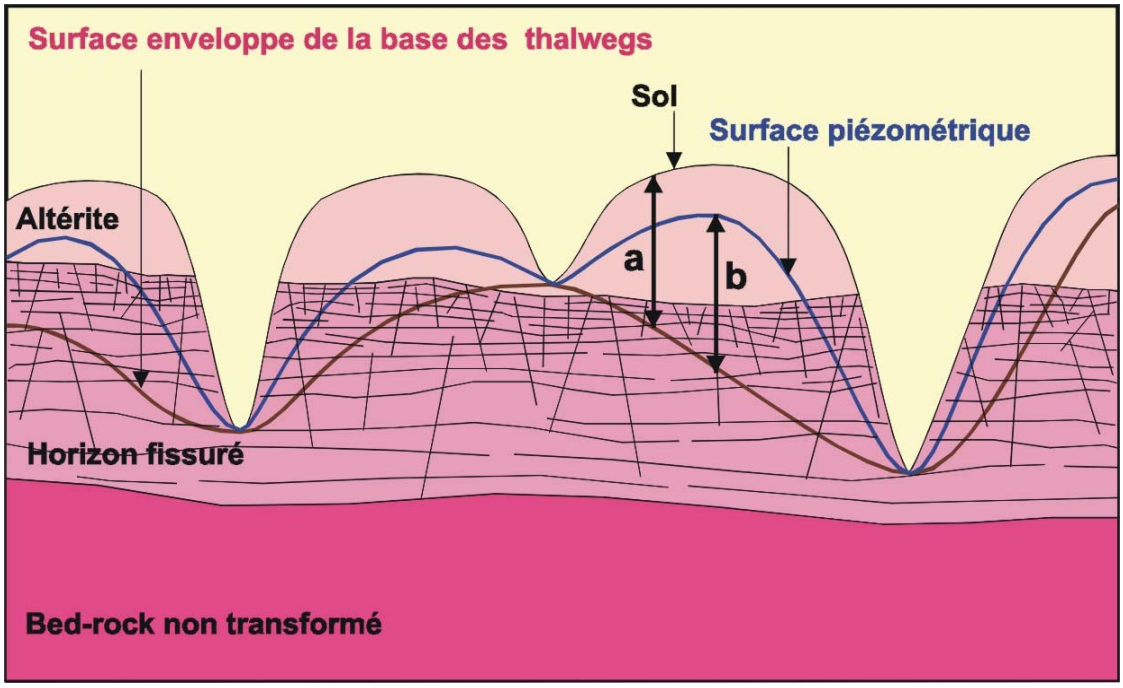


Illustration 17 - Principe de modélisation de la surface piézométrique

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 (ou enveloppe de la base des thalwegs).

Une corrélation linéaire relie d'une part la dénivellation entre l'altitude du sol et celle de la surface-enveloppe des rivières (« a » sur l'illustration 17), et d'autre part la dénivellation entre l'altitude de la surface piézométrique et celle de la surface-enveloppe des rivières (« b » sur l'illustration 17). L'équation de cette droite permet donc d'obtenir une estimation en tout point de l'altitude de la surface piézométrique à

partir de l'altitude du sol et de l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (à condition bien sûr que la corrélation obtenue soit forte).

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, échantillonnage d'un point tous les 25 m linéaires,
- croisement du semis de points avec le MNT pour obtenir l'altitude des points représentatifs du réseau hydrographique pérenne,
- 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.

L'écart-type de krigeage, quantifiant l'erreur associée à la variable interpolée, varie :

- pour le bassin des Echelles entre 0 et 5 m, avec une moyenne de 2.7 m ;
- pour le bassin du Gouessant entre 1 et 9 m, avec une moyenne de 2.4 m ;
- pour le bassin du Bizien entre 0 et 16 m, avec une moyenne de 4.2 m ;
- pour le bassin de l'Horn entre 0 et 11 m, avec une moyenne de 3.0 m ;
- pour le bassin de l'Urne entre 0 et 14 m, avec une moyenne de 4.7 m.

D'après ces résultats, on constate que la variabilité spatiale de 4 bassin versants est un peu plus forte que sur celui des Echelles ce qui se traduit par des incertitudes un peu plus fortes.

Les bassins versants du Bizien et de l'Urne sont caractérisés localement par de fortes incertitudes ; elles s'expliquent par la configuration spatiale des données intervenants dans le voisinage de krigeage (réseau hydrographique assez lâche).

La surface du sol est fournie par le MNT.

Sur les grilles englobant les zones d'étude, 184 mesures piézométriques ont été utilisées (illustration 16).

Pour chacun de ces points, on a calculé par croisement avec les grilles correspondantes l'altitude du sol et l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes, de manière à calculer les paramètres « a » (Zsol-Zrivières) et « b » (Zpiézométrie -Zrivières).

Une première représentation des 184 couples de variables a et b sur un diagramme binaire a montré que 45 points (15 sur les Echelles, 1 sur le Gouessant, 3 sur le Bizien, 18 sur l'Horn et 8 sur l'Urne) s'éloignaient de la droite b=f(a).

Plusieurs raisons expliquent ce comportement éloigné par rapport à la majorité des points validés :

- points à abscisse négative : points pour lesquels la surface enveloppe des rivières calculée se situe au dessus de la surface topographique, ce qui n'est pas possible (points proches des vallées) ;
- points à ordonnée trop faible : points influencés par des pompages ou par une absence de remontée de la nappe ; les niveaux piézométriques sont alors inférieurs à ce qu'ils devraient être (cf. explications au paragraphe a)).

Après élimination des valeurs aberrantes (45 mesures), 131 mesures piézométriques ont pu été utilisées (54 sur les Echelles, 7 sur le Gouessant, 11 sur le Bizien, 45 sur l'Horn et 14 sur l'Urne).

Les relations obtenues entre les variables a et b (cf. diagrammes binaires présentés par les illustrations 18-19-20-21-22) sont :

Bassin des Echelles	b = 0.77 * a - 2,01
Bassin du Gouessant	b = 0.99 * a - 2,10
Bassin du Bizien	b = 0.98 * a - 2,73
Bassin de l'Horn	b = 0.92 * a - 3,79
Bassin de l'Urne	b = 0.86 * a - 1,15

Ces équations permettent de calculer directement l'altitude de la surface piézométrique à partir du MNT et de la grille de l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes.

Les pentes des droites b=f(a) (0.77, 0.99, 0.98, 0.92 et 0.86) sont représentatives de la perméabilité en grand des roches présentes sur chaque bassin versant. Plus la pente est proche de 1 plus le massif est imperméable (Zsol $\simeq$ Zpiézométrie) et inversement plus la pente se rapproche de 0 plus le massif est perméable (Zrivières $\simeq$ Zpiézométrie). Ainsi on note que le bassin des Echelles est le plus perméable (pente=0.77) et celui du Gouessant est le moins perméable (0.99).

Les ordonnées à l'origine négatives (-2.0, -2.1, -2.7, -3.8 et -1.2 m) représentent l'encaissement moyen des rivières par rapport à leurs berges.

Une altitude moyenne étant affectée à la maille de 50 m située au niveau de la rivière, l'altitude d'une maille située dans une vallée encaissée (bassin de l'Horn) comporte plus d'erreur qu'une maille située dans une vallée à fond plat (bassin de l'Urne). La maille du MNT est donc parfois trop large par rapport à la morphologie existante.

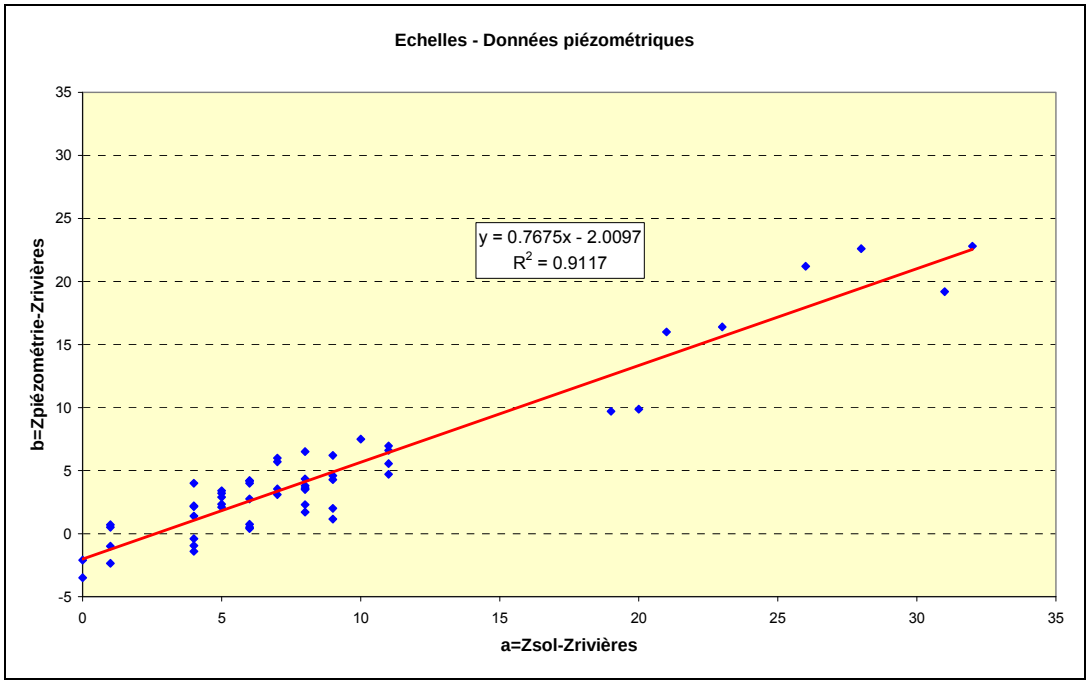


Illustration 18 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin des Echelles)

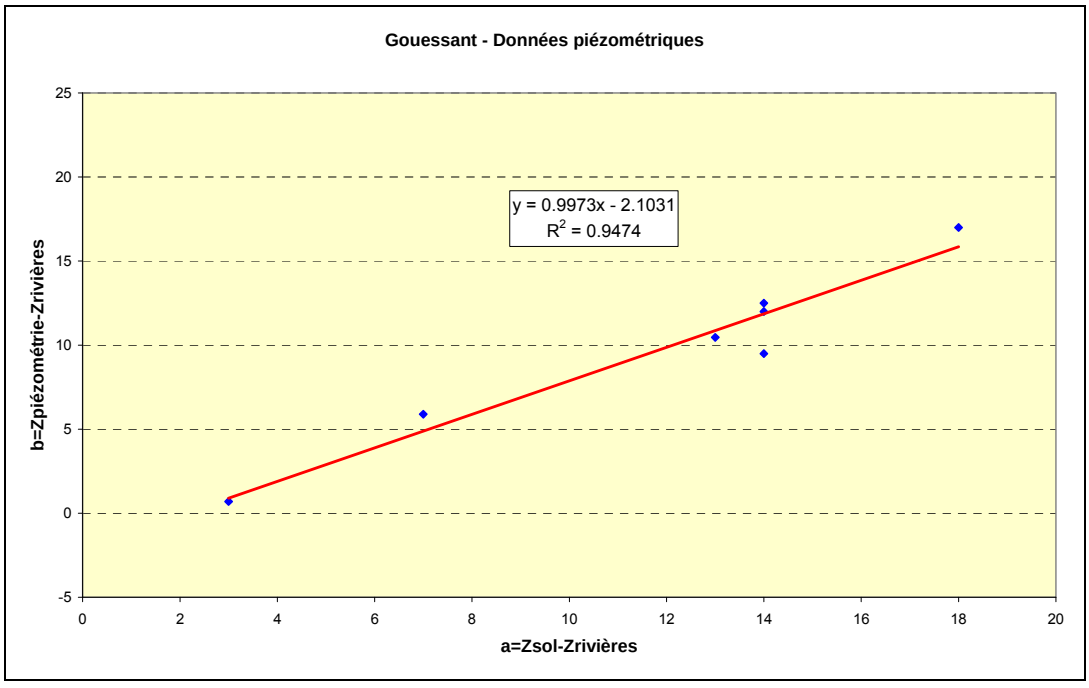


Illustration 19 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin du Gouessant)

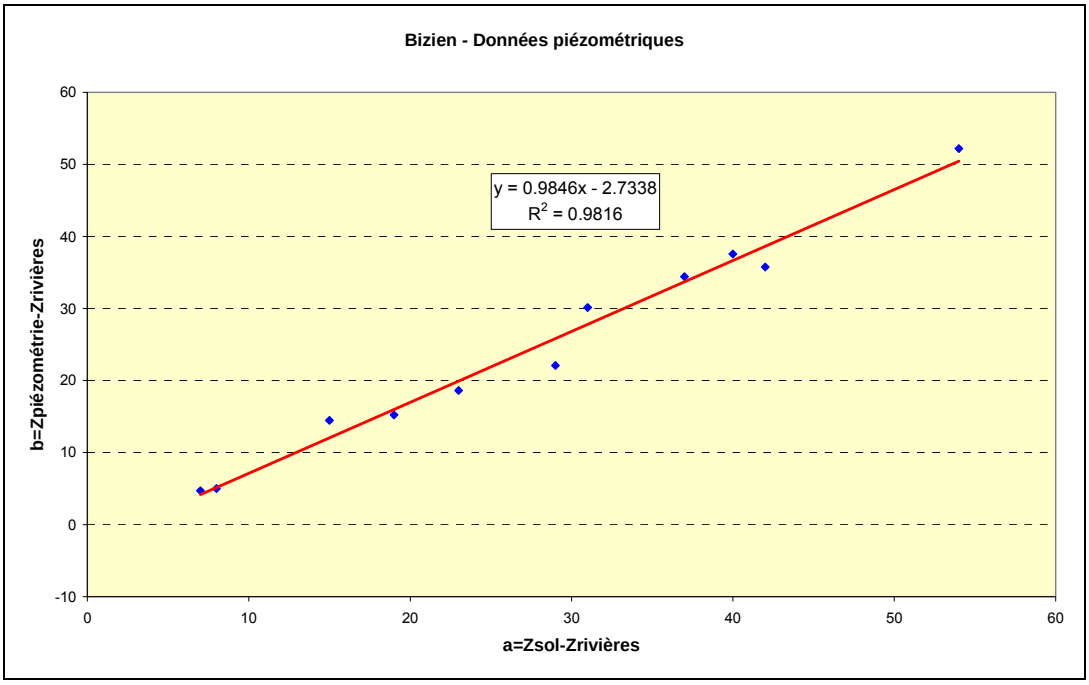


Illustration 20 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin du Bizien)

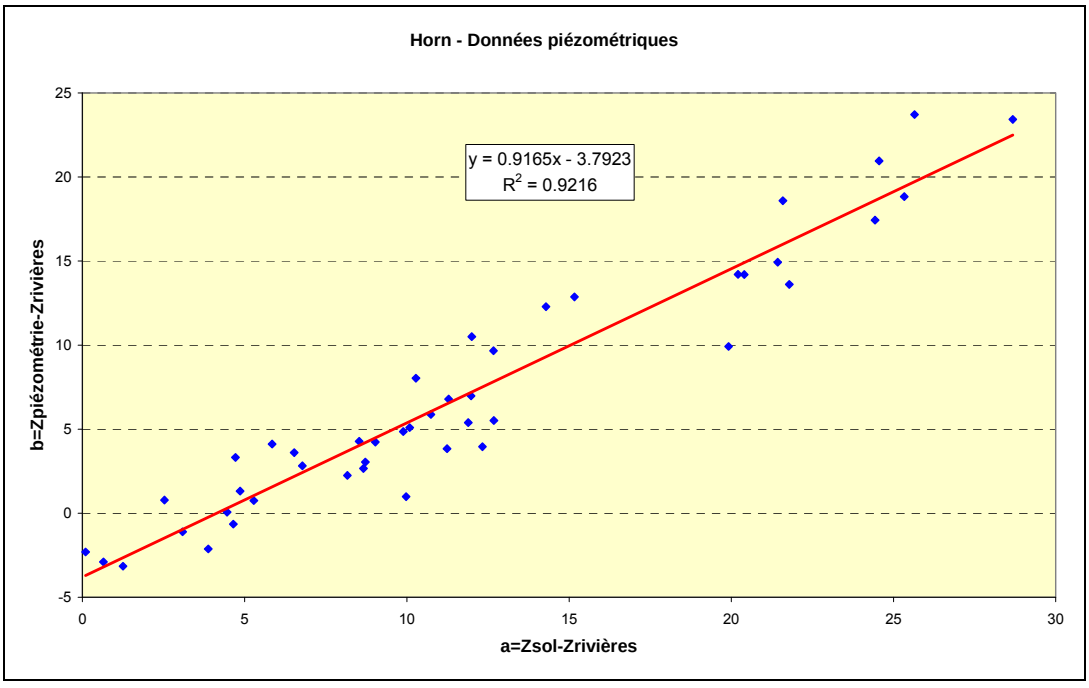


Illustration 21 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de l'Horn)

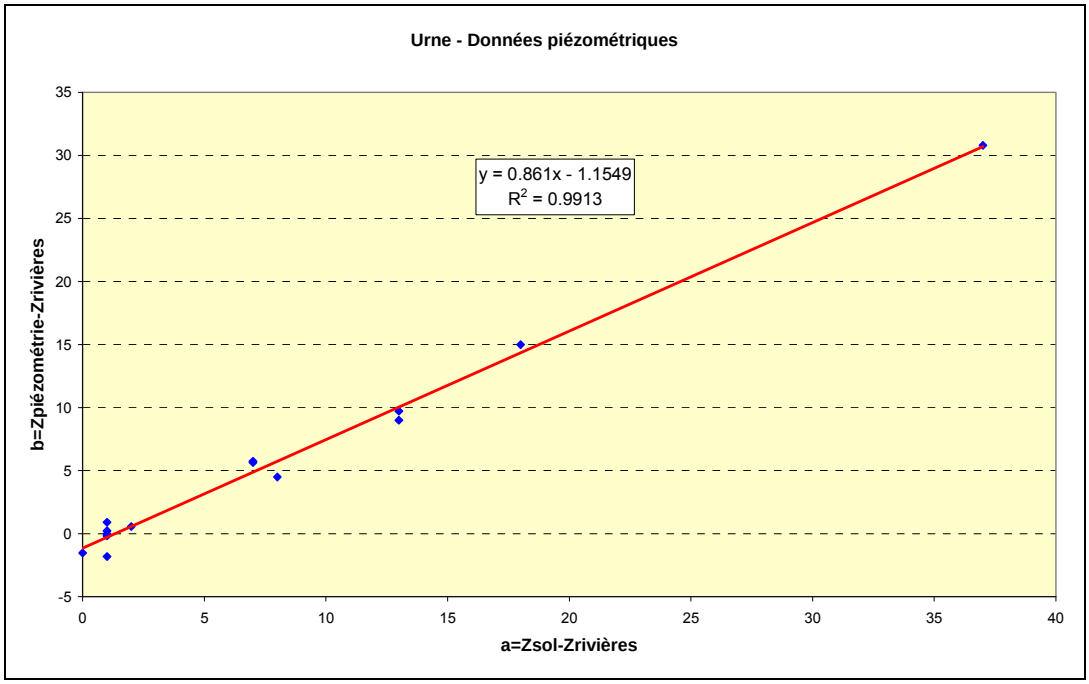


Illustration 22 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de l'Urne)

c) Profondeur de la nappe

La carte de la profondeur de la nappe a été réalisée par différence entre le MNT et l'altitude de la surface piézométrique.

Les cartes de la profondeur de la surface piézométrique sur les 5 bassins versants sont respectivement représentées sur les planches 10-11-12-13-14 en annexe 2.

L'écart-type de krigeage de la surface-enveloppe des rivières pérennes, qui représente l'essentiel de l'incertitude associée au calcul de l'altitude de la surface piézométrique, est représenté sur les planches 15-16-17-18-19 en annexe 2.

Ces cartes montrent que l'écart-type de krigeage est faible à proximité de chaque point issu du réseau hydrographique servant de base à la modélisation, tandis que cet écart-type augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers les plateaux.

La profondeur de la nappe varie :

- sur le bassin des Echelles entre 0 et 9.4 m, avec une moyenne de 3.6 m ;
- sur le bassin du Gouessant entre 2 et 2.3 m, avec une moyenne de 2.1 m ;
- sur le bassin du Bizien entre 2.5 et 3.9 m, avec une moyenne de 3.0 m ;

- sur le bassin de l'Horn entre 2.9 et 6.3 m, avec une moyenne de 4.6 m ;
- sur le bassin de l'Urne entre 0 et 12.4 m, avec une moyenne de 3.5 m.

Les planches 10-11-12-13-14 montrent que, sur les bassins, les niveaux piézométriques sont profonds au niveau des plateaux (profondeur parfois supérieure à 6 m) et qu'ils se rapprochent du sol à proximité des cours d'eau.

Modélisation de la base des altérites et de l'épaisseur des altérites en place

La surface de base des altérites a été construite par krigeage, après étude géostatistique, d'une population de points d'observation de l'interface altérites/milieu fissuré : 561 points sur les Echelles, 402 points sur le Gouessant, 654 points sur le Bizien, 751 points sur l'Horn et 1289 points sur l'Urne.

Ces points proviennent :

- de données des forages recensés dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et qui ont recoupé la base des altérites (interprétation réalisée dans le cadre du projet SILURES Bretagne rapport BRGM/RP-55001-FR, 2006),
- d'observations de carottes prélevées par tarières, prélèvements anciennement réalisées à proximité des bassins versants (pour le programme de la carte géologique de la France),
- d'observations des affleurements présents sur les zones d'étude,
- du repérage sur le terrain du contact altérites/milieu fissuré (digitalisation des contours et création de points).

L'ensemble des 3657 points représente une densité d'observations d'environ 1 point pour 0.04 km² sur les Echelles, 1 point pour 0.11 km² sur le Gouessant, 1 point pour 0.09 km² sur le Bizien, 1 point pour 0.17 km² sur l'Horn et 1 point pour 0.07 km² sur l'Urne.

L'altitude de la surface de base des altérites a été obtenue sur les 5 bassins versants.

L'écart-type de krigeage, quantifiant l'erreur associée à la variable interpolée, varie :

- entre 2 et 13 m, avec une moyenne de 7.1 m, pour le bassin des Echelles ;
- entre 1 et 19 m, avec une moyenne de 5.1 m, pour le bassin du Gouessant ;
- entre 1 et 6 m, avec une moyenne de 2.3 m, pour le bassin du Bizien ;
- entre 1 et 8 m, avec une moyenne de 3.9 m, pour le bassin de l'Horn ;
- entre 2 et 17 m, avec une moyenne de 8.0 m, pour le bassin de l'Urne.

Sur le bassin des Echelles, la variabilité spatiale est importante sur de faibles distances.

Au niveau des bassins versants, des failles (Echelles, Bizien et Horn) ont été introduites dans le krigeage de la base des altérites car elles décalaient localement cette surface (elles représentent des « barrières » pour l'interpolation). Une faille d'orientation Ouest-Est située au Nord du bassin du Bizien a décalé la base du profil d'altération de 10 à 20 mètres. A l'Ouest du bassin des Echelles, une faille longeant le filon de quartz orienté N5 décale le profil de 10 mètres. Sur le bassin de l'Horn, plusieurs niveaux à transitions brutales ont été mis en évidence, ce qui permet de conclure à des décalages (horsts et effondrements), d'environ 20 mètres du profil d'altération, par des failles difficilement distinguables sur le terrain.

Pour chaque bassin, la carte de l'extension et de l'épaisseur des altérites en place a été réalisée par différence entre le MNT et l'altitude de la base des altérites (cf. planches 20-21-22-23-24 en annexe 2).

L'incertitude (écart-type de krigeage) sur l'altitude de la base des altérites pour ces 5 bassins versants est respectivement représentée sur les planches 25-26-27-28-29 en annexe 2.

Ces cartes montrent que l'écart-type de krigeage est faible à proximité de chaque point servant de base à la modélisation (altitude de la base des altérites connue), tandis que cet écart-type augmente dans les secteurs où la densité de points est plus faible.

L'épaisseur des altérites varie :

- sur le bassin des Echelles entre 0 et 27 m, avec une moyenne de 5.7 m ;
- sur le bassin du Gouessant entre 0 et 46 m, avec une moyenne de 8.6 m ;
- sur le bassin du Bizien entre 0 et 31 m, avec une moyenne de 9.8 m ;
- sur le bassin de l'Horn entre 0 et 31 m, avec une moyenne de 6.4 m ;
- sur le bassin de l'Urne entre 0 et 55 m, avec une moyenne de 12.0 m.

Ces planches montrent que les bassins des Echelles, du Bizien et de l'Urne sont mieux pourvus d'altérites que les deux autres bassins versants (Horn et Gouessant). Le bassin du Gouessant est le plus pauvre en altérites.

Sur le bassin du Gouessant (planche 21), l'épaisseur maximum des altérites (46 m) est très locale et surévaluée (extrême Sud-Est en dehors du bassin). Il en est de même sur le bassin de l'Urne (planche 24) : les épaisseurs maximales des altérites (40-55 m) sont locales et surévaluées (Sud et Nord-Est du bassin). Ceci est lié à l'absence de contrainte du modèle de la base des altérites (écart-type de krigeage maximum). Des reconnaissances par sondages à la tarière mécanique permettraient d'affiner fortement les épaisseurs en ajoutant des points pour la modélisation.

Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration

Une cartographie de la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration peut être approchée à partir des informations fournies par les forages recensés sur et à proximité de chaque bassin versant étudié.

Ces informations sont les suivantes :

- débits instantanés des forages d'eau (débit exhauré, par l'émulsion air-eau produite par la méthode du marteau fond de trou) qui fournissent une bonne image de la perméabilité locale du sous-sol ;
- profondeur des ouvrages.

Afin de réaliser cette cartographie, il a été considéré que, toutes choses égales par ailleurs, notamment les pentes et l'état des sols :

- la 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 les débits souterrains notables (vidanges permettant de reconstituer la capacité d'accueil de l'aquifère entre deux périodes de recharge),
- à l'inverse, la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration est d'autant plus faible que l'épaisseur de la zone non saturée et les écoulements souterrains sont faibles.

Le chapitre sur la « Valorisation de la base de données des forages » a permis, pour chaque bassin versant, de caractériser la perméabilité du sous-sol à partir de statistiques issus des résultats des forages d'eau.

Cette caractérisation a été actualisée en utilisant le paramètre débit sur profondeur (Q/P) représentatif de la perméabilité relative du sous-sol.

Les formations géologiques présentes sur les bassins étudiés ont été valorisées par une valeur moyenne de Q/P issue des caractéristiques des forages présents dans chaque formations (ou groupe de formations) géologiques.

L'illustration 23 détaille ce classement.

BV	Géologie	Nbre forages	Q/P ($m^3/h/m$)	Valeur
Bizien	Grès et pélites (graphiteux)	27	0.234	
Bizien	Grés feldpathiques rouges et conglomérats	39	0.124	régionale
Bizien	Leptinites et volcanites	28	0.202	
Echelles	Granodiorite à biotite	105	0.209	
Echelles	Granodiorite à biotite et cordiérite	30	0.160	
Gouessant	Granite monzonitique à biotite	48	0.094	
Gouessant	Grés et pélites	837	0.132	régionale
Gouessant	Micaschistes	20	0.194	
Gouessant	Schistes et quartzites	168	0.153	régionale
Horn	Gneiss de Brest	23	0.342	
Horn	Micaschistes de la Penzé	54	0.187	
Horn	Orthogneiss de Plouénan, et paragneiss à biotite	62	0.242	
Urne	Granite gneissique monzonitique	29	0.126	régionale
Urne	Granitoïde	23	0.093	
Urne	Grés et pélites métamorphiques	22	0.166	
Urne	Monzogranite porphyroïde	30	0.096	

Illustration 23 - Classement des formations géologiques en fonction de Q/P

Deux formations situées sur le bassin de l'Urne, une sur le bassin du Gouessant et une sur celui de l'Horn ne sont pas suffisamment renseignées (nombre de forages proche de 20, cf. cases en jaune). Les résultats sur ces formations seront donc à considérer avec réserve (capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration). Par ailleurs, sur certains bassins, les formations géologiques n'ont pas pu être renseignées localement en raison du faible nombre de forage sur cette formation ; pour ces formations, la valeur régionale sera utilisée (cf. dernière colonne du tableau).

Les planches 10-11-12-13-14 représentent la profondeur de la surface piézométrique pour chacun des bassins versants étudiés. La surface piézométrique est proche du sol au niveau des vallées (l'épaisseur de la zone non saturée est faible ou nulle au niveau des cours d'eau) tandis qu'elle s'approfondit au niveau des plateaux (épaisseur forte parfois supérieure à 6 m).

Les cartes précédentes (Q/P et épaisseur de la zone non saturée) ont été croisées afin d'établir une carte présentant la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration sur chaque bassin versant.

Ces cartes, représentées en planches 30-31-32-33-34 en annexe 2 utilisent les critères de l'illustration 24.

		Production des forages de chaque formation géologique exprimée en indice Q/P (m^3/h/m foré)		
		< 0,175	0,175 à 0,25	> 0,25
Epaisseur de la zone non saturée (m)	< 3,5	Capacité d'absorption très faible	Faible	Moyenne
	3,5 à 5	Faible	Moyenne	Forte
	> 5	Moyenne	Forte	Capacité d'absorption très forte

Illustration 24 - Détail des pôles caractérisant la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration

Sur le bassin des Echelles, la planche 30 montre un découpage amont/aval du bassin versant : la partie amont a une capacité d'absorption des eaux d'infiltration faible à moyenne (elle devient même forte sur les plateaux) et la partie aval est plus « imperméable » à ces eaux (le ruissellement devient majoritaire) puisque la capacité y est très faible à faible. La formation géologique la plus « infiltrante » est la Granodiorite à biotite.

La planche 31 montre que le bassin du Gouessant, dans sa quasi-totalité, n'a qu'une très faible capacité d'absorption des eaux d'infiltration (le ruissellement est majoritaire), à l'exception du Sud-Ouest du bassin où la capacité d'absorption reste faible. Ceci s'explique par la faible perméabilité des formations géologique (avec Q/P<0.175 m^3/h/m foré) et par le niveau de nappe peu profond (environ 2 m).

Sur le bassin du Bizien, la planche 32 montre qu'une majeure partie du bassin n'a qu'une faible capacité d'absorption des eaux d'infiltration (le ruissellement est majoritaire). La capacité d'absorption devient même très faible au niveau d'une partie centrale orientée Ouest-Est. Ceci s'explique par la faible perméabilité des formations géologique et par le niveau de nappe peu profond (de 2.5 à 4 m).

La planche 33 montre que le bassin de l'Horn, sur une grande partie de sa superficie, a une capacité d'absorption des eaux d'infiltration moyenne à forte. Les seules petites zones moins favorables aux eaux d'infiltration sont situées dans les vallées (faible épaisseur de la zone non saturée et perméabilité moyenne à faible des formations). Les formations géologiques acceptant le plus les eaux d'infiltration sont : les Orthogneiss de Plouénan au Nord, et les Gneiss de Brest au Sud du bassin versant.

La planche 34 montre que tout le bassin de l'Urne n'a qu'une très faible ou faible capacité d'absorption des eaux d'infiltration (le ruissellement est majoritaire), à l'exception des plateaux où la capacité d'absorption devient moyenne.

2.2. CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES AU DEBIT DES RIVIERES

2.2.1. Méthode

Données utilisées

Dans le cadre du projet SILURES Bretagne (phase « interprétation des hydrogrammes des rivières »), une modélisation globale des écoulements dans 8 bassins avait été réalisée en utilisant le logiciel Gardenia du BRGM. Dans chacun de ces bassins, il s'agissait d'évaluer la participation du ruissellement et des écoulements souterrains à l'écoulement global.
Cette modélisation s'est appuyée sur les mesures de débits des cours d'eau aux stations hydrométriques précisées ci-dessous (cf. illustration 25).

Cours d'eau	Dépt	Station hydrologique	N° station	Superficie BV (km²)
Horn	29	Mespaul (Pont Milin)	J3014310	50
Loisance	35	Saint-Ouen-la-Rouërie	J0144010	81.5
Aber Wrac'h	29	Drennec	J3205710	24
Arguenon	22	Jugon-les-Lacs	J1103010	104
Rosette	22	Mégrit	J1114010	102
Gouessant	22	Andel	J1313010	242
Guindy	22	Plouguiel	J2034010	125
Urne	22	Plédran	J1405310	40.4

Illustration 25 - Superficie des bassins retenus au droit des stations hydrométriques

La modélisation des bassins versants a été réalisée avec un modèle à deux réservoirs profonds pour simuler les deux régimes d'écoulement existant dans les socles bretons : un écoulement dans les roches altérées et un écoulement plus profond dans le milieu fissuré. La méthode utilisée est détaillée dans le rapport du projet SILURES Bretagne Année 4 (Rapport BRGM/RP-55001-FR).

En raison de l'absence de station hydrométrique de la DIREN Bretagne sur les rivières Ic et Bizien, ces bassins ne pourront pas être caractérisés. Par ailleurs, le bassin versant en contentieux de l'Arguenon sera caractérisé par ces deux sous-bassins : l'Arguenon à Jugon-les-Lacs et la Rosette à Mégrit.

Situation des bassins étudiés par rapport aux bassins modélisés

L'illustration 26 localise la superposition des bassins étudiés (en rouge) sur les bassins modélisés (en fond gris et contour vert) au droit des stations hydrométriques (en jaune).

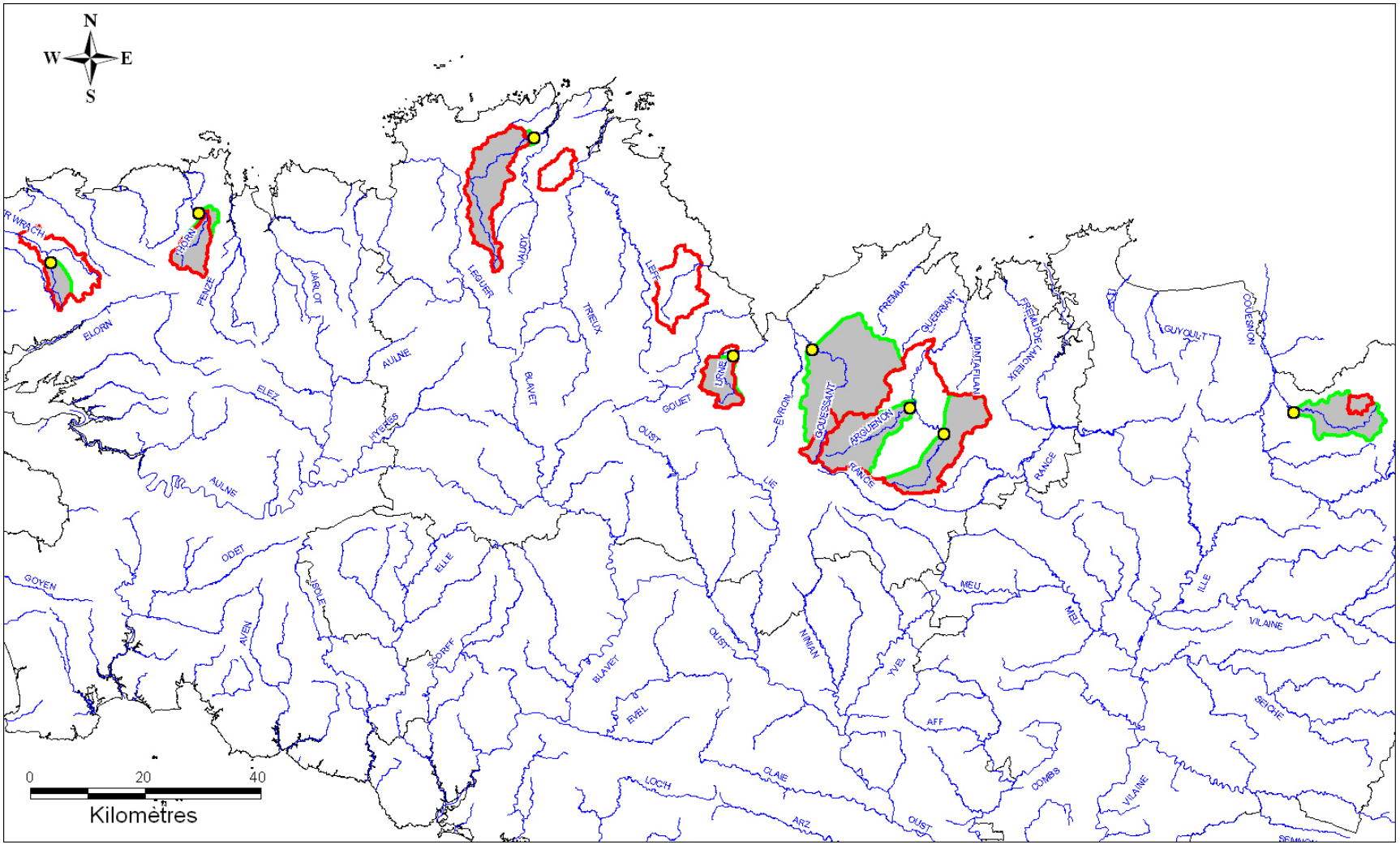


Illustration 26 - Localisation des bassins étudiés par rapport aux bassins modélisés

La délimitation des bassins de l'Horn, du Guindy et de l'Urne modélisés sont quasi identiques aux bassins étudiés. Les résultats des modélisations sont donc applicables directement aux bassins en contentieux.

Le bassin de l'Aber Wrac'h modélisé (24 km²), composé de granites uniquement (Massif de Kersaint), est contenu dans le bassin de l'Aber Wrac'h en contentieux. Comme le bassin étudié comporte un sous-sol granitique et gneissique, le pourcentage d'écoulement souterrain par rapport à l'écoulement total calculé sur le bassin de l'Aber Wrac'h modélisé constituera donc un maximum pour le bassin de l'Aber Wrac'h en contentieux.

Le bassin du Gouessant (principalement granitique) est contenu dans le bassin du Gouessant modélisé à Andel (majoritairement sur des formations schisto-gréseuses mais également sur des formations intrusives : granites, gneiss, migmatites, grabbros). Le pourcentage d'écoulement souterrain par rapport à l'écoulement total calculé sur le bassin du Gouessant modélisé à Andel constituera donc un minimum pour le bassin du Gouessant.

Les bassins de l'Arguenon et de la Rosette modélisés (respectivement 104 et 102 km²), composés de schistes et de granites, sont contenus dans le bassin de l'Arguenon en contentieux. Comme le bassin étudié comporte un sous-sol schisto-gréseux et granitique, les pourcentages d'écoulement souterrain par rapport à l'écoulement total calculés sur les bassins de l'Arguenon et de la Rosette modélisés constitueront donc un intervalle pour le bassin de l'Arguenon en contentieux.

Le bassin des Echelles (granitique uniquement) est contenu dans le bassin de la Loisance modélisé (principalement granitique et également composé de schistes à l'aval). Le pourcentage d'écoulement souterrain par rapport à l'écoulement total calculé sur le bassin de la Loisance constituera donc un minimum pour le bassin des Echelles.

2.2.2. Résultats

Compte-tenu de la disponibilité des données au moment du projet SILURES Bretagne, les modélisations ont été réalisées pour les périodes suivantes : 1989-2000 (Aber Wrac'h), 1990-2000 (Horn), 1995-2000 (Arguenon, Rosette et Urne), 1995-2003 (Loisance, Gouessant et Guindy), après un calage des paramètres lors de deux années (90-91 ou 95-96).

Les corrélations finales sont de : 66 % pour la Rosette (en raison d'une chronique d'évapotranspiration potentielle (ETP) incomplète à Trémeur), 78 % pour l'Horn, 82 % pour l'Arguenon la Loisance le Gouessant et le Guindy, 85 % pour l'Urne, et 90.5 % pour l'Aber Wrac'h.

L'illustration 27 ci-dessous rassemble les résultats ultimes des modélisations.

Pluie totale mm/an	Evapo-transpiration mm/an	Pluie efficace mm/an	Ecoulements à Mespaul, St-Ouen, Drennec, Jugon, Mégrit, Andel, Plouguiel et Plédran				
			Rapide		Lent		Bassins
			mm/an	%	mm/an	%	
1013	541	472	184	39	288	61	Horn
972	629	343	155	45	188	55	Loisance
1144	574	570	248.5	43.5	321.5	56.5	Aber Wrac'h
861	590	271	156	57.5	115	42.5	Arguenon
828	621	207	105.5	51	101.5	49	Rosette
787	600	187	79	42	108	58	Gouessant
959	638	321	126	39	195	61	Guindy
849	554	295	125	42	170	58	Urne

Illustration 27 - Résultats des modélisations Gardénia

Compte-tenu des propos du chapitre 2.2.1, les résultats de la modélisation indiquent que la lame d'eau écoulée aux prises d'eau potable des bassins en contentieux est alimentée, en moyenne, par les eaux souterraines à hauteur :

- de 61 % pour le bassin de l'Horn,
- de 61 % pour le bassin du Guindy,
- de 58 % pour le bassin de l'Urne,
- d'un peu moins de 56.5 % pour le bassin de l'Aber Wrac'h,
- de plus de 58 % pour le bassin du Gouessant,
- de 42.5 à 49 % pour le bassin de l'Arguenon,
- de plus de 55 % pour le bassin des Echelles.

L'analyse des hydrogrammes des rivières met en évidence que l'Arguenon et la Rosette ont des étiages peu soutenus par rapport aux autres bassins. Ces deux bassins sont influencés par les phénomènes de ruissellement.

A l'inverse, les six autres bassins présentent des étiages plus soutenus grâce à une forte influence des réservoirs souterrains.

Synthèse sur la contribution des eaux souterraines au débit des rivières étudiées

L'illustration 27 et ses conclusions permettent de tenter d'établir un classement des bassins, allant de celui qui a la plus forte participation des eaux souterraines à l'écoulement de la rivière à celui qui a la participation la plus faible :

+ forte participation =====> + faible participation

Horn ≥ Guindy > Gouessant ≥ Urne > Aber Wrac'h ≥ Echelles > Arguenon

(Ic et Bizien non classés en raison de l'absence de données de débits journaliers)

2.3. PREMIERE CARACTERISATION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DES BASSINS VERSANTS

2.3.1. Utilisation des qualitomètres

En juin 2007, le BRGM a extrait de la banque nationale ADES (portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) les coordonnées et les teneurs en nitrates des qualitomètres[1] existant en Bretagne. Les producteurs de données sont l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne ainsi que les Directions Départementales des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS).

Afin de compléter et mettre à jour les données (nombre de points, cadence, et obtention des données récentes de 2007), le BRGM s'est rapproché de la Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales (DRASS) en juillet. Suite à la demande du BRGM, la DRASS de Bretagne a extrait de sa base SISE-Eaux tous les résultats « nitrates » mesurées pour les eaux souterraines de la Bretagne.

Les planches 35-36-37-38-39-40-41-42-43 en annexe 2 permettent de localiser, sur un fond de carte géologique (1/50 000 et 1/250 000), les qualitomètres disponibles aux alentours des 9 bassins étudiés ainsi que les chroniques « nitrates » correspondantes. Chaque qualitomètre est caractérisé par : soit son numéro BSS soit le nom du lieu-dit, sa nature (puits ou forage) et sa profondeur quand elle est connue.

Sur le bassin des Echelles (cf. planche 35), un seul qualitomètre existe : il s'agit d'un puits de 7.5 m de profondeur, situé sur la commune de Villamée, dont les teneurs en nitrates sont suivies depuis 1984. Ce point, captant l'aquifère des altérites (cf. planche 20), montre que la qualité des eaux souterraines s'est dégradée régulièrement entre 1984 et 2006 avec des teneurs en nitrates qui passent de 24 à 58 mg/l (+1.6 mg/l/an). Un saut de concentration est observé entre juin 1993 et mai 1994.

6 qualitomètres ont été recensés autour du bassin du Gouessant (cf. planche 36) : ils sont situés à l'amont du bassin, en géologie schisto-gréseuse et micaschistes (géologie non majoritaire sur ce bassin plutôt granitique). Ces points sont des puits constituant des captages d'eau potable situés dans des environnements protégés. Les concentrations en nitrates sont variables entre les points (de 20 à 65 mg/l). La

[1] Un qualitomètre est une station de mesure de la qualité des eaux souterraines.

tendance qui semble se dégager est une dégradation de la qualité des eaux souterraines entre 1991 et 2000 (+1.7 mg/l/an), puis les concentrations se stabilisent ensuite jusqu'en 2007.

Les 8 qualitomètres utilisés sur le bassin du Bizien sont tous des forages de 60 à 102 m de profondeur (cf. planche 37). Ils se répartissent sur deux secteurs : au Centre du bassin, les 4 forages ont des eaux souterraines dénitrifiées (teneur en nitrates maximum de 6 mg/l), et au Nord-Ouest, les concentrations sont mesurées entre 19 et 85 mg/l. Entre 1993 et 2007, les 4 qualitomètres non dénitrifiés montrent tous une tendance à la dégradation (+1.6 mg/l/an).

Sur le bassin de l'Horn (cf. planche 38), 6 qualitomètres ont été recensés : 1 source et 5 puits de 7 à 10 m de profondeur. La source, située juste à côté du bassin versant, montre des teneurs en nitrates très élevées entre 114 et 144 mg/l, qui ont cependant tendance à diminuer entre 1998 et 2006 (-2.3 mg/l/an). Cette source capte l'aquifère des altérites (cf. planche 23). Les puits, localisés au Sud du bassin, ont des teneurs très semblables et assez stables autour de 60 mg/l. Sur ces points, l'évolution des concentrations montre une légère amélioration (-0.3 mg/l/an).

5 qualitomètres sont recensés autour du bassin de l'Urne (cf. planche 39) : ils sont situés à l'amont et à l'aval du bassin, en géologie schisto-gréseuse et gabbros (géologie non majoritaire sur ce bassin plutôt granitique). Ces points (1 puits et 4 forages) sont semblent être situés dans des environnements soit protégés (15 à 40 mg/l de nitrates) soit dénitrifiés (forages 02792X0043 et 58). Le puits situé dans le bassin versant capte à la fois l'aquifère des altérites (cf. planche 24) et celui de l'horizon fissuré (mélange d'eaux polluée et dénitrifiée). Il montre, tout comme les forages, que la qualité des eaux souterraines s'est dégradée entre 1991 et 2000 (+1.3 mg/l/an), puis stabilisée entre 2001 et 2007. Les forages « Stalaven » et 02792X0044 montrent quant à eux une amélioration des teneurs (-0.8 mg/l/an).

Les 9 qualitomètres présents aux alentours du bassin de l'Aber Wrac'h sont implantés dans les 3 formations géologiques principales du secteur (cf. planche 40) : 2 puits dans le granite de Kersaint, 1 source dans le granite de Kernilis, et 6 puits dans les gneiss de Lesneven. La source est le point le plus chargé en nitrates malgré une amélioration régulière entre 1998 et 2007 puisque les concentrations descendent de 119 à 77 mg/l (-5.4 mg/l/an). Les autres points ont des teneurs très semblables évoluant entre environ 80 et 60 mg/l entre 1998 et 2007 (-2.9 mg/l/an). A noter au niveau du puits 02391X0021 une baisse des teneurs d'environ 60 à 7 mg/l en octobre 2001 et 2005. Ceci peut être lié à des réactions chimiques à proximité d'une zone humide.

Sur le bassin du Guindy (cf. planche 41), 9 qualitomètres ont été recensés : 4 forages et 5 puits. Le puits 02033X0032, situé dans la formation géologique principale du bassin (granites de Bégard), a une teneur en nitrates nulle. Le doublet puits/forage situé au Sud du bassin est intéressant puisque le puits 02414X0024 a des teneurs moyennes (24-41 mg/l) tandis que le forage 02414X0027 a des eaux dénitrifiées (0-22 mg/l). Le puits 02033X0033 est le point le plus chargé en nitrates, les teneurs augmentent entre 1991 et 2000 (+2.2 mg/l/an), puis se stabilisent de 2001 à 2007. La tendance est identique pour les 3 forages au Nord du bassin (02033X0017, 22 et

« l'Hôpital ») : +2.4 mg/l/an entre 1994 et 2000, puis stable de 2001 à 2007. Les 2 forages du lieu-dit « Kernevez » montrent quant à eux une amélioration des teneurs en nitrates entre 1991 et 2005 (-0.6 mg/l/an).

Les 8 qualitomètres présents aux alentours du bassin de l'Ic sont implantés dans les formations géologiques principales du secteur (cf. planche 42). Ces points (3 puits et 5 forages) ont des teneurs en nitrates très différentes : allant du puits de « La Fontaine accent » présentant les teneurs les plus élevées en régulière dégradation entre 1991 et 2000 (+7.8 mg/l/an), aux forages « Grand Lejon » et du « Camping du Minihy » qui sont dénitrifiés. Les 3 forages situés au Sud du bassin ont également des teneurs différentes entre 20 et 70 mg/l. Ils montrent une tendance à la dégradation entre 1995 et 2000 (+1.8 mg/l/an) puis une relative stabilisation entre 2001 et 2007 (+0.6 mg/l/an). Les puits 02048X0045 et 53 au Nord du bassin sont dans la même tendance entre 1991 et 2000 (+2.7 mg/l/an), et entre 2001 et 2007 (+0.8 mg/l/an).

Les 11 qualitomètres du bassin de l'Arguenon sont 8 puits et 3 forages (cf. planche 43). Les 3 forages sont situés dans le même lieu-dit au Nord du bassin versant au niveau d'un captage qui comporte également un puits. Ces 4 points présentent des teneurs en nitrates très différentes : le forage le plus profond capte une eau souterraine dénitrifiée (« le Pas d'Ereuc » 110 m), le puits à les teneurs les plus élevées (augmentation de 31 à 101 mg/l entre 1993 et 2006), et les 2 forages restants ont des concentrations similaires de 2 à 85 mg/l. La dégradation moyenne de ces 4 qualitomètres entre 1992 et 2006 est estimée à +4.6 mg/l/an. Au Sud-Est du bassin, 2 puits sont implantés dans les schistes Briovérien (02808X0017 et 18). Ils ont des teneurs en augmentation régulière entre 1991 et 2007 (+0.9 mg/l/an entre 1991 et 2000, puis +0.2 mg/l/an entre 2001 et 2007). Le puits 02444X0065 situé au Nord du bassin suit la même évolution. 4 puits, localisés au Sud et au Sud-Ouest du bassin, ont des évolutions très variables : le puits 02805X0055 a des teneurs stables (environ 20 mg/l), le puits 02806X0026 montre des teneurs en augmentation entre 2003 et 2007 (+2.0 mg/l/an), le puits 02798X0057 subit lui aussi une dégradation (+0.9 mg/l/an entre 1997 et 2007), tandis que le puits 02807X0011 est le seul point du bassin où la qualité des eaux souterraines s'améliore entre 1991 et 2007 (-1.8 mg/l/an).

La synthèse des informations disponibles ci-dessus sur le bassin de l'Arguenon montre que la tendance globale d'évolution des concentrations en nitrates des eaux souterraines est à l'augmentation de +1.2 mg/l/an entre 1991 et 2007.

<u>Synthèse sur l'évolution des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines des bassins étudiés</u>

Beaucoup de bassins présentent des indices d'eau souterraine dénitrifée. De façon générale, on note une hausse des concentrations entre 1990 et 2000, puis une relative stabilisation entre 2001 et 2007. Depuis 2001, les bassins peuvent être classés en trois catégories :

- tendance à l'amélioration des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines : bassins de l'Aber Wrac'h, de l'Horn et de l'Urne (respectivement -2.9, -2.3 et -0.8 mg/l/an) ;

- tendance à la dégradation : bassins des Echelles, du Bizien, de l'Arguenon et de l'Ic (respectivement +1.6, +1.6, +1.2 et +0.7 mg/l/an) ;
- tendance à la stabilisation : bassins du Gouessant et du Guindy.

2.3.2. Recensement et prélèvement des points d'eaux souterraines

Objectif

L'objectif de cette phase du projet était de réaliser une centaine de prélèvements d'eaux souterraines en période de basses eaux en été 2007 sur les 9 bassins en contentieux.

C'est durant cette période que la participation des eaux souterraines aux débits des rivières est la plus élevée entraînant dans certains cours d'eau un dépassement du seuil de 50 mg/l d'azote nitrique (Guindy à Plouguiel, Ic à Binic et Bizien à Hengoat) et dans d'autres un passage en-dessous du seuil (Gouessant à Saint Trimoël et Arguenon à Pleven). Dans les autres bassins, cette situation n'est pas aussi nette.

Le cahier des charges de l'étude proposait de fixer le nombre de prélèvements en fonction de la superficie du bassin. En se fixant 1 point pour 7-8 km², 104 points d'eau souterraine pourraient faire l'objet de prélèvements, allant de 3 sur le bassin du Gouessant (21 km²) à 49 sur l'Arguenon (388 km²).

Le cahier des charges prévoyait aussi de mesurer dans les échantillons prélevés les éléments chimiques suivants : NO_3^-, NO_2^-, NH_4^+, ainsi que SO_4^{--} et Fe^{++}. En effet, ces éléments sont des indicateurs de dénitrification utilisant la pyrite (FeS_2) présente naturellement dans certaines roches :

$$5FeS_2 + 14NO_3^- + 4H^+ \leftrightarrow 7N_2 + 10\ SO_4^{2-} + 5Fe^{2+} + 2H_2O$$

Recensement des points d'eaux souterraines

Le travail a débuté par un recensement de points potentiels de prélèvement (puits, forages, piézomètres…) situés en zone agricole sur des pentes ou des plateaux, en dehors des zones de bas fonds qui peuvent être le lieu de réactions de dénitrification liées aux zones humides. Ce recensement s'est appuyé sur la Banque de données du Sous-Sol du BRGM (BSS) qui rassemble les informations des forages et puits dépassant 10 m de profondeur (déclaration au titre du code minier).

Sur un même bassin, les points ont été dispersés sur toute la superficie du bassin versant en renseignant chaque formation géologique (cf. illustration 28, la légende des formations est la même que sur l'illustration 7, chaque point est caractérisé par la commune, le lieu-dit et la date de prélèvement). Sur les plus grands bassins, des doublets puits-forage ont été recherchés de façon à analyser la qualité chimique des eaux souterraines provenant des altérites et celles venant de l'horizon fissuré (cf. un exemple sur l'illustration 28 au Nord-Ouest du bassin).

La campagne sur le terrain s'est déroulée du 18 juin au 5 juillet 2007, afin de repérer précisément les points (positionnement, accessibilité, abandon, changement de propriétaire), mesurer éventuellement des niveaux piézométriques, examiner la possibilité de prélever (pompe en place, traitement par chloration, ouvrage rebouché) et bien sûr obtenir l'accord des propriétaires.

Prélèvement des points d'eaux souterraines

Suite à cette première campagne, la seconde consacrée aux prélèvements d'eaux souterraines s'est échelonnée du 12 juillet au 17 août 2007. Pour les prélèvements, deux solutions ont été utilisées :

- utiliser la pompe en place du propriétaire (eau régulièrement renouvelée),
- ou prélever avec une pompe de surface et un groupe électrogène (les ouvrages non exploités sont vidangés plusieurs fois avant prélèvements).

Les échantillons prélevés (flacons de 50 et 100 ml par point) ont été envoyés chaque fin de semaine au laboratoire du BRGM (accrédité COFRAC) situé à Orléans. Les éléments chimiques à analyser sont les cations et les anions majeurs suivants : CO_3^{2-}, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, NO_2^-, F^-, PO_4^{2-}; Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, NH_4^+, SiO_2, et Fe.

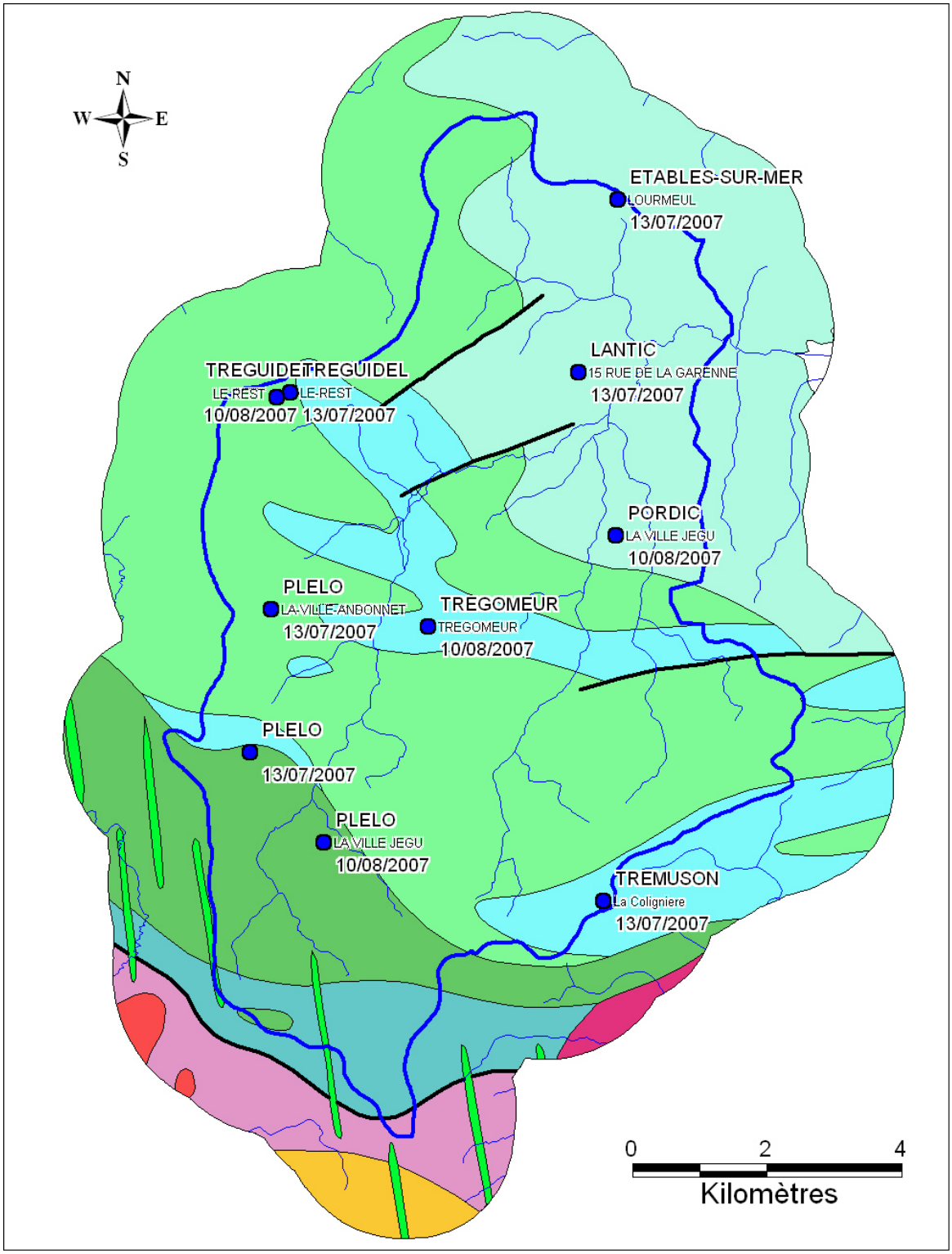


Illustration 28 - Localisation des 10 points prélevés sur le bassin versant de l'Ic

Protocoles analytiques

Les eaux prélevées sont filtrées à 0,45 μm. Le dosage des cations se fait après acidification à l'acide nitrique quasi-pur.

Le dosage des carbonates et bicarbonates a été effectué par méthode potentiométrique selon la norme NF EN ISO 9963-1 de février 1996.

Le dosage des chlorures, fluorures, nitrates et sulfates a été réalisé par chromatographie ionique (DIONEX) selon la norme NF EN ISO 10304-1 (Juin 1995) pour les eaux faiblement contaminées, par évaluation des aires des pics.

Le dosage de l'ion ammonium s'est fait par analyse en flux et détection spectrométrique selon la norme NF EN ISO 11732.

Les orthophosphates ont été analysés selon le chapitre 4 de la norme NF EN ISO 6878 : méthode spectrométrique au molybdate d'ammonium.

Les nitrites ont été dosés par spectrométrie d'adsorption moléculaire selon la norme NF EN 26777.

Les analyses des éléments suivants ont été effectuées par ICP sur un spectre d'émission selon la norme NF EN ISO 11885 de mars 1998 : calcium, magnésium, sodium, potassium, fer, silice.

2.3.3. Résultats de la campagne réalisée

Au total, 100 points d'eau souterraine ont été prélevés (cf. illustration 29). Par rapport à l'objectif initial, 4 points n'ont pas pu être prélevés en raison : du climat politique tendu sur les bassins en contentieux, de refus de propriétaires, et d'absences de certains propriétaires durant l'été. Comme ces points sont situés sur les deux plus grands bassins, ce manque ne sera pas dommageable (1 point en moins sur le Guindy et 3 en moins sur l'Arguenon).

Département	Bassin versant	Prise d'eau	Sup. (km²)	pts de prélèvement
35	Echelles	Montour	10	0
22	Gouessant	St-Trimoël	21	3
22	Bizien	Hengoat	27	3
29	Horn	Plouenan	44	6
22	Urne	Trégueux	48	6
22	Ic	Binic	81	10
29	Aber Wrac'h	Kernilis	98	12
22	Guindy	Plouguiel	122	14
22	Arguenon	Pleven	388	46
				100

Illustration 29 - Répartition des points de prélèvement sur les bassins étudiés

Dans le cadre de l'étude spécifique menée sur le bassin des Echelles, parmi les 43 points de prélèvement visités du 24 au 31 juillet 2007, 29 concernent l'eau souterraine (8 forages et 21 puits). Ce bassin n'a donc pas fait l'objet de prélèvements dans le cadre de la présente étude globale, mais les résultats obtenus en juillet 2007 seront utilisés.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans l'illustration 30 (deux pages suivantes).

Comme convenu avec les propriétaires lors de la campagne de recensement et avec l'accord de la MIRE, les résultats des analyses de leur point d'eau, leur ont été envoyés par courrier en date du 2 octobre 2007.

BV		Ca (Calcium)	Cl (Chlorures)	F (Fluorures)	Fe (Fer)	K (Potassium)	Mg (Magnésium)	NH4 (Ammonium exprimé en NH4)	NO2 (Nitrites exprimés en NO2)	NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	Na (Sodium)	PO4 (Ortho-Phosphates en PO4)	SO4 (Sulfates)	SiO2 (Silice)	CO3 (Carbonates)	HCO3 (Bicarbonates)
	Limite de quantification	**0.5**	**0.5**	**0.1**	**0.02**	**0.5**	**0.5**	**0.1**	**0.01/4/5**	**0.5**	**0.5**	**0.1**	**0.5**	**0.5**	**5**	**5**
		mg/l	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**
Gouessant	02801X0045 F 12/07/07	17.4	35.8	0.5	1.73	5.8	10.1	< 0.1	< 0.01	< 0.5	34.9	< 0.1	43.2	49.2	< 5	81
Gouessant	02794X0044 F 12/07/07	31.9	47.3	0.1	< 0.02	3.6	14.3	< 0.1	< 0.01	35.6	34.4	< 0.1	50.2	40	< 5	81
Gouessant	02798X0054 P1 10/08/07	10.1	23.9	< 0.1	< 0.02	0.8	6	< 0.1	< 0.01	39.6	16.5	< 0.1	3.3	22	< 5	28
Bizien	02041X0072 F 16/08/07	27.1	53.8	0.1	0.17	3.5	9.8	< 0.1	0.02	2.1	35.6	< 0.1	39.7	32.7	< 5	92
Bizien	02041X0067 F 16/08/07	52.8	52.8	0.1	0.24	1.5	10.2	< 0.1	< 0.01	29.8	29.4	< 0.1	59.8	22.9	< 5	111
Bizien	02041X0075 F 16/08/07	50.8	37.6	< 0.1	< 0.02	1	9.2	< 0.1	< 0.01	27.3	27.4	< 0.1	38.1	19.1	< 5	134
Horn	02394X0006-F22-3/08/07	25	33	< 0.1	< 0.02	5.5	16.7	< 0.1	0.65	129.3	29.6	< 0.1	30.5	15.9	< 5	40
Horn	02394X0027-F1-3/08/07	21.9	34	< 0.1	< 0.02	2.7	14.1	< 0.1	< 0.01	114.1	26.6	< 0.1	26	18.2	< 5	22
Horn	02394X0004-F-3/08/07	18.3	31.2	< 0.1	< 0.02	3.7	15.5	< 0.1	< 0.01	105.1	26	< 0.1	37.5	19.4	< 5	21
Horn	02394X0025-F-3/08/07	25.7	28.8	< 0.1	0.02	4	17.5	< 0.1	< 0.01	97.6	30.9	< 0.1	62.6	22.2	< 5	34
Horn	02394X0029 F1 17/08/07	22.9	30.8	< 0.1	0.37	2.6	11.5	< 0.1	< 0.01	68.6	21.8	< 0.1	35.3	20.7	< 5	34
Horn	02018X0075 F1 17/08/07	21.1	36.8	0.2	1.2	3.6	16.9	< 0.1	0.03	2.1	27.7	< 0.1	61.4	29	< 5	91
Urne	02436X0072 F 12/07/07	10.2	23.2	0.2	0.49	3.1	11.5	< 0.1	< 0.01	0.7	21.3	< 0.1	13.3	37.6	< 5	129
Urne	02436X0059 F 12/07/07	10.6	24.7	0.2	0.19	3.5	8.3	< 0.1	< 0.01	1.2	20.9	< 0.1	18.3	51.7	< 5	64
Urne	02791X0124 F 12/07/07	9	20.5	0.1	1.46	3.1	6.8	< 0.1	< 0.01	10.4	20.8	0.4	29.9	42	< 5	32
Urne	02792X0068 F 12/07/07	20	34.1	< 0.1	< 0.02	3.4	8.2	< 0.1	< 0.01	109.3	29.3	< 0.1	2.1	28.4	< 5	21
Urne	02792X0059 P1 09/08/07	7.4	25.7	< 0.1	0.02	2.2	5.6	0.4	< 0.01	32.8	13.4	< 0.1	4.3	12.4	< 5	16
Urne	02436X0089 F1 17/08/07	15.7	24.3	0.1	< 0.02	2.6	8.5	< 0.1	< 0.01	< 0.5	19	< 0.1	18	47.2	< 5	90
Ic	02431X0144 F 13/07/07	33.2	67.2	< 0.1	0.06	2.6	16	< 0.1	0.04	159.7	45.6	< 0.1	6.3	25.2	< 5	43
Ic	02424X0022 F 13/07/07	31.2	33.2	0.2	0.15	1.5	13.4	< 0.1	< 0.01	< 0.5	26.3	< 0.1	22.3	38.7	< 5	137
Ic	02424X0044 F 13/07/07	28	88.5	< 0.1	0.03	5	16.9	< 0.1	< 0.01	8.4	39.6	< 0.1	14.4	39.5	< 5	100
Ic	02424X0040 F 13/07/07	21.5	43.6	< 0.1	< 0.02	1.6	8.8	< 0.1	< 0.01	69.5	31.7	< 0.1	7.8	29.5	< 5	56
Ic	02431X0103 F 13/07/07	32.6	69.7	0.1	< 0.02	2.6	16.3	< 0.1	0.02	50.2	54.8	< 0.1	36.3	31.7	< 5	117
Ic	02055X0019 F29 13/07/07	29.8	54.8	0.2	< 0.02	2.8	13.1	< 0.1	0.04	35.4	46	0.4	54.9	19.4	< 5	84
Ic	02424X0040 P 10/08/07	15.7	11.2	< 0.1	< 0.02	3.4	7.3	< 0.1	0.01	9	27.2	< 0.1	19.1	13.6	< 5	107
Ic	02424X0054 F1 10/08/07	26.1	34.5	0.1	< 0.02	1	10.2	< 0.1	< 0.01	82.7	28.9	< 0.1	25.2	26.1	< 5	46
Ic	02424X0036 P1 10/08/07	33.9	51.1	< 0.1	< 0.02	2.3	13.4	< 0.1	0.01	72.6	34.4	< 0.1	34.6	27.4	< 5	73
Ic	02431X0053 F 10/08/07	53.4	68.3	< 0.1	< 0.02	3.6	30.2	< 0.1	< 0.01	65	58.2	< 0.1	81.2	23	< 5	212
Aber Wrac'h	02384X0079-F2-1/08/07	208.3	824	0.5	1.86	14.1	55.3	0.2	< 0.01	< 0.5	312.8	< 0.1	273.4	25.6	< 5	78
Aber Wrac'h	F4-1/08/07	29.7	94.7	0.1	6.26	4.1	16.4	< 0.1	< 0.05	< 0.5	48.6	< 0.1	90.5	32.6	< 5	63
Aber Wrac'h	02384X0108-F1-1/08/07	23.8	64.7	0.2	2.47	4.1	14.1	< 0.1	0.12	3.6	52.9	< 0.1	110.1	31.4	< 5	49
Aber Wrac'h	02395X0071-F-2/08/07	15.2	27.2	0.1	0.49	10.9	5.9	< 0.1	0.15	42.9	19.3	< 0.1	39.6	11.4	< 5	34
Aber Wrac'h	02395X0057-F1-2/08/07	21.8	24.3	< 0.1	0.43	1.2	8.5	< 0.1	< 0.01	23.9	19.8	0.3	52.6	11.9	< 5	32
Aber Wrac'h	02395X0054-F1-2/08/07	26.5	37.1	< 0.1	0.04	6.3	9.7	< 0.1	< 0.01	120.5	24.3	< 0.1	29	13.5	< 5	< 5
Aber Wrac'h	02383X0091-F1-2/08/07	19.7	51.2	0.1	< 0.02	1.6	15.4	< 0.1	< 0.01	80.3	29.9	< 0.1	41.4	17.3	< 5	15
Aber Wrac'h	02384X0013-F143-2/08/07	69.1	39.1	< 0.1	< 0.02	2.9	17.8	0.2	< 0.01	84.6	30.2	0.1	34.5	17.4	< 5	199
Aber Wrac'h	02384X0007-F-2/08/07	15.9	52.6	< 0.1	< 0.02	6.4	14.7	< 0.1	< 0.01	118.1	37	0.1	18.5	19.2	< 5	18
Aber Wrac'h	02384X0153-F-2/08/07	29.3	47	< 0.1	< 0.02	15.6	10	< 0.1	0.03	96.3	27.9	< 0.1	43.7	12.3	< 5	24
Aber Wrac'h	02391X0006-F259-3/08/07	21	29.3	< 0.1	0.04	3.7	12.5	< 0.1	< 0.01	121.8	31.6	< 0.1	25.7	21.3	< 5	21
Aber Wrac'h	02388X0019-F361-3/08/07	15.9	29.9	< 0.1	< 0.02	2.2	13.8	< 0.1	0.06	80.9	23.2	< 0.1	27.1	18	< 5	16

BV		Ca (Calcium)	Cl (Chlorures)	F (Fluorures)	Fe (Fer)	K (Potassium)	Mg (Magnésium)	NH4 (Ammonium exprimé en NH4)	NO2 (Nitrites exprimés en NO2)	NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	Na (Sodium)	PO4 (Ortho-Phosphates en PO4)	SO4 (Sulfates)	SiO2 (Silice)	CO3 (Carbonates)	HCO3 (Bicarbonates)
	Limite de quantification	**0.5**	**0.5**	**0.1**	**0.02**	**0.5**	**0.5**	**0.1**	**0.01/4/5**	**0.5**	**0.5**	**0.1**	**0.5**	**0.5**	**5**	**5**
		mg/l	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**
Guindy	02037X0043 F 13/08/07	24.3	34.6	< 0.1	0.67	5	12.5	< 0.1	< 0.01	2.2	26	< 0.1	96	36.3	< 5	34
Guindy	02037X0045 F 13/08/07	24.7	57.6	< 0.1	< 0.02	4.2	11.3	< 0.1	0.61	50.8	35.9	< 0.1	34.9	27.5	< 5	48
Guindy	02037X0032 Puits 13/08/07	18.8	46.9	< 0.1	< 0.02	3.4	13.7	< 0.1	< 0.01	80.8	26.6	< 0.1	26.9	20.1	< 5	17
Guindy	02037X0031 Puits 13/08/07	29.8	27.3	< 0.1	< 0.02	3.2	12.1	< 0.1	0.02	69.2	20.5	< 0.1	33.9	16.6	< 5	59
Guindy	02037X0048 F1 13/08/07	28.2	32.1	0.1	0.82	4.2	12.5	< 0.1	< 0.01	< 0.5	27.4	< 0.1	97.9	32.9	< 5	56
Guindy	02033X0041 F 14/08/07	26.3	42.3	0.1	0.36	3.6	14.5	< 0.1	0.01	6.3	28.8	< 0.1	52.2	25.8	< 5	95
Guindy	02033X0047 F1 14/08/07	30.8	48.1	< 0.1	< 0.02	2	9.8	< 0.1	< 0.01	66.7	36.9	< 0.1	47.6	21.1	< 5	49
Guindy	02034X0025 F 14/08/07	38.3	42.2	< 0.1	< 0.02	3.6	14.9	< 0.1	< 0.01	173.2	41.6	0.1	37.5	22.5	< 5	43
Guindy	02034X0017 P 14/08/07	37.1	31.5	0.1	0.12	7.6	14.7	< 0.1	0.09	76.6	20.3	0.8	20.3	12.8	< 5	99
Guindy	02033X0029 F 14/08/07	56	50.4	< 0.1	< 0.02	3.5	15.3	< 0.1	0.01	11.5	28.8	< 0.1	74.9	18.8	< 5	138
Guindy	02038X0008 F3 14/08/07	22.2	43.4	< 0.1	< 0.02	8	15.5	< 0.1	0.02	74.9	24.7	0.1	49.1	18.9	< 5	26
Guindy	Puits Le Guido 16/08/07	57.6	85.3	0.1	< 0.02	6.3	16.5	< 0.1	0.03	15.4	51.1	0.3	37.5	22	< 5	204
Guindy	01708X0040 F1 16/08/07	26.3	55	< 0.1	0.03	1.4	8.7	< 0.1	0.02	80.8	42.4	< 0.1	36.2	27.5	< 5	34
Guindy	02034X0075 F 17/08/07	32.8	62.3	< 0.1	< 0.02	2	7.3	< 0.1	< 0.01	103.4	44.6	0.2	17.6	29.4	< 5	44
Arguenon	02807X0014 F 16/07/07	7.1	23.2	0.2	6.41	2.5	10.1	0.1	< 0.05	0.6	14.9	< 0.1	11.8	24.6	< 5	64
Arguenon	02804X0030 F 16/07/07	11.3	22	0.2	1.76	2.4	9.9	< 0.1	0.02	1.3	17.2	< 0.1	24.7	27.4	< 5	62
Arguenon	02804X0032 F 16/07/07	8.6	21.7	0.2	6.61	3.3	7.7	0.1	< 0.04	< 0.5	20	< 0.1	9.7	48	< 5	68
Arguenon	02804X0039 F 16/07/07	8.6	22.8	0.1	0.04	1.9	3.5	< 0.1	< 0.01	9.7	28	0.2	27.9	38.7	< 5	32
Arguenon	02803X0040 F 16/07/07	25.9	41.7	0.4	2.62	2	7.6	< 0.1	< 0.01	< 0.5	35.7	< 0.1	23.1	47.5	< 5	111
Arguenon	02802X0031 F 16/07/07	64.6	54	0.2	< 0.02	0.9	24.2	< 0.1	< 0.01	142.8	47.4	< 0.1	37.7	33.3	< 5	170
Arguenon	02802X0025 F 17/07/07	28.5	62.7	0.3	0.2	6	16.4	< 0.1	0.04	35	33.8	< 0.1	29	33.1	< 5	91
Arguenon	02802X0036 F 17/07/07	15.2	43.1	0.2	0.06	2.5	12.1	< 0.1	< 0.01	< 0.5	32.6	< 0.1	29.5	40.7	< 5	85
Arguenon	02802X0047 F 17/07/07	8.8	49.9	0.3	0.09	2.1	15.2	< 0.1	< 0.01	< 0.5	34	< 0.1	24.6	40.8	< 5	76
Arguenon	02802X0043 F 17/07/07	12.4	24.8	0.3	0.71	1.2	11.2	< 0.1	< 0.01	< 0.5	12.6	< 0.1	28.6	21	< 5	50
Arguenon	02803X0020 F 17/07/07	16.7	54.8	0.2	< 0.02	8.5	15.2	< 0.1	< 0.01	13.9	29.6	< 0.1	44.9	22.4	< 5	57
Arguenon	02803X0055 F 17/07/07	11.8	32.7	0.1	0.04	1.9	12	< 0.1	< 0.01	< 0.5	21.9	< 0.1	22.7	20.2	< 5	71
Arguenon	02803X0034 P1 17/07/07	16.6	56.1	< 0.1	0.13	5.2	17.6	< 0.1	< 0.01	73.2	29.4	< 0.1	13.3	13.0	< 5	48
Arguenon	02801X0008 F8 18/07/07	38.4	47.1	< 0.1	0.03	3	9.6	< 0.1	< 0.01	118.1	45.1	< 0.1	44.5	41.9	< 5	44
Arguenon	02801X0004 F297 18/07/07	30.9	35.3	< 0.1	< 0.02	2	9.2	< 0.1	< 0.01	129.9	29.2	< 0.1	16.5	31.9	< 5	18
Arguenon	02447X0082 F 18/07/07	26.1	54.1	0.1	2.53	4.8	15.6	< 0.1	< 0.01	< 0.5	36.6	< 0.1	51.4	46.9	< 5	107
Arguenon	02802X0013 F 18/07/07	8.3	39.5	0.2	0.64	1.1	9.4	< 0.1	< 0.01	1.2	21.3	< 0.1	11	33.8	< 5	47
Arguenon	02803X0009 FC9 18/07/07	13.9	37.7	0.2	1.23	1.9	9.6	< 0.1	< 0.01	11.6	32.9	0.4	24.9	43.6	< 5	68
Arguenon	02805X0074 F 18/07/07	8.7	12	1.2	0.03	1.7	3.5	< 0.1	< 0.01	< 0.5	14.5	< 0.1	20.9	36.3	< 5	33
Arguenon	02805X0035 P new 18/07/07	14.2	35.7	< 0.1	< 0.02	3.6	8.5	< 0.1	< 0.01	39.7	21.6	< 0.1	25.4	19.4	< 5	23
Arguenon	02448X0065 F 06/08/07	12.1	30.2	< 0.1	< 0.02	1.6	3.2	< 0.1	0.01	29.7	29.7	0.2	21.1	44.3	< 5	33
Arguenon	02804X0025 FA26 06/08/07	39.8	39.9	0.1	< 0.02	7.6	11.9	< 0.1	< 0.01	43.1	26.2	< 0.1	80	20.7	< 5	89
Arguenon	02804X0033 P 06/08/07	13.4	40.8	< 0.1	< 0.02	2.3	4.9	< 0.1	0.05	44.4	28.6	< 0.1	7.7	36.2	< 5	28
Arguenon	02447X0047 P 06/08/07	12.4	20.2	< 0.1	0.03	81.7	5.7	< 0.1	0.05	29	16.6	2.8	32.8	13.9	< 5	129
Arguenon	02447X0049 P 06/08/07	20.4	22	< 0.1	< 0.02	17	10.4	< 0.1	0.04	100.6	19.6	0.4	26.2	17	< 5	24
Arguenon	02447X0011 F215 06/08/07	31	76.8	< 0.1	0.03	22.7	15	< 0.1	< 0.01	1.6	35.2	< 0.1	98.3	30.1	< 5	53
Arguenon	02802X0018 F 07/08/07	16.6	41.9	0.2	3.98	3.3	12.5	< 0.1	< 0.01	< 0.5	23.6	< 0.1	44	31.1	< 5	60
Arguenon	02801X0054 F 07/08/07	24.7	45.6	0.2	0.05	3.2	11.7	< 0.1	< 0.01	22.3	26.2	< 0.1	45.8	30.3	< 5	66
Arguenon	02802X0022 F 07/08/07	14.4	42	0.2	5.76	2.1	14.7	< 0.1	< 0.01	< 0.5	23.5	< 0.1	29.4	38.7	< 5	79
Arguenon	02802X0040 F 07/08/07	13.4	32.7	0.2	0.19	2	10.1	< 0.1	< 0.01	0.6	36.7	< 0.1	18.7	39.5	< 5	114
Arguenon	02806X0019 P1 07/08/07	8.1	29.7	< 0.1	< 0.02	4.1	5.7	< 0.1	< 0.01	38.1	18	< 0.1	6.3	12.9	< 5	16
Arguenon	02806X0023 F 07/08/07	20.3	33.8	0.1	25.31	2.5	11	< 0.1	< 0.01	< 0.5	19.4	< 0.1	< 0.5	39.7	< 5	109
Arguenon	02447X0073 F 07/08/07	11	48.5	0.1	1.12	2.7	6.4	< 0.1	< 0.01	< 0.5	35.7	< 0.1	7.8	41.9	< 5	67
Arguenon	02803X0007 F299 08/08/07	7.3	30.7	0.3	4.08	2	14	< 0.1	0.01	< 0.5	19.4	< 0.1	13.7	43.7	< 5	80
Arguenon	02807X0012 F 08/08/07	7.3	31.4	< 0.1	44.14	1.5	1.4	5.6	< 0.01	< 0.5	20.7	< 0.1	1.2	22.3	< 5	51
Arguenon	02805X0055 P1 08/08/07	42.1	21.5	< 0.1	< 0.02	1	3.9	< 0.1	< 0.01	17.7	11	< 0.1	12.9	10.8	< 5	113
Arguenon	02803X0027 F 08/08/07	10.7	50.9	0.1	3.67	1.8	11.8	< 0.1	< 0.01	< 0.5	31.4	< 0.1	28.1	42.9	< 5	58
Arguenon	02803X0038 F 08/08/07	13.6	38.2	0.2	0.04	1.7	5.6	< 0.1	0.01	1.3	29.3	0.2	23	46.3	< 5	60
Arguenon	02801X0018 F292 08/08/07	27.4	47.7	0.1	< 0.02	3	10.8	< 0.1	< 0.01	53.5	36.4	< 0.1	54.8	44.2	< 5	48
Arguenon	02446X0029 F 09/08/07	24.5	82.7	0.1	< 0.02	4.1	12.1	< 0.1	< 0.01	40.2	41.3	< 0.1	21.3	43.5	< 5	56
Arguenon	02446X0067 F 09/08/07	15.2	59.6	< 0.1	< 0.02	3.7	4.4	< 0.1	< 0.01	47.6	54	< 0.1	19.9	38	< 5	56
Arguenon	02446X0033 puits 09/08/07	29.4	42.3	< 0.1	0.02	5.3	14.4	< 0.1	< 0.01	151.1	32.3	< 0.1	20.3	26.9	< 5	20
Arguenon	02446X0025 F 09/08/07	18.2	38	0.2	5.37	4.1	11.5	< 0.1	0.03	2.1	27.1	< 0.1	37	47.6	< 5	82
Arguenon	02805X0037 F289 09/08/07	7.4	20.2	0.1	0.21	1.9	6.8	< 0.1	< 0.01	2.6	14.4	< 0.1	10.8	23	< 5	49
Arguenon	02807X0011 P1 10/08/07	15.6	43.1	< 0.1	< 0.02	5.9	11.4	< 0.1	< 0.01	56.1	19.3	< 0.1	13.8	12.5	< 5	26
Arguenon	02802X0039 F 13/08/07	15.5	44.8	0.1	0.03	2.2	13.4	< 0.1	0.11	1.9	28.8	< 0.1	44.4	29.3	< 5	64

Illustration 30 - Résultats des analyses des 100 points d'eaux souterraines

Les planches 44-45-46-47-48-49-50-51 en annexe 2 permettent de localiser les points de prélèvement ainsi que les teneurs en nitrates dans les eaux souterraines des 8 bassins prélevés. La légende des formations géologiques est la même que sur les illustrations des chapitres 2.1.2 et 2.1.3, chaque point est caractérisé par son numéro BSS, sa nature (puits ou forage), sa profondeur (en bleu, en haut à gauche du point) et sa teneur en nitrates (en rouge gras, en bas à droite du point).

Au niveau de chacun des 9 bassins étudiés, les teneurs en nitrates minimums, maximums et moyennes ont été calculées, ainsi que le nombre de points prélevés du bassin ayant une teneur supérieure à 50 mg/l (cf. illustration 31).

	Points de prélèvements			Teneur en nitrates (mg/l)			Teneur > 50 mg/l
Bassins versants	Forages	Puits	Total	Minimum	Maximum	Moyenne	Nb pts
Gouessant	2	1	3	< 0.5	39.6	25.1	0.0%
Bizien	3	0	3	2.1	29.8	19.7	0.0%
Horn	6	0	6	2.1	129.3	86.1	83.3%
Urne	5	1	6	< 0.5	109.3	25.7	16.7%
Ic	8	2	10	< 0.5	159.7	55.0	60.0%
Aber Wrac'h	12	0	12	< 0.5	121.8	64.4	58.3%
Guindy	10	4	14	< 0.5	173.2	58.0	64.3%
Arguenon	37	9	46	< 0.5	151.1	27.4	17.4%
Echelles	8	21	29	< 0.5	126.0	50.0	48.3%

Illustration 31 - Synthèse des analyses d'eaux souterraines

Les planches cartographiques, le tableau des résultats d'analyses, et le tableau ci-dessus amènent les conclusions suivantes :

- des phénomènes de dénitrification naturelle utilisant la pyrite sont mis en évidence dans tous les bassins étudiés (cf. teneurs minimums de l'illustration 31 et concentrations observées en nitrates, sulfates et fer de l'illustration 30). La dénitrification entraine des teneurs en nitrates faibles ($NO3 \leq 5$ mg/l), des teneurs en sulfates et en fer fortes ($Fe \geq 0.5$ mg/l et $SO4 \geq 25$ mg/l) ;
- la dénitrification peut être plus ou moins importante en fonction de la formation géologique recoupée (Talbo H. et al, 1993). Par exemple, sur le bassin de l'Arguenon (cf. planche 51), 10 des 15 points implantés dans les schistes Briovérien (67% des points), ont des teneurs en nitrates faibles ou nulles liées à la dénitrification ;
- sur le bassin de l'Arguenon (cf. planche 51), 2 doublets composés d'un puits et d'un forage situés au même endroit ont permis de caractériser une eau souterraine assez polluée contenue dans les altérites et une eau dénitrifiée contenue dans le milieu fissuré :

- o au Centre du bassin, le puits 02803X0034 a une profondeur de 7 m et une teneur en nitrates de 73.2 mg/l, et le forage 02803X0055 a une profondeur de 40 m et une teneur < 0.5 mg/l ;
- o au Nord du bassin, le puits 02446X0033 a une profondeur de 7 m et une teneur de 151.1 mg/l, et le forage 02446X0025 a une profondeur de 81 m et une teneur de 2.1 mg/l ;

- sur les bassins du Guindy et de l'Arguenon, qui offrent le plus grand nombre de points de prélèvements, les teneurs moyennes en nitrates calculées dans les puits (4 sur le Guindy et 9 sur l'Arguenon) sont plus élevées que dans les forages (respectivement 61 et 57 mg/l sur le Guindy, et 61 et 19 mg/l sur l'Arguenon). Ceci peut s'expliquer par le fait que les puits captent les eaux souterraines plus chargées des altérites et les forages celles du milieu fissuré ;
- 4 puits prélevés (puits 02798X0054 sur le Gouessant, 02792X0059 sur l'Urne, 02805X0055 et 02807X0011 sur l'Arguenon) correspondent à des qualitomètres (cf. chapitre 2.3.1). Les analyses d'été 2007 sont semblables à celles effectuées en début d'année 2007 (février-mars) ;
- sur chaque bassin, il y a une bonne corrélation entre la moyenne des teneurs en nitrates des eaux souterraines en été 2007 et celle de la rivière (exemple du bassin de l'Ic : teneur moyenne des 6 prélèvements du 13/07/2007 54 mg/l et dans la rivière le 12/07/2007 teneur=58, 4 prélèvements le 10/08/2007 teneur moyenne=57 et dans la rivière 16/08/2007 teneur=62). Ceci démontre que les points choisis sont pertinents et correctement répartis sur les bassins étudiés ;
- à partir des résultats de l'illustration 31, on classer les bassins en fonction de la dégradation de la qualité de l'eau souterraine selon l'ordre suivant :

+ pollués =====> - pollués

Horn > Aber Wrac'h > Guindy > Ic > Echelles > Arguenon > Urne

2.4. TYPOLOGIE DES BASSINS VERSANTS

Ce paragraphe a pour objectif de faire une synthèse des caractéristiques des 9 bassins étudiés présentées dans toutes les parties du chapitre 2.

Pour chaque bassin, l'illustration 32 rassemble les informations suivantes :

- le contexte géologique principal (issu des cartes à 1/50 000 et 1/250 000) ;
- le débit moyen du quartile supérieur (m3/h) qui est une image de la perméabilité du sous-sol ;
- la densité de couverture des altérites (superficie rapportée à celle du bassin) ;

- l'épaisseur moyenne des altérites en place (en mètres) calculée sur les 5 plus petits bassins ;
- la profondeur moyenne de la surface piézométrique (en mètres) sur les 5 plus petits bassins ;
- la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (5 plus petits bassins) ;
- la participation des eaux souterraines aux débits des rivières, qui est aussi une idée du ratio ruissellement / infiltration ;
- les teneurs moyennes en nitrates des eaux souterraines (mg/l) à l'issue des prélèvements de juillet-août 2007. En raison du faible nombre d'échantillons (3 par bassin), les résultats du Gouessant et du Bizien ne sont pas mentionnés ;
- à partir des informations fournies par les qualitomètres : l'évolution de la qualité des eaux souterraines sur le paramètre nitrates (en mg/l/an) (« + » signifiant une augmentation, et « - » une diminution) ;
- le rapport de la longueur du réseau hydrographique sur le périmètre du bassin. Ce paramètre donne une idée de la densité du réseau : plus celui-ci est élevé plus le bassin est ruisselant, et à l'inverse plus il est faible plus le bassin est infiltrant ;
- les précipitations annuelles moyennes (en mm) issues des cartes de Météo-France sur la période 1971-2000 ;
- l'importance des fortes pentes : rapport entre la superficie des secteurs où les pentes sont élevées et supérieures ou égales à 5 % et la superficie du bassin ;
- et l'Indice moyen de Développement et de Persistance des Réseaux hydrographiques (IDPR), qui est le rapport de la densité des vallées (linéaire de vallées sèches et drainées issues du MNT rapporté à la surface du BV) à la densité de drainage. Cet indice étudie indirectement la capacité d'infiltration des bassins : plus cet indice est fort plus le bassin est « plutôt ruisselant », plus il est faible plus le bassin est « plutôt infiltrant ».

BV en contentieux	Echelles	Gouessant	Bizien	Horn	Urne	Ic	Aber Wrac'h	Guindy	Arguenon
Superficie (km²)	10	21	27	44	48	81	98	122	388
Contexte géologique principal	Granites	Granites et grès	Roches volcaniques et grès	Micaschistes et gneiss	Granites et grès	Roches volcaniques et schistes-grès	Granites et gneiss	Granites et roches volcaniques	Schistes-grès et granites
Débit moyen du quartile supérieur (m3/h)	28.1	15.3	20.2	20.9	15.8	24.6	18	52.9	22.4
Densité de couverture des altérites (% BV)	85.7%	60.7%	80.6%	64.0%	72.1%	51.4%	77.6%	61.1%	38.4%
Epaisseur moyenne des altérites en place (m)	5.7	8.6	9.8	6.4	12.0				
Profondeur moyenne de la surface piézométrique (m)	3.6	2.1	3.0	4.6	3.5				
Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration	Très faible à forte	Très faible à faible	Faible à très faible	Moyenne à très forte	Très faible à moyenne				
Participation des eaux souterraines aux débits des rivières	> 55%	> 58%		61%	58%		< 56.5%	61%	42.5-49%
Teneurs moyennes en NO3 des eaux souterraines (mg/l)	50.0			86.1	25.7	55.0	64.4	58.0	27.4
Evolution de la qualité des eaux souterraines (mg/l/an nitrates) qualitomètres (+ augmentation, - diminution)	1984-2006 : +1.6	91-00 : +1.7 01-07 :stable	93-07 : +1.6	98-06 : -2.3	91-00 : +1.3 01-07 : -0.8	91-00 : +4.1 01-07 : +0.7	98-07 : -2.9	91-00 : +2.3 01-07 :stable	1991-2007 : +1.2
Densité réseau hydro (longueur / périmètre)	0.64	0.81	0.58	1.19	1.17	1.41	1.80	1.47	2.05
Précipitation annuelle moyenne (1971 - 2000) (en mm)	925	848	743	1041	883	700	1098	814	775
Importance des fortes pentes (>=5%)	25.5%	45.6%	18.6%	25.4%	56.3%	30.1%	15.0%	27.0%	37.8%
IDPR moyen	1209	1124	819	1079	1149	998	1230	1078	838

Illustration 32 - Synthèse des caractéristiques des bassins étudiés

Cette caractérisation des bassins étudiés aux plans hydrogéologique et hydrochimique, permet :

- de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique des bassins,
- de les hiérarchiser suivant quelques critères influençant la dynamique de la pollution azotée (perméabilité, partition infiltration/ruissellement, indicateurs de dénitrification, teneurs en nitrates lors de l'été 2007),
- de fournir une assise aux modélisations et aux simulations prévisionnelles et d'aider à leur interprétation.

Par exemple, compte tenu de leurs caractéristiques (cf. illustration 32), on pourrait dire que les bassins du Bizien et de l'Urne ont des comportements opposés :

- le bassin du Bizien parait être influencé par les phénomènes d'infiltration (perméabilité moyenne du sous-sol, forte participation supposée des eaux souterraines au débit de la rivière, peu de fortes pentes, faible densité du réseau hydrographique, IDPR faible),
- tandis que l'Urne semble être contrôlée par les phénomènes de ruissellement (faible perméabilité du sous-sol, très faible capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration, beaucoup de fortes pentes, densité moyenne du réseau hydrographique, IDPR fort).

Ainsi, si ces 2 cours d'eau avaient des teneurs en nitrates similaires au niveau de leurs prises d'eau potable, une diminution de 1/3 des apports azotés à la surface du sol entraînerait un retour à la conformité (teneurs en nitrates < 50 mg/l) plus rapide sur l'Urne que sur le Bizien (vitesse de réaction de l'Urne plus rapide).

3. Méthodologie de modélisation (volet 2)

3.1. TYPE DE MODÉLISATION

La modélisation du transfert des nitrates dans chacun des bassins versants de l'étude est conduite en 2 étapes:

1) simulation des écoulements superficiels et souterrains;

2) simulation du transfert des nitrates en utilisant les résultats de l'étape précédente, c'est à dire les flux d'eau simulés.

Dans les deux cas, la modélisation de chaque bassin utilise une approche "boîte noire", dérivée des techniques de traitement du signal; elle est réalisée avec le code de calcul TEMPO, développé au BRGM et utilisé dans de nombreuses études hydrologiques (citées en références bibliographiques).

Dans une telle approche, le système physique étudié est caractérisé par des "entrées" et des "sorties" mises en relation par des **fonctions de transfert** (ou **réponses impulsionnelles**). Une fonction de transfert, inconnue, est calculée à partir des données disponibles en entrée et en sortie du système (opérations de déconvolution).

- Pour la première étape, l'hydrodynamique, les données nécessaires sont:
  - la pluie et l'ETP, "entrées" du système physique,
  - le débit des cours d'eau, "sorties" du système

Des données piézométriques peuvent être utilisées pour mieux contraindre la modélisation.

- Pour passer à la deuxième étape, le transfert des nitrates, doivent s'ajouter:
  - des données agronomiques (notamment les intrants azotés): elles interviennent comme "entrées" du système
  - les teneurs en nitrates mesurées à l'exutoire des bassins (ce sont les "sorties" du système).

Les fonctions de transfert inconnues sont obtenues par calage sur les "sorties" (débits et teneurs en nitrates aux exutoires des bassins).

Après calage, la simulation de scénarios devient possible.

Modélisations et simulations prévisionnelles ont été effectuées au pas de temps décadaire.

3.2. DONNÉES UTILISÉES

3.2.1. Les données climatologiques

Les données climatologiques ont été obtenues auprès de Météo France pour les stations les plus proches du secteur d'étude, elles comprennent :

- Le cumul décadaire des hauteurs de précipitations,
- les données décadaires d'évapotranspiration potentielle PENMAN,
- la moyenne décadaire des températures moyennes journalières.

Pour l'Horn, les précipitations décadaires ont été obtenues auprès de Météo France aux stations de Sibiril et de Landivisiau de janvier 1990 à août 2007. De l'analyse des isohyètes interannuelles on obtient des coefficients de pondération par surface d'influence pour chaque poste pluviométrique concerné. Ainsi le bassin de l'Horn est en majorité sous l'influence de la station de Sibiril (70%). Cette part correspond à la partie aval du bassin. L'amont du bassin est sous l'influence de la station de Landivisiau (30%).

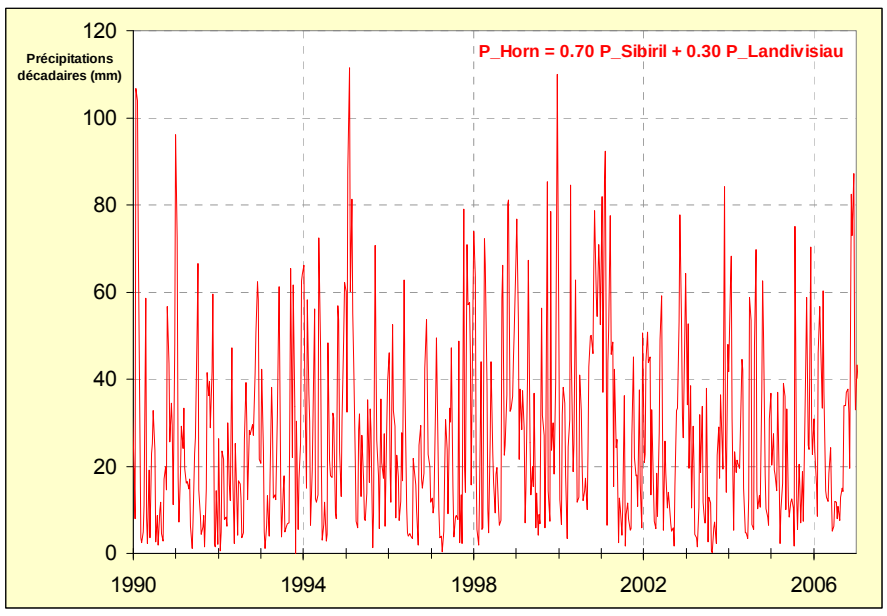


Illustration 33 : Précipitations prises en compte pour la modélisation sur le bassin de l'Horn (influences des stations : Landivisiau 30%, Sibiril 70%).

3.2.2. Les données piézométriques

Jusqu'à un passé récent, il n'existait que très peu de données piézométriques pour le Nord de la Bretagne. Les nouveaux piézomètres, qui ne fonctionnent que depuis quelques années, ne peuvent être utilisés dans le cadre de cette étude car les séries de mesures sont trop courtes et ne couvrent que des années déficitaires (2003-2007).

Seuls trois piézomètres présentent des séries suffisamment longues pour être traitées : les deux premiers sont implantés dans des granites (St-Divy, 02388X0060/F pour l'Aber Wrac'h et Le Foeil F3 pour l'Urne), le troisième dans des micaschistes (Plouvorn, 02394X0019/F pour l'Horn).

3.2.3. Les données hydrométriques

Les chroniques de débits ont été obtenues auprès de la DIREN (via la Banque Hydro). Un facteur d'échelle est appliqué à ce débit de manière à simuler les écoulements au niveau de la station d'alimentation en eau potable (AEP) (rapport des surfaces d'alimentation en amont de la station AEP et de la station hydrométrique).

Le débit du Bizien n'étant pas mesuré, ce bassin versant n'a pas pu être modélisé dans le cadre de cette étude.

Le débit de l'Ic a été reconstitué à partir de données du Conseil Général des Côtes d'Armor (Direction Agriculture et Environnement) et de la DDE (Cellule Qualité des Eaux Littorales). Ces données n'existent que jusqu'à décembre 2006 et il n'y a pas eu possibilité de mises à jour.

3.2.4. Les teneurs en nitrate dans le réseau de surface

Seules les séries de mesures les plus représentatives des AEP sont utilisées.

Pour le bassin des Echelles, les chroniques étant incomplètes et trop courtes (1998-2005 avec une interruption importante en 2001), les teneurs en nitrates n'ont pu être modélisées.

Pour le bassin de l'Horn, les chroniques des AEP ne sont pas non plus complètes. C'est pourquoi il a été nécessaire de reconstituer une chronique à partir de celles de deux stations présentes sur le bassin (illustrations 34 et 35). La station HO8 est située au niveau de la prise d'eau au lieu-dit « Traon Gleuziou ». La station 04174520 est positionnée 3 km en amont au lieu-dit « Kertanguy ».

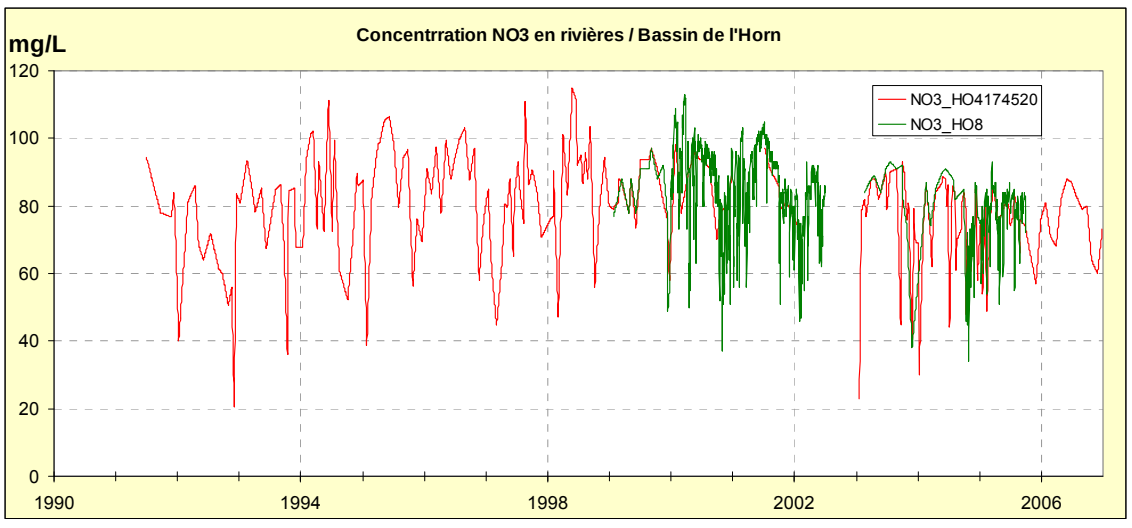


Illustration 34 : Chroniques incomplètes de NO3 au niveau des AEP sur le bassin de l'Horn

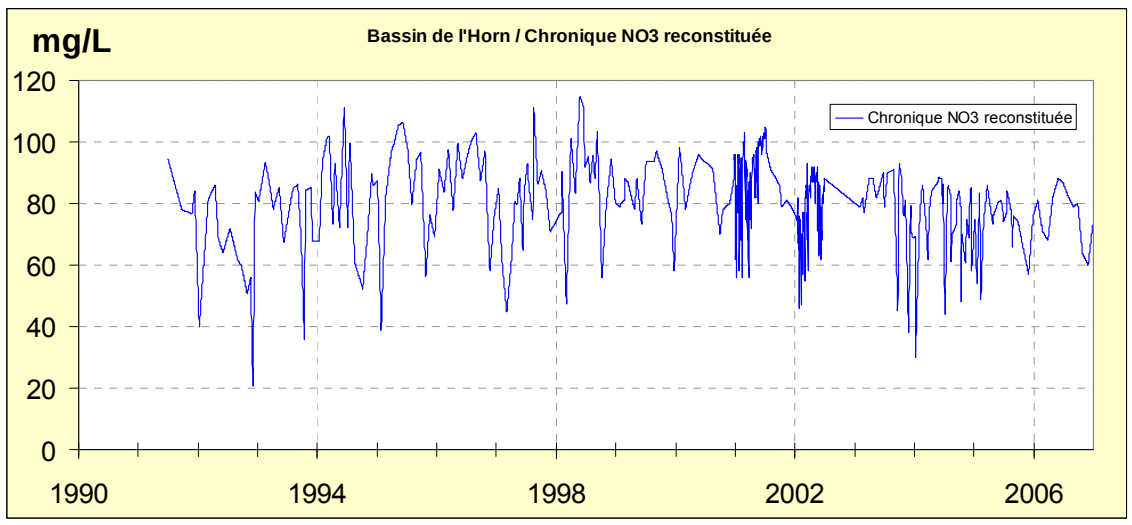


Illustration 35 : Chroniques de nitrates reconstituée sur le bassin de l'Horn

3.2.5. Les données agronomiques

1) Apports azotés

Suite aux différents échanges avec l'INRA et le CEMAGREF, les intrants azotés (minéraux et organiques) introduits dans le modèle sont de 210 kg/ha/an (en azote N). Cette valeur de référence a été appliquée à tous les bassins. Cette dose initiale, issue de la réglementation et des déclarations des exploitants agricoles, n'est connue de fait qu'avec un facteur important d'incertitude. Au 15 octobre 2007, aucune donnée interannuelle fiable n'est disponible.

De plus, l'hypothèse a été faite que cette quantité est épandue chaque année entre le 1er mars et le 1er mai (illustration 36).

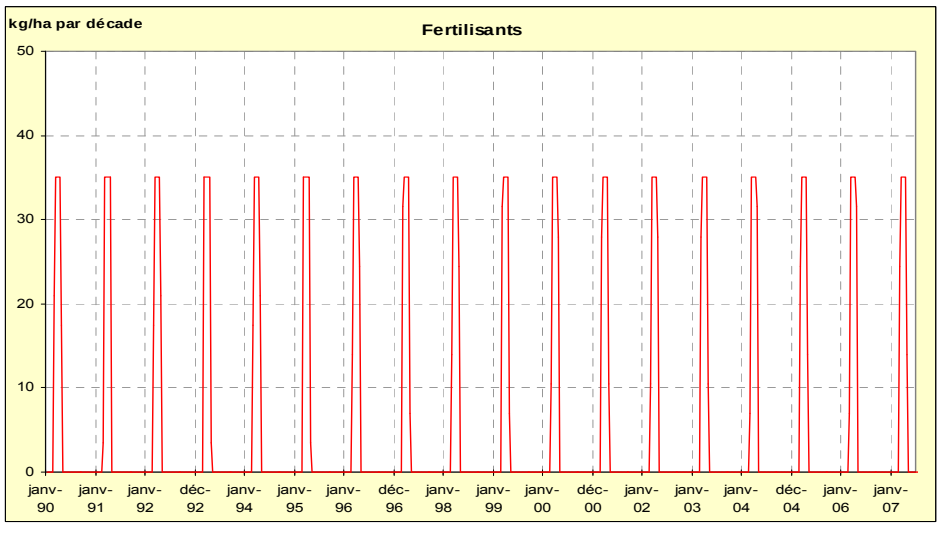


Illustration 36 - Répartition dans le temps de la fertilisation azotée

2) Minéralisation de la matière organique du sol

La fraction d'azote nitrique provenant de la minéralisation de la matière organique du sol (stock de matière organique du sol, résidus culturaux enfouis, amendements organiques), variable dans le temps et dont la contribution au stock d'azote nitrique "lessivable" peut être significative.

La minéralisation de la matière organique est en fait elle même un processus complexe dépendant :

- du type de sol et de sa teneur en matière organique,
- du système cultural,
- des conditions climatiques, déterminant notamment la teneur en eau du sol et sa température, facteurs influençant fortement l'activité des micro-organismes agissant sur la minéralisation de la matière organique ou au contraire sur l'incorporation de l'azote disponible à la biomasse ("réorganisation").

Compte tenu de l'introduction de ce processus dans les simulations prévisionnelles et du manque de données, seules les conditions climatiques sont prises en compte. Cette fonction de minéralisation est dépendante de la pluie et de la température.

Elle est calculée selon une cinétique d'ordre 1 (L.A. Kauark Leite, 1990 -, *Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole*).

La relation entre la minéralisation azotée et la température est simulée suivant une loi exponentielle (loi de Van't Hoff). La relation utilisée est la même que celle utilisée par le programme de calcul LIXIM (Mary et al., 1999).

$$F(T) = \exp [0.115 (T-T_{ref})]$$

où T est la température du sol en °C et T_{ref} une température de référence choisie dans notre étude à 15°C.

La minéralisation des résidus organiques ne sera pas prise en compte dans les modèles (processus très dépendant des conditions culturales et difficile à considérer dans une approche globale).

3) Exportations d'azote par les cultures

Leur estimation nécessite la connaissance des rendements et de la consommation unitaire d'azote par la culture considérée (ses différentes parties végétales).

Dans cette étude, elles sont considérées comme proportionnelles à l'ETP.

Le tableau suivant (illustration 37) récapitule les données utilisées pour la modélisation. Les planches 52-53-54-55-56-57-58-59-60 en annexe 2 précisent le positionnement des données utilisées (climatologie, piézométrie, hydrométrie, suivi nitrates).

Un schéma récapitulatif du processus de modélisation et de simulation est fourni en illustration 38.

	BV en contentieux	Les Echelles	Bizien	Horn	Urne	Ic
	Département	35	22	29	22	22
Piézométrie	Piézomètre (commune)	Louvigné-du-Désert	Pommerit-Jaudy	Plouvorn	Le Foeil	Trémuson
	Numéro BSS	0247-8X-0122	0203-4X-0082	0239-4X-0019	F3	0243-1X-0106
	Commentaires sur les chroniques	Trop courtes	Trop courtes	Durée ok, mais effet de seuil	Courte et signal perturbé	Trop courtes
Hydrométrie	Débit	Loysance à St Ouen La Rouërie		Mespaul	Plédran	
	Sup. (km²)	81.5		50	40.4	
	Commentaires sur les chroniques	très à l'aval de la prise d'eau	Inexistante	à l'aval immédiat de la prise d'eau	à l'amont, proche de la prise d'eau	Reconstituée
Climatologie	Pluie	0.13 P Landéan + 0.60 P St-Germain + 0.27 P Noyal	P Pommerit-Jaudy	0,70 P Sibiril + 0,30 P Landivisiau	0,90 P St Donan + 0,10 P St Brieuc	P_StBrieuc
	Commentaires sur les chroniques				Pdonan remplacé par P Plaintel à partir du 11/12/05	
	ETP et Température	Louvigné	Pommerit-Jaudy	Landivisiau	St Brieuc	St Brieuc
	Commentaires sur les chroniques			St Servais = landivisiau		
Nitrates : concentration à la prise d'eau	Prise d'eau	Montours	Hengoat	Plouenan	Trégueux	Binic
	Sup. (km²)	10	27	44	48	81
	Code_NO3	4162940		HO8	4168250	Bief du chien noir, IC5
	Commentaires sur les chroniques	Courtes chroniques 1998/2005 avec une lacune en 2001		Signal très fluctuant		Signal très fluctuant

	BV en contentieux	Aber Wrac'h	Gouessant	Guindy	Arguenon_Jugon	Arguenon
	Département	29	22	22	22	22
Piézométrie	Piézomètre (commune)	St-Divy	Bréhand	Pommerit-Jaudy	Trémeur	Trémeur
	Numéro BSS	0238-8X-0060	0279-4X-0063	0203-4X-0082	0280-3X-0036	0280-3X-0036
	Commentaires sur les chroniques	Durée ok	Trop courtes	Trop courtes	Trop courtes	Trop courtes
Hydrométrie	Débit	Drennec	Andel	Plouguiel	Jugon-les-lacs	Mégrit et Jugon
	Sup. (km²)	24	242	125	104	102 et 104
	Commentaires sur les chroniques	très en amont de la prise d'eau	très à l'aval de la prise d'eau	à l'aval immédiat de la prise d'eau		
Climatologie	Pluie	0,75 P Ploudaniel + 0,25 P Landivisiau	0.43 P Lamballe + 0.52 P Plestan + 0.05 P Lanrelas	P Pommerit-Jaudy	0,40 P Trémeur + 0,45 P Lanrelas + 0,15 P Collinée	0,40 P Trémeur + 0,45 P Lanrelas + 0,15 P Collinée
	Commentaires sur les chroniques					
	ETP et Température	Landivisiau	Quinténic	Pommerit	Trémeur	Trémeur
	Commentaires sur les chroniques					
Nitrates : concentration à la prise d'eau	Prise d'eau	Kernilis	St-Trimoël	Plouguiel	Pleven	Pleven
	Sup. (km²)	98	21	122	104	388
	Code_NO3	AW8	4167850	04172570, 04172500	4167000	4167100
	Commentaires sur les chroniques	Signal très fluctuant	HG36=4167850		prise d'eau proche station hydro	exutoire

Illustration 37 : Récapitulatif des données de modélisation

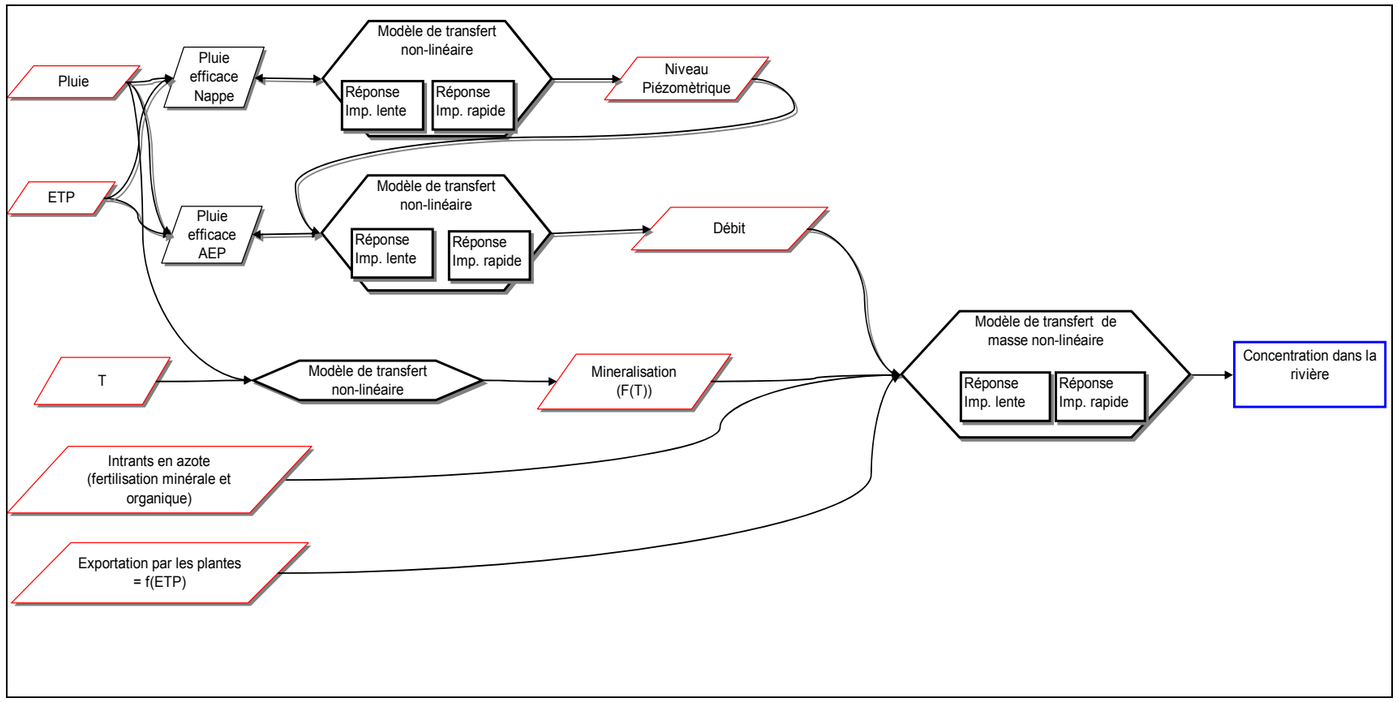


Illustration 38 - Schéma récapitulatif du processus de modélisation et de simulation

3.3. FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL TEMPO

D'une façon générale, dans la modélisation d'un système physique à l'aide d'une approche "boîte noire", on met en relation une ou plusieurs "entrées" du système avec une "sortie" via une ou plusieurs fonctions de transfert.

Les fonctions de transfert sont calculées à partir des "entrées" et par calage sur les données de "sortie" (inversion d'un système matriciel).

La fonction de transfert, appelée aussi réponse impulsionnelle, correspond à la sortie du système quand l'entrée est une impulsion se produisant pendant un intervalle de temps très court (par exemple une pluie très brève sur l'ensemble du bassin). Suivant le contexte la réponse impulsionnelle revêt différentes formes, par exemple celle indiquée par la figure ci-dessous (phase de montée puis de décroissance).

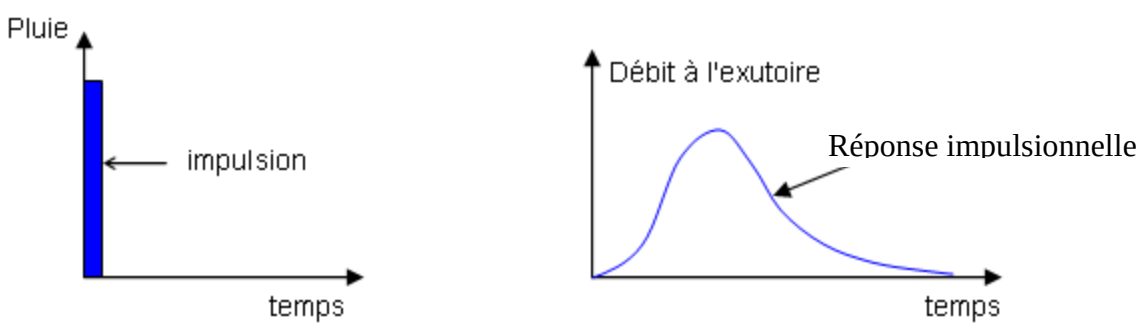


Illustration 39- Exemple de réponse impulsionnelle

Le code de calcul TEMPO fonctionne suivant ce principe général illustré à l'aide d'un exemple simple ci-après.

3.3.1. Exemple simple

Dans un système linéaire, la relation entre une entrée e(t), une sortie s(t) et une fonction de transfert g(t), s'exprime par l'intégrale de convolution classique suivante:

$$s(t) = \int_0^t e(\tau).g(t-\tau)d\tau$$

L'aire de la fonction de transfert vaut 1 (conservation des flux), soit: $\int_0^\infty g(t)dt = 1$

Pour un système hydrologique (bassin versant superficiel et souterrain) dont l'entrée est représentée par une chronique de pluies <u>efficaces</u> $P_{eff}(t)$ et la sortie par un débit Q(t) à l'exutoire du bassin, on peut écrire, en supposant qu'une seule fonction de transfert g(t) suffit à décrire le système (ce qui revient à supposer un ruissellement nul, toute la pluie efficace participant à la recharge de la nappe):

$$Q(t) = \int_0^t P_{eff}(\tau).g(t-\tau)d\tau \qquad (1)$$

Pour un transport de masse, on peut écrire de même:

$$\Phi_M(t) = \int_0^t \Phi_{in}(\tau).g_{FM}(t-\tau)d\tau \qquad (2)$$

avec:

$\Phi_M=\Phi_{ex}$ le flux de masse à l'exutoire où le débit mesuré est Q(t) et où la concentration mesurée est C_{ex}: $\Phi_{ex}(t)= Q(t).C_{ex}(t)$

Φ_{in} le flux de masse entrant avec une concentration C_{in}: $\Phi_{in}(t)= Q_{in}(t). C_{in}(t)$

$g_{FM}(t)$ la fonction de transfert.

L'intégrale 2 peut se réécrire:

$$C_{ex}(t) = \frac{1}{Q(t)}\int_0^t C_{in}(\tau).Q_{in}(\tau).g_{FM}(t-\tau).d\tau \qquad Q(t) \neq 0 \qquad (3)$$

Remarque: *dans la suite de ce document, la forme condensée* s(t) = e(t)*g(t) *sera utilisée à la place des intégrales de convolution (s=sortie, e=entrée).*

3.3.2. Généralisation

En fait, les processus étant plus complexes (coexistence d'écoulements "lents" et "rapides") et certains non linéaires (effets de seuils), plusieurs fonctions de transfert peuvent être introduites dans TEMPO pour simuler au mieux un système hydrologique (§ 3.3.3).

De même, plusieurs entrées sont parfois nécessaires dans le processus de modélisation: ainsi, un débit à l'exutoire d'un bassin peut être reproduit à partir d'une séquence de pluies et d'ETP et à partir d'une chronique de niveaux piézométriques permettant par exemple de prendre en compte un soutien des débits d'étiage, ou plus généralement des échanges nappe-cours d'eau.

Dans cet exemple, il y aura deux fonctions de transfert "lentes", l'une associée à la fraction de la pluie efficace participant à la recharge de la nappe, l'autre associée aux variations piézométriques.

La contribution des différentes entrées au cours du temps est calculée par le logiciel, une fois déterminées les fonctions de transfert.

Les fonctions de transfert peuvent avoir une forme a priori, par exemple un trapèze (équivalent d'une moyenne mobile avec un effet retard) ou bien une forme analytique; dans ce cas seuls les paramètres de cette fonction sont à calculer. Mais elles peuvent être aussi calculées de façon discrète, sans formulation paramétrique.

Pour les obtenir, différentes techniques ont été mises au point, décrites dans une littérature abondante. La technique mise en œuvre dans le logiciel Tempo est mentionnée dans l'article de Pinault et al, 2001[(1)].

3.3.3. Modélisation des écoulements

• Composantes des écoulements

Dans le processus de modélisation, TEMPO permet de simuler deux types d'écoulements:

- des écoulements dits "rapides", par exemple ruissellement de surface ou bien, dans une nappe, écoulements préférentiels via un système de macropores, de fissures interconnectées, de conduits karstiques.

- des écoulements "lents" expliquant les retards plus ou moins importants entre la pluie et le débit (ou la variation d'un niveau piézométrique) observés en sortie: processus d'infiltration dans la zone non saturé et écoulements dans l'aquifère.

Partant de la pluie efficace (cf ci-dessous pour son calcul), 2 fonctions de transfert associées à chacun de ces écoulements sont calculées:

Γ_R, associée aux écoulements "rapides"

Γ_L, associée aux écoulements "lents"

soit, pour un débit Q(t) simulé à l'exutoire d'un bassin de superficie A:

$$Q(t) = A.(\Gamma_R * Peff_R + \Gamma_L * Peff_L) \qquad \textbf{(1)}$$

$Peff_R$ et $Peff_L$ sont les composantes de la pluie efficace Peff induisant le transfert rapide et le transfert lent ($Peff = Peff_R + Peff_L$).

Dans TEMPO, les variables sont réduites, divisées par leur moyenne (ce qui fait disparaître la superficie A du bassin dans le cas de la simulation de débits).

---

(1) Pinault J-L, Pauwels H. and Cann Ch., Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Application to nitrate transport and denitrification, Water Res. Research, 37 (8), pp 2179-2190, 2001.

Par exemple, pour les débits, par conservation des volumes: $\overline{Q} = A.\overline{P_{eff}}$ et donc:

$$\frac{Q}{\overline{Q}} = \Gamma_R * \frac{Peff_R}{\overline{Peff}} + \Gamma_L * \frac{Peff_L}{\overline{Peff}}$$

• Calcul de la pluie efficace

C'est la hauteur de pluie permettant d'engendrer un écoulement superficiel ou souterrain. Elle est calculée par TEMPO à partir de chroniques de pluies et d'ETP à l'aide d'un seuil $\Omega(t)$ que l'on peut interpréter comme le déficit de la réserve en eau des sols: la pluie est efficace lorsque le déficit est nul (la réserve saturée),

P_{eff}= Pluie- $\Omega(t)$ si Pluie > $\Omega(t)$ P_{eff}=0 sinon

Le seuil $\Omega(t)$ est calculé à partir de 2 réponses impulsionnelles, Γ_{Pluie} et Γ_{ETP} :

$$\Omega(t) = \Gamma_{Pluie} * \text{Pluie} + \Gamma_{ETP} * \text{ETP} + Cste \quad \textbf{(2)}$$

La variable Ω ayant le sens d'un déficit, l'ETP l'augmente (le déficit s'accroît) tandis que la pluie la fait diminuer (le déficit se comble).

La réponse impulsionnelle Γ_{ETP} de Ω à l'ETP sera donc positive, tandis que sa réponse Γ_P à la pluie sera négative.

Les 2 réponses impulsionnelles Γ_{ETP} et Γ_P sont représentées par des trapèzes (équivalent d'une moyenne mobile avec un effet retard)

• Calcul des composantes de la pluie efficace induisant les écoulements lents et rapides.

La pluie efficace est décomposée en une composante rapide $Peff_R$ et une composante lente $Peff_L$, chacune de ces composantes étant transférée à l'exutoire ou dans la nappe au moyen de la réponse impulsionnelle correspondante.

La contribution de la pluie efficace au transfert rapide est décrite au moyen d'une fonction $\alpha(t)$ dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1. Cette fonction donne, au temps t, la contribution de la pluie efficace impliquée dans le transfert rapide.

$$\alpha(t) = \frac{\text{Peff}_R}{\text{Peff}_R + \text{Peff}_L} \quad \textbf{(3)}$$

La fonction α (t) est aussi calculée à l'aide d'une RI, représentée par un trapèze:

$\alpha(t) = \Gamma_{\alpha,Peff} * Peff$ **(4)**

• Calcul des fonctions de transfert

En se limitant aux processus décrits ci-dessus, 5 fonctions de transfert (illustration 40 ci-dessous) sont donc à déterminer : $\Gamma_{\Omega, Pluie}$, $\Gamma_{\Omega, ETP}$, $\Gamma_{\alpha, Peff}$,Γ_R, Γ_L

Variables calculées	• ***Réponses impulsionnelles***
Seuil de déclenchement de la pluie efficace Ω (t) *Pluie efficace si Pluie > Ω (t)*	de Ω à la pluie et à l'ETP Γ_{Pluie} et Γ_{ETP}
Part de la pluie efficace impliquée dans le transfert rapide α(t): $\alpha(t) = \frac{Peff_R}{Peff_R + Peff_L}$	de α à la pluie efficace $\Gamma_{\alpha,Peff}$
Composante de la pluie efficace induisant un transfert "rapide" $Peff_R(t)$	du débit à la pluie efficace "rapide" Γ_R
Composante de la pluie efficace induisant un transfert "lent" $Peff_L(t)$	du débit à la pluie efficace "lente" Γ_L
Fonction seuil Ω : $\Omega(t) = \Gamma_P * Pluie + \Gamma_{ETP} * ETP$	
Pluie efficace	Peff si Pluie(t) > Ω (t)
Pluie efficace:	$Peff = Peff_R + Peff_L$
Fonction α :	$\alpha(t) = \Gamma_{Peff} * Peff = \Gamma_{Peff} * (Peff_R + Peff_L)$
Débit Q:	$Q(t) = A(\Gamma_R * Peff_R + \Gamma_L * Peff_L)$ avec $Peff_L = 1-\alpha(t)$

Illustration 40 - Variables et réponses impulsionnelles dans la modélisation des écoulements

Les calculs sont conduits de façon itérative:

- 1) les réponses impulsionnelles $\Gamma_{\Omega, Pluie}$, $\Gamma_{\Omega, ETP}$, $\Gamma_{\alpha, Peff}$ sont initialisées
- 2) les fonctions Ω (seuil de pluie efficace) et α (partition de la pluie efficace) sont calculées à partir des relations (2) et (4)
- 3) les fonctions de transfert lente Γ_L et rapide Γ_R de la relation (1) sont ensuite calculées par inversion de cette relation (déconvolution).

- 4) il reste ensuite à calculer les réponses impulsionnelles $\Gamma_{\Omega,\ Pluie}$, $\Gamma_{\Omega,\ ETP}$, $\Gamma_{\alpha,\ Peff}$ initialisées à l'étape 1, c'est-à-dire à calculer les paramètres définissant les trapèzes représentant ces réponses, soit 12 paramètres au total (4 par trapèze).

On itère sur les étapes 2, 3 et 4.

• Temps de transit

Les temps de transit **moyens** sur chaque bassin sont calculés à partir des réponses impulsionnelles "lente" et "rapide" (moyenne des temps pondérée par les valeurs des RI). Ces temps, $\overline{T_L}$ ("lent") et $\overline{T_R}$ ("rapide") sont donnés par:

$$\overline{T_L} = \frac{\int_0^\infty t.\Gamma_L(t).dt}{\int_0^\infty \Gamma_L(t).dt} \qquad \overline{T_R} = \frac{\int_0^\infty t.\Gamma_R(t).dt}{\int_0^\infty \Gamma_R(t).dt}$$

Remarque: la somme des aires des réponses impulsionnelles vaut 1

$$\int_0^\infty \Gamma_L(t).dt + \int_0^\infty \Gamma_R(t).dt = 1$$

3.3.4. Modélisation des transferts de nitrates

La modélisation du transfert des nitrates suit les mêmes principes en utilisant les résultats de la modélisation des écoulements, les nitrates étant véhiculés par les flux d'eau.

Le calage se fait sur les concentrations mesurées aux exutoires.

Le signal de sortie est recomposé en fonction (cf. figure 14) :

- des débits reconstitués eux même en fonction de la pluie, de l'ETP et du niveau piézométrique (cf. explication ci-dessus)
- des intrants en azote (fertilisation minérale et organique)
- de l'ETP qui peut être reliée à l'activité de la végétation, et qui assure ici le rôle de la fonction export d'azote par les cultures.
- de la minéralisation de la matière organique, simulée à l'aide d'une réponse impulsionnelle corrélée à la température, celle-ci étant aussi une entrée des modèles.

La dénitrification, difficile à quantifier, n'est pas prise en compte. Les scénarios simulés seront donc "majorants".

Remarque - Concernant les aspects agronomiques (intrants et minéralisation de la matière organique), la voie suivie et les hypothèses faites ont été exposées au CEMAGREF et à l'INRA dont les points de vue ont été pris en compte quand cela était possible dans le cadre de la démarche adoptée.

3.4. SIMULATIONS PRÉVISIONNELLES

Les simulations prévisionnelles consistent à générer de très nombreuses séquences de pluie et d'ETP (plusieurs centaines) et à faire une analyse statistique des variables "en sortie", c'est à dire ici les concentrations en nitrates, dont l'évolution dépend aussi des conditions climatiques.

Au scénario sur les intrants, défini par une réduction de 1/3 des apports azotés par rapport à la situation supposée actuelle (abaissement de 210 à 140 kg N/ha), sont donc adjoints des scénarios climatiques.

Les scénarios climatiques sont construits à l'aide d'un "générateur" (cf. détail en annexe 3) capable de simuler des séquence de pluie et d'ETP de façon stochastique tout en respectant plusieurs conditions déduites de l'analyse de la chronique observée (saisonnalité, densité des événements…). Pour chaque réalisation de pluies et d'ETP, le logiciel TEMPO peut simuler les chroniques de débits et de concentrations par l'intermédiaire des fonctions de transfert calculées dans la phase de calage.

Les résultats de toutes les simulations sont ensuite regroupés par subdivision temporelle sur l'année (par décade dans le cas présent) ; sur chacun de ces intervalles de temps, les valeurs de la variable de sortie (débits ou teneurs en nitrates) sont classées par ordre croissant, ce qui revient à construire une fonction de répartition "expérimentale" (ou distribution cumulée des fréquences). Il est alors possible de calculer une fréquence d'occurrence de telle ou telle valeur dans chaque intervalle de temps (une probabilité de non dépassement) ou bien de définir **différents quantiles**.

Si P est la probabilité de non dépassement, déduite de la fonction de répartition, on définit une période de retour (T) par :

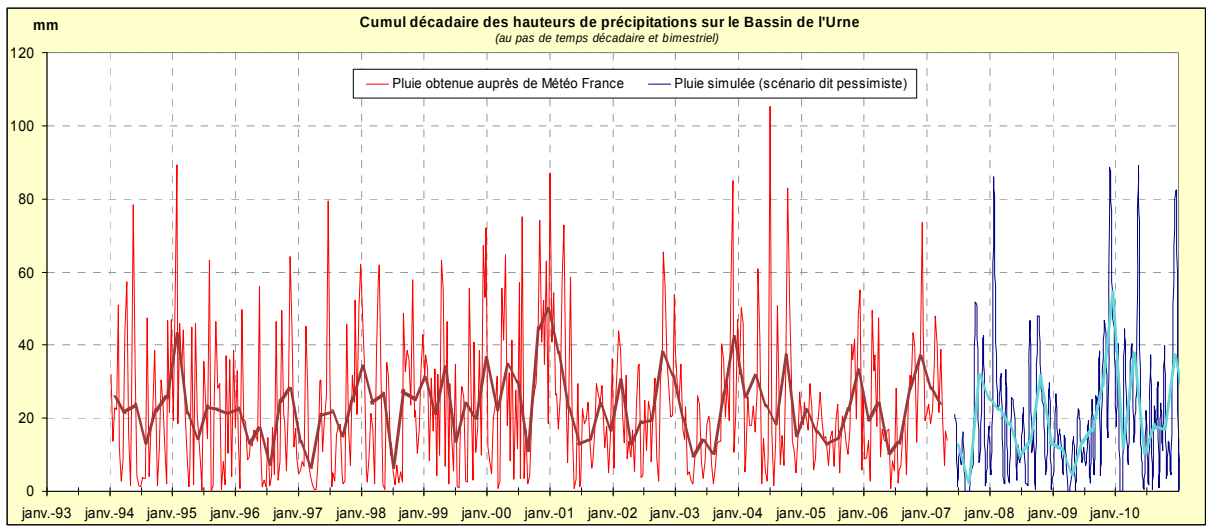
$$T = \frac{1}{1-P} \text{ si } P > 0.5 \qquad T = \frac{1}{P} \text{ si } P < 0.5$$

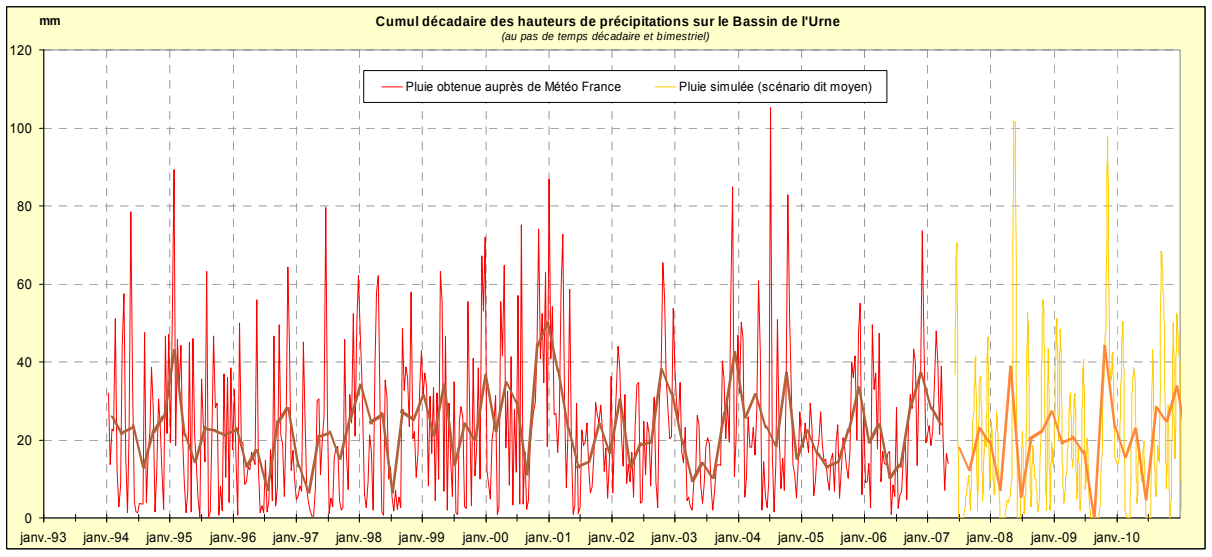
Outre la possibilité d'obtenir ainsi, pour chaque pas de temps, les différents quantiles correspondant aux périodes de retour choisies (T = 10 ans humide, T= 10 ans sec et P = 0.5 : année médiane), le logiciel permet aussi de choisir un scénario de pluie et d'analyser la concentration en nitrates correspondante.

Par l'analyse des séquences de pluies simulées, trois scénarios pluviométriques ont été retenus (illustration 41) :

- un scénario dit "pessimiste", correspondant à la succession d'une année hydrologique (de septembre 2007 à août 2008) sèche et de deux années hydrologiques;
- un scénario un scénario dit "moyen" correspondant à trois années hydrologiques moyennes consécutives;
- un scénario dit "optimiste" correspondant à la succession d'une année hydrologique humide et de deux années hydrologiques sèches.

Les scénarios sont qualifiés **a priori** de pessimistes ou d'optimistes relativement à l'année 2009 où les effets de la réduction des intrants doivent être analysés.





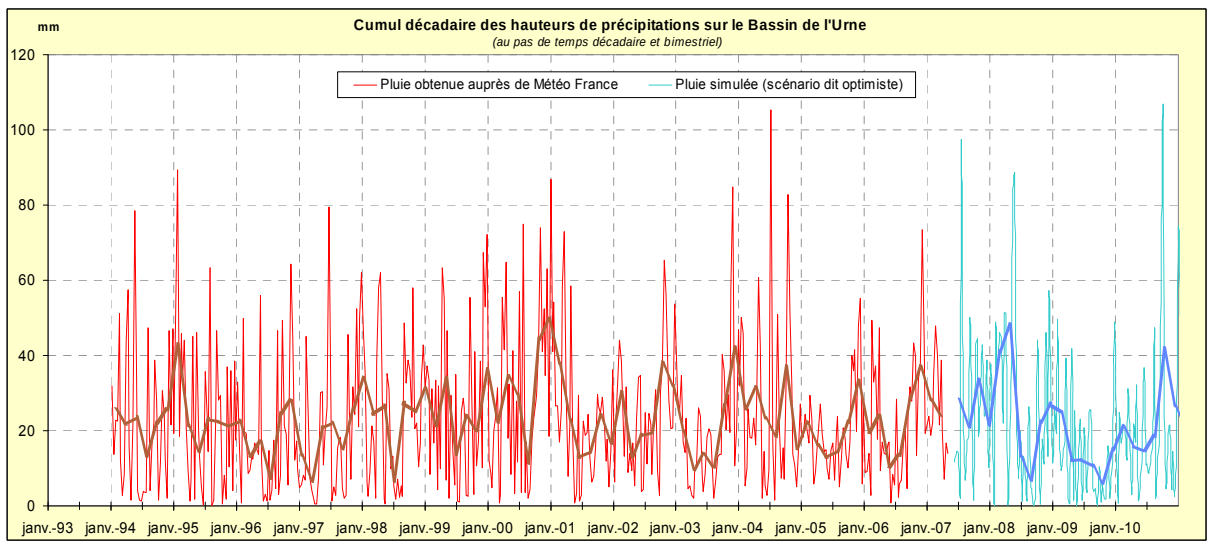


Illustration 41- Trois scénarios climatiques pour les simulations prévisionnellles

de haut en bas: scénarios: 1) "pessimiste", 2)"moyen", 3)"optimiste"

4. Modélisation de l'évolution des teneurs en nitrates au droit des prises d'eau (volet 3)

4.1. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Dans ce chapitre, on présente pour chaque bassin modélisé, une série de graphiques rendant compte:

1) de la modélisation des écoulements : résultats du calage sur les débits mesurés aux stations d'une part et simulation prévisionnelles par quantiles sur la période allant de juillet 2007 à décembre 2009 d'autre part;

2) de la modélisation du transfert des nitrates : résultats du calage sur les concentrations mesurées aux stations et simulations prévisionnelles sur la période juillet 2007-décembre 2009, celles-ci étant présentées:

- par quantiles d'une part,
- par scénario d'autre part ("pessimiste", "optimiste", moyen)

La qualité du calage est quantifiée par l'intermédiaire du critère de Nash, classiquement utilisé en hydrologie (il apparaît dans la partie haute des graphiques):

$$\mathrm{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[Q_i^{obs} - Q_i^{sim}\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}\left[Q_i^{Obs} - \overline{Q^{obs}}\right]^2}$$

où:

Q^{obs} est la série observée

Q^{sim} est la série simulée

$\overline{Q}^{obs}$ est la moyenne de la série observée

n est le nombre de valeurs dans les séries

le calage est d'autant meilleur que le critère tend vers 1.

Remarque: rappelons que, dans les simulations par quantile, les courbes simulées représentent, pour un quantile donné et pour chaque pas de temps, la valeur de la variable (débit ou teneur en NO_3) correspondant à la période de retour associée au quantile. Cette valeur est le résultat du classement des n scénarios climatiques (construction d'une fonction de répartition) produits par le générateur de pluie et d'ETP La succession de ces valeurs pas de temps par pas de temps permet de construire, sur la période de simulation, la courbe continue correspondant au quantile.

La présentation des résultats sous forme graphique a été limitée aux aspects les plus importants des modélisations, c'est-à-dire les calages et les simulations prévisionnelles (débits et concentrations en nitrates). Mais de nombreux autres graphiques peuvent être visualisés à l'aide du logiciel, en particulier les graphiques représentant les réponses impulsionnelles. A titre d'exemple, on présente ci-dessous les réponses impulsionnelles (pluies-débits) obtenues pour les bassins du Gouessant (illustration 42, haut) et de l'Arguenon (illustration 42, bas).

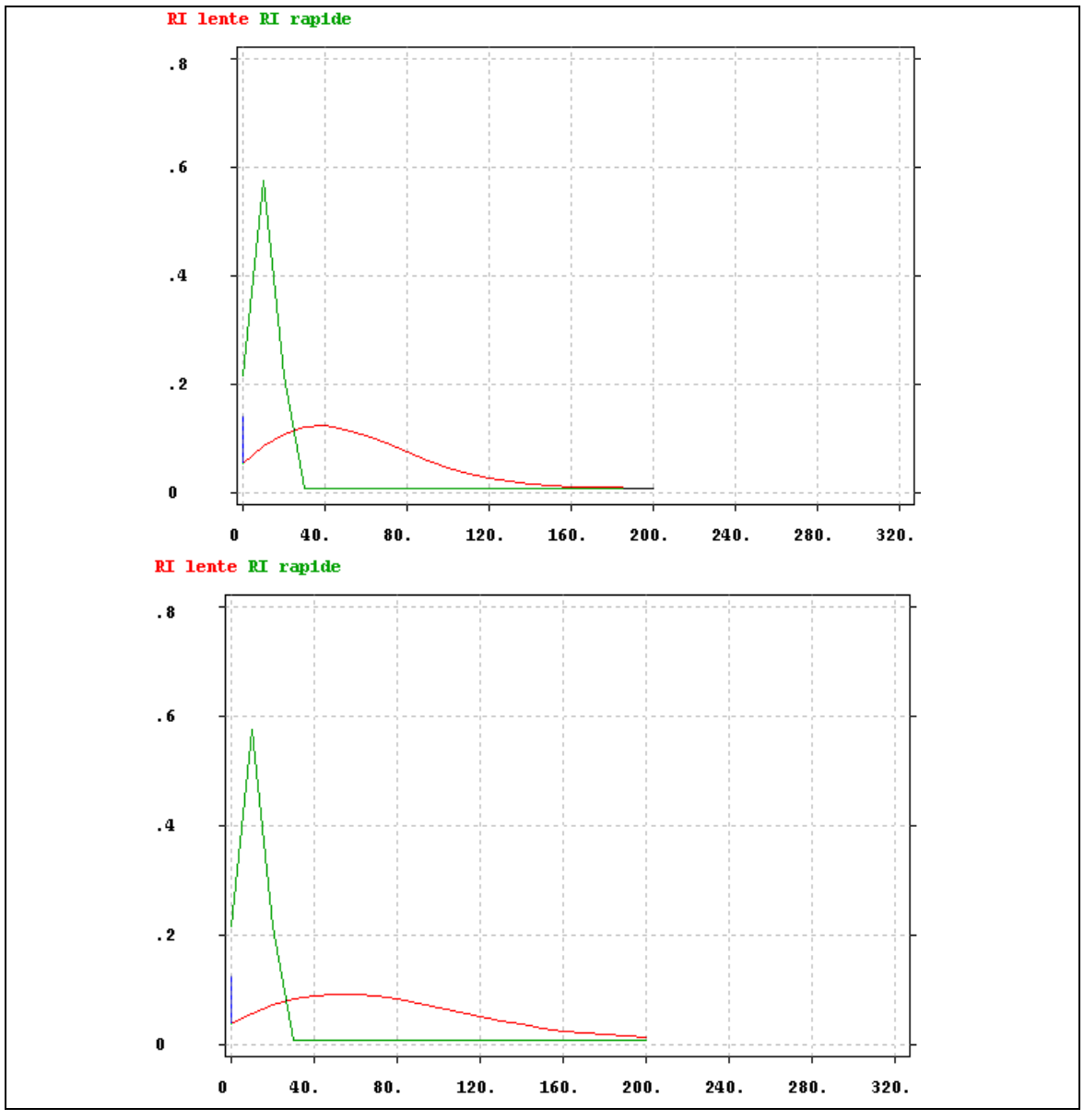


Illustration 42 – Réponses impulsionnelles "Pluie-Débits" pour les bassins du Gouessant et de l'Arguenon
(Abscisses en jours et ordonnées en jour^{-1})

Pour tous les bassins, la forme de ces réponses est la même.

Les temps de transit **moyens** (caractérisant globalement les bassins) déduits de ces réponses (cf § 3.3.3.) varient de 7 à 11 jours pour la composante "rapide" des écoulements et de 40 jours (Arguenon à Jugon et Horn) à 80 jours (Ic) pour la composante lente.

Pour les bassins du Gouessant et de l'Arguenon (ci-dessus), les temps de transit moyens pour la composante lente sont respectivement de 53 jours et 75 jours. Pour l'Urne et l'Aber Wrac'h, ils sont de 60 jours et pour le Guindy de 65 jours.

4.2. LE GOUESSANT

4.2.1. Résultats par quantile

La station hydrométrique à Andel est située très en aval de la prise d'eau AEP, où sont mesurées les concentrations en nitrates.

Les résultats des simulations sont présentés par les illustrations 43 et 44.

Les fonctions de transfert issues du calage du débit montrent que le bassin du Gouessant est dominé par les écoulements rapides.

Sur le bassin du Gouessant, les chroniques de concentrations en nitrates marquent une tendance à la baisse depuis 1998.

D'après les courbes enveloppes issues de la simulation, les concentrations décadaires correspondant aux pluies de périodes de retour 10 ans humide et 10 ans sec sont respectivement de 48 mg/L et 39 mg/L à la fin décembre 2009, la valeur médiane étant de 43 mg/L.

L'influence de la pluviométrie sur les concentrations est sur ce bassin relativement faible.

4.2.2. Résultats par scénario

Les résultats sont présentés par les illustrations 45 et 46.

Les résultats par scénarios climatologiques confirment cette faible influence. Quelque soit la chronique de pluie choisie, les concentrations en nitrates oscillent entre 40 et 50 mg/L du 15 décembre au 15 juin de chaque année.

Les pics de concentrations se produisent en mars/avril et en général un 2ème pic plus faible succède au premier.

Les années hydrologiques qui précèdent la période de simulation sont des années moyennes à sèches en termes de pluviométrie (moyenne décadaire entre 2 et 24 mm/décade sur cette période).

Ainsi, à pluviométrie stable, une réduction d'un tiers des fertilisants azotés sur ce bassin effective à partir de 2008 provoquera une baisse des concentrations à la rivière (cf. par exemple la 1ère année du scénario pessimiste ou du scénario moyen).

Cette réduction devrait permettre d'atteindre le retour à la conformité.

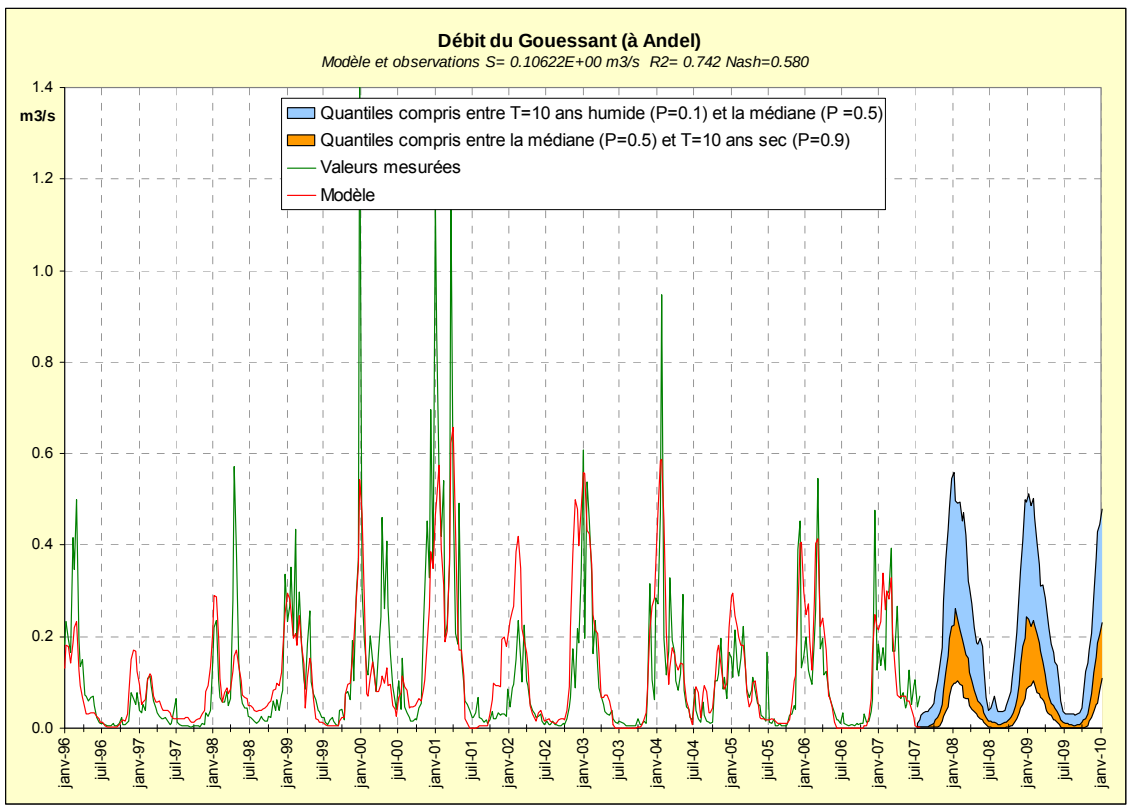


Illustration 43- Bassin du Gouessant: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par quantile

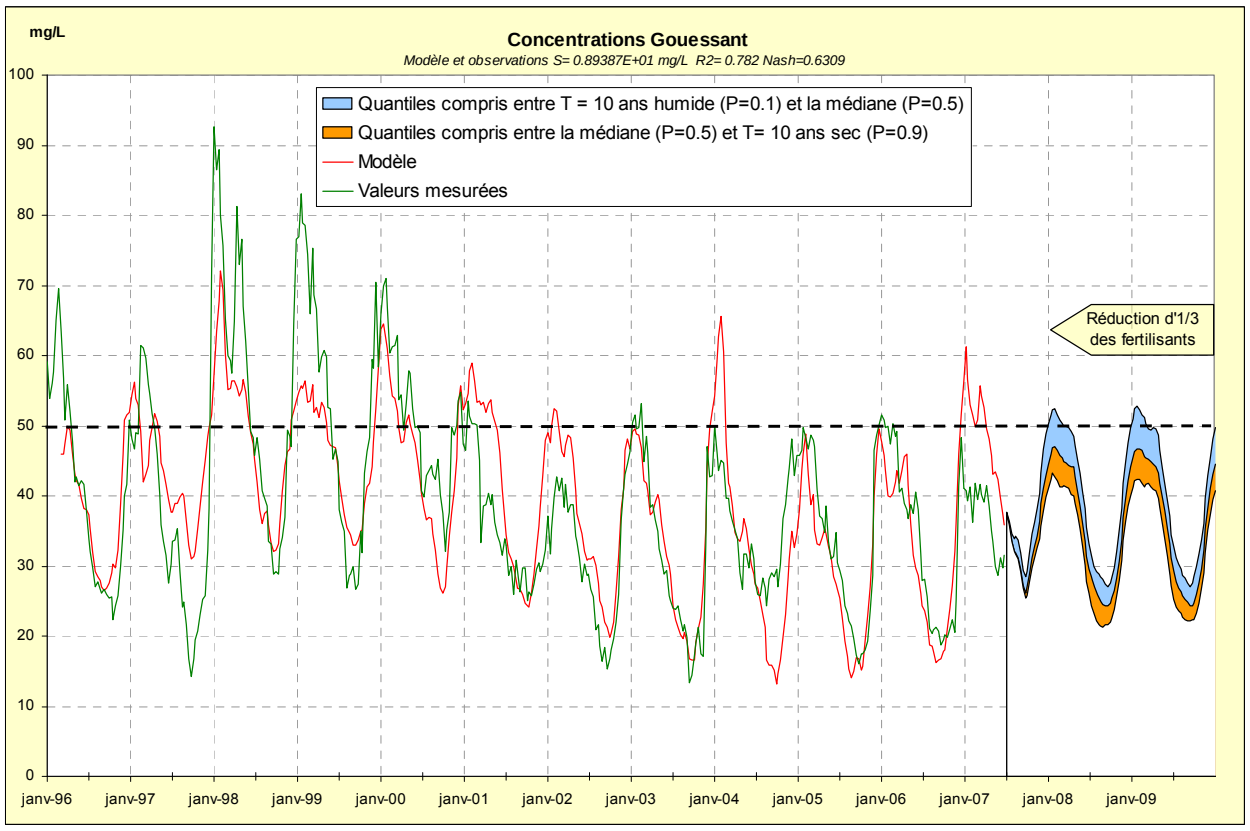


Illustration 44- Bassin du Gouessant: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile

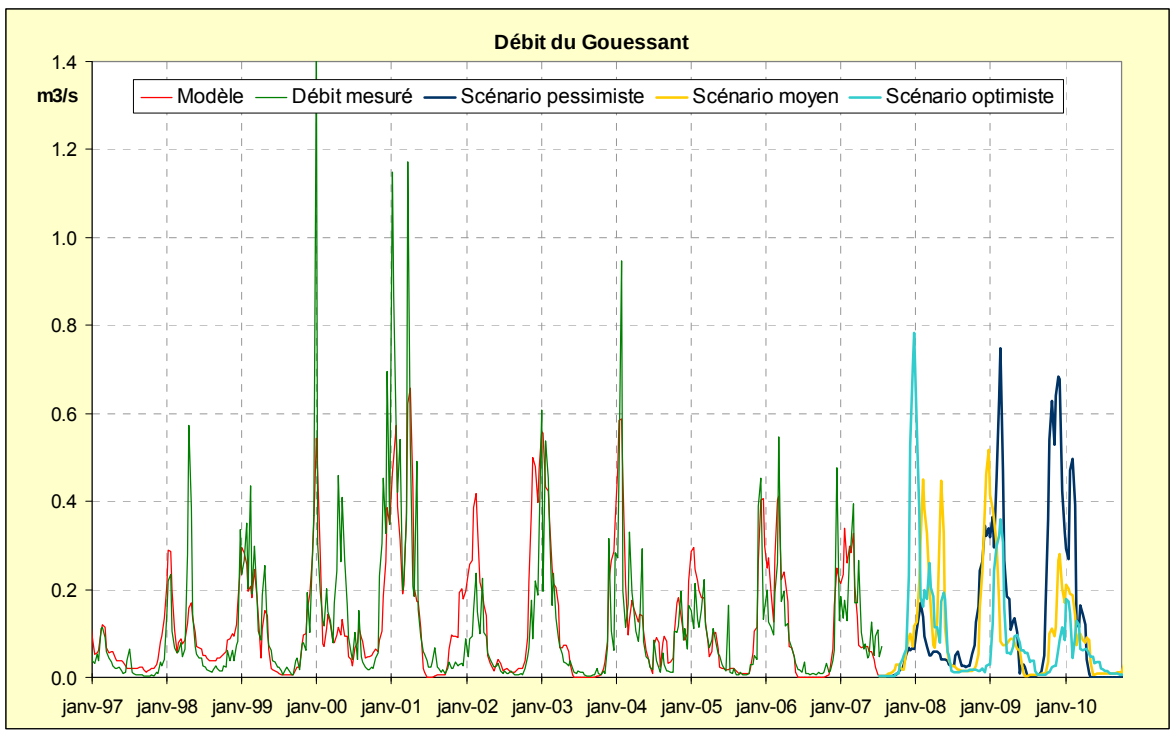


Illustration 45 - Bassin du Gouessant: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario

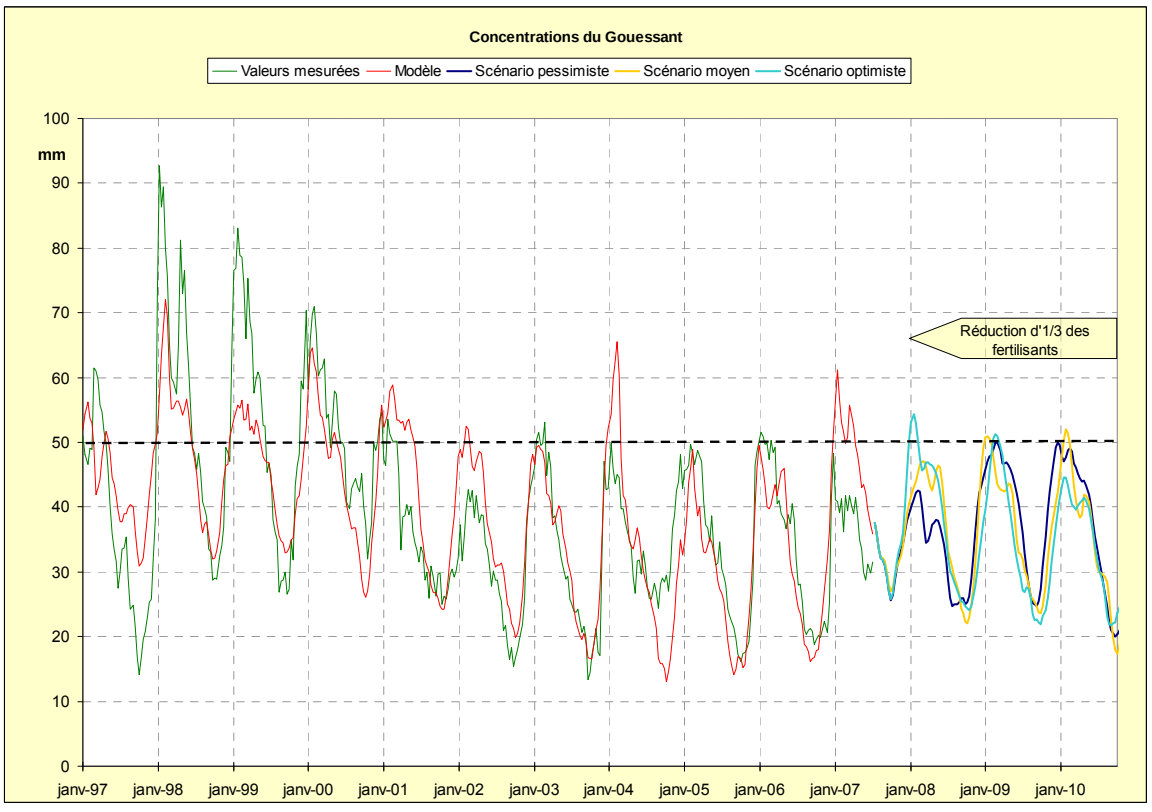


Illustration 46 - Bassin du Gouessant: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario

4.3. L'HORN

Les résultats sont présentés par les illustrations 47 à 50.

4.3.1. Résultats par quantile

Les quantiles de concentrations oscillent entre 53 et 86 mg/L pour une période de retour de 10 ans sec et entre 62 et 90 mg/L pour une période de retour de 10 ans humide.

La réduction de 1/3 des intrants azotés permet une diminution significative et relativement rapide des concentrations en nitrates dans la rivière.

Le signal des concentrations étant fluctuant, il est très difficile de reproduire les nombreux pics de concentrations sur l'Horn avec un modèle global de type Tempo. La modélisation des fluctuations rapides est très délicate, mais l'allure générale des principales variations est bien retranscrite.

4.3.2. Résultats par scénario

L'Horn est essentiellement alimenté par les eaux souterraines, ce qui explique son débit d'étiage soutenu.

Le débit a été modélisé à l'aide du piézomètre de Plouvorn.

Même dans le cas d'un scénario pluviométrique dit optimiste (qui à priori devrait avoir une incidence favorable sur la baisse des concentrations d'ici la fin 2009), une réduction de 1/3 des apports azotés est insuffisante pour atteindre le retour à la conformité d'ici 2009.

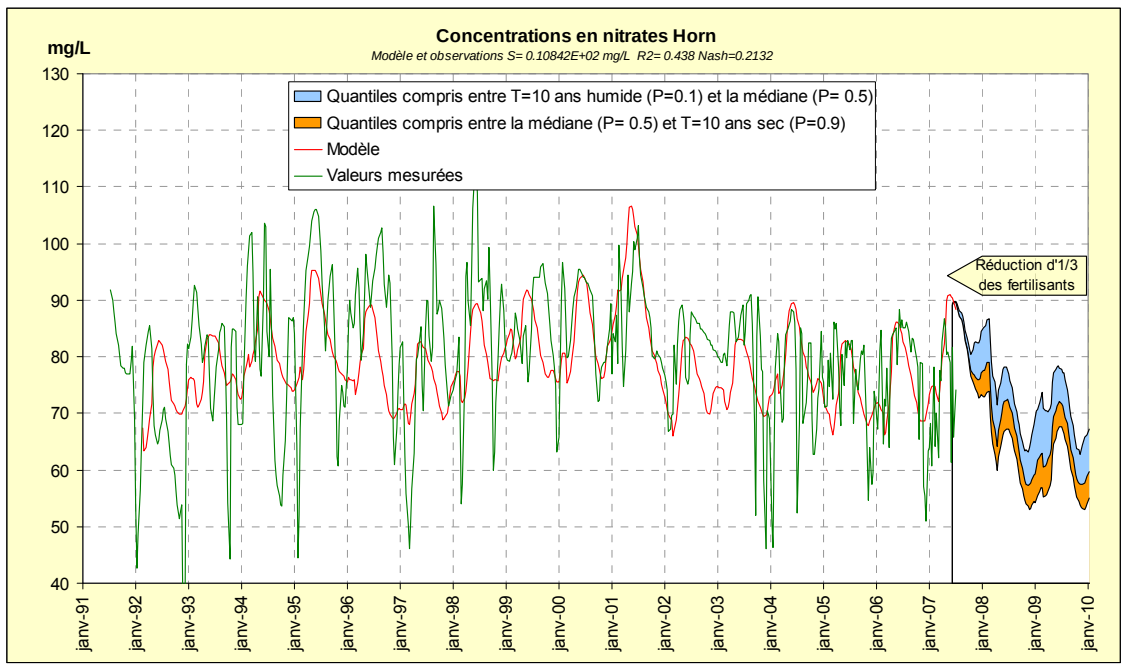


Illustration 47 - Bassin de l'Horn: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile

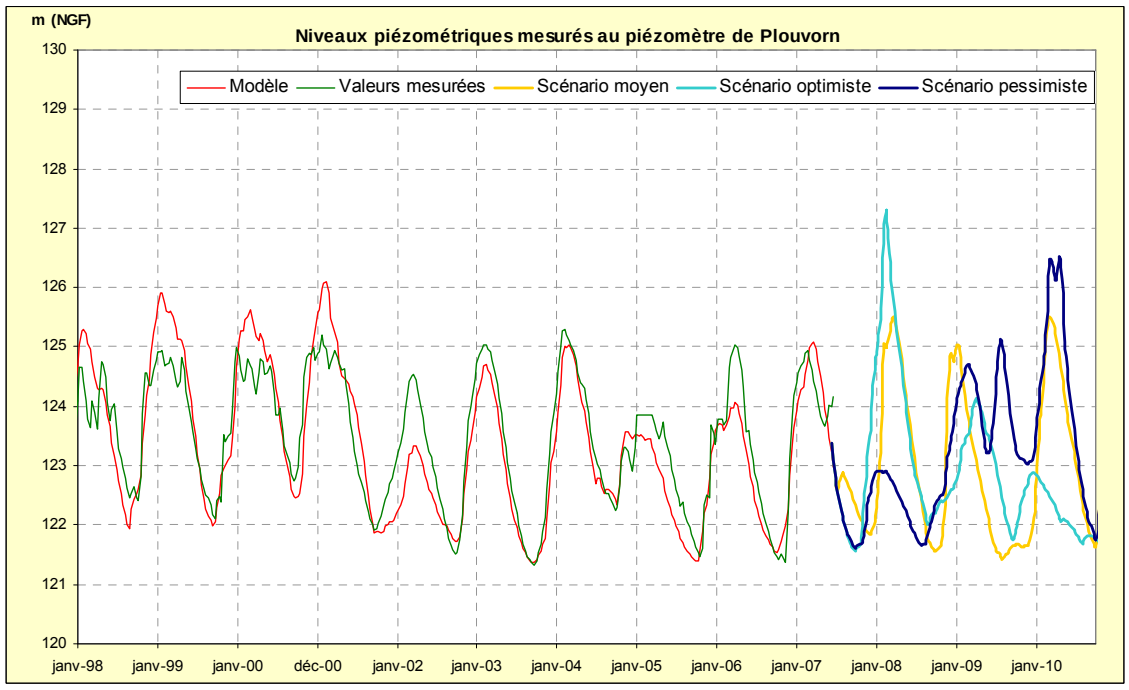


Illustration 48 - Bassin de l'Horn: résultats du calage sur les niveaux piézométriques et simulations prévisionnelles par scénario

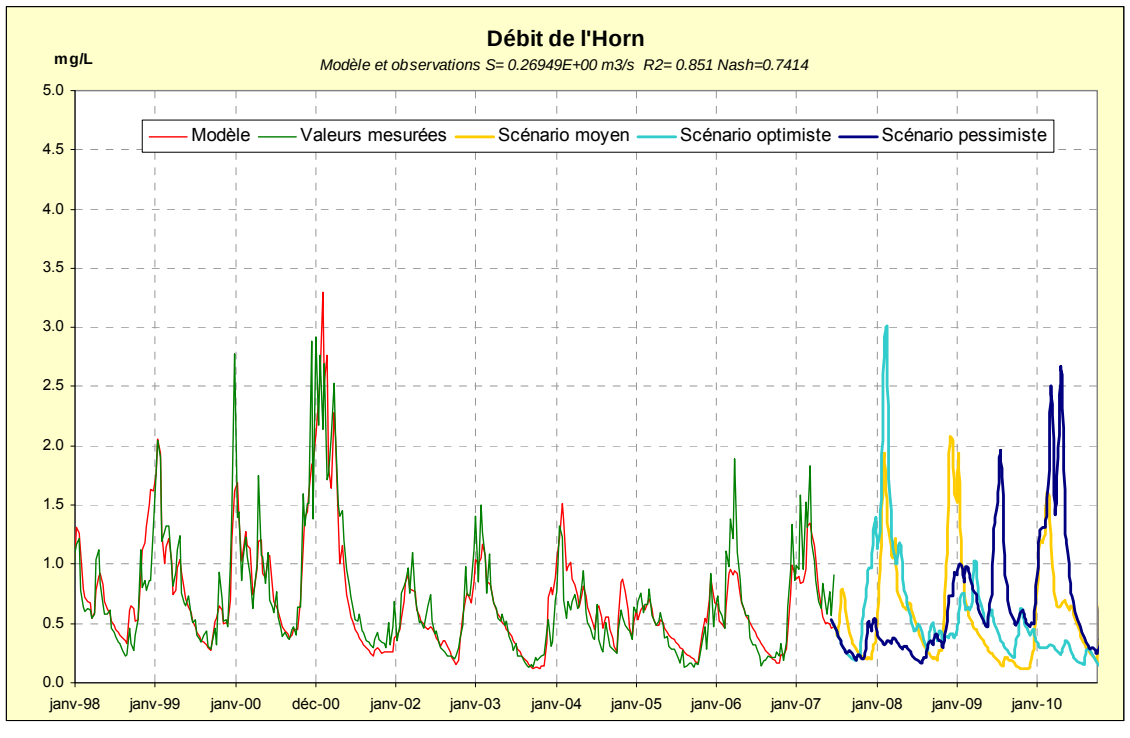


Illustration 49- Bassin de l'Horn: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario

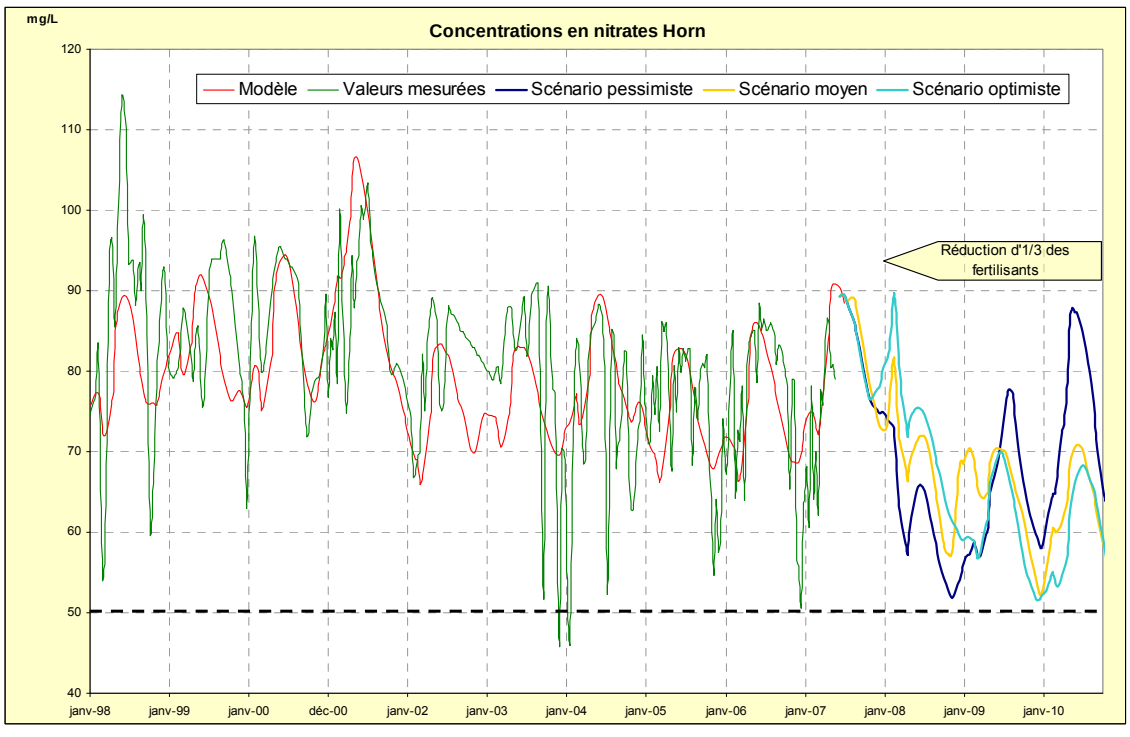


Illustration 50 - Bassin de l'Horn: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario

4.4. L'URNE

Les résultats sont présentés par les illustrations 51 à 54.

4.4.1. Résultats par quantile

Sur le bassin de l'Urne, le piézomètre Le Foeil a été modélisé. Toutefois, la durée de la chronique est insuffisante pour utiliser cette chronique dans la modélisation du débit.

La modélisation des concentrations en nitrates en rivières à l'exutoire du bassin de l'Urne est globalement assez fidèle aux observations. On observe cependant une sous-estimation des concentrations sur les hivers 1998 et 1999.

Depuis 1998, on observe une tendance générale à la baisse des concentrations jusqu'en 2001 puis une relative stagnation depuis. Le seuil de 50 mg/l est régulièrement dépassé lors de périodes de fortes pluies.

4.4.2. Résultats par scénario

L'observation des simulations des scénarios montre qu'une réduction d'un tiers des fertilisants permet de réduire ces dépassements. **En 2010, le seuil de 50 mg/l n'est dépassé que dans le cas d'un scénario pluviométrique dit « pessimiste ».**

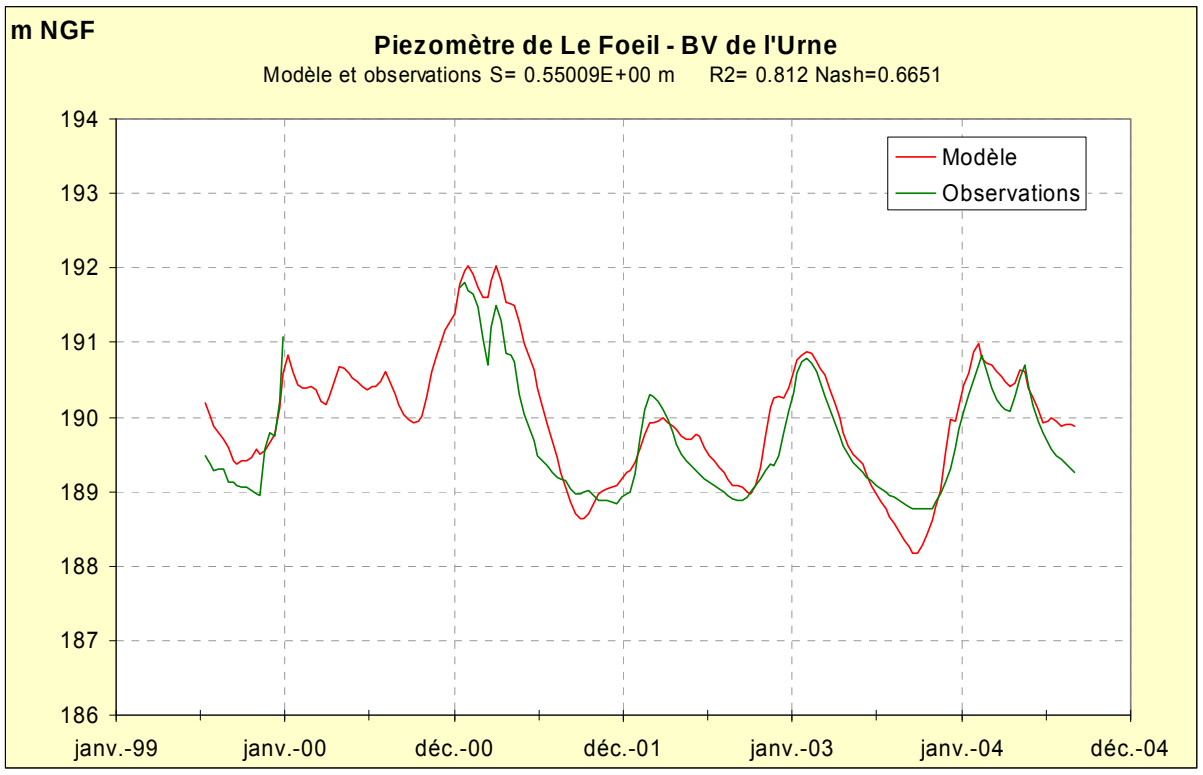


Illustration 51 – Bassin de l'Urne: résultat du calage sur les niveaux piézométriques

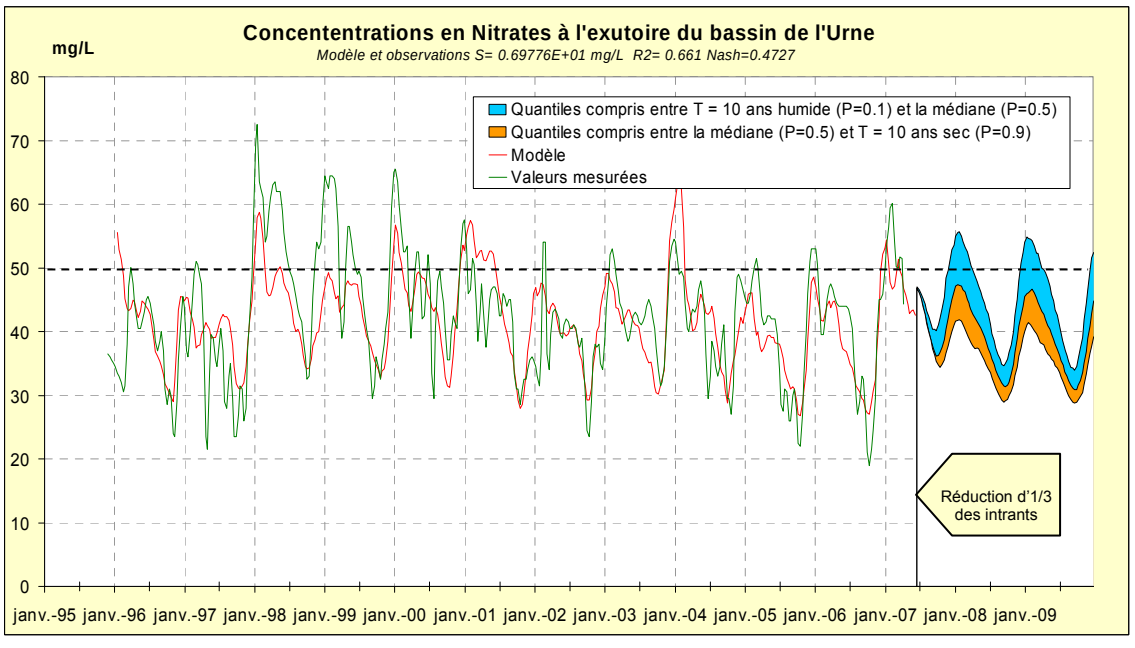


Illustration 52 – Bassin de l'Urne: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile

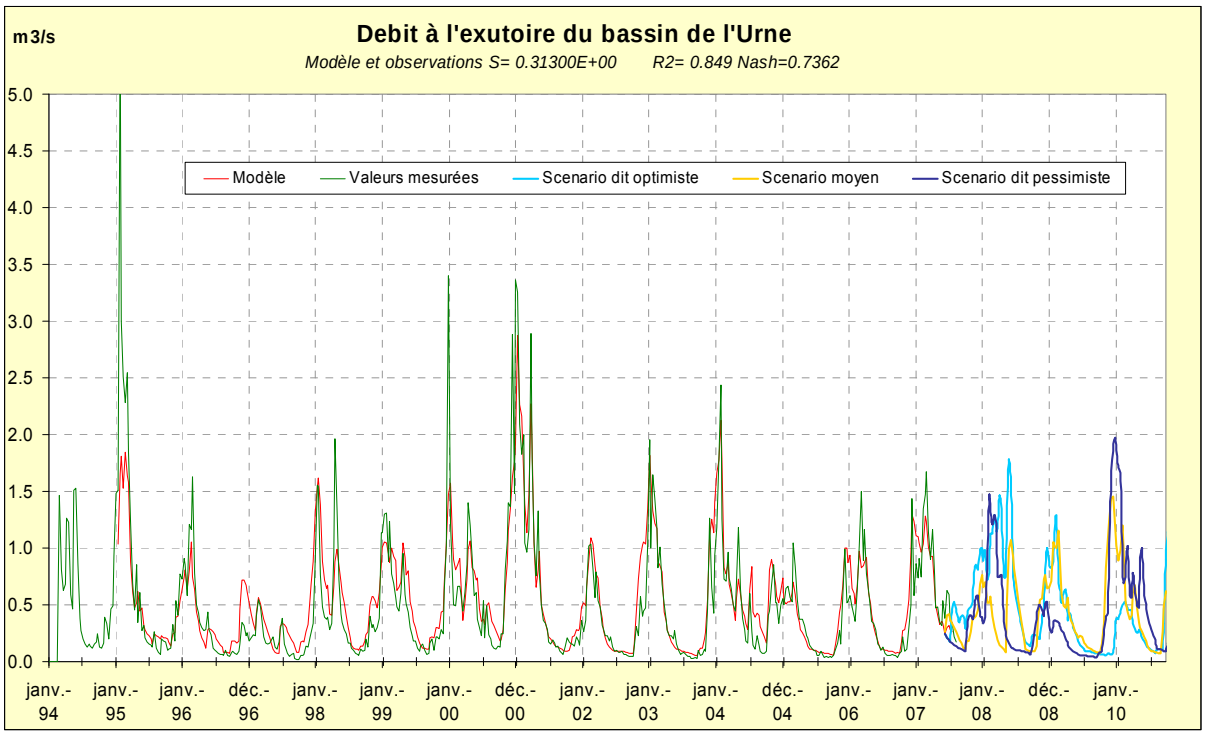


Illustration 53- Bassin de l'Urne: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario

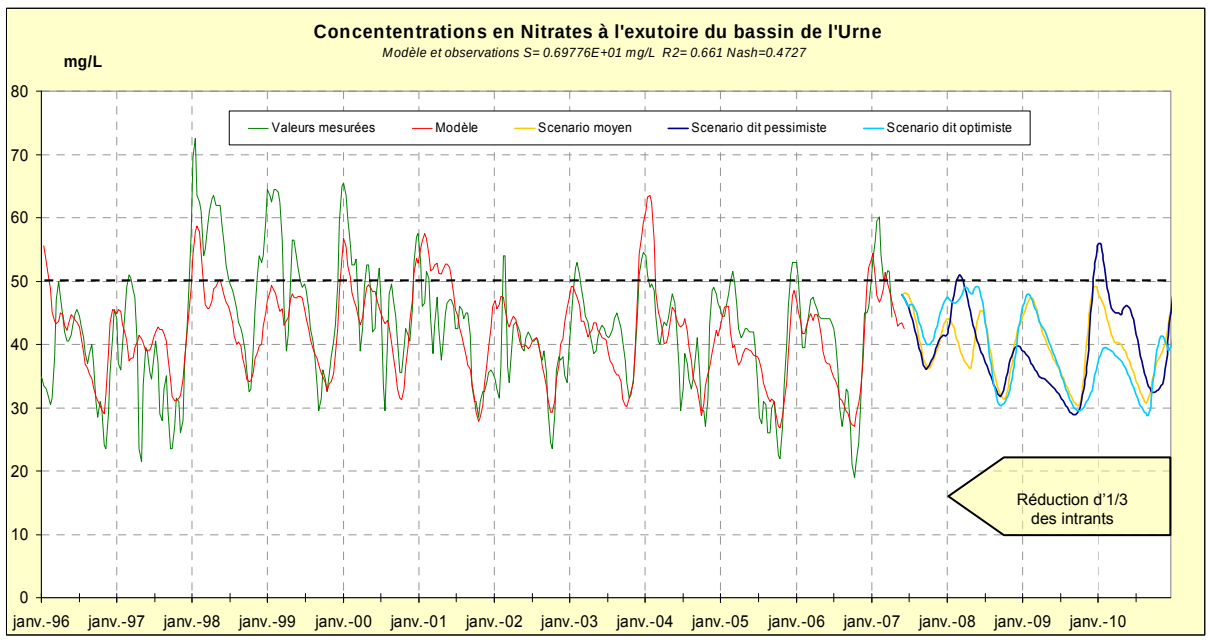


Illustration 54 - Bassin de l'Urne: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario

4.5. L'ABER WRAC'H

Les résultats sont présentés par les illustrations 55 à 58.

4.5.1. Résultats par quantile

Comme pour le bassin du Gouessant, une tendance à la baisse des concentrations est nette depuis 1995. De plus, depuis janvier 2002, l'amplitude des fluctuations est plus faible.

La réduction de 1/3 des apports azotés induit une forte baisse des concentrations à la prise d'eau.

4.5.2. Résultats par scénario

La modélisation du débit de l'Aber Wrac'h au Drennec montre une forte contribution des eaux souterraines. Les évolutions des cotes (en m NGF) du piézomètre situé sur la commune de Saint Divy ont été modélisées puis ont servi au calage du débit.

Sur le bassin de l'Aber Wrac'h l'atteinte du retour à la conformité en 2009 dépendra des conditions climatiques. Dans le cas d'une succession d'années pluviométriques moyennes ou d'une succession d'une année hydrologique humide et de deux années hydrologiques sèches, les concentrations en nitrates dans la rivière seront inférieures à 50 mg/L. Mais si les hauteurs d'eau cumulées sont conséquentes à partir de septembre 2008, les concentrations pourraient dépasser les 55 mg/L.

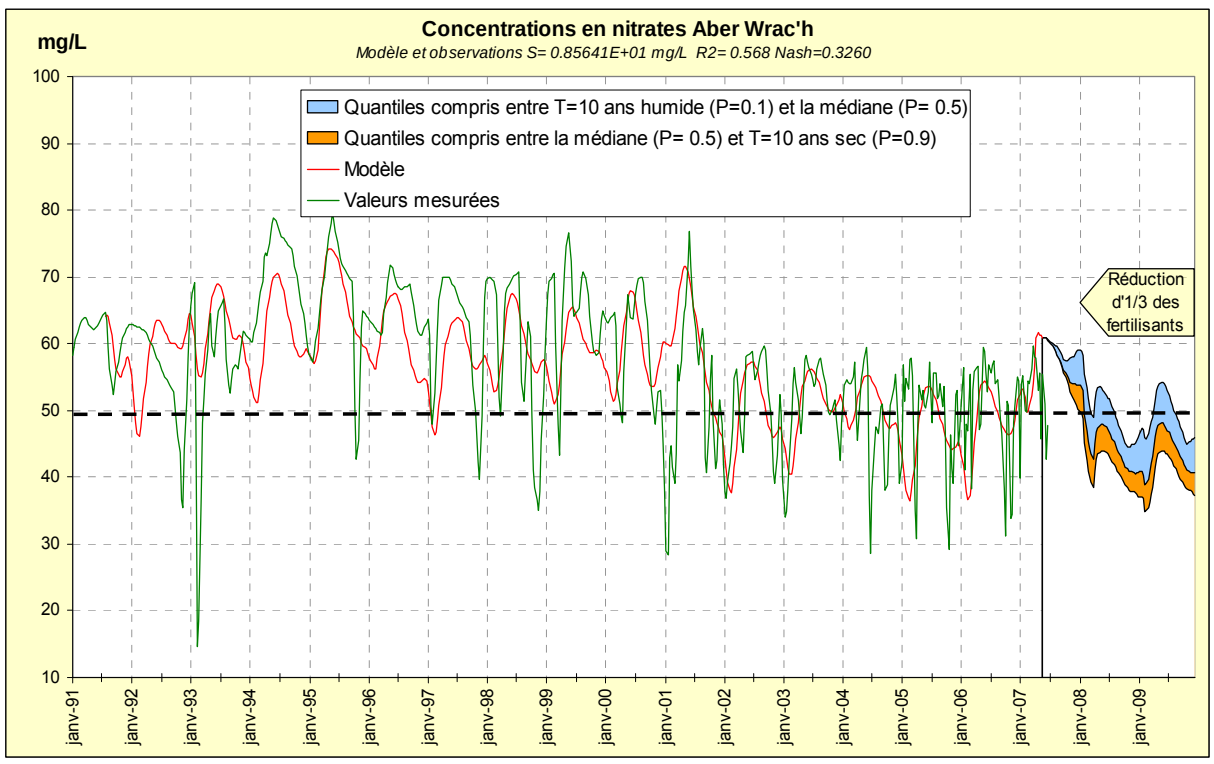


Illustration 55 - Bassin de l'Aber Wrac'h: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile

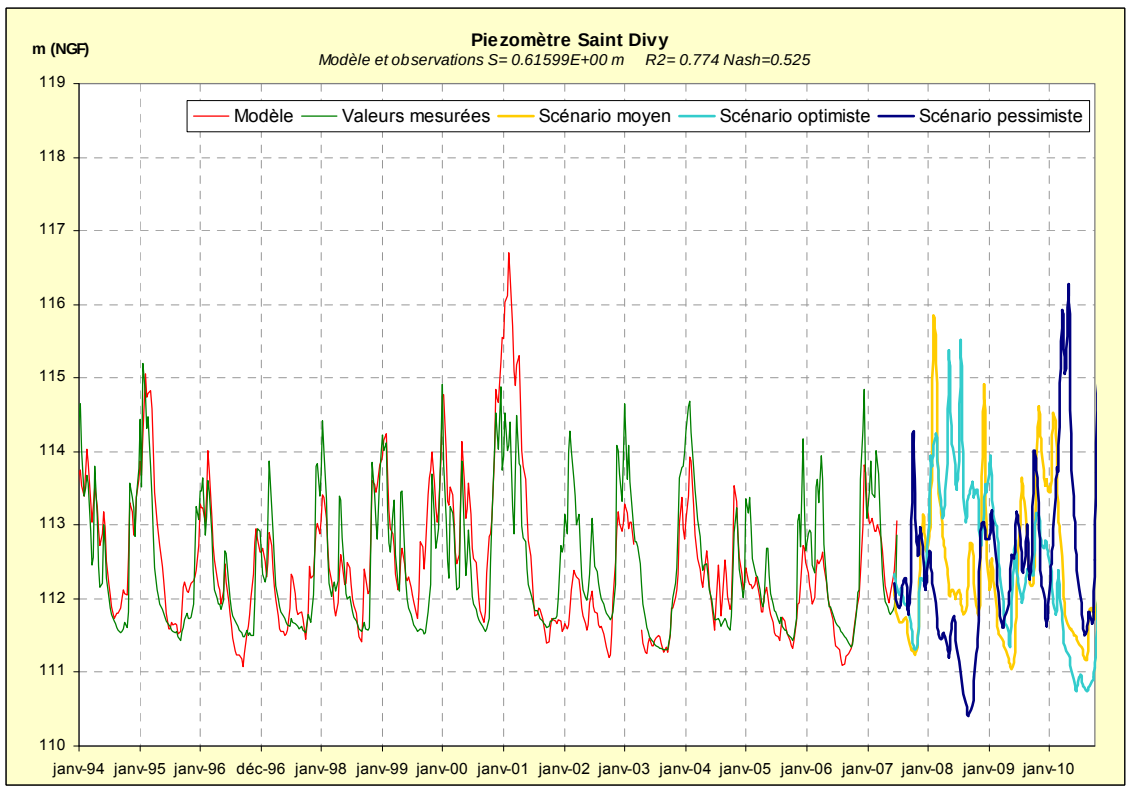


Illustration 56 - Bassin de l'Aber Wrac'h: résultats du calage sur les niveaux piézométriques et simulations prévisionnelles par scénario

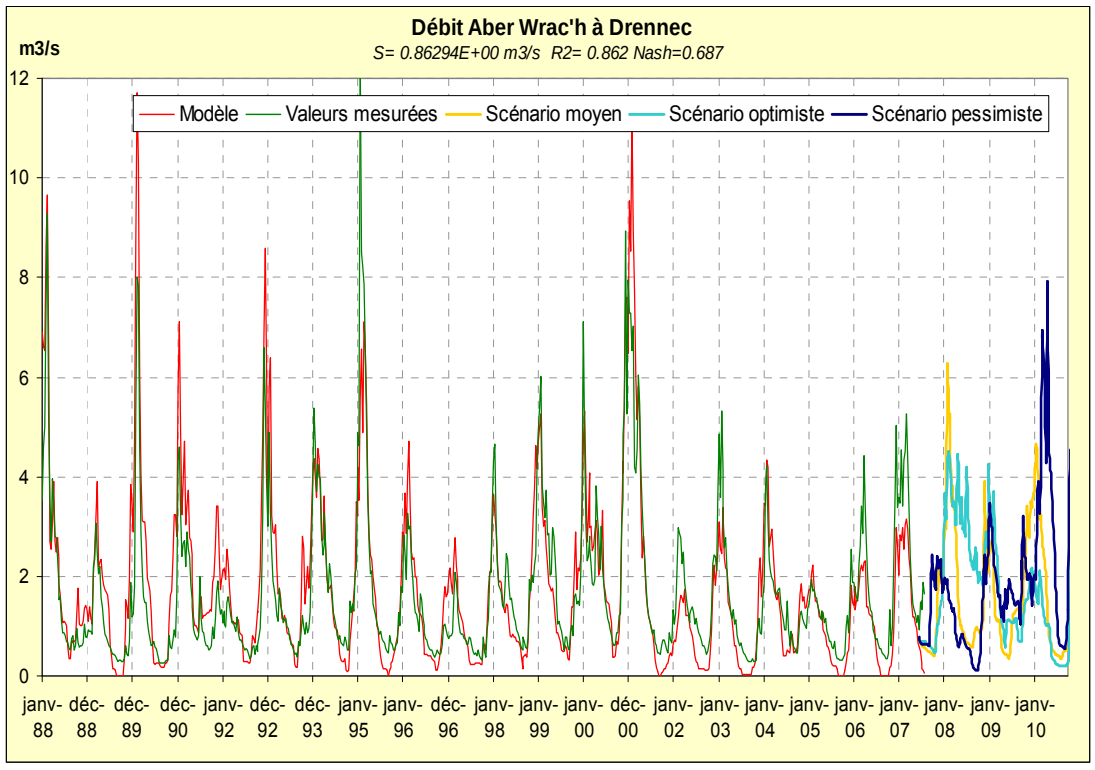


Illustration 57 - Bassin de l'Aber Wrac'h: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario

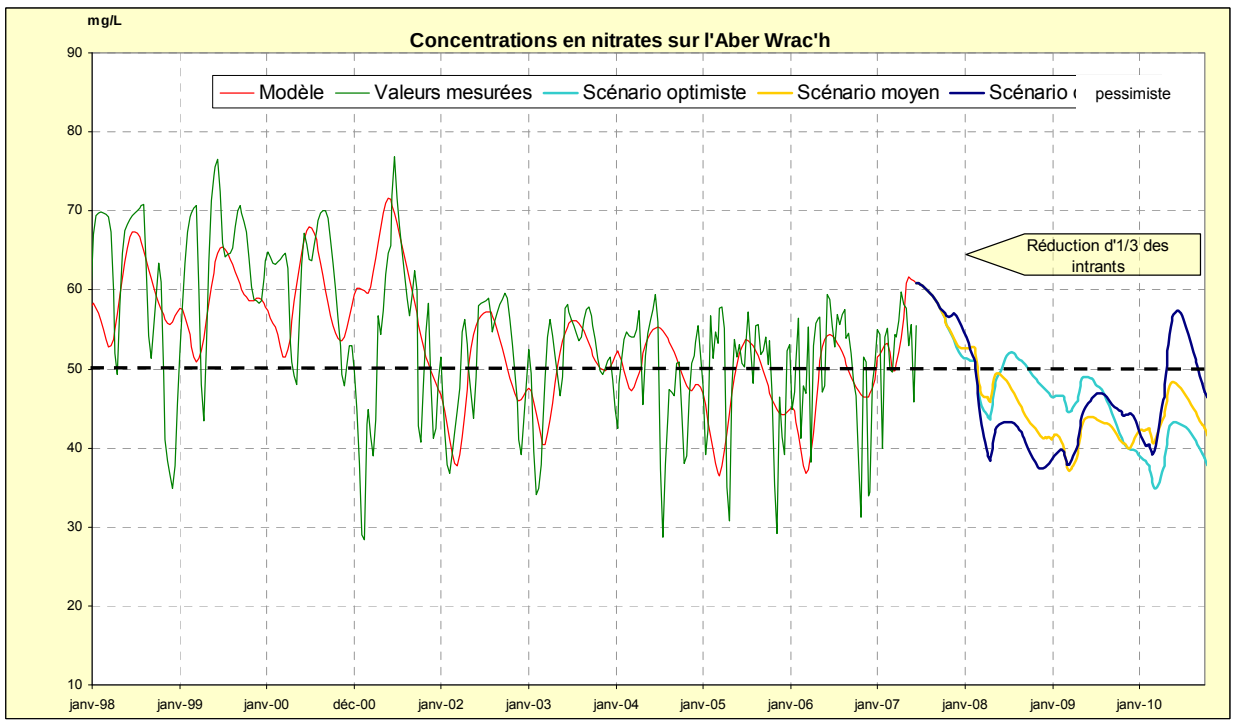


Illustration 58 – Bassin de l'Aber Wrac'h: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario

4.6. LE GUINDY

Les résultats sont présentés par les illustrations 59 à 61.

4.6.1. Résultats par quantile

La chronique des concentrations observées à l'exutoire du bassin du Guindy montre une amélioration sensible entre 2000 et 2002. Depuis cette date, l'état est stationnaire, oscillant entre 25 et 48 mg/l.

La modélisation de ces chroniques est assez bonne même si les fluctuations très rapides peinent à être reproduites.

On observe que les concentrations sont assez réactives aux conditions climatiques, avec des pics de concentrations lors des périodes humides.

Si l'on se place dans des conditions climatiques de moyennes à sèches, les prévisions données par le logiciel Tempo sont toujours en dessous du seuil de 50 mg/l. On observe néanmoins un dépassement du seuil dans les conditions les plus humides.

4.6.2. Résultats par scénarios

Mis à part les crues de décembre 2006 et l'étiage de l'été 2001, les chroniques de débits sont raisonnablement reproduites.

Seul le scénario pessimiste amène à un dépassement du seuil de 50 mg/l dans les prochaines années.

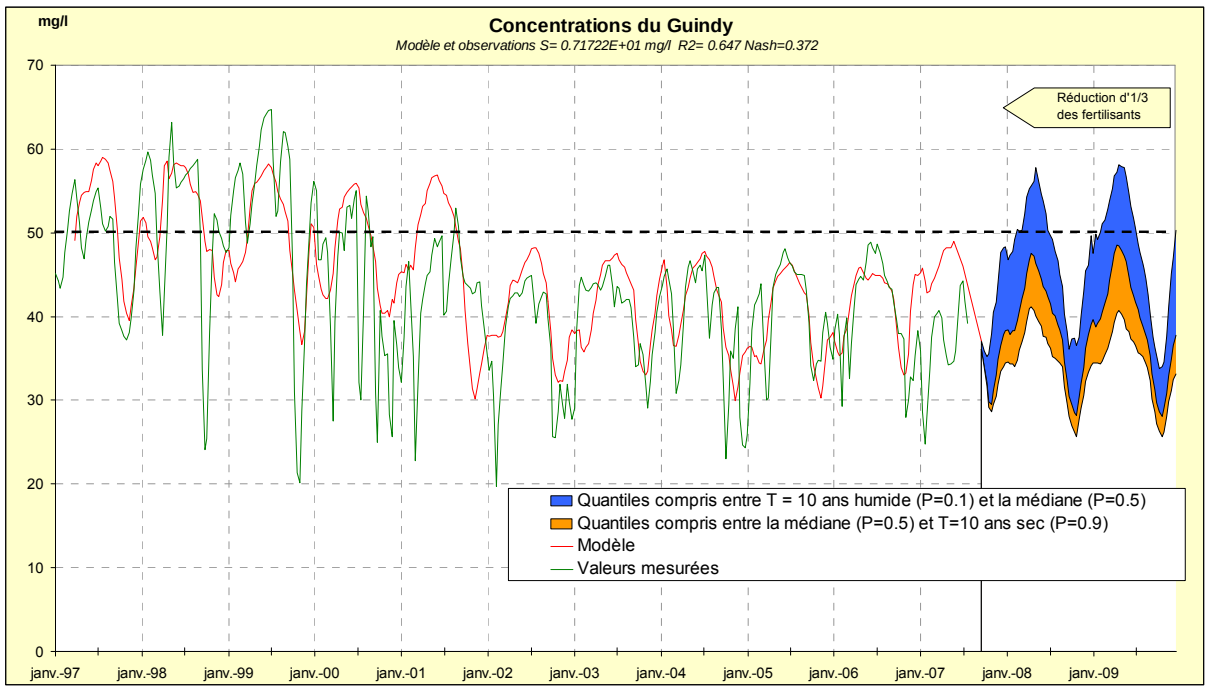


Illustration 59- Bassin du Guindy: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile

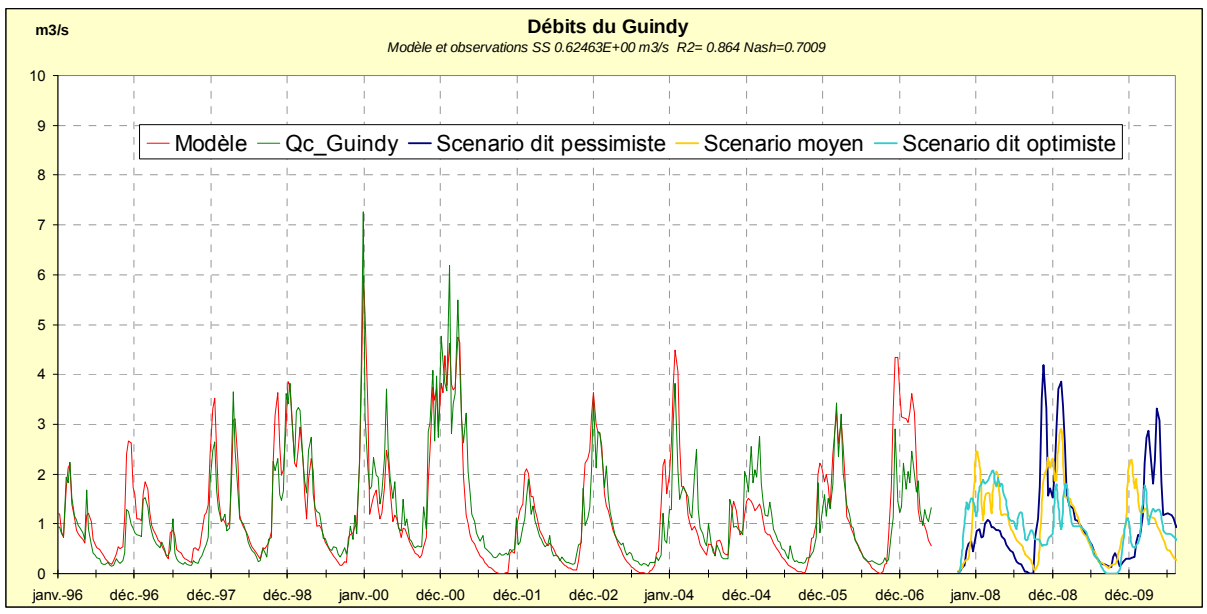


Illustration 60 – Bassin du Guindy: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario

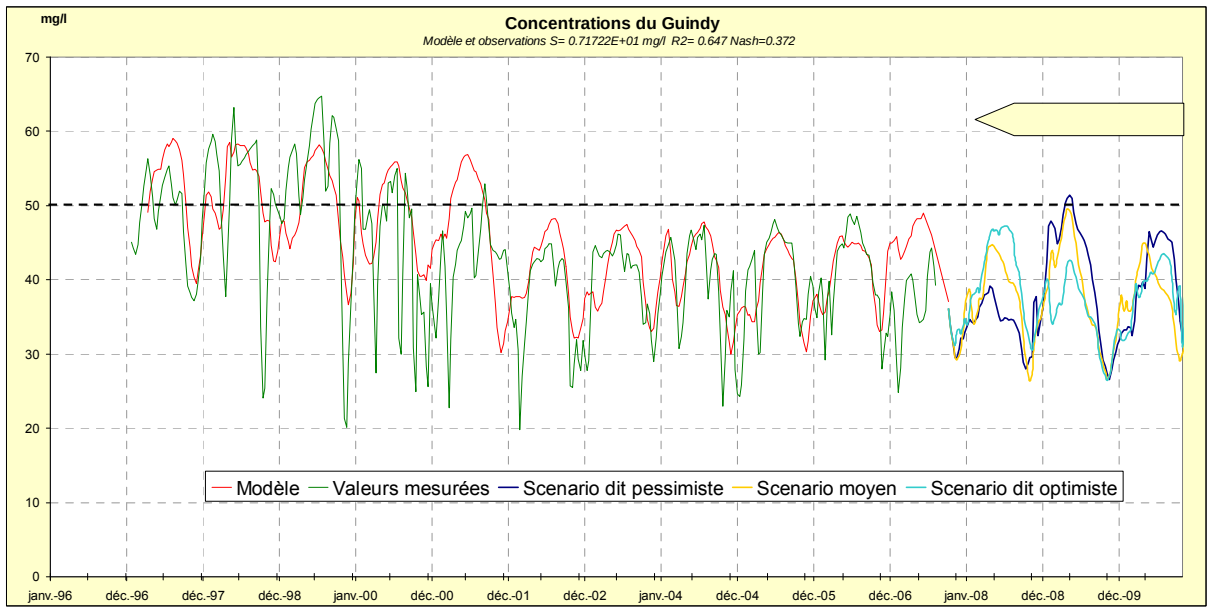


Illustration 61 - Bassin du Guindy: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario

4.7. L'ARGUENON A JUGON

Etant donnée la taille du bassin, il était intéressant de modéliser les concentrations à l'amont et à l'aval du bassin. Grâce à la coexistence de données hydrométrique avec des chroniques de concentrations en nitrates en rivière, il a été possible de modéliser à la fois le sous bassin de l'Arguenon à Jugon et la totalité du bassin (débits et concentrations à l'exutoire).

4.7.1. Résultats par quantile

Sur l'Arguenon, comme sur l'Urne, le modèle sous-estime les pics de concentrations observés en 1998 et 1999 (illustration 62). A contrario, l'évènement de 2001 est surestimé.

Le modèle retranscrivant fidèlement les autres pics de concentrations, il semble que sur la période 1998-2001, un changement des pratiques agricoles non connu par le modèle (les apports azotés sont supposés constants sur cette période) soit à l'origine de ces sous et surestimations.

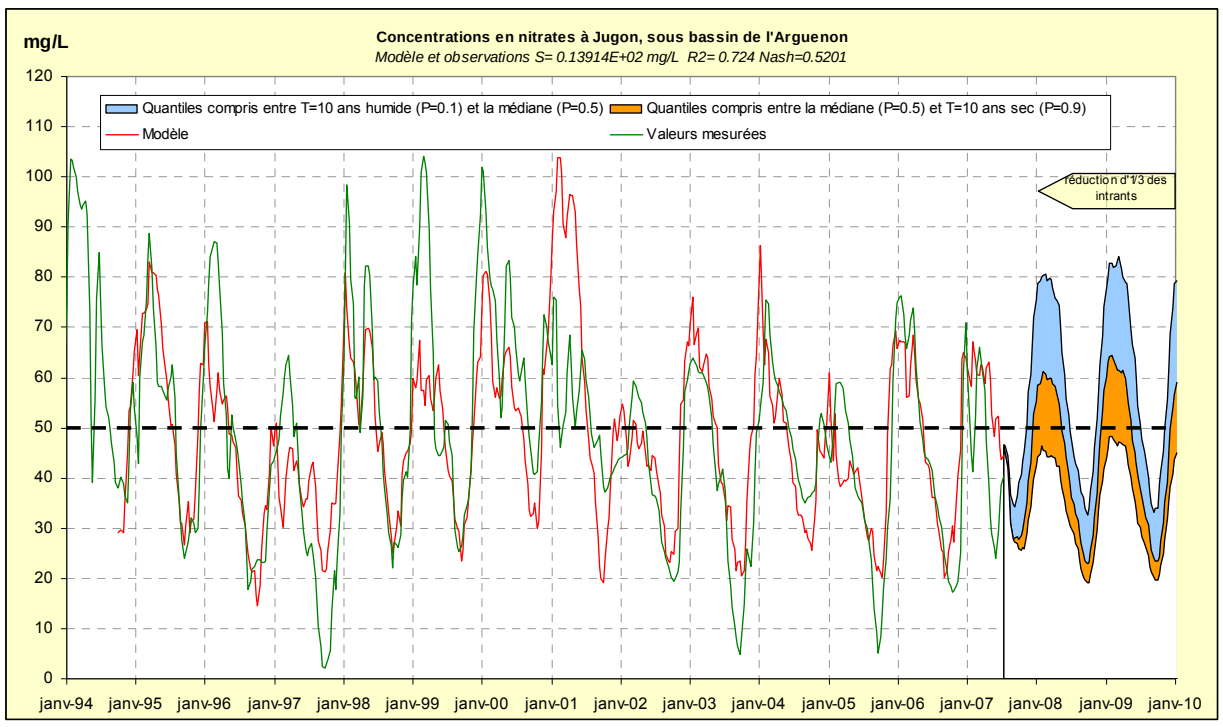


Illustration 62 – L'Arguenon à Jugon: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile

4.7.2. Résultats par scénario

Les résultats sont présentés par les illustrations 63 et 64.

C'est sur ce bassin que la contribution des eaux souterraines aux débits est la plus faible. C'est aussi celui où les concentrations sont les plus influencées par la pluviométrie. La différence entre les concentrations simulées à une date t peut atteindre 40 mg/L entre deux scénarios pluviométriques.

Sur ce bassin, les pics de concentrations sont souvent doubles. Le 2ème pic observé est probablement l'effet direct du drainage (selon le Conseil Général des Côtes d'Armor, 5 à 10% de la superficie du BV est constitué de zones drainées).

Le sous-bassin de l'Arguenon pourra atteindre le retour à la conformité seulement dans le cas d'un scénario pluviométrique optimiste.

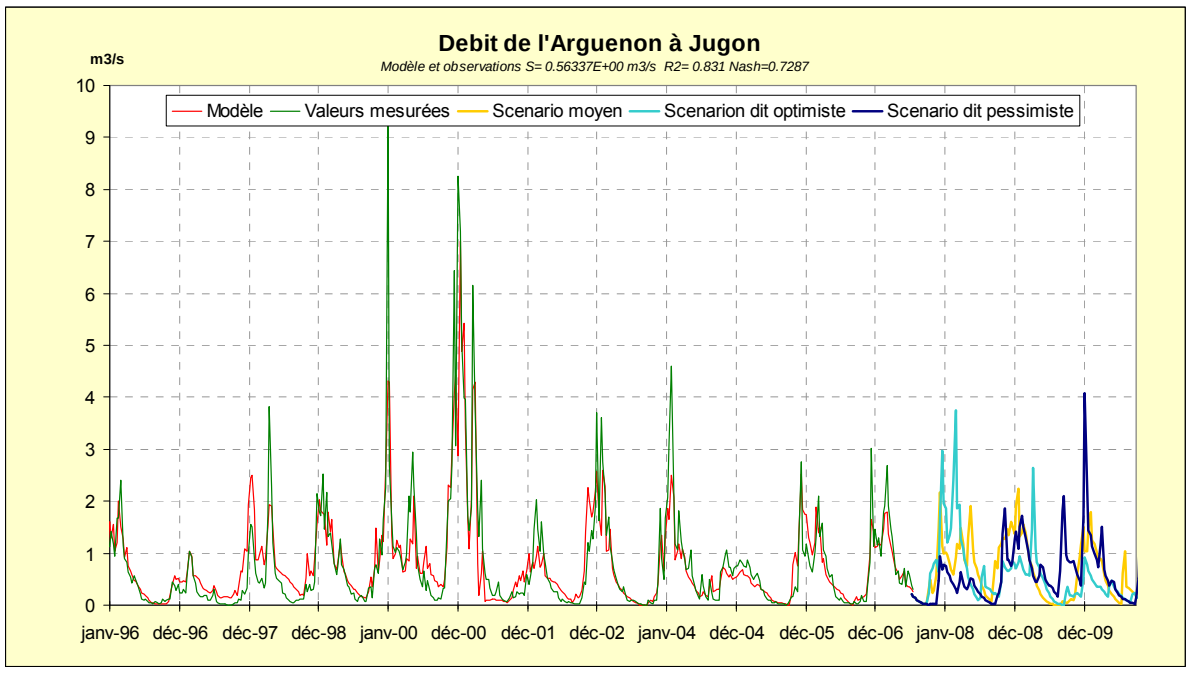


Illustration 63 - L'Arguenon à Jugon: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario

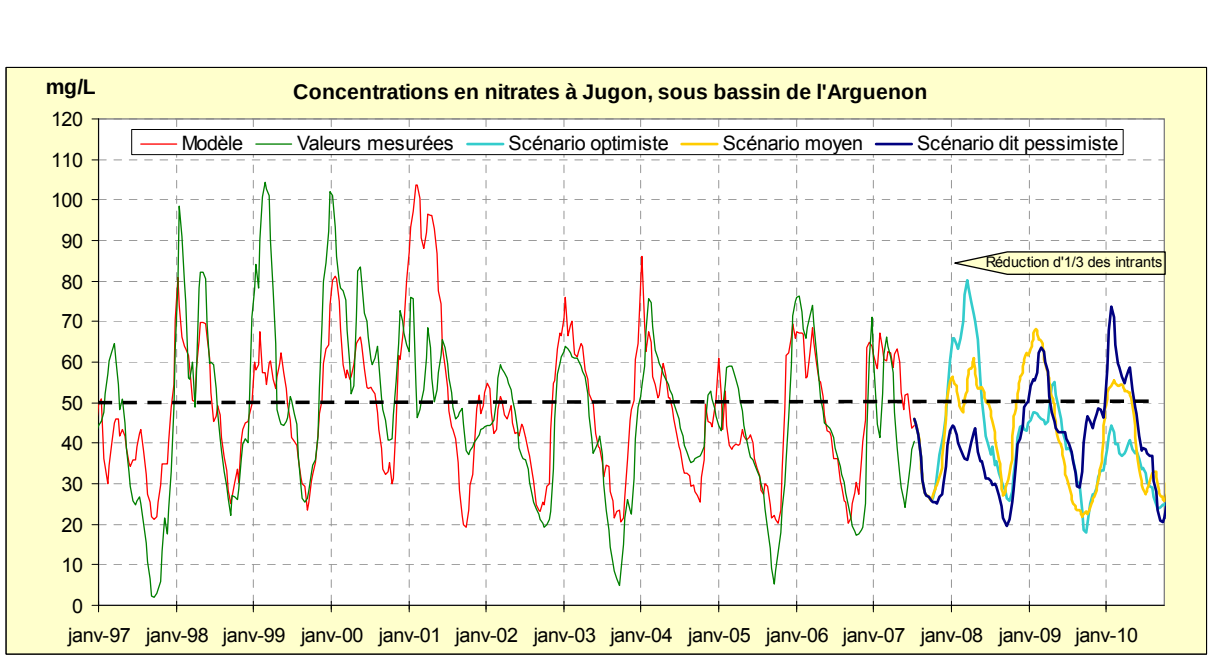


Illustration 64 - L'Arguenon à Jugon: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario

4.8. L'ARGUENON A L'EXUTOIRE

4.8.1. Résultats par quantile

Ce bassin présente bien sûr de grandes similitudes avec le sous-bassin à Jugon.

Les concentrations en nitrates à l'exutoire sont inférieures aux concentrations à Jugon (illustration 65)

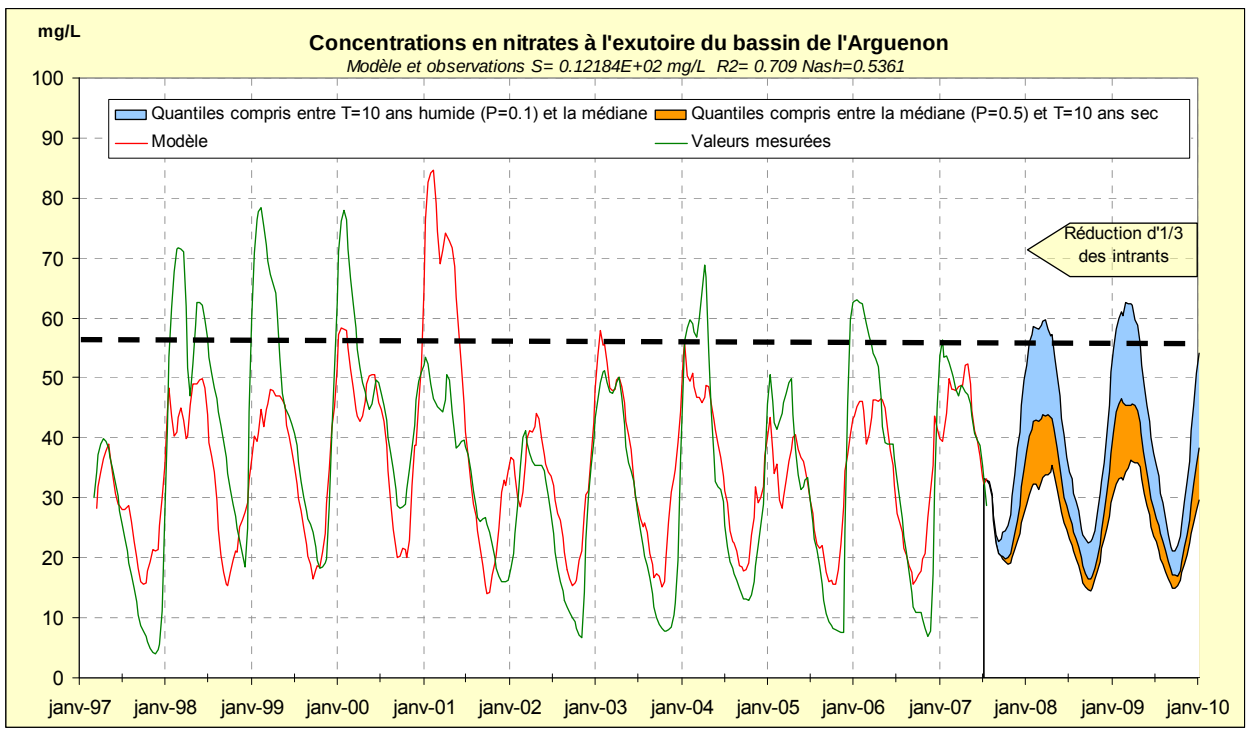


Illustration 65 – Arguenon à l'exutoire: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par quantile

4.8.2. Résultats par scénario

Les résultats sont présentés par les illustrations 66 et 67.

Même si l'influence de la pluviométrie est conséquente sur ce bassin, quelque soit le scénario choisi, les concentrations se maintiennent en dessous des 50 mg/l.

Sur le bassin de l'Arguenon, le retour prochain à la conformité est probable suite à une réduction de 1/3 des intrants.

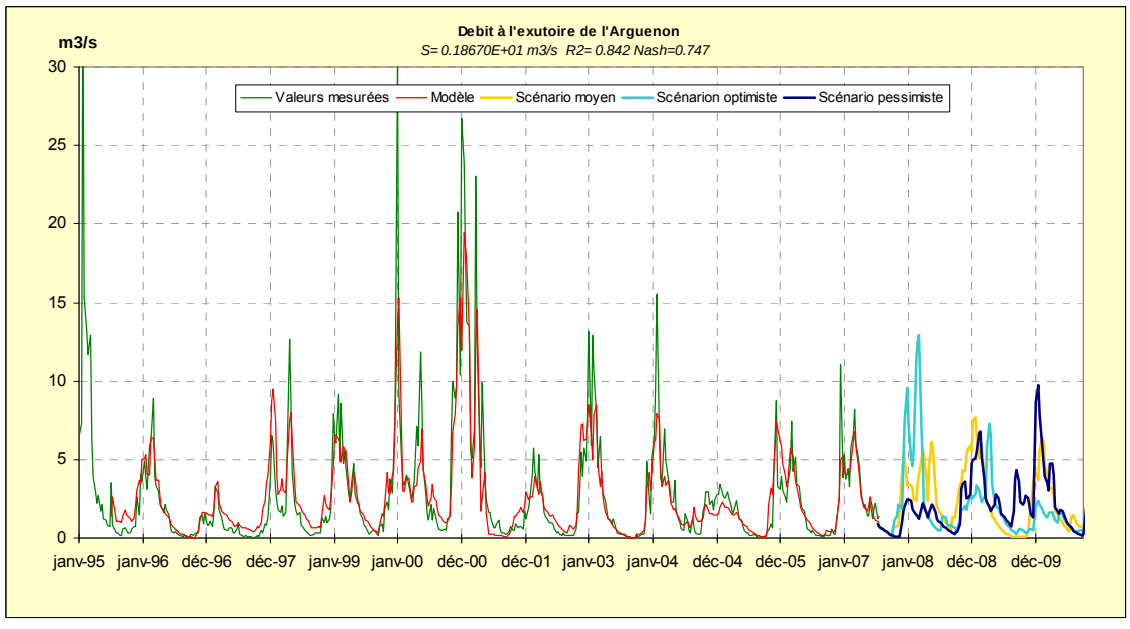


Illustration 66 - Arguenon à l'exutoire: résultats du calage sur les débits et simulations prévisionnelles par scénario

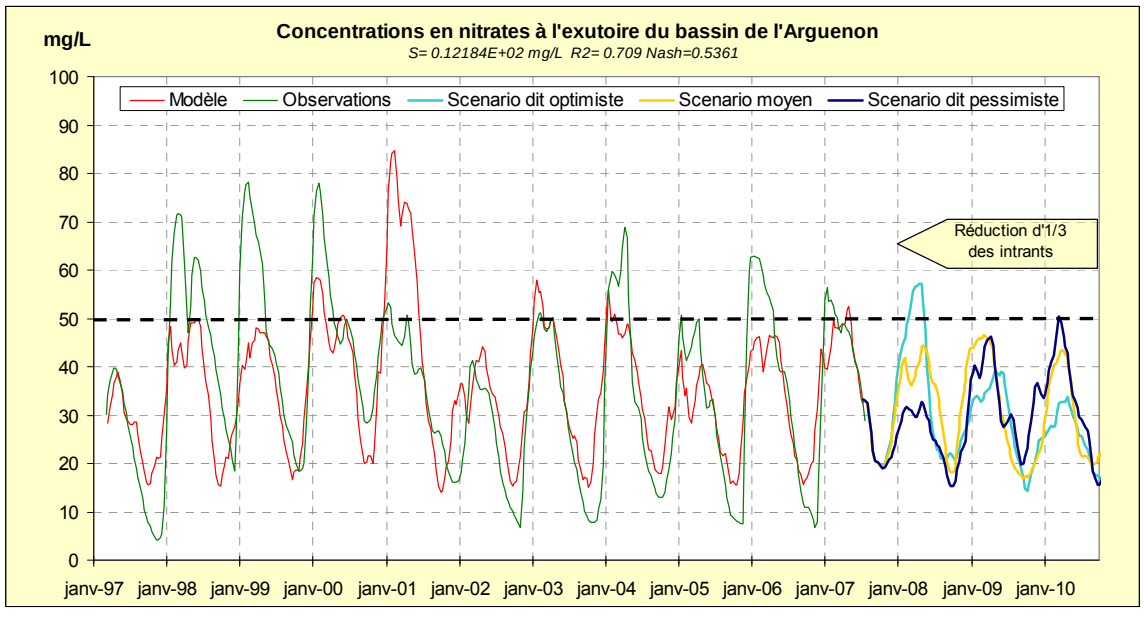


Illustration 67 - Arguenon à l'exutoire: résultats du calage sur les concentrations et simulations prévisionnelles par scénario

4.9. L'IC

Les débits de l'Ic ont été reconstitués, parfois à partir de valeurs mensuelles et ne sont donc pas toujours très fiables, surtout en période de crue. Il est en effet difficile de retrouver une chronique décadaire de crue à partir de valeurs mensuelles. Le fait que le modèle retranscrive mal les pics de crue est donc explicable car les pluies ne peuvent expliquer les erreurs faites lors de la reconstitution des débits (illustration 68).

Le modèle retranscrit globalement les variations des concentrations à l'exutoire du bassin de l'Ic (illustration 69). Néanmoins, les fluctuations rapides et les forts pics des hivers 1998, 1999 et 2000 sont mal reproduits.

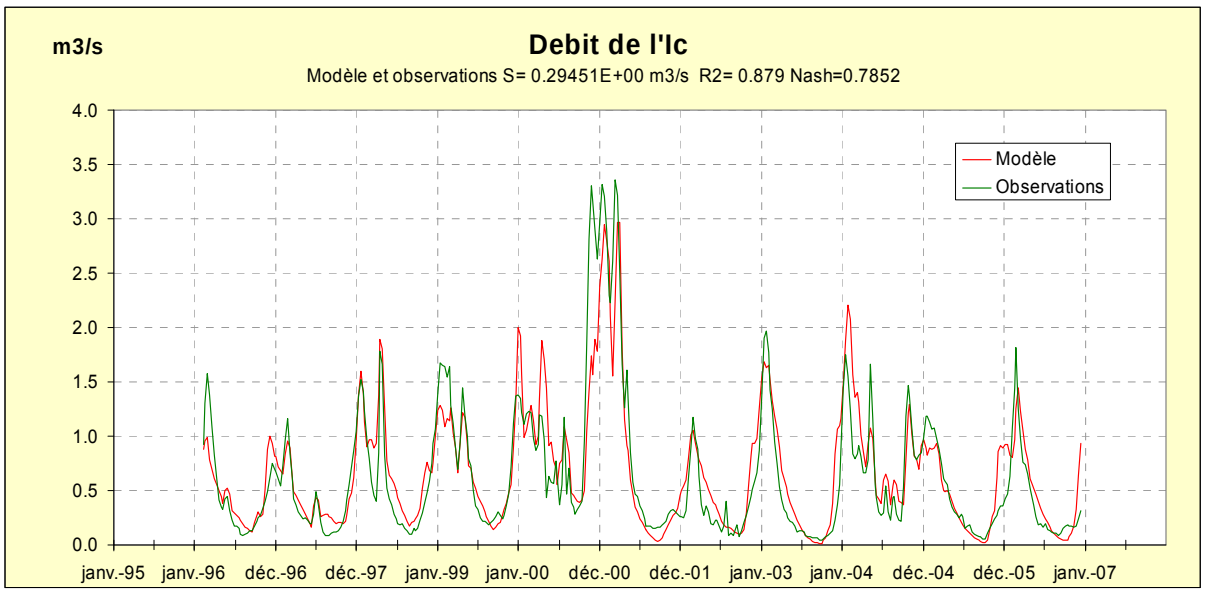


Illustration 68 – Bassin de l'Ic: résultats du calage sur les débits

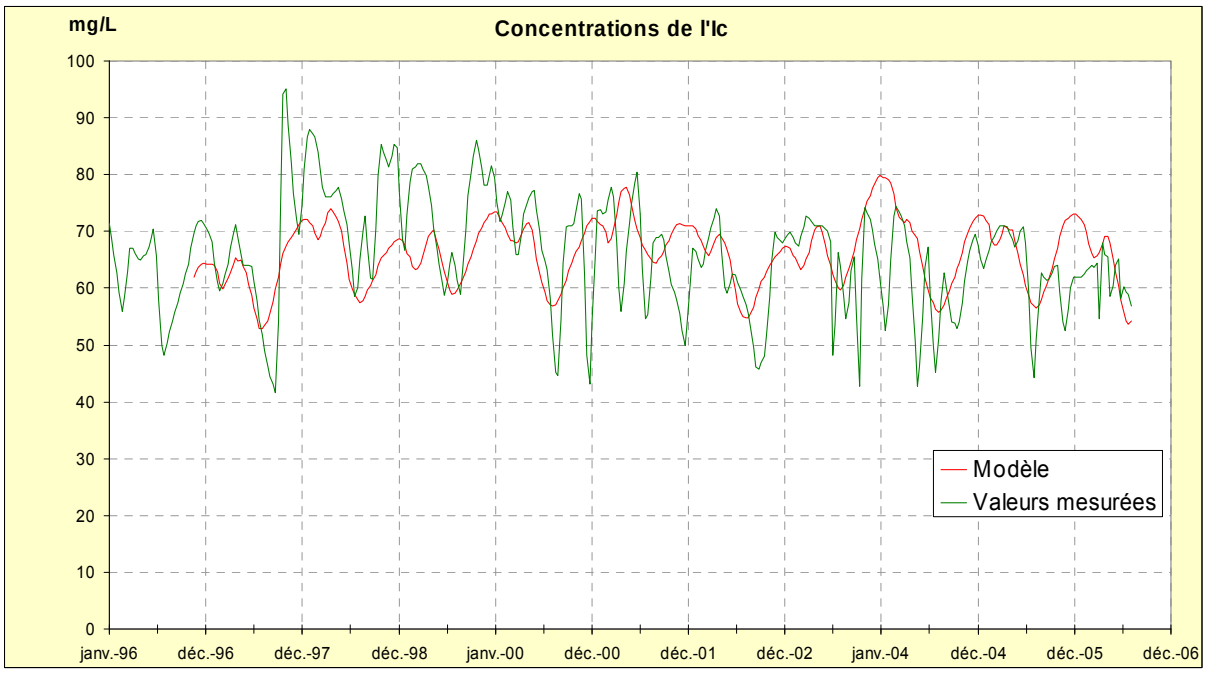


Illustration 69- Bassin de l'Ic: résultats du calage sur les concentrations

La modélisation des débits et des concentrations à partir de 2006 et les simulations nécessitent l'acquisition de données de débits non communiquées au jour de la rédaction de ce rapport.

4.10. LES ECHELLES ET LE BIZIEN

Ces bassins n'ont pu être traités dans les délais impartis faute de données.

Aucune donnée hydrométrique n'est disponible sur le bassin versant du Bizien.

Les chroniques des concentrations en nitrates sont trop courtes et peu fiables (notamment avant 2000 et depuis 2005) sur le bassin des Echelles.

A titre d'exemple sont représentées ici les concentrations en nitrates sur les Echelles. Depuis 2005, les mesures sont effectuées par colorimétrie avec une marge d'erreur de + ou – 10mg/L.

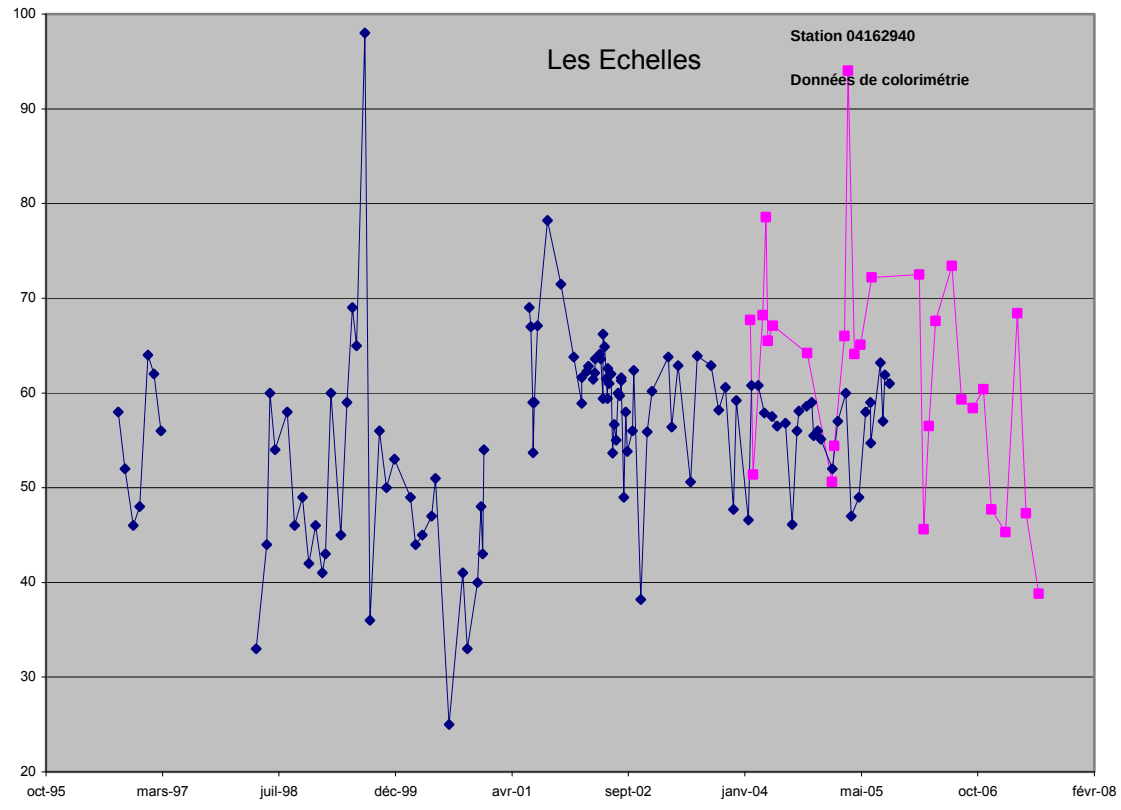


Illustration 70- Concentrations (en mg/L) sur le bassin des Echelles

5. Conclusion

La gestion des ressources en eau implique la prise en compte des eaux souterraines qui interviennent de façon non négligeable, voire prépondérante, dans l'alimentation des rivières et dans le transfert des éléments dissous.

Dans le cadre de la présente étude, le BRGM a travaillé dans un premier temps sur une caractérisation géologique, hydrogéologique et chimique des 9 bassins versants en contentieux « nitrates eaux brutes ». Ce travail a permis de classer les bassins selon : la vitesse/lenteur de circulation des eaux souterraines dans le sous-sol, la participation de ces eaux au débit des rivières, la qualité chimique des eaux souterraines des bassins lors de l'été 2007.

Ce volet de l'étude permet d'avancer des explications sur les différents temps de réaction des bassins suite à une réduction de 1/3 des apports azotés.

Dans un deuxième temps, grâce à une adaptation du logiciel TEMPO, des modélisations, privilégiant une approche « traitement du signal », ont été réalisés sur 6 des 9 bassins en contentieux. Les concentrations en nitrates au droit des prises d'eau potable ont été reconstituées, et suite à ce travail de calage, des simulations prévisionnelles ont été tentées.

Les simulations des concentrations en nitrates, consécutives à une réduction de 1/3 des intrants azotés, montrent que :

- sur 2 bassins, les teneurs passent sous les 50 mg/l d'ici 2009 (Gouessant et Arguenon à Pléven) ;
- sur 3 bassins, la probabilité d'atteindre la conformité est forte. On observe des pics de dépassement en cas d'années très humides (Urne, Aber Wrac'h et Guindy) ;
- sur 1 bassin, les teneurs restent au dessus des 50 mg/l (Horn).

Au niveau des 3 bassins restants, les données sont soit absentes (débit du Bizien) soit incomplètes (débit de l'Ic en 2007) soit inutilisables (concentrations en nitrates sur le bassin des Echelles d'octobre 2005 à août 2007).

Le BRGM a utilisé l'ensemble des données disponibles au 15 octobre 2007 pour arriver à ces conclusions. Des compléments d'informations et de données, à fournir notamment par l'INRA, pourraient être disponibles d'ici juin 2008. Ils devraient permettre d'affiner les modélisations que l'on peut encore considérer aujourd'hui comme perfectibles.

6. Bibliographie

1) Hydrogéologie de la Bretagne

CARN A. - Etude du gisement aquifère. Chapitre 3. In Contribution à l'étude hydrogéologique des volcanites du Trégor. Thèse : Sciences Naturelles. Soutenue le 24 Mai 1983 à Montpellier 172 p.

DDAF des Côtes d'Armor - Résultats des recherches en eau souterraine sur le site de Caribet - Commune de Ploeuc-sur-Lié - Janvier 1989 (0279-2X-0036 à 47)

Feuilles géologiques à 1/50 000 : n°201 ST-POL-DE-LEON, 204 PONTRIEUX, 243 ST-BRIEUC, 247 ST-HILAIRE, 279 MONCONTOUR, 280 BROONS

GEOARMOR - Recherche d'eau souterraine - Ets STALAVEN St-Brieuc - Phase du forage d'exploitation - Octobre 1982 (0243-6X-0019)

LACHASSAGNE, P., WYNS R., BÉRARD P., BRUEL T., CHÉRY L., COUTAND T., DESPRATS J.-F., LE STRAT P. (2001) - Exploitation of high-yields in hard-rock aquifers: downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones - Groundwater, vol. 39, (4), p. 568-581

MOUGIN B., collaboration : CARN A., JEGOU J-P. et QUEMENER G. (2006) - SILURES Bretagne - Rapport d'avancement de l'année 4 - BRGM/RP-55001-FR - 61 p., 23 ill., 5 ann.

B. MOUGIN, E. THOMAS, R. WYNS, R. BLANCHIN et F. MATHIEU (2004) - Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse - Bassins versants du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56) - Rapport final - BRGM/RP-52731-FR - 82 p., 16 tab., 21 fig., 3 annexes, 39 planches

RABU D., CHANTRAINE J. et BECHENNEC F., 2001. Carte géologique du Massif Armoricain à 1/ 250 000. BRGM.

TALBO H. et CARN A. (avril 1993) – Valorisation des ressources en eau du socle breton – Les phénomènes de dénitrification naturelle en sous-sol – Rapport BRGM R37290 BRE-SGN 93.

WYNS, R. (1998) - Ressources en eau de la Margeride ouest - PRD 324 - Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin-versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif Central). Rapport BRGM R 40191, 18 p., 9 fig., 4 pl. hors-texte.

WYNS, R., BALTASSAT J.M., LACHASSAGNE P., LEGCHENKO A., VAIRON J., (2004) - Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France).- Bull. Soc. Géol. Fr., t. 175, (1) (accepté)

2) Logiciel Tempo

Pinault J.L. (2007) – Manuel utilisateur de Tempo. Logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie.

3) Etudes réalisées avec le logiciel TEMPO

Delay F., Dupuit A., Porel G. (2007) - Expertise des travaux effectués par le BRGM pour le compte de la DIREN Poitou-Charentes et annexés au rapport : RP-54569 FR : "Recherche d'indicateurs piézométriques pour la gestion des prélèvements en nappe (Phase 1: bassins de la Dive-Nord, du Clain, de la Sèvre Niortaise, de la Boutonne et de la Seudre)"

PINAULT, J.L., Allier, D., Chabart M. (2007) - Prévision des volumes d'eau exploitables de 10 bassins versants en Champagne crayeuse.
Rapport BRGM 55087-FR

PINAULT, J.L., and F. BERTHIER (2007) - A methodological approach to characterize the resilience of aquatic ecosystems with application to Lake Annecy, France, Water Resour. Res., 43, W01418, doi:10.1029/2006WR005125.

PINAULT, J.L., and S. SCHOMBURGK (2006), Inverse modeling for characterizing surface water/groundwater exchanges, Water Resour. Res., 42, W08414, doi:10.1029/2005WR004587.

PINAULT, J.L., N. AMRAOUI, and C. GOLAZ (2005), Groundwater-induced flooding in macropore-dominated hydrological system in the context of climate changes, *Water Resour. Res.*, 41, W05001, doi:10.1029/2004WR003169

PINAULT, J.L., N. DOERFLIGER, B. LADOUCHE, and M. BAKALOWICZ (2004), Characterizing a coastal karst aquifer using an inverse modeling approach: The saline springs of Thau, southern France, Water Resour. Res., 40, W08501, doi:10.1029/2003WR002553.

PINAULT J.L., PAUWELS H. and CANN Ch. (2001) - Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Application to nitrate transport and denitrification, Water Res. Research, 37 (8), pp 2179-2190.

PINAULT J.L., PLAGNES V, AQUILINA L. and BAKALOWICZ M. (2001)- Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Characterization of karst system functioning, Water Res. Research, 37 (8), pp 2191-2204, 2001.

LACHASSAGNE P, PINAULT J.L., LAPORTE P. (2001) - Radon 222 emanometry: a relevant methodology for water well siting in hard rock aquifers, Water Res. Research, 37 (12), pp 3131-3148, 2001.

PINAULT J.L., BAUBRON J.C. (1997) - Signal processing of diurnal and semidiurnal variations in radon and atmospheric pressure: A new tool for accurate in situ measurement of soil gas velocity, pressure gradient, and tortuosity, Journal of Geophysical Research, Vol. 102, N° B8, pp 18,101-18,120, 1997

PINAULT J.L., BAUBRON J.C., (1996) - Signal processing of soil gas radon, atmospheric pressure, moisture and soil temperature data: A new approach for radon concentration modelling, Journal of Geophysical Research, Vol. 101, N° B2, pp 3157-3171, 1996

4) Autres références

KAUARK LEITE L. A. Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole, Th Doctorat, Ecole nationale des Ponts et Chaussées ; 1990

HAITJEMA H.M. (1995) - On the residence time distribution in idealized groundwatersheds, Journal of Hydrology, Vol 172, pp 127-146, 1995

B. MARY, N. BEAUDOIN, E. JUSTES and J.M. MACHET, Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model, European Journal of Soil Science, Vol 50, pp 549-566, 1999

SEGUIN J.J. (1988), Modélisation globale des transferts de nitrates dans un basin hydrogéologique pour prévoir l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines. Le modèle BICHE: analyse de sensibilité.
Rapport BRGM 88 SGN 369 EEE.

TODD H., SKAGGS, Z.J. KABALA, JURY W.A. (1998) - Deconvolution of a nonparametric transfer function for solute transport in soils, Journal of Hydrology, Vol 207, pp 170-178.

VALE M. (2006) - Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol in situ, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français, Th. Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse.

ZUBER A. (1986) - On the interpretation of tracer data in variable flow systems, Journal of Hydrology, Vol 86, pp 45-57.

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

Service géologique régional Bretagne
Rennes Atalante Beaulieu
2, rue de Jouanet
35700 – Rennes – France
Tél. : 02 99 84 26 70

Document public

Bassins versants bretons en contentieux européen : typologie et modélisation de l'évolution des concentrations en nitrates

Rapport d'avancement au 15 octobre

ANNEXES

BRGM/RP-55842-FR
octobre 2007

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Bassins versants bretons en contentieux européen : typologie et modélisation de l'évolution des concentrations en nitrates

Rapport d'avancement au 15 octobre

ANNEXES

BRGM/RP-55842-FR
octobre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007 EAU B44

D. Allier, E. Putot, B. Mougin, J-J. Seguin, J-M. Schroetter, R. Blanchin
Avec la collaboration de
J-L. Izac, J-P. Jégou

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document à accès réservé

« Ce rapport est adressé en communication exclusive aux demandeurs : (MEDAD/DE et Préfecture de Région/MIRE), en 7 exemplaires conformément aux termes de la convention.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial prévus pour la Commission Européenne, le SGAE, le MAP, la DIREN Bretagne, l'INRA.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait, et, des éventuelles conséquences pouvant en résulter ».

Liste des annexes

Annexe 1 - Interpolation par la géostatistique

Annexe 2 - Planches cartographiques

Annexe 3 - Le générateur de pluie et d'ETP du logiciel TEMPO

Annexe 1

Interpolation par la géostatistique

Interpolation par la géostatistique

Les formations lithologiques présentent un comportement global que l'on pourrait modéliser par une approche déterministe, néanmoins elle présentent aussi des variations et des irrégularités locales qui échappent à toute représentation fonctionnelle simple et qu'il est plus rigoureux de modéliser par une approche probabiliste.

La géostatistique est une théorie et une méthodologie, fondée sur l'analyse statistique des corrélations spatiales, pour étudier les variables dites régionalisées c'est à dire dont l'évolution dans l'espace (et/ou le temps) présente un caractère à la fois aléatoire et structuré.

Deux raisons majeures justifient la mise en œuvre d'une approche géostatistique :

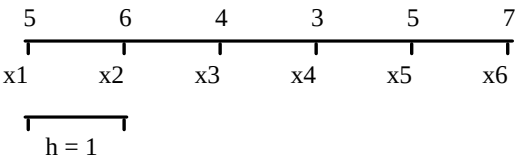
- Elle permet de caractériser la variabilité spatiale du phénomène que l'on étudie, à savoir le comportement des formations retenues. L'outil utilisé est **le variogramme** qui synthétise la structure de la variable. Pour une direction donnée, il indique comment varie l'écart des valeurs prises en 2 points X et X+h en fonction de la distance h. Il renseigne sur les anisotropies éventuelles et sur le degré de régularité de la variable.

- Elle permet de résoudre le problème de l'interpolation optimale, c'est à dire de l'estimation optimale d'une valeur Z(xo) inconnue à partir des informations disponibles. L'interpolateur utilisé est le **krigeage**, seule technique qui fournit simultanément la valeur estimée et l'erreur associée caractérisée par l'écart-type de krigeage.

Le variogramme

Dans un phénomène naturel comme la topographie, les cotes mesurées en différents points, bien que variables d'un point à l'autre, ne sont pas indépendantes de leur localisation. La différence de cote Z entre deux points x et x + h est d'autant plus faible que la distance h qui les sépare est petite. D'un point de vue statistique, il y a une corrélation spatiale entre les données. Cette corrélation est d'autant plus forte que les points expérimentaux sont rapprochés et que le phénomène est continu et régulier. Pour quantifier le degré de corrélation spatiale, ou plutôt la détérioration de cette corrélation avec la distance, la géostatistique fait appel à la fonction variogramme $\gamma(h)$. Cette fonction donne, en fonction de la distance h qui sépare deux points, la valeur moyenne de $1/2[Z(x+h)-Z(x)]^2$.

La figure ci-dessous illustre ce calcul.



$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{1}^{N(h)} \left[Z(x) - Z(x+h) \right]^2}{N(h)}$$

avec : h = distance ; Z(x) = valeur au point x

et : N(h) = nombre de couples de points distants de h

à la distance h=1 (5 couples de points distants de la distance 1) :

$\gamma(1)$ = 1/2 Moyenne$[Z(x_{i+1})-Z(x_i)]^2$

= 1/2 [$(Z(x_2)-Z(x_1))^2$ + $(Z(x_3)-Z(x_2))^2$ + … +$(Z(x_6)-Z(x_5))^2$] / 5

= 1/10 . [$(6-5)^2$ + $(4-6)^2$ + … +$(7-5)^2$] = 1.4

à la distance h=2 (4 couples de points distants de la distance 2) :

$\gamma(2)$ = 1/2 Moyenne$[Z(x_{i+2})-Z(x_i)]^2$

= 1/2 [$(Z(x_3)-Z(x_1))^2$ + $(Z(x_4)-Z(x_2))^2$ + $(Z(x_5)-Z(x_3))^2$ +$(Z(x_6)-Z(x_4))^2$] / 4

= 1/8 . [$(4-5)^2$ + $(3-6)^2$ + $(5-4)^2$ +$(7-3)^2$] = 3.375

etc…

Principe de calcul du variogramme

Le variogramme est d'abord un outil d'analyse des phénomènes naturels. En effet, l'allure et le comportement du variogramme expérimental fournissent une image synthétique des principaux traits structuraux du phénomène étudié :

- **Continuité à l'origine.** En principe Z(x) et Z(x+h) sont égaux quand h tend vers 0. En pratique toutefois, ceci n'est pas toujours vérifié. En effet il peut exister une discontinuité apparente à l'origine, qui peut être liée soit à une erreur de mesure, soit à des variations à « petites distances », en tout cas à des distances inférieures à la maille d'échantillonnage. Cette discontinuité à l'origine est appelée « effet de pépite ». Elle traduit la part de variabilité du phénomène que l'on ne peut expliquer soit en raison de la maille d'échantillonnage, qui ne permet pas de mettre en évidence des variabilités locales, soit en raison d'erreurs de mesure. La figure A (b) ci-dessous montre un exemple d'effet de pépite.

- **Continuité spatiale au delà de l'origine**, traduite par les observations suivantes :
  - **portée** (distance de corrélation), phénomène stationnaire - figure A (a) ci-dessous ; classiquement la valeur du variogramme est plus faible à l'origine (Z(x) et Z(x+h) sont voisins quand h est faible, donc la valeur du variogramme est faible) et augmente quand la distance augmente. Au bout d'une certaine distance entre points de mesure, la différence entre Z(x) et Z(x+h) n'augmente plus statistiquement, car les points ne sont plus corrélés. Cette distance limite est appelée portée (distance maximale jusqu'à laquelle

des points peuvent être corrélés). A partir de cette distance, la valeur du variogramme se stabilise autour d'un palier,

- **anisotropie,**
- **imbrication d'échelles de variabilité,**
- **absence de portée finie** - figure A (b) ci-dessous, dérive ou tendance régionale, phénomène non stationnaire.

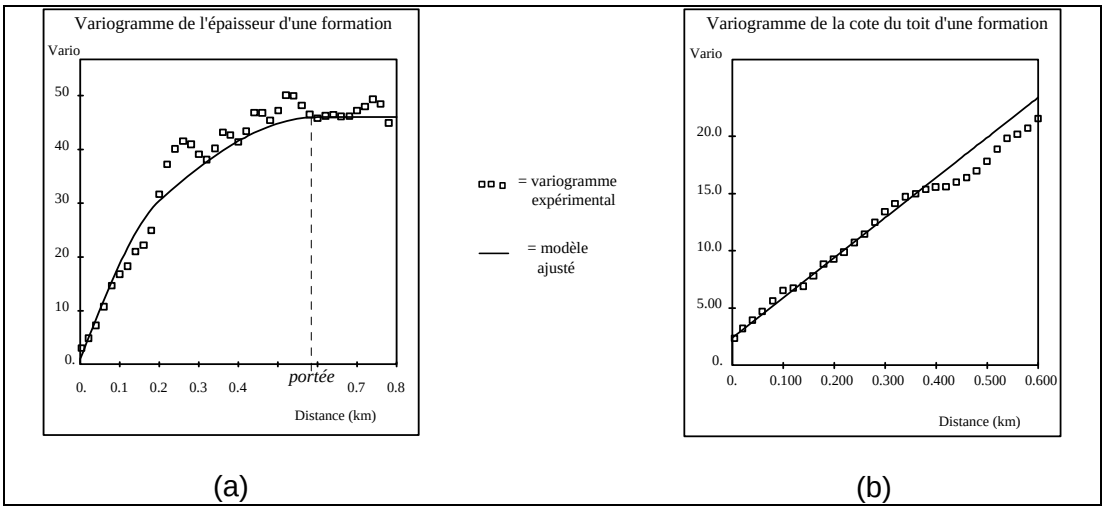


Fig. A : Exemples types de variogrammes : (a) : variable stationnaire avec portée visible, (b) : variable non stationnaire, sans portée.

Le krigeage

La méthode d'interpolation spécifique à la géostatistique est le krigeage. Par rapport aux autres méthodes d'interpolation automatique, les algorithmes du krigeage reposent sur une interprétation du phénomène à travers l'étude variographique préalable. Le krigeage présente un double intérêt :

- Il remplace le dessin par un calcul qui permet d'estimer en tout point la valeur la plus probable du paramètre étudié. Cette interpolation prend en compte :
  - la densité et la répartition des données sur le domaine étudié,
  - la plus ou moins grande continuité spatiale modélisée par le variogramme,
  - les diverses erreurs de mesure et incertitudes associées aux données.
- Il quantifie l'incertitude qui entache toute valeur interpolée. Cette incertitude, qui est une mesure de la qualité locale de la carte obtenue, est essentielle dans tous les projets où les risques encourus doivent être connus, et minimisés le cas échéant par de nouvelles mesures.

Formalisme du krigeage « ordinaire »

Le krigeage le plus utilisé est le « krigeage ordinaire ». Il s'agit d'une interpolation par combinaison linéaire des données de base $Z(x_i)$. La valeur interpolée au point x, notée Z*(x), est donnée par :

$$Z^*(x) = \sum_{i=1,n} \lambda_i Z(x_i)$$

Le non biais est assuré à la condition que la somme des poids ou pondérateurs λ_i soit égale à 1 :

$$\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$$

Les pondérateurs sont alors choisis de façon à minimiser la variance d'estimation. Ceci conduit aux équations du krigeage ordinaire suivantes :

$$\sum_{j=1,n} \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x) \qquad \forall i \text{ (n équations)}$$

$$\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$$

n	=	nombre d'informations disponibles,
i, j	=	indices des points de mesure ; i et j varient de 1 à n,
x_i, x_j	=	points de mesure x_i et x_j,
$Z(x_i)$,$Z(x_j)$	=	valeurs mesurées en x_i et x_j,
x	=	volume à estimer (point ou bloc),
λ_i (ou λ_j)	=	pondérateur (ou poids) affecté à la valeur mesurée en x_i,
μ	=	paramètre de Lagrange,
$\gamma(x_i,x_j)$	=	valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h = distance entre x_i et x_j,
$\gamma(x_i,x)$	=	valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h = distance entre x_i et x, si x est un volume, on prend la valeur moyenne de γ entre x_i et ce volume.

Enfin la variance de l'erreur d'estimation, appelée **variance d'estimation** ou **variance de krigeage**, vaut :

$$S_k^2 = \sum_{i=1,n} \lambda_i \gamma(x_i, x) - \bar{\gamma}(x, x) + \mu$$

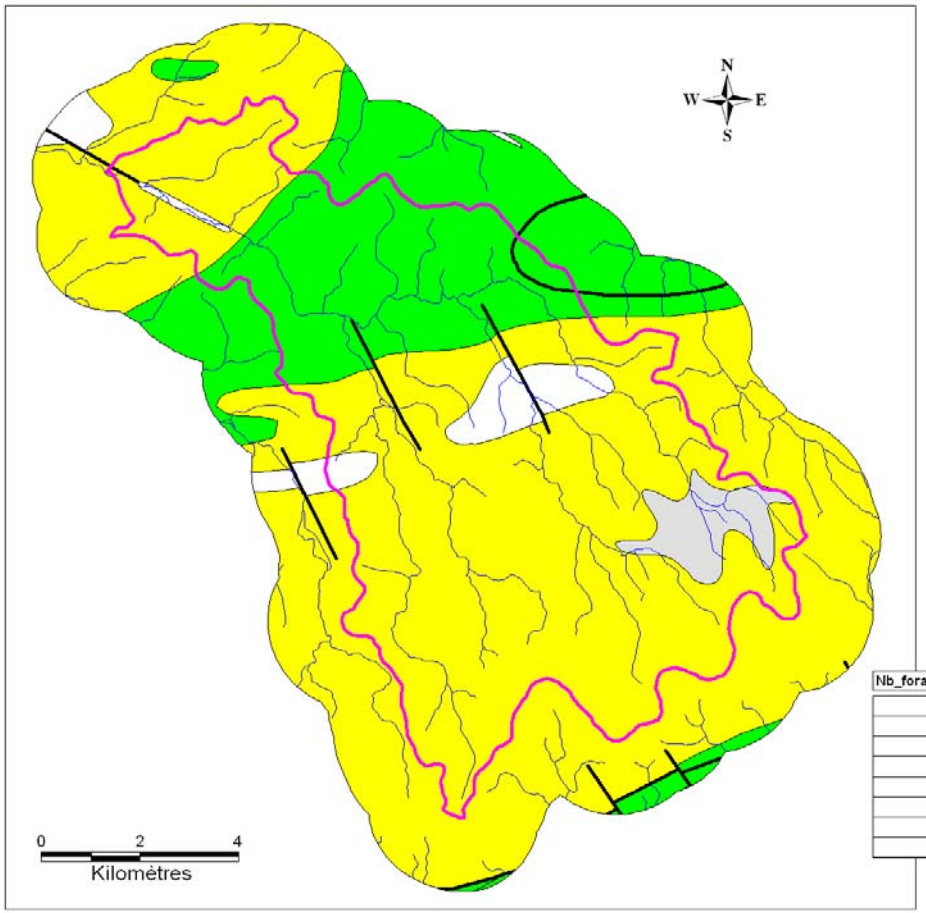
$\bar{\gamma}(x, x)$ est la valeur moyenne du variogramme entre deux points appartenant au volume x. Si le volume se réduit à un point, la distance qui sépare ces points est nulle et on a $\bar{\gamma}(x, x) = 0$.

Dans les expressions ci-dessus on voit que dans le krigeage interviennent :

- les positions des informations x_i par rapport au volume ou au point à estimer x, par le biais des valeurs de $\gamma(x_i,x)$;
- la répartition des informations, par le biais des valeurs de $\gamma(x_i,x_j)$;
- la fonction structurale variogramme γ.

Annexe 2

Planches cartographiques



Légende

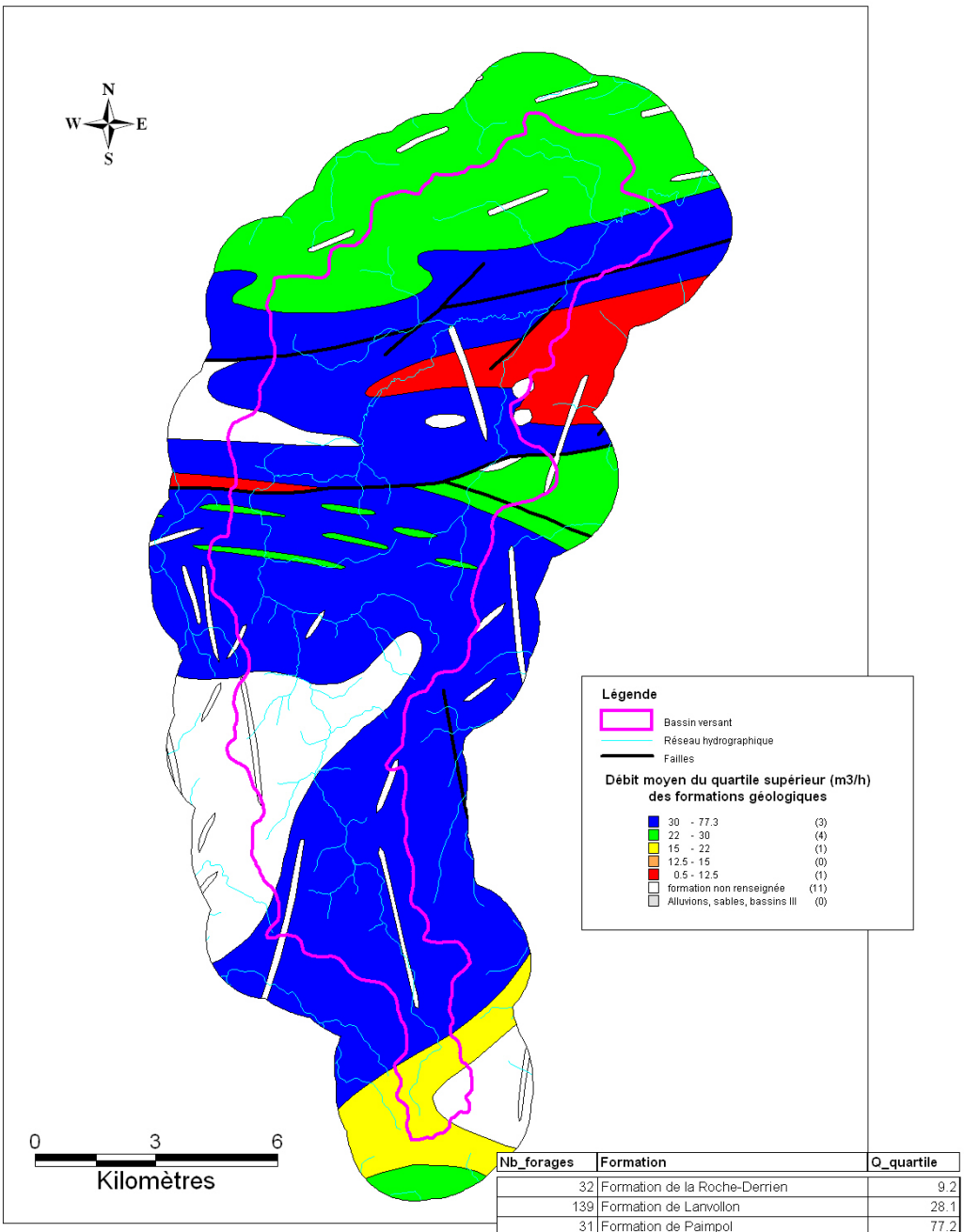
Bassin versant
Réseau hydrographique
Failles

Débit moyen du quartile supérieur (m3/h) des formations géologiques

30 - 77.3	(0)
22 - 30	(6)
15 - 22	(2)
12.5 - 15	(0)
0.5 - 12.5	(0)
formation non renseignée	(3)
Alluvions, sables, bassins tl	(1)

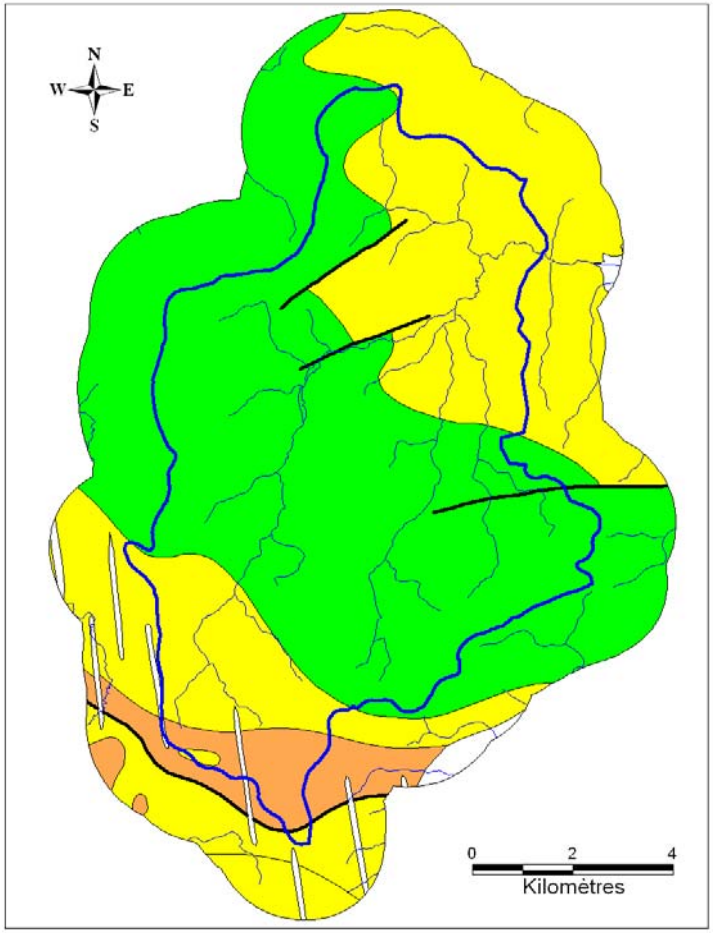
Nb_forages	Formation	Q_quartile
225	Formation de Lesneven	24.7
123	Formations du Conquet et de la Penzé	26.6
87	Groupe de la Roche-Maurice	29.0
114	Massif de Brest	24.3
210	Massif de Kersaint	15.7
96	Massif de l'Aber Ildut	22.5
93	Massifs de Ploudalmézeau et Kernilis	17.9
115	Massifs de Tréglonou et de Plounévez	24.4

Planche 1 - Image de la perméabilité du sous-sol (bassin de l'Aber Wrac'h)



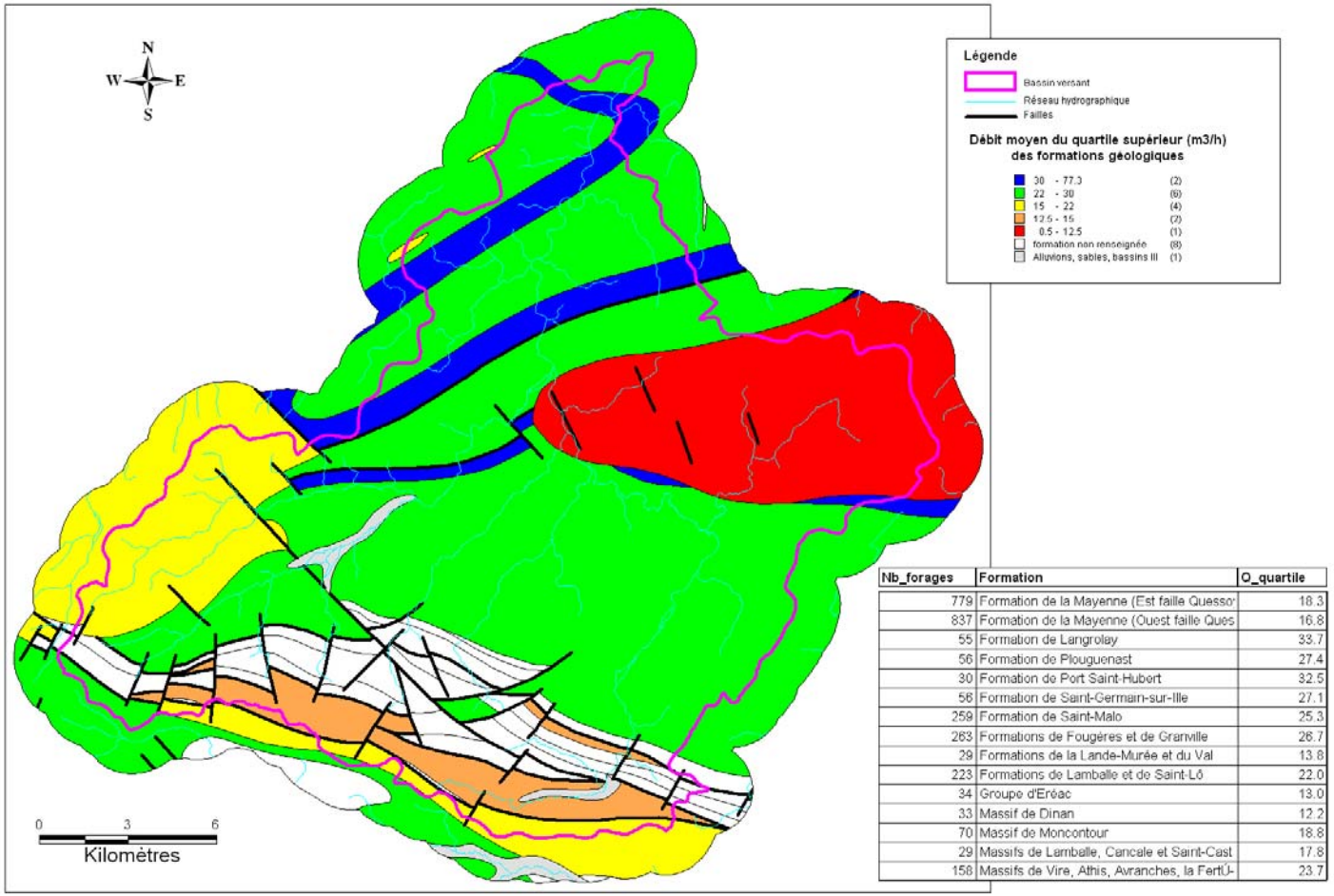
Nb_forages	Formation	Q_quartile
32	Formation de la Roche-Derrien	9.2
139	Formation de Lanvollon	28.1
31	Formation de Paimpol	77.2
33	Formation de Tréguier	38.6
87	Groupe de Plouigneau	29.0
42	Massif de Bégard	64.0
61	Massif nord-trégorrois	26.7
57	Massifs de Plougonven et Keréven	22.4
52	Massifs de Plouisy et de Pabu	16.2

Planche 2 - Image de la perméabilité du sous-sol (bassin du Guindy)



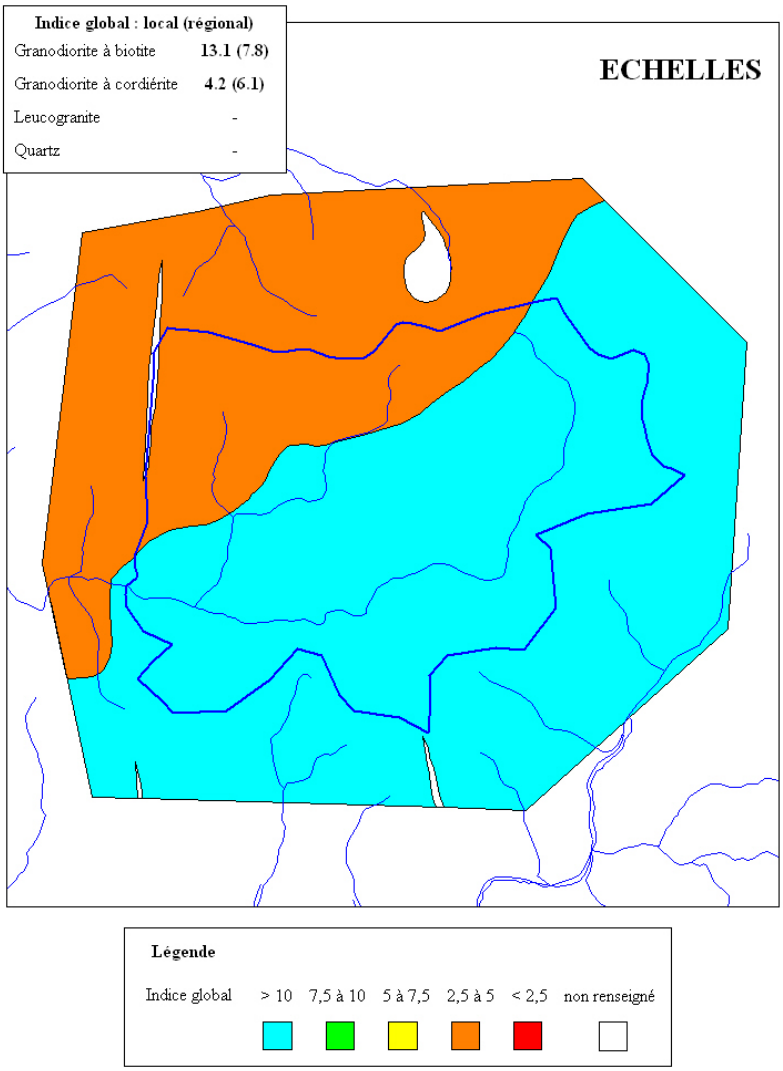
Nb_forages	Formation	Q_quartile
29	Formation de Guingamp	19.6
139	Formation de Lanvollon	28.1
54	Formations de Binic et du Miniard	18.7
31	Massif de Ploufragan	17.6
105	Massif de Quintin	14.8
57	Massifs de Coëtmieux, Plouha et Pontrieux	14.7
56	Massifs de Saint-Quay, Squiffiec et Saint-Al	20.4

Planche 3 - Image de la perméabilité du sous-sol (bassin de l'Ic)



Nb_forages	Formation	Q_quartile
779	Formation de la Mayenne (Est faille Quesso	18.3
837	Formation de la Mayenne (Ouest faille Ques	16.8
55	Formation de Langrolay	33.7
56	Formation de Plouguenast	27.4
30	Formation de Port Saint-Hubert	32.5
56	Formation de Saint-Germain-sur-Ille	27.1
259	Formation de Saint-Malo	25.3
263	Formations de Fougères et de Granville	26.7
29	Formations de la Lande-Murée et du Val	13.8
223	Formations de Lamballe et de Saint-Lô	22.0
34	Groupe d'Eréac	13.0
33	Massif de Dinan	12.2
70	Massif de Moncontour	18.8
29	Massifs de Lamballe, Cancale et Saint-Cast	17.8
158	Massifs de Vire, Athis, Avranches, la FertÚ-	23.7

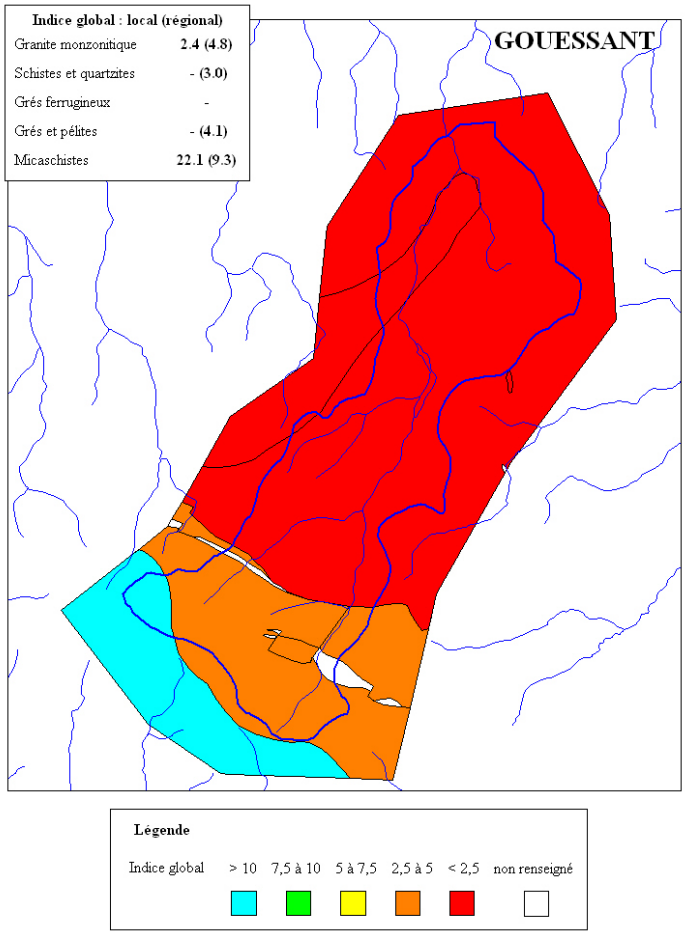
Planche 4 - Image de la perméabilité du sous-sol (bassin de l'Arguenon)



		Statistiques sur la formation géologique								
		Statistiques sur la zone d'étude du bassin versant des Echelles					Statistiques sur la région Bretagne			
Formation géologique	Code géologique	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global	Débit/Profondeur (m3/h/m)	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global
Granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)	G039	105	40.0	32.9	13.1	0.209				
Granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	G039	30	30.0	14.2	4.2	0.160				
Massifs de Bonnemain et Fougères - type Louvigné	G039-G093						153	31.3	25.0	7.8
Massifs de Vire, Athis, Avranches, la Ferté-Macé	G039						158	25.9	23.7	6.1

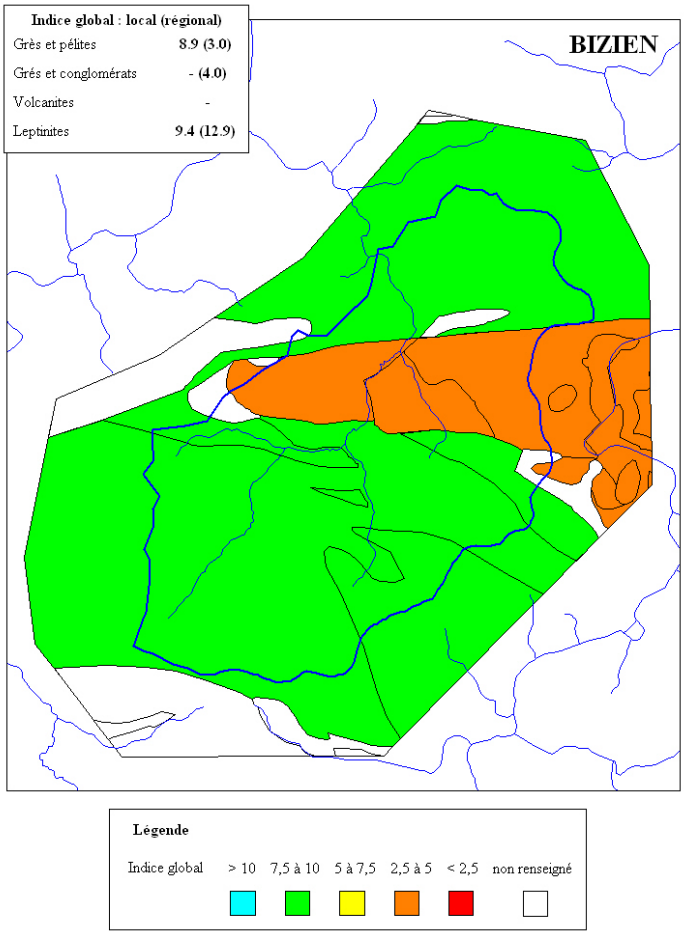
Valeur retenue pour la cartographie de l'indice global de la formation géologique

Planche 5 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle (bassin des Echelles)



		Statistiques sur la formation géologique								
		Statistiques sur la zone d'étude du bassin versant du Gouessant					Statistiques sur la région Bretagne			
Formation géologique	Code géologique	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global	Débit/Profondeur (m3/h/m)	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global
Granite monzonitique à biotite grossier et porphyrique	G093	48	16.7	14.3	2.4	0.094				
Schistes et quartzites (méta-grès ...)	E008-E035	0	-	-	-	-				
Grés ferrugineux	E034	0	-	-	-	-				
Grés et pélites métamorphiques	E000	0	-	-	-	-				
Micaschistes à mu. + chl.	M009	20	65.0	34.0	22.1	0.194				
Massif de Moncontour	G093						70	25.7	18.8	4.8
Formation de Plougastel+Groupe de Bosquen	C000-E001-E018-E035						168	17.9	16.8	3.0
Formations de Bois-Roux et de la Foulerie	E034-R005-Z033						0	-	-	-
Formation de la Mayenne	E000-S005-S007						837	24.4	16.8	4.1
Formation de Plouguenast	M005-M006-M009						56	33.9	27.4	9.3
		Valeur retenue pour la cartographie de l'indice global de la formation géologique								

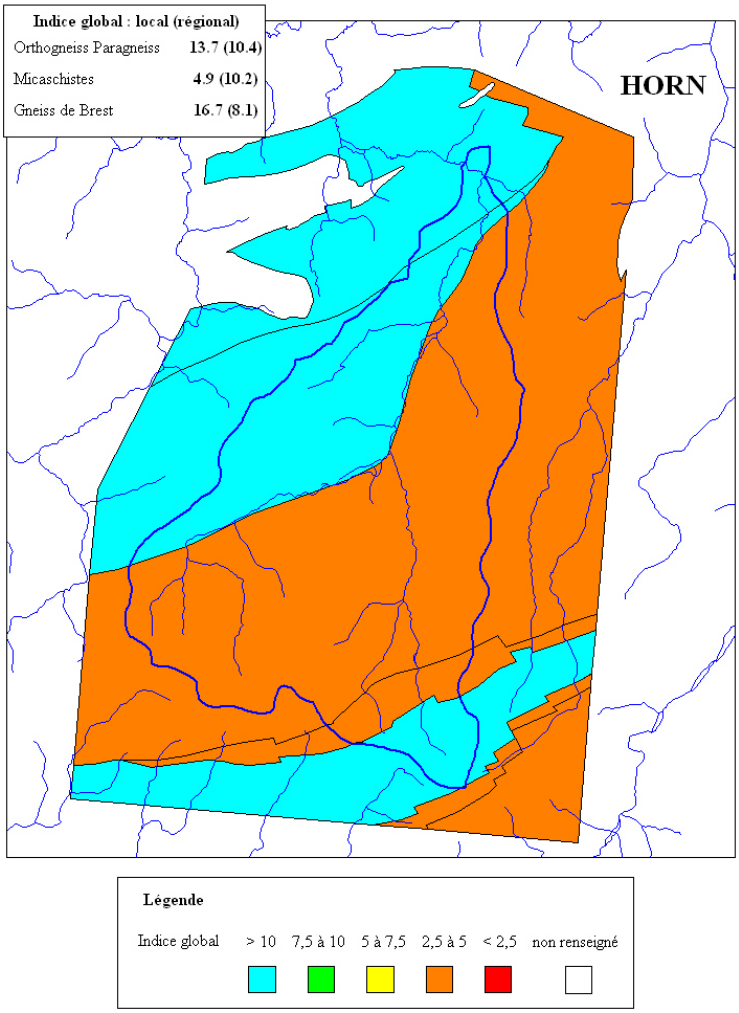
Planche 6 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle (bassin du Gouessant)



		Statistiques sur la formation géologique								
		Statistiques sur la zone d'étude du bassin versant du Bizien					Statistiques sur la région Bretagne			
Formation géologique	Code géologique	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global	Débit/Profondeur (m3/h/m)	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global
Grès et pélites (graphiteux)	E000-S014	27	40.7	21.9	8.9	0.234				
Grés feldpathiques rouges+conglomérats, grés et pélites	E069-I028-Z030-Z	9	-	-	-	-				
Volcanites et subvolcanites	V019	0	-	-	-	-				
Leptinites et volcanites	M008-M009	28	46.4	20.1	9.4	0.202				
Grès et pélites (graphiteux)	E000-S014-V007	27	40.7	21.9	8.9	0.234				
Formation de la Roche-Derrien	E000-S000-S002-S011-S014-W000-W001						32	12.5	9.2	1.1
Formation de Plourivo	D011-E031-E068-E069-I028-Z024-Z030-Z031-Z049-Z050						39	23.1	17.5	4.0
Formation de Plouézec	V019						1	-	-	-
Formation de Lanvollon	A007-E029-M008-M009-N020						139	46.0	28.1	12.9
Formations de Binic et du Minard	E000-S009-S014-V007						54	25.9	18.7	4.9

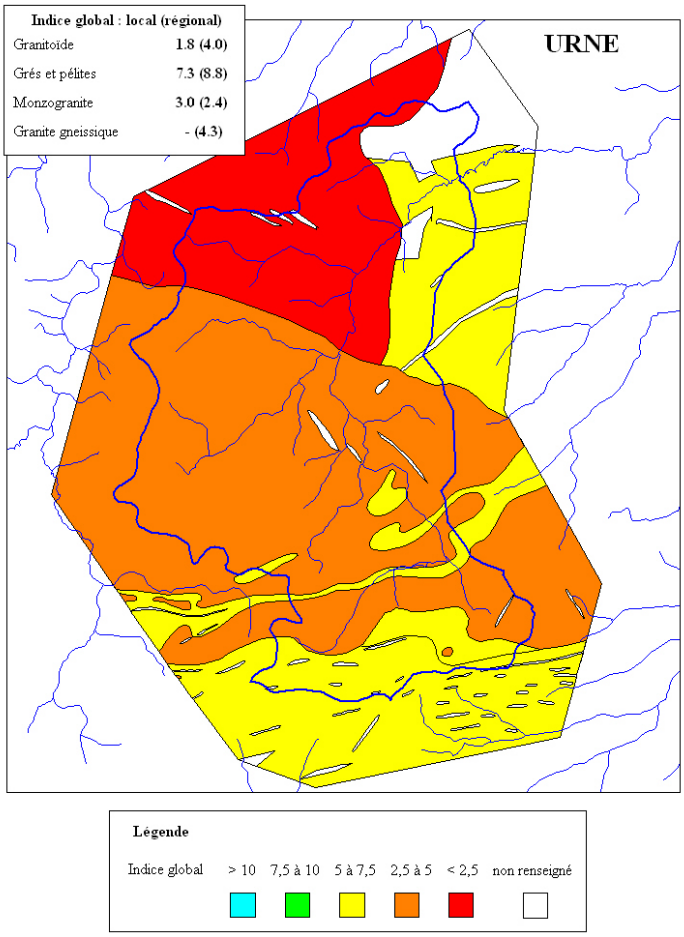
Valeur retenue pour la cartographie de l'indice global de la formation géologique

Planche 7 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle (bassin du Bizien)



		Statistiques sur la formation géologique								
		Statistiques sur la zone d'étude du bassin versant de l'Horn					Statistiques sur la région Bretagne			
Formation géologique	Code géologique	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global	Débit/Profondeur (m3/h/m)	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global
Orthogneiss de Plouénan+Paragneiss à biotite	N001-N009-N010-	62	58.1	23.6	13.7	0.242				
Micaschistes de la Penzé à staurotide-grenat	M014-N001-O000	54	25.9	18.9	4.9	0.187				
Gneiss de Brest	N000-N005	23	47.8	35.0	16.7	0.342				
Formation de Lesneven	N001-N009-N010-N045-O000-O005						225	42.2	24.7	10.4
Formations du Conquet et de la Penzé	M014-N001-O000-O001-Q000						123	38.2	26.6	10.2
Massif de Brest	N000-N005						114	33.3	24.3	8.1
		Valeur retenue pour la cartographie de l'indice global de la formation géologique								

Planche 8 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle (bassin de l'Horn)



		Statistiques sur la formation géologique								
		Statistiques sur la zone d'étude du bassin versant de l'Urne					Statistiques sur la région Bretagne			
Formation géologique	Code géologique	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global	Débit/Profondeur (m3/h/m)	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global
Granitoïde	G041-G092	23	17.4	10.3	1.8	0.093				
Grés et pélites métamorphiques+micaschistes	C003-E000-M009	22	31.8	23.0	7.3	0.166				
Monzogranite porphyroïde à biotite	G033-G034-G093	30	20.0	14.8	3.0	0.096				
Granite gneissique monzonitique	G038	10	-	-	-	-				
Métagabbros et serpentinites	M008-N026	8	-	-	-	-				
Massif de Ploufragan	G041-G092						31	22.6	17.6	4.0
Formations de Lamballe et de Saint-Lô	C003-E000-M009-S008						223	39.9	22.0	8.8
Massif de Quintin	G033-G034-G093						105	16.2	14.8	2.4
Massifs de Lamballe, Cancale et Saint-Cast	G038-N022						29	24.1	17.8	4.3
Formations d'Yffiniac et Belle-Isle	A009-M008-N026						8	-	-	-
		Valeur retenue pour la cartographie de l'indice global de la formation géologique								

Planche 9 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle (bassin de l'Urne)

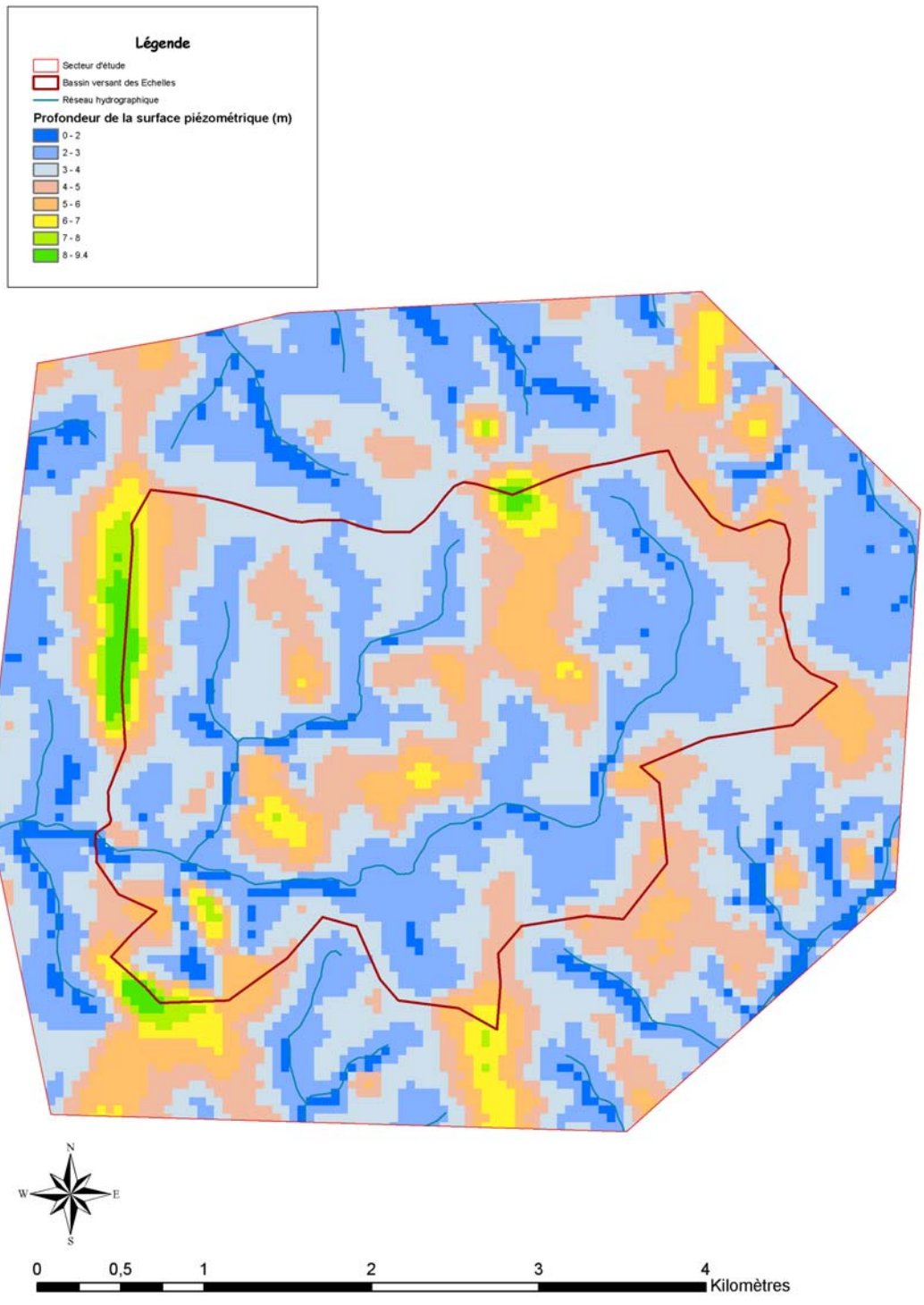


Planche 10 - Profondeur de la surface piézométrique (bassin des Echelles)

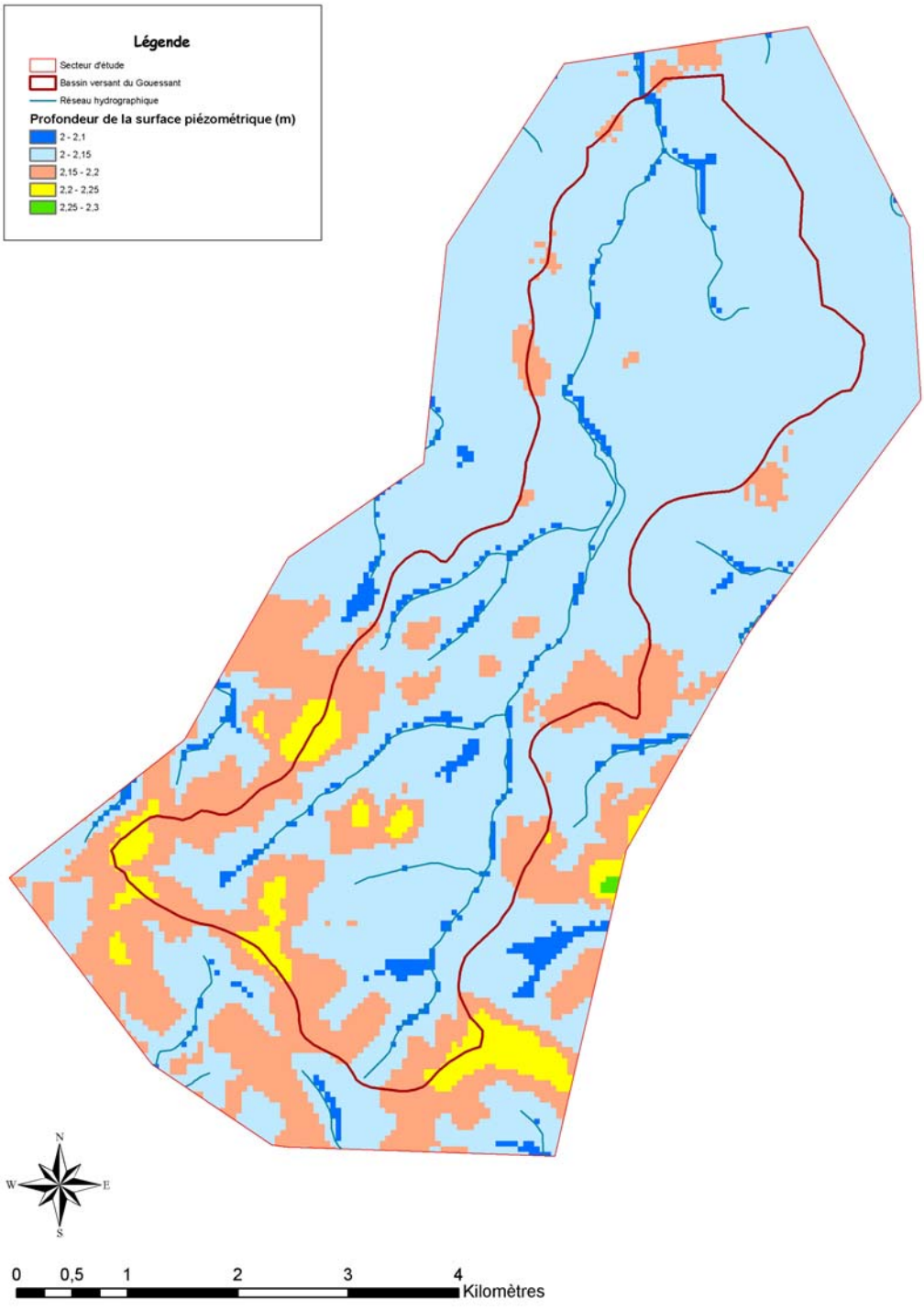


Planche 11 - Profondeur de la surface piézométrique (bassin du Gouessant)

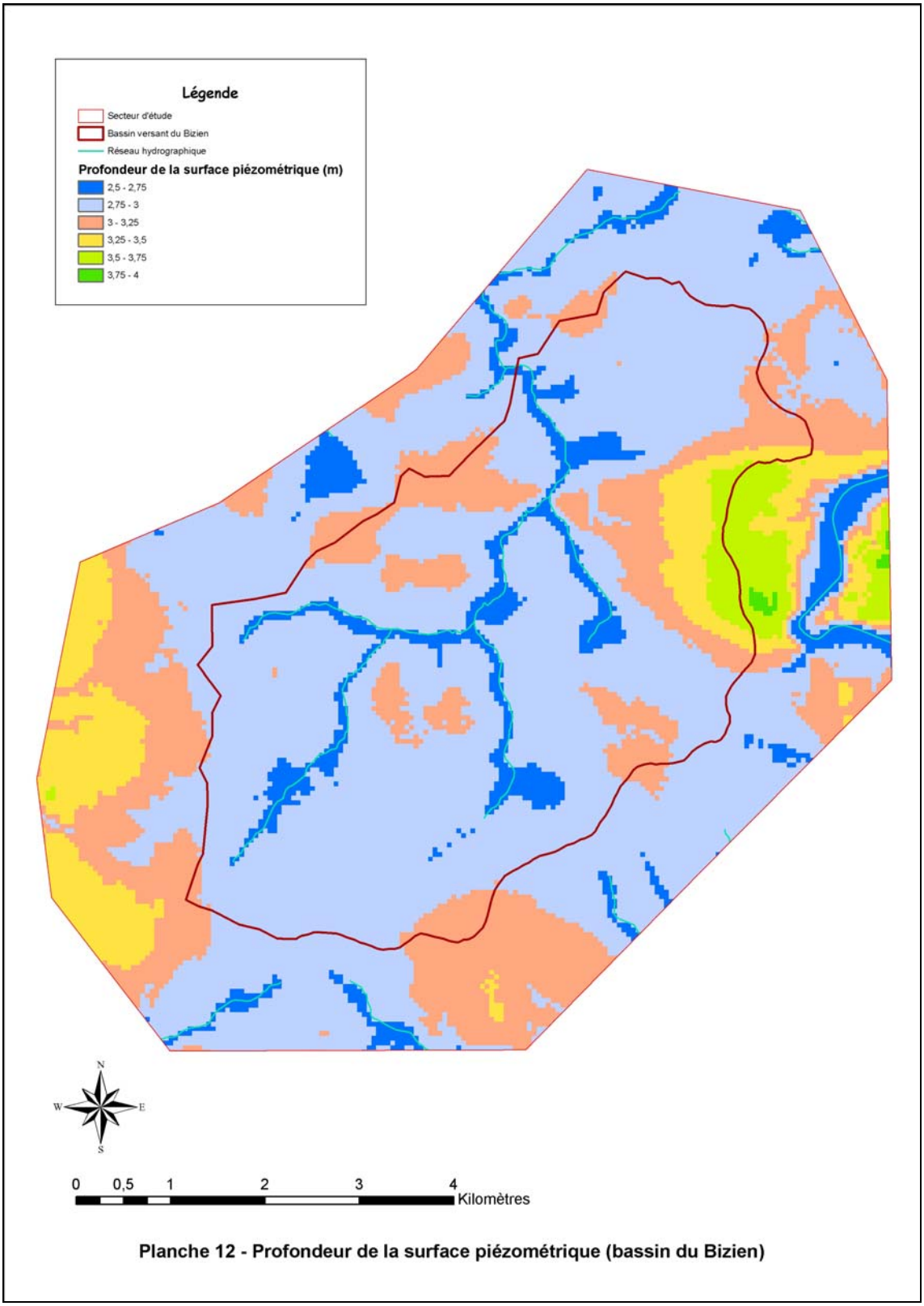


Planche 12 - Profondeur de la surface piézométrique (bassin du Bizien)

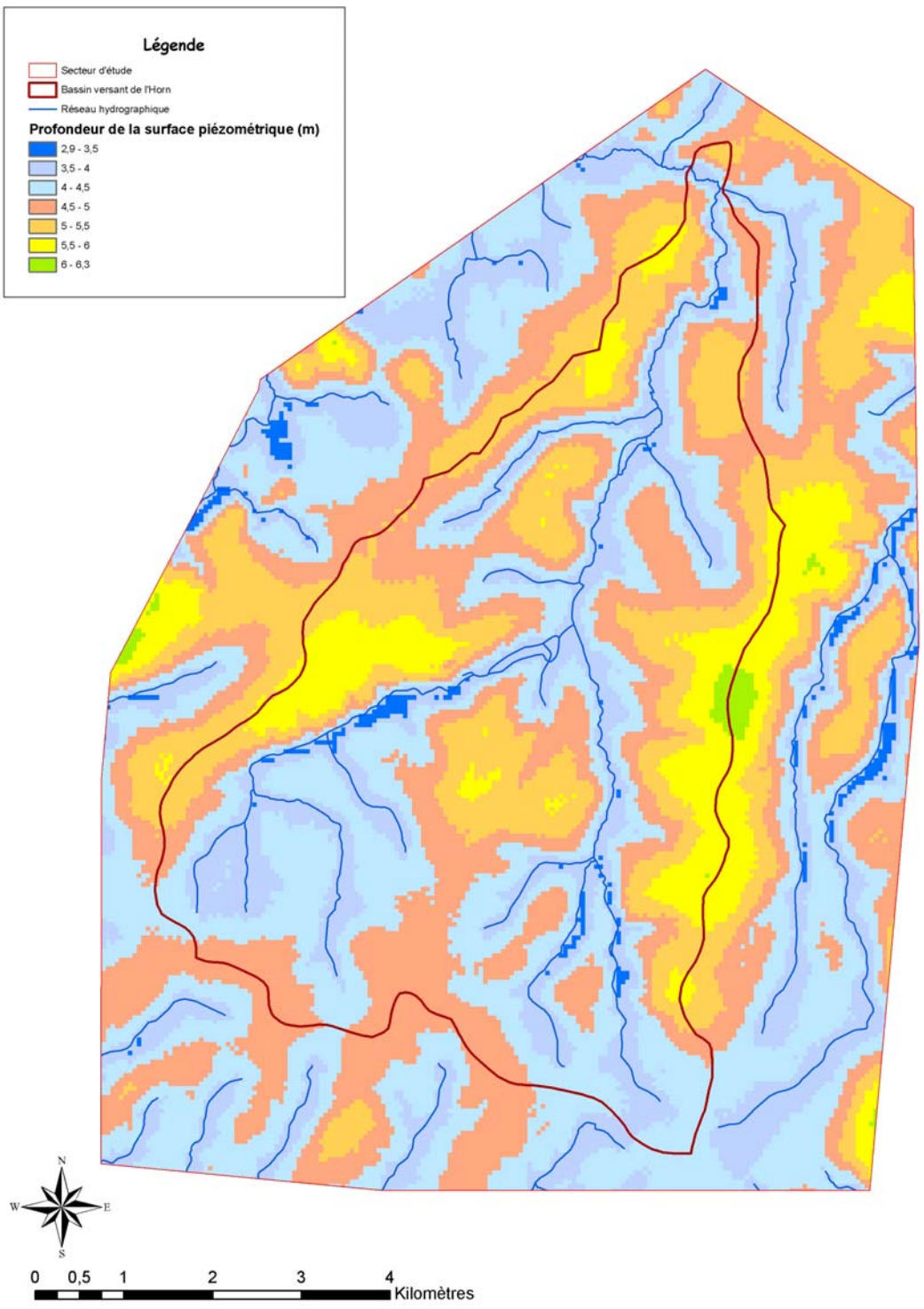


Planche 13 - Profondeur de la surface piézométrique (bassin de l'Horn)

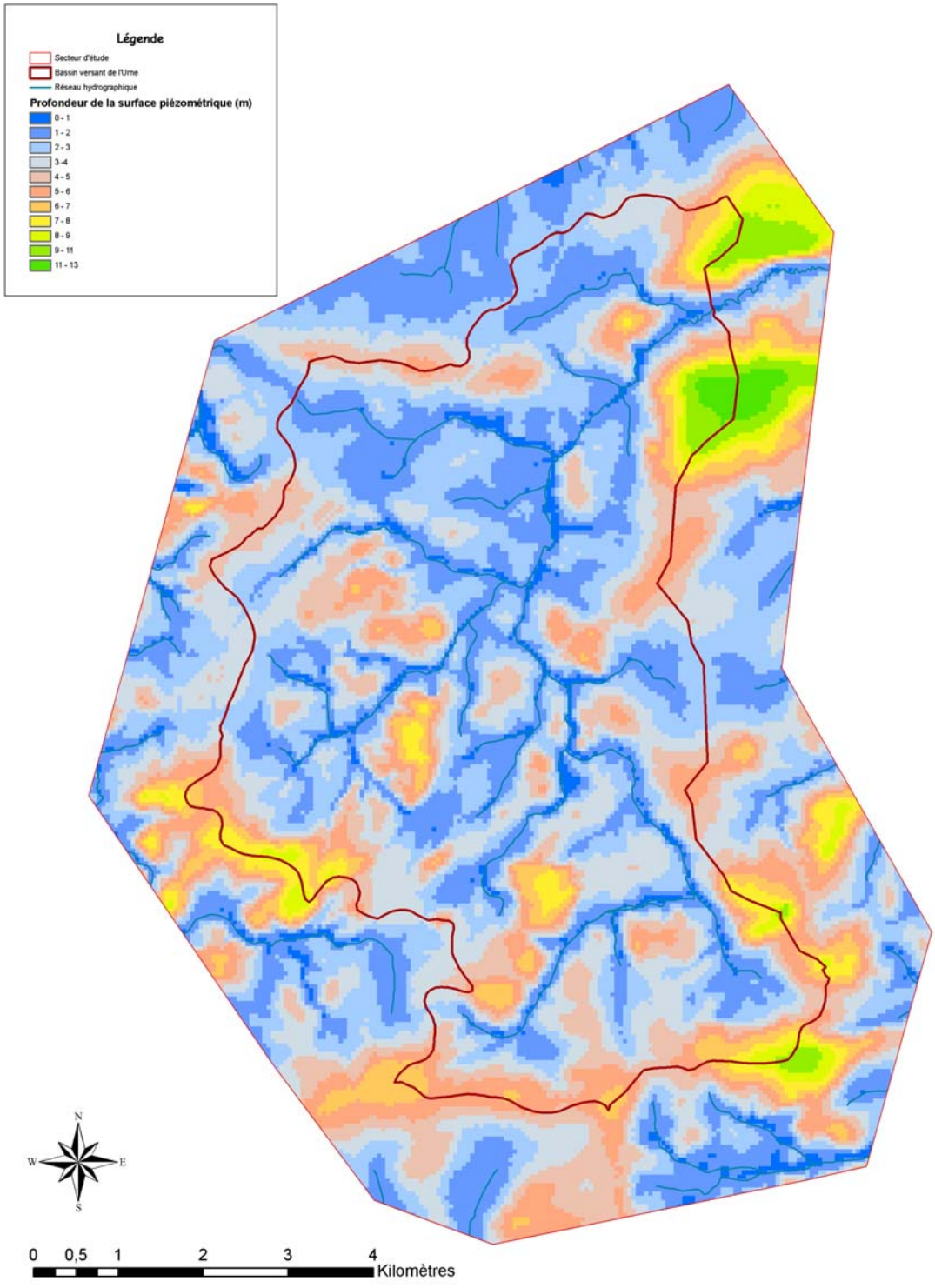


Planche 14 - Profondeur de la surface piézométrique (bassin de l'Urne)

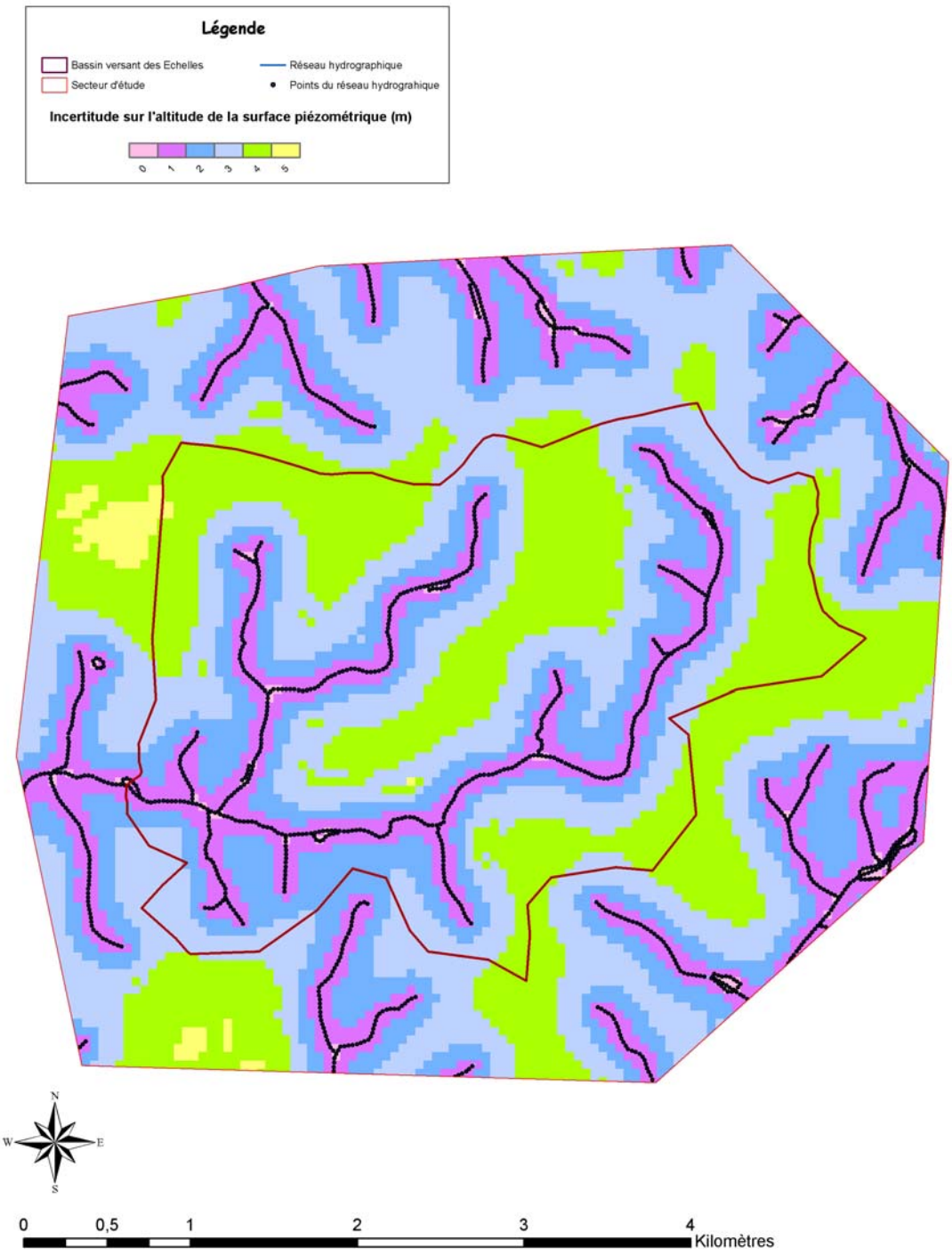


Planche 15 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin des Echelles)

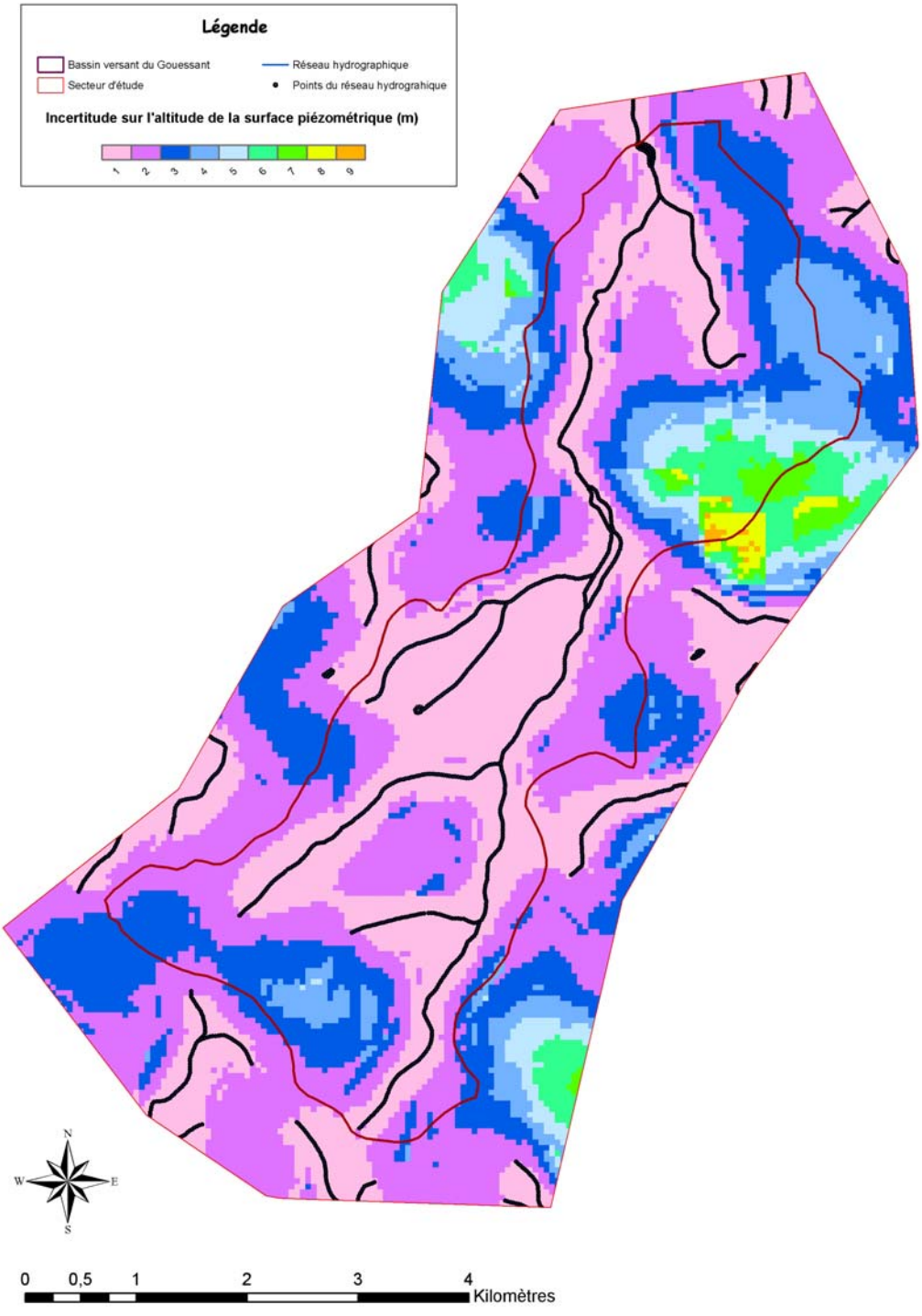


Planche 16 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin du Gouessant)

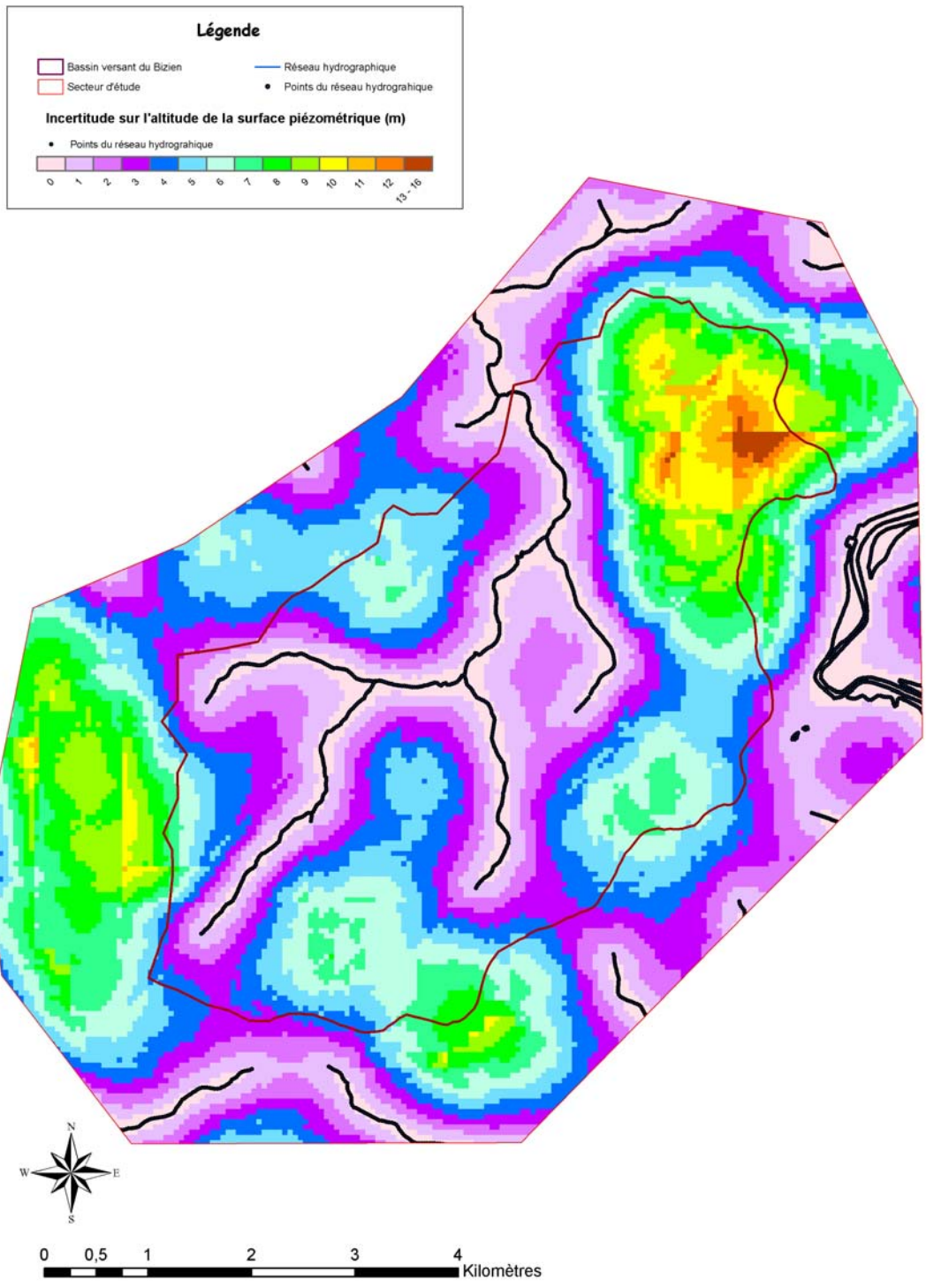


Planche 17 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin du Bizien)

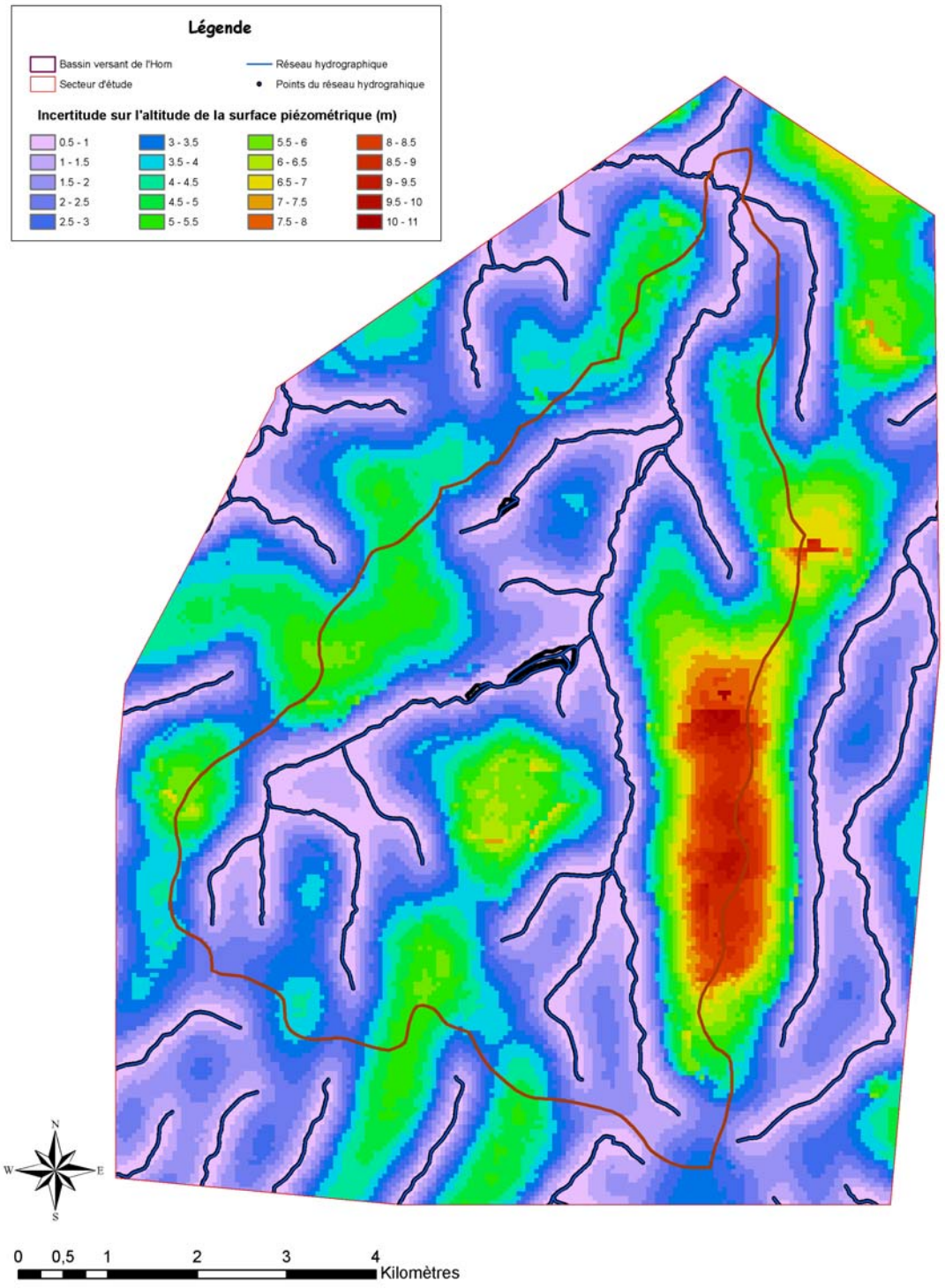


Planche 18 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Horn)

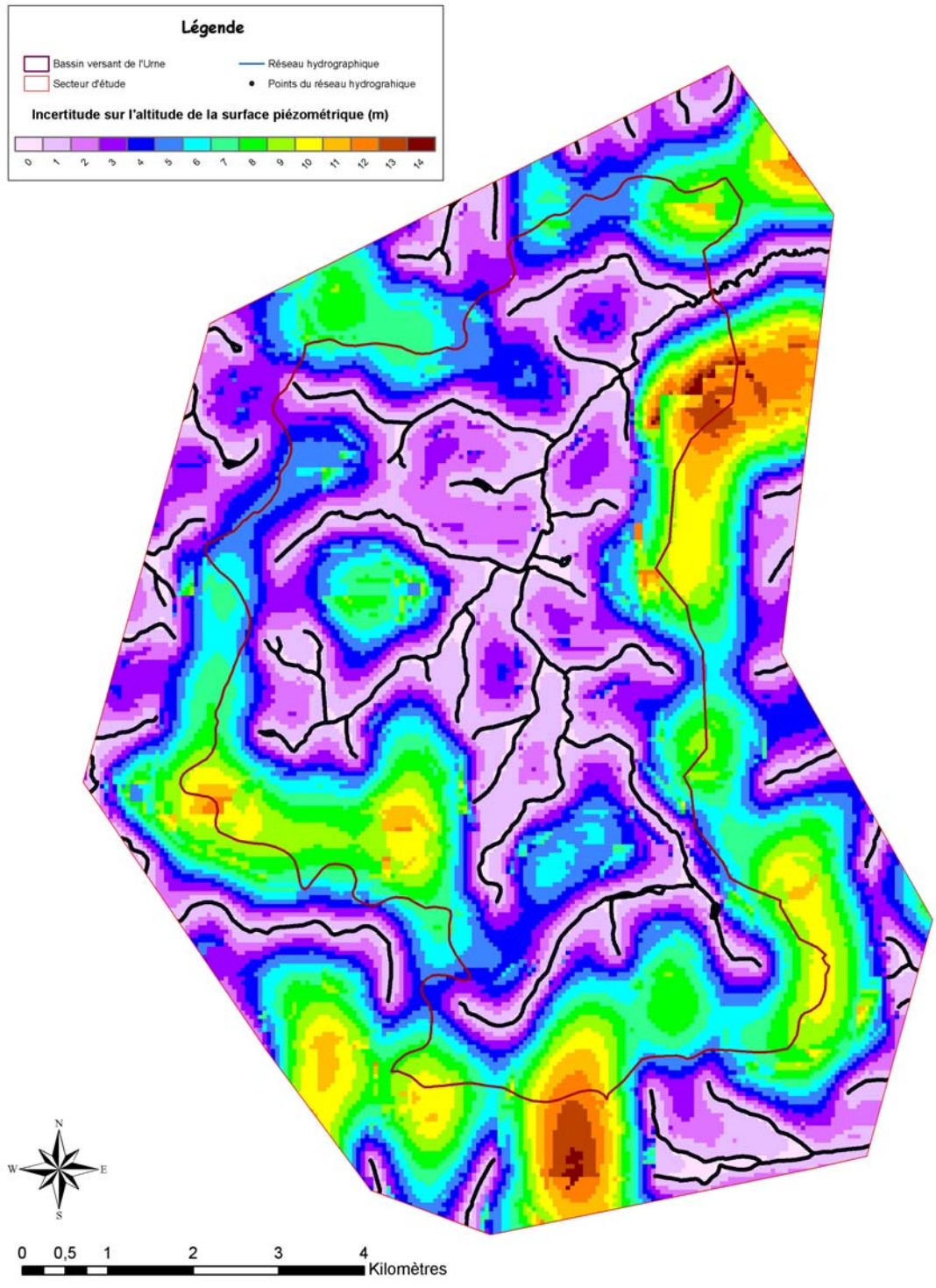


Planche 19 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Urne)

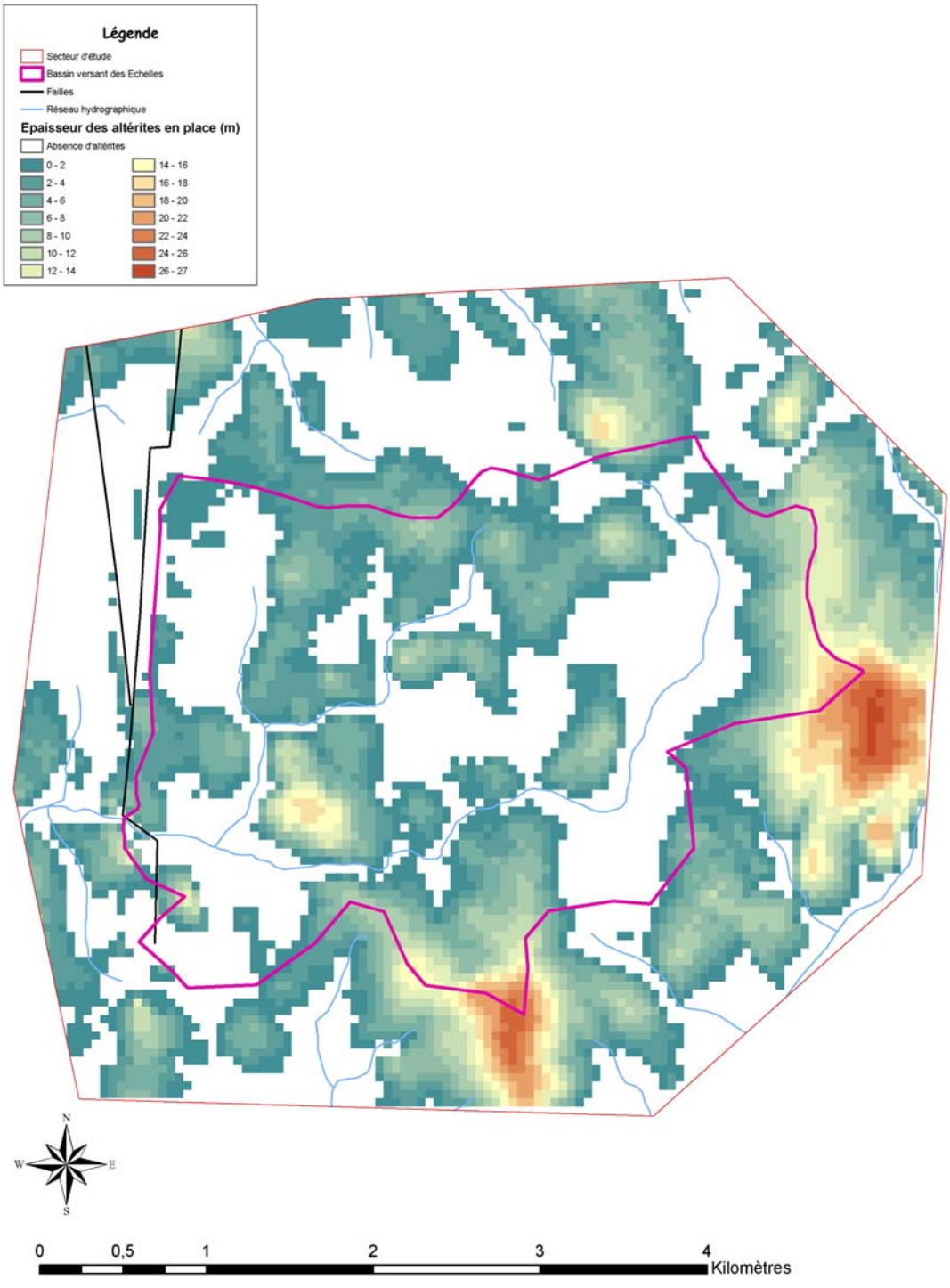


Planche 20 - Epaisseur des altérites en place (bassin des Echelles)

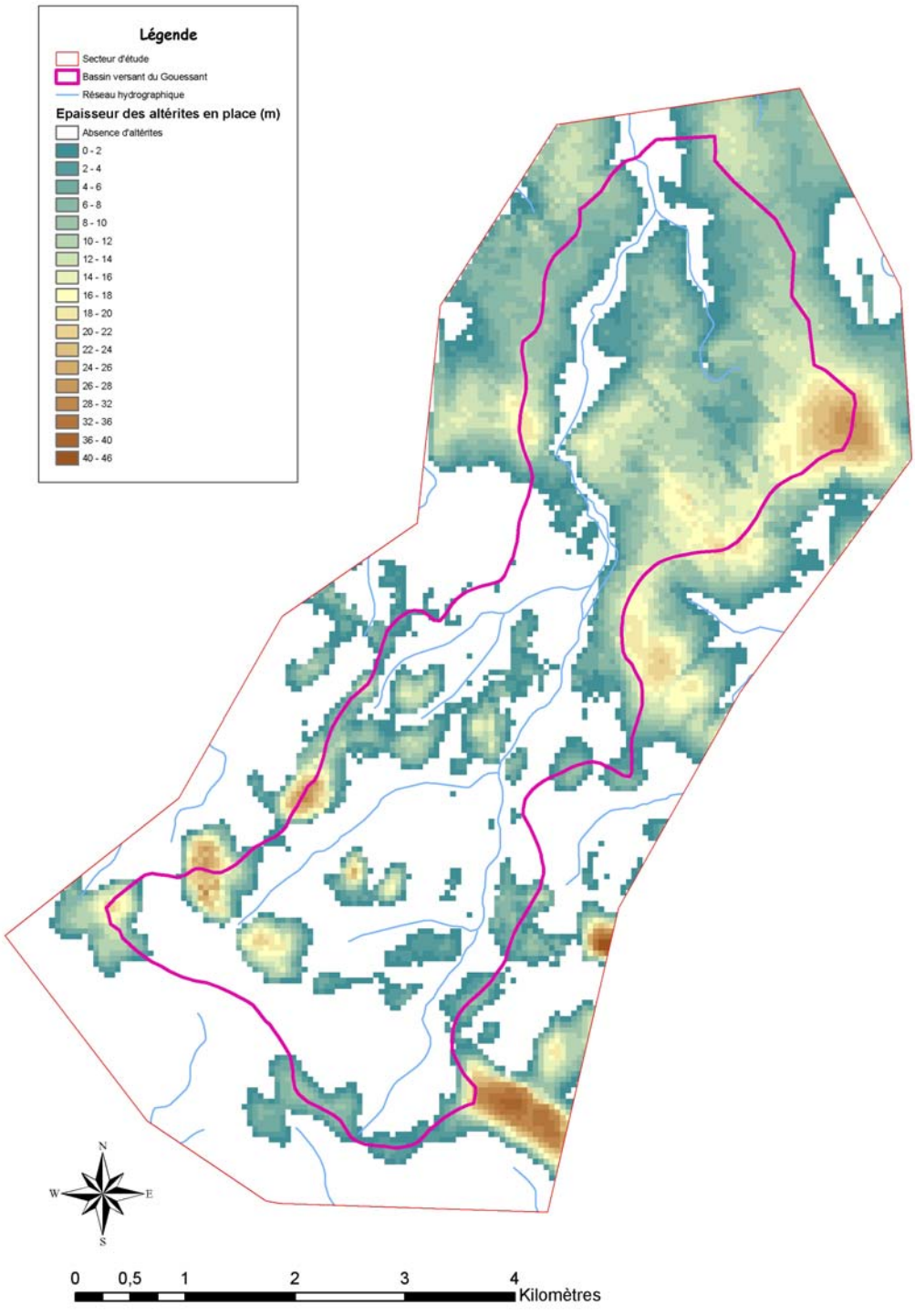


Planche 21 - Epaisseur des altérites en place (bassin du Gouessant)

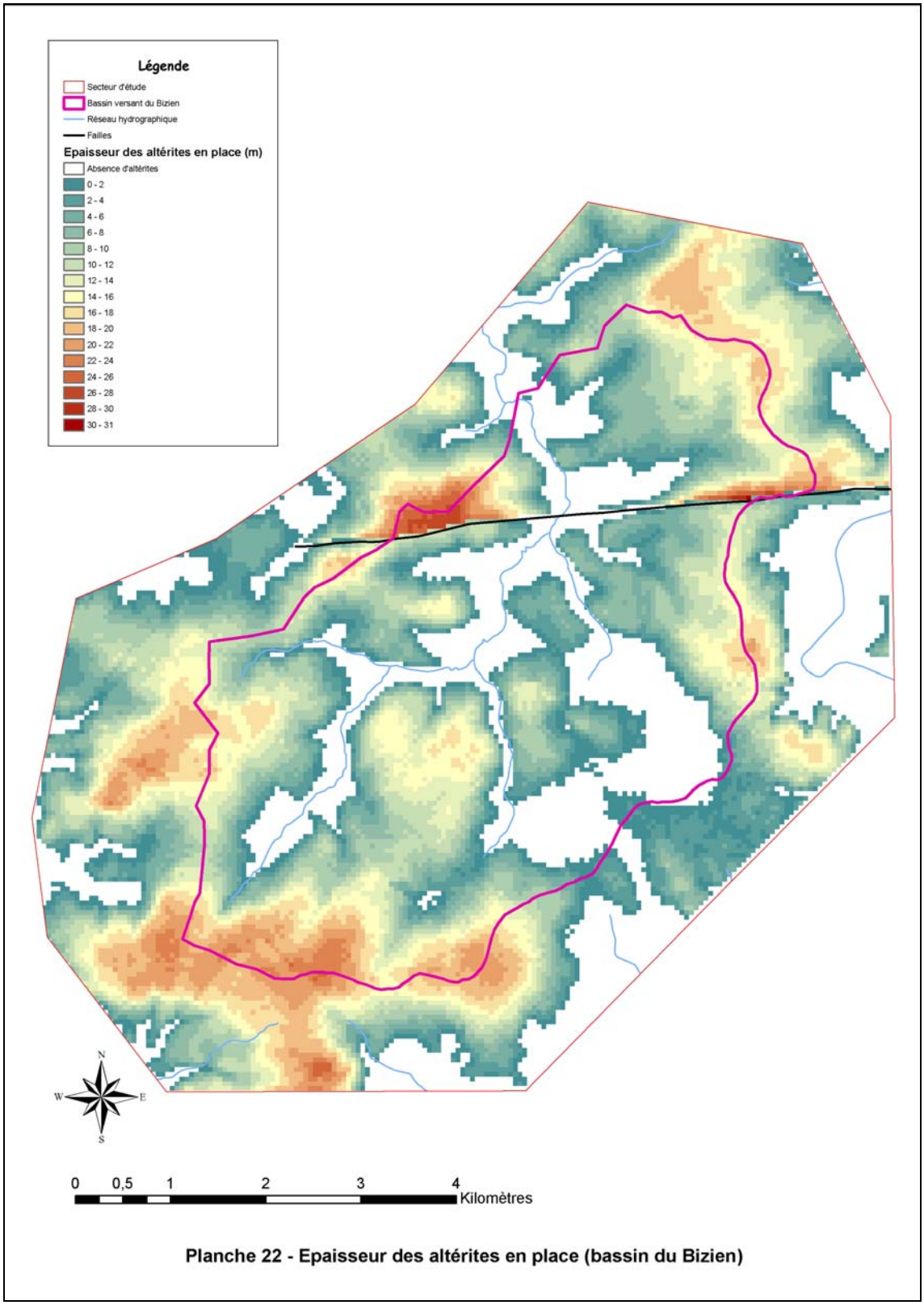


Planche 22 - Epaisseur des altérites en place (bassin du Bizien)

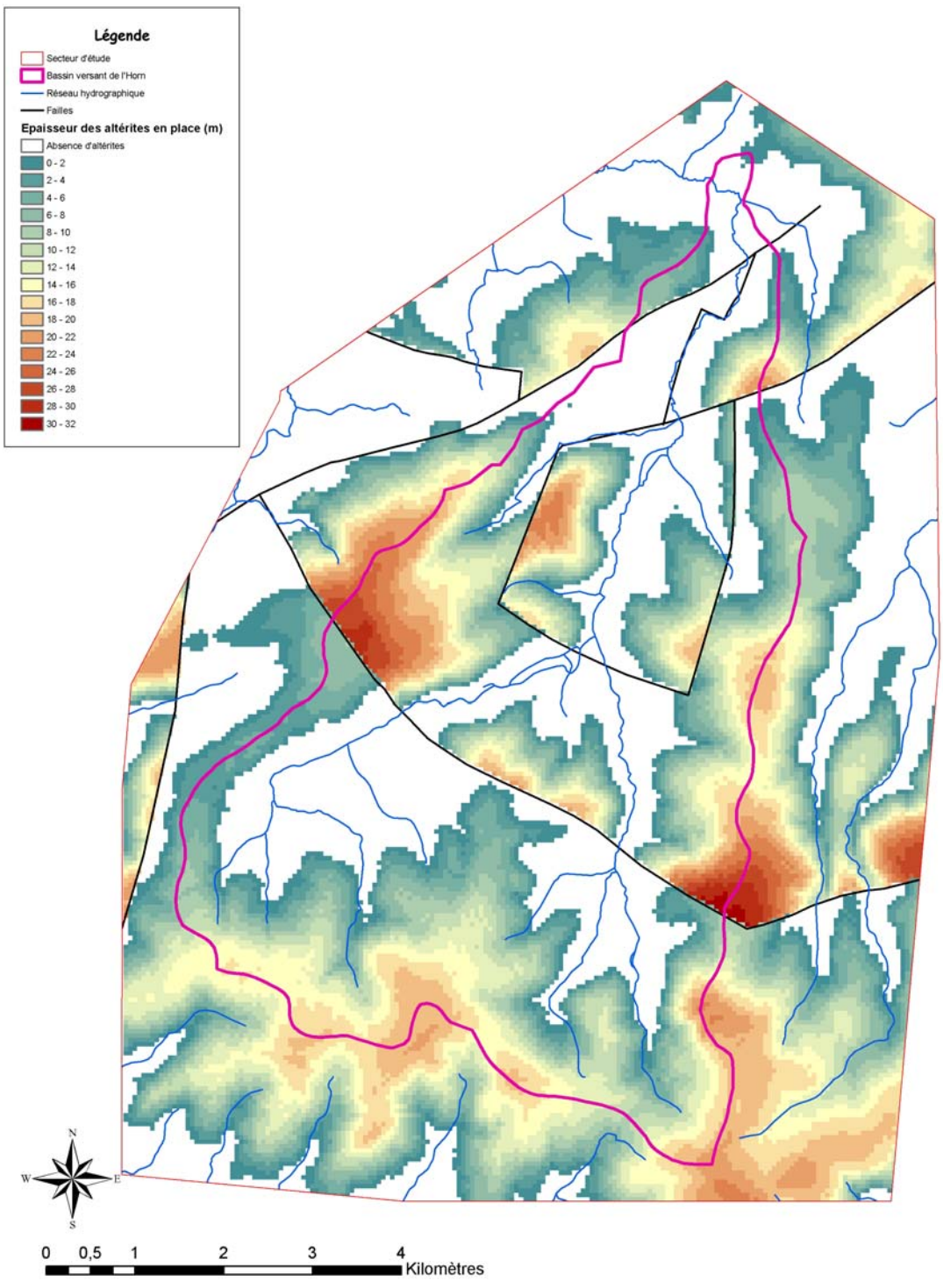


Planche 23 - Epaisseur des altérites en place (bassin de l'Horn)

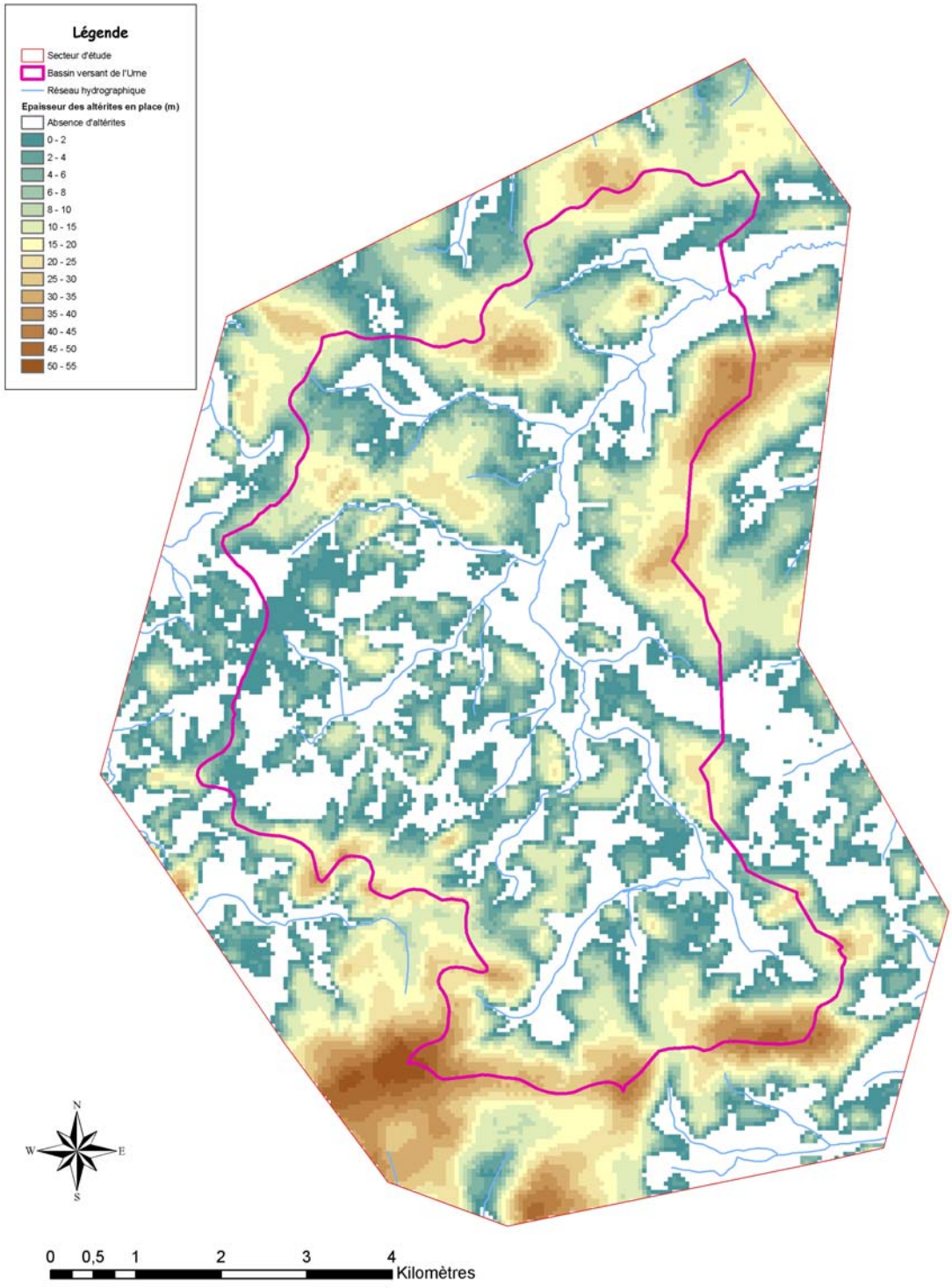


Planche 24 - Epaisseur des altérites en place (bassin de l'Urne)

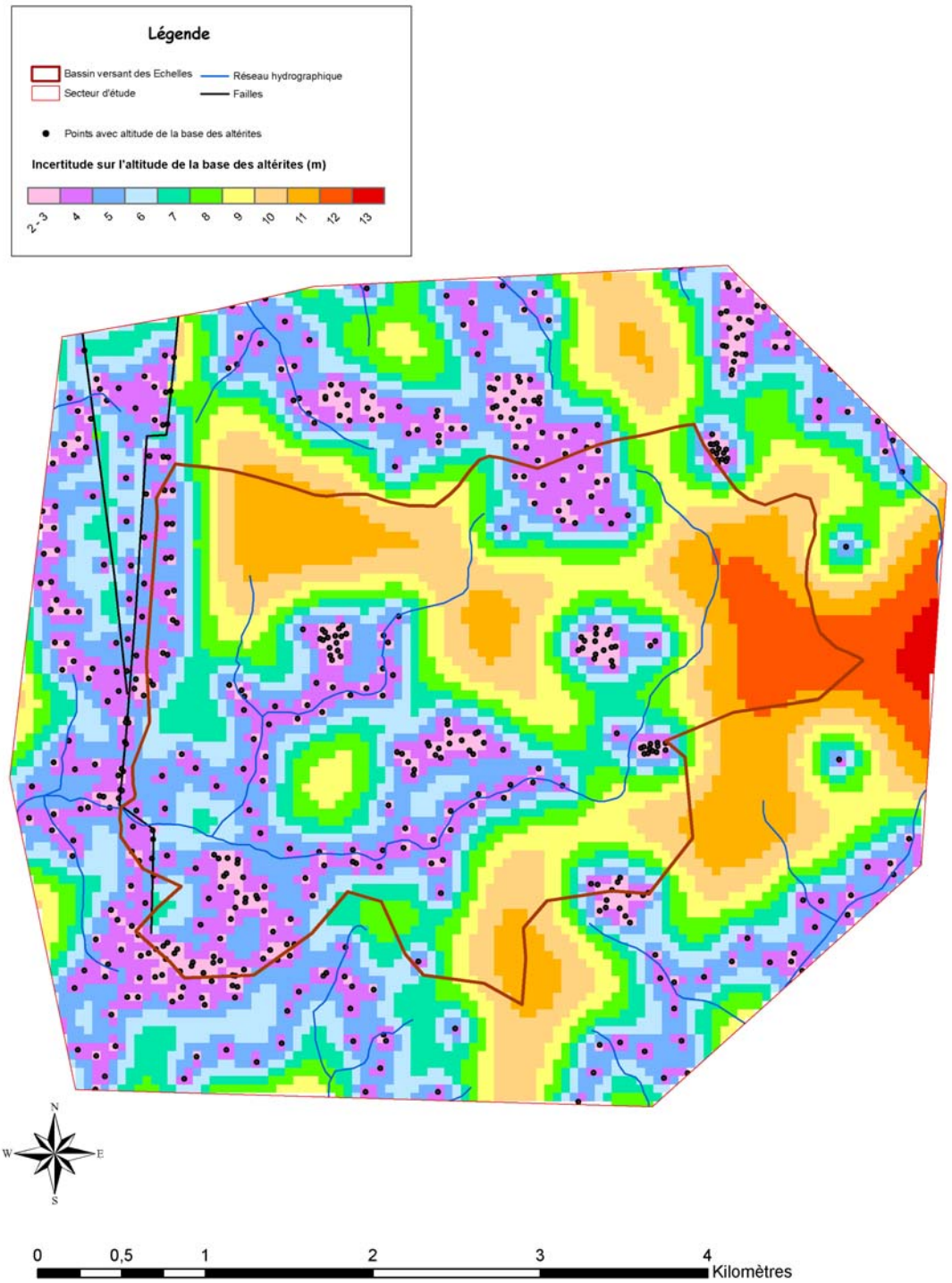


Planche 25 - Incertitude sur l'épaisseur des altérites en place (bassin des Echelles)

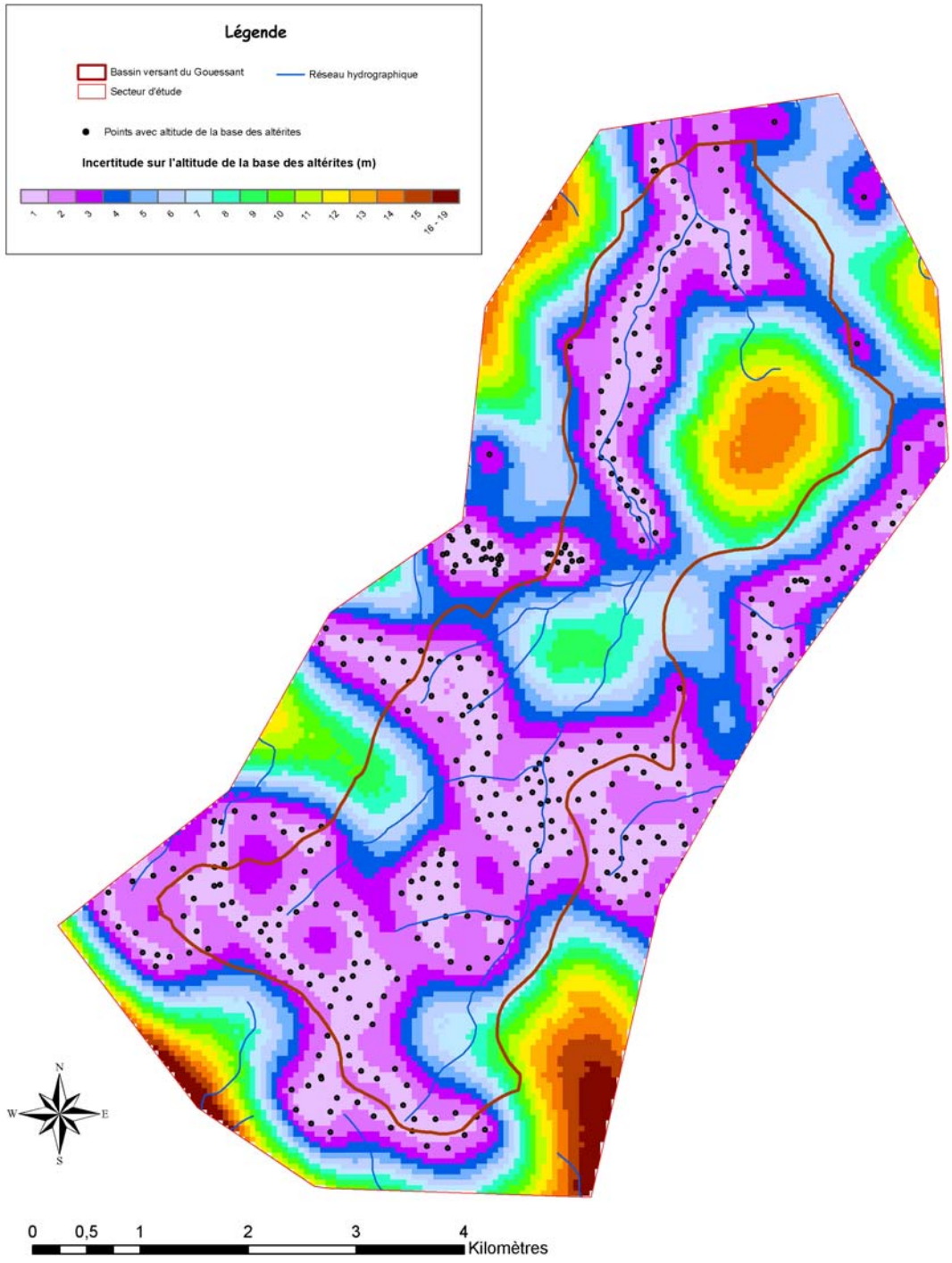


Planche 26 - Incertitude sur l'épaisseur des altérites en place (bassin du Gouessant)

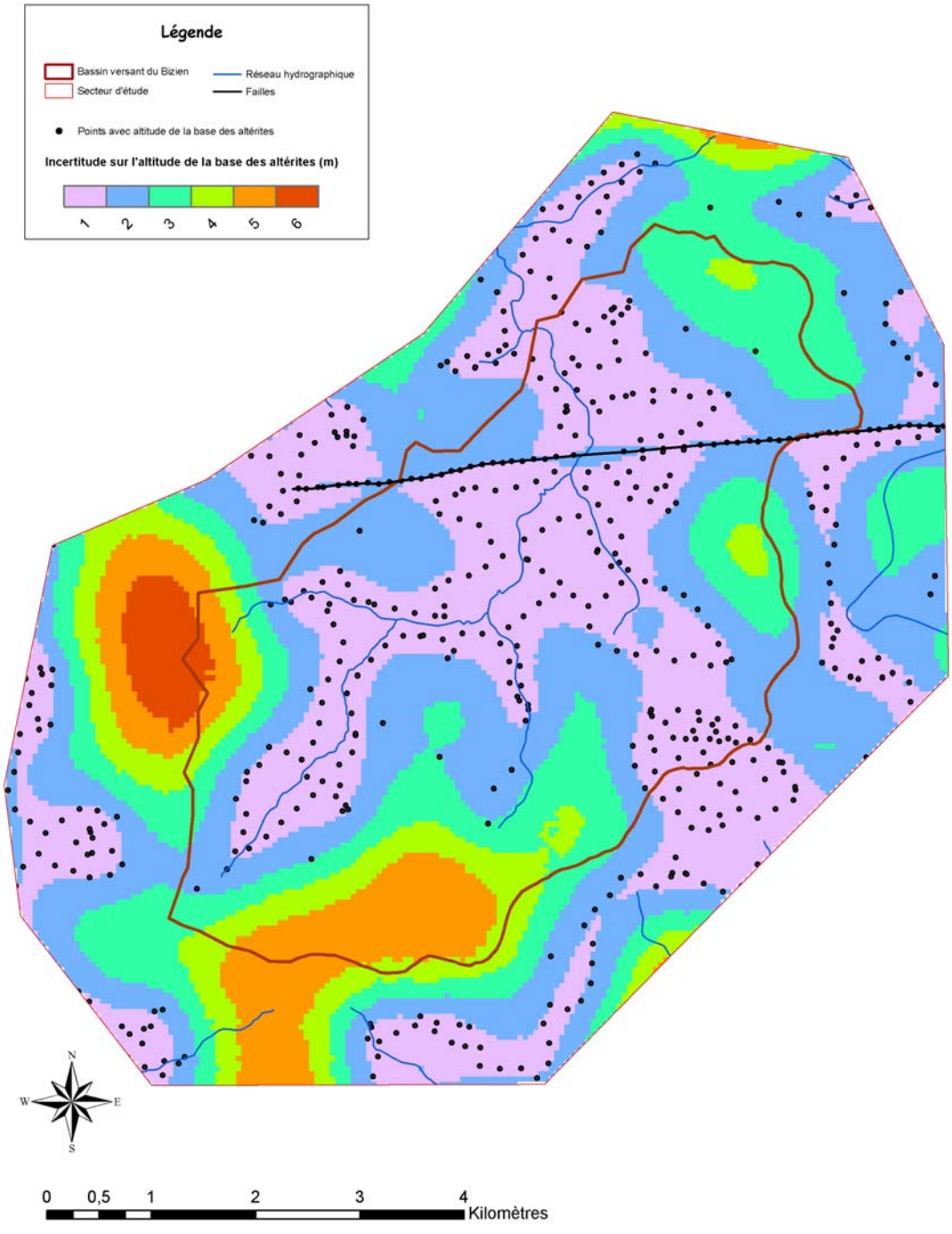


Planche 27 - Incertitude sur l'épaisseur des altérites en place (bassin du Bizien)

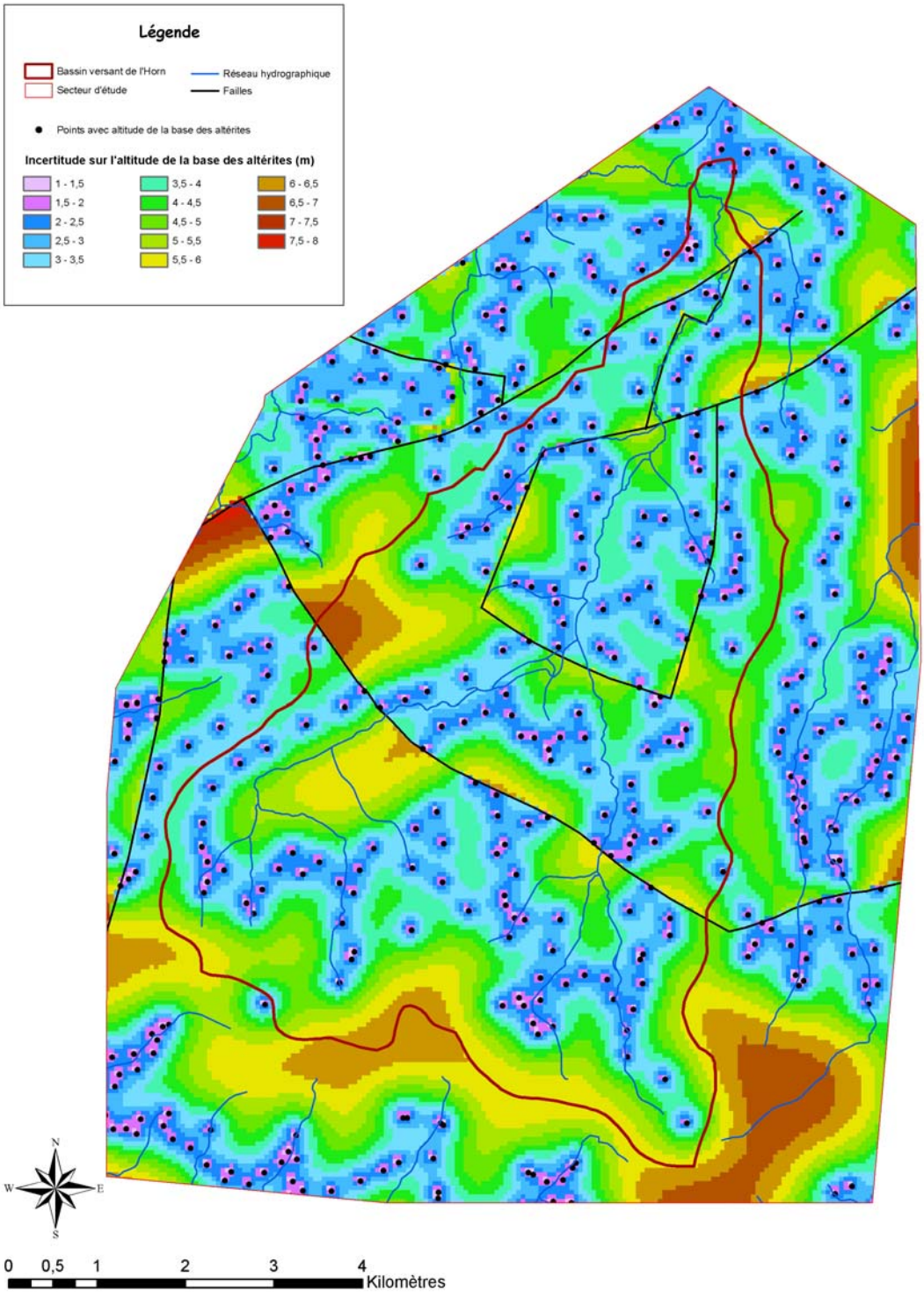


Planche 28 - Incertitude sur l'épaisseur des altérites en place (bassin de l'Horn)

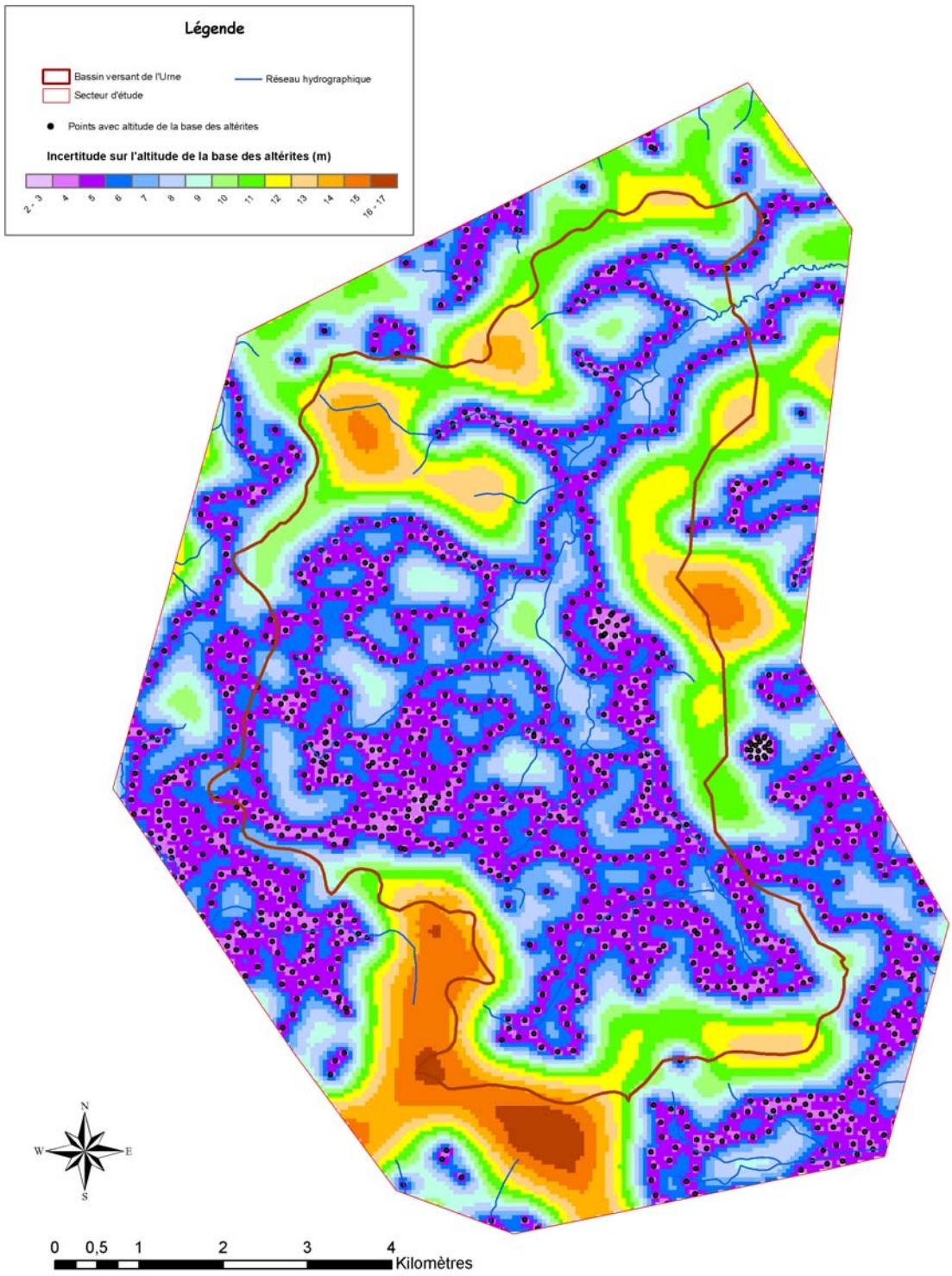


Planche 29 - Incertitude sur l'épaisseur des altérites en place (bassin de l'Urne)

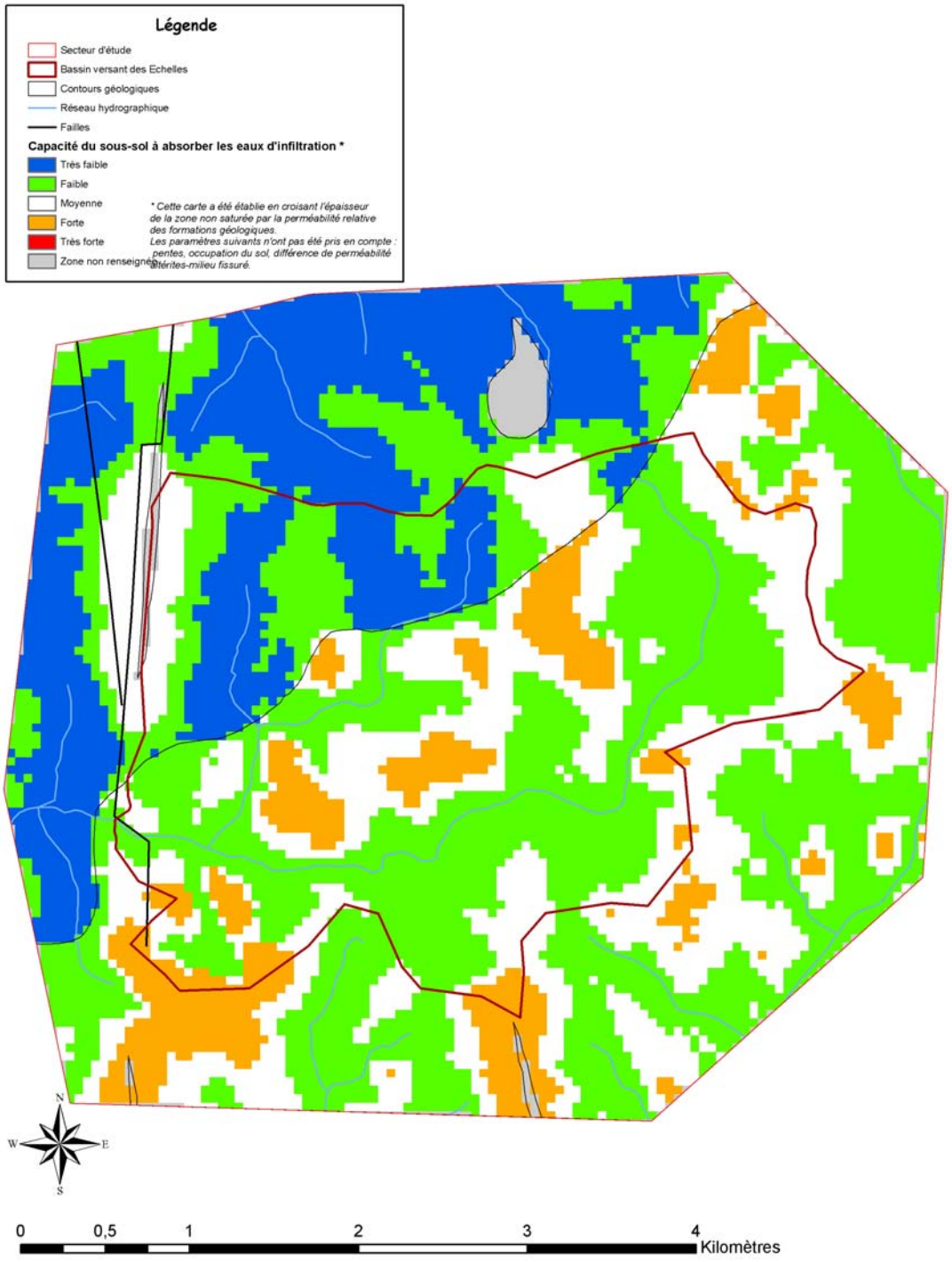


Planche 30 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin des Echelles)

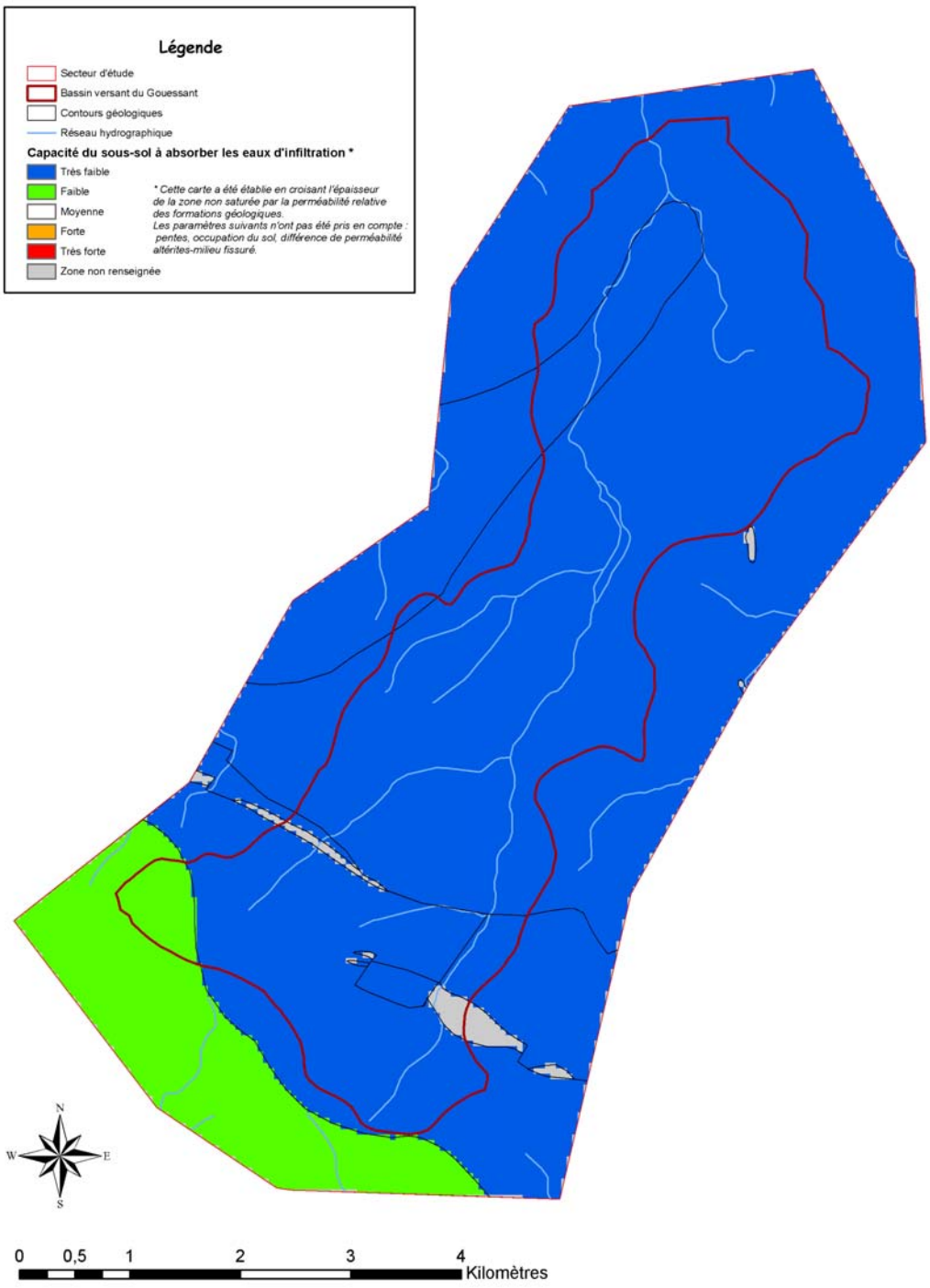


Planche 31 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Gouessant)

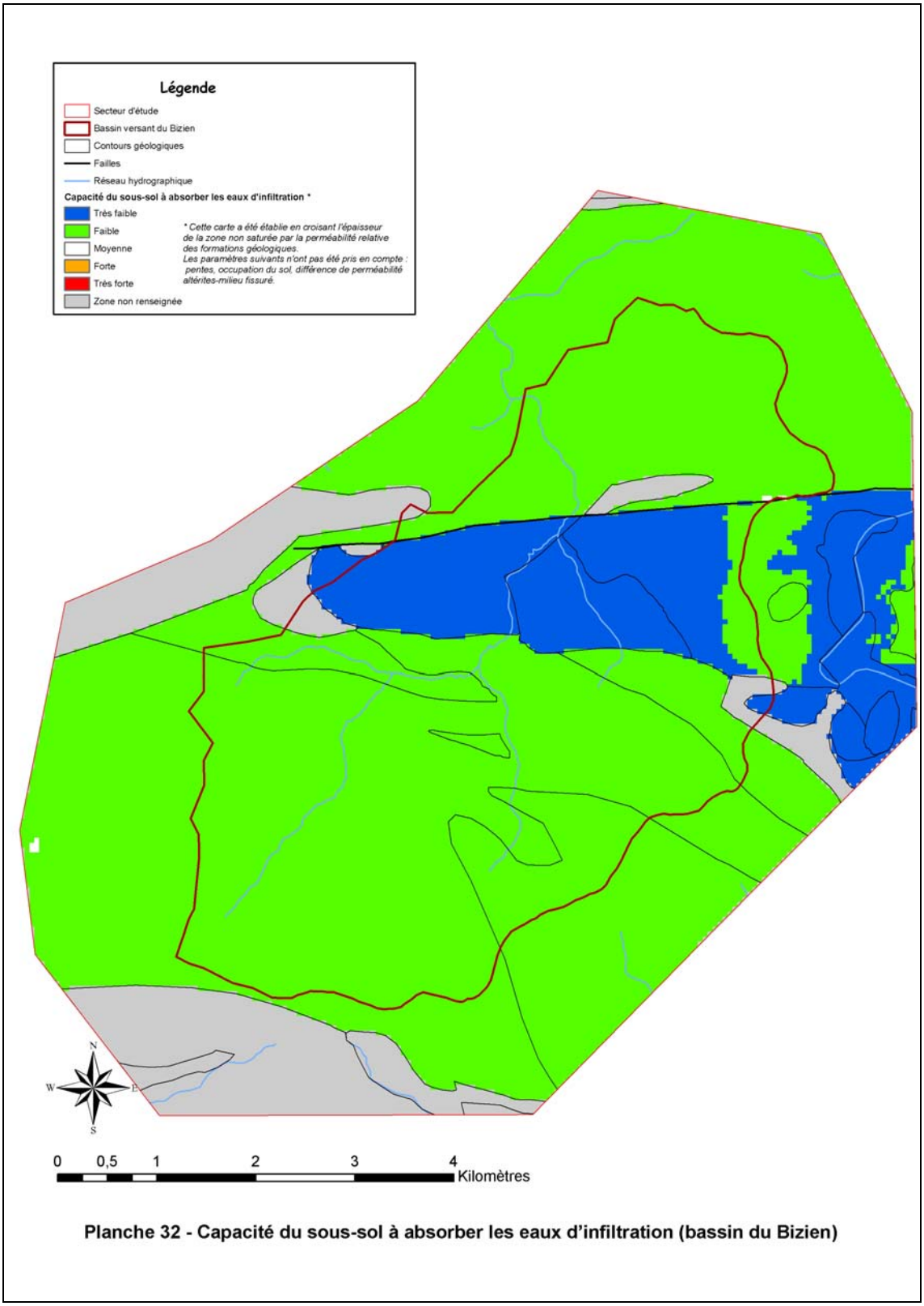


Planche 32 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Bizien)

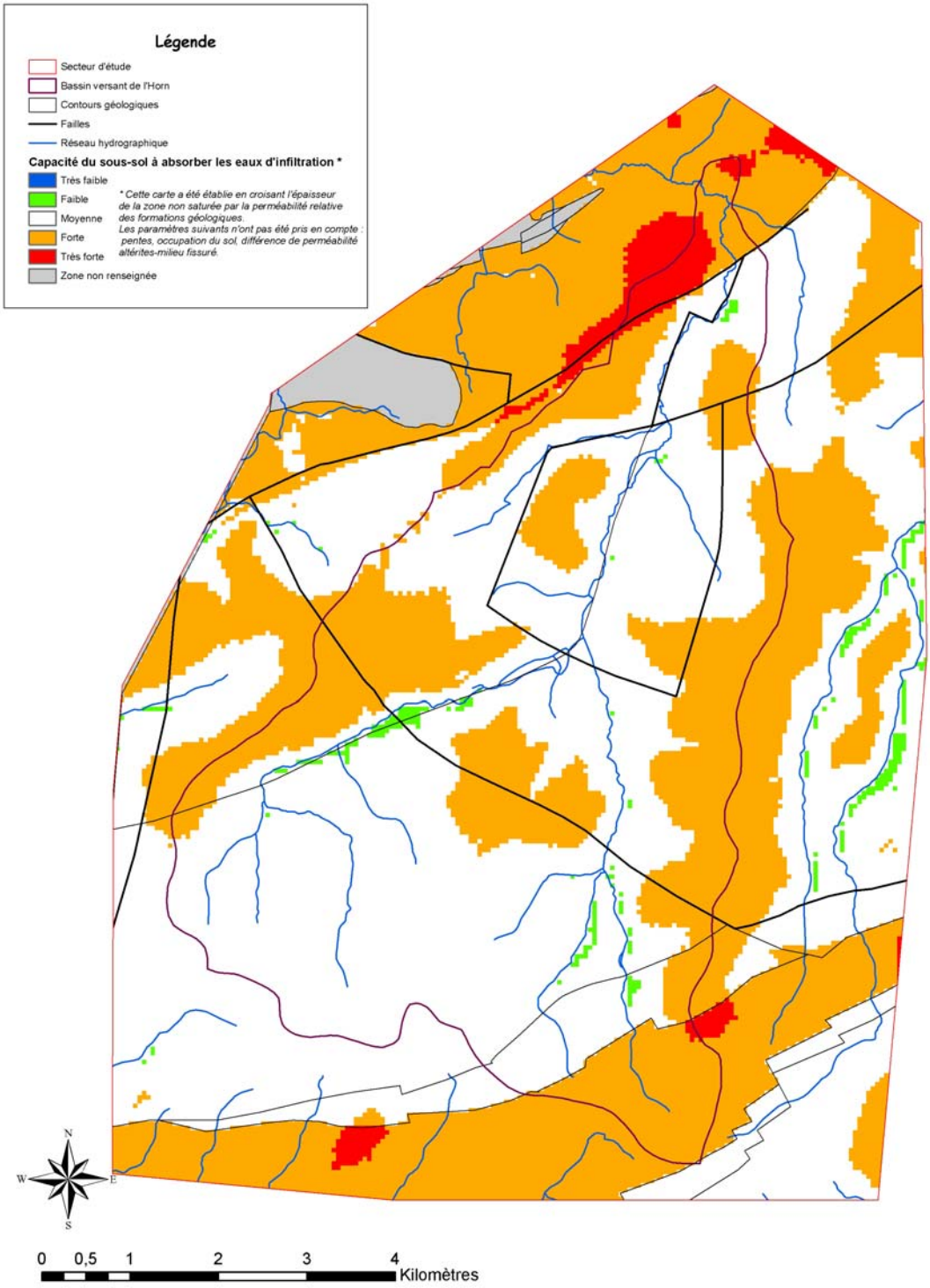


Planche 33 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin de l'Horn)

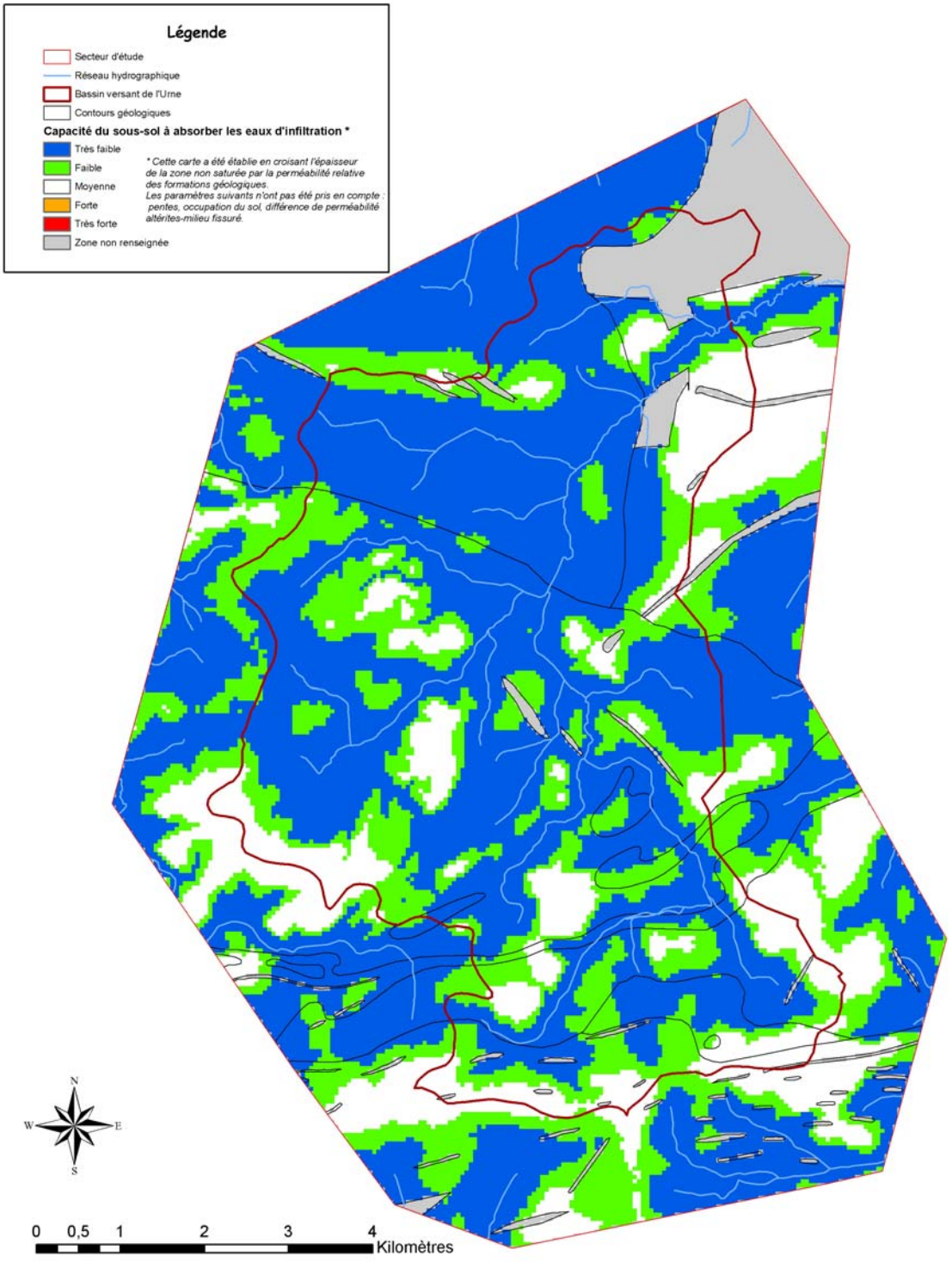
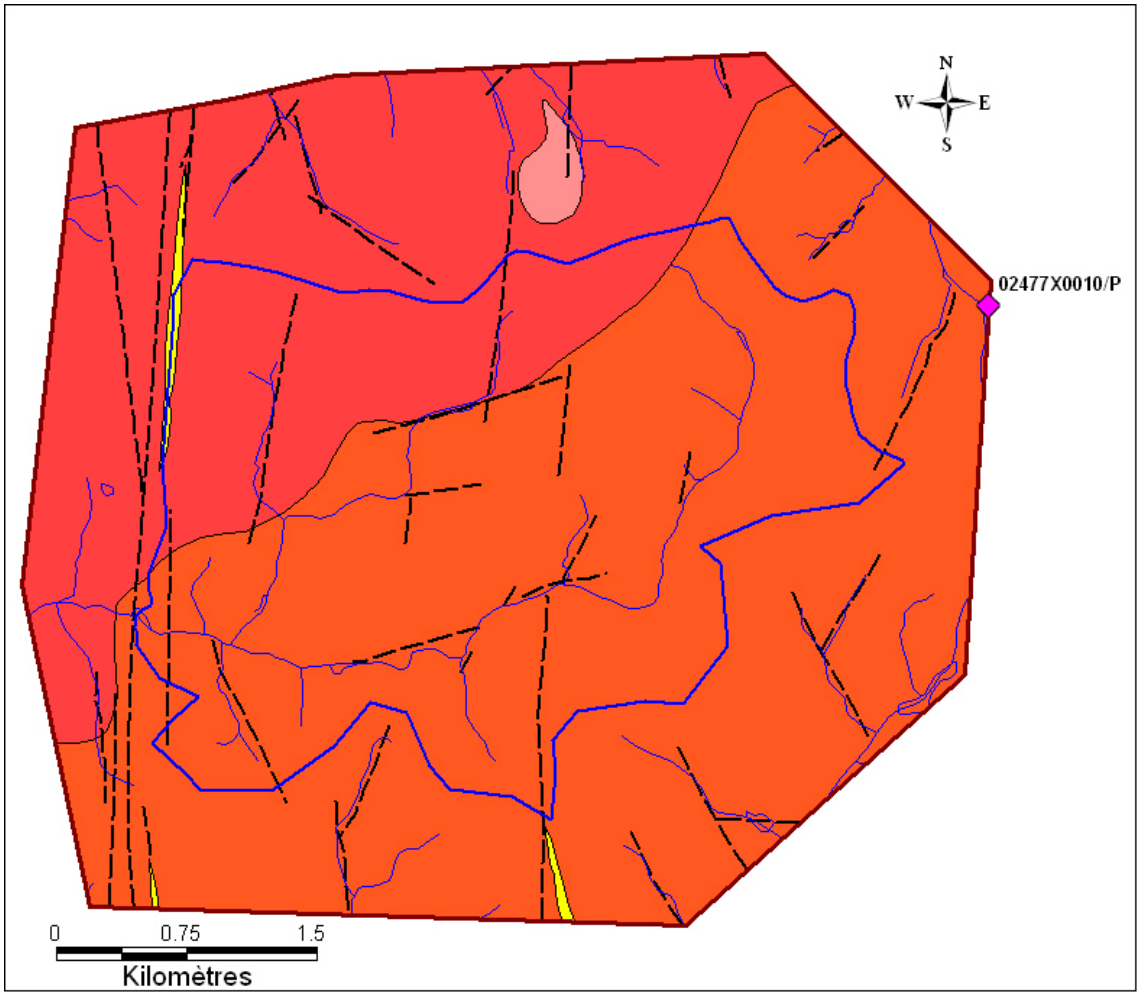


Planche 34 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin de l'Urne)



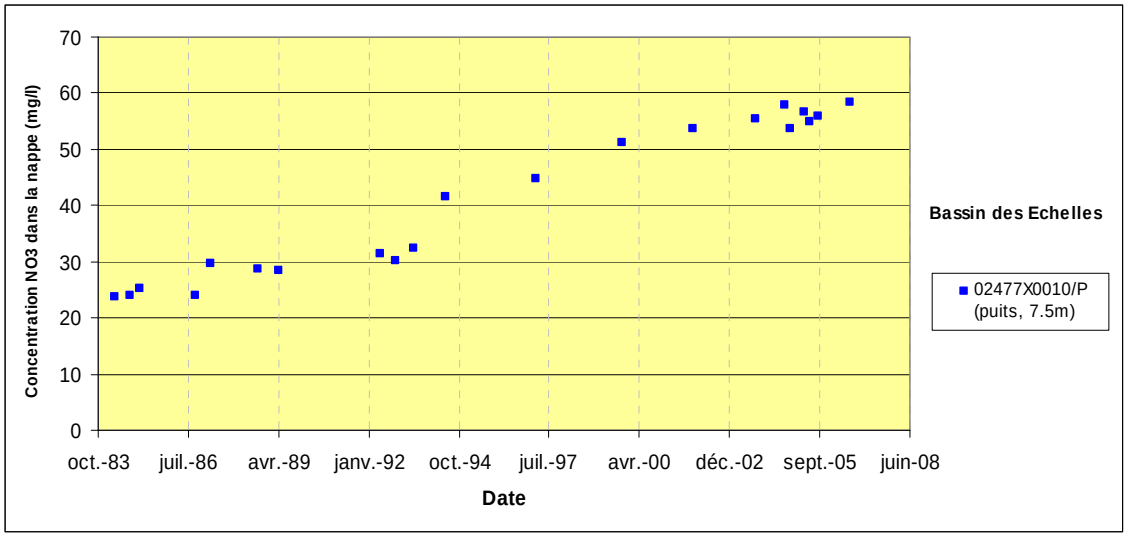
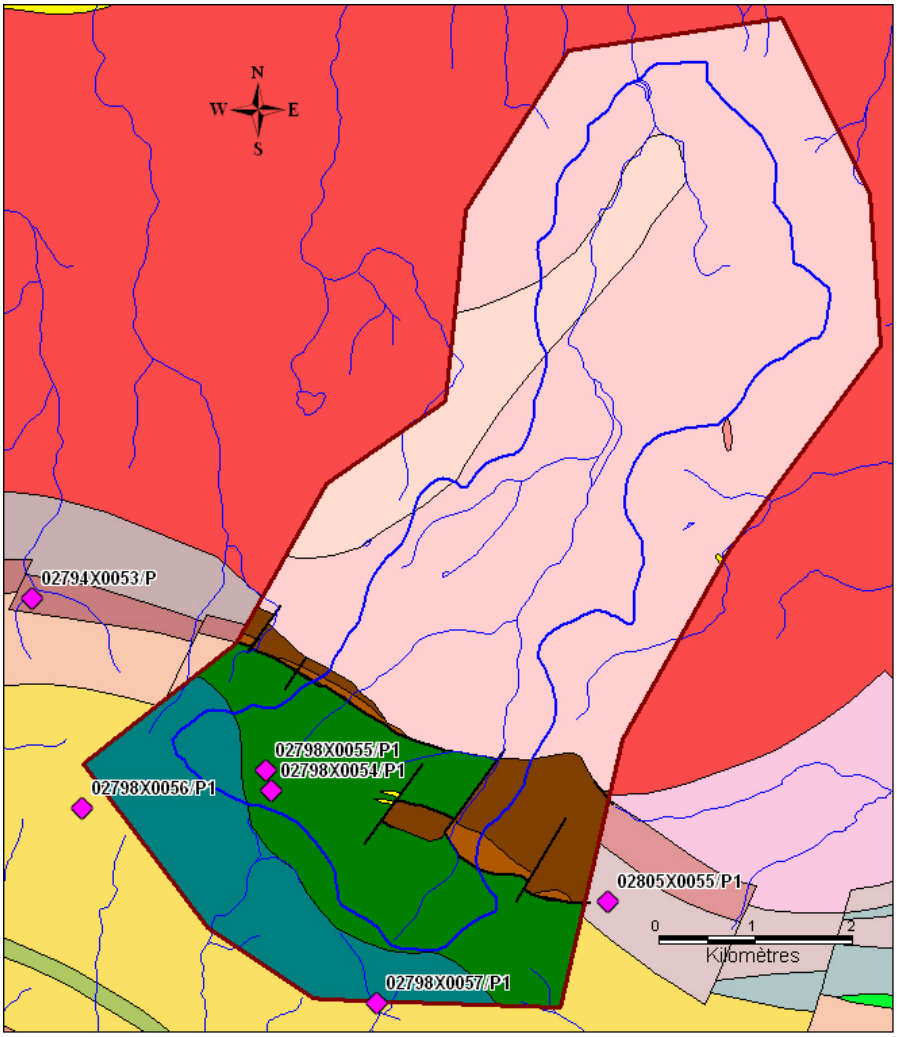


Planche 35 - Localisation des qualitomètres autour du bassin des Echelles



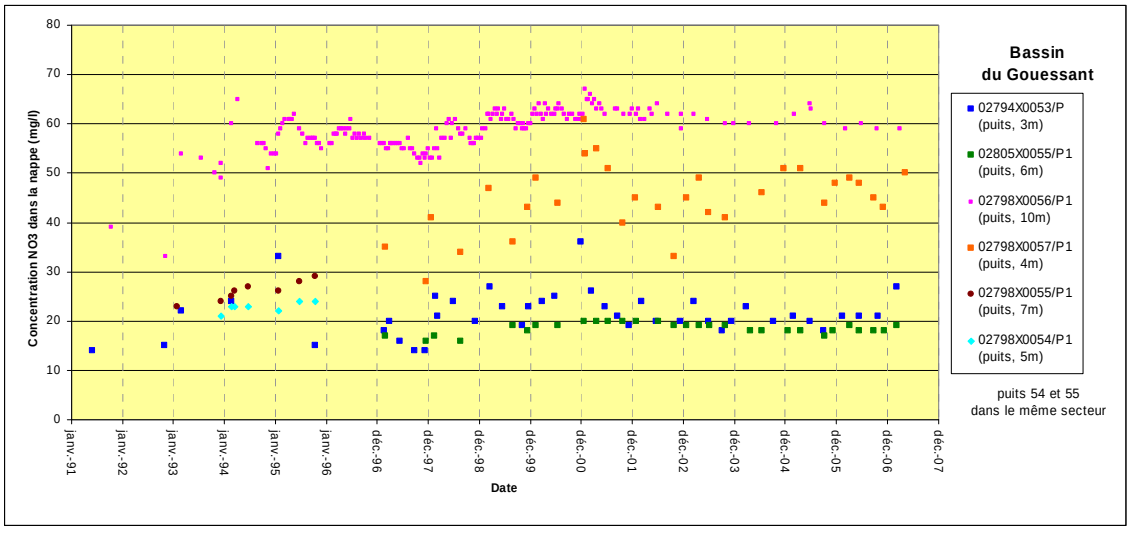
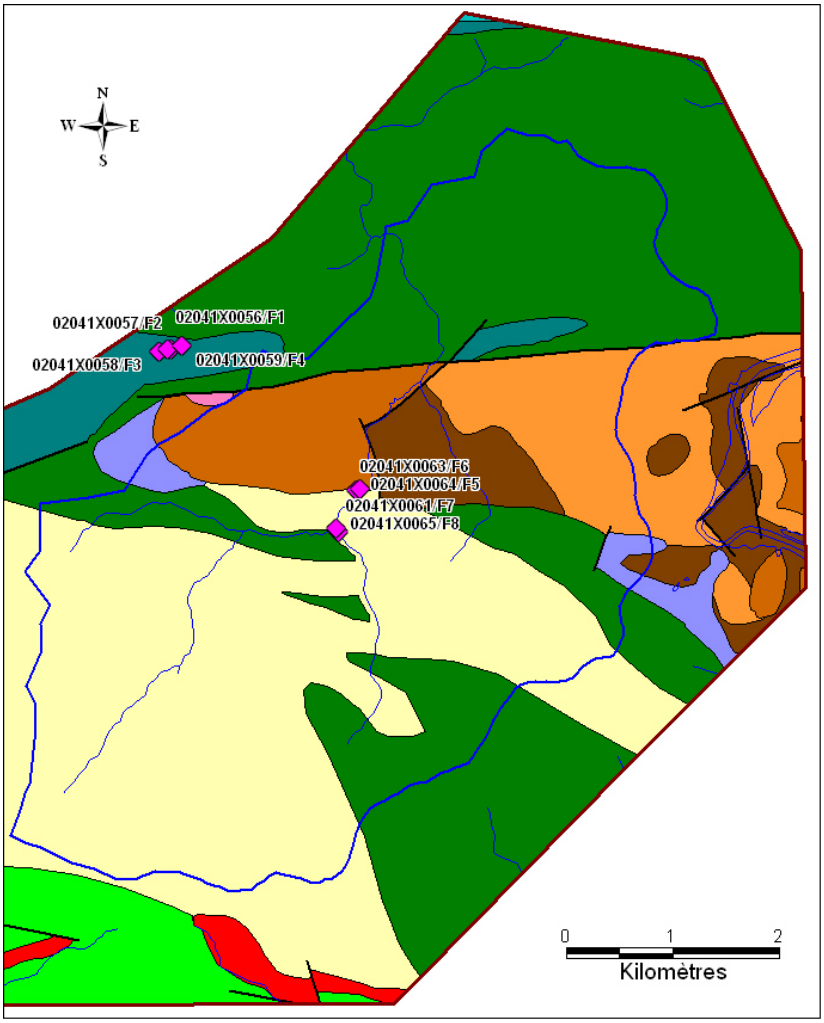


Planche 36 - Localisation des qualitomètres autour du bassin du Gouessant



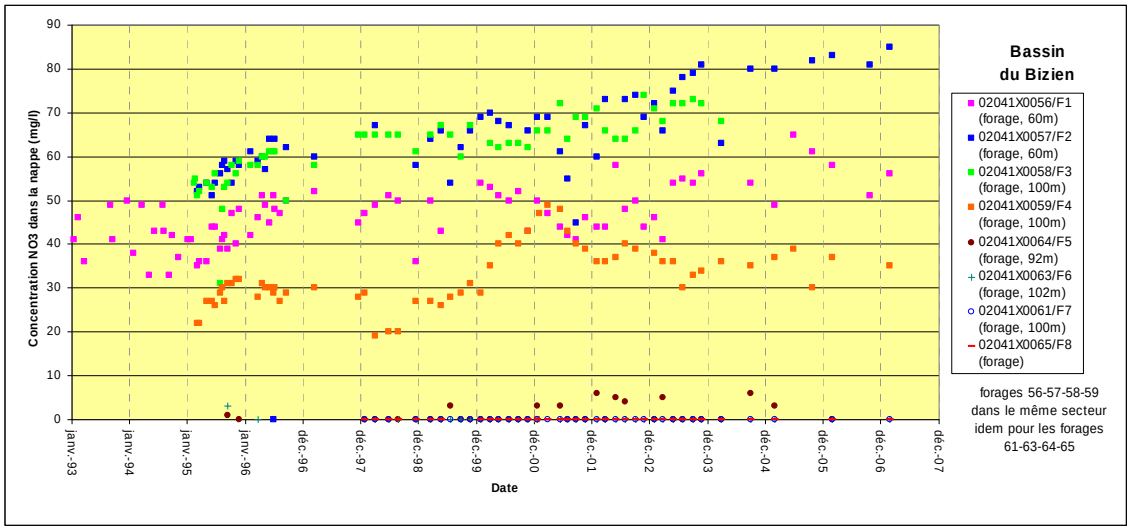


Planche 37 - Localisation des qualitomètres autour du bassin du Bizien

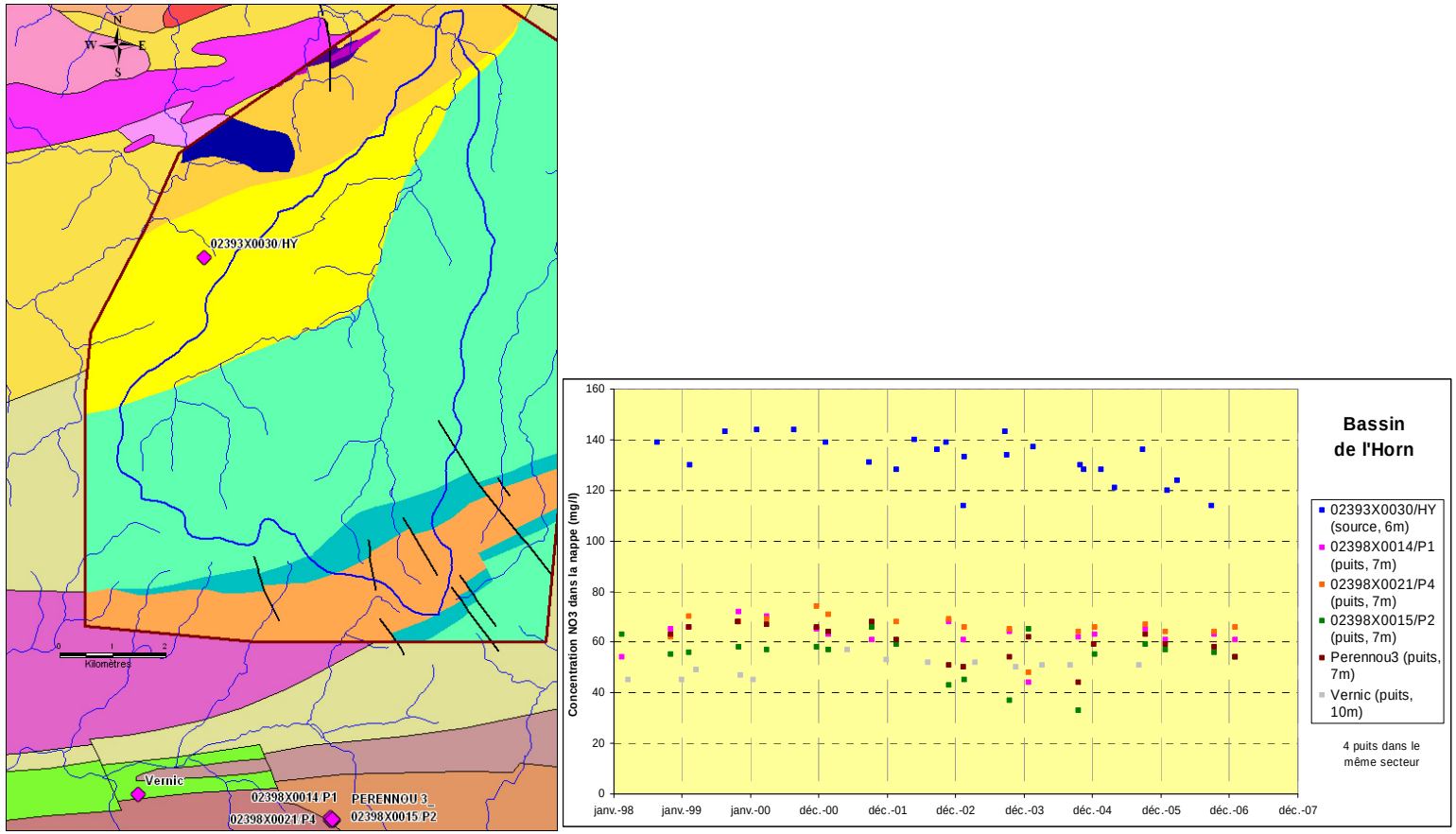


Planche 38 - Localisation des qualitomètres autour du bassin de l'Horn

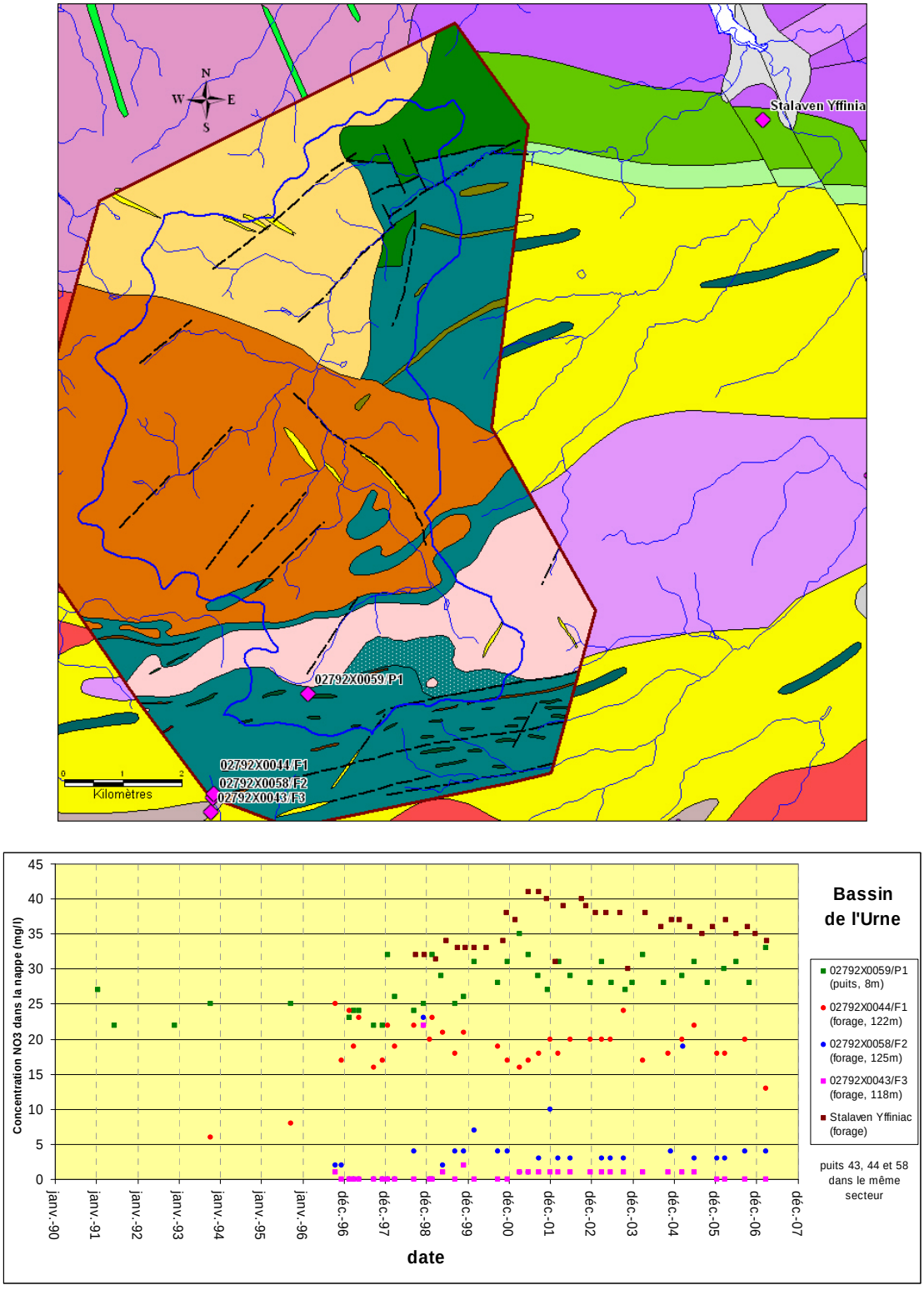
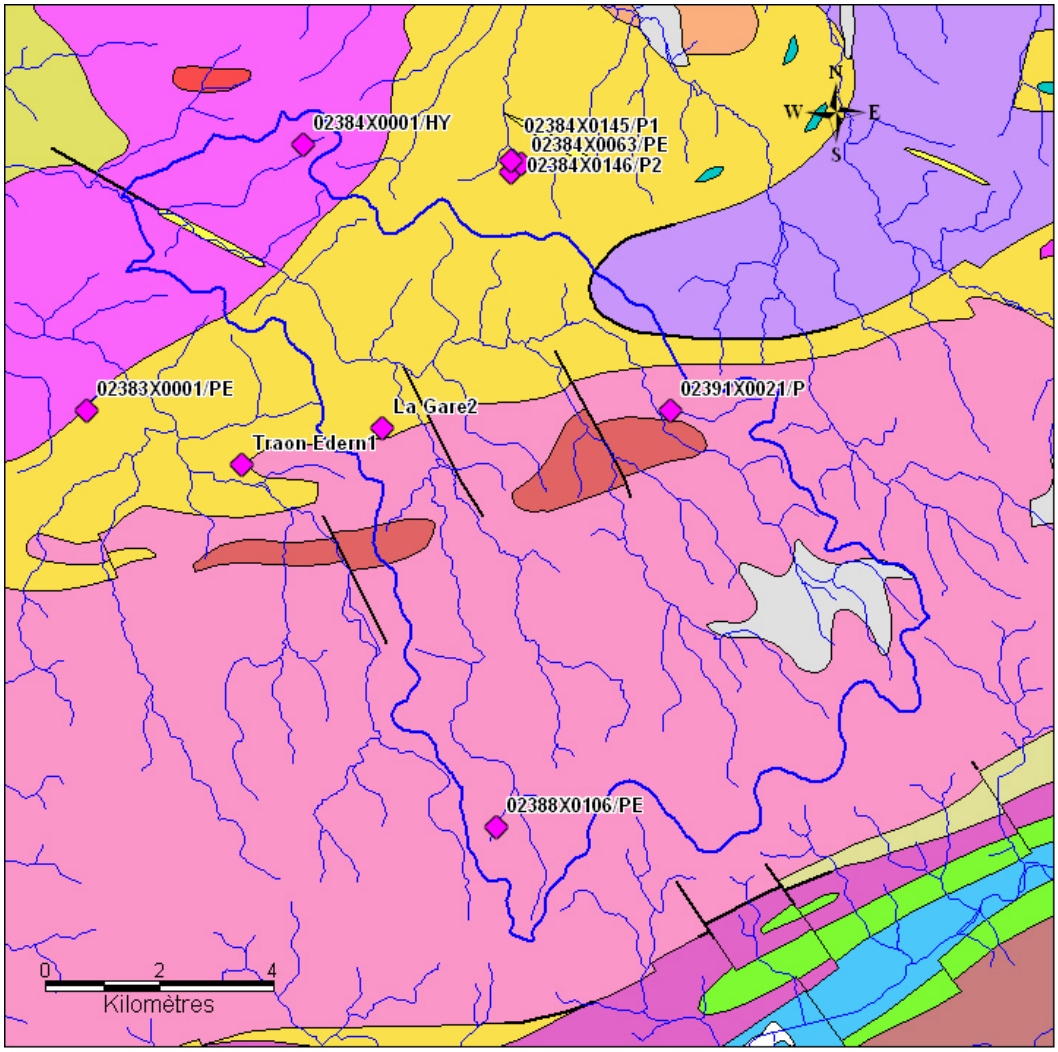


Planche 39 - Localisation des qualitomètres autour du bassin de l'Urne



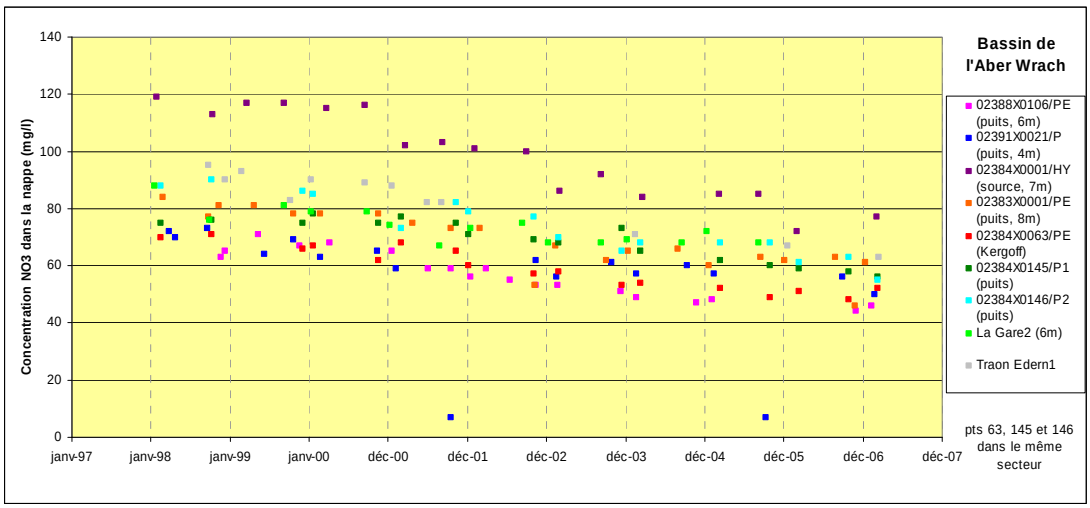


Planche 40 - Localisation des qualitomètres autour du bassin de l'Aber Wrac'h

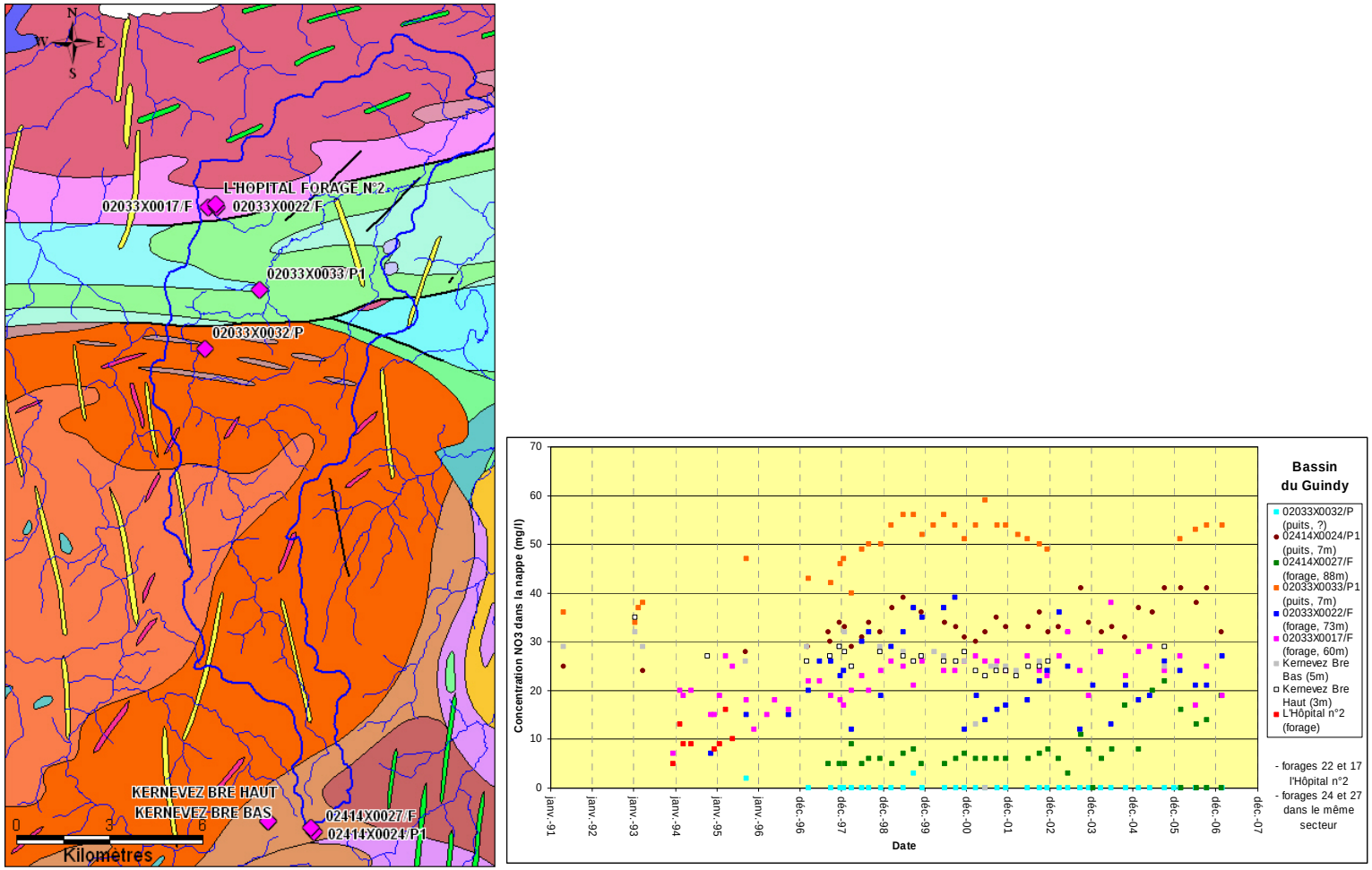
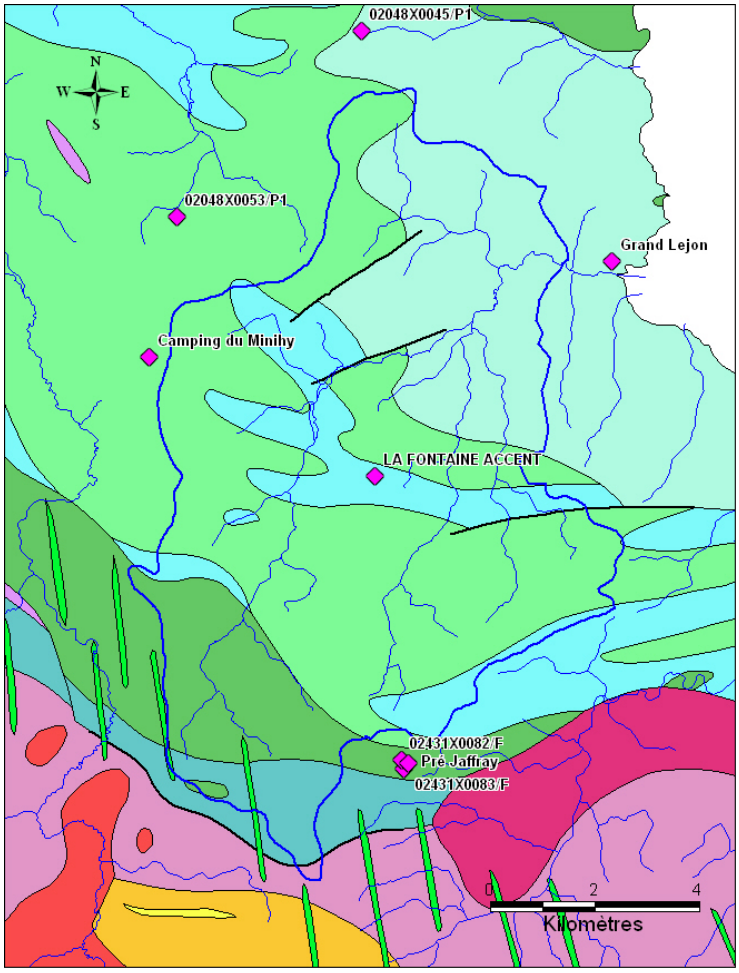


Planche 41 - Localisation des qualitomètres autour du bassin du Guindy



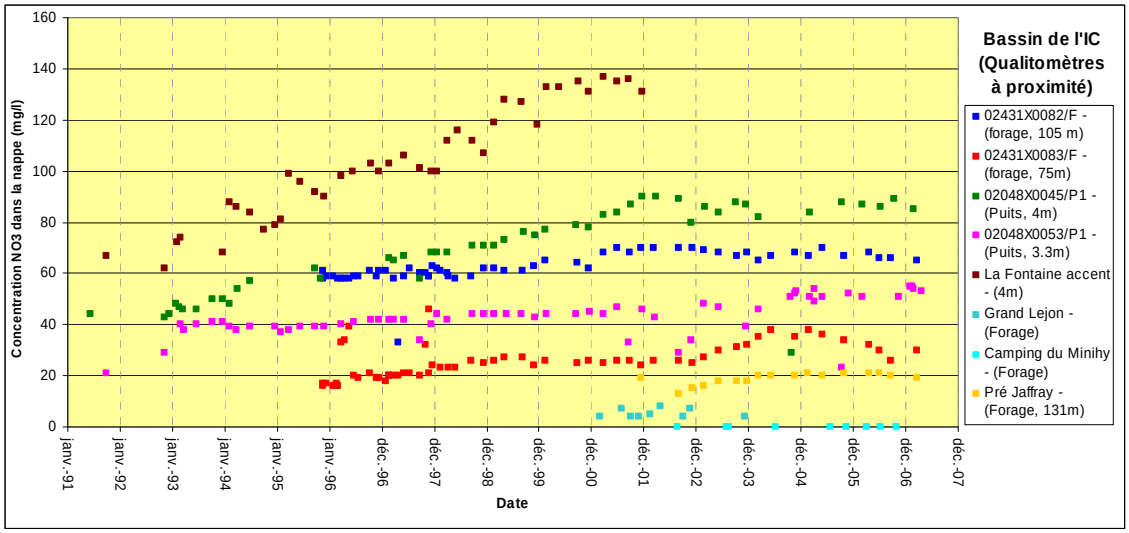
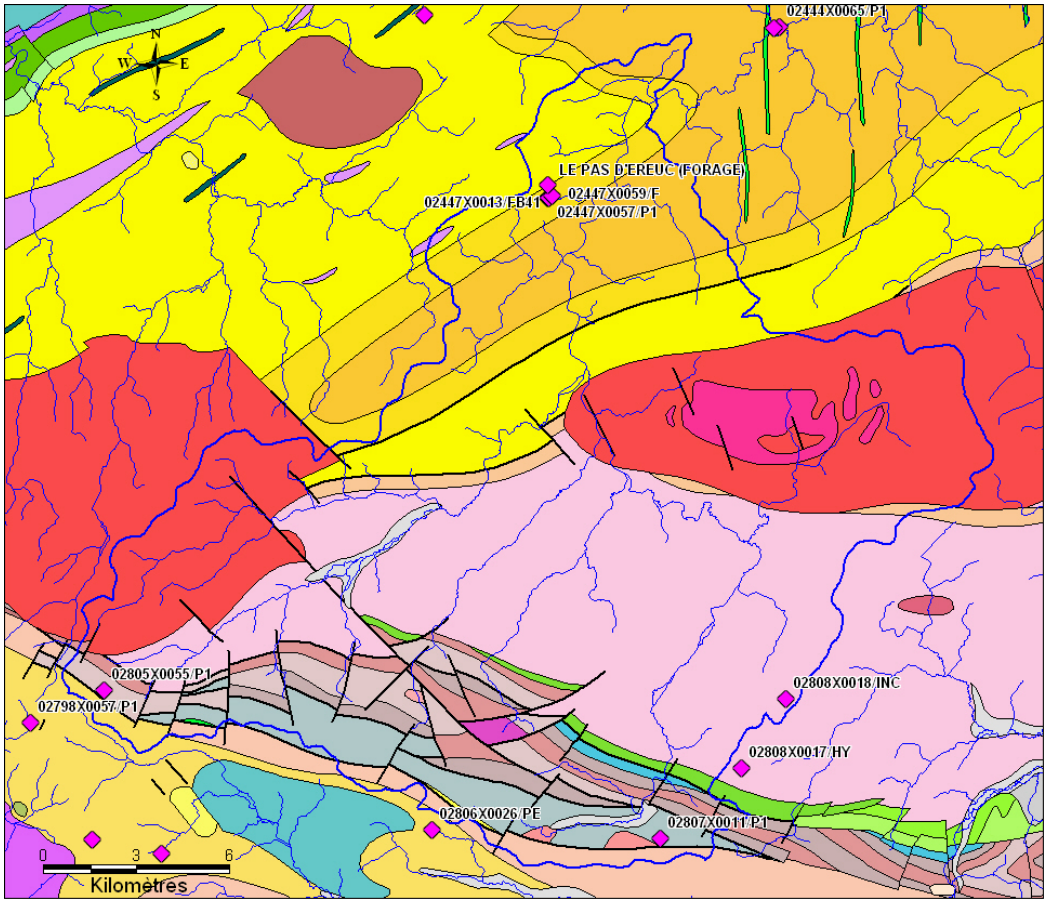


Planche 42 - Localisation des qualitomètres autour du bassin de l'Ic



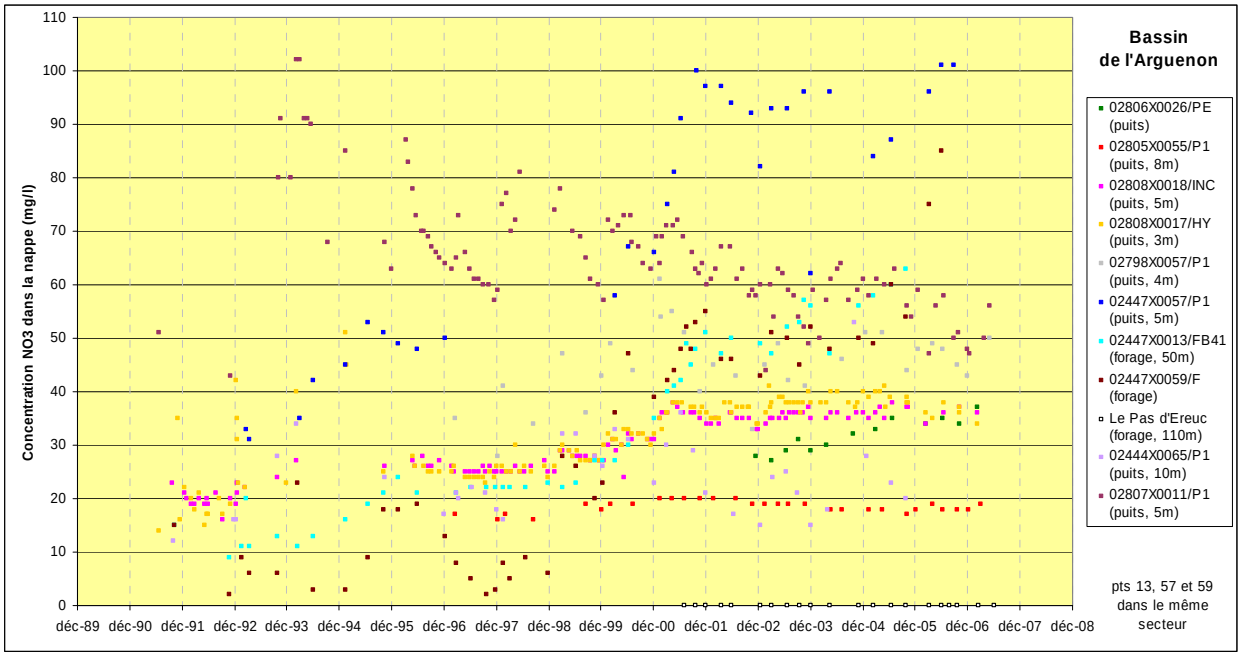


Planche 43 - Localisation des qualitomètres autour du bassin de l'Arguenon

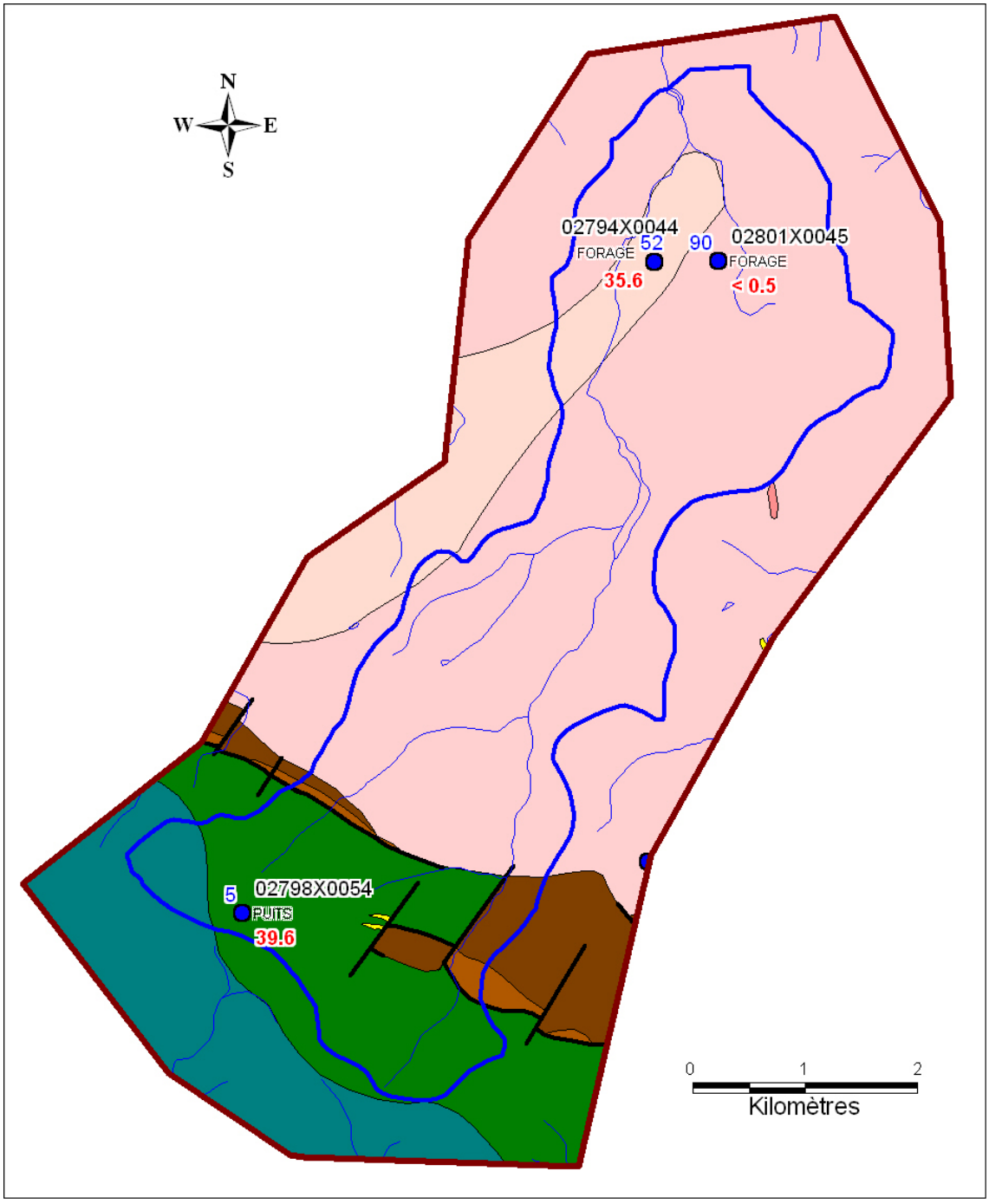


Planche 44 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin du Gouessant

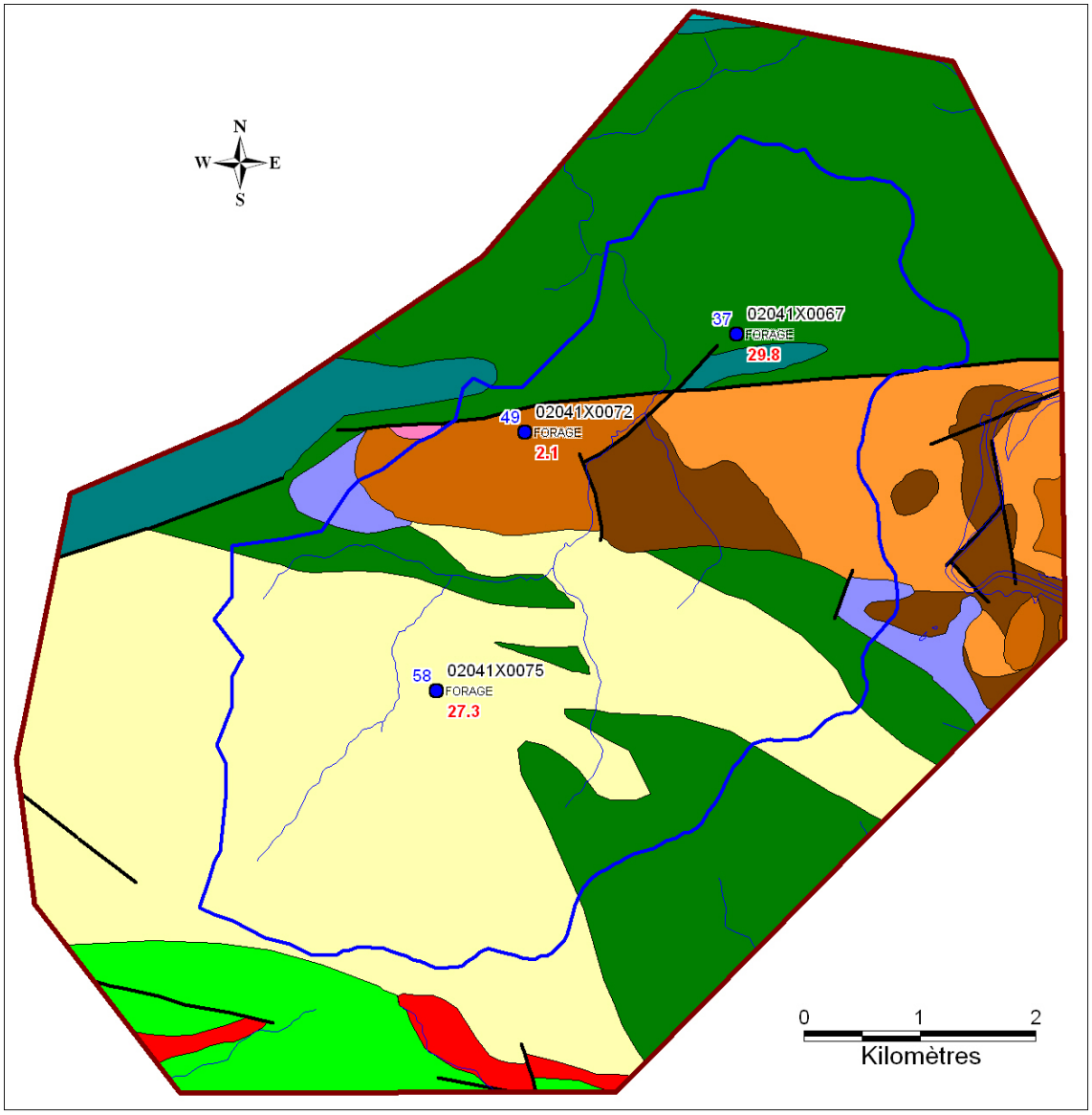


Planche 45 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin du Bizien

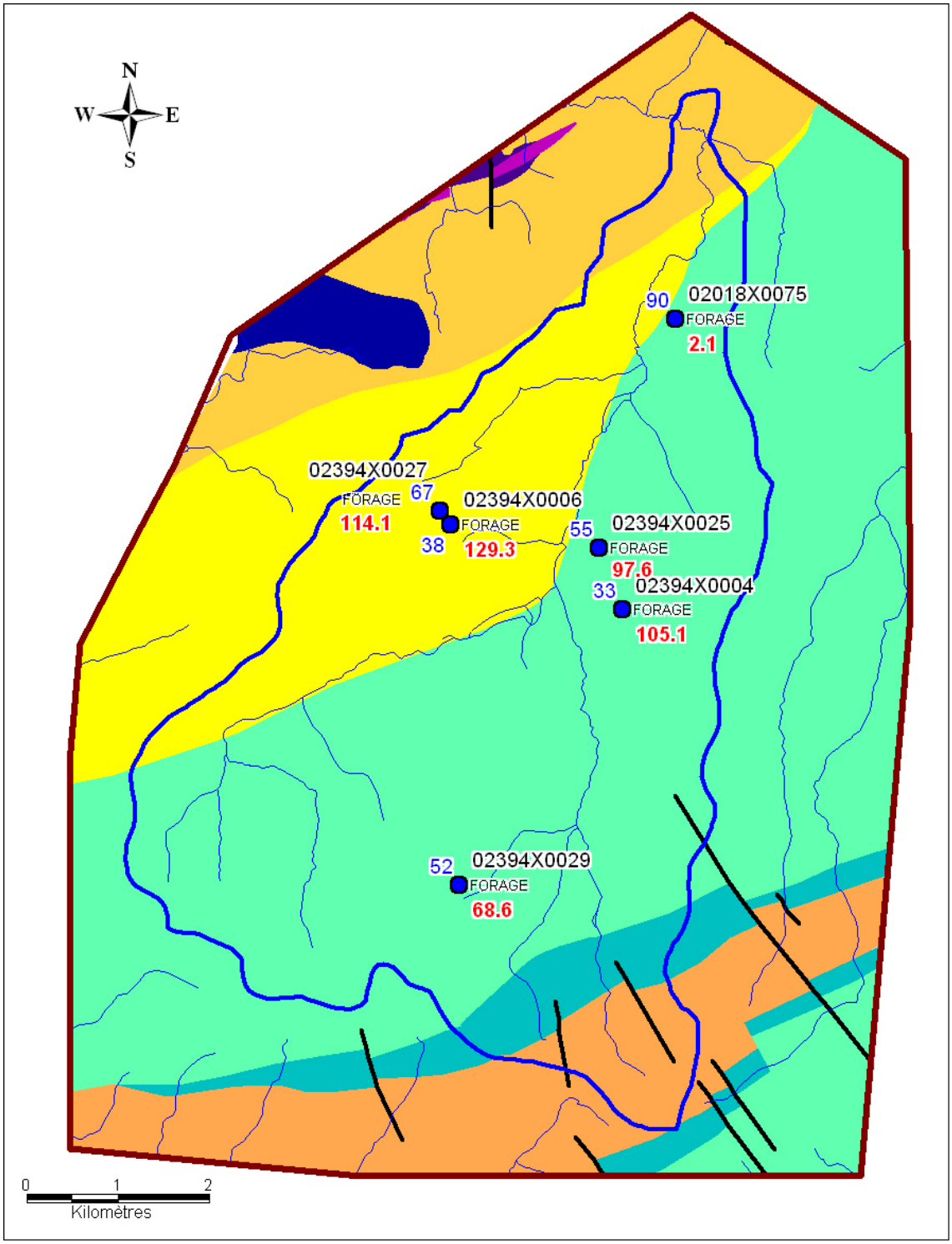


Planche 46 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin de l'Horn

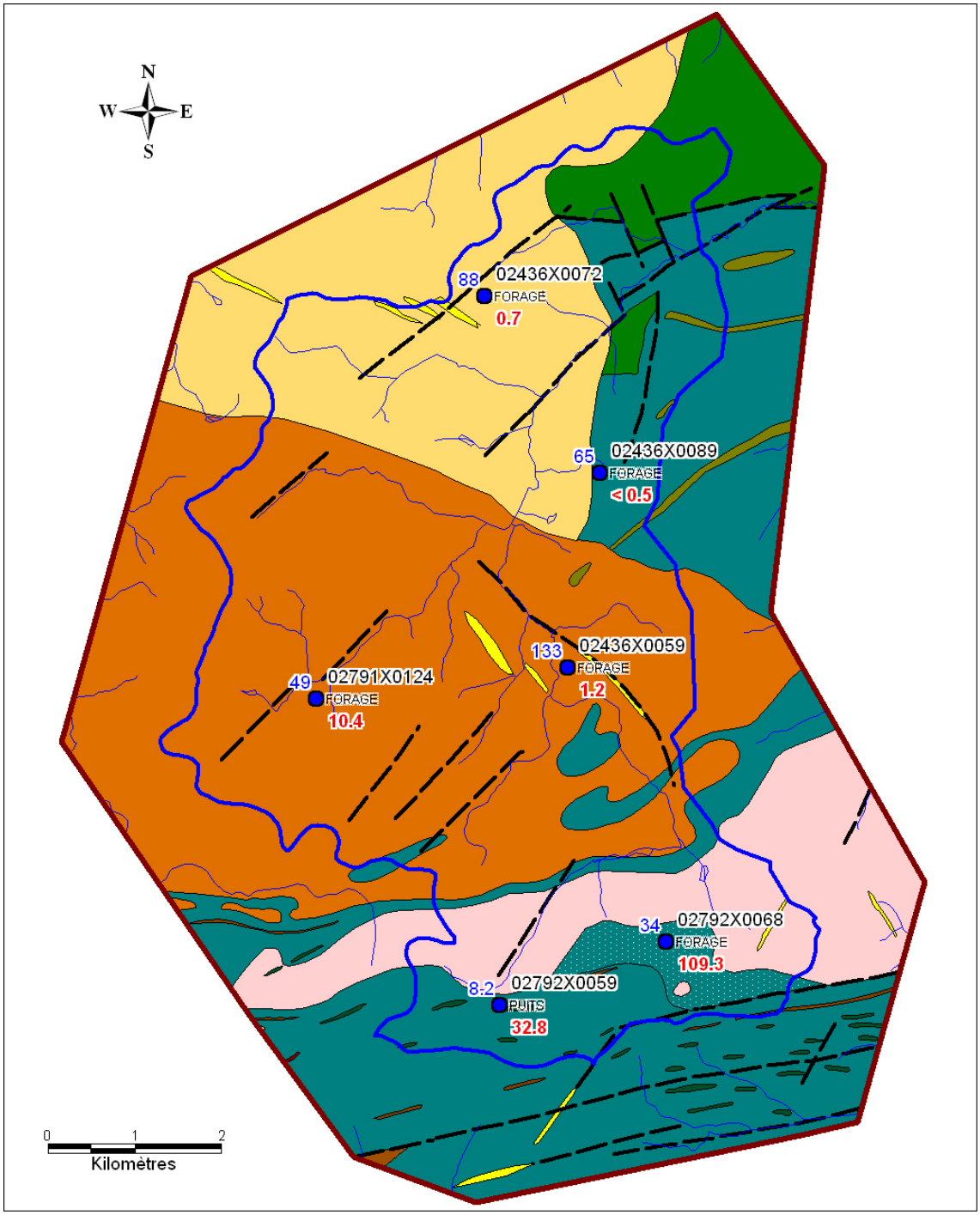


Planche 47 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin de l'Urne

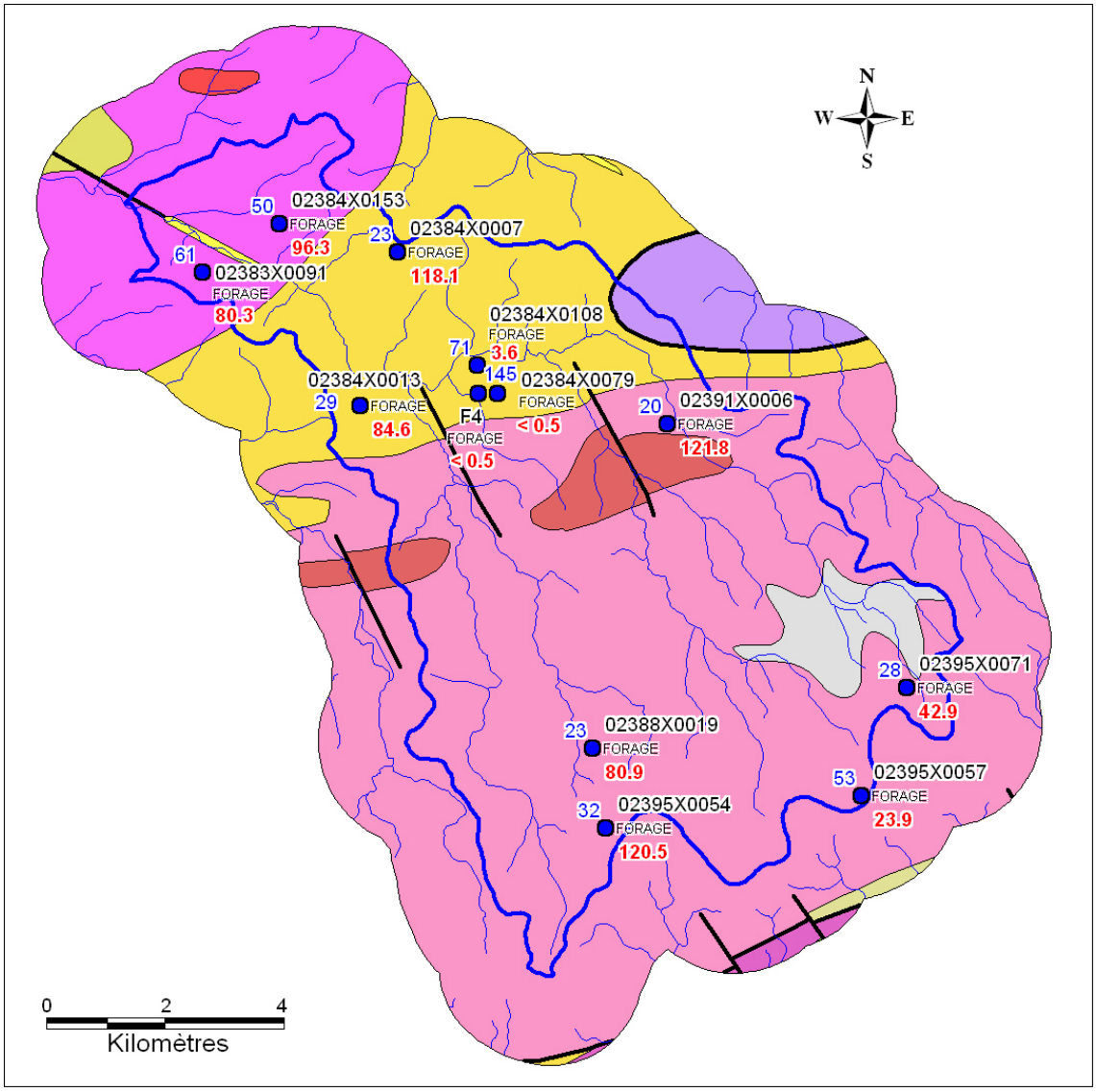


Planche 48 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin de l'Aber Wrac'h

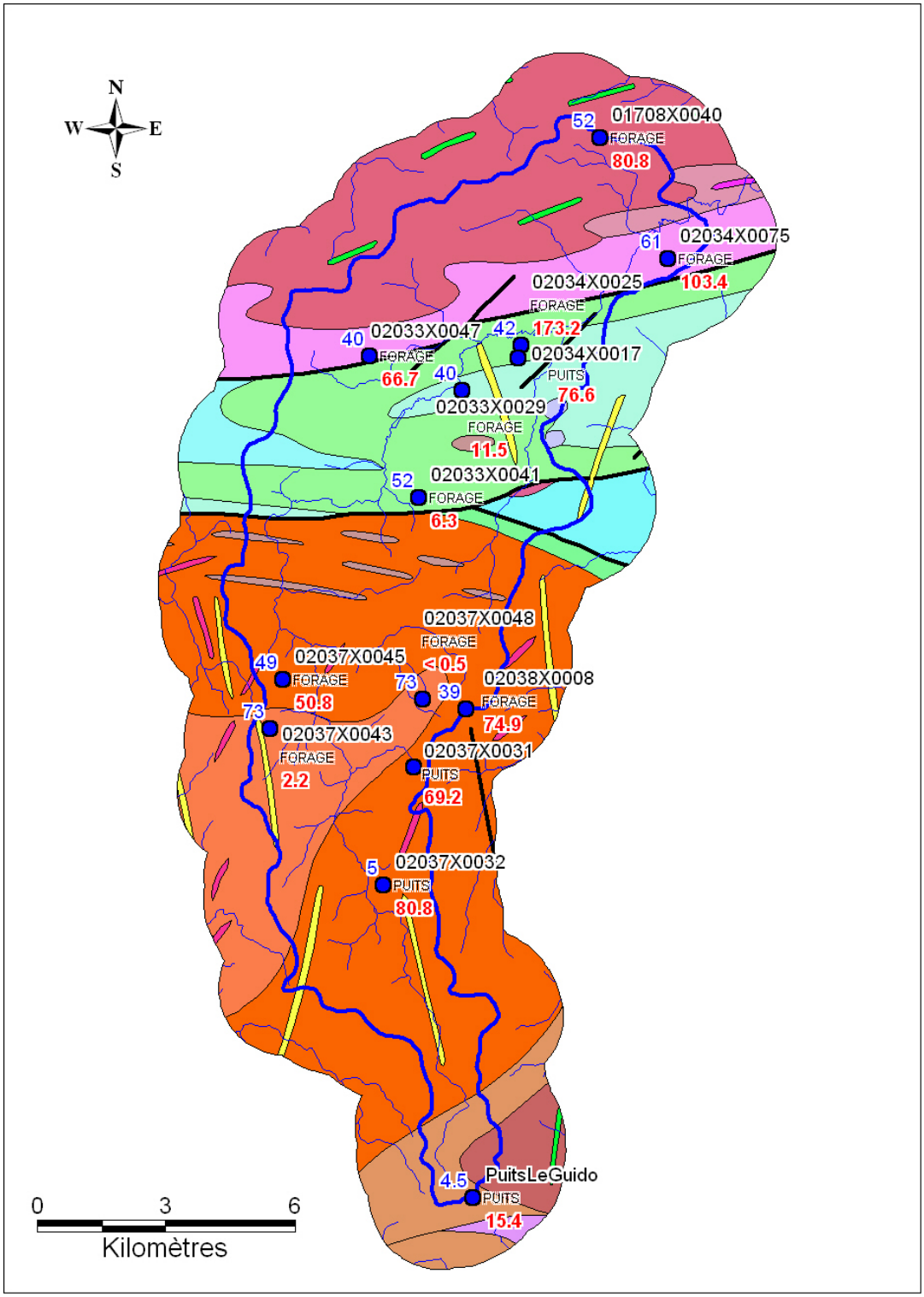


Planche 49 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin du Guindy

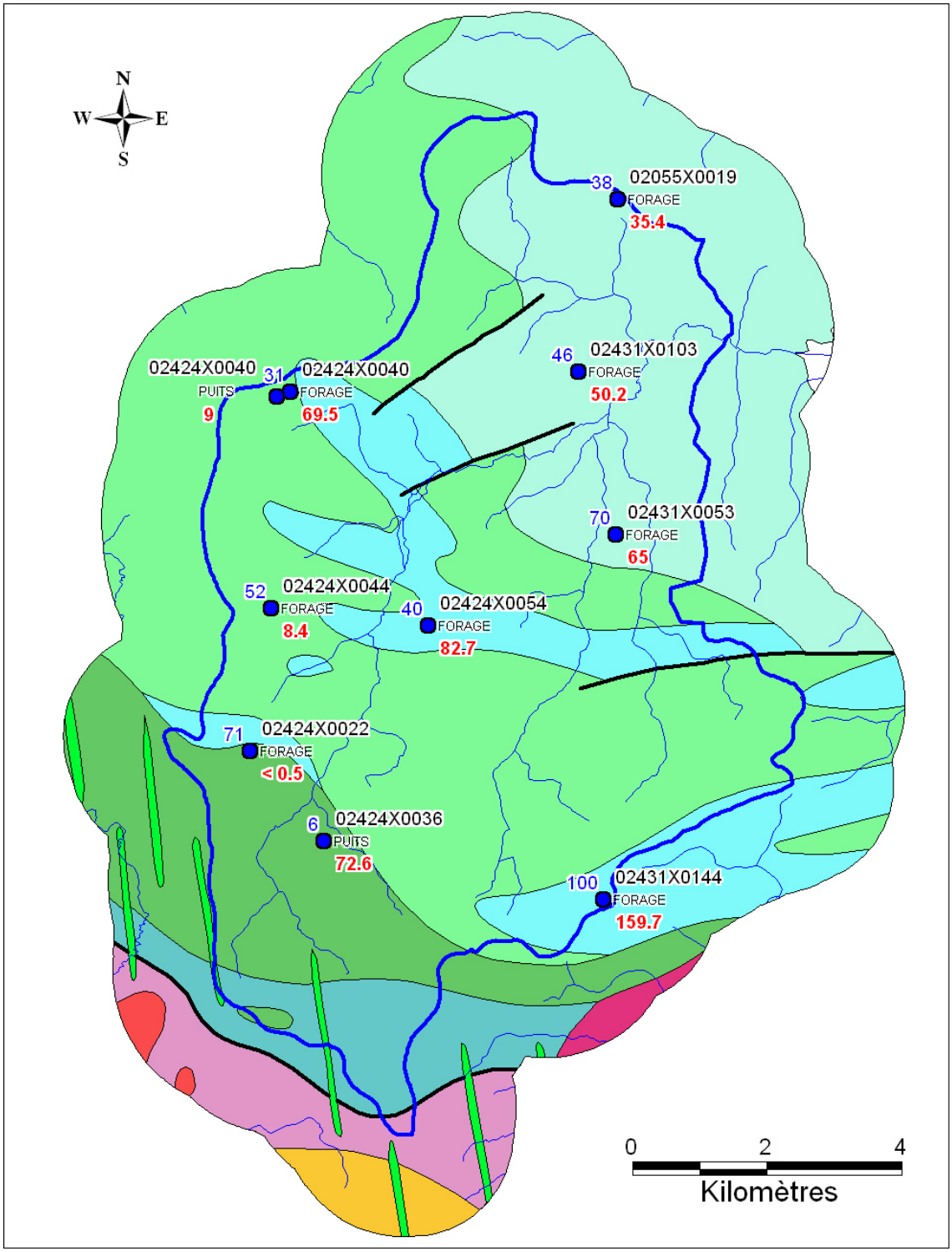


Planche 50 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin de l'Ic

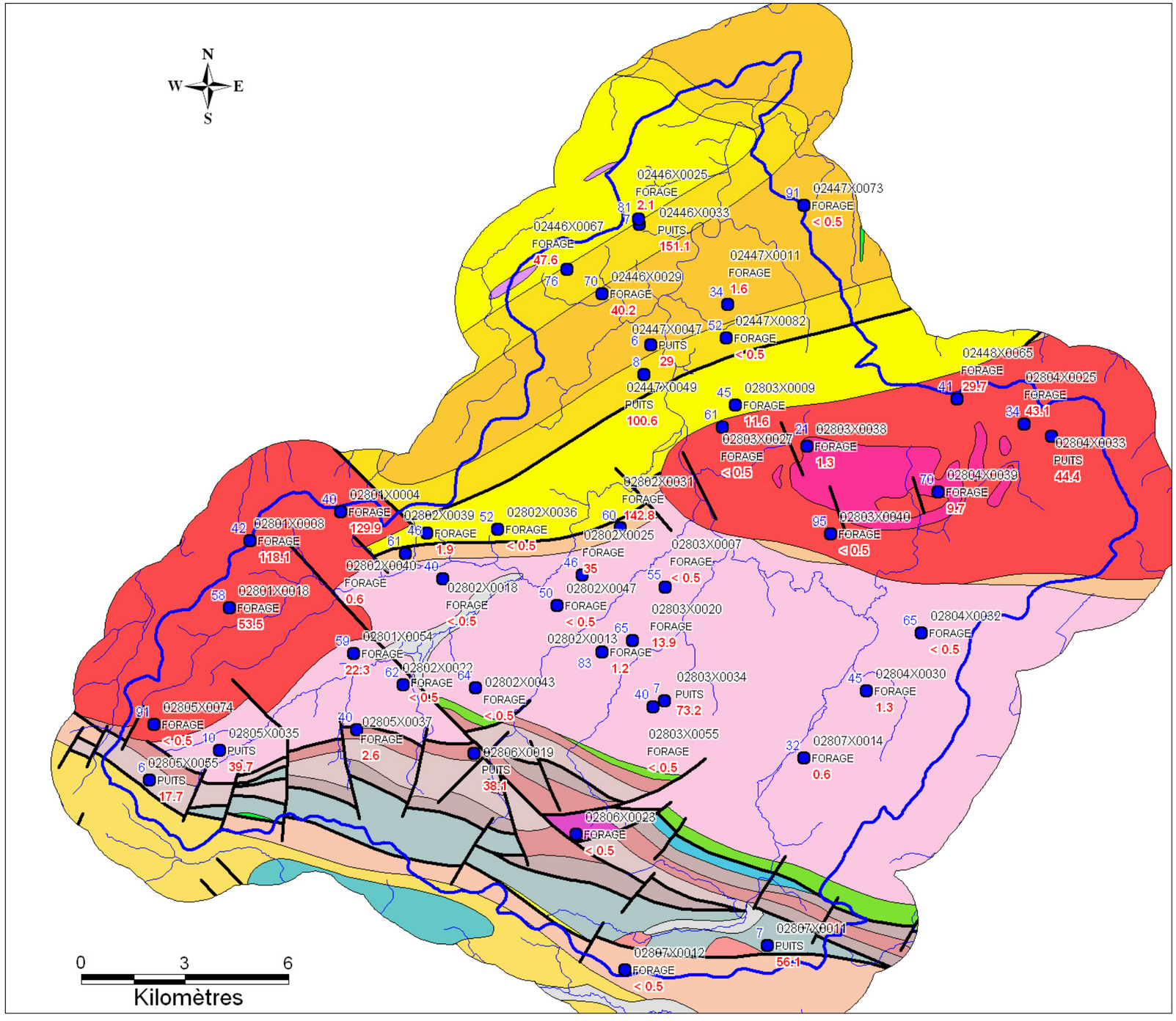


Planche 51 - Résultats des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin de l'Arguenon

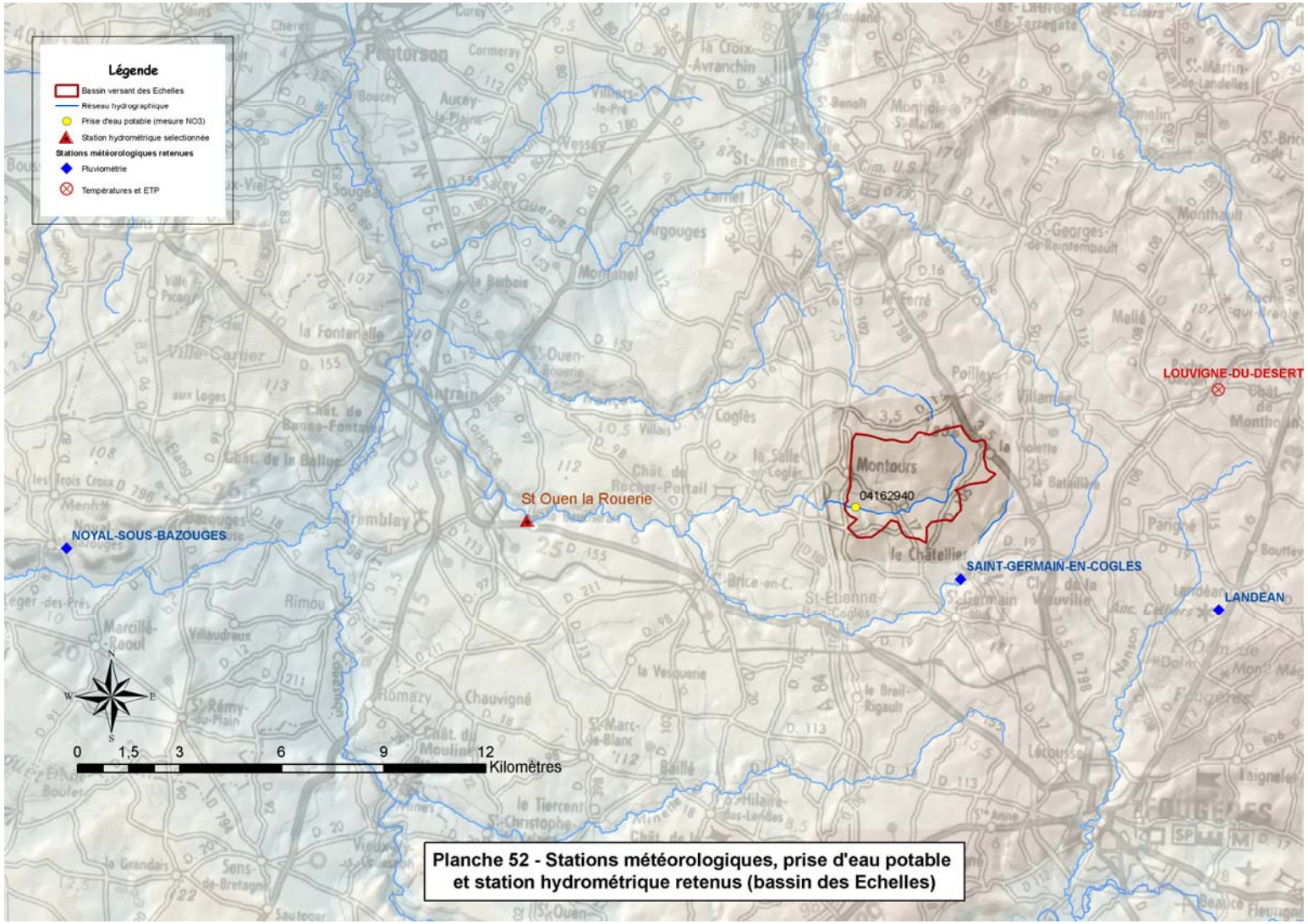


Planche 52 - Stations météorologiques, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin des Echelles)

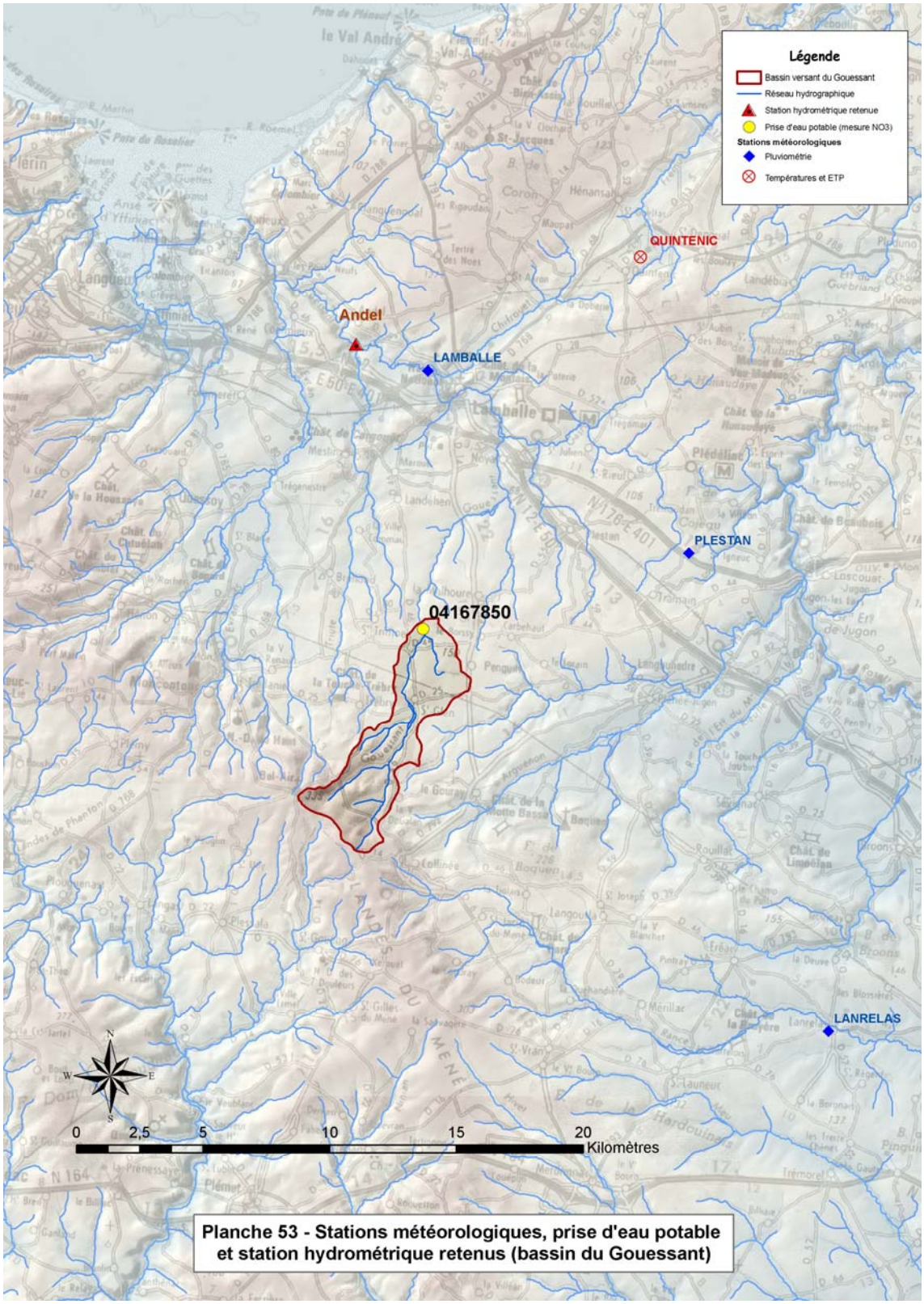


Planche 53 - Stations météorologiques, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin du Gouessant)

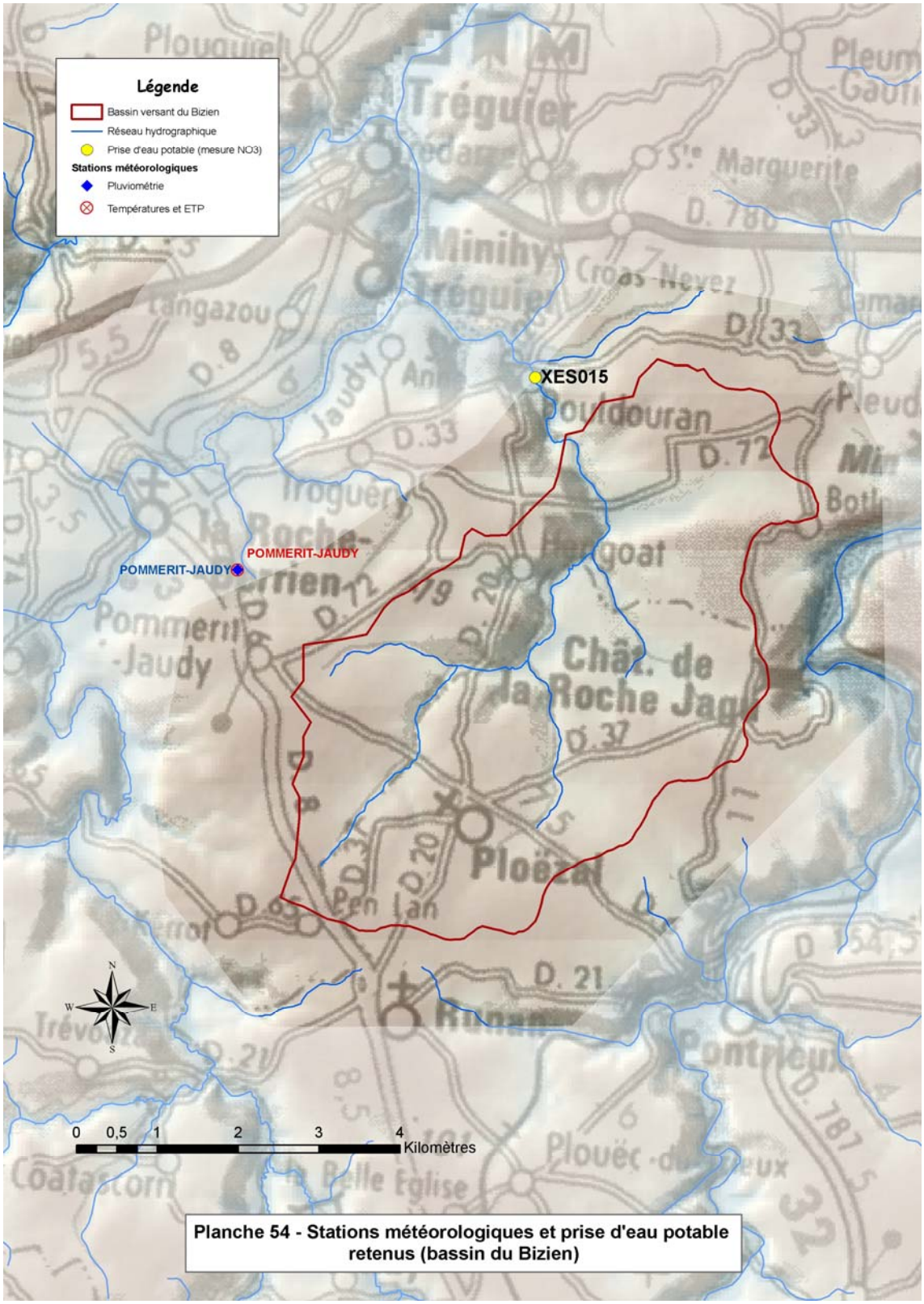


Planche 54 - Stations météorologiques et prise d'eau potable retenus (bassin du Bizien)

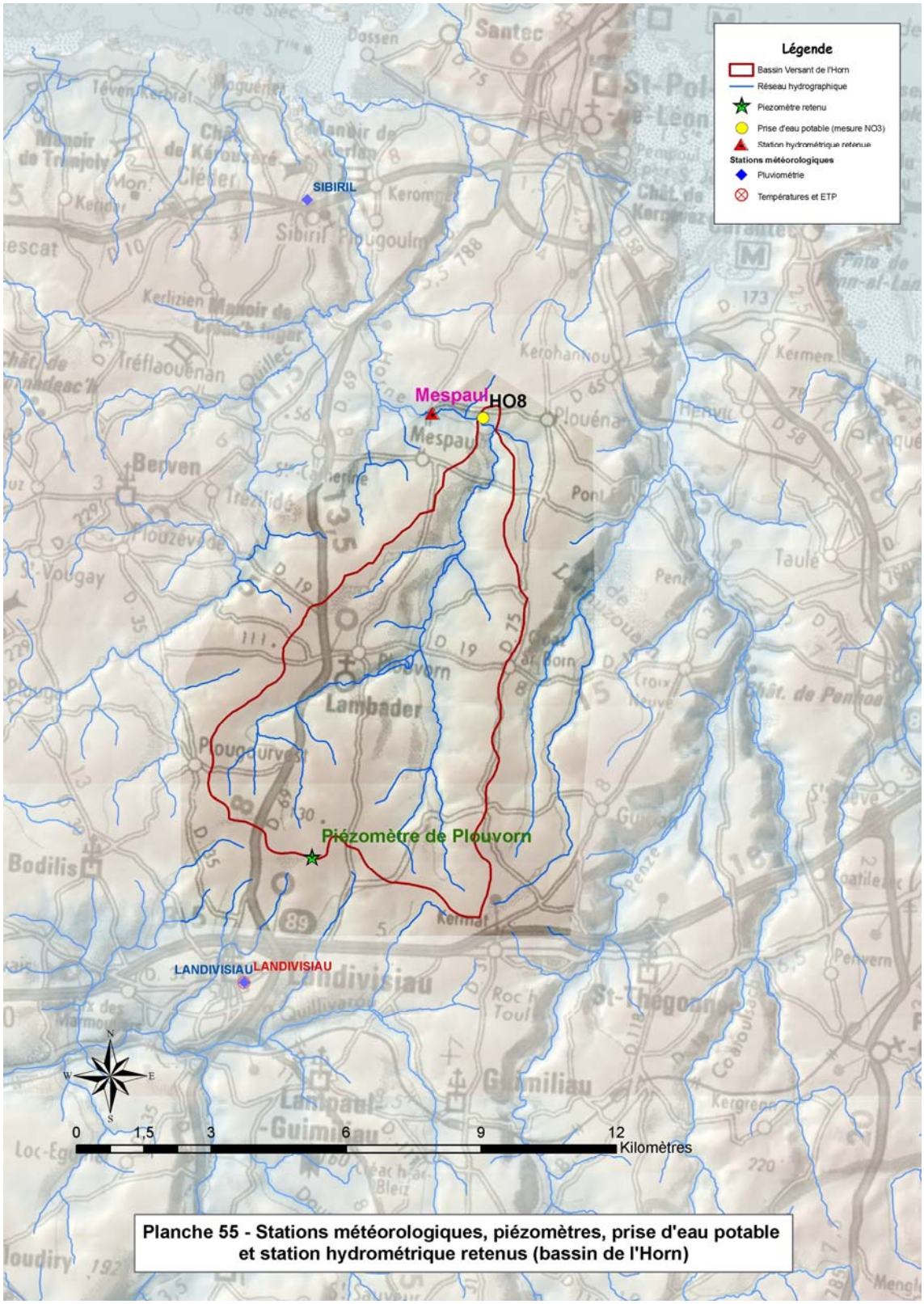


Planche 55 - Stations météorologiques, piézomètres, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin de l'Horn)

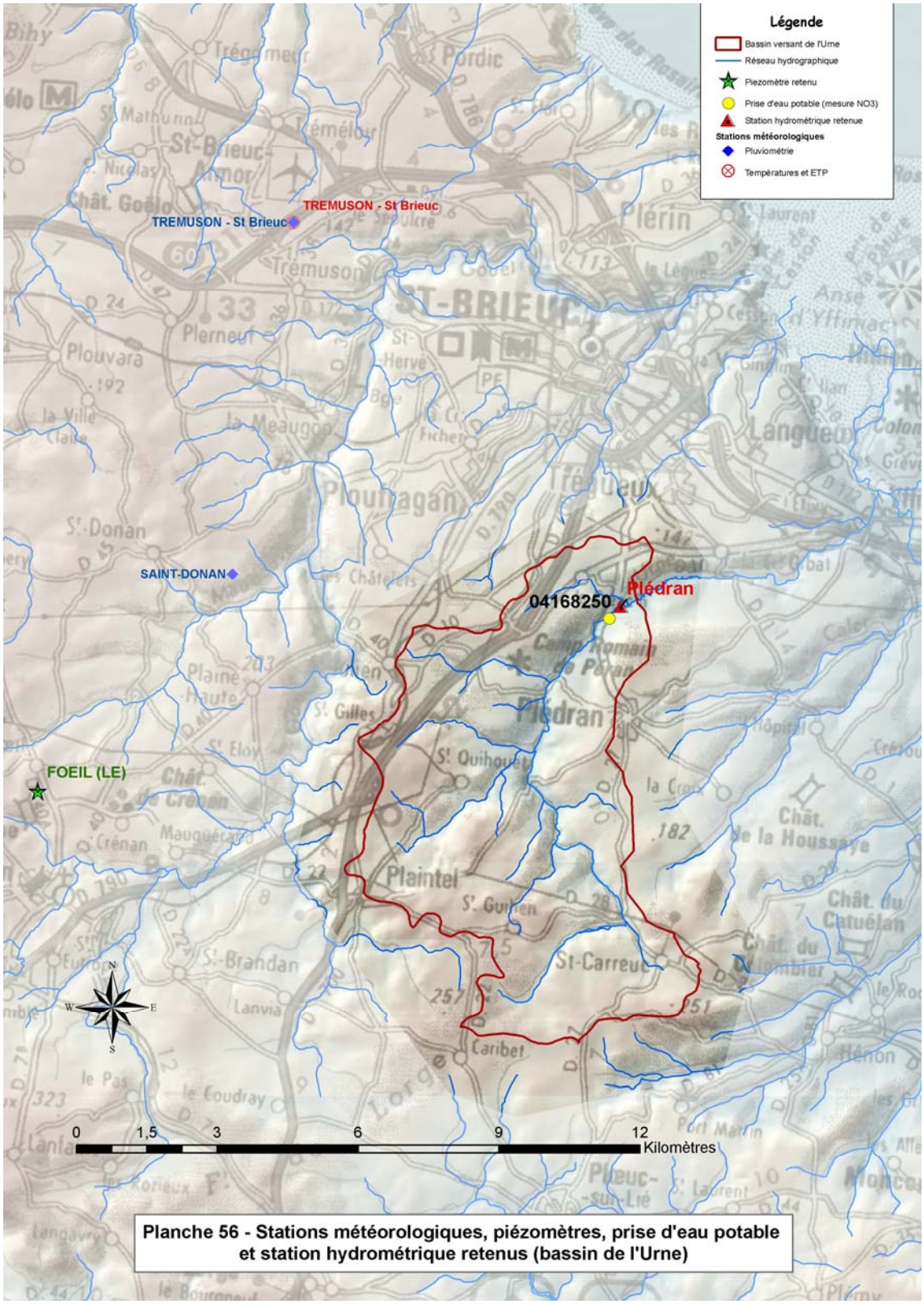


Planche 56 - Stations météorologiques, piézomètres, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin de l'Urne)

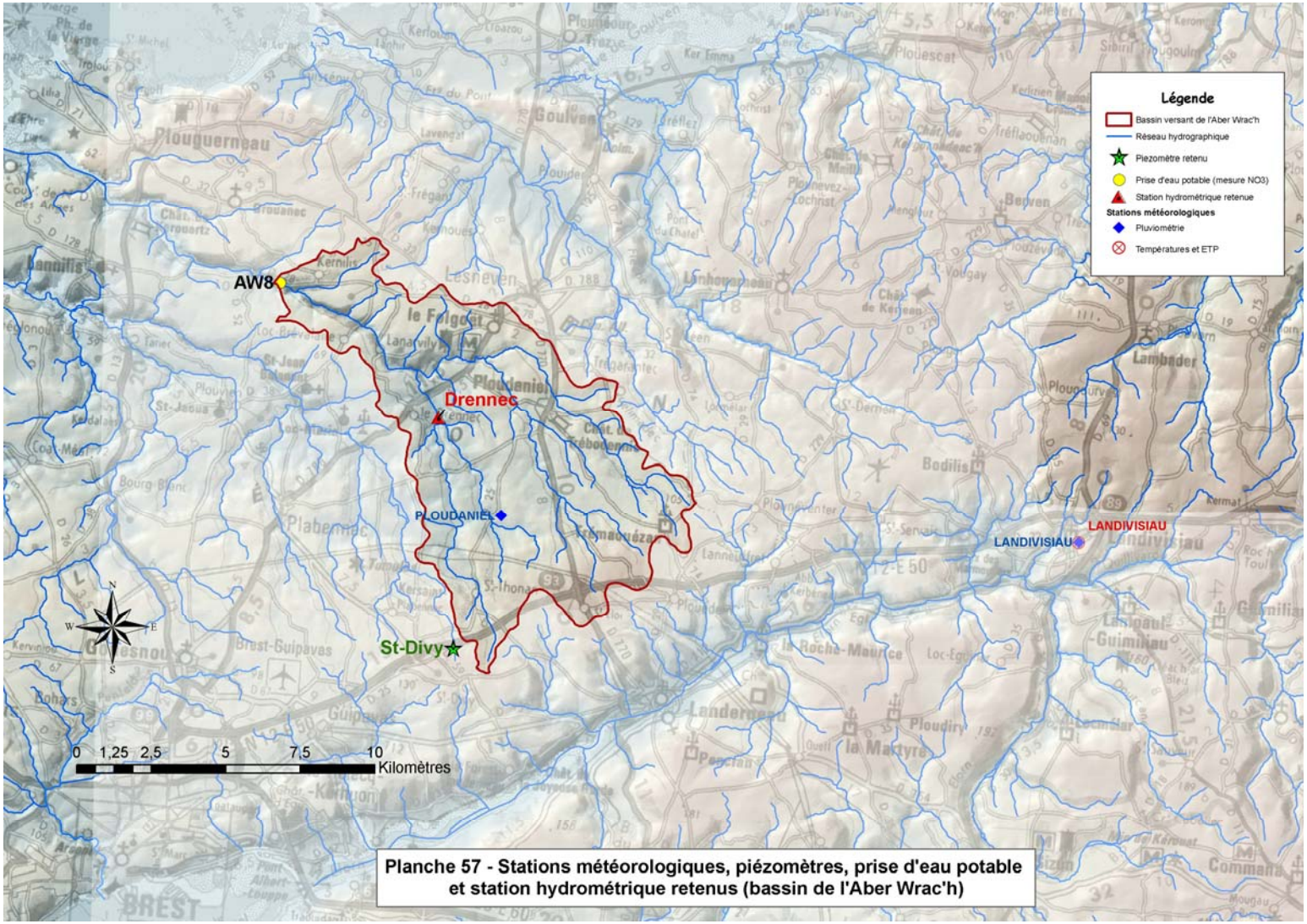


Planche 57 - Stations météorologiques, piézomètres, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin de l'Aber Wrac'h)

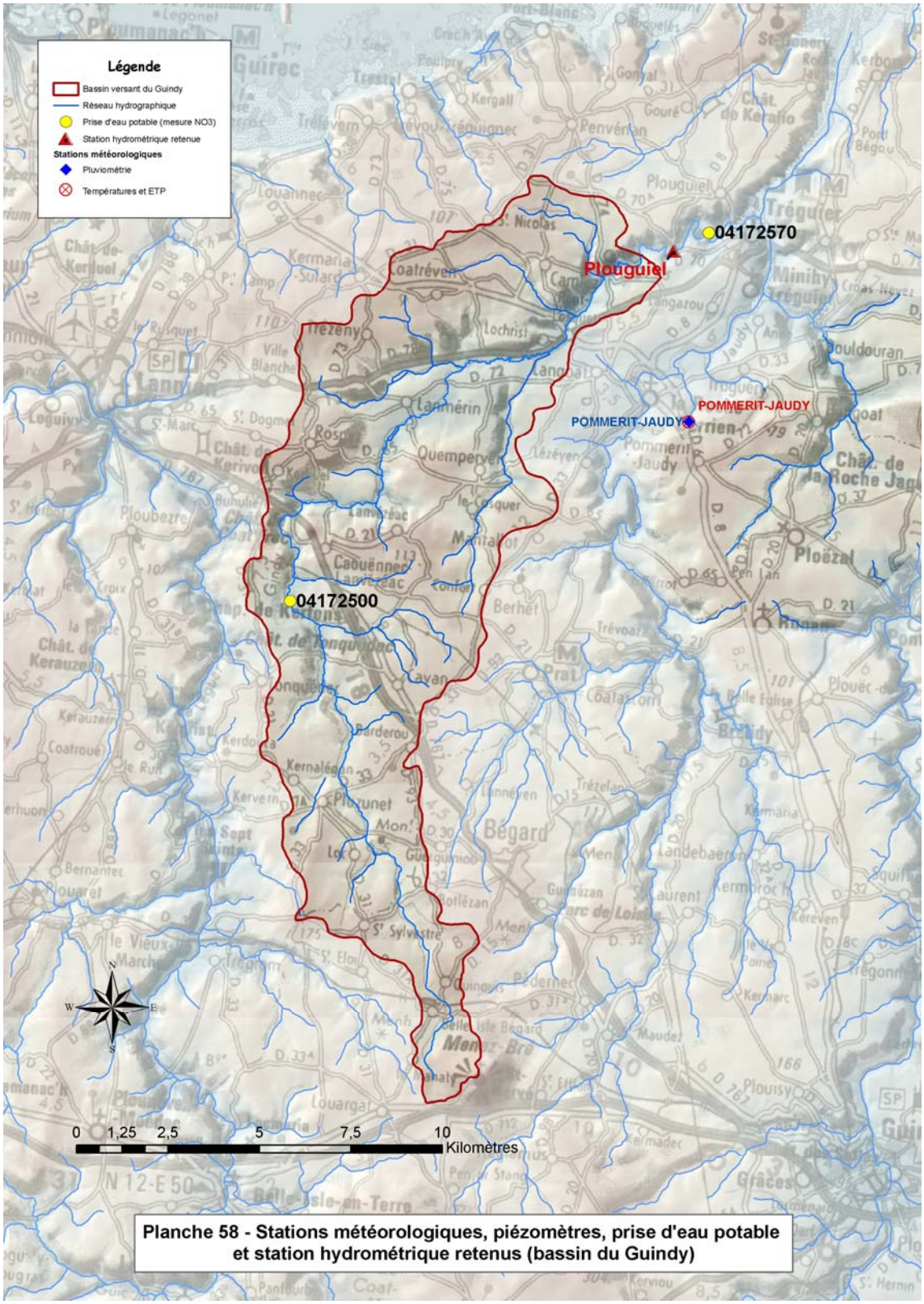


Planche 58 - Stations météorologiques, piézomètres, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin du Guindy)

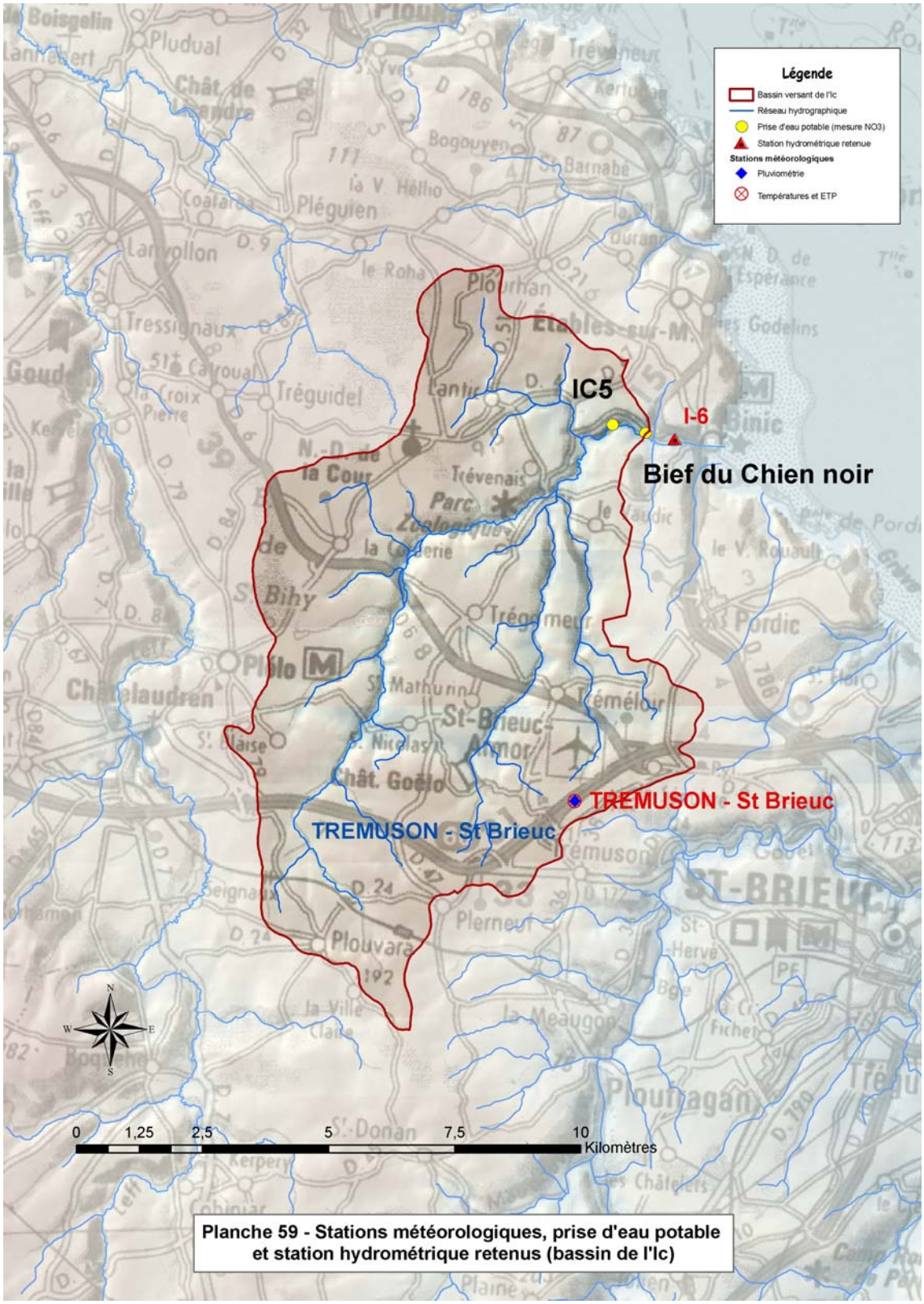


Planche 59 - Stations météorologiques, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin de l'Ic)

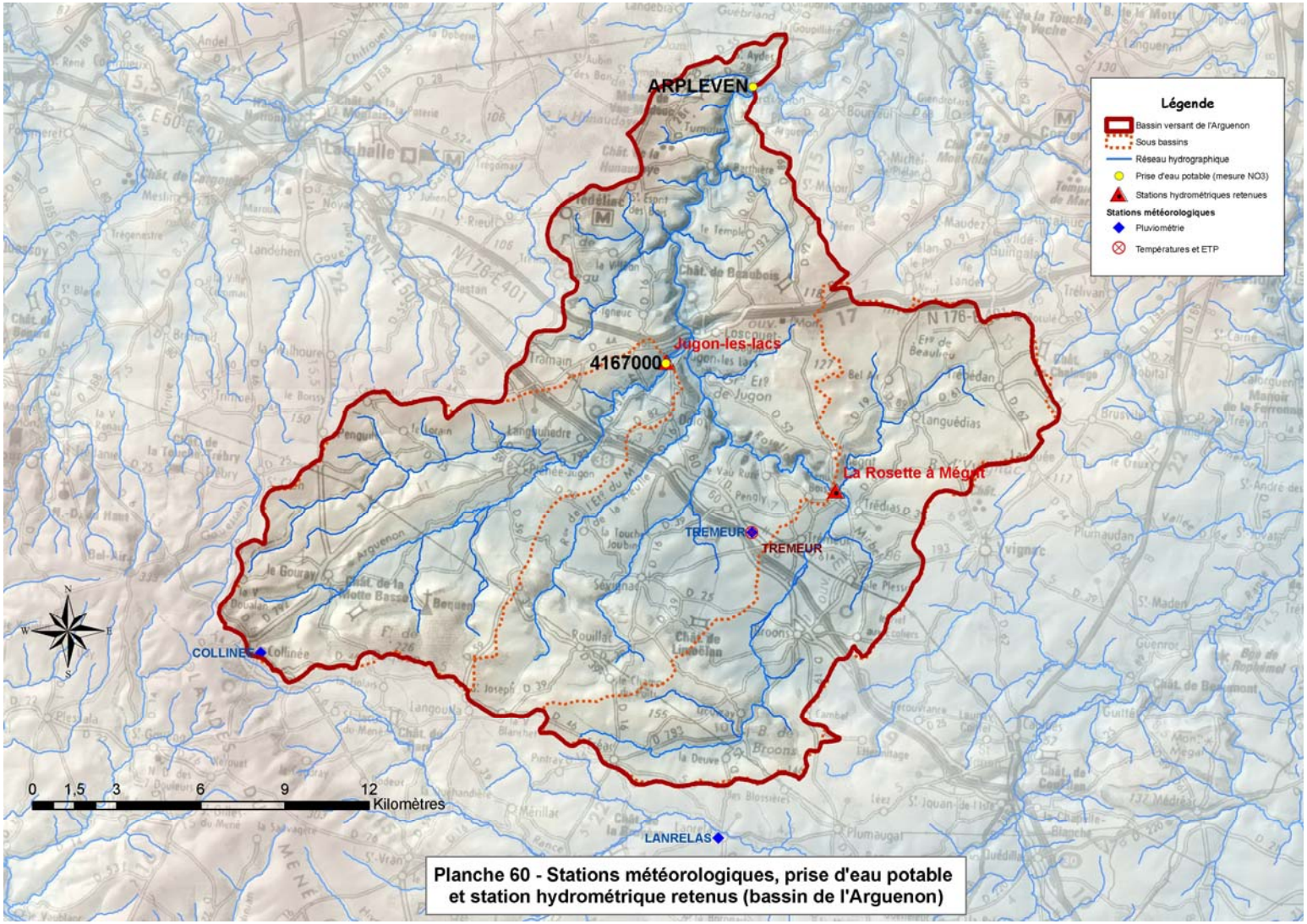


Planche 60 - Stations météorologiques, prise d'eau potable et station hydrométrique retenus (bassin de l'Arguenon)

Annexe 3

Le générateur de pluie et d'ETP du logiciel TEMPO

1. Le générateur de pluie

Le générateur de pluie permet de simuler une séquence de pluie de manière aléatoire, cette séquence satisfaisant un certain nombre de conditions déduites de l'analyse d'une séquence de pluie observée. Le pas d'échantillonnage de la série simulée est celui de la série observée. La simulation d'une séquence de pluie doit en effet satisfaire plusieurs conditions, tant au niveau de la distribution des hauteurs de pluie que des propriétés temporelles des divers événements qui se succèdent. Ce sont :

- la probabilité marginale des hauteurs de pluie (sans considération de distribution dans le temps). La loi de distribution empirique peut éventuellement être remplacée par une loi log-normale ou de Gumbel, lorsque le niveau de confiance calculé à partir du test de Kolmogorov le permet (ce niveau doit au moins être égal à 80% pour que la substitution soit possible). Très souvent la loi empirique est significativement différente de l'une de ces 2 lois, en particulier lorsque la loi de distribution observée est bi-modale (ce phénomène s'observe lorsque la pluie résulte de mécanismes météorologiques variés : crachin breton, orages,...). Toutefois, le prolongement de l'histogramme empirique par une loi de puissance permet la simulation d'événements exceptionnels non observés.

- la densité des événements (nombre d'événements par unité de temps)

- la fonction d'autocorrélation des événements

- la loi d'échelle définie à partir de ses 3 premiers moments. Cette loi d'échelle suppose la véracité de la relation suivante, pour chaque k :

$$M_j(k.dt) = k^{\lambda(j)} M_j(dt)$$

où le moment $M_j(k.dt)$ est la somme sur le segment de temps $k.dt$ des hauteurs de pluie élevées à la puissance j. Seules les hauteurs de pluie strictement positives sont comptabilisées de manière à considérer la moyenne des hauteurs de pluie (sinon on aurait un résultat trivial $\lambda(1)=1$ car $M_j(dt)$ représenterait la hauteur de pluie moyenne). Chacun des exposants $\lambda(j)$ relatifs aux différents moments j de la série simulée doivent être voisins de ceux calculés à partir de la série observée. Cette loi d'échelle est appliquée sur les segments $k.dt$ correspondant à 1,2,3,6,12,24 heures, 2, 8, 16 et 32 jours. Elle a pour but de structurer la manière dont les hauteurs de pluie varient sur des segments de temps de longueur variable. La notion de moment appliquée aux séries temporelles peut être rapprochée des moments associés aux variables aléatoires : le premier moment est la moyenne, le second moment centré est caractéristique de la dispersion (variance), le troisième moment de l'asymétrie de la loi de probabilité. Dans le cas des séries temporelles le premier moment représente la somme des hauteurs de pluie sur des segments de temps de longueur variable ; l'exposant $\lambda(1)$ est généralement voisin de 0.7. Prenons un pas journalier pour fixer les idées ; l'exposant étant inférieur à 1, la hauteur de pluie cumulée sur 2, 8, 16, 32 jours consécutifs croît moins vite que la moyenne journalière des hauteurs de pluie

multipliée par 2, 8, 16, 32 jours ce qui est logique car toute séquence de pluie s'interrompt nécessairement lorsque la durée de la période d'observation augmente. Le second moment structure la dispersion des hauteurs de pluie sur différentes périodes de temps,...

- la saisonnalité des pluies si on dispose d'au moins une année d'observation

- la variabilité de la pluie cumulée sur un pas prédéterminé si les périodes d'observation et de simulation couvrent chacune au moins 10 pas. Une caractéristique importante des différents types de climat et, en particulier, du changement climatique, est la variabilité de la hauteur de pluie cumulée sur un pas prédéterminé. Cette variabilité s'observe aussi bien d'une année sur l'autre qu'au cours d'une même année. Elle peut se mesurer à partir de la variance de la hauteur de pluie. Pour cela, la période d'observation doit être divisée en classes, pas contigus d'égale durée. La variance caractéristique est fonction de la longueur des pas qui doit être choisie en fonction du type de climat ainsi que du problème posé. L'étude d'inondations par remontée de nappe suggère par exemple que chacune des classes couvre quelques semaines, voire quelques mois, car ces phénomènes exceptionnels résultent de l'accumulation de la pluie à cette échelle de temps. Par contre, l'analyse de la variance de pluies engendrant des crues éclair de type méditerranéen doit se faire à partir de pas de temps plus brefs, généralement inférieurs à la journée. Inversement, l'analyse de la recharge de certains aquifères peut nécessiter des pas couvrant une année. La variance caractéristique peut subir des modifications importantes au cours du temps. C'est pourquoi ce peut être un bon indicateur du changement climatique, lorsque des périodes exceptionnellement sèches ou humides se succèdent. La prise en compte de la variance caractéristique peut alors permettre d'intégrer la dérive climatique dans le modèle de prévision, à condition toutefois que la période d'observation à partir de laquelle est établi le simulateur de pluie soit représentative de cette évolution.

- la prévision météorologique.

La séquence de pluies est générée de la manière suivante. Une période de temps T étant définie (la série simulée peut succéder à la séquence observée, mais ce n'est pas obligatoire):

- ces événements sont distribués suivant une loi uniforme sur la période T

- à chaque événement est affectée une hauteur de pluie tirée au hasard à partir de la distribution marginale empirique qui résulte des observations. On obtient ainsi une séquence de pluie dont les hauteurs sont distribuées à la manière de la série observée, mais qui ne présente aucune structure temporelle (les événements pluie sont répartis au hasard sans marquer de saisonnalité,…).

- la densité des événements est telle que la pluie moyenne simulée égale la pluie moyenne observée - les événements sont tirés jusqu'à ce que la moyenne de la hauteur de pluie simulée soit égale à la moyenne de la hauteur de pluie observée sur la période T.

- ces événements sont organisés en réalisant des permutations successives (ces permutations affectent de la même manière les 'non événements' correspondant à l'absence de pluie). Ces permutations visent à minimiser une fonction objectif choisie de telle sorte que les différents critères qui définissent la structuration temporelle de la série simulée se rapprochent de ceux qui caractérisent la série observée. Toute permutation qui améliore la structure temporelle, ce qui se traduit par une décroissance de la fonction objectif, est entérinée. Dans le cas contraire, la permutation n'est entérinée qu'avec la probabilité :

$$\exp\left((O_0 - O)/T\right)$$

où la différence des fonctions objectif $O_0 - O$ mesure la 'dégradation' des propriétés temporelles de la série simulée (différence des fonctions objectif avant et après permutation). La température T est un nombre qui décroît régulièrement, après que l'équilibre thermodynamique du système a été constaté (cet équilibre est atteint lorsque les permutations qui se réalisent effectivement, laissent la fonction objectif inchangée). Ce 'refroidissement' permet de minimiser la fonction objectif progressivement, tout en évitant d'atteindre un minimum local, condition qui bloquerait l'évolution du système.

Cette diminution progressive de la température confère à ce générateur une analogie complète avec la technique du recuit bien connue des métallurgistes. Ce générateur est d'autant plus performant que la série à simuler contient un grand nombre d'événements, ce qui autorise un grand nombre de permutations.

En règle générale, plusieurs centaines d'événements sont nécessaires pour assurer un bon accord entre les propriétés temporelles des séries simulées et observées. La longueur de la série observée doit couvrir plusieurs années lorsqu'elle présente une saisonnalité marquée ou lorsque la variabilité de la pluie est importante au cours des différentes saisons ou d'une année sur l'autre. La saisonnalité est très marquée lors de la génération directe d'une séquence de pluie efficace, sans passer par son calcul à partir de l'ETP.

La technique du recuit, basée sur la minimisation d'une fonction objectif (algorithme de Metropolis - Hastings, 1953, 1970) à partir de permutations successives d'événements, se prête particulièrement bien à la prise en compte de prévisions météorologiques, qui peuvent être aisément exprimées au moyen d'une fonction objectif (hauteur de pluie prévue pendant un certain laps de temps). Une séquence simulée peut faire suite à une séquence observée, la continuité, entre les 2 séquences résultant de la structure temporelle commune aux séries observées et simulées.

La technique du recuit peut toutefois nécessiter des moyens de calcul importants car, pour posséder les caractéristiques de la pluie observée, un nombre relativement important d'événements doivent être simulés pour permettre de nombreuses combinaisons de permutation, que la prévision couvre une période de temps importante ou non.

La génération de séquences de pluie peut être contrainte par l'introduction de prévisions météorologiques. Ces prévisions sont connues selon une certaine loi de

probabilité et il y a lieu de reproduire ces incertitudes au niveau de la prévision des pluies à court et moyen terme. Supposons que la prévision pour demain soit 'il y a 2 chances sur 3 que la hauteur de pluie H soit comprise entre 10 et 30 mm, 1 chance sur 3 qu'elle soit inférieure à 10 mm'.

Ces conditions peuvent être approchées en générant :

- 200 réalisations avec H=20mm

- 100 réalisations avec H=5mm

puis en analysant ces 300 réalisations prises comme un tout.

Si la prévision doit être affinée, une discrimination plus détaillée peut être faite. Ceci s'applique également à la prévision de l'ETP ou de la température journalière moyenne.

La prévision météorologique peut revêtir un intérêt considérable dans le cas de la prédiction des crues. En particulier, les informations radar peuvent être déterminantes. Les prévisions sont alors du type : 'les pluies cesseront dans 7 heures, puis reprendront 3 heures plus tard...'. La hauteur de pluie estimée au cours des différents épisodes peut alors être introduite dans le modèle prévisionnel, même si elle est imprécise ou définie de manière probabiliste.

2. Le générateur d'ETP

Ce générateur permet également de simuler une température journalière. La technique du recuit est utilisée, comme pour le générateur de pluie. Il s'agit en fait de générer le 'bruit' constitué par les variations thermiques (ou d'ETP) autour d'une valeur moyenne mensuelle. Puisque ces écarts sont toujours structurés temporellement, la technique du recuit permet de faire en sorte que les fonctions d'autocorrélation et de corrélation croisée ETP - Pluie des séries observées et simulées soient les plus proches possibles l'une de l'autre, de même que les variations mensuelles observées et simulées de l'écart - type du bruit.

La fonction de corrélation ETP - Pluie est considérée pour des décalages à la fois positifs et négatifs, ce qui permet de simuler aussi bien une relation causale de l'ETP sur la pluie que de la pluie sur l'ETP. Là encore, les prévisions météorologiques peuvent être prises en compte.

L'écart - type du bruit subit généralement une variation mensuelle importante, en particulier lorsque l'ETP est utilisée, car sa valeur reste très proche de zéro en période hivernale (zones tempérées) alors qu'elle peut varier avec beaucoup d'amplitude en été.

Les 3 premiers moments sont calculés à partir de la valeur absolue du bruit (les écarts de l'ETP par rapport à la moyenne mensuelle étant positifs ou négatifs, le calcul des moments à partir de la valeur algébrique du bruit conduirait à des valeurs tendant vers

0 lorsque la période d'observation augmente car la moyenne des écarts tend vers 0. Le calcul des exposants $\lambda(j)$ perdrait alors tout son sens, car on serait en présence de formes indéterminées). Comme dans le générateur de pluie, chacun des exposants $\lambda(j)$ relatifs aux différents moments j de la série simulée doivent être voisins de ceux calculés à partir de la série observée. Cette loi d'échelle est appliquée sur les segments correspondant à 1, 2, 8, 16 et 32 jours. Contrairement à la pluie dont le premier moment est inférieur à 1, l'exposant $\lambda(1)$ est ici voisin de 1, ce qui signifie que l'ETP peut s'écarter de la moyenne mensuelle aussi longtemps que dure la période d'observation (alors que la pluie cessait nécessairement).

La probabilité marginale du bruit (sans considération de distribution dans le temps) peut éventuellement être remplacée par une loi normale lorsque le niveau de confiance calculé à partir du test de Kolmogorov le permet (ce niveau doit au moins être égal à 80% pour que la substitution soit possible). Très souvent la loi empirique est significativement différente de la loi normale. Toutefois, cette loi hypothétique peut être substituée à la distribution observée au-delà d'un certain seuil, comme dans le cas de la pluie.

Une séquence simulée peut faire suite à une séquence observée, ce qui sous-entend la prise en compte d'un effet de continuité grâce aux fonctions d'autocorrélation et de corrélation croisée.

Les prévisions de pluie et de température moyenne journalière sont couplées. Ce couplage est établi à partir du corrélogramme croisé Pluie/Température établi à partir de séries chronologiques de pluie et de température suffisamment longues pour être représentatives. Il prend toute sa signification pour les prévisions à long terme sur la dérive climatique.

3. Evénements exceptionnels

Lors de la génération d'une séquence de pluie, la simulation d'événements exceptionnels ne peut être réalisée que si le pas d'échantillonnage est approprié. La prise en compte d'une loi de répartition log-normale ou de Gumbel peut permettre, dans certains cas, de préciser le comportement asymptotique de la loi de distribution de la pluie. D'une manière plus générale, l'histogramme empirique peut être prolongé par une loi de puissance étant donnée la distribution logarithmique des classes de hauteur de pluie. Le facteur d'échelle λ est défini à partir des deux dernières classes $F(n-1)$ et $F(n)$ de l'histogramme empirique : $\lambda = (1.-F(n))/(1.-F(n-1))$.

L'histogramme est prolongé par récurrence de telle manière que $1.-F(n+1) = \lambda(1.-F(n)), \cdots$ la suite $F(n+1), \cdots$ convergeant très rapidement vers 1 car en général le facteur λ est tel que $\lambda < 0.1$.

Dans l'exemple d'un régime de pluie méditerranéen, supposons que le calibrage du générateur ait été obtenu à partir d'une séquence de pluie observée au pas journalier et que la hauteur de pluie journalière maximale observée soit 100 mm. La loi de probabilité marginale des hauteurs de pluie journalières est calculée pour une variable

aléatoire (la hauteur de pluie journalière) comprise entre 0 et 100 mm. Pour simuler un événement exceptionnel correspondant, par exemple, à 200 mm de pluie, l'histogramme est prolongé par une loi de puissance.

Toutefois la prise en compte des pluies exceptionnelles peut conduire à réduire le pas d'échantillonnage à une heure. La loi de probabilité marginale est alors établie à partir d'événements qui ne présentent plus nécessairement ce caractère exceptionnel au pas horaire.

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

Service géologique régional Bretagne
Rennes Atalante Beaulieu
2, rue de Jouanet
35700 – Rennes – France
Tél. : 02 99 84 26 70