

Projet CYCLEAU Caractérisation des bassins versants du Bélon (Finistère) et du Payré (Vendée)

Rapport final

BRGM/RP-54853-FR
novembre 2006



Projet CYCLEAU

Caractérisation des bassins versants du Bélon (Finistère) et du Payré (Vendée)

Rapport final

BRGM/RP-54853-FR
novembre 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets
de recherche scientifique du BRGM 2006 EAU R16

B. Mougin, M. Leclercq, L. Gourcy, C. Le Guern et P. Conil
Avec la collaboration de
J-P. Jégou et V. Baudouin

Vérificateur :

Nom : Laurence GOURCY

Date : 23 novembre 2006

Nom : Emmanuelle PETELET

Date : 24 novembre 2006

(Original signé)

Approbateur :

Nom : Michel LECLERCQ

Date : 24 novembre 2006

(Original signé)

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



Mots clés : projet CYCLEAU, Interreg III B, débit, rivière, matières en suspension MES, analyses minéralogiques granulométriques chimiques et isotopiques, piézométrie, Bélon, Finistère, Payré, Vendée, France

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : B. MOUGIN, M. LECLERCQ, L. GOURCY, C. LE GUERN et P. CONIL, collaboration : J-P. JEGOU et V. BAUDOIN (2006) - Projet CYCLEAU - Caractérisation des bassins versants du Bélon (Finistère) et du Payré (Vendée) - Rapport final - BRGM/RP-54853-FR - 171 p., 78 fig., 35 tab., 4 ann.

Synthèse

Le projet CYCLEAU entre dans un programme de recherche européen INTERREG IIIB ENO qui s'intéresse à la gestion intégrée de 11 bassins versants (2 en France, 8 en Angleterre et 1 en Irlande). Les objectifs du programme CYCLEAU sont les suivants :

- identifier de nouvelles méthodes de gestion en vue d'améliorer la qualité de l'eau,
- favoriser l'échange de savoirs et d'expériences en matière de gestion de l'eau,
- et renforcer la participation locale dans la gestion des bassins versants.

Les premiers travaux ont démarré en 2002 pour se terminer fin 2006. La réalisation du programme s'appuie sur une approche multidisciplinaire, grâce à un partenariat formé de 14 équipes: anglaises, françaises et Irlandaises.

Le BRGM s'est intégré dans ce projet en 2004 et sa contribution est principalement axée sur la caractérisation des deux bassins versants français : le Bélon en Bretagne d'une superficie de 96 km², et celui du Payré en Pays de Loire sur 154 km².

Ce document constitue le rapport final du BRGM pour ce projet. Il présente les résultats obtenus en 2006 et rappelle ceux des années antérieures 2004 et 2005 concernant :

- les campagnes de prélèvements d'eau sur chacun des deux réseaux de suivi avec des mesures de débit, turbidité, MES, chimie, isotope ;
- les campagnes de mesures du niveau piézométrique des eaux souterraines avec 39 points de mesure sur le bassin du Payré ;
- les prélèvements des sédiments superficiels de fond de rivière, d'estuaire et de berge (33 points sur le Payré, 16 points sur le Bélon) et les analyses chimiques, minéralogiques et granulométriques correspondantes.

Les problèmes d'envasement et d'ensablement des parcs à huîtres, auxquels ont à faire face les ostréiculteurs, ont conduit à la caractérisation de la dynamique hydrologique, qui contrôle la mise en place des différents faciès sédimentaires rencontrés sur les bords et au fond des berges.

L'objectif des réseaux de suivi, avec des prélèvements en plusieurs campagnes, était donc de quantifier les flux solides issus des sous bassins versants qui viennent se déposer dans les estuaires (Bélon et Payré), mais aussi d'identifier et analyser les zones de fortes érosions (ou inversement de dépôts) de chacun des sous bassins.

Les actions menées et les résultats obtenus sur le bassin versant du Bélon sont les suivants :

- Afin de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin, le BRGM a mis en place en 2004, avec l'aide de la Communauté de Communes du Pays de Quimperlé, 2 échelles limnimétriques pour mesurer les hauteurs d'eau du Bélon et du Douordu. Des campagnes d'étalonnage menées par le BRGM et l'IFREMER, ont permis de construire des abaques de correspondance hauteur d'eau/ débit ;
- une analyse multicritères a permis d'identifier que les sous bassins versants les plus sensibles à l'érosion sont situés sur l'affluent du Bélon et à l'aval du Douordu ;
- les résultats des 14 campagnes de mesures (effectuées tous les 2 mois entre juin 2004 et août 2006) estiment un flux moyen journalier de matières en suspension (MES) provenant des cours d'eau du BV du Bélon égal à 282 kg/jour soit 103 tonnes/an. Ce flux de MES provient en moyenne à : 54 % du Bélon, 37 % du Douordu, et 10 % de l'affluent ;
- les teneurs des matières en suspension (MES) sont faibles sur les rivières (moyenne de 7 mg/l, qui peut monter localement à 20-30 mg/l en période pluvieuse). Une cartographie des zones d'apports ou de stagnation des MES a été dessinée ;
- aucune anomalie chimique n'a été détectée au niveau des points de prélèvement des sédiments d'estuaire et des sédiments de fond de rivière. Seules des teneurs en baryum supérieures aux valeurs de référence ont été mises en évidence ; elles reflètent l'abondance de cet élément dans le fond géochimique régional (origine naturelle dans les granites et gneiss) ;
- les analyses granulométriques des sédiments montrent que les sédiments d'estuaire sont sablo-argileux (taille moyenne des particules : 100-350 µm) tandis que ceux des fonds de rivière sont sableux (0,5 et 3 mm) ; Par ailleurs, la taille des particules des sédiments augmente d'amont en aval, ce qui confirme le dépôt régulier de MES (particules d'un diamètre supérieur à 150 µm).
- sur les 4 campagnes de prélèvements, entre août 2004 à février 2006, les analyses chimiques des eaux du Bélon (9 points) montrent l'absence d'anomalie chimique (valeurs analysées inférieures aux seuils). Cependant, les teneurs en nitrates varient entre 1 et 48 mg/l, et se rapprochent fortement par endroits du seuil réglementaire de 50 mg/l ;
- la caractérisation des compositions isotopiques des eaux du Bélon d'une part et des sources potentielles d'apports azotés d'autre part (bovins, volailles, porcs, stations d'épuration et fosses septiques, engrais chimiques...) a été menée en août 2005 et en février 2006. Elle a permis d'estimer l'influence des sources d'apports azotés sur la qualité de l'eau des rivières du bassin versant :
 - sur le Bélon, il est difficile de distinguer une source unique d'apport azoté puisque des mélanges sont couramment observés,
 - les eaux du Douordu seraient plutôt influencées par des engrais organiques de type lisiers de porc et fientes de volaille,

- une influence non négligeable des eaux usées (STEP et fosses septiques), notamment en période de hautes eaux, est visible sur tous les cours d'eau.

Les actions menées et les résultats obtenus sur le bassin versant du Payré sont les suivants :

- contribution à la caractérisation physique du bassin : carte géologique, données de forages, modèle numérique de terrain... ;
- fonctionnement hydrodynamique du bassin : bilan hydrique, estimation des volumes annuels s'écoulant dans le lit du Payré, mesures de débit, mise en évidence de pompages dans les ruisseaux pouvant conduire parfois à des tarissements ponctuels, débit influencé par un barrage, surexploitation des aquifères sédimentaires... ;
- identification des apports des sous bassins versants aux flux arrivant à l'estuaire : réseau de suivi de la qualité de l'eau, campagnes de prélèvements et d'analyses, interprétation des données ;
- érosion/sédimentation en lien avec l'activité ostréicole : campagne d'analyse des sédiments : granulométrie - chimie - matières organiques, mise en évidence de l'existence de 2 ensembles sédimentaires granulométriquement différents avec des sables à l'aval de l'estuaire et des vases plus en amont.

Sommaire

1. Contexte et objectifs du projet	15
1.1. CONTEXTE	15
1.2. OBJECTIFS	17
2. Caractérisation du bassin versant du Bélon (Finistère, Bretagne).....	19
2.1. GEOMORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT	19
2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT.....	19
2.3. RESEAU DE SUIVI DES APPORTS SOLIDES ET DE LA QUALITE DE L'EAU - CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS.....	22
2.3.1. Objectifs du réseau de suivi	22
2.3.2. Campagnes de prélèvements.....	25
2.3.3. Suivi hydrologique des cours d'eau du bassin versant.....	26
2.4. ANALYSE MULTICRITERES ET IDENTIFICATION DES SOUS BASSINS VERSANTS SENSIBLES A L'EROSION.....	31
2.4.1. Détail des paramètres pris en compte	32
2.4.2. Détermination des sous bassins sensibles à l'érosion	37
2.5. RESULTATS OBTENUS ET INTERPRETATIONS	39
2.5.1. Rappel des résultats obtenus en 2004 et 2005	39
2.5.2. Résultats des campagnes réalisées (MES).....	39
2.5.3. Eléments sur les apports solides.....	45
2.5.4. Bilan matière (étude réalisée par l'entreprise CASPEO).....	50
2.5.5. Résultats des analyses chimiques et isotopiques sur les eaux.....	51
2.5.6. Interprétation des analyses chimiques et isotopiques	61
3. Caractérisation du bassin versant du Payré (Vendée, Pays de la Loire)	85
3.1. GEOMORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU PAYRE	85
3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT.....	86
3.3. OCCUPATION DES SOLS	90
3.4. BILAN HYDROLOGIQUE	91
3.4.1. Présentation de la démarche.....	91
3.4.2. Données hydrologiques.....	92

3.4.3. Fonctionnement hydrodynamique	94
3.5. RESEAU DE SUIVI DES EAUX SUPERFICIELLES ET SOUTERRAINES ET DES SEDIMENTS	99
3.5.1. Objectifs du suivi et réseau mis en place	99
3.5.2. Matériels et méthodes	100
3.6. SUIVI HYDROLOGIQUE DES COURS D'EAU DU BASSIN VERSANT	102
3.6.1. Présentation et objectifs	102
3.6.2. Localisation des points de mesure	102
3.6.3. Résultats des campagnes de terrain	105
3.7. SUIVI PIEZOMETRIQUE	112
3.7.1. Présentation et objectifs	112
3.7.2. Localisation du réseau de mesure	113
3.7.3. Résultats des campagnes de terrain	117
3.7.4. Essai de modélisation de la surface piézométrique	119
3.8. SUIVI DE LA SEDIMENTATION EN ZONE ESTUARIEENNE	132
3.8.1. Présentation et objectifs	132
3.8.2. Localisation des prélèvements de sédiments superficiels	132
3.8.3. Analyses granulométriques	135
3.8.4. Teneurs en matière organique	150
3.8.5. Analyses chimiques des éléments majeurs et traces des sédiments	152
3.9. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES SUR LE BASSIN VERSANT DU PAYRE	167
4. Méthodologie CYCLEAU - Apports du BRGM	171
5. Conclusion	173
6. Bibliographie	175

Liste des illustrations

Figure 1 - Localisation du bassin versant du Bélon	16
Figure 2 - Localisation du bassin versant du Payré	16
Figure 3 - Modèle Numérique de terrain du bassin versant du Bélon	20
Figure 4 - Carte géologique synthétique du bassin versant du Bélon (d'après carte au 1/250 000 du Massif Armoricaïn - BRGM, 2001 - Coord. D. Rabu et J. Chantraine)	21
Figure 5 - Localisation du réseau de suivi des transports solides	23

Figure 6 - Courbe de tarage au droit de Pont Bellec sur le Doudu (point C).....	27
Figure 7 - Courbe de tarage au droit de Moulin du Nézet sur le Bélon	27
Figure 8 - Participation des cours d'eau à l'écoulement global mesuré en sortie du bassin versant du Bélon (chiffres en bleu) et contributions relatives des affluents du Bélon (vert) et à certains secteurs des deux rivières (rouge)	30
Figure 9 - Localisation des sous bassins versants étudiés dans l'analyse multicritères	31
Figure 10 - Paramètres de l'analyse multicritères - Sensibilité à l'érosion des sous bassins versants du Bélon	33
Figure 11 - Rose des vents à la station de Lorient - 1979-2003 (source Météo-France).....	34
Figure 12 - Exposition des parcelles des sous bassins versants aux vents dominants	35
Figure 13 - Sensibilité à l'érosion des sous bassins versants du Bélon - Résultat de l'analyse multicritères	38
Figure 14 - Contexte climatique lors des campagnes de prélèvements des MES	41
Figure 15 - Résultats des analyses MES de la campagne des 14 et 15/12/2005	42
Figure 16 - Résultats des analyses MES de la campagne des 27 et 28/02/2006	42
Figure 17 - Résultats des analyses MES de la campagne 11 et 12/04/2006.....	43
Figure 18 - Résultats des analyses MES de la campagne du 13/06/2006	43
Figure 19 - Résultats des analyses MES de la campagne des 29 et 30/08/2006	44
Figure 20 - Flux de MES et débit global du BV du Bélon	46
Figure 21 - Localisation des zones d'apports et des zones de stagnation des MES	49
Figure 22 - Teneurs en nitrates sur les points du réseau de suivi	55
Figure 23 - Expérience menée avec la Chambre d'Agriculture du Finistère	58
Figure 24 - Diagramme de Piper pour les eaux prélevées sur quatre campagnes et sources potentielles d'apport azoté	62
Figure 25 - Résultat de l'ACP effectuée avec les données des quatre campagnes.....	64
Figure 26 - Résultats de l'ACP, domaine des individus sur les axes F1 et F2	65
Figure 27 - Cl vs. Na pour les quatre campagnes d'échantillonnages avec et sans le point F/3	66
Figure 28 - Représentation Cl vs. Na et Cl vs. K pour les échantillons des quatre campagnes sauf point F/3.....	67
Figure 29 - Cl vs SO ₄ pour les eaux des quatre campagnes d'échantillonnage (avec et sans F/3)	68
Figure 30 - SO ₄ vs NO ₃ pour toutes les eaux des quatre campagnes d'échantillonnage	70
Figure 31 - Cl vs NO ₃ pour les eaux des quatre campagnes d'échantillonnage (avec et sans F/3)	71
Figure 32 - Cl vs B pour les eaux des quatre campagnes d'échantillonnage (avec et sans F/3)	72

Figure 33 - Variations du $\delta^{15}\text{N}$ en fonction de $1/\text{NO}_3$ pour les eaux prélevées en août 2005 et février 2006 et valeurs de la littérature pour les $\delta^{15}\text{N}$ des nitrates d'origine organiques et STEP, fosses septiques.....	75
Figure 34 - $\delta^{15}\text{N}$ vs $\ln \text{NO}_3$ pour les points de campagne d'août 2005 et février 2006.....	76
Figure 35 - $\delta^{11}\text{B}$ vs B pour les eaux prélevées en août 2005 et février 2006.....	78
Figure 36 - $\delta^{11}\text{B}$ vs Cl pour les eaux prélevées en août 2005 et février 2006.....	79
Figure 37 - $\delta^{11}\text{B}$ vs $1/B$ pour les eaux prélevées en août 2005 et février 2006 et droites théoriques de mélange.....	81
Figure 38 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ vs $\delta^{11}\text{B}$ pour les eaux prélevées en août 2005 et février 2006.....	81
Figure 39 - Délimitation du bassin versant du Payré à partir du MNT au pas de 50 m (source IGN, 2000).....	85
Figure 40 - Carte géologique de la région de Talmont Saint Hilaire, Extrait de la carte au 1/50000 ^{ème} des Sables d'Olonne-Longeville.....	89
Figure 41 : Occupation des sols sur la frange côtière du bassin versant du Payré (données issues de l'IPLI 85, 2000).....	90
Figure 42 - Localisation des données de débit, de pluviométrie et d'ETP acquises.....	93
Figure 43 - Influence de la pluie efficace sur les débits.....	96
Figure 44 - Scénario d'écoulement (ruissellement et infiltration) et débit.....	97
Figure 45 - Coefficients de corrélation entre les débits et les modèles d'écoulement.....	98
Figure 46 - Carte de localisation des points de mesures du réseau hydrologique.....	104
Figure 47 - Débits spécifiques mesurés sur les cours d'eau du bassin versant du Payré en 2004-2005.....	105
Figure 48 : Comparaison des débits cumulés des points A2 et A3 par rapport au point A1 situé après la confluence des deux points précédents.....	107
Figure 49 : Comparaison des variations de pH, température et conductivité en juillet 2004 et juin 2005.....	110
Figure 50 - Chronique piézométrique de l'ouvrage 05625X0036/F entre janvier 2000 et mars 2004.....	112
Figure 51 - Localisation et nature des ouvrages BSS et des ouvrages non répertoriés du secteur d'étude sur fond topographique.....	114
Figure 52 : Variations du niveau piézométrique par rapport à avril 2004 mesurées lors des campagnes de terrain (limite du bassin versant en rouge).....	118
Figure 53 - Erreurs dues à l'interpolation par la méthode traditionnelle.....	120
Figure 54 - Principe de modélisation de la surface piézométrique en domaine de socle.....	121
Figure 55 - Régression linéaire permettant d'obtenir l'encaissement moyen.....	122
Figure 56 - Régression linéaire entre « a » et « b » pour chacune des trois campagnes.....	123
Figure 58 - Surfaces piézométriques interpolées entre avril et juin (A) et entre juin et août 2004 (B).....	126
Figure 59 - Variations piézométriques interpolées entre avril et juin (A) et entre juin et août 2004 (B).....	128

Figure 60 - Coupes verticales Sud-Nord et Est-Ouest	130
Figure 61 - Localisation des trois coupes verticales Sud-Nord et Est-Ouest (SBT : surface de base des thalwegs)	131
Figure 62 - Localisation des points de prélèvements de sédiments superficiels (Payré).....	134
Figure 63 - Diagramme binaire montrant la relation entre la moyenne et la coefficient de dispersion des échantillons	137
Figure 64 - Répartition des différents faciès sédimentaires rencontrés sur la zone (Payré) et taille moyenne des particules.....	138
Figure 65 - Courbes granulométrique des points n°2, 5H, 1, 4, 5B, 6, 8, 9, 10, 20 et 22.....	140
Figure 66 - Répartition amont-aval des moyennes, modes et coefficients de dispersion des faciès sableux intra-estuariens.....	141
Figure 67 - Planche d'observation des échantillons 1, 2, 4 et 8 à la loupe binoculaire (x3).....	143
Figure 68 - Courbes granulométriques des points n°15, 19 et 30	144
Figure 69 - Evolution Amont-Aval de la moyenne du mode et du coefficient de dispersion des trois affluents du Payré	145
Figure 70 - Profils granulométriques des points n°20, 21, 22, 22BIS et 24 (Le point 24 est utilisé comme référence hors zone ostréicole)	146
Figure 71 - Photo de la flèche sableuse du Veillon (Cliché daté du 6 mai 2004).....	147
Figure 72 - Courbe granulométrique des points n°7, 11 et 12.....	148
Figure 73 : Teneurs en polluants métalliques dans les 7 sédiments de berge analysés.	154
Figure 74 :Localisation des sites industriels susceptibles d'être à l'origine du baryum, du chrome et de l'arsenic.....	155
Figure 75 : Relations linéaires existantes entre chacun des 8 éléments majeurs avec les 22 éléments traces dosés.	161
Figure 76 : a) Evolution des facteurs d'enrichissement pour les 30 éléments montrant des variations amont-aval de leurs teneurs et b) Evolution des FE pour les 8 éléments majeurs en fonction de la distance à la côte.....	163
Figure 77 : Diagramme dans le plan principal selon les axes F1 et F2.....	166
Figure 78 - Méthodologie du BRGM dans le cadre du projet CYCLEAU	172
Tableau 1 - Identification des points du réseau de suivi.....	22
Tableau 2 - Abaque de correspondance hauteur- débit au droit de l'échelle limnimétrique de Pont Bellec sur la rivière du Doudu.....	28
Tableau 3 - Abaque de correspondance hauteur- débit au droit de l'échelle limnimétrique de Moulin Nézet sur la rivière du Bélon.....	29
Tableau 4 - Combinaison des niveaux d'information.....	37
Tableau 5 - Résultats du réseau de suivi lors de la campagne des 14-15/12/2005.....	39
Tableau 6 - Résultats du réseau de suivi lors de la campagne des 27-28/02/2006.....	40

Tableau 7 - Résultats du réseau de suivi lors de la campagne des 11-12/04/2006	40
Tableau 8 - Résultats du réseau de suivi lors de la campagne du 13/06/2006	40
Tableau 9 - Résultats du réseau de suivi lors de la campagne des 29-30/08/2006	40
Tableau 10 - Flux de MES en provenance des cours d'eau lors des campagnes de suivi réalisées	45
Tableau 11 - Corrélations turbidité/MES	47
Tableau 12 - Teneurs en MES et flux (résultats issus des 14 campagnes de mesure).....	47
Tableau 13 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques de la campagne des 30-31/08/2005 (eau des cours d'eau).....	53
Tableau 14 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques de la campagne des 27-28/02/2006 (eau des cours d'eau).....	54
Tableau 15 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques de la campagne des 30-31/08/2005 (sources).....	57
Tableau 16 - Données chimiques et $\delta^{15}\text{N}$ des échantillons d'eau prélevés sur les sols expérimentaux (avril 2006).....	60
Tableau 17 - Matrice des corrélations (quatre campagnes d'échantillonnages).....	64
Tableau 18 - Variations isotopiques d'éléments azotés selon leur origine	74
Tableau 19 - Expression du bilan de Thornthwaite.....	95
Tableau 20 : Résultats des débits mesurés sur les cours d'eau du bassin versant du Payré en 2004 et 2005. La surface indiquée correspond à la surface d'alimentation du bras de cours d'eau relatif au point de mesure	106
Tableau 21 - Débits bruts et débits spécifiques mesurés lors de la campagne de juillet 2004.....	108
Tableau 22 – Résultats des campagnes hydrologiques : mesures de pH, conductivité, température. La surface indiquée correspond à la surface d'alimentation du bras de cours d'eau relatif au point de mesure.	109
Tableau 23 - Résultats de la campagne de suivi des matières en suspension (MES) et de la turbidité les 6 et 7 juillet 2004	111
Tableau 24 - Estimation des flux en MES (en mg) à partir des mesures des 6 et 7 juillet 2004.....	111
Tableau 25 - Caractéristiques des points répertoriés en BSS	115
Tableau 26 - Caractéristiques des points non répertoriés en BSS	116
Tableau 27 - Niveaux piézométriques, profondeur de l'eau et amplitude piézométrique par formation géologique déduite des moyennes des valeurs mesurées lors des différentes campagnes de terrain	117
Tableau 28 - Résultats des analyses semi-quantitatives sur les eaux souterraines.....	119
Tableau 29 - Localisation des points de prélèvements de sédiments superficiels et analyses pratiquées (XLII : X Lambert II, Y LII : Y Lambert II, G : granulométrie, MO : matière organique).....	133
Tableau 30 - Tableau récapitulatif des principaux résultats de l'analyse granulométrique.....	136

Tableau 31 - Caractéristiques modales des points n°4, 5B, 6, 8, 9, 10, 20 et 22.....	140
Tableau 32 : Teneurs en matière organique.....	151
Tableau 33 : Résultats des analyses chimiques des éléments majeurs et traces pratiqués sur les sédiments	153
Tableau 34 : Variabilité des éléments chimiques estuariens analysés (cdv: coefficient de variation).	157
Tableau 35 : Coefficients de corrélation au sens de Pearson entre les éléments et entre les éléments et la distance à la côte (D: Distance à la côte).	160

Liste des annexes

Annexe 1 - Protocoles analytiques

Annexe 2 - Photographies prises lors de la campagne de février 2006

Annexe 3 - Rapport de l'entreprise CASPEO (Rapport 2005/MVD/136 - Décembre 2005)

Annexe 4 - Données hydrologiques pour le bassin du Payré (détermination de la pluie efficace)

1. Contexte et objectifs du projet

1.1. CONTEXTE

Le programme CYCLEAU est un projet de recherche européen mené sur 11 bassins versants : 2 en France, 8 en Angleterre et 1 en Irlande. Le BRGM est entré dans le projet en juin 2004. Ce projet se terminant en décembre 2006, cela correspond à 2,5 années d'études pour le BRGM.

Le projet s'inscrit dans le programme INTERREG IIIB ENO, qui soutient financièrement les projets entrepris dans l'espace Europe du Nord Ouest et dont l'objectif est d'améliorer la coopération transnationale.

Les objectifs du programme CYCLEAU sont les suivants :

- identifier de nouvelles méthodes de gestion en vue d'améliorer la qualité de l'eau,
- favoriser l'échange de savoirs et d'expériences en matière de gestion de l'eau,
- renforcer la participation locale dans la gestion des bassins versants.

L'approche multidisciplinaire est menée grâce à un partenariat large comprenant 14 membres :

- l'Environment Agency, Région du Sud-Ouest de l'Angleterre (leader du projet),
- le Cornwall County Council,
- le Conseil Général du Finistère,
- le Devon Wildlife Trust,
- l'I.R.D North Mayo-West Sligo Ltd,
- le District Council de South Hams,
- le District Council de Teignbridge,
- l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer),
- le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières),
- la Chambre d'Agriculture du Finistère,
- la COCOPAQ (Communauté de Communes du Pays de Quimperlé),
- le Groupe Associatif Estuaire,
- le Farming and Wildlife Advisory Group,
- l'Université d'Exeter.

Les 3 derniers membres sont entrés dans le partenariat en 2005.

L'étude du BRGM est basée sur deux bassins versants Français : le Bélon dans le Finistère (région Bretagne) et le Payré en Vendée (Région Pays de la Loire). Les figures 1 et 2 localisent ces deux bassins.

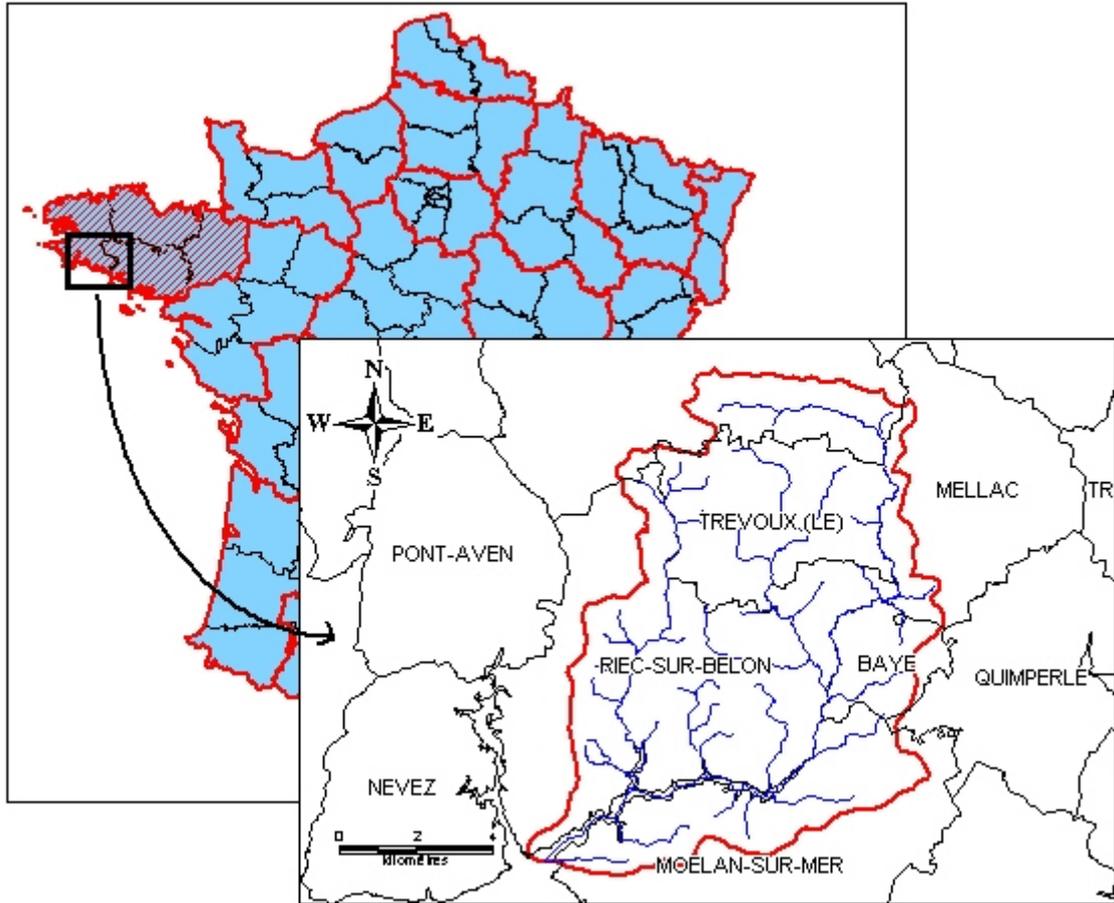


Figure 1 - Localisation du bassin versant du Bèlon

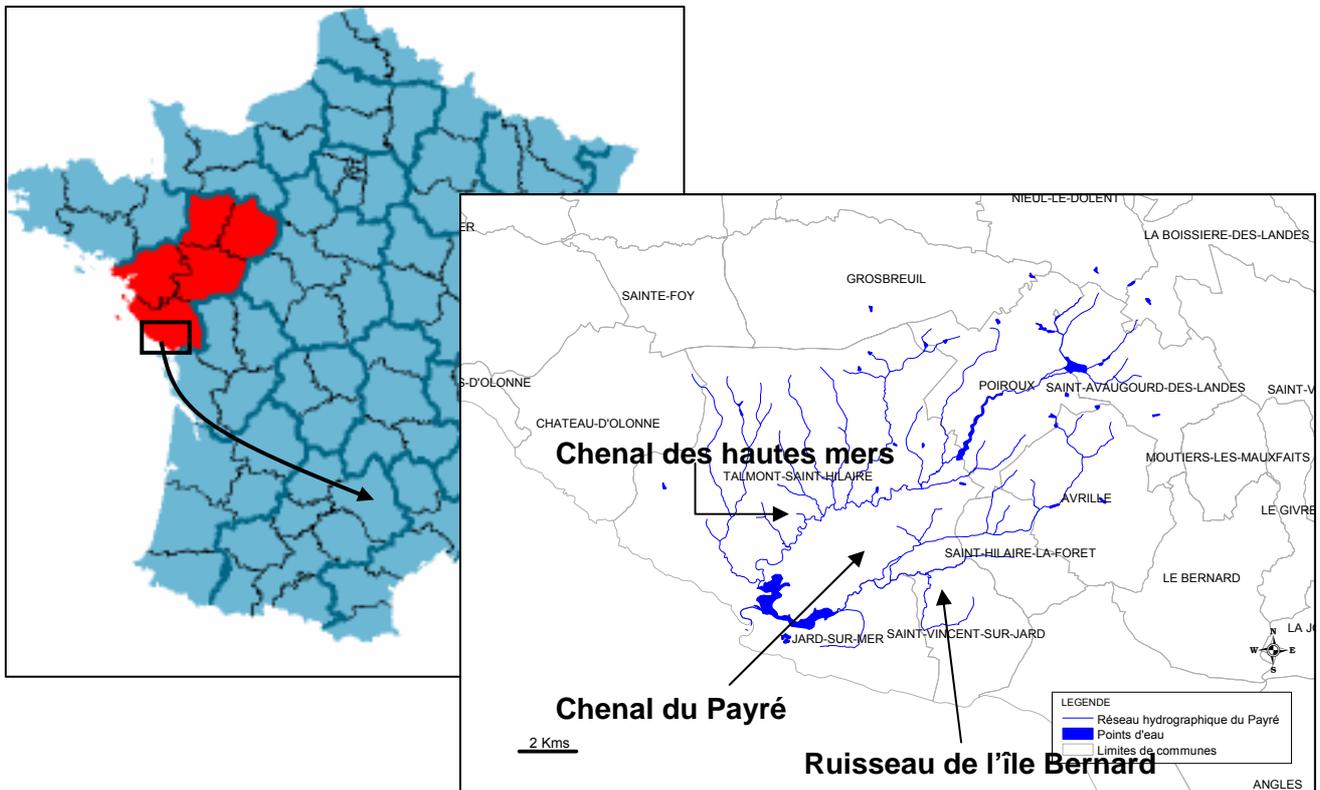


Figure 2 - Localisation du bassin versant du Payré

1.2. OBJECTIFS

L'action du BRGM sur les deux bassins versants français s'articule autour des 4 thèmes principaux suivants :

- caractérisation physique du bassin (carte géologique, données de forages, modèle numérique de terrain...);
- fonctionnement hydrodynamique du bassin (installation d'échelles limnimétriques, mesures de débit...);
- identification des apports des sous bassins versants aux flux arrivant à l'estuaire (réseau de suivi de la qualité de l'eau, campagnes de prélèvements et d'analyses, interprétation des données);
- identification et estimation relative des contributions des différentes sources de pollution azotée (bovins, poulets, cochons, station d'épuration, engrais chimiques...) par analyses isotopiques.

L'ensemble des objectifs ci-dessus, correspond aux thèmes 2.2 « Processus Physiques » et 2.3 « Pollutions diffuses » telles que définies dans le programme INTERREG III B, et plus particulièrement aux actions 2.2.1, 2.2.4 et 2.3.3 des documents de référence.

Ce document constitue le rapport final du projet. Il présente les résultats obtenus en 2006 et rappelle ceux des années antérieures 2004 et 2005.

2. Caractérisation du bassin versant du Bélon (Finistère, Bretagne)

2.1. GEOMORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT

Le bassin versant du Bélon est situé en Bretagne, dans le Sud du Finistère, à l'Ouest de Quimperlé. Il s'étend sur 7 communes et a une superficie de 96 km² de sa source à la mer (source DIREN, code HYDRO J463). Il est incliné du Nord-Est vers le Sud-Ouest (cf. figure 3) et son altitude varie entre 105 m (« Landouarnabat » sur la commune de Bannalec) et 0 m où son estuaire est constitué par une ria ostréicole.

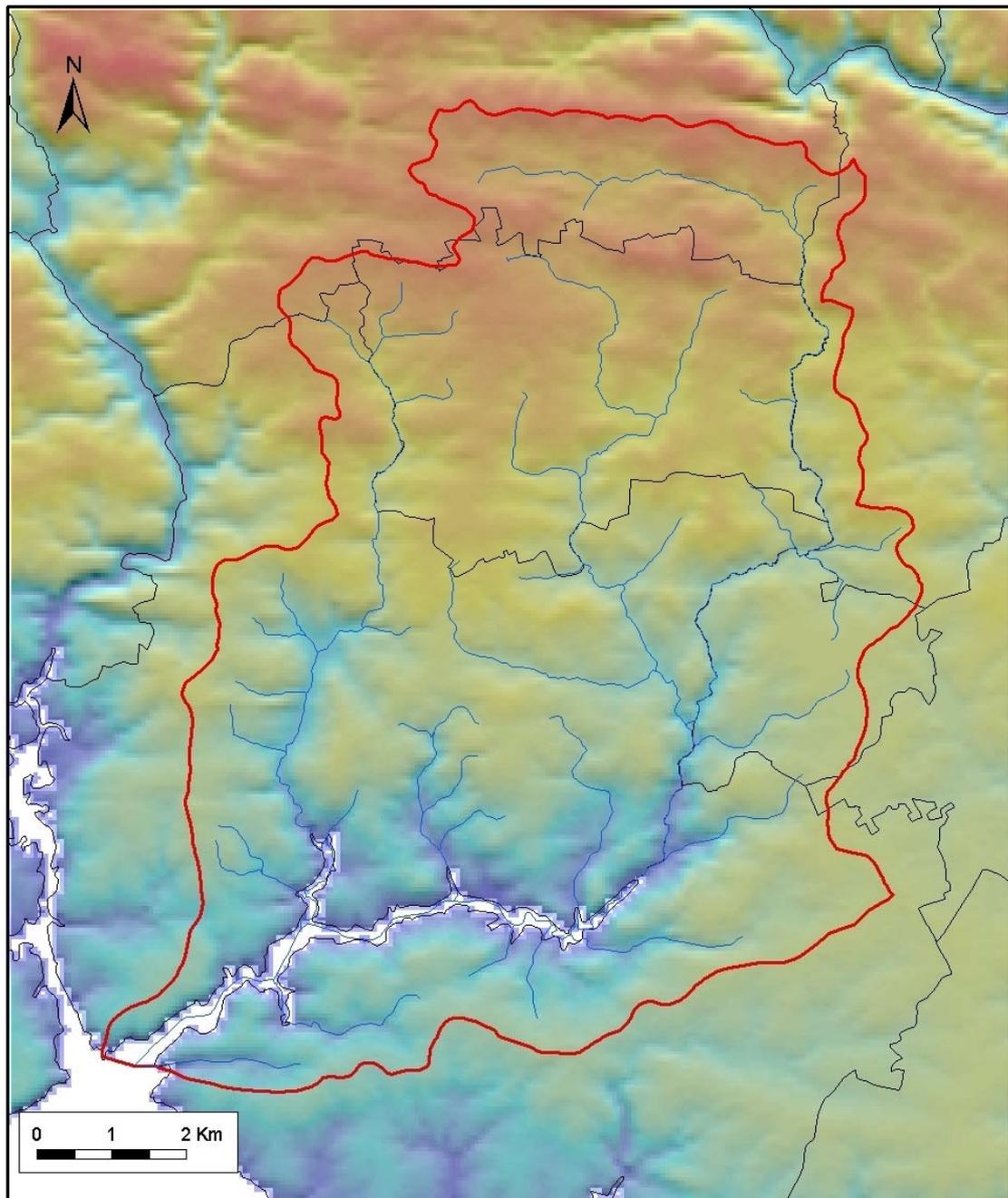
2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

La figure 4 présente une carte géologique synthétique autour du bassin versant du Bélon, carte extraite de la carte géologique du Massif Armoricaïn (échelle 1/250 000).

Le sous-sol du bassin versant est constitué de gneiss, de granites et de micaschistes.

Sur le bassin versant du Bélon, les roches les plus anciennes correspondent à celles du Groupe de Nerly (Formation de Kerfany). Ce sont des dépôts mis en place dans un bassin sédimentaire dominé par des phénomènes volcaniques dans un contexte de convergence entre deux plaques. La collision qui suit sera responsable, à l'Ordovicien, de la production de granitoïdes divers dont la plupart des orthogneiss présents sur le secteur d'étude (Moëlan, Lanmeur, Nizon). Après une longue période de calme tectonique, un nouvel épisode de convergence - collision (phase éovarisque de l'orogène hercynien) est à l'origine du métamorphisme, de la déformation des sédiments et des granitoïdes antérieurs et de la production (par fusion des orthogneiss) de leucogranites. Au début du Carbonifère (phase varisque) se mettent en place les grands accidents cisailants à l'origine de la déformation des leucogranites antérieurs et de la production de nouvelles générations de leucogranites (plutons précoces : Pluguffan, Ergué et Riec ; pluton tardif : Baye), eux-mêmes intensément déformés (mylonites).

Les roches ont, depuis, subi des périodes d'érosion, de recouvrements marins dont il ne reste pas trace. Au cours du Paléogène, mais sans doute déjà au Crétacé, les roches ont subi des phases d'altération et ont été profondément transformées. Aujourd'hui, la partie supérieure des profils d'altération a disparu (érosion) et l'on observe généralement leur partie intermédiaire (arènes plus ou moins meubles).



Projection : système français de coordonnées - Lambert II cartographique - Origine Paris

Légende

-  Réseau hydrographique
-  Communes
-  Bassin versant du Belon
-  Secteur d'étude

MNT au pas de 50m superposé à l'ombrage de la topographie (ombrage : azimuth source au nord, incidence 40°)
Source : IGN - Paris 2000

Légende

mnt

Valeur



Elevée : 108

Faible : 1

Figure 3 - Modèle Numérique de terrain du bassin versant du Bélon

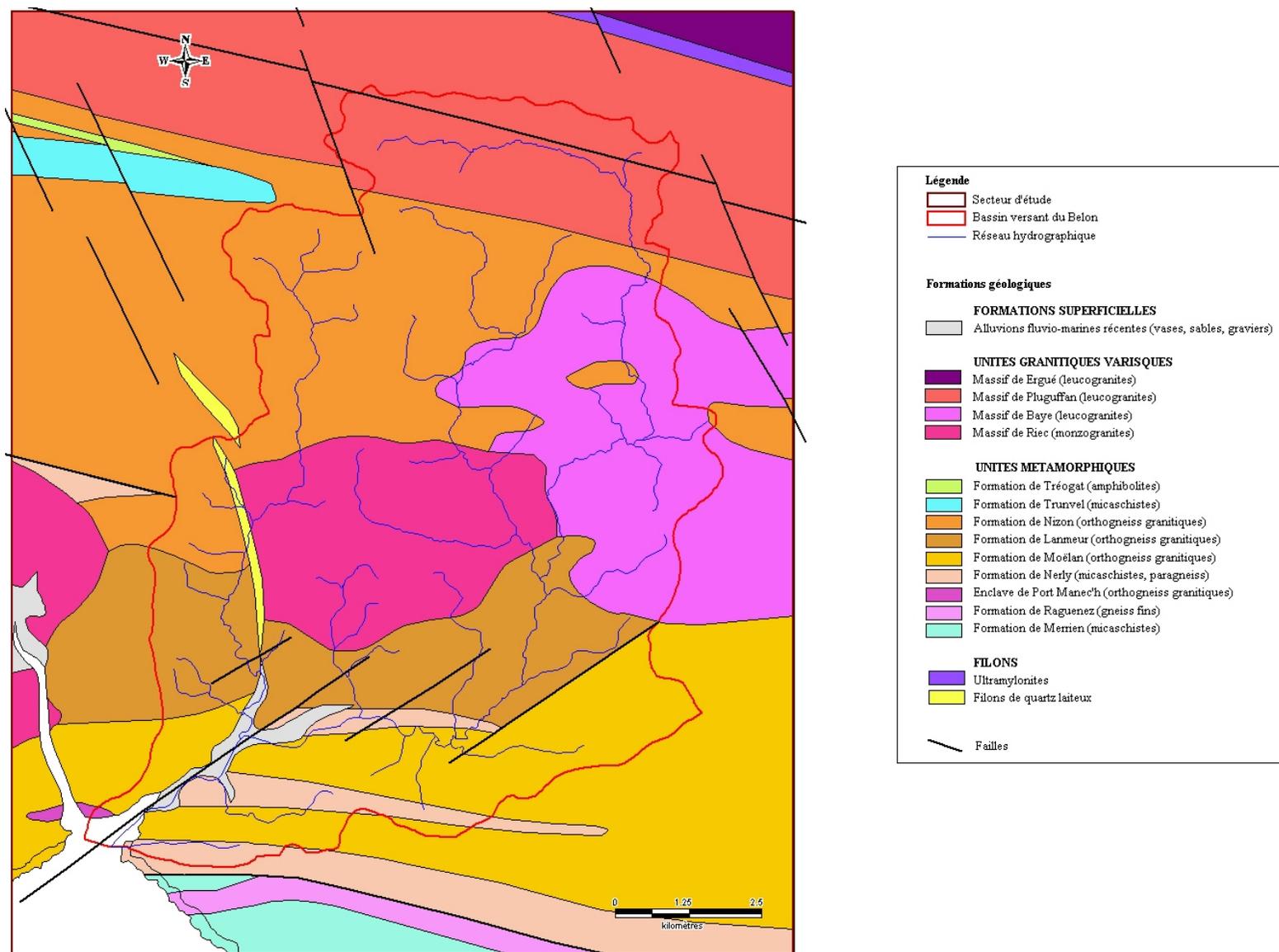


Figure 4 - Carte géologique synthétique du bassin versant du Bélon (d'après carte au 1/250 000 du Massif Armoricain - BRGM, 2001 - Coord. D. Rabu et J. Chantraine)

2.3. RESEAU DE SUIVI DES APPORTS SOLIDES ET DE LA QUALITE DE L'EAU - CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS

2.3.1. Objectifs du réseau de suivi

L'objectif premier de ce réseau est de quantifier les flux solides issus des sous bassins versants, qui viennent se déposer dans l'estuaire du Bélon, et par suite d'identifier et analyser les zones de fortes contributions (ou inversement de dépôts) de chacun des sous bassins. Le second objectif vise à caractériser la qualité chimique des cours d'eau qui constituent le bassin versant.

Le réseau de suivi est composé de 12 points de mesure répartis de la façon suivante (cf. figure 5 et tableau 1) :

- 9 points de prélèvements d'eau en rivière : 5 sur le Bélon, 3 sur le Dourdu, 1 sur un affluent du Bélon,
- et 3 points de prélèvements de sédiment dans l'estuaire.

Nom	Localisation	Cours d'eau	Estuaire	Rivière
A	La Motte Chaume	-	x	
B	Moulin Edouard (amont influence marine)	Dourdu		x
C	Pont Bellec (amont du pont)	Dourdu		x
D	Anse de Ste Thumette	-	x	
E	Pont Caillot (en face exutoire)	-	x	
F	Anse de Keristinec (amont usine)	Affluent		x
G	Moulin Mer (amont influence marine)	Bélon		x
H	St Ouarneau (aval du pont)	Bélon		x
I	Pont Caradec (avant confluence)	Bélon		x
J	Verneur (aval du pont)	Dourdu		x
K	Kervabiau (aval du pont)	Bélon		x
L	Castel Coudiec (amont du pont)	Bélon		x

Tableau 1 - Identification des points du réseau de suivi

Le réseau a été implanté au cours de la 1^{ère} année du projet à partir de plusieurs critères :

- cohérence avec les points du réseau de suivi de l'Ifremer (8 points communs), notamment au niveau de l'estuaire.
- répartition géologique et parfois contacts entre les formations,
- répartition au niveau des 3 cours d'eau (prise en compte de l'arborescence du réseau hydrographique),
- suivi de certaines confluences,
- accessibilité.

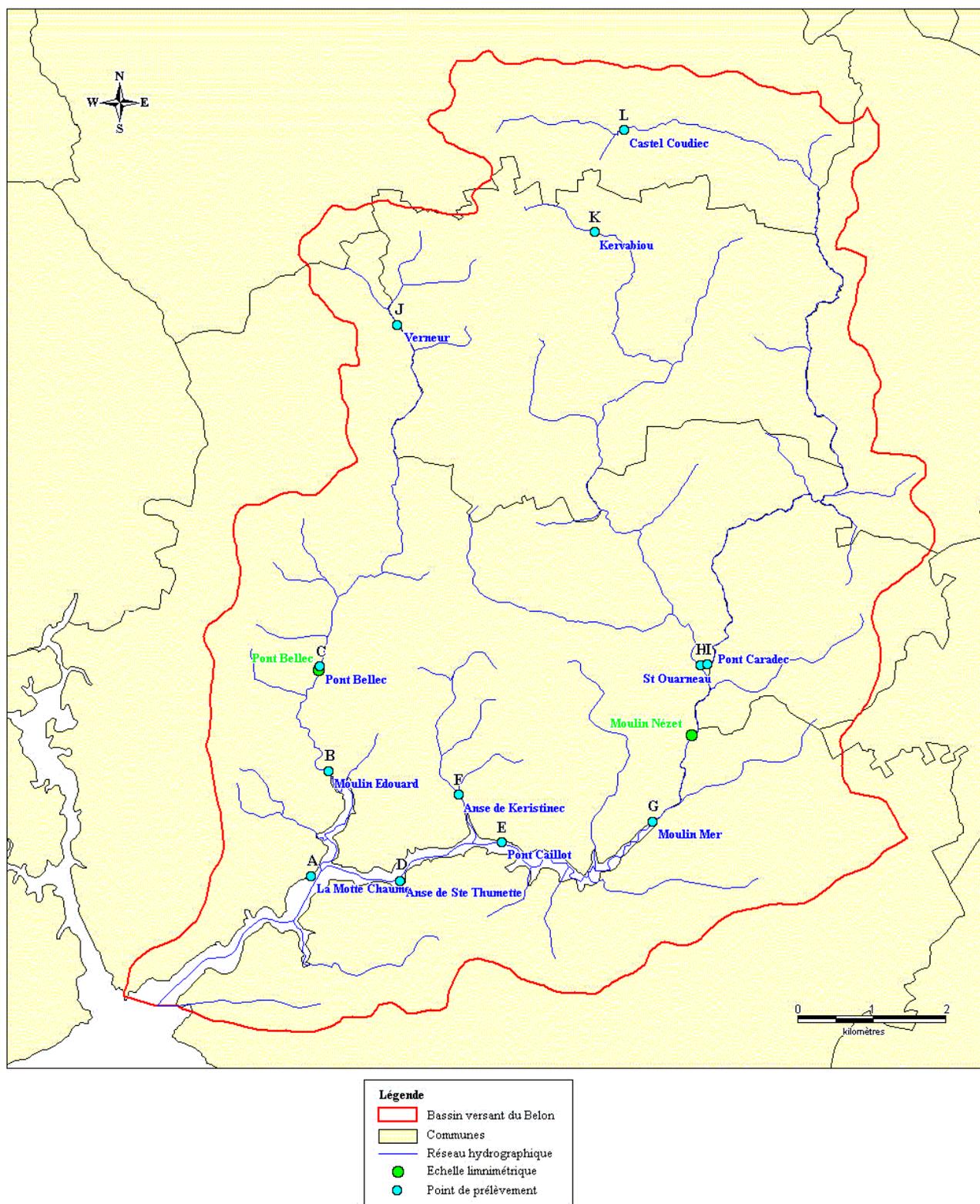


Figure 5 - Localisation du réseau de suivi des transports solides

Trois types de campagnes de prélèvements et d'analyses ont été menés :

- un suivi tous les deux mois des matières en suspension (MES) couplées à des mesures de débits¹ (14-15 décembre 2005 - 27-28 février, 11-12 avril, 13 juin, 29-30 août 2006),
- une campagne de prélèvements d'eau couplés à des mesures de débits (27-28 février 2006).

Ces campagnes viennent en complément de celles réalisées au cours des deux premières années du projet :

- un suivi des MES et des mesures de débits (21-22 juin, du 30 août au 1^{er} septembre, 25-26 octobre 2004, 21-22 décembre 2004 - 24-25 février, du 11 au 13 avril, 14-15 juin, 30-31 août et 20-21 octobre 2005),
- une campagne de prélèvements d'eau et de sédiments en période de basses eaux et mesures de débits (du 30 août au 1^{er} septembre 2004), et une campagne de prélèvements d'eau et de sédiments en période de hautes eaux couplées à des mesures de débits (du 11 au 13 avril 2005),
- une campagne de prélèvements d'eau couplés à des mesures de débits (du 30 au 31 août 2005).

2.3.2. Campagnes de prélèvements

Campagnes de prélèvements d'eau pour analyses des MES (tous les deux mois)

Sur les 9 points de rivière (cf. figure 5), les campagnes de prélèvements et d'analyses, ont été systématiquement couplées à des mesures de débits effectuées avec un micromoulinet C2. Sur le point spécifique constitué par l'échelle limnimétrique du Moulin Nézet sur le Bélon (cf. chapitre 2.3.3), le calibrage a été fait à partir de mesures du débit déterminées à l'occasion de chaque campagne.

Des mesures instantanées de la turbidité ont également été réalisées à l'issue de ces campagnes de prélèvements avec un turbidimètre « Turbiquant[®] 1500T » de MERCK. Les échantillons ont ensuite été envoyés en laboratoire pour détermination des matières en suspension (MES, cf. annexe 1).

Sur place et au niveau de chaque point du réseau (9 points de rivière), au cours de certaines campagnes, les paramètres physico-chimiques de l'eau ont été mesurés (température, conductivité, pH).

¹ Sur les 9 points de rivière, les campagnes de prélèvements et d'analyses, ont été systématiquement couplées à des mesures de débits effectuées avec un micromoulinet C2 (société OTT France).

Campagne de prélèvements d'eau pour analyses chimiques et isotopiques (février 2006)

La campagne de février 2006, en plus des prélèvements d'eau habituels (physico-chimie, MES, turbidité, débit), a été l'occasion d'effectuer les manipulations suivantes :

- prélèvements au niveau des 9 points de rivière (cf. figure 5) pour analyses chimiques des majeurs et des traces (flacons de 100 et 50 ml),
- prélèvements au niveau de 6 des 9 points de rivière (points C, J, H, I, K et L ; cf. figure 5) pour analyses isotopiques (^{15}N et ^{11}B) (flacons de 2 L et 1 L) ;

Les analyses chimiques et isotopiques sont détaillées au chapitre 2.5.5.

Protocoles analytiques

Les protocoles analytiques sont détaillés en annexe 1.

Dans l'annexe 2 sont rassemblées des photographies de la campagne de février 2006.

2.3.3. Suivi hydrologique des cours d'eau du bassin versant

Contrairement aux bassins versants voisins de l'Aven et de la Laïta, le bassin du Bélon n'est pas caractérisé par une station hydrométrique (suivi en continu du débit du cours d'eau). Afin de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin, le BRGM, avec l'appui de la Communauté de Communes du Pays de Quimperlé (COCOPAQ), a mis en place en 2004 deux échelles limnimétriques : la première sur le Bélon (Moulin Nézet) et la seconde sur le Dourdu (Pont Bellec) (cf. emplacements sur la figure 5).

Au niveau de chaque échelle, les débits mesurés ont été corrélés aux hauteurs lues afin d'établir une courbe de correspondance dite « courbe de tarage ».

Les couples de mesures (débit - hauteur d'échelle) effectués par le BRGM, au cours des campagnes mentionnées ci-dessus, ont été complétés par les valeurs mesurées par l'IFREMER au cours de ses propres campagnes de suivi bactériologique de la qualité de l'eau du bassin versant du Bélon.

Ces données permettent de tracer les deux courbes de tarage suivantes au droit des échelles (cf. figures 6 et 7). Ces courbes sont obtenues grâce à 33 couples débit-hauteur sur le Bélon et 33 couples sur le Dourdu (13 mesures du BRGM et 20 de l'IFREMER).

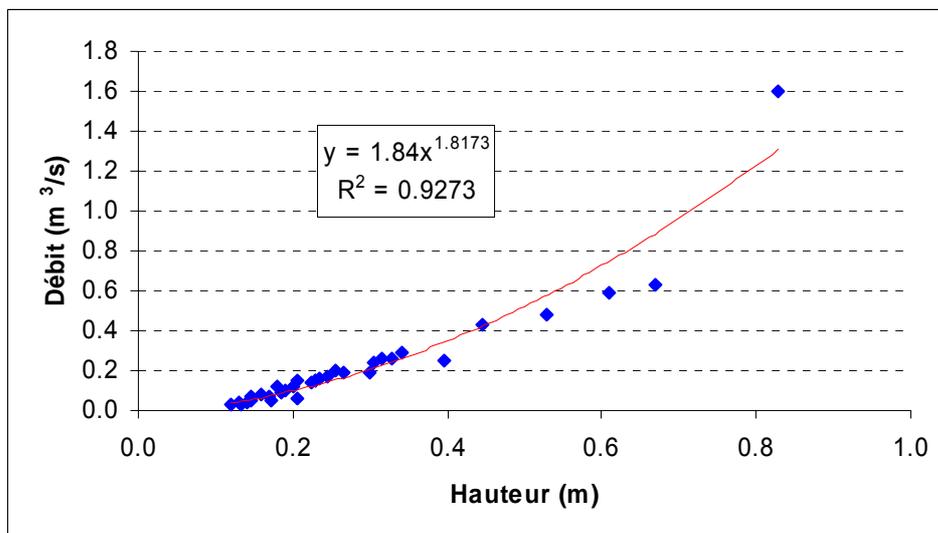


Figure 6 - Courbe de tarage au droit de Pont Bellec sur le Dourdu (point C)

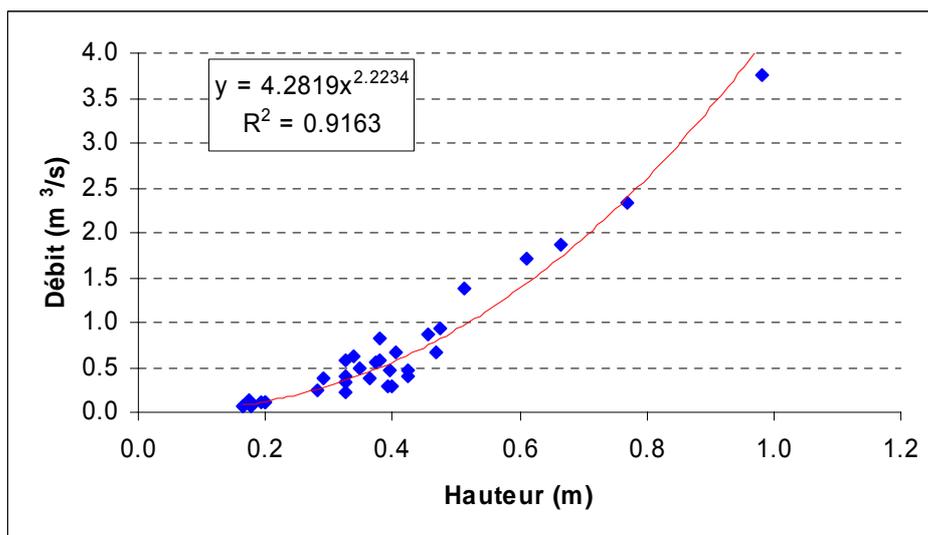


Figure 7 - Courbe de tarage au droit de Moulin du Nézet sur le Bélon

Grâce à chacune de ces courbes les hauteurs d'eau lues sur les échelles sont ensuite immédiatement converties en débits des rivières. Des abaques de correspondance ont été créés (cf. tableaux 2 et 3).

Le DOURDU à Pont Bellec (Finistère)							
BV au droit de l'échelle : 15.2 km ²							
Date de mise en place : 30/08/2004							
Correspondance hauteur-débit (hauteur H en cm, débit Q en m3/s)							
H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
1	0.000	41	0.364	81	1.255	121	2.602
2	0.002	42	0.380	82	1.283	122	2.641
3	0.003	43	0.397	83	1.311	123	2.680
4	0.005	44	0.414	84	1.340	124	2.720
5	0.008	45	0.431	85	1.369	125	2.760
6	0.011	46	0.449	86	1.399	126	2.800
7	0.015	47	0.467	87	1.429	127	2.841
8	0.019	48	0.485	88	1.459	128	2.882
9	0.023	49	0.503	89	1.489	129	2.923
10	0.028	50	0.522	90	1.519	130	2.964
11	0.033	51	0.541	91	1.550	131	3.006
12	0.039	52	0.561	92	1.581	132	3.047
13	0.045	53	0.580	93	1.613	133	3.090
14	0.052	54	0.600	94	1.644	134	3.132
15	0.059	55	0.621	95	1.676	135	3.174
16	0.066	56	0.642	96	1.708	136	3.217
17	0.074	57	0.662	97	1.741	137	3.260
18	0.082	58	0.684	98	1.774	138	3.304
19	0.090	59	0.705	99	1.807	139	3.347
20	0.099	60	0.727	100	1.840	140	3.391
21	0.108	61	0.749	101	1.874	141	3.436
22	0.117	62	0.772	102	1.907	142	3.480
23	0.127	63	0.795	103	1.942	143	3.525
24	0.138	64	0.818	104	1.976	144	3.570
25	0.148	65	0.841	105	2.011	145	3.615
26	0.159	66	0.865	106	2.046	146	3.660
27	0.170	67	0.889	107	2.081	147	3.706
28	0.182	68	0.913	108	2.116	148	3.752
29	0.194	69	0.937	109	2.152	149	3.798
30	0.206	70	0.962	110	2.188	150	3.844
31	0.219	71	0.987	111	2.224		
32	0.232	72	1.013	112	2.261		
33	0.245	73	1.039	113	2.298		
34	0.259	74	1.065	114	2.335		
35	0.273	75	1.091	115	2.372		
36	0.287	76	1.117	116	2.410		
37	0.302	77	1.144	117	2.448		
38	0.317	78	1.171	118	2.486		
39	0.332	79	1.199	119	2.524		
40	0.348	80	1.227	120	2.563		



Source : Ifremer

Tarage de l'échelle réalisé par le BRGM et l'IFREMER
à partir de 33 mesures effectuées d'août 2004 à août 2006
dans le cadre du programme européen CYCLEAU (2004-2006)



Tableau 2 - Abaque de correspondance hauteur- débit au droit de l'échelle limnimétrique de Pont Bellec sur la rivière du Dourdu

Le BELON à Moulin Nézet (Finistère)							
BV au droit de l'échelle : 45.2 km ²							
Date de mise en place : 31/08/2004							
Correspondance hauteur-débit (hauteur H en cm, débit Q en m ³ /s)							
H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
1	0.000	41	0.590	81	2.680	121	6.542
2	0.001	42	0.622	82	2.754	122	6.663
3	0.002	43	0.656	83	2.830	123	6.785
4	0.003	44	0.690	84	2.906	124	6.908
5	0.005	45	0.725	85	2.983	125	7.032
6	0.008	46	0.762	86	3.062	126	7.158
7	0.012	47	0.799	87	3.142	127	7.285
8	0.016	48	0.837	88	3.223	128	7.413
9	0.020	49	0.877	89	3.305	129	7.543
10	0.026	50	0.917	90	3.388	130	7.673
11	0.032	51	0.958	91	3.472	131	7.805
12	0.038	52	1.000	92	3.557	132	7.938
13	0.046	53	1.044	93	3.644	133	8.073
14	0.054	54	1.088	94	3.732	134	8.208
15	0.063	55	1.133	95	3.820	135	8.345
16	0.073	56	1.180	96	3.910	136	8.483
17	0.083	57	1.227	97	4.002	137	8.622
18	0.095	58	1.275	98	4.094	138	8.763
19	0.107	59	1.325	99	4.187	139	8.905
20	0.120	60	1.375	100	4.282	140	9.048
21	0.133	61	1.427	101	4.378	141	9.192
22	0.148	62	1.479	102	4.475	142	9.338
23	0.163	63	1.533	103	4.573	143	9.484
24	0.179	64	1.587	104	4.672	144	9.633
25	0.196	65	1.643	105	4.773	145	9.782
26	0.214	66	1.700	106	4.874	146	9.933
27	0.233	67	1.758	107	4.977	147	10.084
28	0.253	68	1.817	108	5.081	148	10.238
29	0.273	69	1.876	109	5.186	149	10.392
30	0.294	70	1.937	110	5.293	150	10.548
31	0.317	71	2.000	111	5.400	151	10.705
32	0.340	72	2.063	112	5.509	152	10.863
33	0.364	73	2.127	113	5.619	153	11.022
34	0.389	74	2.192	114	5.730	154	11.183
35	0.415	75	2.259	115	5.842	155	11.345
36	0.442	76	2.326	116	5.956	156	11.509
37	0.469	77	2.395	117	6.071	157	11.673
38	0.498	78	2.464	118	6.187	158	11.839
39	0.528	79	2.535	119	6.304	159	12.007
40	0.558	80	2.607	120	6.422	160	12.175

Source : BRGM



Tarage de l'échelle réalisé par le BRGM et l'IFREMER
à partir de 33 mesures effectuées d'août 2004 à août 2006
dans le cadre du programme européen CYCLEAU (2004-2006)









This project has received
European Regional
Development Funding
through the INTERREG III B
Community Initiative



Tableau 3 - Abaque de correspondance hauteur- débit au droit de l'échelle limnimétrique de Moulin Nézet sur la rivière du Bélon

Les 14 campagnes de mesures des débits des 9 points du réseau de suivi, effectuées par le BRGM, permettent d'approcher le fonctionnement hydrologique des cours d'eau du bassin versant (cf. figure 8). On peut remarquer que la plupart de ces campagnes se sont déroulées en dehors de périodes pluvieuses (sous estimation des débits).

Ces mesures du débit, effectuées aux points B (exutoire du Dourdu), F (affluent) et G (exutoire du Bélon), permettent de conclure que le flux d'eau arrivant dans l'estuaire du Bélon provient en moyenne à : 68 % du Bélon, 27 % du Dourdu, et 5 % de l'affluent.

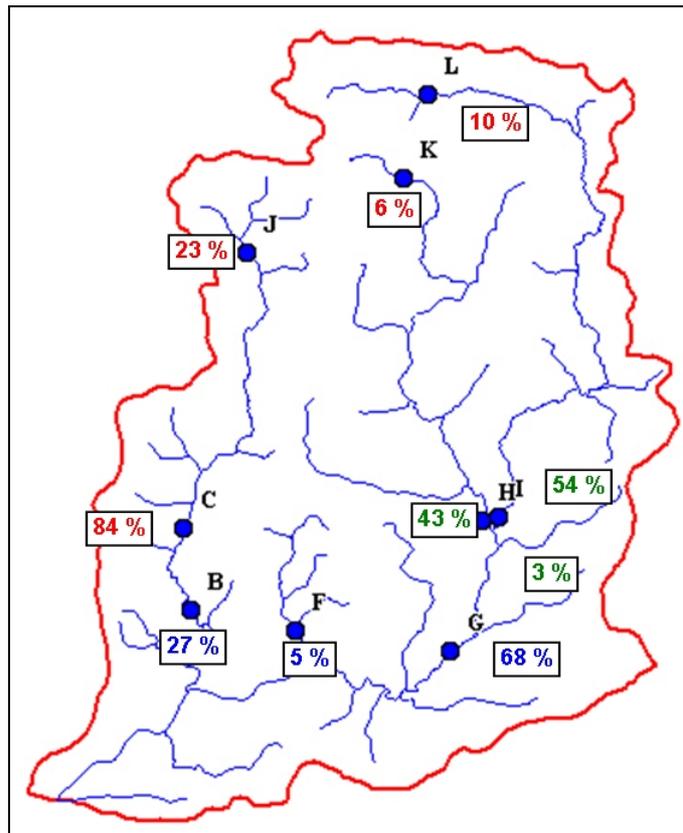


Figure 8 - Participation des cours d'eau à l'écoulement global mesuré en sortie du bassin versant du Bélon (chiffres en bleu) et contributions relatives des affluents du Bélon (vert) et à certains secteurs des deux rivières (rouge)

Au niveau du Dourdu, le débit au point C représente en moyenne 84 % du débit mesuré à l'exutoire au point B (moyenne calculée à partir des 14 campagnes), et de la même façon le débit au point J correspond à 23 % du débit mesuré au point B.

Au niveau du Bélon, le flux d'eau arrivant à l'exutoire au point G provient en moyenne à : 43 % du point H, 54 % du point I, et 3 % de l'affluent nommé Kerlouret-Kerzeller.

Sur le bras Ouest du Bélon, le débit au point K représente en moyenne 6 % du débit mesuré au point H. Sur le bras Est du Bélon, le débit au point L représente en moyenne 10 % du débit mesuré au point I.

2.4. ANALYSE MULTICRITERES ET IDENTIFICATION DES SOUS BASSINS VERSANTS SENSIBLES A L'EROSION

Les sous bassins versants (BV) du Bélon ont été tracés au droit des points de prélèvement du réseau de suivi (rivières), à partir d'un fond IGN au 1/25 000. Chaque sous bassin a été nommé en fonction du point contrôlé (exemple : sous bassin versant à l'amont du point J est appelé « J »). Les sous bassins restants ont été nommés A, D, E (proximité des points de prélèvements dans l'estuaire) et S (comme Sud du BV).

La figure 9 localise ces 13 sous bassins.

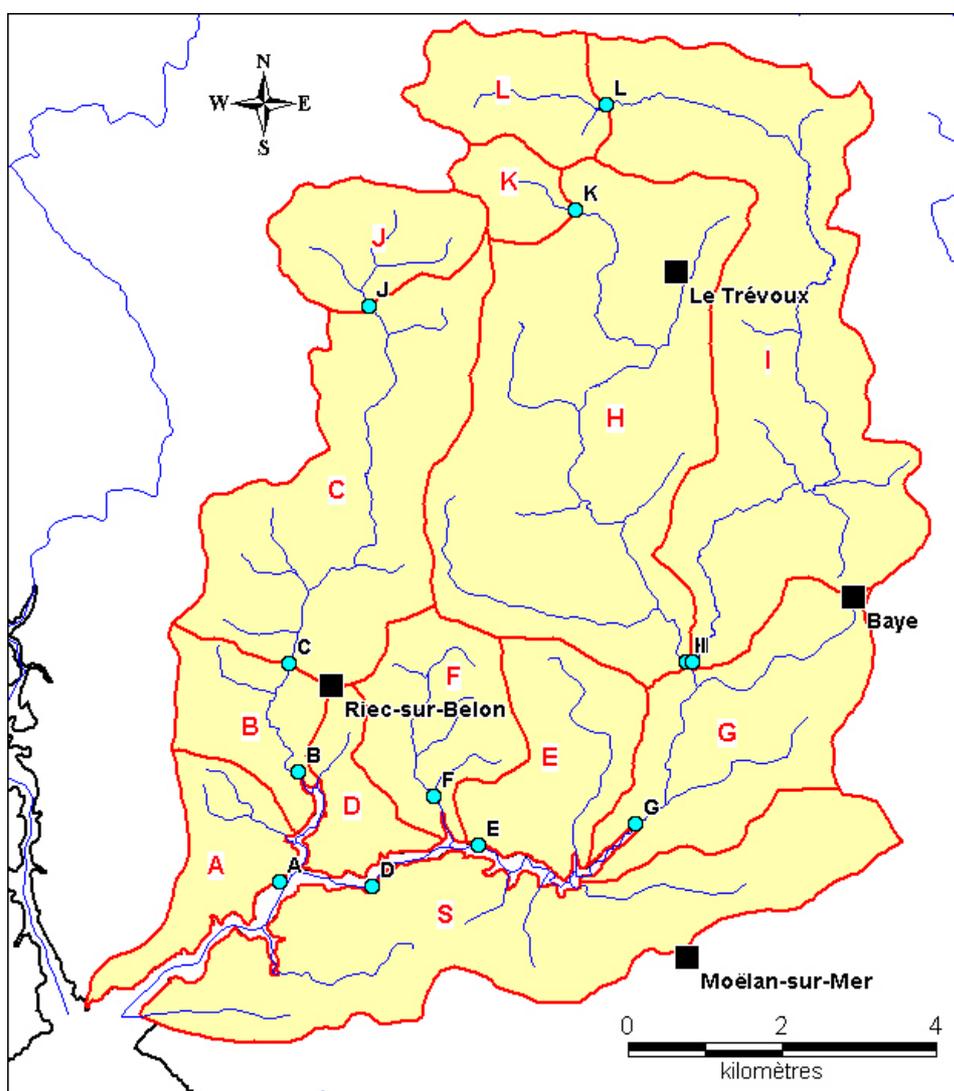


Figure 9 - Localisation des sous bassins versants étudiés dans l'analyse multicritères

Une cartographie de la sensibilité à l'érosion et à l'entraînement particulaire des parcelles des sous bassins versants du Bélon a été effectuée à partir du croisement de plusieurs paramètres.

Les données nécessaires à l'analyse multicritères ont été récupérées auprès de différents organismes : COCOPAQ, IFREMER, IGN, Météo France, BRGM.

2.4.1. Détail des paramètres pris en compte

La géologie

Le sous-sol du bassin versant est constitué de gneiss, de granites et de micaschistes. Sept formations géologiques constituent le substratum des sous bassins versants du Bélon (cf. figure 10) :

- les micaschistes du Groupe de Nerly (Formation de Kerfany) au Sud du bassin du Bélon,
- les orthogneiss de Moëlan, Lanmeur et Nizon (au Sud et à l'Ouest),
- les leucogranites de Pluguffan, Riec et Baye (au Nord, au Centre et à l'Est).

La description des formations géologiques (cf. chapitre 2.2), les connaissances de terrain et les analyses minéralogiques (cf. rapport d'avancement de l'année 2005 - BRGM/RP-54258-FR) ont montré que la sensibilité des formations géologiques à l'érosion pouvait être classée de la façon suivante (du plus sensible au moins sensible) : gneiss de Lanmeur, gneiss de Moëlan, micaschistes de Nerly, granite de Riec, granite de Pluguffan, granite de Baye, et gneiss de Nizon.

Ce classement s'appuie entre autres sur la taille des grains des roches, sur la présence de micas et de quartz, et sur l'altération potentielle des roches.

En fonction des formations géologiques présentes sur les sous bassins versants, ceux-ci sont coloriés sur la figure 10 selon leur sensibilité à l'érosion (vert : peu sensible, jaune : moyennement sensible, et rouge : sensible).

Le relief

Le bassin versant du Bélon est incliné du Nord-Est vers le Sud-Ouest (cf. chapitre 2.1) et son altitude varie entre 105 m et 0 m au niveau de son estuaire. Les cours d'eau prennent leur source au Nord à des altitudes d'environ 100 m. Les sous bassins versants ont un relief colinéaire légèrement marqué. Les rivières dessinent des vallées peu profondes sauf dans leurs parties aval où elles sont plus encaissées.

La figure 10 représente (en bleu) les secteurs où les pentes sont élevées et supérieures ou égales à 5 %. La sensibilité à l'érosion la plus importante a été définie dans des secteurs où ces pentes étaient très présentes par rapport à la superficie des sous bassins versants.

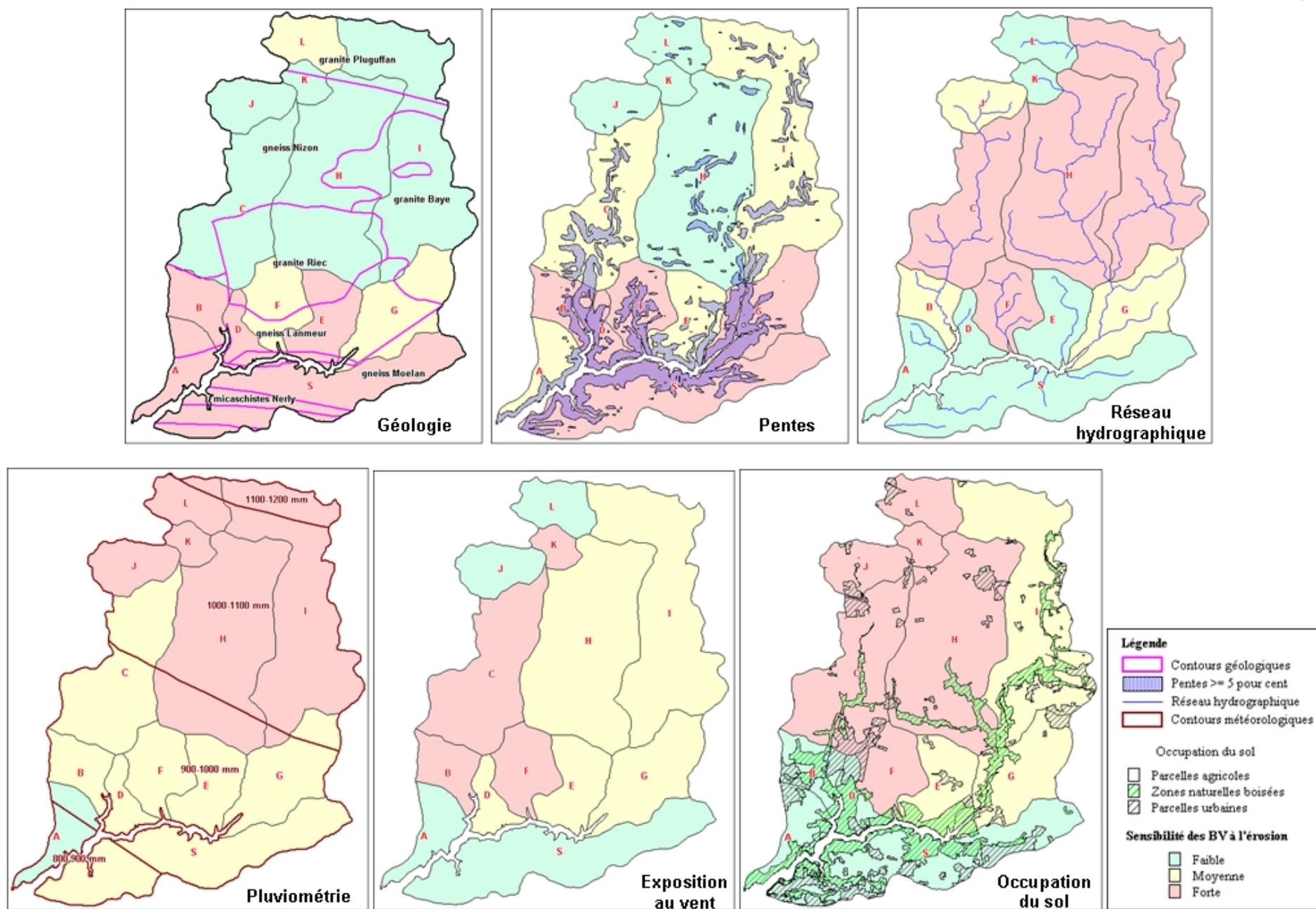


Figure 10 - Paramètres de l'analyse multicritères - Sensibilité à l'érosion des sous bassins versants du Bélon

Le réseau hydrographique

Le chevelu des cours d'eau du Dourdu et du Bélon est plus dense dans leurs parties médianes, tandis que le chevelu de l'affluent est assez dense sur le sous bassin F. Les sous bassins versants ont été classés selon leur sensibilité à l'érosion en se basant sur l'importance du réseau hydrographique sur chaque sous bassin : plus ce réseau est dense, plus l'érosion risque d'être forte (cf. figure 10). La densité du réseau se base sur sa longueur rapportée au périmètre du sous bassin.

Le climat

Les isohyètes de pluies inter-annuelles ont été reportées sur la figure 10 (Normales de pluie annuelle sur la période 1961-1990, source Météo France). Les sous bassins amonts (J du Dourdu, et H-I-K-L du Bélon) sont les plus arrosés et comme une forte pluviométrie risque d'éroder les sols et roches présentes, ces sous bassins ont été classés comme sensibles. Inversement, les sous bassins situés à l'aval des cours d'eau sont plus faiblement arrosés donc moins sensibles à l'érosion.

La rose des vents à Lorient sur la période 1979-2003 a été obtenue auprès de la COCOPAQ qui l'avait achetée à Météo-France (cf. figure 11). Cette station a été jugée représentative du secteur. Cette rose des vents montre que les vents dominants proviennent de deux directions :

- du Sud-Ouest (direction principale) et soufflent vers le Nord-Est,
- du Nord-Est (direction secondaire) et soufflent vers le Sud-Ouest.

Fréquences moyennes des directions du vent en %
Par groupes de vitesses : 2-4 M/S, 5-8 M/S, sup. à 8 M/S
Type de données : Valeurs trihoraires de 00 à 21 heures UTC

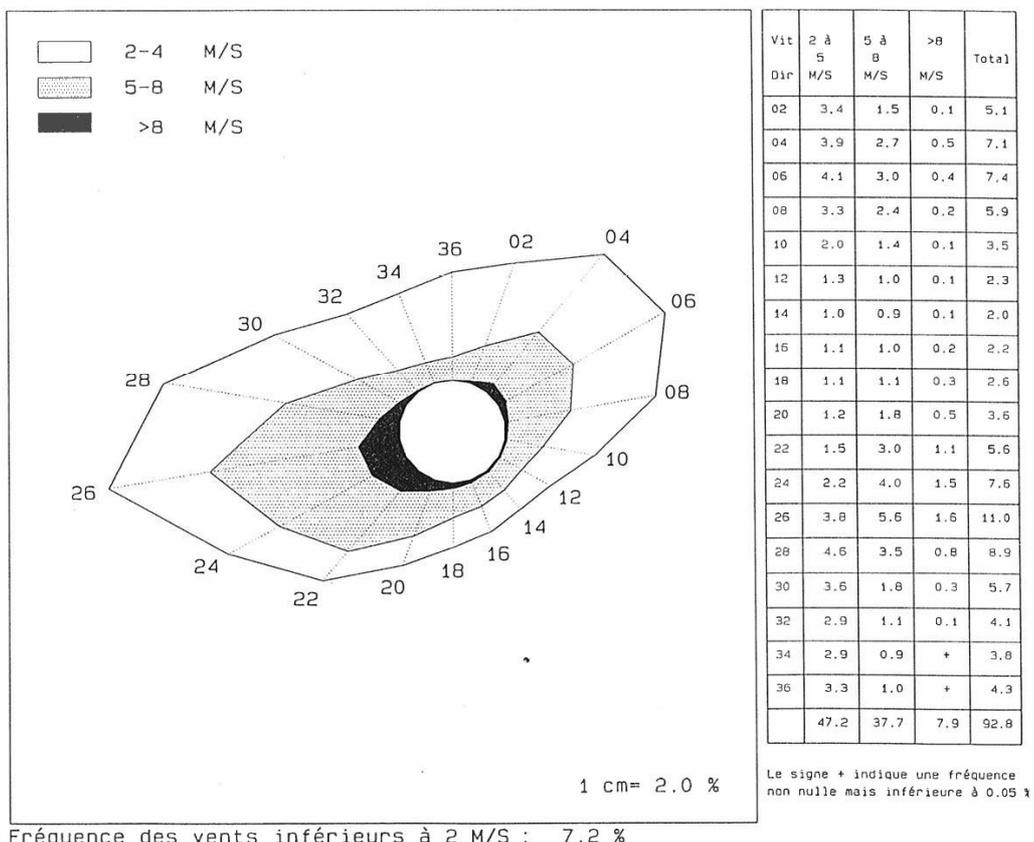


Figure 11 - Rose des vents à la station de Lorient - 1979-2003 (source Météo-France)

Le Modèle Numérique de terrain (cf. chapitre 2.1) a permis de classer les parcelles exposées au vent en 3 catégories :

- très exposées (parcelles orientées de N220 à N300, et N40-N80),
- moyennement exposées (N80-100, N200-220, N300-320 et de N340 à N40),
- et faiblement exposées (N100-200 et N320-340).

Sur la figure 12, les parcelles les plus exposées au vent ont été reportées en rouge (parcelles orientées de N40 à N80) et en orange (parcelles orientées de N220 à N300), les moyennement exposées et faiblement exposées en blanc.

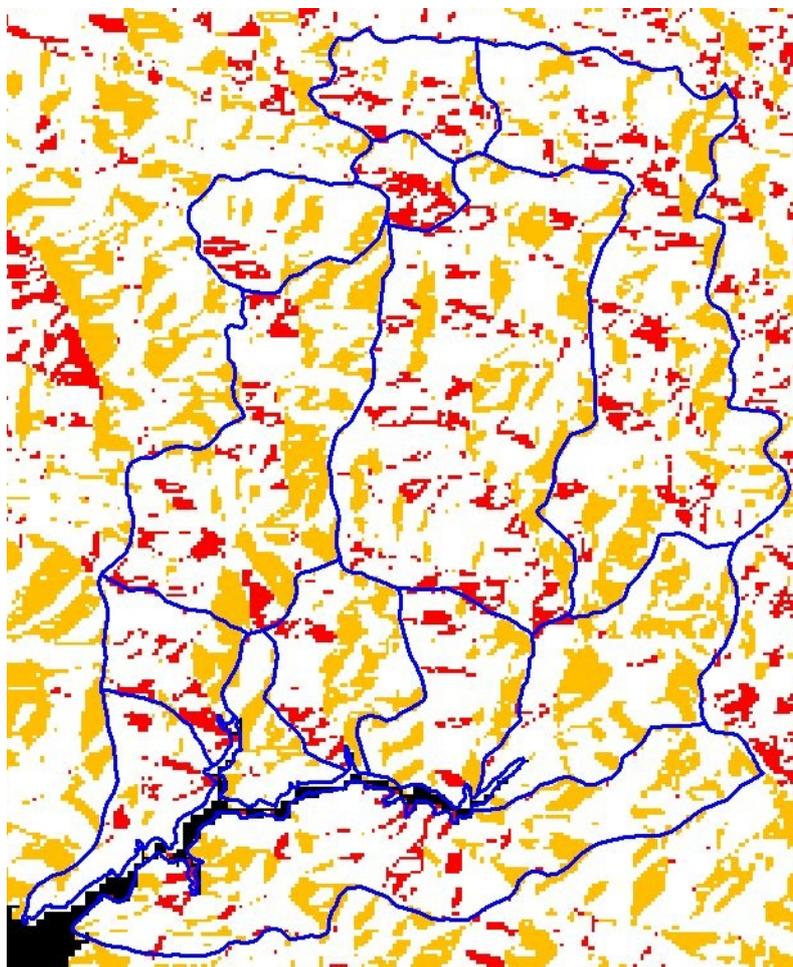


Figure 12 - Exposition des parcelles des sous bassins versants aux vents dominants

La sensibilité la plus importante a été définie dans les secteurs où ces parcelles étaient très présentes par rapport à la superficie des sous bassins versants (cf. figure 10).

L'occupation du sol

En mai 2006, le BRGM a sollicité la COCOPAQ pour récupérer, au format SIG vecteur, le plan d'occupation du sol (zones urbanisées, bois-forêts, landes-végétation naturelle, parcelles agricoles) à l'échelle du territoire du bassin versant du Bélon. Celui-ci était disponible avec des niveaux d'informations très variés selon les communes du bassin : soit une couche BD CARTO issue de l'IGN peu récente, soit une numérisation du Plan Local d'Urbanisme (PLU) datant de 2006. Les communes concernées sont les suivantes :

- Baye, Mellac, Moëlan-sur-Mer, Quimperlé, Riec-sur-Belon (PLU numérisés),
- Bannalec, Le Trévoux (ancien tracé).

Les fonds disponibles sur ces communes ont été assemblés puis découpés selon les contours du bassin versant du Bélon. La représentation sur la figure 10 a été découpée en trois secteurs : parcelles agricoles, zones naturelles boisées et parcelles urbaines.

Selon les données fournies par la COCOPAQ, la surface des bassins versants à un usage agricole qui est de l'ordre de 77 % ce qui situe la zone au-dessus de la moyenne départementale (63 %). La partie appelée « zone naturelle boisée » est relativement importante (cf. figure 10), surtout sur les pentes des vallées relativement encaissées à l'aval des rivières ou sur les pentes près de l'estuaire à l'aval. Elle couvre 13 % du territoire. Les zones urbaines représentent 10 % du territoire (agglomérations de Riec-sur-Belon, Moëlan-sur-Mer, le Trévoux et Baye).

En fonction de l'occupation du sol du secteur, les sous bassins versants du Bélon ont été hiérarchisés : les zones agricoles et urbaines étant considérées comme les plus sensibles à l'érosion et les zones boisées comme les moins sensibles (cf. figure 10).

2.4.2. Détermination des sous bassins sensibles à l'érosion

Pour évaluer la part du milieu physique et de l'occupation des sols dans les phénomènes d'érosion, une valeur a été calculée à partir des paramètres listés ci-dessus (géologie, relief, densité réseau hydrographique, climat et occupation du sol).

Chaque paramètre a été découpé en trois classes de 1 à 3 (1 : faible sensibilité à l'érosion, 2 : sensibilité moyenne, 3 : forte sensibilité).

Le tableau 4 ci-dessous détaille la méthode de définition des classes de sensibilité.

Paramètres	Catégories	Faible sensibilité à l'érosion	Forte sensibilité à l'érosion
Géologie	Gneiss, granites, micaschistes	Gneiss Nizon, granite Baye	Gneiss Moëlan et Lanmeur
Pentes	Faibles à fortes	Faibles	Fortes
Densité réseau hydrographique	Peu à très dense	Peu dense	Très dense
Pluviométrie	Faible à forte	Faible	Forte
Exposition au vent	Faible à forte	Faible	Forte
Occupation du sol	Zones urbaine, agricole ou boisée	Zone boisée	Zones urbaine, agricole

Tableau 4 - Combinaison des niveaux d'information

A chaque sous bassin versant, une valeur égale à la somme des coefficients de chaque paramètre a été affectée. Cette valeur permet de classer les sous bassins selon la sensibilité des parcelles à l'érosion (cf. figure 13).

Le classement des sous bassins versants, des moins sensibles aux plus sensibles, donne l'ordre suivant : A, S, J (Dourdu), L (Bélon), E, D, K-H-I-G (Bélon), B-C (Dourdu) et F (Affluent).

Ce résultat sera croisé avec celui des zones de faible/fort apports en MES (cf. chapitre 2.5.3 « Eléments sur les apports solides »).

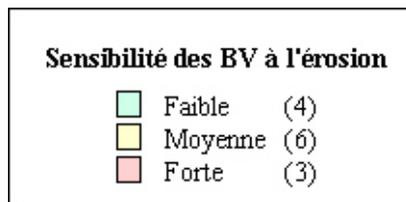
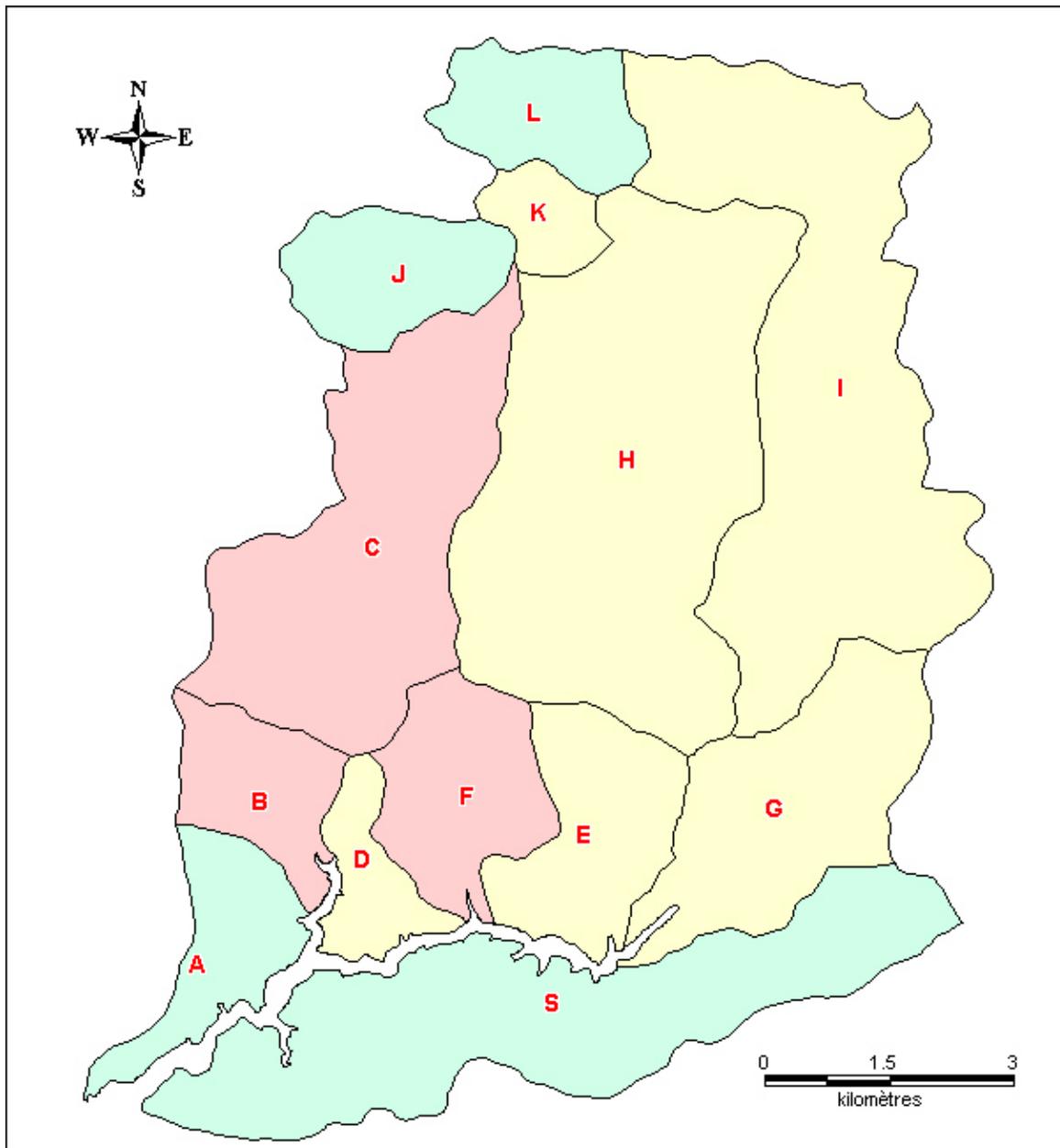


Figure 13 - Sensibilité à l'érosion des sous bassins versants du Bélon - Résultat de l'analyse multicritères

2.5. RESULTATS OBTENUS ET INTERPRETATIONS

2.5.1. Rappel des résultats obtenus en 2004 et 2005

En 2005, en raison d'une saison de hautes eaux très modérées et d'une période d'étiage sévère, les prélèvements ont été quasiment systématiquement effectués en dehors des périodes de crues (faible pluviométrie).

Les principaux résultats à retenir sur le bassin versant du Bélon sont les suivants :

- En raison du contexte climatique sec de 2005, les teneurs des matières en suspension (MES) étaient faibles sur les rivières. Ces teneurs augmentent en période de pluie à l'amont du Bélon et sur son affluent ; les matériaux sédimentent ensuite le long du Bélon. Le flux moyen journalier de MES provenant de tous les cours d'eau du BV était évalué à 206 kg/jour soit 75 tonnes/an (moyenne basse) ;
- Aucune anomalie chimique de l'eau n'a été détectée au niveau des 9 points de prélèvements (à l'amont, teneurs en nitrates proches du seuil de potabilité de 50 mg/l) ;
- Aucune anomalie chimique n'a été détectée au niveau des 3 points de prélèvement des sédiments d'estuaire. Pour 6 des 9 points de rivière, des teneurs en baryum supérieures aux valeurs de définition de source-sol VDSS (Guide de gestion des sites potentiellement pollués - MEDD - Mars 2000) ont été mises en évidence. Ces teneurs en baryum reflètent l'abondance de cet élément dans le fond géochimique régional (origine naturelle dans les granites et gneiss confirmée par les 4 prélèvements de berge) ;
- Les analyses granulométriques des sédiments ont montré que les sédiments d'estuaire sont sablo-argileux (taille moyenne des particules : 100-350 µm) tandis que ceux des fonds de rivière sont sableux (0,5 et 3 mm) ; Par ailleurs, la taille des particules des sédiments augmente d'amont en aval, ce qui confirme le dépôt régulier de MES (particules d'un diamètre supérieur à 150 µm).

2.5.2. Résultats des campagnes réalisées (MES)

Cinq campagnes de prélèvements au niveau du réseau de suivi ont donc été réalisées les 14-15 décembre 2005, les 27-28 février 2006, les 11-12 avril 2006, le 13 juin 2006, les 29-30 août 2006 (cf. tableaux ci-dessous, débits en litres par seconde).

Nom	Date	Heure	Turbidité (NTU)	MES (mg/l)	Débit mesuré (L/s)	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH
B	14/12/2005	11h10	4.8	3	217.4	7.2	288	7.12
C	14/12/2005	11h55	5.7	4	162.5	7.5	280	6.80
J	14/12/2005	12h40	5.5	4	65.3	8.6	238	6.51
F	14/12/2005	14h25	5.7	4	40.4	8.2	322	7.05
G	14/12/2005	16h15	5.3	4	524.1	7.6	281	6.50
H	15/12/2005	9h25	5.1	3	212.6	7.7	260	7.02
I	15/12/2005	10h15	7.9	6	311.9	7.9	-	7.30
K	15/12/2005	11h00	6.8	4	14.3	8.5	-	6.83
L	15/12/2005	11h40	1.1	4	44.2	8.9	253	6.53

Tableau 5 - Résultats du réseau de suivi lors de la campagne des 14-15/12/2005

Nom	Date	Heure	Turbidité (NTU)	MES (mg/l)	Débit mesuré (L/s)	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH	Eh (mV)	O2 (%)
B	27/02/2006	9h30	10.9	8	307.2	3.8	268	6.77	145	91.4
C	27/02/2006	10h20	10.4	7	241.7	4.4	264	6.43	125	83.0
J	27/02/2006	14h05	8.5	5	71.7	7.0	228	6.35	170	81.3
F	27/02/2006	15h05	9.5	8	78.7	6.6	284	7.10	125	86.2
G	27/02/2006	11h45	9.5	6	810.0	4.2	252	6.72	160	92.8
H	27/02/2006	16h40	8.2	6	328.1	5.9	242	7.04	210	85.5
I	27/02/2006	17h25	10.3	9	381.8	6.4	240	7.14	190	88.1
K	28/02/2006	8h55	9.7	6	19.6	5.8	227	6.38	160	71.0
L	28/02/2006	10h10	5.6	5	36.1	6.8	233	6.40	184	68.0

Tableau 6 - Résultats du réseau de suivi lors de la campagne des 27-28/02/2006

Nom	Date	Heure	Turbidité (NTU)	MES (mg/l)	Débit mesuré (L/s)	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH
B	11/04/2006	9h20	8.8	7	678.3	-	-	-
C	11/04/2006	16h20	8.2	6	245.9	-	-	-
J	11/04/2006	16h40	5.5	4	196.1	-	-	-
F	11/04/2006	17h05	12.5	13	113.8	-	-	-
G	12/04/2006	9h10	7.0	3	1594.1	-	-	-
H	11/04/2006	18h10	8.6	6	486.5	-	-	-
I	11/04/2006	18h20	7.0	3	739.2	-	-	-
K	12/04/2006	9h50	20.1	7	76.9	-	-	-
L	12/04/2006	10h25	2.6	2	147.4	-	-	-

Tableau 7 - Résultats du réseau de suivi lors de la campagne des 11-12/04/2006

Nom	Date	Heure	Turbidité (NTU)	MES (mg/l)	Débit mesuré (L/s)	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH
B	13/06/2006	9h10	6.1	4	95.4	-	-	-
C	13/06/2006	8h25	7.8	6	74.3	-	-	-
J	13/06/2006	10h00	2.8	< 2	17.3	-	-	-
F	13/06/2006	10h45	6.8	9	10.1	-	-	-
G	13/06/2006	11h40	2.9	2	242.4	-	-	-
H	13/06/2006	15h00	3.1	4	110.5	-	-	-
I	13/06/2006	15h30	2.9	< 2	135.8	-	-	-
K	13/06/2006	16h30	13.6	4	5.0	-	-	-
L	13/06/2006	17h05	2.1	2	12.9	-	-	-

Tableau 8 - Résultats du réseau de suivi lors de la campagne du 13/06/2006

Nom	Date	Heure	Turbidité (NTU)	MES (mg/l)	Débit mesuré (L/s)	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH
B	29/08/2006	9h55	22.0	40	81.3	-	-	-
C	29/08/2006	9h00	12.0	9	59.8	-	-	-
J	29/08/2006	10h45	11.9	12	13.7	-	-	-
F	29/08/2006	11h50	13.1	11	29.4	-	-	-
G	29/08/2006	13h35	10.1	6	112.1	-	-	-
H	29/08/2006	15h35	11.4	10	84.1	-	-	-
I	29/08/2006	16h20	4.1	3	86.3	-	-	-
K	30/08/2006	9h10	19.4	19	1.2	-	-	-
L	30/08/2006	9h55	3.5	2	2.2	-	-	-

Tableau 9 - Résultats du réseau de suivi lors de la campagne des 29-30/08/2006

La figure 14 présente le débit journalier de l'Issole à la station de Quimperlé [Place des Anciennes Fonderies, puis Pont Joseph Le Roch] (référence base HYDRO J4813010) : station de mesure DIREN la plus proche du bassin versant du Bélon.

Cette figure permet de préciser le contexte climatique de toutes les campagnes réalisées : prélèvements effectués en période humide (octobre, décembre 2004 – février, avril, décembre 2005 – février, avril 2006) et en période sèche (juin et août 2004 – juin, août, octobre 2005 – juin, août 2006).

En 2005, en raison du déficit pluviométrique en saison de hautes eaux (celles-ci ont été en réalité très modérées) et d'une période d'étiage sévère, les prélèvements ont été quasiment systématiquement effectués en dehors des périodes de crues.

Les quelques campagnes qui se sont déroulées « sous la pluie » sont : juin et décembre 2004 (un peu de pluie) – février, juin, octobre 2005 (un peu de pluie le 24/2, averse : le 15/6, dans la nuit du 20 au 21/6) – août 2006 (pluie le matin du 29/8).

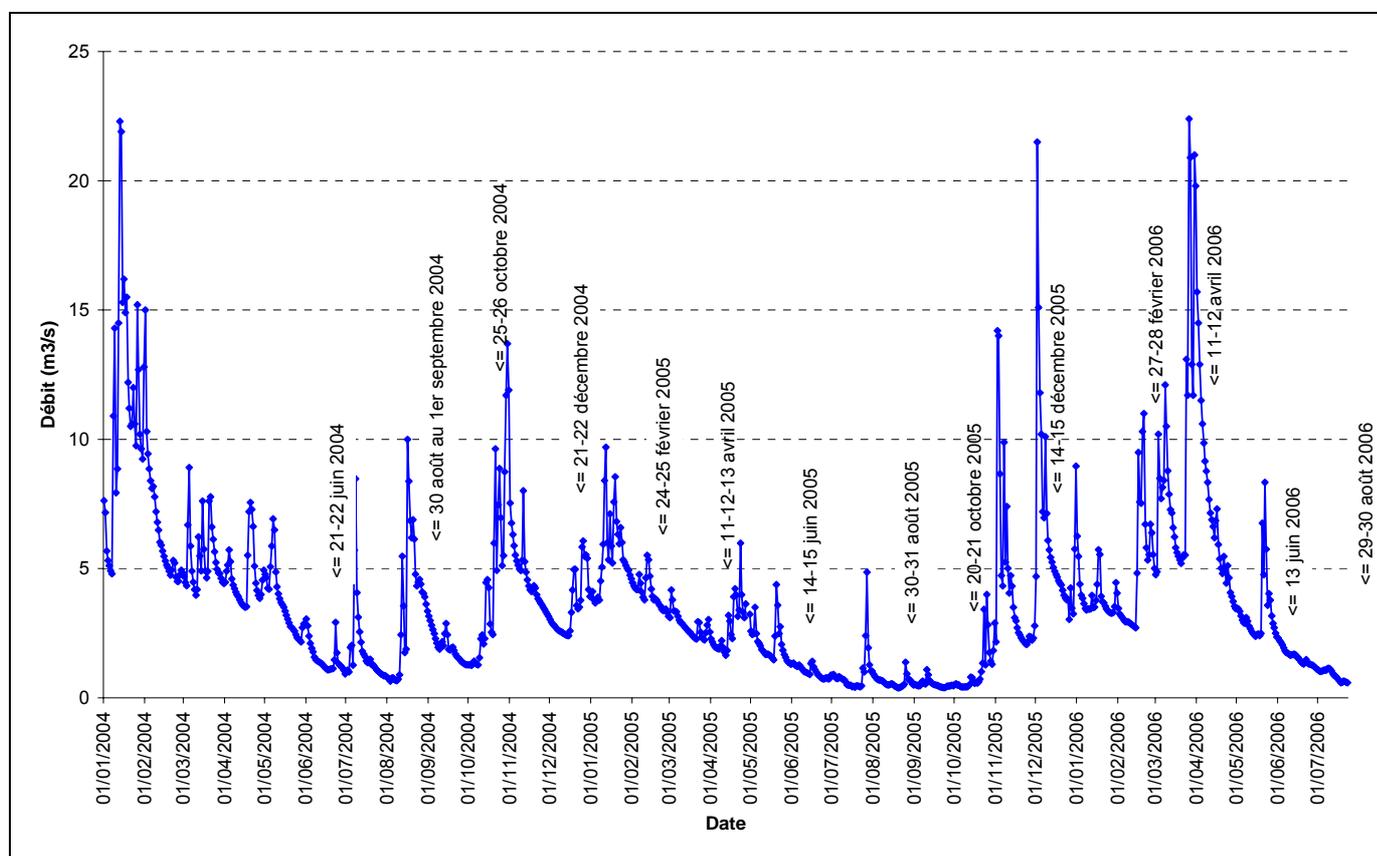


Figure 14 - Contexte climatique lors des campagnes de prélèvements des MES

Les figures 15, 16, 17, 18 et 19 (cf. pages suivantes) montrent la répartition des MES le long des rivières lors des campagnes de décembre 2005 puis février, avril, juin et août 2006.

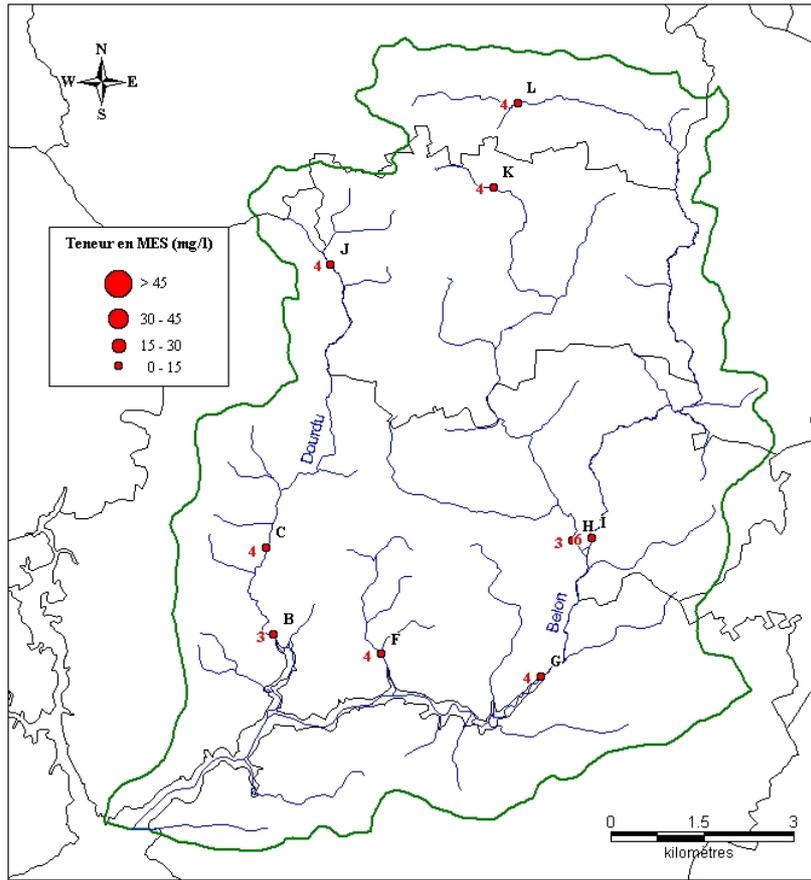


Figure 15 - Résultats des analyses MES de la campagne des 14 et 15/12/2005

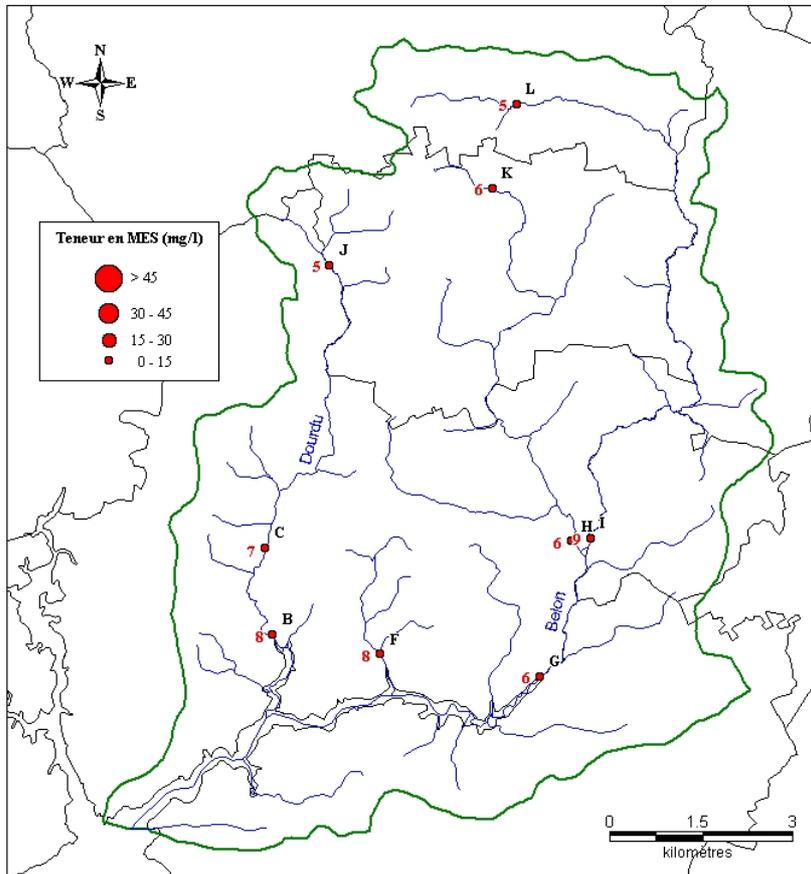


Figure 16 - Résultats des analyses MES de la campagne des 27 et 28/02/2006

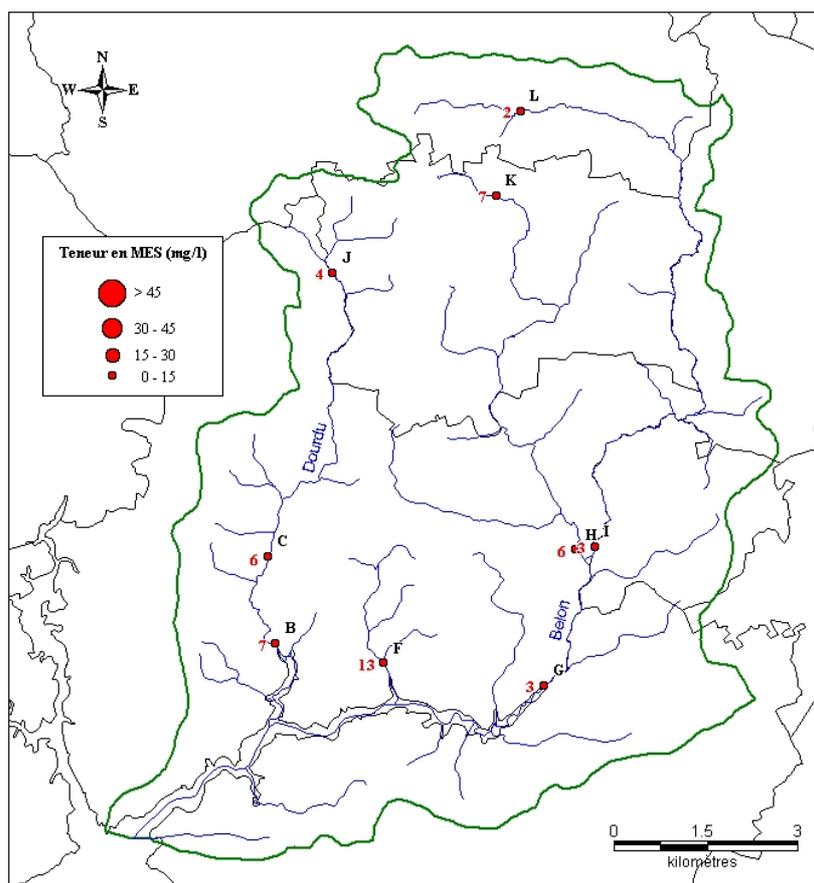


Figure 17 - Résultats des analyses MES de la campagne 11 et 12/04/2006

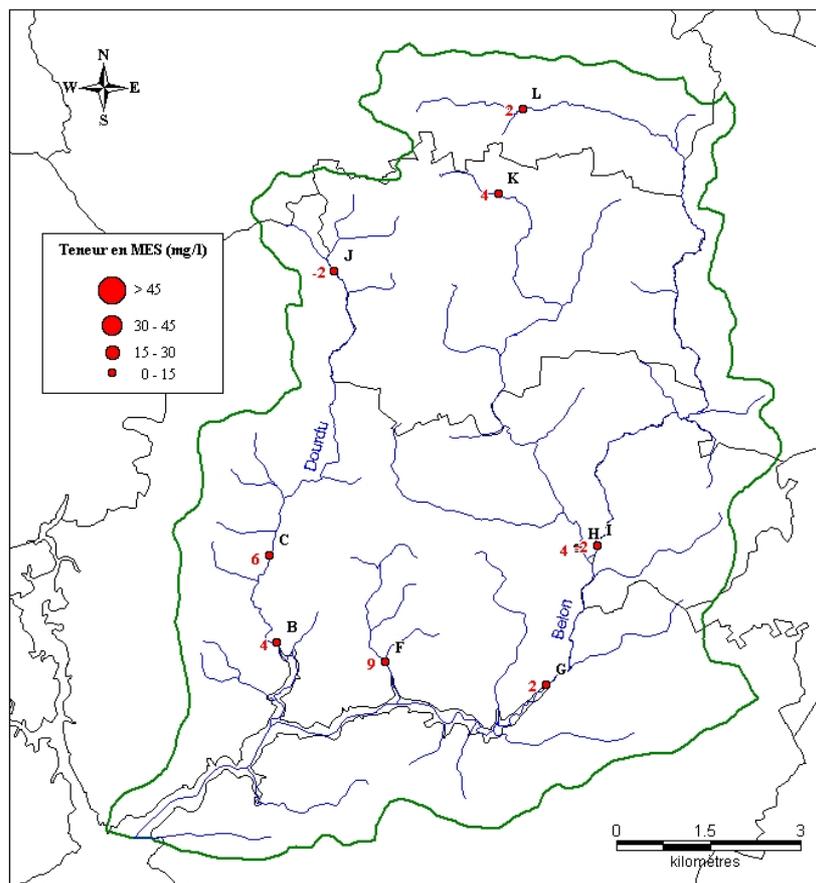


Figure 18 - Résultats des analyses MES de la campagne du 13/06/2006

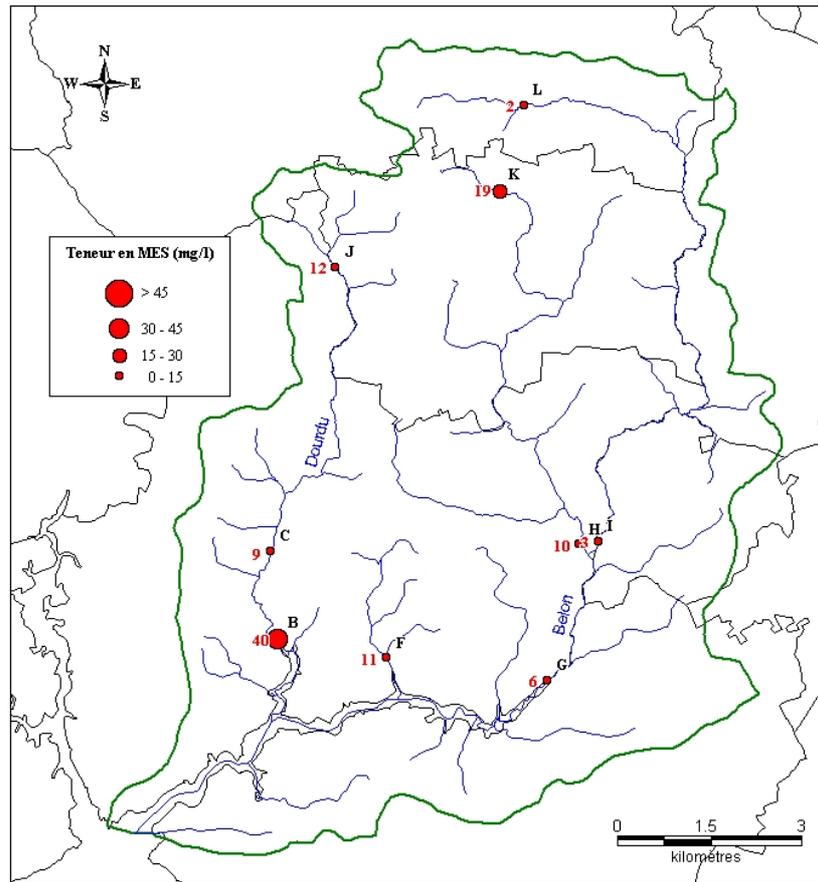


Figure 19 - Résultats des analyses MES de la campagne des 29 et 30/08/2006

2.5.3. Eléments sur les apports solides

A l'issue de toutes les campagnes de prélèvement, les résultats permettent :

- de calculer les flux moyens de MES arrivant dans l'estuaire,
- d'établir les corrélations entre la turbidité et les MES sur les trois cours d'eau,
- d'appréhender le fonctionnement des transports solides sur certaines zones des 3 rivières suivies (Bélon, affluent, Dourdu).

Flux de MES

Les flux de MES ont été calculés aux 3 exutoires (points : G pour le Bélon, F pour l'affluent du Bélon et B pour le Dourdu). Le tableau 10 présente les résultats obtenus.

Date	Flux en provenance du Bélon (kg/jour)	Flux provenant de l'affluent du Bélon	Flux en provenance du Dourdu	Flux total
22/06/2004	12.86	1.16	11.11	25.13
31/08/2004	122.20	7.78	18.85	148.83
25/10/2004	176.39	24.37	95.73	296.49
21/12/2004	183.76	12.87	44.12	240.74
24/02/2005	154.48	24.96	102.76	282.20
11/04/2005	50.84	9.33	19.58	79.75
14/06/2005	160.50	120.36	105.92	386.77
30/08/2005	5.46	0.07	8.37	13.90
20/10/2005	12.44	4.29	12.65	29.38
14/12/2005	181.13	13.96	56.35	251.44
27/02/2006	419.90	54.40	212.34	686.64
11/04/2006	413.19	127.82	410.24	951.25
13/06/2006	41.89	7.85	32.97	82.71
29/08/2006	58.11	27.94	280.97	367.03

Tableau 10 - Flux de MES en provenance des cours d'eau lors des campagnes de suivi réalisées

Afin de comprendre l'évolution des flux de MES sortant des cours d'eau du BV du Bélon, les valeurs calculées dans le tableau 10 ont été superposées aux débits de l'Issole et de l'ensemble des rivières du BV du Bélon (cf. figure 20). Pour permettre une comparaison, les débits ont été rapportés à la surface de la zone drainée (débits spécifiques en $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$, soit une surfaces de 96 km^2 pour le Bélon et 224 km^2 pour l'Issole).

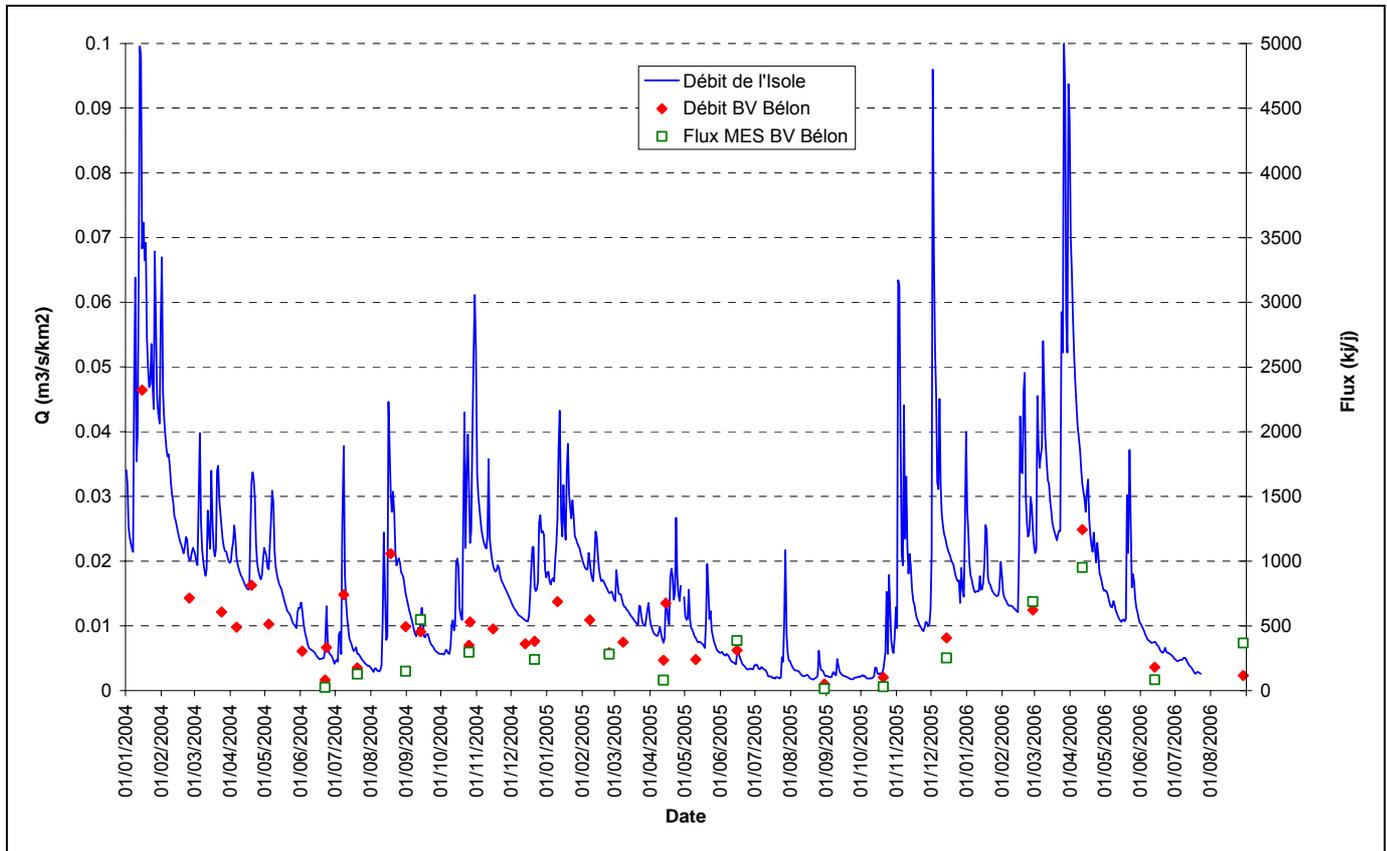


Figure 20 - Flux de MES et débit global du BV du Bélon

Cette figure montre que les flux de MES mesurés sont faibles en 2005 et un peu plus élevés en 2006, et qu'ils sont très influencés par les crues des rivières. En effet, on note des flux légèrement plus élevés en septembre 2004, en juin 2005, et en février-avril 2006, lors de pics de pluviométrie entraînant une augmentation des débits des cours d'eau.

En utilisant les résultats de toutes les campagnes, le flux moyen journalier de MES provenant des cours d'eau du BV du Bélon est évalué à 282 kg/jour soit 103 tonnes/an . On peut remarquer que cette valeur, caractéristique d'une période globalement peu humide (notamment en 2005), est une moyenne plutôt basse.

Les mesures de flux de MES, effectuées aux points B (exutoire du Dourdu), F (affluent) et G (exutoire du Bélon), permettent de conclure que le flux de MES arrivant dans l'estuaire du Bélon provient en moyenne à : 54% du Bélon, 37% du Dourdu, et 10% de l'affluent. Ceci montre que plus de la moitié des flux de MES proviennent du Bélon.

Ces valeurs sont à comparer aux débits provenant des trois cours d'eau : 68% du flux d'eau provient du Bélon, 27% du Dourdu, et 5% de l'affluent. L'affluent du Bélon et le Dourdu apportent relativement plus de MES que le Bélon.

Corrélation turbidité / MES

La comparaison entre les mesures de turbidité et les analyses de MES permettent de proposer les corrélations suivantes :

Lieu	Relation	Corrélation	Conclusion
Dourdu	MES=1,0100 x Turbidité	57 %	A confirmer
Affluent (F)	MES=1,1786 x Turbidité	68 %	Correct
Bélon	MES=0,6676 x Turbidité	70 %	Correct

Tableau 11 - Corrélations turbidité/MES

Certaines de ces corrélations ont été corrigées en éliminant des valeurs aberrantes ou erronées sans doute liées à des erreurs d'échantillonnage et/ou d'analyses de turbidité ou de MES.

En fonction du pourcentage de corrélation obtenu, la relation est jugée correcte ou à confirmer par d'autres mesures de turbidité et MES.

Ces corrélations permettront de calculer les MES des points du réseau à partir de mesures quasi-instantanées de la turbidité.

Le réseau de suivi permettra alors de mettre en évidence rapidement les secteurs où les apports de MES sont les plus importants et de remonter jusqu'aux sources.

Fonctionnement des transports solides

A l'issue des 14 campagnes de mesures, les résultats des teneurs en MES et des flux sont les suivants :

Nom	Cours d'eau	MES (mg/l)		MES (mg/l)			Flux de MES (kg/jour)		
		Moy pluie	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	
B	Dourdu	16.3	7.7	< 2	40	115.5	8.4	410.2	
C	Dourdu	7.3	4.9	< 2	13	69.7	2.8	320.6	
J	Dourdu	8.5	4.2	< 2	13	15.7	1.2	67.8	
F	Affluent	18.3	9.5	< 2	35	31.8	0.1	127.8	
G	Bélon	4.8	3.3	< 2	6	139.4	5.5	419.9	
H	Bélon	14.5	4.5	< 2	19	78.3	2.1	295.2	
I	Bélon	7.7	5.4	< 2	12	114.6	9.9	296.9	
K	Bélon	19.3	11.4	3	41	9.7	0.9	46.5	
L	Bélon	28.3	9.5	< 2	40	9.7	0.2	34.7	

Tableau 12 - Teneurs en MES et flux (résultats issus des 14 campagnes de mesure)

Dans ce tableau, les moyennes des teneurs en MES mesurées lors des périodes pluvieuses (colonne appelée « Moy pluie ») ont été calculées pour les 9 points du réseau de suivi (périodes précisées au chapitre 2.5.2).

Une analyse synthétique des résultats permet de tirer des conclusions quant à la provenance des MES sur chaque cours d'eau. La figure 21 permet d'illustrer le détail des observations précisées ci-dessous :

- les teneurs en MES sont relativement faibles sur les 3 rivières : teneur moyenne en tout point = 7 mg/l ; teneur qui descend à 5 mg/l en ne tenant pas compte des campagnes pluvieuses ;
- ces teneurs en MES augmentent en période de pluie et les points L et K (amont Bélon) puis F (affluent) deviennent alors les plus chargés avec des teneurs de 20 à 30 mg/l (avec par ordre décroissant L-K-F) ;
- Douordu : les teneurs en MES sont très proches entre l'amont (point J) et le point C, elles augmentent ensuite régulièrement entre le point C et l'exutoire B ; Les apports proviennent donc essentiellement de la partie aval du cours d'eau ;
- au point F, l'affluent constitue le point le plus chargé des exutoires avec une teneur moyenne = 9.5 mg/l (cette situation reste identique en période pluvieuse) ; les teneurs en MES au point F sont très légèrement supérieures à celles de l'exutoire du Douordu (point B) et nettement plus fortes que celles du Bélon (point G) ;
- Bélon : entre les points amont K et L (où les teneurs sont semblables) et la confluence H-I, les MES ont tendance à sédimenter le long du cours d'eau (visible systématiquement entre K et H, ainsi qu'entre L et I) ; cette stagnation se poursuit entre les points H-I et l'exutoire G (teneur moyenne à l'exutoire au point G = 3 mg/l) ; les apports de MES sont légèrement plus importants en provenance de l'affluent Ouest (point H) par rapport à l'affluent Est (point I) ; Les apports proviennent donc essentiellement de la partie amont du cours d'eau ;
- en cas de fortes précipitations, les secteurs définis sur la figure 21 comme « zones de stagnation des MES » peuvent être des lieux de remise en solution des particules qui se sont accumulées.

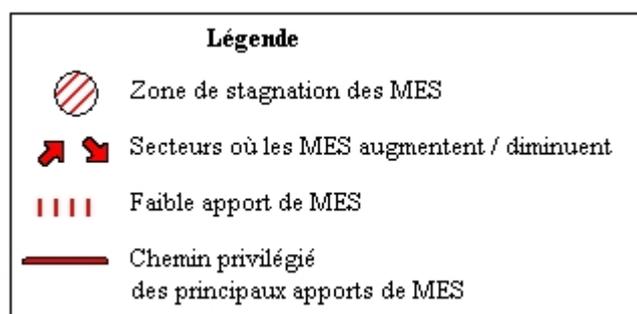
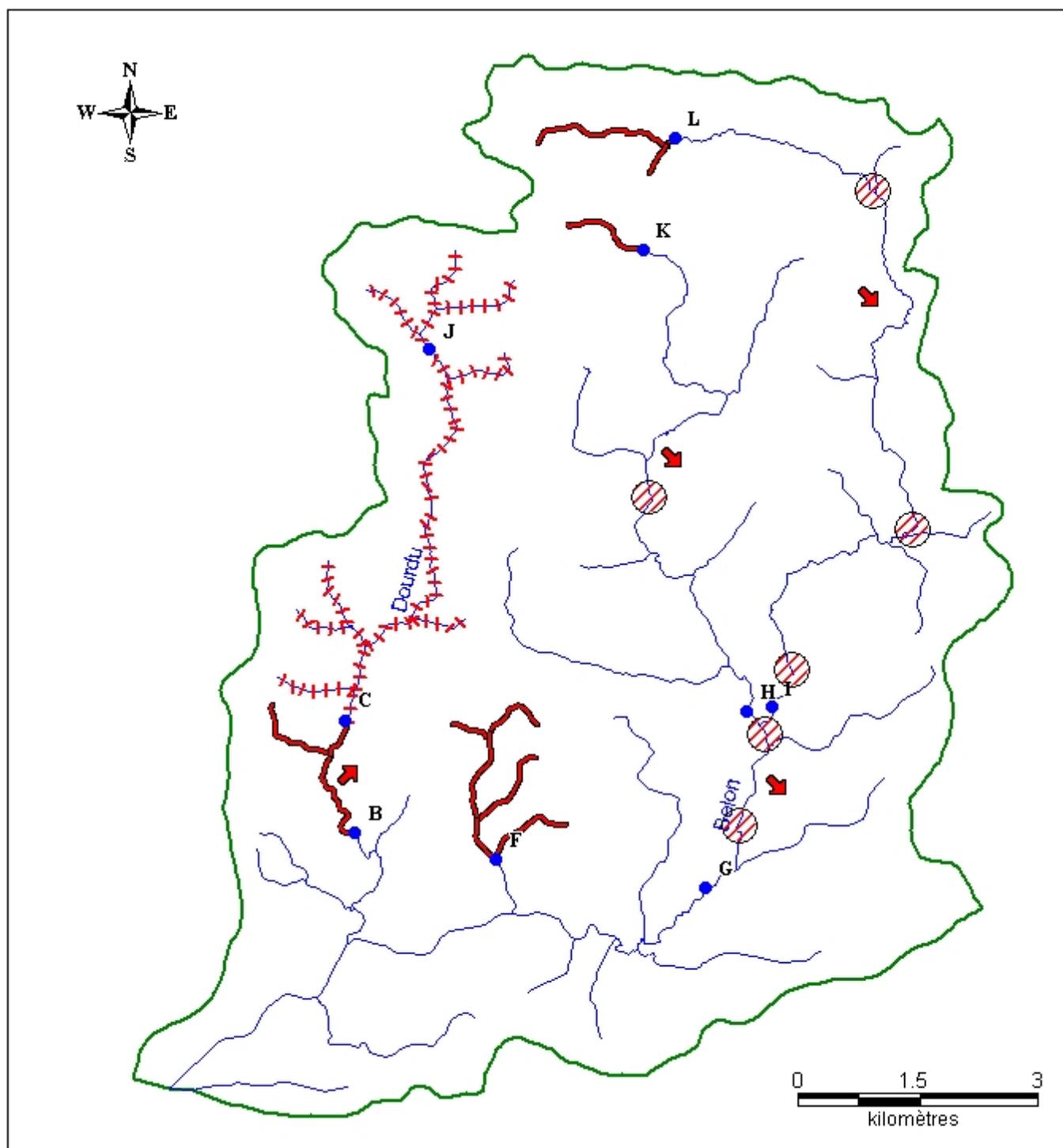


Figure 21 - Localisation des zones d'apports et des zones de stagnation des MES

Comparaison avec les résultats de l'analyse multicritères

Les résultats de l'analyse multicritères sont précisés au chapitre 2.4 et sur la figure 13.

Les sous bassins versants B-C du Doudu et F de l'affluent sont les plus sensibles à l'érosion ; ils correspondent à des zones de forts apports en MES (cf. figure 21) : entre B et C, ainsi qu'à l'amont du point F. Une surveillance des sous bassins B et F semble donc nécessaire afin d'identifier les zones privilégiées de transit des MES.

Sur les sous bassins versants du Bélon moyennement sensibles (G-H-I-K) les apports provenant de l'érosion sont masqués par des zones de stagnation.

Les sous bassins J et L situés respectivement à l'amont du Doudu et du Bélon apparaissent comme peu sensibles à l'érosion. Le sous bassin L est classé comme faiblement sensible alors que des apports de MES transitent. La superficie du sous bassin fausse les résultats car la partie Sud du bassin semble être plus sensible à l'érosion (géologie favorable et parcelles agricoles exposées à la pluie et au vent).

Le réseau de suivi des MES ne s'est raisonnablement pas intéressé aux sous bassins S et A très peu sensibles à l'érosion. Le sous bassin D, moyennement sensible, ne comporte que peu de cours d'eau et ne doit donc pas apporter beaucoup de MES à l'estuaire. Par contre, le sous bassin E (moyennement sensible) aurait mérité un suivi des MES.

2.5.4. Bilan matière (étude réalisée par l'entreprise CASPEO)

CASPEO est une entreprise innovante, dont la spécialité est l'analyse des procédés industriels. Dans ce contexte, elle a développé un savoir-faire dans l'analyse des réseaux de circulation de flux solides et liquides par la mise en œuvre de techniques avancées de bilan matière (cf. explications dans l'annexe 3). Le BRGM Bretagne a donc demandé à CASPEO de mettre en œuvre cette compétence dans l'analyse des réseaux hydrologiques des BV du Bélon (Finistère) et du Payré (Vendée).

L'objectif est de vérifier et éventuellement adapter l'utilisation des bilans matière et de la méthode de réconciliation des données pour l'analyse des bassins versants. Le rapport complet de l'étude (35 p.) réalisée par CASPEO est reporté en annexe 3.

Ce travail, mené fin 2005, a été réalisé d'une part à partir des résultats des campagnes de mesures des MES et débits de juin 2004 à octobre 2005, d'autre part des analyses chimiques d'août 2004, avril et août 2005 (éléments : nitrate, sulfate, chlore, fer et silice).

Les conclusions les plus remarquables sont les suivantes :

- les apports annuels en MES sont faibles et ils ne peuvent pas expliquer à eux seuls la dynamique d'ensablement de l'estuaire,
- mise en évidence d'apports de nitrates : à l'amont de J (Dourdu), entre L et I (Bélon) ; absence d'apport de nitrates : entre J et C (Dourdu), entre K et H (Bélon) ;
- apports des sulfates : entre J et C (Dourdu), entre H-I et G (Bélon) ;
- chlore : pas de remontée d'eau de mer ;
- apports de fer (Fe^{2+}) : à l'amont de J et entre C et B (Dourdu), entre H-I et G (Bélon) ;
- lixiviation du fer des berges, transport dans l'eau des rivières et précipitation dans l'estuaire.

2.5.5. Résultats des analyses chimiques et isotopiques sur les eaux

Analyses chimiques

Les données chimiques sur les eaux, relatives aux campagnes d'août 2005 et février 2006, concernent les 9 points de prélèvement du réseau de suivi eau de rivière : B-C-J pour le Dourdu, G-H-I-K-L pour le Bélon, et F pour l'affluent du Bélon (cf. figure 5).

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux 13 et 14 (pages suivantes).

Afin d'évaluer la qualité des eaux de surface, les valeurs de constat d'impact (VCI), définies dans le guide de gestion des sites (potentiellement) pollués publié par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable aux éditions du BRGM (ISBN 2-7159-0899-7 - version 2 de juillet 2001), ont été utilisées.

Les valeurs de constat d'impact ($\text{VCI}_{\text{usage sensible}}$) pour les eaux ont été déterminées à partir de l'Annexe 1.1. du décret du 3 janvier 1989 « relatif aux eaux destinées à la consommation humaine à l'exclusion des eaux minérales naturelles ». Compte tenu de la distance au captage AEP direct existant, les valeurs à retenir sont celles pour usage non sensible. Les $\text{VCI}_{\text{usage non sensible}}$ sont dérivées des précédentes (en les multipliant par 2 pour les éléments majeurs, ou par 5 pour les éléments en trace). Si les valeurs ainsi obtenues sont inférieures aux valeurs de l'Annexe 3 du décret du 3 janvier 1989 modifié (limites de qualité des eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine), on choisira les valeurs de l'Annexe 3 du décret du 3 janvier 1989. Nous mentionnons néanmoins les $\text{VCI}_{\text{usage sensible}}$ valeurs plus restrictives.

En août 2005, des teneurs élevées en argent sont notées aux points B (teneur supérieure aux $\text{VCI}_{\text{usage non sensible}}$) et L (supérieure aux $\text{VCI}_{\text{usage sensible}}$) (origine géologique possible : Gneiss de Nizon). Par ailleurs, des teneurs en fer élevées sont visibles au point L (dénitrification supposée car nitrates quasi nuls), et des teneurs en manganèse supérieures aux $\text{VCI}_{\text{usage non sensible}}$ sont également présentes en L. Enfin, les points se rapprochant le plus des $\text{VCI}_{\text{usage sensible}}$ sont les points K et J (nitrates : 48 et 46 mg/l pour 50 mg/l).

En février 2006, aucune anomalie n'a été détectée au niveau des 9 points de prélèvements.

Bélon											ISOTOPES			MAJEURS																				
											+ ou - 0.3																							
											15N/14N	δ11B	incert.	Ca	Mg	Na	K	SiO2	CO3	HCO3	Cl	NO3	SO4	NO2	NH4									
Nom	Localisation	Cours d'eau	Date	Heure	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH	Eh (mV)	O2 (%)	Débit mesuré (m³/s)	vs air ‰	vs NBS 951	11B/10B	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l									
B	Moulin Edouard	Dourdu	27/02/2006	8h30	3.8	268	6.77	145	91.4	0.3072				12.1	7	22.9	4.1	13.1	<5	24	34.9	36.7	15.1	0.07	0.6									
C	Pont Bellec	Dourdu	27/02/2006	10h15	4.4	264	6.43	125	83	0.2417	15.1	29.75	0.12	11.9	6.9	22.2	4	12.9	<5	23	33.9	36.3	14.8	0.04	0.7									
J	Verneur	Dourdu	27/02/2006	14h00	7.0	228	6.35	170	81.3	0.0717	8.1	38.41	0.14	11.2	6.2	18.7	3.2	12.6	<5	14	29.1	42.5	9.4	0.01	<0.1									
F	Anse de Keristinec	Affluent	27/02/2006	15h00	6.6	284	7.1	125	86.2	0.0787				17.4	7.1	23.1	3.3	15.3	<5	28	40	36	18.6	0.03	<0.1									
G	Moulin Mer	Bélon	27/02/2006	11h40	4.2	252	6.72	160	92.8	0.8100				12.1	6.7	21.2	3.6	14.8	<5	19	31.8	41.5	12.1	0.02	<0.1									
H	St Ouarnau	Bélon	27/02/2006	16h40	5.9	242	7.04	210	85.5	0.3281	8.3	35.76	0.12	11.5	6.7	20.3	3.6	14.3	<5	19	31	39.4	12.1	0.02	<0.1									
I	Pont Caradec	Bélon	27/02/2006	17h20	6.4	240	7.14	190	88.1	0.3818	7.8	35.75	0.10	11.8	6.4	20.2	3.1	15.1	<5	17	29.5	44.2	10.6	0.02	<0.1									
K	Kervabiou	Bélon	28/02/2006	9h00	5.8	227	6.38	160	71	0.0196	8.2	36.87	0.24	10.3	6.2	19.8	3.1	13.4	<5	21	29.9	35.9	8.2	0.02	<0.1									
L	Castel Coudiec	Bélon	28/02/2006	10h10	6.8	233	6.4	184	68	0.0361	7.2	36.43	0.16	11.2	6.1	20.2	2.8	13.4	<5	18	30.1	44.2	7.5	<0.01	<0.1									
											VCI eaux Usage sensible													200	50	250								
											VCI eaux Usage non sensible															400	100	500						
											décret 20/12/01 eaux potables surveillance																	50						
											eaux potabilisables																	200						
Bélon											ELEMENTS TRACES																							
											Ag	Al	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn							
Nom	Localisation	Cours d'eau	Date	Heure	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH	Eh (mV)	O2 (%)	Débit mesuré (m³/s)	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l						
B	Moulin Edouard	Dourdu	27/02/2006	8h30	3.8	268	6.77	145	91.4	0.3072	<5	69	<5	19	17	<5	<2	<2	<5	<2	0.13	<10	39	<5	<2	80	5							
C	Pont Bellec	Dourdu	27/02/2006	10h15	4.4	264	6.43	125	83	0.2417	<5	70	<5	17	17	<5	<2	<2	<5	4	0.16	<10	44	<5	<2	77	6							
J	Verneur	Dourdu	27/02/2006	14h00	7.0	228	6.35	170	81.3	0.0717	<5	75	<5	13	20	<5	<2	<2	<5	<2	0.12	<10	21	<5	<2	70	<5							
F	Anse de Keristinec	Affluent	27/02/2006	15h00	6.6	284	7.1	125	86.2	0.0787	<5	56	<5	22	14	<5	<2	<2	<5	<2	0.09	<10	24	<5	<2	111	5							
G	Moulin Mer	Bélon	27/02/2006	11h40	4.2	252	6.72	160	92.8	0.8100	<5	61	<5	15	20	<5	<2	<2	<5	<2	0.12	<10	18	<5	<2	87	<5							
H	St Ouarnau	Bélon	27/02/2006	16h40	5.9	242	7.04	210	85.5	0.3281	<5	66	<5	13	17	<5	<2	<2	<5	<2	0.11	<10	17	<5	<2	79	<5							
I	Pont Caradec	Bélon	27/02/2006	17h20	6.4	240	7.14	190	88.1	0.3818	<5	60	<5	13	23	<5	<2	<2	<5	<2	0.08	<10	15	<5	<2	92	<5							
K	Kervabiou	Bélon	28/02/2006	9h00	5.8	227	6.38	160	71	0.0196	<5	71	<5	12	21	<5	<2	<2	<5	<2	0.15	<10	18	<5	<2	77	<5							
L	Castel Coudiec	Bélon	28/02/2006	10h10	6.8	233	6.4	184	68	0.0361	<5	77	<5	11	20	<5	<2	<2	<5	<2	0.11	<10	19	<5	<2	91	<5							
											VCI eaux Usage sensible			10	200	50	100	5	50	1000			50	50	50	5000								
											VCI eaux Usage non sensible			50	1000	250	1000	25	250	2000			250	250	250	10000								
											décret 20/12/01 eaux potables surveillance					10	1000	700	5	50	2000			20	10									
											eaux potabilisables			100			1000	5	50	1000	2		1000		50		5000							

Tableau 14 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques de la campagne des 27-28/02/2006 (eau des cours d'eau)

Quatre campagnes de suivi de la qualité de l'eau ont été menées en hautes et basses eaux entre août 2004 et février 2006. Les analyses chimiques montrent l'absence d'anomalie chimique dans les eaux. Cependant, les teneurs en nitrates varient entre 1 et 48 mg/l (cf. figure 22), et se rapprochent fortement par endroits du seuil réglementaire de 50 mg/l.

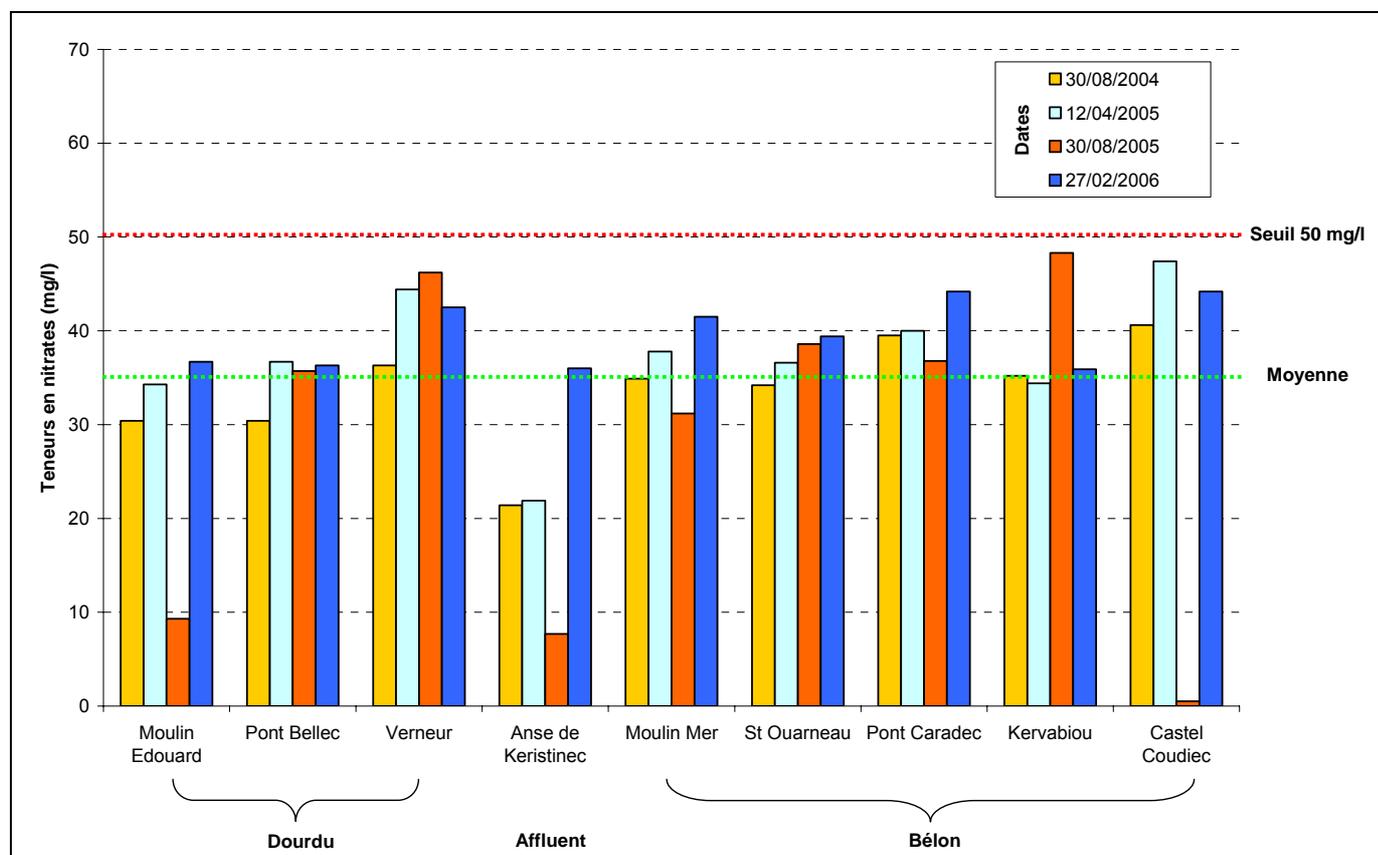


Figure 22 - Teneurs en nitrates sur les points du réseau de suivi

La teneur moyenne en nitrate (obtenue à l'issue des 4 campagnes) est de 35 mg/l.

Analyses isotopiques

Au vu de ces résultats, le BRGM a cherché à obtenir une première estimation de l'influence des sources de pollution azotée (bovins, poulets, cochons, STEP, engrais chimiques...) sur la qualité de l'eau des rivières du bassin versant. L'objectif étant à long terme de remonter à la source, et de mieux comprendre les phénomènes de transfert des apports azotés vers les cours d'eau.

La détermination des différentes sources potentielles azotées a pu être réalisée à l'aide des isotopes^(*) de l'azote (rapport isotopique $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) et du bore ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$).

Les différentes sources nitratées, soit naturellement (minéralisation du sol, soit à cause d'activités anthropiques locales (station d'épuration, lisiers de procs, fientes de volailles, fumiers de bovins, engrais, fosse septique) ont été caractérisées par leur composition isotopique et chimique.

(*) Un isotope est un corps simple ayant le même numéro atomique qu'un autre (même nombre de protons et nombre différent de neutrons), des propriétés chimiques presque identiques, mais une masse atomique différente (propriétés physiques différentes).

Le protocole analytique des analyses isotopiques est précisé en annexe 1.

La caractérisation des compositions isotopiques et chimiques a été menée en deux étapes :

1) les 30 et 31 août 2005 :

- prélèvement de 9 points situés dans le lit des cours d'eau,
- et de 5 sources potentielles de pollution azotée :
 - ❖ fumier de bovins, prélevé sous forme liquide dans la fosse à fumier, chez Jacques GOUYEC au lieu-dit Rouas sur la commune de MELLAC (échantillon noté BOVI),
 - ❖ lisier de porcs, prélevé sous forme liquide dans le bassin de stockage, chez René MIOSSEC au lieu-dit Guernez sur la commune de RIEC-SUR-BELON (échantillon PORC),
 - ❖ fiente de volaille, prélevé sous forme solide(*) sous une serre de stockage, chez Frédéric KERHERVE au lieu-dit Kerhuiten sur la commune de MOELAN-SUR-MER (échantillon VOLA),
 - ❖ engrais chimique, prélevé sous forme solide(*) dans un sac d'ammonitrate 33.5, chez Frédéric KERHERVE au lieu-dit Kerhuiten sur la commune de MOELAN-SUR-MER (échantillon ENGR),
 - ❖ effluent de station d'épuration (STEP), prélevé sous forme liquide en sortie de la station d'épuration du Trévoux (échantillon STEP).

(*) Les échantillons solides ont été broyés, lixiviés et filtrés à 0.45 µm.

2) les 27-28 février 2006 :

- prélèvement de 6 des 9 points situés dans le lit des cours d'eau (points C-J du Doudu et H-I-K-L du Bélon).

Les résultats des échantillons d'eau sont présentés dans les tableaux 13 et 14 et les résultats des sources dans le tableau 15.

Les échantillons prélevés en février 2006 (hautes eaux) avaient pour but de compléter l'information obtenue en basses eaux.

En août 2005, pour 3 des 9 échantillons de rivières (points B, F et L), les teneurs en $\delta^{15}\text{N}$ des nitrates n'ont pas pu être mesurées en raison de concentrations en nitrates trop faibles (respectivement 9, 8 et 0.5 mg/l). De la même façon, toutes les teneurs en $\delta^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$ des sources n'ont pas pu être obtenues (l'azote n'est pas présent sous la forme de nitrates) sauf pour l'échantillon ENGR (engrais chimique).

Béton		liquides			ISOTOPES					MAJEURS													
					+ ou - 0.3																		
Lieu	Type	Lieu	Date	Heure	15N/14N vs air ‰	δ11B vs NBS 951	incert. 11B/10B	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	SiO2 mg/l	CO3 mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l						
PORC	Lisier porcs	chez M. MIOSSEC	30/08/2005	15h15		14.33	0.09	58.6	3.1	694.5	2733.8	53.8	1512	13467	1673.1	< 0.5	49						
BOVI	Fumier bovins	chez M. GOUYEC	31/08/2005	12h30		30.24	0.10	194.8	160.4	198.8	1501.4	68.3	215	4771	740.9	< 0.5	3						
STEP	Station d'épuration	Le Trévoux	30/08/2005	18h50		-1.27	0.06	41.4	8.9	94.8	31.3	11	< 5	454	42	< 0.5	57.1						
Béton		solides			ISOTOPES					MAJEURS													
					+ ou - 0.3																		
Nom	Localisation	Cours d'eau	Date	Heure	Cond. (µS/cm)	pH	15N/14N vs air ‰	δ11B vs NBS 951	incert. 11B/10B	Ca mg/Kg	Mg mg/Kg	Na mg/Kg	K mg/Kg	SiO2 mg/Kg	Cl mg/Kg	NO3 mg/Kg	SO4 mg/Kg						
VOLA	Fientes volailles	chez M. KERHERVE	30/08/2005	16h15	199000	7		10.97	0.12	230	53	2432	18443	101	5575	< 50	6100						
ENGR	Engrais ammonitrate	chez M. KERHERVE	30/08/2005	16h30	15430	7.95	-0.1	9.34	0.27	3013	< 50	< 50	< 50	< 25	1550	796500	15300						
Béton		liquides			ELEMENTS TRACES																		
Lieu	Type	Lieu	Date	Heure	Ag µg/l	Al µg/l	As µg/l	B µg/l	Ba µg/l	Be µg/l	Cd µg/l	Co µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Fe mg/l	Li µg/l	Mn µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Sr µg/l	Zn µg/l		
PORC	Lisier porcs	chez M. MIOSSEC	30/08/2005	15h15	< 50	1167	< 100	2511	53	< 50	< 20	56	124	65	1.03	< 50	< 50	162	< 200	477	294		
BOVI	Fumier bovins	chez M. GOUYEC	31/08/2005	12h30	< 50	377	< 100	342	< 50	< 50	< 20	24	< 50	15	2.58	< 50	330	< 50	< 200	576	96		
STEP	Station d'épuration	Le Trévoux	30/08/2005	18h50	< 5	52	< 10	444	13	< 5	< 2	< 2	9	8	0.04	13	16	< 5	< 2	167	31		
Béton		solides			ELEMENTS TRACES																		
Nom	Localisation	Cours d'eau	Date	Heure	Cond. (µS/cm)	pH	Ag mg/Kg	Al mg/Kg	As mg/Kg	B mg/Kg	Ba mg/Kg	Be mg/Kg	Cd mg/Kg	Co mg/Kg	Cr mg/Kg	Cu mg/Kg	Fe mg/Kg	Li mg/Kg	Mn mg/Kg	Ni mg/Kg	Pb mg/Kg	Sr mg/Kg	Zn mg/Kg
VOLA	Fientes volailles	chez M. KERHERVE	30/08/2005	16h15	199000	7	< 0.25	6.6	0.6	36.5	2.08	< 0.25	< 0.1	0.6	3.93	21.49	82.3	< 0.5	5.13	1.76	1.49	4.1	53.75
ENGR	Engrais ammonitrate	chez M. KERHERVE	30/08/2005	16h30	15430	7.95	< 0.25	0.9	< 0.5	< 0.5	< 0.25	< 0.25	< 0.1	< 0.1	< 0.25	< 0.1	< 1	< 0.5	0.4	< 0.25	< 0.1	1	< 25

Tableau 15 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques de la campagne des 30-31/08/2005 (sources)

En complément de la campagne des 27-28 février 2006, une expérience a été menée en collaboration avec la Chambre d'Agriculture du Finistère (de Quimperlé) pour compléter la caractérisation de la composition isotopique et chimique des sources.

Cette expérimentation a eu lieu en mars et avril 2006, selon le protocole suivant :

- 5 sceaux de 15 litres ont été remplis de terre (16 kg brut dont 9.6 kg de terre sèche) provenant d'une prairie naturelle du bassin du Belon (à Rozeign sur commune du Trévoux) sans aucun apport ni pâturage depuis 35 ans (cf. figure 23). Les sceaux ont ensuite été complétés avec différents apports (environ 450 g des produits) :

- lisier de porcs, charcutier pauvre en matières sèches (3.2 unités N-NH₄/m³) ;
- lisier de bovins, raclage du surnageant de lisier riche en matières sèches (pelletable) ;
- fumier de volailles, classique un peu humide (4 mois de stockage) ;
- végétal broyé, phacélie poussant sur une parcelle habituellement fertilisée au lisier de porc ;
- le dernier sceau constitue le sol témoin, sol nu sans apport.



Figure 23 - Expérience menée avec la Chambre d'Agriculture du Finistère

Le sol, provenant de pâturages non fertilisés depuis 35 ans, a été enrichi avec du maërl broyé² pour favoriser son action de nitrification.

Les mélanges, mis en place le 11 mars 2006, ont été arrosés puis ont été stockés dans une salle pendant un mois. En avril, les sceaux ont été arrosés (les 7, 10 et 11 avril) pour recueillir l'eau filtrant dans chaque sol et des échantillons d'eau ont été prélevés. Par ailleurs, un effluent en sortie de fosse septique a également été échantillonné (bidon blanc à gauche de la figure 23). Tous ces prélèvements ont été effectués le 11 avril en utilisant de l'eau déminéralisée.

Cette expérience menée en 2006 donne des informations complémentaires de celles obtenues en 2005 (cf. tableau 16).

Pour l'échantillon FOSS (effluent en sortie de fosse septique), la teneur en $\delta^{15}\text{N}$ n'a pas pu être mesurée en raison de concentration en nitrates trop faible (1.4 mg/l). L'azote est présent sous forme ammoniac.

² Débris d'une algue marine à enveloppe calcaire, fragile, de teinte rouge, entrant pour 80 % dans la composition d'un sable recueilli sur les rivages bretons pour amender les terres pauvres en chaux

Bélon				ISOTOPES	MAJEURS										
				+ ou - 0.3											
Nom	Type	Date	Heure	15N/14N vs air ‰	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	CO3 mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	NO2 mg/l	NH4 mg/l
PORC	Sol+lisier porcs	11/04/2006	13h55	3.6	101.3	18.5	41.9	19.1	< 5	5	80.5	463.3	14.6	0.15	20.4
BOVI	Sol+fumier bovins	11/04/2006	11h15	1.0	15.8	3.3	13.3	0.9	< 5	12	21.9	33.2	14.2	0.02	0.3
VOLA	Sol+fumier volailles	11/04/2006	12h05	7.0	61.3	17.7	58.7	119.8	< 5	22	135.8	717.1	79.8	1.29	135
SOL	Sol	11/04/2006	14h15	-3.9	7.9	1.6	9.5	< 0.5	< 5	10	11.9	7.7	13.6	0.01	0.3
VEGE	Sol+végétal broyé	11/04/2006	14h35	-2.1	86.2	15.9	31.4	21.4	< 5	7	67.5	363.9	10.2	0.36	8.7
FOSS	Fosse septique	11/04/2006	11h35		47.2	8.8	142.6	52.3	< 5	1243	117.1	1.4	76.2	0.08	261.5

Tableau 16 - Données chimiques et $\delta^{15}\text{N}$ des échantillons d'eau prélevés sur les sols expérimentaux (avril 2006)

2.5.6. Interprétation des analyses chimiques et isotopiques

Interprétation des analyses chimiques

Les échantillons d'eau de surface ont été prélevés à quatre saisons différentes, allant de périodes de très basses eaux (août 2005) à des périodes de hautes eaux (février 2006). L'ensemble des données in-situ et résultats des analyses chimiques et isotopiques est présenté dans les tableaux du chapitre précédent.

Les échantillons prélevés durant les campagnes où les débits étaient plus élevés (/1 pour août 2004, /2 pour avril 2005 et /4 pour février 2005) montrent peu de variations chimiques entre la partie amont et la partie aval du bassin. Les échantillons prélevés durant les basses eaux (/3 pour août 2005) mettent en évidence une plus grande variation spatiale sur les deux sous bassins versants (Dourdu et Belon).

Une expérience a également été menée sur des sols prélevés dans le bassin versant et enrichis en engrais organiques et végétaux (cf. expérience du chapitre précédent).

En période de basses eaux, les eaux circulant dans les rivières proviennent quasiment exclusivement des aquifères. Les eaux sont donc plus concentrées (conductivité plus élevée) en éléments dissous du fait d'un temps de séjour et donc de contact eau-roche important dans les aquifères. Il existe également une plus grande variation chimique spatiale des eaux du fait de l'absence de dilution par les eaux de pluies. Ceci ne se confirme pas pour les nitrates, chlorures et sulfates qui sont des éléments apportés en grandes quantités par les activités anthropiques sur le bassin. Pour ces éléments on ne constate pas l'effet de dilution sur les eaux de février 2006 dont les débits étaient pourtant de l'ordre de dix fois plus élevés que lors des basses eaux. Ceci s'explique par un apport important de ces éléments par lessivage des sols.

Durant la période d'étude, sur tous les points, les concentrations en nitrates et sulfates sont plus élevées en février 2006 qu'en août 2004. Ceci ne permet toutefois pas de conclure à une augmentation dans le temps des apports en nitrates et sulfates dans le bassin versant. En effet les variations peuvent dépendre du délai entre l'épandage de fertilisants (ou sortie de STEP) et la collecte des échantillons, les conditions physico-chimiques des sols...

Pour la dernière campagne (février 2006), les ions ammoniums et nitrites ont été mesurés afin d'étudier la présence possible d'azote sous forme non oxydée. Sur les deux points aval du Dourdu (Pont Bellec C et Moulin Edouard B) des concentrations en NH_4 de 0,6 et 0,7 mg.l^{-1} ont été mesurées. Ceci indiquerait l'existence d'une source d'azote proche des points de prélèvements, ne permettant pas l'oxydation complète de cet élément en nitrate.

Sur le diagramme de Piper (figure 24), les eaux du Belon et du Dourdu se situent dans le domaine chloruré sodique. Les nitrates peuvent représenter (en meq) jusqu'à 37 % du total des anions. Durant les plus basses eaux (août 2005) un point se détache du

groupe sur le diagramme de Piper, Castel Coudiec (L/3). Ce point, en tête de bassin, présente des teneurs en nitrates très faibles. Ces valeurs faibles peuvent indiquer une dénitrification des eaux ou la non nitrification des eaux. Dans ce cas l'azote pourrait se trouver sous forme NH_4 ou NO_2 , ions non mesurés durant cette campagne. Les teneurs en nitrates en ce point, mesurées lors des autres campagnes, sont supérieures à 40 mg.l^{-1} , écartant la possibilité de valeurs naturellement très basses en azote. Ceci est renforcé par le fait de teneurs élevées en K, Sr, Cr... Une hypothèse qui permettrait d'expliquer cette faible teneur en nitrates du fait d'une dénitrification serait la présence juste en amont du point de prélèvement d'un marécage riche en matière organique. Une dénitrification de type hétérotrophe est fortement probable dans un tel milieu. On constate toutefois que la dénitrification ne fonctionne que durant les périodes de très basses eaux, la valeur de $0,5 \text{ mg.l}^{-1}$ n'ayant été observée qu'en août 2005 où le débit du ru a été mesuré à $0,14 \text{ l.s}^{-1}$.

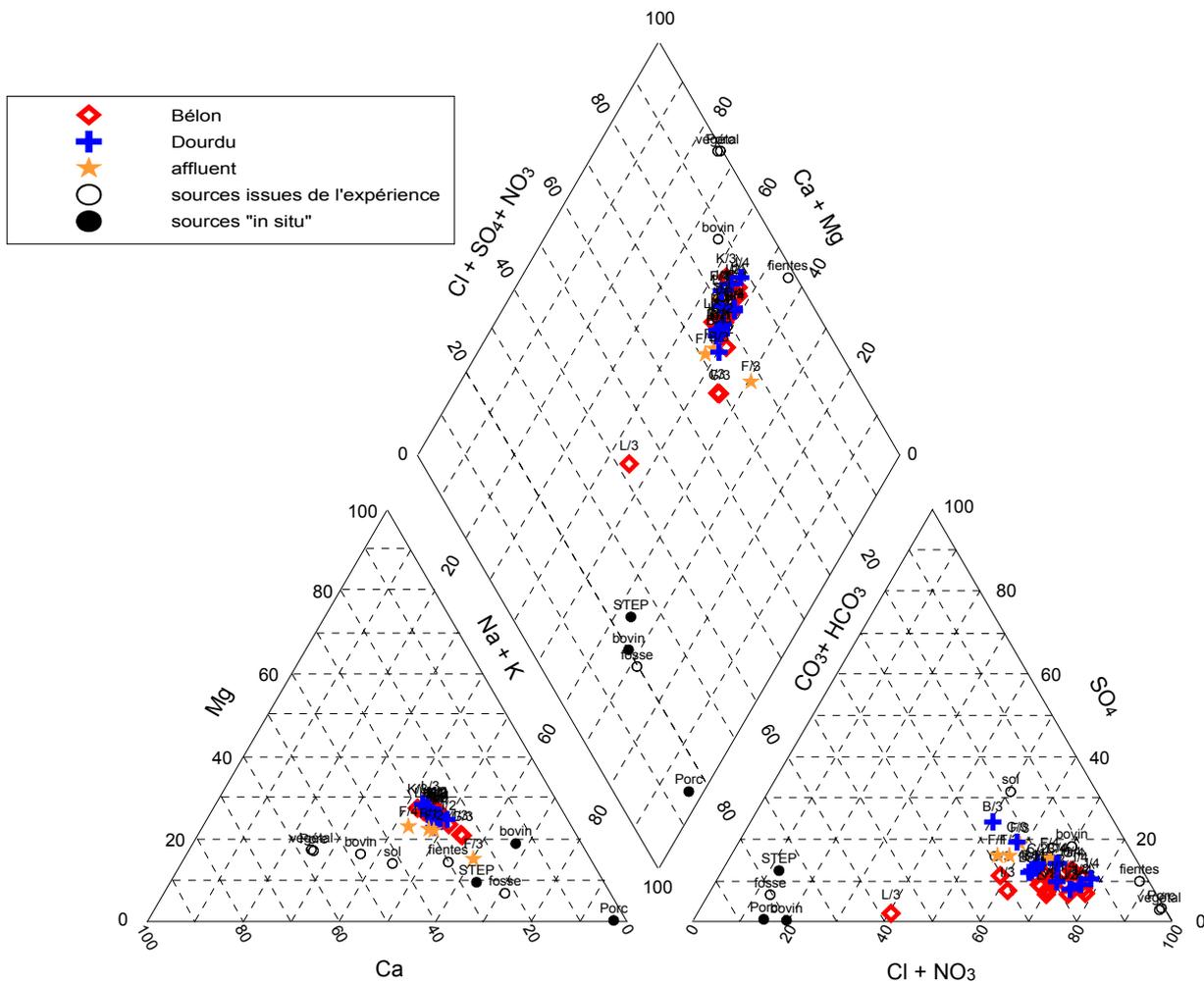


Figure 24 - Diagramme de Piper pour les eaux prélevées sur quatre campagnes et sources potentielles d'apport azoté

Sur le diagramme de Piper, les points représentant les sources potentielles de contamination des eaux, prélevées sur le bassin du Belon en août 2005 ont été rajoutés. Ces données concernent uniquement les eaux du lisier porcin, du fumier bovin, de sortie de STEP et de fosse septique. Les données concernant les matières solides (fientes de volailles et engrais) n'ont pas été reportées. Ont également été reportés les points correspondants aux eaux extraites des sols nus ou enrichis durant l'expérience menée avec la Chambre d'Agriculture. Excepté dans le cas des fosses septiques et STEP, les sources d'apport de nitrate au système ont une disparité chimique importante due principalement au fait que, pour les échantillons prélevés sur le terrain, l'azote ne se trouvait pas sous forme nitrate. On constate également que les échantillons issus de l'expérience ont le calcium comme cation dominant alors que les données « in situ » donnaient le potassium comme cation le plus important.

Avec des concentrations moyennes de chlorures dans les pluies de 10 à 16 mg.l⁻¹ (Chéry L. 2006) et des facteurs d'évapotranspiration sur la côte Bretonne pouvant être considérés à 50-60% (Météo France) des concentrations de chlorure comprises entre 20 et 40 mg.l⁻¹ pourraient être attendues. Ce sont les concentrations que l'on trouve sur tous les points excepté l'anse de Keristinec en basses eaux, influencé directement par l'eau de mer.

Une analyse ACP faite avec l'intégralité des points (quatre campagnes, majeurs et traces) et en ignorant tous les éléments détectés seulement une ou deux fois, montre que les nitrates réagissent de manière très différente des autres ions majeurs. Sur l'axe 1 de la figure 25, les variations de concentrations ne sont pas liées aux variations de débit des rivières, mais bien à l'influence anthropique représentée par les nitrates. Cet axe F1 représente 50% des variations chimiques spatiales et temporelles. Les éléments liés principalement au fond géochimique comme la silice, calcium, sodium et potassium s'opposent aux variations de nitrates. Sur l'autre axe (F2, 17.3% des variations) les éléments les mieux représentés sont le baryum, fer et manganèse qui s'opposent aux sulfates. Fe et Mn sont des éléments sensibles aux variations du potentiel redox (paramètre non mesuré). Fe et Mn sont des éléments souvent liés et leur mobilité varie selon les conditions Eh-pH. Cet axe F2 pourrait donc concerner les conditions d'oxydoréduction des eaux. En conditions réductrices le S se trouve sous forme de sulfure et non de sulfate et cet élément se trouve donc bien en opposition aux Fe et Mn. Les concentrations en baryum sont liées en grande partie à la dissolution de la baryte (BaSO₄) et son évolution est donc inverse à celle des sulfates.

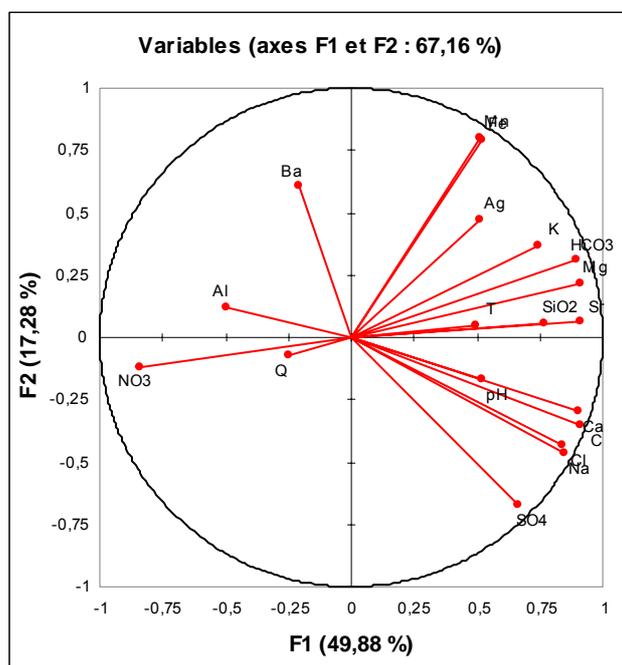


Figure 25 - Résultat de l'ACP effectuée avec les données des quatre campagnes

La table des corrélations (tableau 17) confirme la bonne relation entre le fer et le manganèse. Fe et Mn sont peu solubles dans les conditions oxydantes et les fortes valeurs rencontrées sur le point L laissent penser à un milieu plus réducteur (Eh plus bas) tout à fait en accord avec la présence de NH_4 .

Variables	T	C	pH	Q	Ca	Mg	Na	K	SiO2	HCO3	Cl	NO3	SO4	Ag	Al	Ba	Fe	Mn	Sr
T	1	0,347	0,452	-0,404	0,308	0,362	0,348	0,388	0,495	0,497	0,263	-0,387	0,196	0,226	-0,447	-0,055	0,222	0,140	0,321
C	0,347	1	0,454	-0,195	0,955	0,794	0,977	0,521	0,637	0,693	0,970	-0,661	0,841	0,262	-0,482	-0,296	0,205	0,201	0,842
pH	0,452	0,454	1	0,058	0,435	0,325	0,488	0,464	0,358	0,423	0,381	-0,359	0,370	0,183	-0,384	-0,101	0,031	0,068	0,487
Q	-0,404	-0,195	0,058	1	-0,211	-0,215	-0,163	-0,127	-0,057	-0,254	-0,153	0,200	-0,063	-0,154	0,331	0,001	-0,127	-0,136	-0,194
Ca	0,308	0,955	0,435	-0,211	1	0,810	0,898	0,542	0,671	0,691	0,924	-0,644	0,812	0,248	-0,443	-0,296	0,253	0,260	0,889
Mg	0,362	0,794	0,325	-0,215	0,810	1	0,669	0,833	0,655	0,820	0,705	-0,724	0,509	0,600	-0,441	0,027	0,630	0,636	0,848
Na	0,348	0,977	0,488	-0,163	0,898	0,669	1	0,390	0,622	0,632	0,973	-0,619	0,844	0,153	-0,415	-0,351	0,103	0,080	0,776
K	0,388	0,521	0,464	-0,127	0,542	0,833	0,390	1	0,412	0,706	0,360	-0,647	0,340	0,688	-0,474	0,064	0,559	0,618	0,610
SiO2	0,495	0,637	0,358	-0,057	0,671	0,655	0,622	0,412	1	0,725	0,648	-0,679	0,433	0,282	-0,073	-0,146	0,532	0,407	0,741
HCO3	0,497	0,693	0,423	-0,254	0,691	0,820	0,632	0,706	0,725	1	0,604	-0,845	0,338	0,508	-0,409	-0,105	0,768	0,757	0,828
Cl	0,263	0,970	0,381	-0,153	0,924	0,705	0,973	0,360	0,648	0,604	1	-0,615	0,839	0,137	-0,318	-0,334	0,149	0,120	0,789
NO3	-0,387	-0,661	-0,359	0,200	-0,644	-0,724	-0,619	-0,647	-0,679	-0,845	-0,615	1	-0,539	-0,657	0,312	0,390	-0,553	-0,540	-0,642
SO4	0,196	0,841	0,370	-0,063	0,812	0,509	0,844	0,340	0,433	0,338	0,839	-0,539	1	0,165	-0,367	-0,591	-0,217	-0,214	0,513
Ag	0,226	0,262	0,183	-0,154	0,248	0,600	0,153	0,688	0,282	0,508	0,137	-0,657	0,165	1	-0,311	0,087	0,497	0,530	0,351
Al	-0,447	-0,482	-0,384	0,331	-0,443	-0,441	-0,415	-0,474	-0,073	-0,409	-0,318	0,312	-0,367	-0,311	1	0,129	0,003	-0,117	-0,381
Ba	-0,055	-0,296	-0,101	0,001	-0,296	0,027	-0,351	0,064	-0,146	-0,105	-0,334	0,390	-0,591	0,087	0,129	1	0,303	0,297	0,010
Fe	0,222	0,205	0,031	-0,127	0,253	0,630	0,103	0,559	0,532	0,768	0,149	-0,553	-0,217	0,497	0,003	0,303	1	0,969	0,551
Mn	0,140	0,201	0,068	-0,136	0,260	0,636	0,080	0,618	0,407	0,757	0,120	-0,540	-0,214	0,530	-0,117	0,297	0,969	1	0,556
Sr	0,321	0,842	0,487	-0,194	0,889	0,848	0,776	0,610	0,741	0,828	0,789	-0,642	0,513	0,351	-0,381	0,010	0,551	0,556	1

Tableau 17 - Matrice des corrélations (quatre campagnes d'échantillonnages)

La figure des individus (figure 26) indique que les deux axes sont fortement influencés par les individus L/3 et F/3 qui sont Castel Coudiec et Anse de Keristinec en août 2005 (basses eaux). Comme démontré plus loin, ces échantillons sont très particuliers.

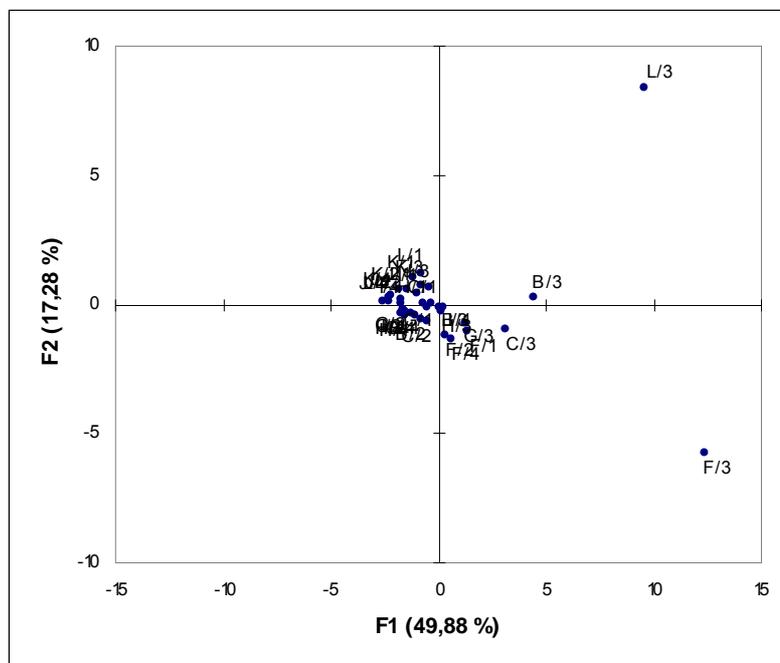


Figure 26 - Résultats de l'ACP, domaine des individus sur les axes F1 et F2

Le point de Castel Coudiec d'août 2005 (L/3) présente de fortes concentrations en divers éléments traces (Ag, As, Cr, Fe, Mn et Sr) et majeurs (K, HCO₃, silice) et un pH faible. Ce point est situé en amont du bassin. Ces fortes teneurs ne se retrouvent que durant les basses eaux lorsque la dénitrification est active. Ce point présente de faibles valeurs de sulfates et bore. Ces deux éléments sont des ions qui sont facilement dissous et proviennent de formations marines (eau de mer ou formations évaporitiques) en dehors des origines anthropiques classiques (borates des lessives, engrais chimiques).

Pour la dernière campagne (février 2006) d'échantillonnage où les valeurs d'Eh sont disponibles les variations de nitrates et oxydoréduction sont liées.

Sur le graphique Na vs. Cl (figure 27) on constate que les points se situent sous la droite de dilution de l'eau de mer (Berner-Kay and Berner 1987) avec un enrichissement systématique en Na. Cette enrichissement est attendu pour des aquifères de type granite et schistes et dépend du temps de résidence des eaux (importance de la relation eau-roche). Cet enrichissement est donc plus important en période de basses eaux (/3) du fait que les eaux de surface sont alimentées exclusivement par les aquifères. Le point F/3 montre toutefois un net enrichissement

en ces deux éléments. Ce point est également enrichi en sulfate, strontium et bore, ions d'origine marine probable. Il est donc possible que l'eau prélevée à l'anse de Keristinec en période de faibles débits soit influencée par l'eau de mer. Il y a toutefois un mélange avec une eau d'une autre origine, qui expliquerait que le point se situe au-dessous de la droite de mélange. Sur l'ensemble des campagnes de prélèvement, l'influence de l'eau de mer dans l'anse se fait surtout sentir durant le mois d'août 2005 (débit le plus bas). Au moment du prélèvement on était en période de basse mer et petit coefficient. L'arrivée d'eau de mer permettrait une diminution des teneurs en nitrates à cette période (7,7 mg.l⁻¹).

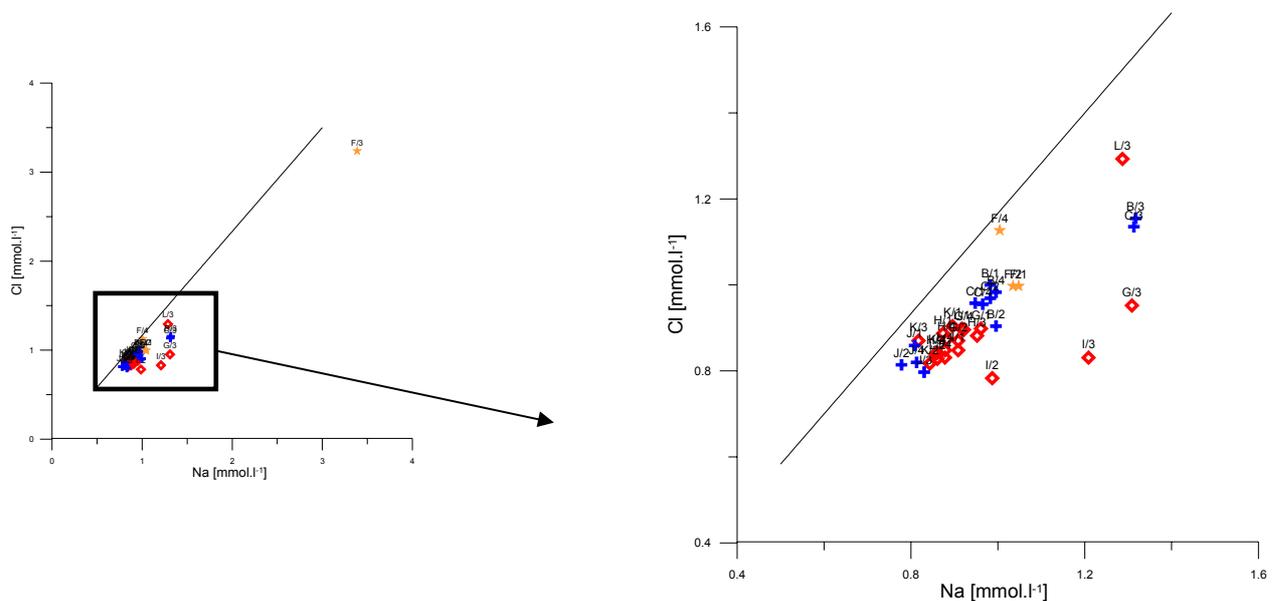


Figure 27 - Cl vs. Na pour les quatre campagnes d'échantillonnages avec et sans le point F/3

On constate que l'enrichissement en sodium des eaux de Castel Coudiec (L), Moulin Edouard (B) et Pont Bellec (C) durant la campagne d'août 2005 (/3) s'accompagne d'un enrichissement en potassium (figure 28) pour les points situés en aval du Doudu et le point amont du Belon (Castel Coudiec). Les lisiers, fientes et fumiers sont riches en potassium et chlorure.

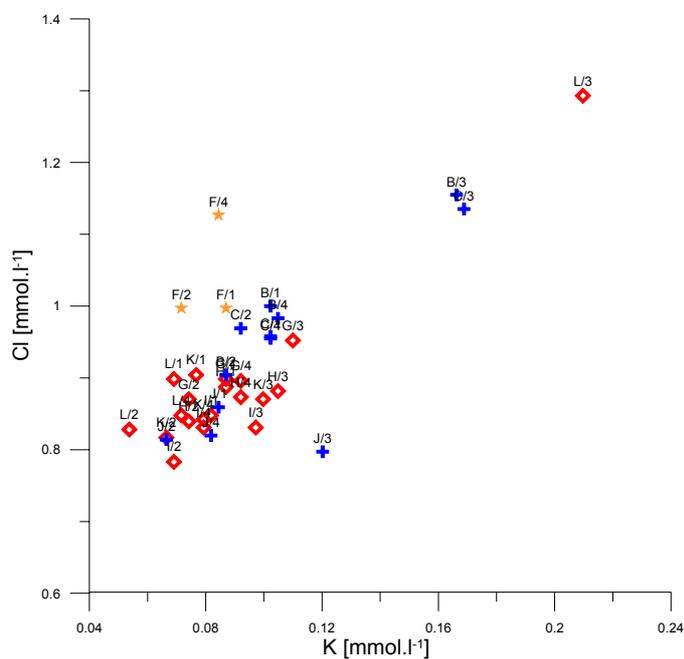


Figure 28 - Représentation Cl vs. Na et Cl vs. K pour les échantillons des quatre campagnes sauf point F/3

Si l'on regarde la relation Cl vs. SO_4 (figure 29), on constate que le comportement du point L ne suit pas celui des autres points du Dourdu et du Belon qui présentent une relation linéaire. Ce point présente de faibles concentrations en sulfates. Les concentrations en basses eaux sont beaucoup plus faibles qu'en moyenne et hautes eaux contrairement à ce qui pourraient être attendu. Les eaux de ce point situées juste en aval d'une zone marécageuse pourraient présenter, en basses eaux un caractère réducteur qui expliquerait les faibles teneurs en sulfates (réduction des sulfates). Les sulfures sont alors sous forme H_2S ou HS^- . Cet état réducteur semble être confirmé par l'augmentation des concentrations en fer et manganèse de l'eau à Castel Coudiec.

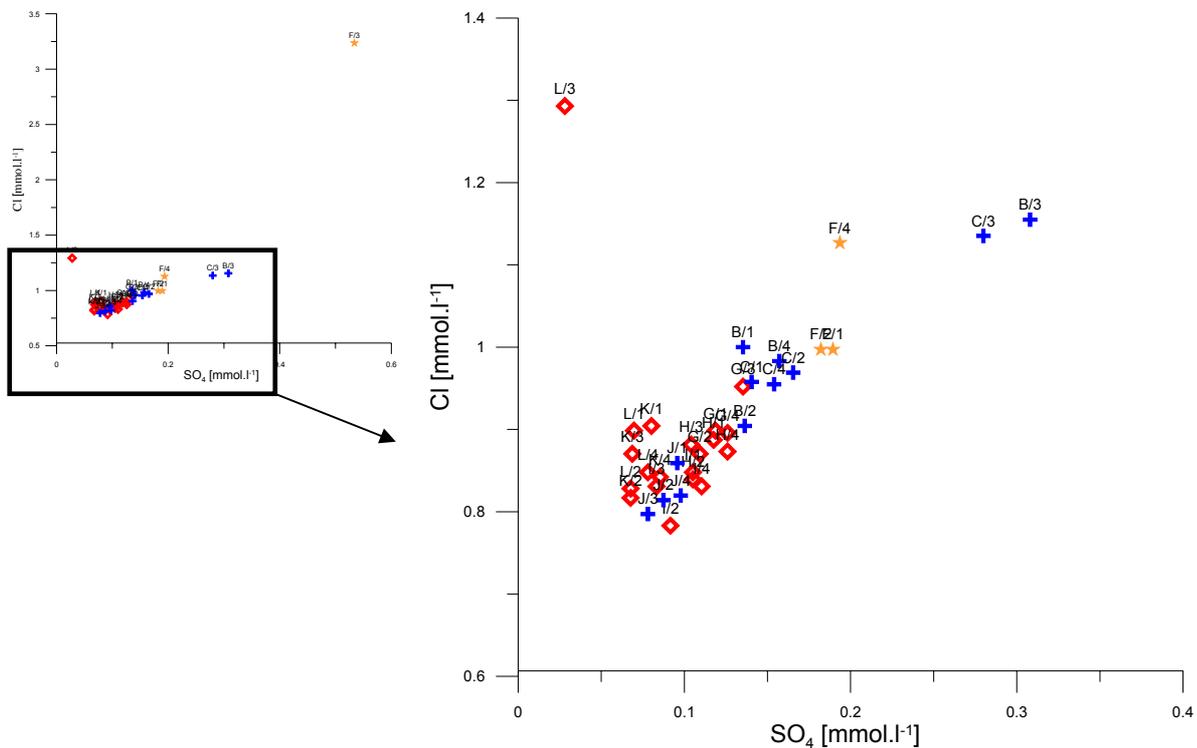


Figure 29 - Cl vs SO₄ pour les eaux des quatre campagnes d'échantillonnage (avec et sans F/3)

Si on se réfère à la composition chimique des sources possibles de contamination (tableau 15) échantillonnées en août 2005 (lisier de porcs, fumier de bovins, station d'épuration, fientes de volailles et engrais ammonitrates) on constate que le sulfate est présent dans les engrais ammonitrates alors que les fientes de volailles se caractérisent par de fortes teneurs en potassium et sodium et que les fumiers de porcs et bovins sont surtout riches en bicarbonates et carbonates, bore, aluminium et strontium.

Les bicarbonates dominaient pour le prélèvement lisier et fumier 2005 alors que pour l'expérience menée en 2006 ce sont les nitrates qui dominent la chimie des eaux de lessivage. Le potassium, important dans les fientes analysées en 2005 est en relativement plus faible concentration dans les eaux de lessivage des sols expérimentaux. Il est important de noter que l'analyse d'août 2005 concerne les matières solides alors que celle de 2006 concerne l'eau de lessivage. Les rejets de volaille et porc sont ceux qui, proportionnellement aux apports totaux, apportent le plus de nitrate. Les terrains sous végétation sont également très riches en nitrate. Les rejets de bovins apportent également beaucoup de sodium, bicarbonates, sulfates, chlorures. Dans les stations d'épuration l'azote est essentiellement sous forme d'ammonium. Ces eaux sont très enrichies en bicarbonates. Les sols nus apportent en proportion quasiment égal sodium, nitrates, calcium, bicarbonates, chlorures et sulfates.

Un prélèvement d'eau en sortie de fosse septique (appartenant à un particulier) a été effectué en avril 2006 afin de compléter les informations. Sur le bassin il existe beaucoup de systèmes individuels d'assainissement des eaux usées. D'autre part, selon l'IFREMER, il semble que certaines STEP du bassin versant sont sous-dimensionnées et certains déversements se font directement à la rivière (problème au niveau du trop-plein). La fosse est plus riche en Na, Cl, NO₃ et bicarbonates que la STEP analysée antérieurement.

L'ammonium est présent dans l'eau extraite des sols pour les types lisier, fumier et végétal présentant également les plus fortes concentrations en nitrates. Le potassium domine la chimie de l'eau extraite des sols enrichis en fientes. Seuls les sulfates montrent des concentrations proches de celle extraites des sols « naturels ». Le sol sur lequel a été placé du fumier de bovin est peu enrichi en éléments minéraux par rapport au sol naturel.

Les calculs de bilan d'azote dans les sols montrent que 70% de l'azote du lisier a été minéralisé sur la durée de l'essai (56j.), 3% pour le fumier de bovin et 39% pour les fientes. Ce sont les taux classiquement mesurés par la Chambre d'Agriculture. Pour le fumier le fait d'avoir apporté principalement de la matière solide explique cette faible minéralisation. Le sol avec plante (CIPAN) montre un pourcentage de minéralisation de 29%.

Une bonne relation entre les sulfates et les nitrates peut indiquer un processus autotrophique de dénitrification. Dans les roches cristallines, les sulfures (issus de la pyrite FeS₂) peuvent réagir avec les nitrates lors de processus d'oxydo-réduction lorsque les concentrations en oxygène deviennent faibles, souvent en présence d'une bactérie selon la réaction :



La figure 30 permet, montrant l'évolution des nitrates en fonction de sulfates d'étudier la présence d'une dénitrification autotrophe, commune en Bretagne.

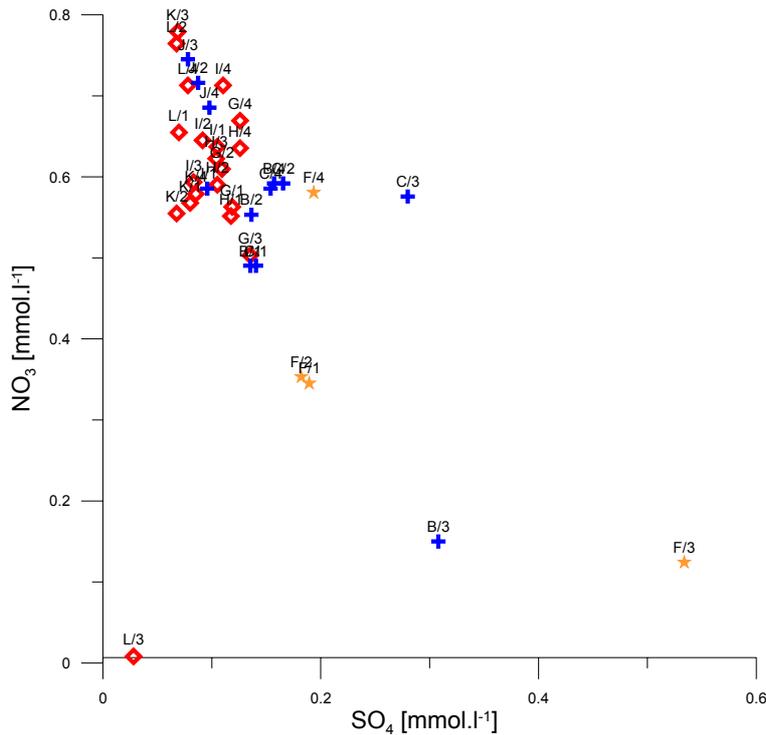


Figure 30 - SO₄ vs NO₃ pour toutes les eaux des quatre campagnes d'échantillonnage

Les faibles valeurs de nitrate du point F/3 sont attribuées à une dilution des eaux douces par l'eau de mer pauvre en nitrate. On peut penser que les points F/1 et F/2 sont également influencés par l'eau de mer, mais sans doute plus légèrement. Pour le point Castel Coudiec (L/3) on a vu précédemment que la dénitrification de type hétérotrophe a entraîné une forte diminution des concentrations en nitrates et qu'une réduction des sulfates a pu également avoir lieu. Les eaux de Moulin Edouard (B/3) sont appauvries en nitrate en comparaison aux autres eaux du Belon et du Dourdu et des eaux de Moulin Edouard durant les autres campagnes d'échantillonnage. Les mesures de la quatrième campagne ont permis de voir que l'azote peut être présent ici sous forme d'ammonium du fait de la proximité de ce point à une source de pollution. En basses eaux, l'oxydation de l'azote peut se faire plus lentement qu'en hautes eaux et donc ce point montre des concentrations en nitrate plus faibles du fait qu'une partie de l'azote est sous une autre forme chimique. En février 2006, le potentiel d'oxydoréduction à ce point est le plus bas mesuré sur le bassin. Aucune mesure n'est disponible pour les autres campagnes qui permettraient de confirmer l'hypothèse d'une oxydation incomplète de l'azote à ce point.

Pour les autres points du bassin, la relation entre sulfates et nitrates, confirmant souvent une origine anthropique des ions dissous, n'est pas très bonne. Les variations de teneurs en sulfates sont faibles par rapport aux variations de nitrates. Si l'on ne considère que les eaux du Dourdu et du Belon sans Moulin Edouard, Pont Bellec et Castel Coudiec en basses eaux montrant des anomalies, les concentrations en

sulfates sur l'ensemble des campagnes varient de 6,5 à 15,9 mg.l⁻¹. Les engrais ammonitrates étant composés principalement de NO₃ avec présence également de sulfates, l'impact des engrais aboutirait à une augmentation des concentrations de ces deux éléments. Les fumiers compostés peuvent également apporter une bonne portion de sulfate. Des réactions de dénitrification ou de non nitrification (comme probablement au point Moulin Edouard) ou une double origine des sulfates font que la relation sulfate / nitrate n'est pas bonne.

La mauvaise relation entre chlorures et nitrates (figure 31) confirme la diversité des sources de chlorures et nitrates. Pour les chlorures, une influence de l'eau de mer et embruns a été montrée. Pour les nitrates, il semble évident que des apports animaux, minéraux ou d'eaux usées influencent la chimie des eaux. Cinq points se détachent du groupe des eaux du bassin sur la figure 31 mettant en relation chlorures et nitrates. Le point L/3 est pauvre en nitrates du fait de la dénitrification. Pour le point B/3 il semble que la proximité de la source de contamination ne permette pas la transformation totale de l'azote en nitrate par oxydation. Le point F/3 est également pauvre en nitrates à la suite d'une dilution par les eaux de mer. Il est possible que les points F1 et F2 subissent également l'influence de l'eau de mer.

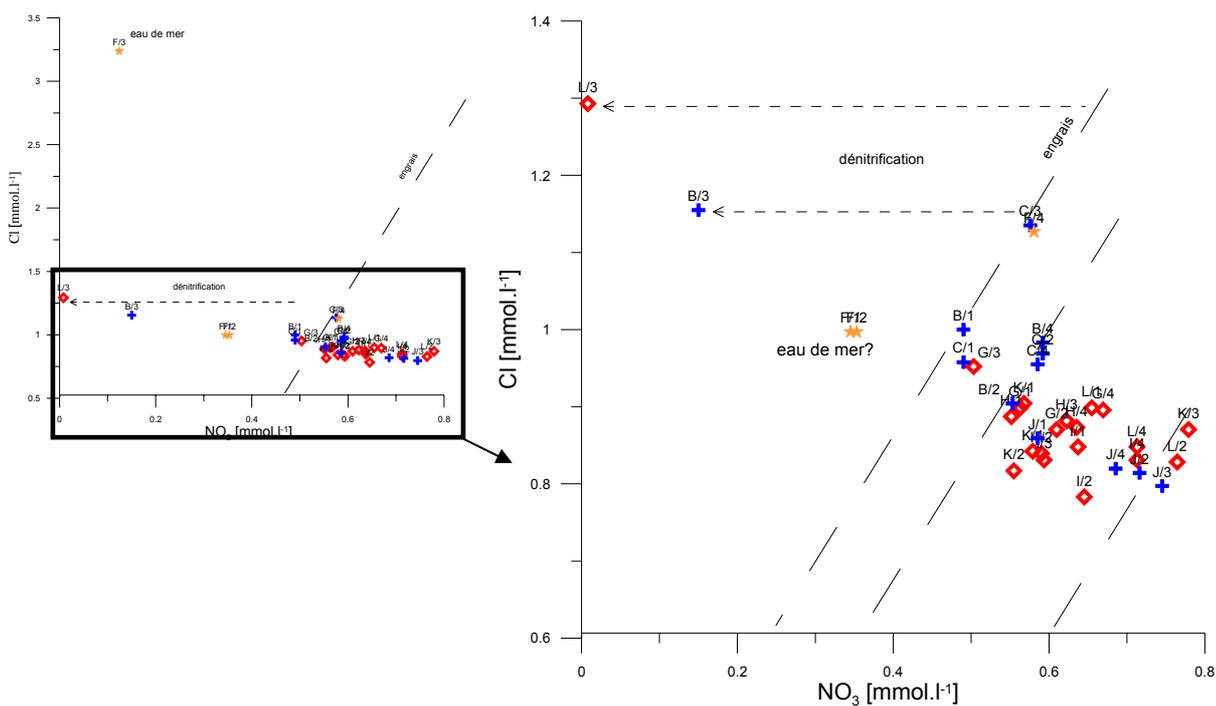


Figure 31 - Cl vs NO₃ pour les eaux des quatre campagnes d'échantillonnage (avec et sans F/3)

Pour les points restants, on pourrait supposer un enrichissement du nitrate en fonction du chlorure suivant différentes relations. Plusieurs droites peuvent être envisagées, alignement des points sur l'une ou l'autre de ces droites dépendant de l'origine des nitrates dans les eaux (engrais minéraux et/ou engrais organiques). On pourrait ainsi définir des eaux plus influencées par une contamination par engrais organiques (B, C) et des points plus impactés par les engrais minéraux (J, L). Ceci restant très théorique (et notamment la position des droites engrais minéraux et engrais organiques) vu le peu de variations observées pour ces deux éléments.

Pour le Dourdu et le bras principal du Belon on observe une diminution des concentrations relativement plus sensible de l'amont vers l'aval sur la première partie du bassin et ensuite une stabilité des concentrations (la distance entre les points du milieu du bassin et aval est également plus faible !). Cette diminution des concentrations est due à un apport d'eau moins chargée en nitrate tout au long des cours d'eau. Sur le bras secondaire du Belon, entre les points K et H l'évolution des concentrations n'est pas systématique.

Pour confirmer l'origine marine des chlorures au niveau de l'Anse de Keristinec, il faut regarder l'évolution des chlorures en fonction du bore. Le bore est un élément d'origine marine et un indicateur des relations eau-roche important. Mais le bore peut également se trouver présent dans les fertilisants boratés et eaux usées. On constate (figure 32) que le point F/3 se trouve exactement sur la droite de dilution de l'eau de mer. Ce point est donc influencé par l'eau de mer.

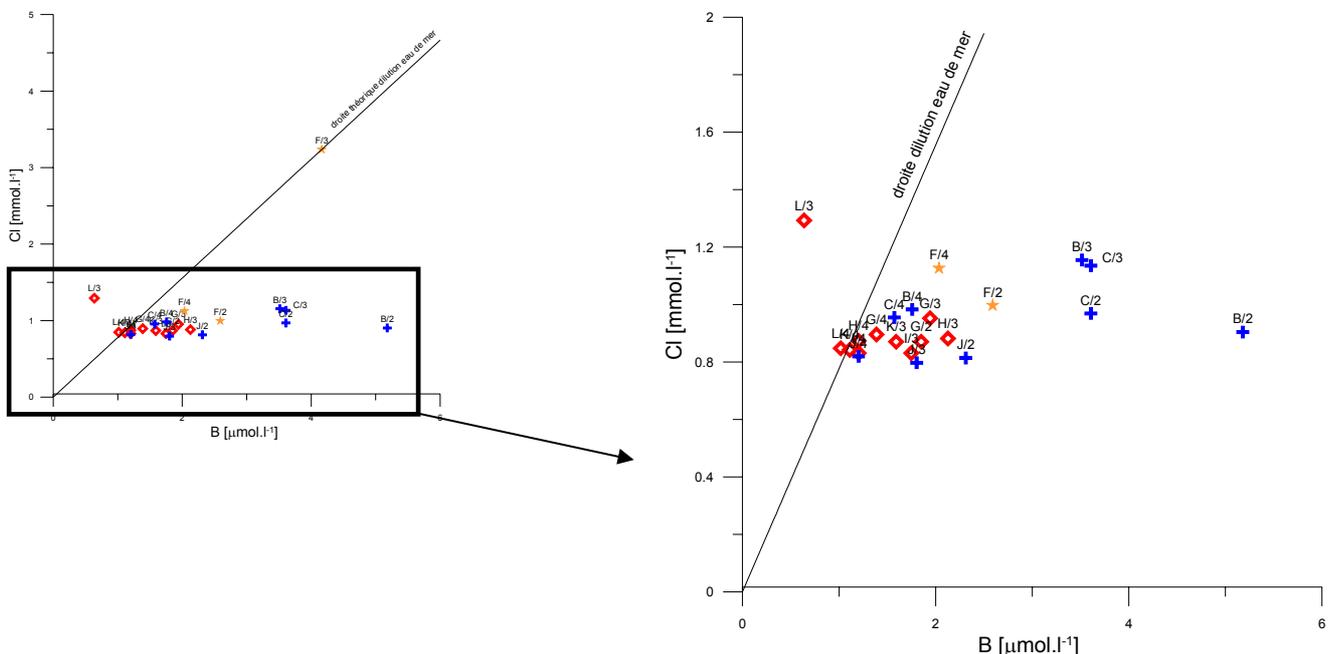


Figure 32 - Cl vs B pour les eaux des quatre campagnes d'échantillonnage (avec et sans F/3)

Pour les autres points, il existe une évolution des teneurs en bore sans fortes variations des chlorures (compte tenu des échelles différentes des axes). Les points B et C de basses (1/3) et moyennes (1/2) eaux ont les concentrations les plus élevées en bore. La présence systématique de bore dans les eaux de surface en basses et moyennes eaux pourrait indiquer un lessivage durant les périodes pluvieuses de lisier et fientes ou le mauvais fonctionnement de STEP/fosses septiques localisées dans le bassin. Cette influence pourrait être masquée durant les hautes eaux.

Si l'on se réfère aux flux (concentration x débits) on peut confirmer que sur le Dourdu la majeure partie des ions dissous provient de l'amont du bassin. Pour le Belon cette comparaison n'est pas possible puisque seuls deux points (amont et aval) de chaque bras sont échantillonnés. L'évolution des débits et concentrations sur les deux bras du Belon est plus ou moins similaire. En basses eaux (1/3) le total des matières transporté mesuré au point G (après la confluence des deux bras) correspond à la somme des transports de chaque bras (pas d'apports entre H-I et G). En moyenne eaux et basses eaux il y a des apports relativement importants sur cette partie aval qui couvre peu de kilomètres (influence de l'affluent situé entre H-I et G). La contamination des eaux se ferait donc principalement sur la partie amont du bassin, correspondant à une plus grande distance entre les points donc des surfaces mis en jeu plus importantes, sur le Dourdu et sur l'ensemble du bassin pour le Belon.

Interprétation des analyses isotopiques

$\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{11}\text{B}$ ont été analysés sur les échantillons d'eau superficielle de la campagne d'août 2005 et de février 2006.

Afin de compléter les informations sur les teneurs isotopiques des sources possibles en nitrate, le $\delta^{15}\text{N}$ a été déterminé sur des échantillons provenant des essais réalisés sur des sols préparés (voir explication détaillée ci-dessus).

Suite à cette expérience, les valeurs obtenues pour le $\delta^{15}\text{N}$ sont en général plus basses que celles relevées dans la littérature (cf. tableau 18). La valeur de $\delta^{15}\text{N}$ du sol utilisé dans tous les échantillons de l'expérience n'est pas celle des sols classiques (composition isotopique « classique » comprise entre 5 et 9 ‰, composition moyenne mondiale de la matière organique des sols). Par contre, la concentration en nitrates de ces eaux inférieure à 10 mg.l^{-1} , correspond bien aux valeurs de la littérature. Les teneurs en nitrates obtenues à l'issue de l'expérience montrent des résultats cohérents vis-à-vis des connaissances agronomiques de pourcentage de minéralisation des sols. Un enrichissement en maërl (algue calcaire) effectué pour l'expérience a sans doute entraîné une minéralisation de l'azote et donc une diminution importante des teneurs isotopiques des nitrates dissous.

Pour pouvoir relier la composition isotopique de l'eau de surface (ou souterraine) aux apports en azote de l'air, activités agricoles et eaux usées, il faut considérer les processus de nitrification, dénitrification ainsi que les mélanges de nitrates et

ammonium des sols et sources atmosphériques. Sur le tableau 18 sont données les valeurs attendues des $\delta^{15}\text{N}$ et les valeurs mesurées rencontrées dans la littérature.

Molécule	Origine	$\delta^{15}\text{N}$ attendu	$\delta^{15}\text{N}$ Mesuré
N_2	Air	0‰	0‰
	Dénitrification	-3 to +15‰	-5 to +2‰
	Emission de NO_x	-5 to +5‰	
N combiné	M.O. des sols		+4 to +9‰
	Particules des rivières		0 to +3‰
NO_3^-	Fertilisant de synthèse	0‰	-5 to +7‰
	nitrification	<-10 ‰	-30 to +10‰
	eau de pluie	+10‰	-12 to +2‰
	eau de surface	0‰	-4 to +15‰
	eau souterraine		+1 to +15‰
Fertilisants organiques et eaux usées		-4 to +5‰	
N_2O	dénitrification/nitrification	>0‰	
		>0‰	
NH_4	pluies		-15 to 0‰
	fertilisants		-4 to +5‰

Tableau 18 - Variations isotopiques d'éléments azotés selon leur origine

On constate donc une grande variabilité des teneurs isotopiques des nitrates dans les eaux. D'un point de vu chimique, on a vu (tableau 16) que les eaux récupérées lors de l'expérience étaient plus riches en calcium et plus pauvre en potassium que les sources d'apport azoté prélevées in-situ. Cette différence chimique s'accompagne sans doute également d'une différence isotopique (du $\delta^{15}\text{N}$).

Les résultats des $\delta^{15}\text{N}$ obtenus durant cette expérience pour les apports organiques sont en général assez bas comparativement aux valeurs de la littérature pour les eaux souterraines (les nitrates des eaux influencées par les fertilisants organiques peuvent avoir un $\delta^{15}\text{N}$ supérieur à 33‰). Le phénomène qui conduit à un fort enrichissement isotopique est la dénitrification. Mais les sols sont aussi le siège d'autres réactions très fractionnantes isotopiquement comme la nitrification et la fixation de l'azote (transformation du N_2 en N organique). Du fait de la variation chimique des eaux extraites des sols par rapport aux sources mesurées in-situ et des conditions non naturelles du déroulement de l'expérience (humidité, température, relief, échange dans les sols,...), nous avons préféré utiliser dans cette étude les valeurs moyennes de $\delta^{15}\text{N}$ relevées dans la littérature dans cette étude.

La seule valeur provenant directement de ce travail est celle de l'engrais-bille.

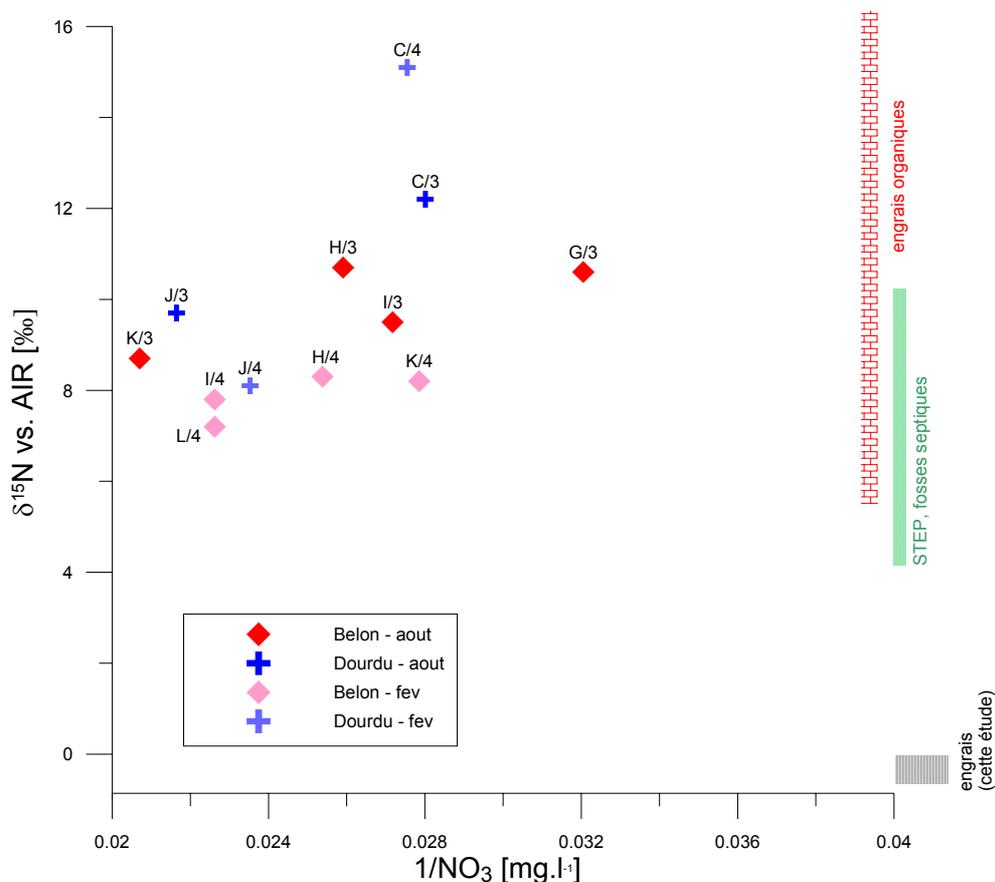


Figure 33 - Variations du $\delta^{15}\text{N}$ en fonction de $1/\text{NO}_3$ pour les eaux prélevées en août 2005 et février 2006 et valeurs de la littérature pour les $\delta^{15}\text{N}$ des nitrates d'origine organiques et STEP, fosses septiques

$\delta^{15}\text{N}$ varie relativement peu (8,7 à 12,2‰) sur les échantillons d'eau des deux rivières (figure 33) durant les basses eaux. A cette époque on peut considérer que les eaux échantillonnées sont essentiellement d'origine souterraine. Les $\delta^{15}\text{N}$ sont donc plus difficiles à interpréter du fait que les eaux proviennent d'un bassin versant où plusieurs sources d'azote se mêlent et que celles-ci peuvent provenir d'eaux infiltrées sur plusieurs années.

Seul le point C montre une variation importante de $\delta^{15}\text{N}$ par rapport aux autres points. Les $\delta^{15}\text{N}$ du Belon varient particulièrement peu (7,2 à 8,3‰) et restent dans le domaine d'apport organiques et/ou STEP (ou fosses septiques individuelles).

En hautes eaux les variations de $\delta^{15}\text{N}$ sont encore plus faibles. On ne constate pas une variation systématique des rapports isotopiques entre les eaux du Douurdu et celles du Belon sur l'ensemble des points. Les concentrations en nitrate sur ces points varient également peu (31,2 à 48,3 mg.l⁻¹).

Excepté au point C, les eaux de février (époque pluvieuse) présentent des $\delta^{15}\text{N}$ plus faibles (de env. 2‰) que durant la période sèche. Cette différence pourrait être due à l'apport des pluies, très important à cette époque de l'année. En effet, les nitrates des pluies se caractérisent généralement par des $\delta^{15}\text{N}$ bas. Un apport plus important d'eaux usées pourrait également expliquer des valeurs légèrement plus faibles des $\delta^{15}\text{N}$ en période de hautes eaux (débordement des STEP ou assainissement individuel mal conçu). En considérant que le point C est également dilué par les eaux de pluies, une augmentation des $\delta^{15}\text{N}$ s'expliquerait par un apport important de nitrates enrichis isotopiquement (engrais d'origine animal ou eaux usées).

Pour l'ensemble des points on note une légère diminution des $\delta^{15}\text{N}$ pour une augmentation des teneurs en nitrates. Ceci pourrait être dû à une dénitrification qui entraîne une diminution des concentrations et un enrichissement isotopique. Cette dénitrification pourrait être confirmée à l'aide de la relation $\delta^{15}\text{N}$ vs. $\ln\text{NO}_3^-$ (figure 34).

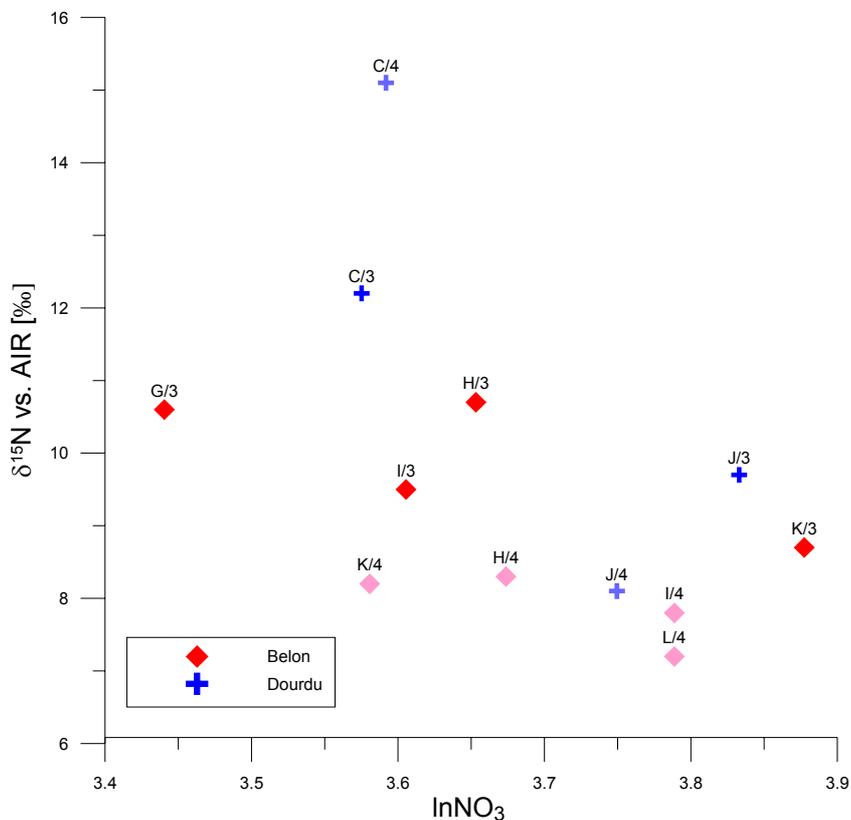


Figure 34 - $\delta^{15}\text{N}$ vs $\ln\text{NO}_3$ pour les points de campagne d'août 2005 et février 2006

La faible variation globale des teneurs en nitrates et des $\delta^{15}\text{N}$ ne permet pas de déterminer une évolution obéissant à une loi de distillation, de type loi de Rayleigh :

$$\delta - \delta_0 = \varepsilon \ln \frac{C}{C_0}$$

δ : composition isotopique de l'azote nitrique résiduel.

δ_0 : composition isotopique de l'azote nitrique initial (i.e. avant dénitrification).

C : concentration de l'azote nitrique mesuré.

C_0 : concentration initiale de l'azote nitrique.

ε : coefficient d'enrichissement isotopique.

D'autre part les concentrations restent fortes par rapport aux concentrations en nitrates des eaux ayant subi une dénitrification (généralement inf. à 2 mg.l^{-1}), ce qui laisse suggérer que les hautes teneurs en $\delta^{15}\text{N}$ sont dues à des apports organiques.

La gamme de variations du $\delta^{15}\text{N}$ observée permet, a priori, d'éliminer les engrais ammonitrates présentant des $\delta^{15}\text{N}$ très bas, voire négatifs. Cet apport n'est en tout cas pas prédominant, même si il est toujours possible en faible proportion.

Afin de confirmer l'origine des nitrates dans les eaux, des mesures de $\delta^{11}\text{B}$ ont été effectuées sur les mêmes eaux que celles prélevées pour le $\delta^{15}\text{N}$. Il est intéressant de noter que les concentrations les plus faibles en bore se retrouvent durant les hautes eaux (figure 32). Le bore est un bon indicateur des intrusions marines. Dans notre cas, l'influence marine se fait plus sentir en hautes eaux (/4), excepté pour le point de Castel Coudiec.

Les données du $\delta^{11}\text{B}$ montrent des variations importantes sur l'ensemble du bassin (figure 35). Les sources potentielles de contamination échantillonnées dans le bassin du Belon ont pu être analysées et sont reportées sur l'illustration. Les sources fumiers de bovins et STEP-fosses se dissocient assez bien tandis que les autres sources (lisier de volaille et porc et engrais chimiques) ont des valeurs en $\delta^{11}\text{B}$ relativement proches.

Il existe, pour les deux rivières, une augmentation des concentrations en bore et une diminution du $\delta^{11}\text{B}$ de l'amont vers l'aval. Les points B et C se détachent des autres points. Ils sont « tirés » vers des valeurs en $\delta^{11}\text{B}$ basses comme celles des eaux usées. Les eaux du Dourdu seraient donc peu influencées par des engrais organiques de type bovin.

On constate que le point F/3 possède un $\delta^{11}\text{B}$ très inférieur à celui de l'eau de mer malgré une influence confirmée par la chimie de l'eau de mer sur ces eaux de surface. Ceci est dû aux apports anthropiques (à teneurs isotopiques faibles comme les lisiers de porcs, fientes de volailles, eaux usées) difficilement observables sur la chimie des

eaux du fait de la dominance des ions sodium et chlore mais observable sur les rapports isotopiques.

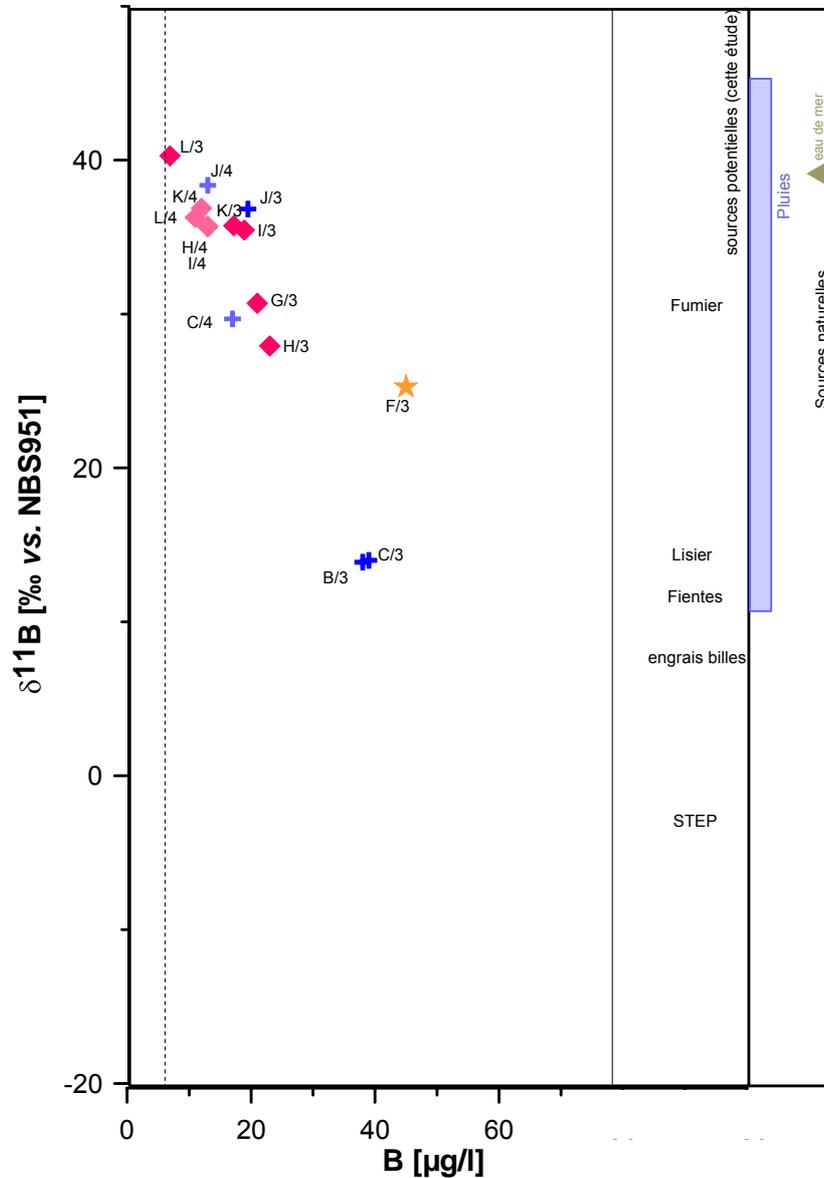


Figure 35 - $\delta^{11}\text{B}$ vs B pour les eaux prélevées en août 2005 et février 2006

Les autres points partent du pôle eau de pluie (proche de la composition eau de mer, point L) vers des valeurs plus faibles de $\delta^{11}\text{B}$. On note encore une faible variation des rapports isotopiques et teneurs en bore sur la partie aval du bassin (C→B et G→H et I). Sur la partie amont du bassin (L vers I pour le Belon, K vers H pour le bras du Belon et J vers C pour le Dourdu) il y a une diminution des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ indiquant un

apport important de bore par des sources de type eaux usées, engrais-billes, fientes de volaille, lisiers de porc.

Durant les hautes eaux, les variations de $\delta^{11}\text{B}$ et les concentrations en bore sont faibles. Seul le point C/4 se détache significativement des autres. Ceci confirmerait l'influence d'une source de bore (et sans doute nitrate associé) proche du point de prélèvement.

Comme le bore, les teneurs en chlorures pourraient informer d'une possible influence marine sur la qualité des eaux de surface du bassin du Belon. La figure 36 montre l'évolution de $\delta^{11}\text{B}$ vs. Cl.

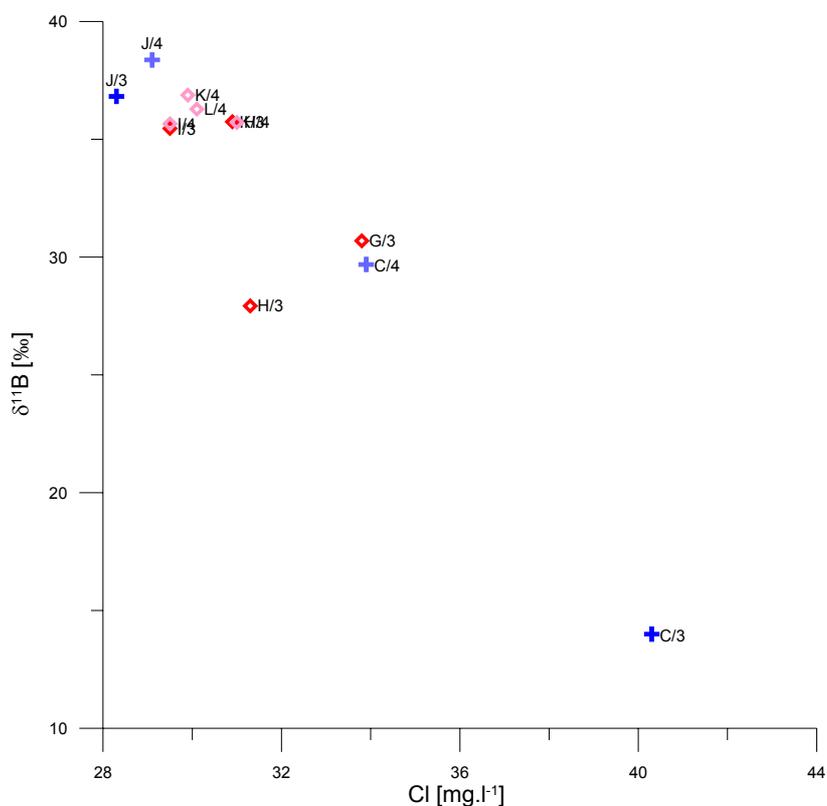


Figure 36 - $\delta^{11}\text{B}$ vs Cl pour les eaux prélevées en août 2005 et février 2006

Les points qui ont les teneurs les plus élevées en chlorures ont les $\delta^{11}\text{B}$ les plus faibles. La localisation géographique ainsi que les données chimiques ont permis de démontrer la faible (sans doute par les pluies) influence marine au point C. De plus les teneurs de $\delta^{11}\text{B}$ de l'eau de mer sont proches de 39 ‰, donc très positives. Le point C est donc très fortement influencé par un élément anthropique à $\delta^{11}\text{B}$ très bas, STEP, engrais minéraux, lisier de porc ou fientes de volaille par exemple.

Sur un graphique $\delta^{11}\text{B}$ vs $1/\text{B}$ (figure 37) on peut tracer, pour chacun des groupes de points, une droite passant par ce groupe et le pôle non pollué. Aucun des points prélevés ne peut être considéré comme le pôle non pollué et ce sont donc les pluies théoriques de région côtière qui ont été choisis comme point de départ des droites théoriques de mélange. Ce point aurait une concentration en bore de $12 \mu\text{g.l}^{-1}$ et un $\delta^{11}\text{B}$ de $39,5 \text{‰}$ (Widory et al., 2001). Les droites de mélange recoupent les groupes de points J/3-K/3-I/3, G/3-C/4-H/3 et C/3-B/3. Le point F/3 offre deux origines différentes du bore (mer et apport azoté anthropique), par conséquent une droite de mélange simple ne présente donc pas la réalité. Les autres points se situent trop près du pôle non pollué.

A partir de ces droites il est possible de donner une gamme de compositions isotopiques en bore pour les sources d'apport azoté. La première limite est donnée par la valeur de l'échantillon lui-même (la plus élevée du groupe). La deuxième limite correspond à une concentration en bore maximale ($1/\text{B}=0$).

Le premier groupe se trouve donc dans une gamme de valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ de $29\text{-}36,8\text{‰}$ (bovins), le deuxième aurait une gamme de $\delta^{11}\text{B}$ de $10\text{-}30,7\text{‰}$ (lisier) et le troisième groupe comprenant les eaux du Dourdu couvre une gamme de $2\text{-}14\text{‰}$ correspondant à des eaux usées/STEP, engrais, volaille. Ces gammes sont des hypothèses de travail car nous ne disposons pas du point d'origine et il est possible que le bore ne provienne pas d'une source unique (cas de F/3 par exemple).

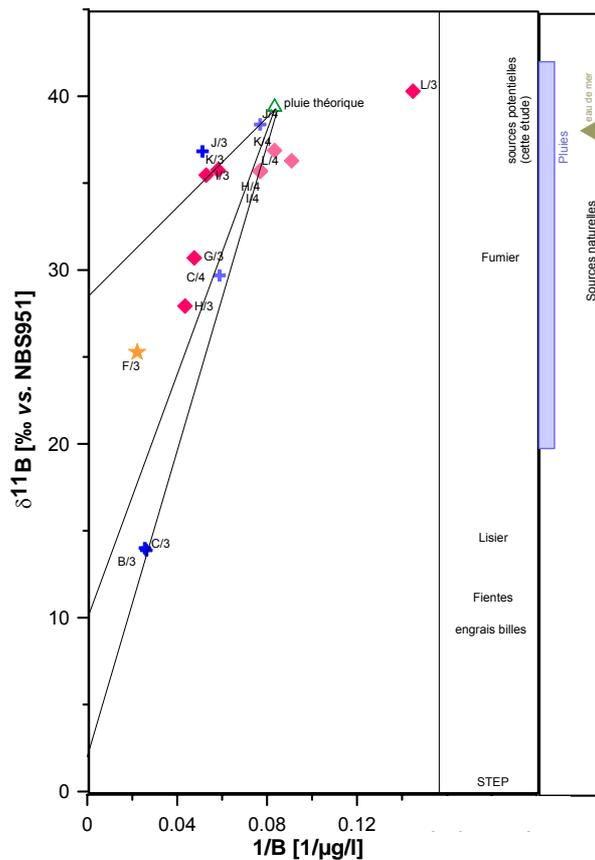


Figure 37 - $\delta^{11}\text{B}$ vs $1/\text{B}$ pour les eaux prélevées en août 2005 et février 2006 et droites théoriques de mélange

Le croisement de l'étude des isotopes du nitrate et du bore permet de mieux définir l'origine des nitrates dans les eaux superficielles.

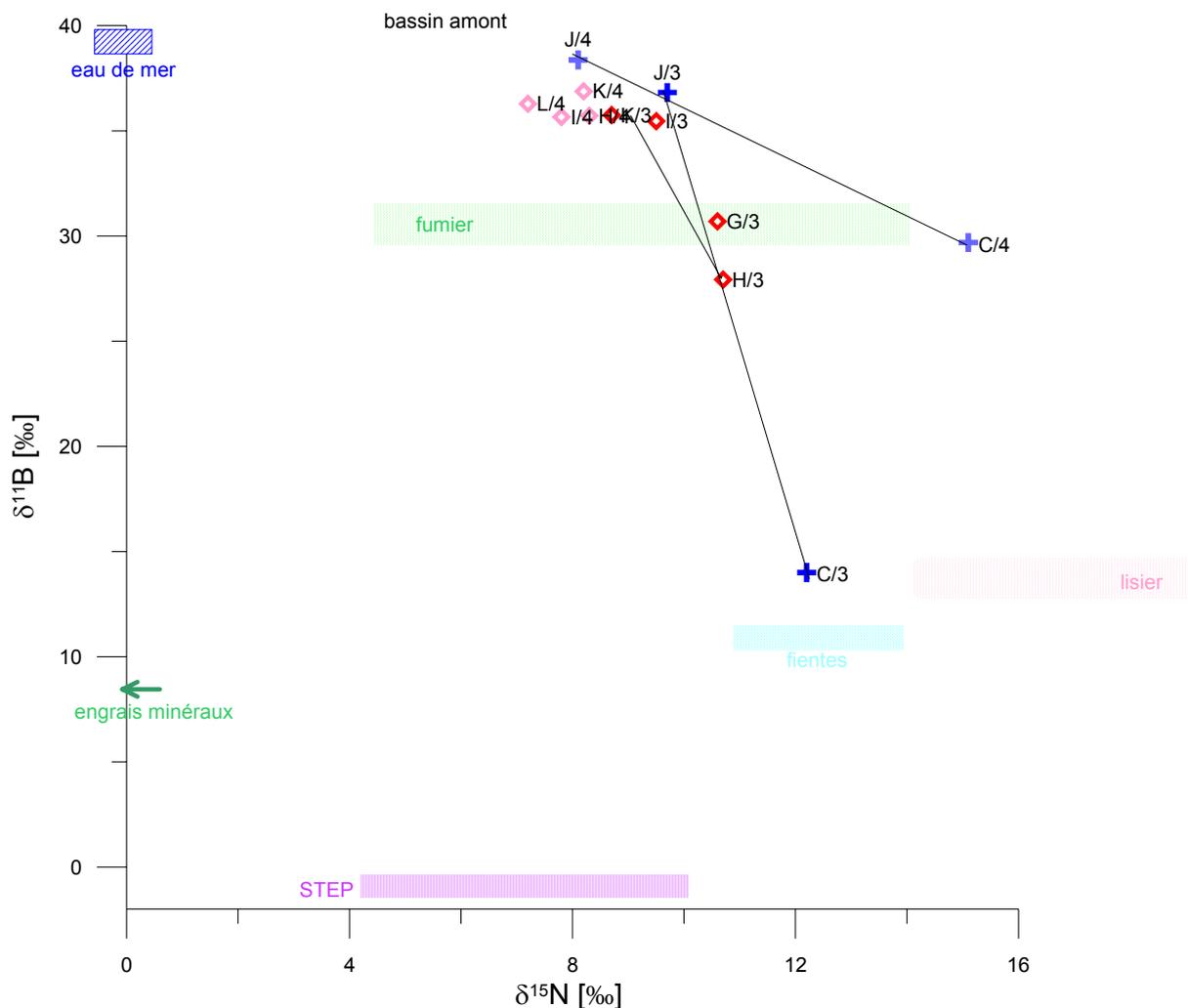


Figure 38 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ vs $\delta^{11}\text{B}$ pour les eaux prélevées en août 2005 et février 2006

La figure 38 permet de nuancer les premières conclusions obtenues. Sur cette illustration, nous avons reporté les valeurs de la littérature pour les sources potentielles d'azote et les valeurs en $\delta^{11}\text{B}$ correspondantes aux mesures faites sur le bassin du Belon.

Pour ce qui concerne les isotopes, les eaux du Doudu évoluent de manière notable entre l'amont et l'aval. En effet, en hautes eaux et basses eaux, on observe une

augmentation des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ indiquant une origine animale (lisier de porcs ou fientes de volailles) ou eaux usées (STEP, fosses septiques etc.). Les teneurs en isotope du Bore, $\delta^{11}\text{B}$, diminuent très nettement en période de basses eaux et moins fortement en période de hautes eaux. L'enrichissement en $\delta^{11}\text{B}$ durant les périodes de hautes eaux pourrait être dû à un effet de dilution par les eaux de pluies qui, étant donné la proximité à la mer devrait avoir une composition isotopique proche de 39,5‰.

Il est possible de déduire que l'apport en nitrates dans les eaux provient de fientes de volaille et lisiers sur le bassin du Dourdu, mais il n'est pas complètement exclu également que les nitrates proviennent d'un apport d'eaux usées (STEP ou fosses septiques) notamment durant les hautes eaux.

La différence entre les points I et H localisés géographiquement très proches l'un de l'autre et représentant deux bras du Belon pourrait indiquer une origine et/ou une évolution différentes de l'azote sur ces deux cours d'eau. Malheureusement la valeur de $\delta^{15}\text{N}$ du point amont de l'un de ces affluents (L) n'est pas disponible du fait de la très faible teneur en nitrates. Cette teneur plus faible que les valeurs naturelles indique un processus de dénitrification important pour cette eau.

Conclusions synthétiques

De manière générale, il est difficile de distinguer une source unique d'apport azoté sur les eaux du bassin versant du Belon. En effet, des mélanges ont été couramment observés sur le cours d'eau principal.

Les eaux du Dourdu seraient peu influencées par des engrais organiques de type bovin, mais plutôt par des apports azotés en provenance des lisiers de porc et fientes de volaille.

Certains apports organiques sont peu différenciables (lisier de porcs et fientes de volailles). On remarque sur les cours d'eau une influence non négligeable des eaux usées (STEP et fosses septiques), notamment en période de hautes eaux.

Les engrais minéraux ne semblent pas jouer un rôle important dans la minéralisation en nitrates des eaux du bassin.

Perspectives

Suite à la présentation de cette méthode, il semble important de préciser ses limites : densité de points d'échantillonnage dans les cours d'eau, seulement deux campagnes de mesure, manque un point de référence sans contamination, absence de caractérisation de la composition isotopique des eaux souterraines et des eaux de pluie.

Des efforts sont à poursuivre pour mener des investigations plus fouillées dans le cas de pollutions diffuses.

Enfin, il semble envisageable à terme, d'étendre cette application dans le cadre de l'estimation de la vulnérabilité des points d'eau destinés à la consommation humaine, et d'aider par suite à la mise en place de périmètres de protection, en mettant en évidence l'importance relative des sources potentielles de pollutions ponctuelles existant sur un bassin versant.

3. Caractérisation du bassin versant du Payré (Vendée, Pays de la Loire)

3.1. GEOMORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU PAYRE

Situé en Vendée à l'extrémité sud du Massif armoricain, le Payré est un petit cours d'eau encadré par les villes des Sables d'Olonne au Nord et de La Tranche sur Mer au Sud. Il s'écoule sur une distance d'environ vingt kilomètres selon une direction NE-SO et se jette dans l'océan Atlantique à proximité de la ville de Talmont Saint Hilaire.

Son cours peut être décomposé en trois affluents principaux alimentés par quelques ruisseaux. Le chenal du Payré est le plus important et coule depuis le massif granitique d'Avrillé situé au Nord-Ouest et jusqu'à Talmont. Sur l'un de ses affluents (le Châtenay), se situe le barrage de Finfarine. Cette retenue d'eau est utilisée pour l'alimentation en eau potable. Le second affluent, plus petit, appelé « le petit chenal des hautes mers », se situe à l'ouest du précédent. Le dernier bras, au sud, est le ruisseau de l'île Bernard. Ces trois affluents se rejoignent dans les marais en zone topographiquement basse, puis se jettent dans l'océan au niveau d'un havre.

La délimitation cartographique du bassin versant du Payré (figure 39) a été effectuée à partir du MNT de l'IGN -pas de 50 m- et validée à partir des cartes topographiques au 1/25 000 de l'IGN. Sa superficie est de 154,1 km².

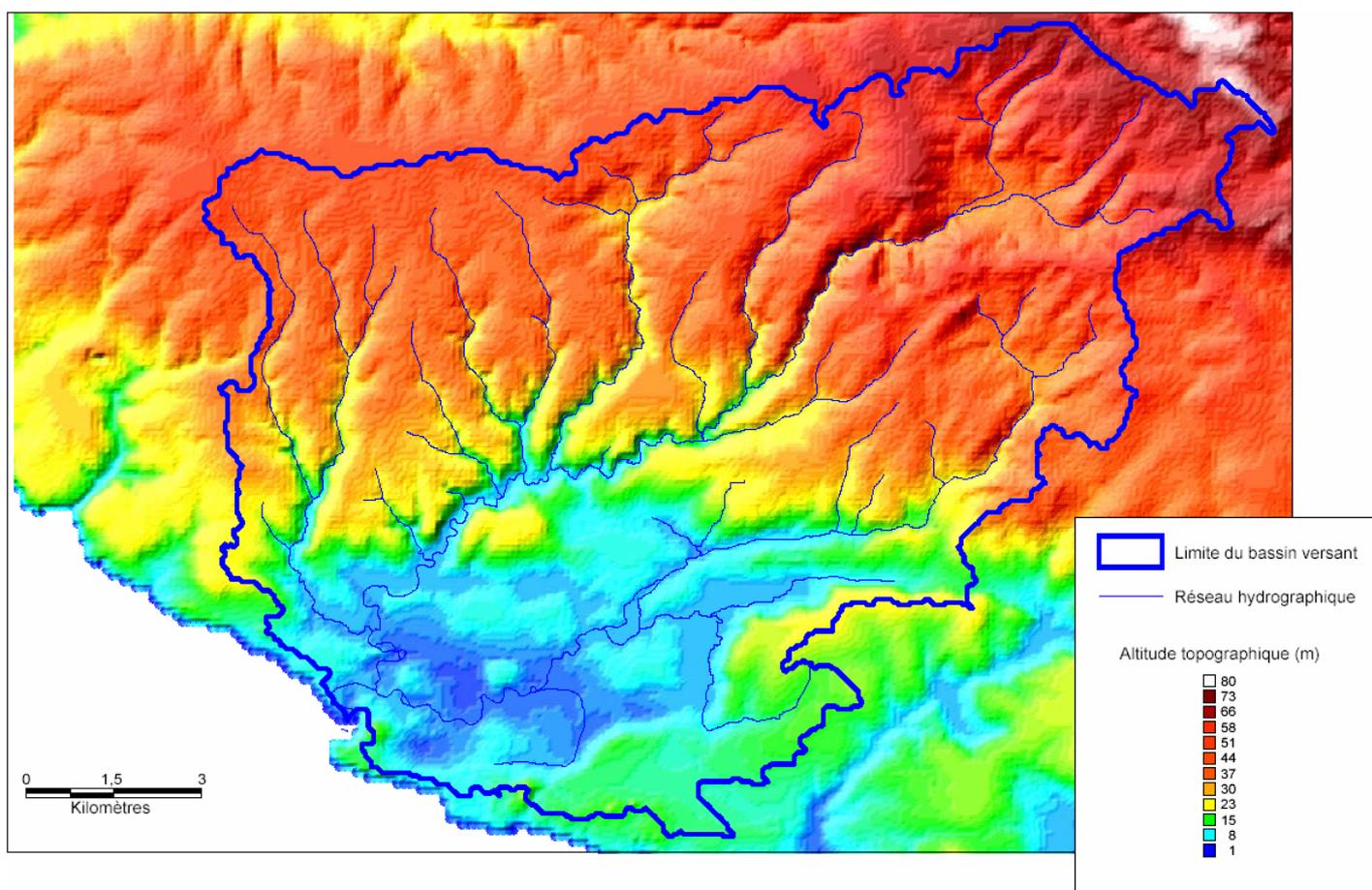


Figure 39 - Délimitation du bassin versant du Payré à partir du MNT au pas de 50 m (source IGN, 2000)

3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

Le bassin versant du Payré se situe à cheval sur deux ensembles géologiques : des terrains de socle d'origine plutonique et métamorphique majoritaires sur la partie Nord du bassin versant (correspondant à l'extrémité Sud du Massif Armoricain), et des terrains d'origine sédimentaire sur la partie Sud (correspondant à la bordure septentrionale du bassin d'Aquitaine).

Les terrains de socle correspondent aux zones topographiquement hautes, tandis que les terrains sédimentaires sont situés dans les zones topographiquement plus basses. Ceci est lié à l'histoire géologique du Talmondaï, qui s'inscrit dans le contexte plus vaste de celle du Massif armoricain et plus précisément de celle de son segment vendéen. Elles sont scindées en plusieurs étapes centrées sur l'orogénèse Varisque dont les effets sont prépondérants dans cette région :

Sédimentation et magmatisme pré-varisque cambro-dévonien

En dépit des « effets » de l'orogénèse Varisque (raccourcissements, déplacements transcurrents, métamorphisme) il est possible de caractériser plusieurs épisodes de sédimentation détritique (grès, grauwackes, argilites, ampélites, siltites) prévarisques ; actuellement exposés dans différentes unités tectoniques dont il n'est guère possible de définir les interrelations paléogéographiques originelles, ces sédiments plus ou moins métamorphisés (au cours de l'orogénèse Varisque) sont localement biostratigraphiquement datés (dans les faciès peu métamorphisés) du Cambrien, de l'Ordovicien, du Silurien et du Dévonien.

De plus, une importante phase magmatique est mise en évidence à l'Ordovicien inférieur (datations géochronologiques) qui se traduit principalement soit par du volcanisme acide (méta-rhyolites = Porphyroïdes de Vendée) en contexte géodynamique de marge active soit par des granitoïdes (orthogneiss) en contexte de marge continentale.

L'orogénèse Varisque

Elle se développe à la fin du Dévonien et au Carbonifère et se caractérise essentiellement par une collision continentale suivie d'une extension crustale. Cette collision continentale, stade ultime d'un processus de raccourcissement à l'échelle globale, est à l'origine des différents épisodes de métamorphisme régional ; celui-ci modifie la texture (apparition de schistosité et/ou foliation) et la nature minéralogique (néogénèse minérale) d'une part des sédiments détritiques antérieurs (en fonction de son intensité ils se transforment en schistes, micaschistes, quartzites, etc.) et d'autre part des roches magmatiques (méta-rhyolites, leptynite, orthogneiss, amphibolites, etc.). De plus, lorsque son intensité est suffisamment forte, apparaît localement un début d'anatexis des roches antérieures alors qu'à la base de la croûte continentale épaissie se développent les magmas granitiques. Cette collision se traduit aussi par des déplacements, empilements tectoniques des différentes unités paléogéographiques originelles, grands cisaillements transcurrents qui se poursuivent

durant le Carbonifère supérieur et auxquels sont aussi associées des systèmes de failles décrochantes NO-SE souvent associées à des failles conjuguées de moindre importance.

L'extension crustale qui succède, résulte d'un processus de réajustement gravitaire suite à l'épaississement et au blocage du processus de raccourcissement ; elle permet notamment la montée de magmas granitiques qui, tel celui d'Avrillé, entraînent alors localement des métamorphismes de contact.

L'évolution Varisque se termine au Carbonifère supérieur avec le dépôt des premiers sédiments discordants témoins du début du processus d'érosion de la chaîne.

La transgression Jurassique

Dès le Jurassique débute le processus d'ouverture du Golfe de Gascogne et de l'individualisation du bassin d'Aquitaine dont les marges sont situées dans le Talmondais. De ce fait s'observent dans cette région, d'une part des rejeux normaux d'anciennes failles NO-SE et d'autre part le dépôt, en discordance sur les séries paléozoïques, de séries liasiques carbonatées témoins d'une transgression marine sur les marges de la chaîne Varisque en voie de pénéplanation.

Histoire récente

Le Massif armoricain et son segment vendéen demeurent à l'écart des zones actives (pyrénéennes, alpines) au cours du Secondaire et du Tertiaire. Ainsi, bien que des incursions marines modérées se développent localement au Crétacé et au Tertiaire, la sédimentation associée reste peu importante et consignée dans de petits bassins tectoniques associés à d'anciennes failles qui rejouent, plus ou moins fortement, notamment à l'Eocène.

Enfin, l'histoire géologique récente est caractérisée par l'alternance des cycles périglaciaires. Une transgression a eu lieu au cours du Pliocène et a mis en place diverses séries sédimentaires (sables rouges et cailloutis : P). Les alternances climatiques suivantes ont permis, lors des bas niveaux marins, une incision dans le lit du fleuve comblée aujourd'hui par des sables, et lors des hauts niveaux marins, de mettre en place les limons éoliens dans les zones hautes (Würm). La dernière transgression flandrienne a donné le trait de côte actuel avec la mise en place des colluvions sableuses Holocènes, des cordons dunaires D et des marécages Mz. Les séries Quaternaires (limons éoliens du Würm, LP et colluvions sableux Holocènes, Cs) témoignent également de cette alternance.

La carte géologique au 1/50 000^{ème} des Sables-d'Olonne-Longeville montre, au niveau de la zone d'étude (cf. Figure 40) des terrains très variés témoignant de cette histoire géologique complexe :

- Au nord et à l'est de Talmont, affleurent principalement des terrains de socle, schistes et micaschistes orientés N130, recoupés par le granite d'Avrillé ;
- Au sud de Talmont, affleurent des terrains sédimentaires principalement d'âge Jurassique discordants sur les terrains de socle précédents ;
- Enfin, de nombreuses séries d'âge Quaternaire recouvrent les vallées du bassin versant d'une mince pellicule.

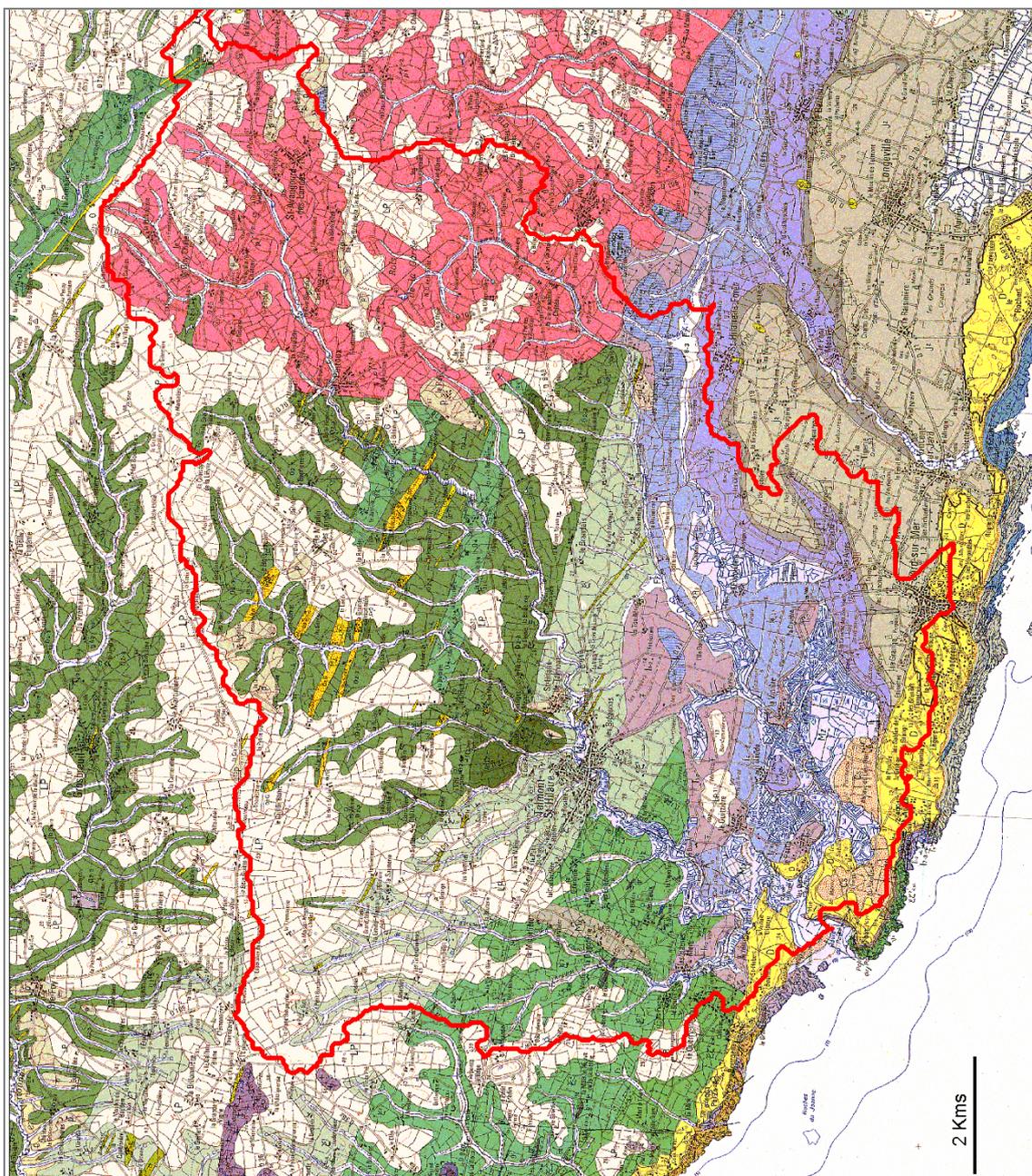
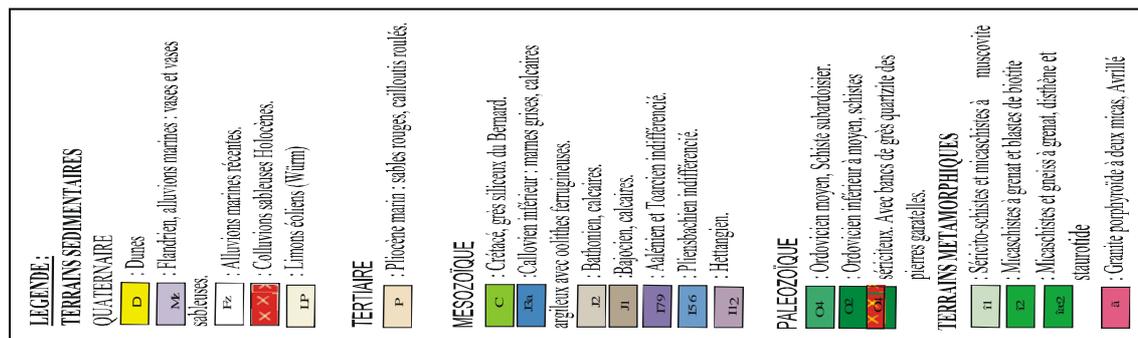


Figure 40 - Carte géologique de la région de Talmont Saint Hilaire, Extrait de la carte au 1/50000^{ème} des Sables d'Olonne-Longeville

3.3. OCCUPATION DES SOLS

L'occupation des sols est marquée par de nombreuses activités anthropiques, dont les intérêts peuvent être divergents en matière de gestion de l'eau. L'agriculture (terres cultivées, prairies, vignes...) et la conchyliculture sont ainsi prépondérantes (Figure 41). Le bassin présente en outre des activités industrielles et de services et des activités touristiques. L'urbanisation est, comme dans la plupart des zones côtières, en développement.

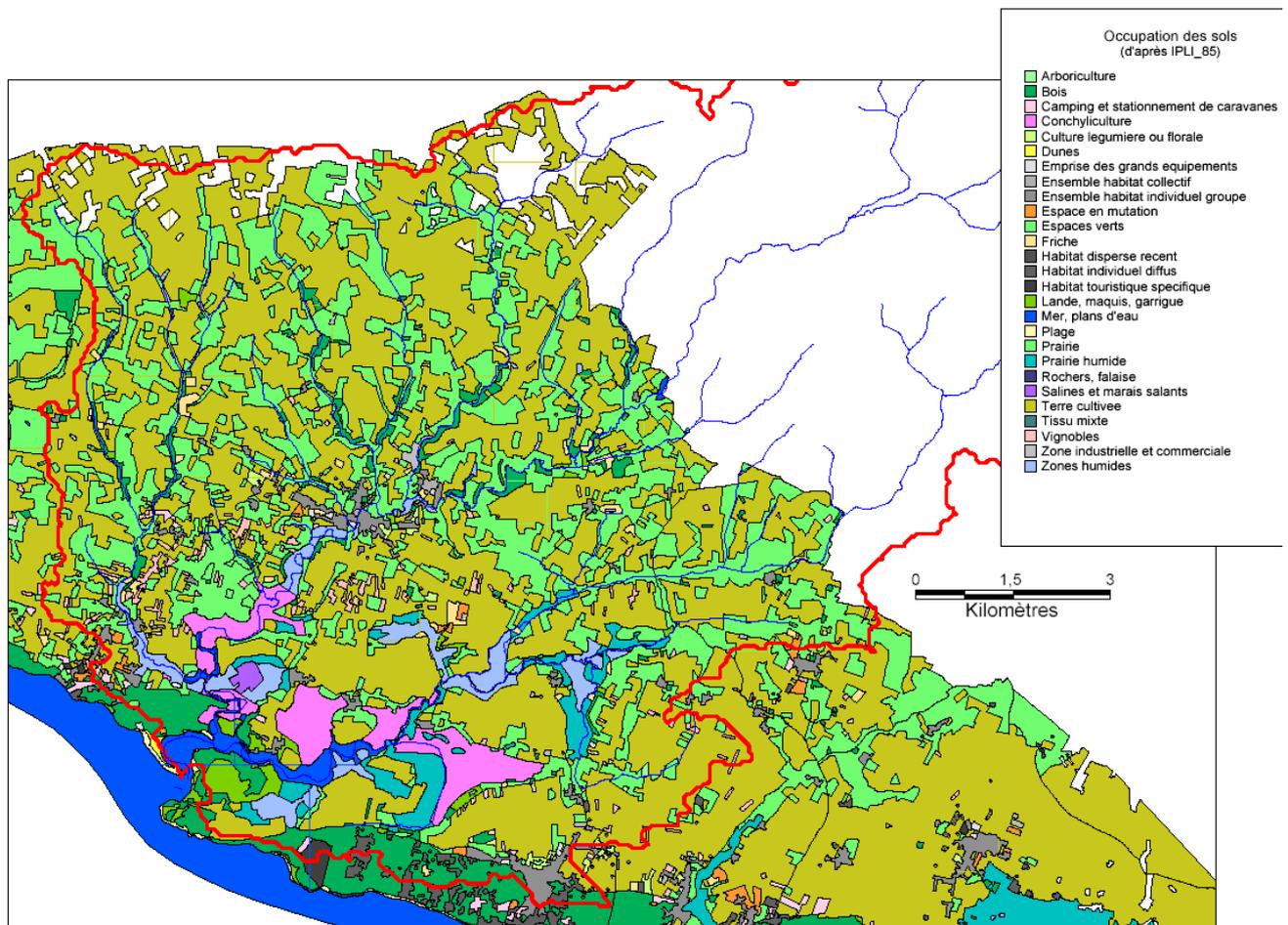


Figure 41 : Occupation des sols sur la frange côtière du bassin versant du Payré (données issues de l'IPLI 85, 2000)

3.4. BILAN HYDROLOGIQUE

Une première approche du fonctionnement hydrodynamique du bassin a été envisagée sur la base des données existantes. Le but est d'une part, de quantifier les volumes transitant par les eaux de surface et d'autre part, d'estimer leur proportion par rapport au volume total infiltré sur le secteur. Le volume d'eau infiltré qui se retrouve dans les nappes souterraines peut ensuite être déduit.

3.4.1. Présentation de la démarche

Dans ce cadre, on s'appuie sur un bilan hydrologique, qui peut être réalisé à partir des données relatives à la pluviométrie, à l'évapotranspiration et au débit de la rivière. Des stations fixes, qui mesurent ces valeurs, sont implantées dans toute la France métropolitaine depuis parfois plusieurs décennies. Les données correspondantes, compilées par les organismes associés (Météo France, DIREN, ...) sont accessibles sur les sites Internet suivants :

<http://www.climatheque.meteo.fr/okapi> pour la pluviométrie et
<http://www.hydro.rnde.tm.fr> pour les débits.

Cependant, aucune station n'est présente sur le bassin versant du Payré.

Cette absence de données nous a conduit à examiner les stations et les bassins versants voisins en se basant sur plusieurs critères, afin de choisir le bassin versant dont le contexte se rapproche le plus du Payré. Les critères retenus sont :

- ✓ la proximité géographique ;
- ✓ le contexte géologique ;
- ✓ le contexte climatique ;
- ✓ l'existence de chroniques de débit, de pluviométrie et d'évapotranspiration.

Au final, le bassin versant de l'Auzance dont la surface est de 58,2 km² a été sélectionné :

- ✓ ce petit fleuve côtier se situe à une quinzaine de kilomètres au nord du Payré à proximité du village de La Motte Achard ;
- ✓ Le contexte géologique est plus ou moins similaire à celui du Payré. Le cours d'eau est encaissé en grande majorité dans des roches métamorphiques telles que les schistes Ordoviciens et Siluriens tandis que l'extrémité Est du bassin s'insère dans le massif granitique de la Roche sur Yon. En revanche, les roches sédimentaires datées du Jurassique sont moins présentes qu'à Talmont. Elles sont à l'affleurement uniquement à proximité de la côte dans de petites dépressions ;
- ✓ La carte de France des précipitations efficaces éditée en 1983 par le BRGM montre que ces deux bassins versants sont compris dans des zones climatiques semblables. Pour la période 1946-1976, un peu moins de 200 mm de pluie

efficace tombent chaque année dans le talmondais et légèrement plus sur l'Auzance (entre 200 et 250 mm par an).

La proximité géographique ainsi que les contextes géologiques et climatiques nous ont permis d'émettre l'hypothèse que le fonctionnement hydrologique de l'Auzance est proche de celui du Payré. La transposition des résultats permet ainsi une première approche pour la partie en zone de socle du bassin versant du Payré.

3.4.2. Données hydrologiques

La première phase pour réaliser un bilan hydrologique consiste à calculer les pluies efficaces. Ces pluies représentent les points d'entrée dans le système et donc les volumes qui seront disponibles pour l'écoulement superficiel ainsi que pour les infiltrations. Pour déterminer cette valeur, il faut disposer des pluies brutes, de l'évapotranspiration et de la réserve utile équivalente (RUE ou RU).

Il s'agit dans une seconde phase d'acquérir les valeurs de débit qui représentent les points de sortie du système.

Localisation des données acquises

Les données de débits ont été acquises uniquement sur l'Auzance au niveau de la station installée à Vaire (287780 XLII et 2183680 YLII).

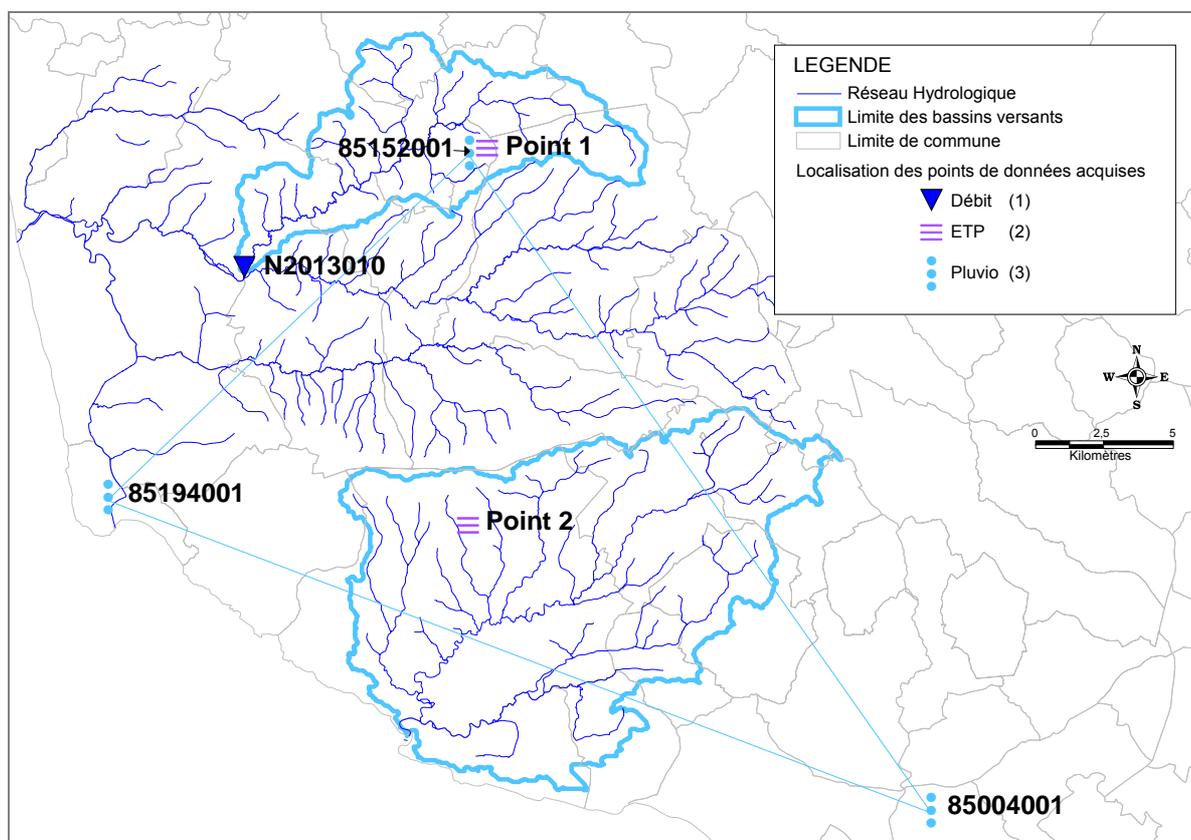


Figure 42 - Localisation des données de débit, de pluviométrie et d'ETP acquises

En revanche, les données de pluviométrie brute ont pu être acquises en trois points différents répartis de façon relativement homogène autour du bassin versant (cf. Figure 42). Il s'agit des stations :

N° 85004001 à Angles : 312877 XLII et 2163742 YLII.

N° 85152001 à La Motte Achard : 296010 XLII et 2187940 YLII.

N° 85194001 aux Sables d'Olonne : 282817 XLII et 2175264 YLII.

Le bilan a été exprimé à partir des données de la station n° 85152001 car c'est la seule située en amont mesurant les débits de l'Auzance. Les deux autres stations ont été utilisées afin de déterminer la représentativité des valeurs en les comparant entre elles.

Enfin, les données d'ETP existantes à proximité de la station pluviométrique 85152001, au point 1 repéré 46°37'30"N et 1°37'30"W ont été choisies. Leur représentativité par rapport au Payré a pu être étudiée par l'acquisition des données du point 2 (46°30'00"N et 1°37'30"W) localisé quant à lui dans le bassin versant du Payré au nord de Talmont Saint Hilaire.

Les données brutes sont présentées en annexe 4.

Comparaison pluies efficaces - débits (année 2001)

Les pluies efficaces calculées à partir des données « 2001 » (cf. Annexe 4) représentent 310,9 mm sur les 936,2 mm tombés au cours du cycle hydrologique observé, soit 33,2%. Cette lame d'eau apparaît un plus élevée que les moyennes annoncées (200 mm sur la période 1946-1976, cf. plus haut). Cette estimation de 310,9 mm peut être expliquée en partie par les importantes précipitations du début de l'année qui représentent 168,2 mm efficaces en trois mois. Enfin, l'épisode orageux du mois de juillet vient également gonfler le bilan avec 62 mm de pluies efficaces. Compte tenu de la superficie du bassin versant, cela correspond à un volume de l'ordre de 48 millions de mètres cube d'eau par an.

En parallèle, les valeurs de débit mesurées au niveau de la station de Vaire, et transposées sur le Payré ont permis d'évaluer un volume total de 45 à 50 millions de mètres cube d'eau transportés en écoulement superficiel entre février 2001 et janvier 2002. Cela correspond à une contribution annuelle, appelée lame d'eau, de 314 mm par mètre carré de terrain du bassin versant.

On constate une bonne cohérence entre ces deux estimations.

3.4.3. Fonctionnement hydrodynamique

Comme l'on ne disposait que de chroniques courtes de pluies efficaces, la répartition entre écoulements superficiels et infiltration a été évaluée en utilisant la méthode de Thornthwaite modifiée. Cette méthode permet de répartir, pour les pluies efficaces, la proportion qui donne un écoulement rapide (qui ruisselle sur les pentes du bassin versant) et celle qui correspond à un écoulement différé (percolation) (cf. tableau 19).

La figure 43 montre l'évolution du débit et de la pluviométrie sur l'année 2001 et montre une relation entre ces deux variables. Le bassin versant étant localisé en domaine de socle pour la grande majorité, il s'agit de déterminer la proportion des eaux qui percole et la proportion qui s'écoule en surface.

BILAN THORNTHWAITE - janvier 2001 - janvier 2002														
Débits	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	Total
Débit moyen (m3/s)	-	3,84	4,35	3,15	1,65	0,31	0,65	0,07	0,07	1,03	0,83	1,15	1,48	1,55
Volume (*106 m3)	-	9,29	11,65	8,16	4,42	0,80	1,74	0,18	0,18	2,76	2,15	3,08	3,96	48,39
Lame d'eau (mm)	-	60,3	75,6	53,0	28,7	5,2	11,3	1,2	1,2	17,9	14,0	20,0	25,7	314,01
Pluies	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	Total
Pluie efficace (mm)	-	44,7	93,6	29,9	0,3	0,0	62,0	0,0	0,0	17,3	12,1	24,7	26,3	310,9
Excédent (mm)	-	110,2	148,7	104,2	52,4	26,2	75,1	37,6	18,8	26,7	25,4	37,4	45,0	-
Écoulement superficiel (mm)		55,1	74,3	52,1	26,2	13,1	37,6	18,8	9,4	13,3	12,7	18,7	22,5	353,8
Écoulement différé n+1 (mm)	65,5	55,1	74,3	52,1	26,2	13,1	37,6	18,8	9,4	13,3	12,7	18,7		-

Tableau 19 - Expression du bilan de Thornthwaite.

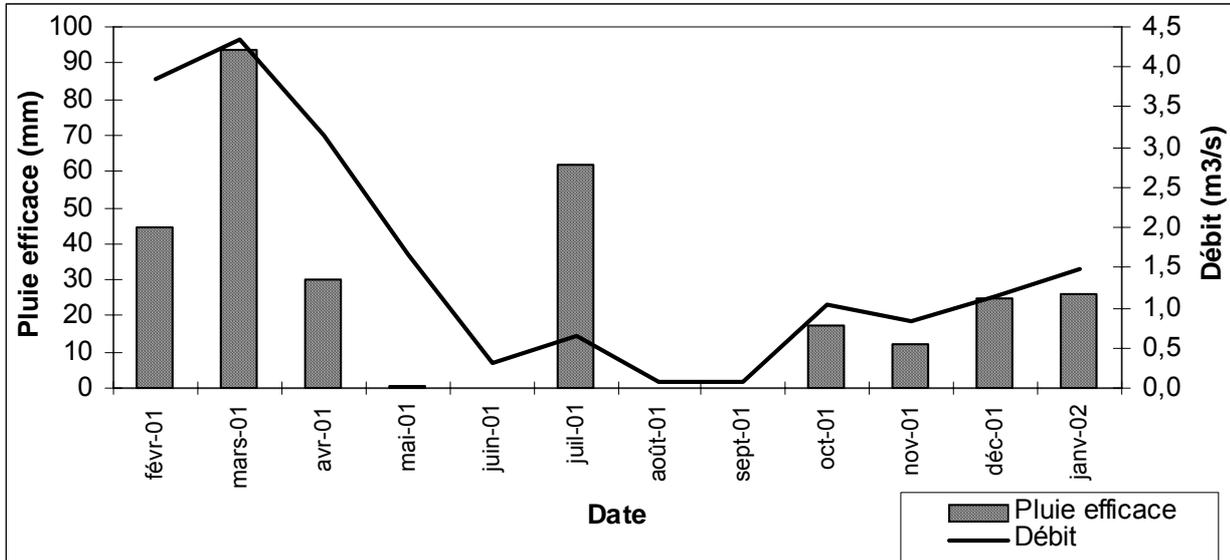


Figure 43 - Influence de la pluie efficace sur les débits.

Pour cela, une modélisation du comportement hydrodynamique du bassin versant a été réalisée. Il a fallu déterminer à partir des précipitations efficaces, les proportions de ruissellement, d'écoulement différé au mois $n+1$ et éventuellement au mois $n+2$. Il est en effet nécessaire de faire apparaître des écoulements différés afin d'expliquer la pérennité des débits pendant les mois qui ne montrent pas de précipitations efficaces. C'est le cas en mai, en juin, en août et en septembre.

Le principe de calcul pour le mois n est le suivant (E = écoulement) :

- $E \text{ total } (n) = a \times (P \text{ eff } (n) + E \text{ différé } (n-1))$.
- $E \text{ différé } 1 = b \times P \text{ eff } 1$ (= Excédent).
- $E \text{ différé } (n-1) = b \times (P \text{ eff } (n-1) + E \text{ différé } (n-2))$.
- Avec : $a + b = 100$.

Dans un premier temps, de nombreux scénarios, dont cinq ont été représentés sur la figure qui suit, ont été explorés. Ceux-ci couvrent l'ensemble du spectre de la gamme fréquentielle possible. En effet, ces cinq combinaisons proposent un ruissellement allant de 90% des pluies efficaces à seulement 10% et inversement pour les infiltrations (écoulements différés $n+1$). Le pas choisi entre chaque cas présenté est de plus ou moins 20%.

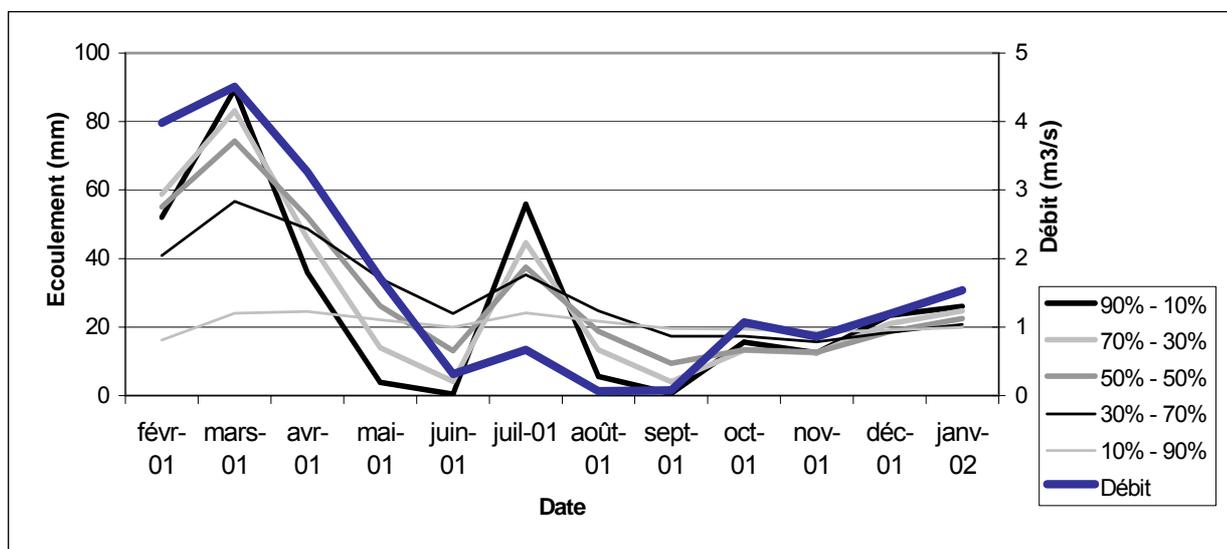


Figure 44 - Scénario d'écoulement (ruissellement et infiltration) et débit.

En plus de ces scénarios, d'autres cas ont été étudiés en se basant sur des infiltrations induisant des écoulements différés sur deux mois (n+1 et n+2). Cependant, les résultats n'ont pas apporté de modèles fiables.

Finalement, les modèles étudiés ne semblent pas en mesure d'expliquer parfaitement les débits reconstitués. Cela est dû en grande partie à l'épisode pluvieux du mois de juillet. Les précipitations efficaces obtenues n'induisent pas la hausse de débit attendue. Les combinaisons montrant moins de 30% de ruissellement et plus de 90% peuvent néanmoins être écartées car elles ne reproduisent absolument pas l'évolution des débits du Payré. Il est donc plus réaliste de s'intéresser aux combinaisons prenant en compte de 40% à 80% de ruissellement.

Afin de choisir le meilleur scénario, les coefficients de corrélation entre les débits et les écoulements ont été représentés sur la figure 45. Il en ressort que le coefficient de corrélation maximum obtenu est de 0,83. Le ruissellement est alors de 50% et l'écoulement différé est de 50% pour le mois n+1.

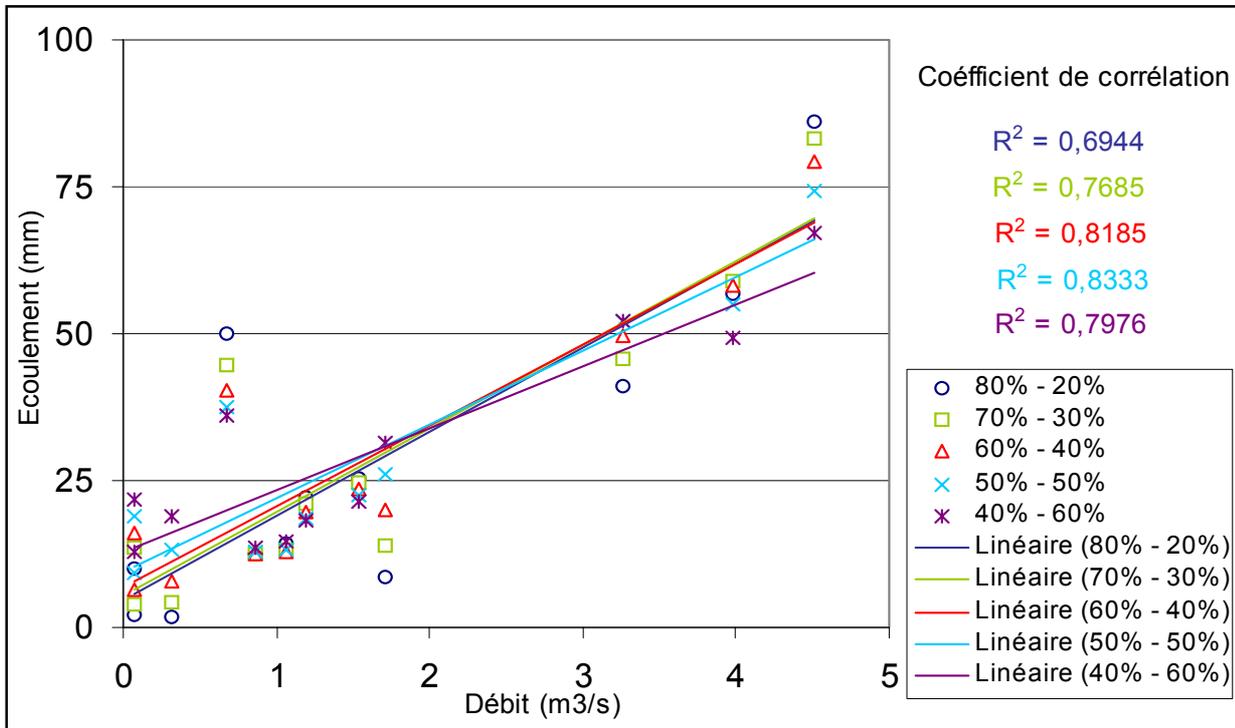


Figure 45 - Coefficients de corrélation entre les débits et les modèles d'écoulement

Le bilan hydrologique a donc été exprimé en prenant en compte cette combinaison de 50% de ruissellement et 50% d'infiltration (des pluies efficaces).

Ce bilan préliminaire nous permet donc d'avoir une première estimation du fonctionnement hydrologique du bassin versant. L'ensemble des résultats obtenus peut ainsi être résumé :

Les pluies efficaces ont été calculées à partir de la pluviométrie brute observée sur la station de La Motte Achard n°85152001 (936,2 mm). Ces pluies ont été estimées à 311 mm soit à 33% des pluies totales.

Le bilan hydrologique a été établi en se basant sur le principe de la méthode de Thornthwaite. La répartition entre l'écoulement superficiel et l'écoulement différé au mois n+1 a été modélisé. Le scénario retenu correspond à la combinaison 50%, 50%.

Les valeurs théoriques obtenues pour le cycle hydrologique 2001/2002 montrent un écoulement superficiel de 354 mm soit un volume total de 55 millions de m³ et une lame d'eau de 314 mm soit un volume total de près de 50 millions de m³.

L'absence de chroniques de débits et de pluviométrie sur le Payré justifie la mise en place d'un réseau de suivi.

3.5. RESEAU DE SUIVI DES EAUX SUPERFICIELLES ET SOUTERRAINES ET DES SEDIMENTS

3.5.1. Objectifs du suivi et réseau mis en place

La finalité du réseau de mesures concerne l'évaluation de la dynamique hydro-sédimentaire. Le réseau doit ainsi permettre de quantifier les écoulements superficiels réels et d'évaluer les flux en particules transportés dans les différents affluents du Payré et se retrouvant dans l'estuaire.

Le réseau de suivi est composé des points de mesure suivant :

- Eaux de rivière : 7 points de mesure de débits, matières en suspension (MES) et turbidité (dont 3 sur le chenal du Payré, 3 sur le chenal des hautes mers au Payré, et 1 sur le Ruisseau de l'île Bernard), et 16 points de mesure de pH et conductivité.
- Eaux souterraines : 39 points de mesure de niveau piézométrique, 7 points de mesure de qualité.
- Sédiments : 33 points de prélèvements (29 en zone d'influence des marées et 4 en dehors) dont 7 pour des mesures de qualité.

Le réseau a été implanté au cours de la 1^{ère} année du projet selon plusieurs critères :

- répartition géologique et parfois contacts entre les formations,
- répartition au niveau des 3 cours d'eau (prise en compte de l'arborescence du réseau hydrographique),
- suivi de certaines confluences.

Les localisations des points de prélèvements sont précisées pour chaque critère dans les chapitres ci-après.

Les campagnes de prélèvements et d'analyses menées se sont organisées comme suit :

- Eaux de surface : 2 campagnes de mesure de débit en hautes eaux, 2 en basses eaux (Juil, déc 2004 ; Avril, juin 2005), 2 campagnes de mesure des paramètres physico-chimiques (avril, juin 2005), 1 campagne de mesure des MES et turbidité (juin 2005)
- Eaux souterraines : des campagnes piézométriques trimestrielles (avril, juin, août, nov 2004 ; avril, mai, juillet 2005 ; janvier 2006) et une campagne d'analyses physico-chimiques en basses eaux (juillet 2005)
- Sédiments : 1 campagne de prélèvement et d'analyses granulométriques et chimiques (4 et le 6 mai 2004)

3.5.2. Matériels et méthodes

Mesures et analyses sur les eaux

- Débit

Un micro-moulinet de type C2 de OTT (réf : 10.150.005.B.F) a été utilisé pour mesurer les débits des cours d'eau. Ce matériel est prévu pour la mesure de vitesses de courants allant de 2,5 cm/s à 5 m/s. Chaque point devant faire l'objet d'une mesure de débit a été choisi afin que la section du cours d'eau soit la plus simple possible et que l'écoulement soit homogène (ou du moins non turbulent).

Le protocole consiste à réaliser un transect des vitesses instantanées du courant en différents points de cette section : sur différentes verticales espacées au minimum de 20 cm par rapport à la berge puis de 50 cm ensuite. Ces écarts peuvent cependant être modifiés selon la configuration du site.

L'appareil mesure alors le nombre « n » de tours d'hélice provoqués par le courant durant un intervalle de temps compris entre 30 et 60 secondes sur chacun des points de la section. Cette donnée permet de calculer la vitesse instantanée en chaque point de mesure. Les débits sont évalués graphiquement à partir des vitesses instantanées.

- Matières en suspension

Les matières en suspension (MES) sont constituées par les solides en suspension dans l'eau. Ils proviennent de sources naturelles, d'effluents municipaux et industriels, du ruissellement des terres agricoles et des retombées atmosphériques.

La technique utilisée consiste à passer les échantillons de 1L sur des filtres à l'aide d'une pompe à vide. La MES se dépose ainsi sur les filtres. La masse correspondante (mg/L) est obtenue par différence entre la masse du filtre avant et après filtration et séchage.

- Turbidité

La turbidité renvoie à la mesure du caractère trouble de l'eau. Elle est en partie causée par les matières en suspension, telles que les argiles, les limons, les particules organiques, le plancton et les autres organismes microscopiques. Elle est également liée à la présence de molécules en solution comme par exemple les hydroxydes de fer. Une turbidité trop élevée contrarie la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau et peut ainsi diminuer la croissance des algues et des plantes aquatiques.

Les mesures ont été effectuées en utilisant le Turbiquant 1500IR de MERCK. Après calibrage de l'appareil (à l'aide de trois tubes étalons de 0,02, 10 et 1000 NTU Formazine), le turbidimètre est utilisé conjointement avec un agitateur magnétique. Ce protocole permet d'éviter les fluctuations des mesures causées par la décantation des particules. La turbidité retenue pour un échantillon correspond à la moyenne algébrique de 12 valeurs enregistrées pendant 1 minute toutes les 5 secondes.

- Température, pH, conductivité

Ces paramètres ont été mesurés sur place, au moyen d'équipements de terrain : pH mètre JENWAY 3150 (pH et température) et conductimètre WTW LF 318. Le pH mètre est étalonné avant chaque mission de mesure et vérifié également au retour.

- Piézométrie

Les mesures piézométriques ont été effectuées à l'aide d'une sonde manuelle à témoin lumineux.

Mesures et analyses sur les sédiments

- Granulométrie

Les analyses granulométriques ont été réalisées par la méthode optique de granulométrie laser (granulomètre BECKMAN COULTER). Chaque échantillon a fait l'objet d'un prélèvement aliquote dilué ensuite dans environ 10 ml d'eau, puis homogénéisé sous agitation magnétique. La suspension obtenue a ensuite été tamisée en voie humide à 2 mm. Le refus de tamis (supérieur à 2 mm), n'étant pas pris en compte par le granulomètre laser, a été séparé et comptabilisé à part et seule la fraction inférieure à 2 mm a été soumise à l'analyse optique. Le sédiment restant a ensuite été dilué afin d'obtenir les pourcentages d'obscurité permettant d'acquies des résultats corrects.

- Matières organiques

Le protocole consiste à éliminer la matière organique avec du peroxyde d'hydrogène concentré (eau oxygénée, concentration 33% volume) et à déduire la masse correspondante par différence entre la masse d'échantillon avant et après traitement. Le traitement à l'eau oxygénée est effectué sur 1 à 3 g d'échantillon séché à 35°C.

- Eléments traces métalliques

Les échantillons ont été analysés selon les normes en vigueur (NF ISO 11464, NFX 31-147 et XP 33-012). Les protocoles MO077 et MO111 ont été appliqués. Les échantillons ont donc été séchés à 40°C. Ensuite, seule la fraction inférieure à 2 mm a été prise en compte. 34 éléments ont été dosés dont 8 éléments majeurs et 26 éléments traces.

3.6. SUIVI HYDROLOGIQUE DES COURS D'EAU DU BASSIN VERSANT

3.6.1. Présentation et objectifs

Afin de déterminer les volumes d'eau s'écoulant en surface, une série de campagnes de mesures ponctuelles des débits en différents endroits du bassin versant ont été effectués dans le but de quantifier les volumes transitant dans chacun des affluents.

3.6.2. Localisation des points de mesure

Les points de mesure de débit ont été choisis en dehors des zones influencées par la marée dynamique. Cette condition doit être respectée afin d'obtenir des valeurs de débits représentatives du cours d'eau. En effet, elles ne doivent pas être perturbées par le flot et le jusant pendant les marées montantes et descendantes. Sept points ont ainsi été retenus pour que la couverture du chevelu de la rivière soit maximum (Cf.

Figure 46). Trois points sont localisés sur le chenal des hautes mers au Payré (A1, A2 et A3), trois autres sont situés sur le chenal du Payré (B1, B2 et B3) et le dernier sur le ruisseau de l'île Bernard (C2).

Afin de quantifier les flux en particules, les mesures effectuées sur les 7 points cités plus haut ont été couplées avec des prélèvements d'eau. Ils ont ensuite fait l'objet de mesures des MES et de la turbidité.

En marge de ces mesures, le pH, la conductivité et la température des eaux ont été déterminés sur 16 points afin de caractériser les eaux rencontrées sur le bassin versant. L'installation d'un pluviomètre n'a pas été envisagée.

La localisation des points de mesure est précisée dans la Figure 46.

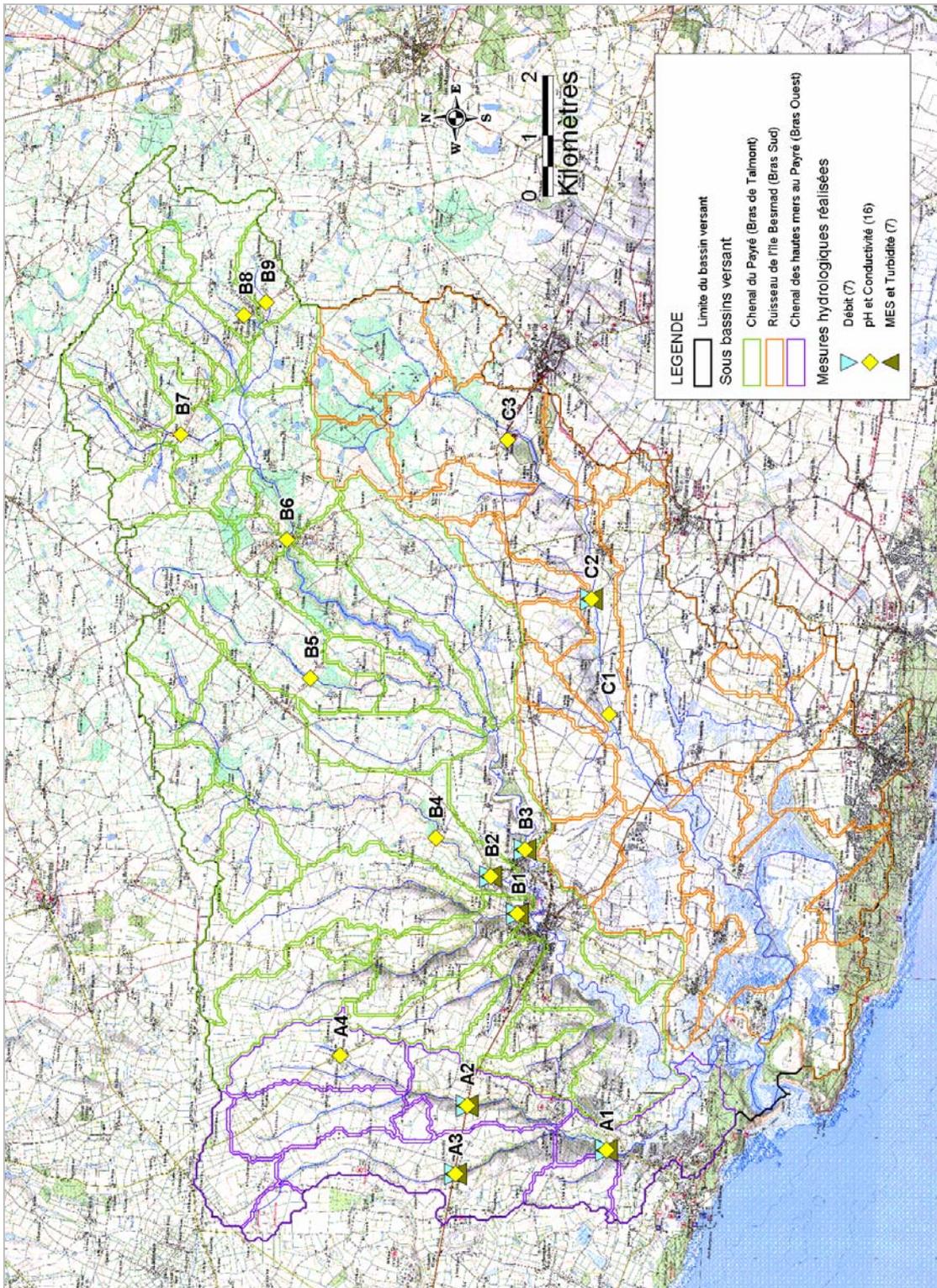


Figure 46 - Carte de localisation des points de mesures du réseau hydrologique

3.6.3. Résultats des campagnes de terrain

Débits

Le Tableau 20 (page suivante) et la figure 47 présentent l'ensemble des débits mesurés au cours des campagnes de terrain. L'année 2005 ayant été exceptionnellement sèche, une grande partie des mesures de débit n'a pu avoir lieu (fin de printemps, été, automne). Les cours d'eau étaient en effet soit taris soit à écoulement quasi nul.

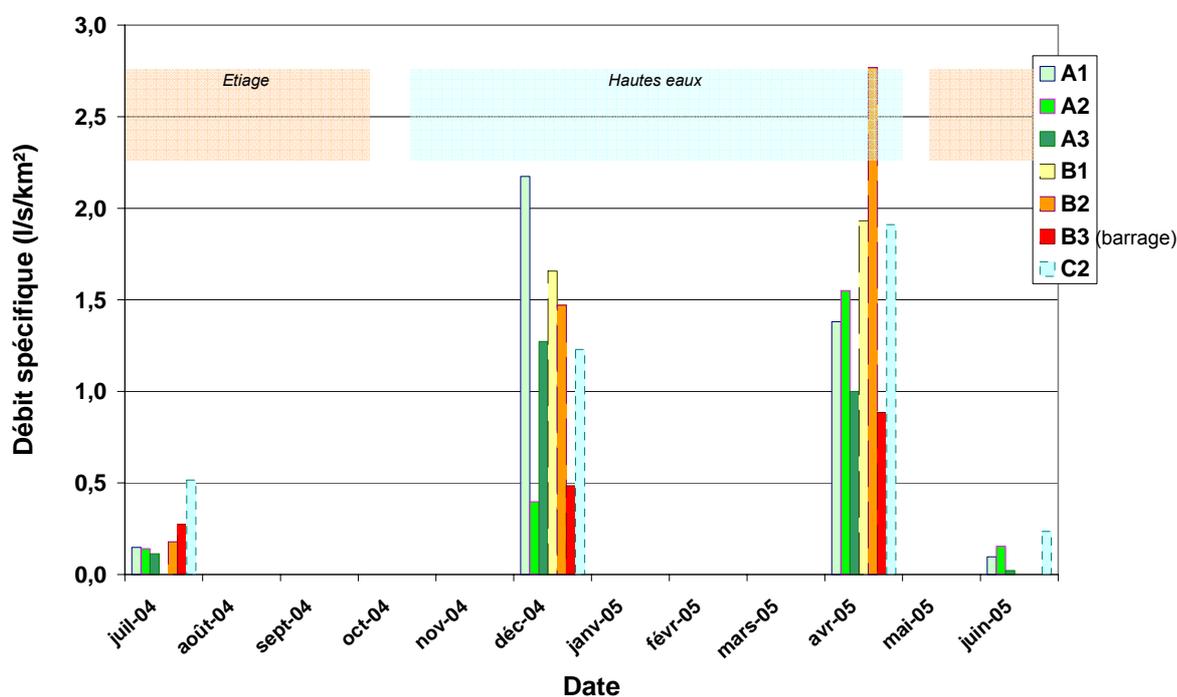


Figure 47 - Débits spécifiques mesurés sur les cours d'eau du bassin versant du Payré en 2004-2005

Les débits mesurés sont concordants avec les périodes d'étiage et de hautes eaux.

			5-6 juillet 2004			14-15 décembre 2004			27-avr-05			13-juin-05		
Unité Hydrologique	Point	Surface (km ²)	Débit (L.s-1)	Débit (m3/j)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Débit (L.s-1)	Débit (m3/j)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Débit (L.s-1)	Débit (m3/j)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Débit (L.s-1)	Débit (m3/j)	Débit spécifique (l/s/km ²)
Bras Ouest: Petit														
Chenal des	A1	15,5	2,3	199	0,1	33,7	2 912	2,2	21,4	1 849	1,4	1,5	130	0,10
Hautes Mers au	A2	7,8	1,10	95	0,1	3,1	268	0,4	12,1	1 045	1,6	1,2	104	0,15
Payré	A3	2,2	0,25	22	0,1	2,8	242	1,3	2,2	190	1,0	0,0475	4	0,02
Bras Talmont:														
Chenal du Payré	B1	10,2			0,0	16,9	1 460	1,7	19,7	1 702	1,9	-	-	
	B2	13,4	2,4	207	0,2	19,7	1 702	1,5	37,1	3 205	2,8			0
	B3	38,4	10,5	907	0,3	18,6	1 607	0,5	34	2 938	0,9	-	-	
Bras Sud:														
Ruisseau de l'île														
Bernard	C2	15,7	8,1	700	0,5	19,3	1 668	1,2	30	2 592	1,9	3,7	320	0,24

Tableau 20 : Résultats des débits mesurés sur les cours d'eau du bassin versant du Payré en 2004 et 2005. La surface indiquée correspond à la surface d'alimentation du bras de cours d'eau relatif au point de mesure

Au niveau du chenal des hautes mers au Payré, le point A1 se situe en aval hydraulique des points A2 et A3, après leur confluence. En l'absence d'autres apports, la somme des débits des points A2 et A3 doit correspondre au débit du point A1. La figure 48 indique les résultats de cette comparaison.

La somme des débits des points A2 et A3 apparaît généralement supérieure au débit du point A1. La différence pourrait être due soit à des infiltrations vers les nappes souterraines, soit à des prélèvements superficiels d'eau. En début de période de hautes eaux (décembre 2004), la tendance apparaît inversée, indiquant un apport d'eau supplémentaire en aval.

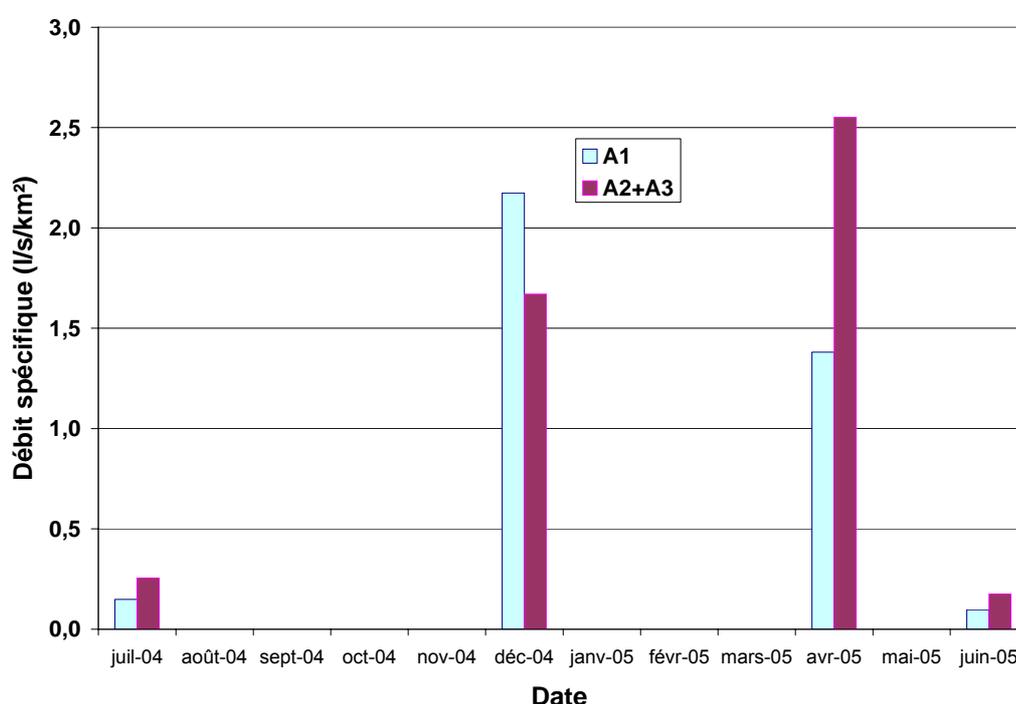


Figure 48 : Comparaison des débits cumulés des points A2 et A3 par rapport au point A1 situé après la confluence des deux points précédents

De la même façon, l'interprétation des évolutions par sous-bassin est difficile. En effet, les tendances observées sont différentes pour les cours d'eau d'un même sous-bassin.

Par exemple si l'on considère la campagne de juillet 2004, dont les résultats (débits bruts, débits spécifiques) sont présentés dans le tableau 21, on observe que les débits spécifiques des cours d'eau prenant leur source dans les schistes et les micaschistes (A1, A2, A3, et B2) sont homogènes. Les valeurs oscillent entre 0,11 et 0,18 l/s/km². Toutefois, le ruisseau des Rosais (B1) se démarque de cet ensemble par une absence totale d'écoulement.

Point de prélèvement	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C2
Q brut (l/s)	2,3	1,1	0,25	0,0	2,4	10,5	8,1
Surface (km ²)	15,5	7,8	2,2	0,0	13,4	38,4	15,7
Q spécifique (l/s/km ²)	0,151	0,141	0,11	0,0	0,179	0,27	0,51

Tableau 21 - Débits bruts et débits spécifiques mesurés lors de la campagne de juillet 2004

Plusieurs hypothèses avaient été avancées pour expliquer ce tarissement, dont la présence d'une faille conduisant à des circulations d'eau spécifiques. Cette observation n'a pas du tout été reproduite l'année d'après, et ce sont même d'autres ruisseaux qui ont montré des tarissements / baisses de débits particuliers.

Le point B3 est apparu en outre influencé par la gestion du barrage de Finfarine, situé en amont hydraulique. Compte tenu des prélèvements en eau effectués (le barrage sert de réserve et prélèvement pour l'alimentation en eau potable), la valeur du débit spécifique présenté dans le Tableau 21 est sous-estimée par rapport à la valeur réelle et il témoigne en partie des lâchés effectués par la compagnie qui gère le barrage (SAUR).

Un bilan global sur les débits s'avère en conséquence impossible.

En revanche, les données de gestion du barrage recueillies auprès de la SAUR ont permis d'évaluer à 3,77M m³ les volumes restitués entre le 1^{er} août 2003 et le 31 juillet 2004. Combinés aux 3M m³ prélevés par le barrage de Finfarine (alimentation en eau potable), cela représente un total de 6,77 millions de mètres cubes par an pour une surface de 21,4 km². Reporté sur l'ensemble du BV cela représente un écoulement de 49M m³. Ceci est à rapprocher des 55 Mm³ évalués à partir des pluies efficaces pour cette même période.

En conclusion des études hydrologiques, il s'avère que l'interprétation détaillée des débits dans le bassin versant se trouve confrontée à plusieurs obstacles majeurs, rendant les corrélations illusoire :

- Des pompages dans les ruisseaux ou dans leurs environnements immédiats, pouvant conduire parfois à des tarissements partiels,
- Un cours d'eau majeur du bassin versant, dont le débit (point B3) est complètement influencé par un barrage (Finfarine) et témoigne de la politique de gestion des lâchés d'eau.

Nature des eaux rencontrées

Les valeurs obtenues pour le pH, la conductivité et la température sur l'ensemble des points sont présentés dans le Tableau 22. Les mesures de pH de la campagne d'avril 2005 n'ont pas été reportées suite à un problème d'électrode, constaté lors du contrôle après campagne, ayant conduit à invalider ces données.

			5-6 juillet 2004			14-15 décembre 2004			27 avril et 3 mai 2005			13 et 20 juin 2005		
Unité Hydrologique	Point	Surface (km ²)	5-6 juillet 2004			14-15 décembre 2004			27 avril et 3 mai 2005			13 et 20 juin 2005		
			pH	Conductivité (µS.cm-2)	Température (°C)	Température (°C)	Conductivité (µS.cm-2)	Température (°C)	pH	Conductivité (µS.cm-2)	Température (°C)	pH	Conductivité (µS.cm-2)	Température (°C)
Bras Ouest: Petit Chenal des Hautes Mers au Payré	A1	15,5	7,19	979	15,3	5,2	627	11,2	7,53	960	14,8			
	A2	7,8	7,05	600	14,9	6,1	548	14,9	7,6	595	15			
	A3	2,2	6,3	449	13,7	6,6	500	11,7	6,91	451	14,1			
	A4		6,65	587	15,3		491	15,3	7,3	780	16,9			
Bras Talmont: Chenal du Payré	B1	10,2	BRAS A SEC			4,6	503	13,8	7,19	735	13,7			
	B2	13,4	7,8	1333	19,2	3,7	417	13,8	à sec					
	B3	38,4	6,67	331	17,2	4,6	435	14,5	7,16	589	16,1			
	B4		6,65	587	16,1		414	17,5	7,3	446	17,7			
	B5		6,47	351	15,5		400	19,5	7,03	440	18,3			
	B6		7,36	400	15,4		368	15	7,48	410	21,3			
	B7		7,39	419	16,2		371	15,4	7,49	433	17,2			
	B8		6,94	366	18		341	16,3	7,04	393	19,5			
	B9		6,6	418	17,5		316	14,7	6,61	780	20			
Bras Sud: Ruisseau de l'île Bernard	C1		7,05	572	18,2		553	17,4	7,3	634	21,3			
	C2	15,7	7,23	554	17	5	581	12	7,89	613	16,5			
	C3		7,15	760	16,5		485,0	18,2	7,08	739	20,8			

Tableau 22 – Résultats des campagnes hydrologiques : mesures de pH, conductivité, température. La surface indiquée correspond à la surface d'alimentation du bras de cours d'eau relatif au point de mesure.

Le bras de Talmont et le bras Ouest montrent une tendance plutôt neutre à légèrement acide. Ceci peut être en partie imputé à la présence du massif granitique d'Avrillé en amont du bassin versant. Les pH les plus faibles se situent ainsi sur le massif granitique aux points A3 (6,30 – 6,90) et B9 (6,60 – 6,61).

Le bras Sud montre quant à lui des pH proches de la neutralité à légèrement basique (C2 en juin 2005).

Le pH et la conductivité élevés observés sur le point B2 en juillet 2004 (7,80 et 1333 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-2}$) sont peut-être dus à la carrière située à proximité.

Une augmentation de pH apparaît dans la plupart des bras aval en juin 2005 par rapport à juillet 2004. La comparaison des différences de température, conductivité et pH (Figure 49) ne montre pas de corrélation entre ces paramètres.

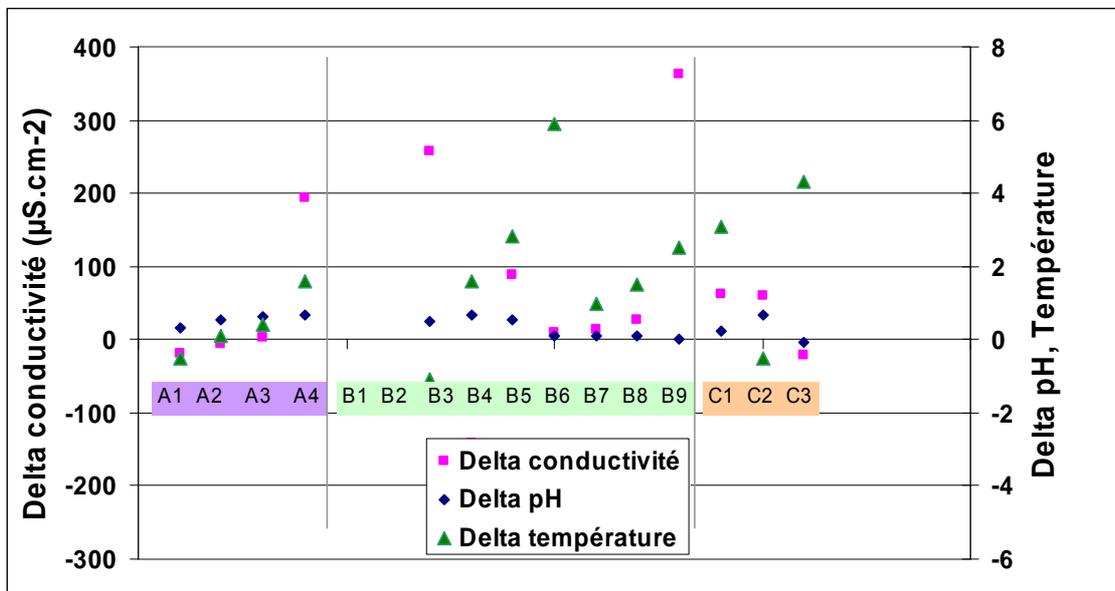


Figure 49 : Comparaison des variations de pH, température et conductivité en juillet 2004 et juin 2005.

Les résultats des mesures de MES et de turbidité sont présentés dans le tableau 23 ci-après.

Unité hydrologique	Point	pH	Conductivité ($\mu\text{S.cm}^2$)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Débit (L.s^{-1})	MES (mg.L^{-1})	Turbidité (NTU)
Bras Ouest : Petit chenal des hautes mers au Payré	A1	7,19	979	15,3	2,30	<2	2,39
	A2	7,05	600	14,9	1,10	6	12,70
	A3	6,30	449	13,7	0,25	<2	0,87
Bras Talmont : Chenal du Payré	B1	BRAS A SEC					
	B2	7,80	1333	19,2	2,40	<2	5,16
	B3	6,67	331	17,2	10,50	3	6,48
Bras Sud : Ruisseau de l'île Bernard	C2	7,23	554	17,0	8,10	4	8,69

Tableau 23 - Résultats de la campagne de suivi des matières en suspension (MES) et de la turbidité les 6 et 7 juillet 2004

Les flux de matières en suspension ont été déterminés à partir des concentrations en MES et des débits instantanés pour chaque exutoire. On observe un flux plus important pour le Payré (B3) et pour le ruisseau de l'île Bernard (C2). Ils apportent à eux seuls la quasi-totalité des particules en suspension du bassin versant vers l'estuaire. On notera par ailleurs la bonne corrélation entre la turbidité et la concentration en MES.

Point de prélèvement	A1	B1	B2	B3	C2	/ 90 km ²	BV Total
Flux en MES (mg/s)	2,3	0,0	2,4	31,5	32,4	68,6	118,1
Flux en MES (mg/j)	198,7	0,0	207,4	2721,6	2799,4	5927,0	10207,7

Tableau 24 - Estimation des flux en MES (en mg) à partir des mesures des 6 et 7 juillet 2004

La valeur de flux de MES de 10,2 kg/j pour l'ensemble du bassin versant est très faible. Elle témoigne des apports d'étiage.

La présence d'un barrage sur un cours d'eau majeur, les incertitudes sur les débits et l'impossibilité de pouvoir établir des bilans sur ces derniers empêchent toute analyse fine des flux de MES.

Il en est de même pour la chimie de l'eau. Il a été jugé préférable de reporter sur d'autres cibles (sédiments,...) les moyens prévus initialement pour les campagnes de mesure de la chimie des eaux de surface.

3.7. SUIVI PIEZOMETRIQUE

3.7.1. Présentation et objectifs

Les piézomètres correspondent à des ouvrages souterrains dans lesquels des mesures de niveau d'eau peuvent être réalisées de façon manuelle ou automatique. Cela permet d'acquérir des données régulières et donc de réaliser un suivi des nappes souterraines.

Le Conseil Général de Vendée gère un parc de 35 ouvrages qui se répartissent de façon hétérogène à l'échelle du département (<http://www.ades.rnde.tm.fr>). En effet, la plupart sont localisés en Sud Vendée en domaine sédimentaire. Aucun ouvrage n'est recensé sur le bassin versant du Payré.

L'ouvrage le plus proche et le plus représentatif du contexte de l'étude est situé à une trentaine de kilomètres au Nord-Est du Payré, à La Roche sur Yon. Cet ouvrage est implanté en domaine de socle dans le massif granitique dit de « La Roche sur Yon ». La figure 50 présente l'évolution du niveau de la nappe entre janvier 2000 et mars 2004.

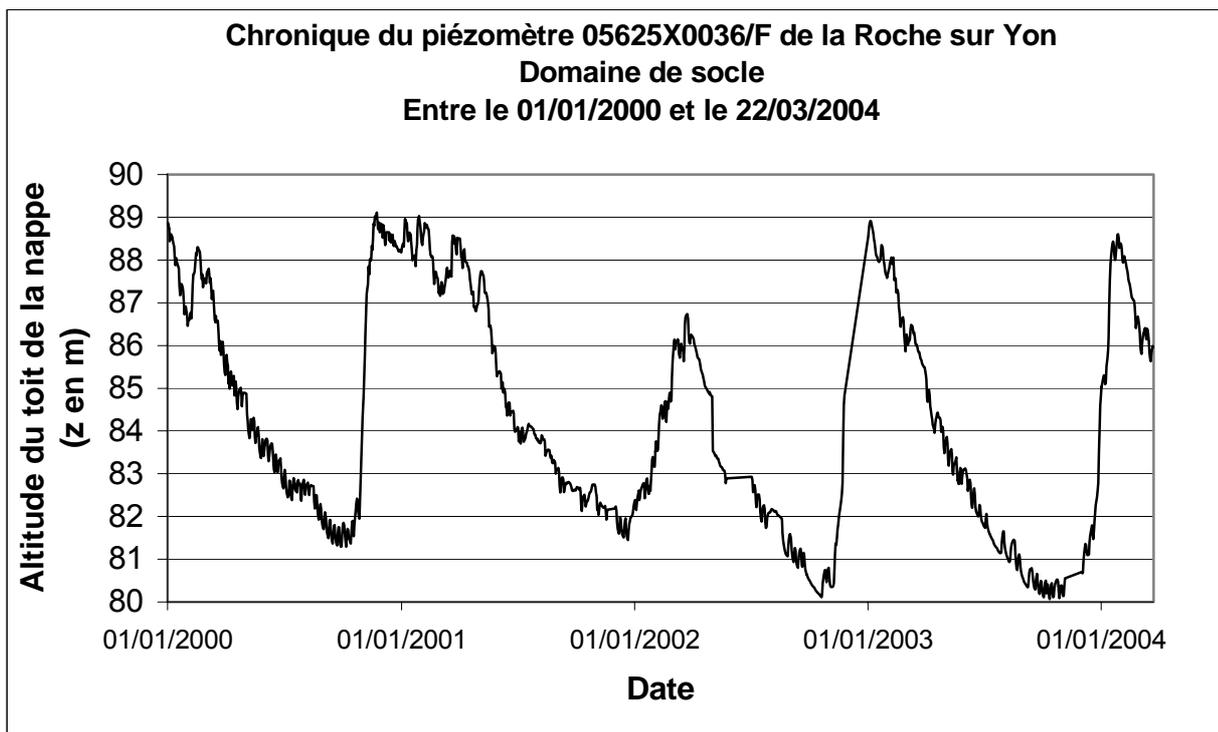


Figure 50 - Chronique piézométrique de l'ouvrage 05625X0036/F entre janvier 2000 et mars 2004

Les données enregistrées montrent un battement annuel d'environ 9 mètres compris entre 80 et 89 mètres. On note que les plus hautes eaux sont généralement obtenues entre décembre et janvier. En revanche, en 2002, le niveau maximum des nappes a été atteint plus tard dans l'année aux cours des mois de mars et d'avril. Les plus basses eaux sont atteintes quant à elles entre septembre et octobre exception faite de 2001, où l'étiage s'est poursuivi jusqu'en décembre.

Cette chronique témoigne du fonctionnement de la nappe phréatique au niveau du granite de La Roche sur Yon et donne une idée de son fonctionnement global. Cependant, la distance entre le piézomètre et le bassin versant du Payré est trop importante pour extrapoler les résultats à la zone d'étude. Il a donc été jugé nécessaire de faire l'acquisition de données précises sur le bassin versant afin de caractériser son fonctionnement hydrogéologique. Pour cela, un suivi piézométrique a été mis en place.

L'objectif de ce suivi est de comprendre le fonctionnement des aquifères et les relations entre les eaux souterraines et le réseau hydrographique du Payré. Pour cela, il s'agit dans un premier temps d'évaluer l'évolution du niveau piézométrique de ces nappes dans le temps.

3.7.2. Localisation du réseau de mesure

Les points qui ont fait l'objet de mesures correspondent :

- ✓ soit à des points répertoriés dans la banque de données du sous-sol ou BSS (21 points ont été mesurés) ;
- ✓ soit à des points repérés lors des campagnes de terrain (18 points supplémentaires non mentionnés dans la BSS, ont également fait l'objet de mesures).

Il s'agit principalement de forages et de puits utilisés par les particuliers pour l'arrosage des jardins et parfois pour l'alimentation en eau de leur domicile. Quelques-uns de ces ouvrages sont aussi utilisés par les agriculteurs pour l'irrigation. L'ensemble de ces 39 points est localisé sur la Figure 51 et leurs caractéristiques sont précisées dans les tableaux ci-après (Tableau 25 et Tableau 26). La description détaillée des ouvrages a été proposée en annexe du rapport d'avancement 2005 (BRGM/RP-54258-FR).

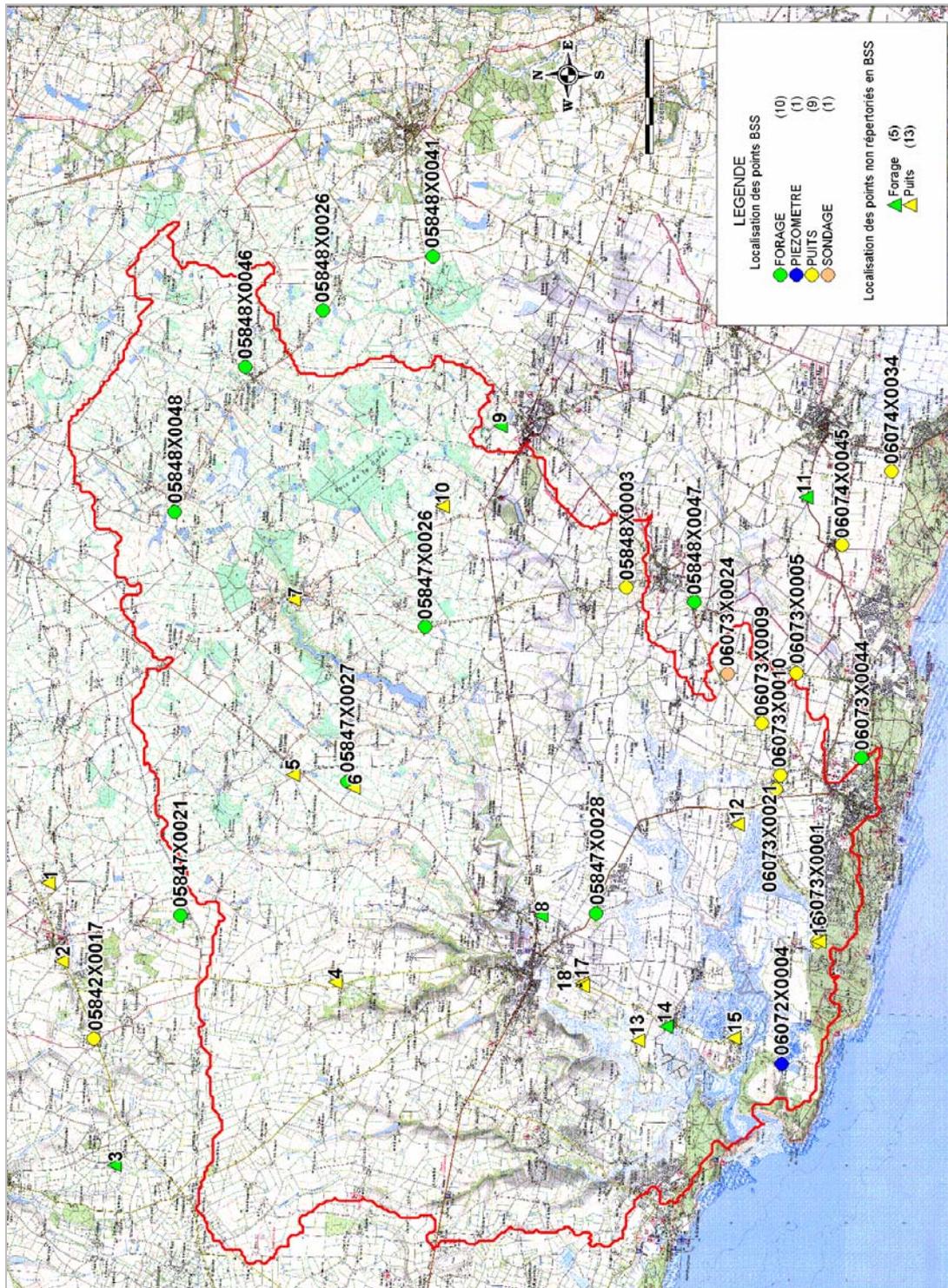


Figure 51 - Localisation et nature des ouvrages BSS et des ouvrages non répertoriés du secteur d'étude sur fond topographique

Indice	X L2	Y L2	Commune	Lieu-dit	Nature	Z (m NGF)
05842X0017	295220	2178050	Grosbreuil	La Viguairie	Puits	43,00
05847X0021	297380	2176550	Grosbreuil	Château-Gauthier	Forage	51,00
05847X0026	302460	2172310	Poiroux	Tortereau	Forage	44,00
05847X0027	299740	2173650	Talmont Saint Hilaire	Vendée Air Park	Forage	40,00
05847X0028	297410	2169340	Talmont Saint Hilaire	Les Grandes Groies	Forage	14,00
05848X0003	303150	2168820	Saint Hilaire la forêt	Le Pré Bas	Puits	9,00
05848X0026	308020	2174075	Saint Avaugourd des landes	Les Quatre Vents	Forage	57,00
05848X0041	308975	2172175	Saint Avaugourd des landes	Bois Renard	Forage	55,00
05848X0046	306860	2175220	Saint Avaugourd des landes	18 Rue René Fagot	Forage	65,00
05848X0047	302890	2167640	Saint Hilaire la forêt	21, Rue de l'océan	Forage	15,00
05848X0048	304470	2176650	Poiroux	Jossé	Forage	57,00
06072X0004	294775	2166120	Jard sur mer	Le Maroc	Piézomètre	4,00
06073X0001	296920	2165500	Jard sur mer	Colonie de vacances de la ville Stains	Puits	8,00
06073X0005	301640	2165870	Saint Vincent sur Jard	La Tigerie	Puits	13,68
06073X0009	300760	2166470	Saint Vincent sur Jard	Le Longeais	Puits	12,48
06073X0010	299850	2166150	Saint Vincent sur Jard	Les Aires	Puits	10,21
06073X0021	299610	2166220	Jard sur mer	Route des Aires	Puits	11,00
06073X0024	301630	2167060	Saint Vincent sur Jard	Les Noues	Sondage	15,00
06073X0044	299930	2164780	Jard sur mer	3, Impasse des Bécasses	Forage	13,00
06074X0034	305180	2164220	Longeville sur mer	Les Châtelaines	Puits	13,16
06074X0045	303890	2165080	Longeville sur mer	La Raisinière	Puits	14,65

Tableau 25 - Caractéristiques des points répertoriés en BSS

Indice	X L2	Y L2	Commune	Lieu-dit	Nature	Z (m NGF)
1	297948	2178839	Grosbreuil	La Gachetière	Puits	46,0
2	296574	2178609	Grosbreuil	Le petit Paris	Puits	36,0
3	293006	2177698	Sainte Foy	L'Alphonsière	Forage	51,0
4	296213	2173860	Talmont saint hilaire	La petite Garcillière	Puits	40,0
5	299867	2174595	Talmont saint hilaire	La Landes	Puits	49,0
6	299634	2173549	Talmont saint hilaire	La Templerie	Puits	41,5
7	302934	2174583	Poiroux	Rue de la Burelière	Puits	35,0
8	297374	2170297	Talmont saint hilaire	489, Av de Luçon	Forage	17,0
9	306000	2171000	Avrillé	Puy Durand	Forage	47,0
10	304570	2172010	Avrillé	La Chagnollière	Puits	45,0
11	304732	2165703	Longeville sur mer	La Violette	Forage	18,0
12	298998	2166892	Jard sur mer	La Davière	Puits	5,0
13	295186	2168619	Talmont saint hilaire	La Bourrie	Puits	4,5
14	295434	2168131	Talmont saint hilaire	34, Rue des salines	Forage	5,0
15	295232	2166958	Talmont saint hilaire	Le Port	Puits	4,0
16	296925	2165479	Jard sur mer	Colonie de vacances de la ville Stains	Puits	7,5
17	296186	2169588	Talmont saint hilaire	La Grenetière	Puits	21,0
18	296141	2169577	Talmont saint hilaire	La Grenetière	Puits	20,0

Tableau 26 - Caractéristiques des points non répertoriés en BSS

3.7.3. Résultats des campagnes de terrain

Le contexte géologique du talmondais a montré qu'au niveau de la zone d'étude, le sous-sol est constitué de deux types de formations. Il est en effet possible de distinguer un domaine de socle composé de schistes, de micaschistes et de granites au Nord de Talmont Saint Hilaire et un domaine sédimentaire au Sud. Cette diversité risque d'engendrer des différences de comportement au niveau des aquifères dont il faut tenir compte dans l'interprétation des résultats. Le tableau 27 et la figure 52 suivants permettent de visualiser l'évolution de la profondeur du toit de la nappe et des variations de niveau piézométrique au cours des campagnes réalisées en fonction des formations géologiques.

Remarque : dans les données collectées, l'existence de pompages, dans ou à proximité des ouvrages mesurés, se manifeste ponctuellement par des incohérences dans l'historique des profondeurs des eaux souterraines. L'analyse piézométrique, pour limiter ce « bruit », porte donc sur des comportements moyens.

Lithologie	Niveaux piézo (m)	Profondeur de l'eau (m)	Amplitude piézo (m)
alluvions fluvio-marines	2	2,6	1,1
argiles, sables et calcaires gréseux	6	3,5	1,6
calcaires argileux ou graveleux	6	9,4	2,1
dunes et cordons littoraux	4	4,5	0,6
granites	51	3,9	1,8
micaschistes, paragneiss à staurotide-grenat	17	2,8	1,7
schistes ardoisiers, quartzites	36	2,7	2,1

Tableau 27 - Niveaux piézométriques, profondeur de l'eau et amplitude piézométrique par formation géologique déduite des moyennes des valeurs mesurées lors des différentes campagnes de terrain

Il apparaît ainsi que les niveaux piézométriques mesurés en lien avec la nature des formations géologiques se corrélient avec la topographie. Les niveaux piézométriques les plus élevés correspondent aux formations géologiques en situation topographique haute. Les profondeurs d'eau apparaissent relativement homogènes, de l'ordre de 3 m, à l'exception des calcaires où les nappes se situent à 9 m de profondeur en moyenne. La moyenne de 4,5 m pour les dunes et cordons littoraux correspond à 3 points où la profondeur d'eau est de l'ordre de 3 m et un point où elle est supérieure à 9 m.

La plus grande profondeur de la nappe dans les calcaires, notamment par rapport aux schistes et aux granites situés en crête de bassin versant, peut être liée à des différences de propriétés (perméabilité, porosité...). Compte tenu du contexte, l'explication pourrait être une plus forte intensité des pompages, en lien avec les activités agricoles (irrigation de cultures). Il est vrai aussi que les nappes calcaires offrent en général des débits intéressants. Compte tenu de l'intérêt de la nappe, il serait important de vérifier son niveau d'exploitation. En effet, la surexploitation de cet

aquifère côtier pourrait entraîner une progression du biseau salé vers l'intérieur des terres et à terme mettre en danger la qualité de l'eau (salinisation).

L'amplitude de la variation du niveau piézométrique apparaît faible pour l'ensemble des formations : 1 à 2 m en moyenne sur les 2 ans d'observation.

Les variations du niveau piézométrique atteignent localement jusqu'à 9 m selon les périodes. Cette forte baisse est observée au mois de juillet 2005, période de sécheresse marquée. Elle peut être liée en partie à des pompages plus importants (et n'a donc pas été pris en compte dans les calculs d'amplitude piézométrique moyenne).

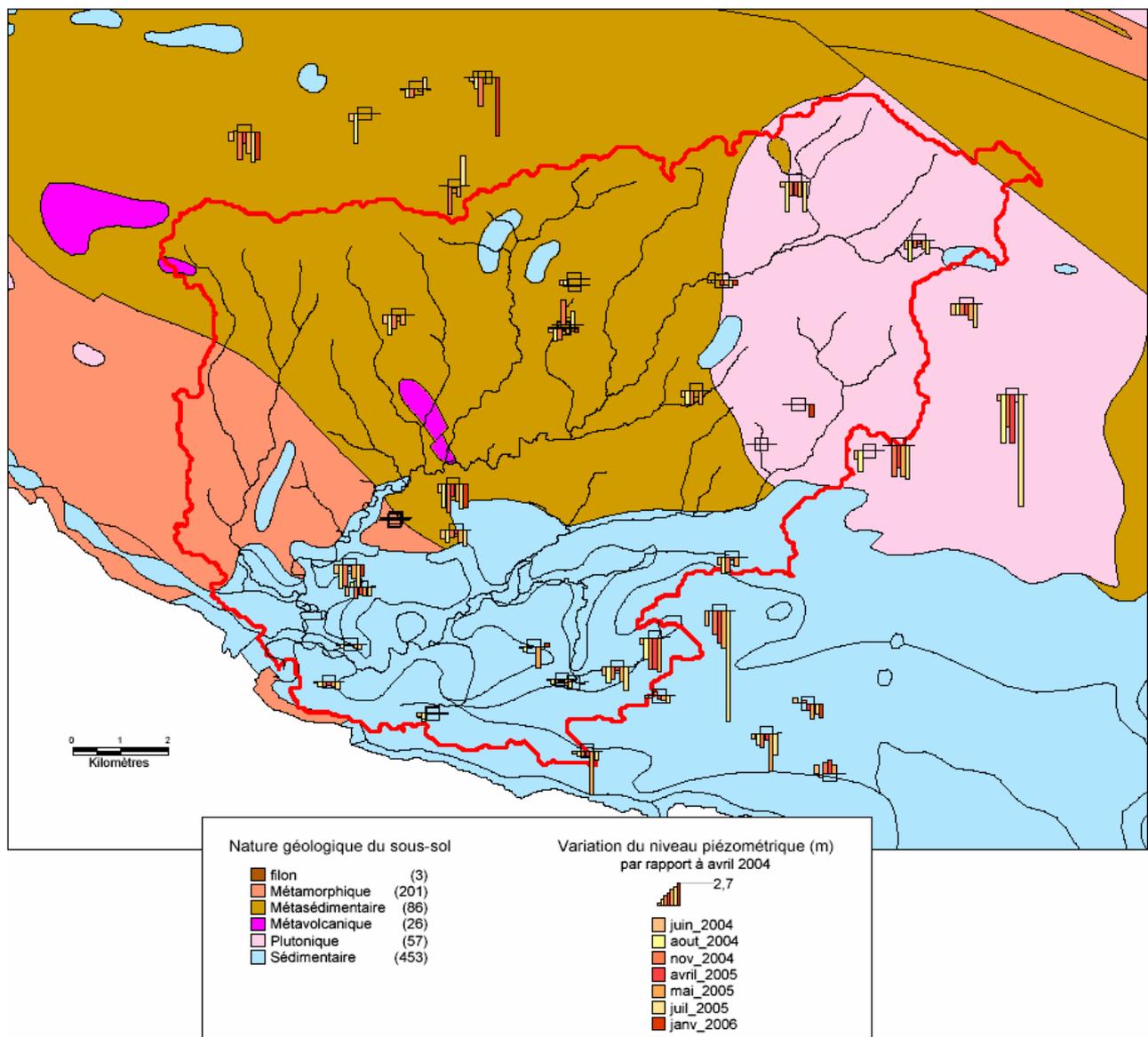


Figure 52 : Variations du niveau piézométrique par rapport à avril 2004 mesurées lors des campagnes de terrain (limite du bassin versant en rouge)

Par ailleurs, des analyses chimiques des teneurs en nitrates, sulfates et chlorures ont été effectuées en juillet 2005 sur les eaux souterraines prélevées dans 7 des ouvrages suivis dans le cadre du réseau piézométrique.

Ces prélèvements ont également donné lieu à une mesure des paramètres physicochimiques. Les résultats correspondants sont présentés dans le Tableau 28.

Indice	Socle/ Sédim	Commune	Lieu-dit	pH	t°	Conducti	NO3 (mg/L)	SO4 (mg/L)	Cl (mg/L)
05847X0021	Socle	Grosbreuil	Château-Gauthier	6,52	16,1	598	60	0	100
05847X0026	Socle	Poiroux	Tortereau	7,06	19,8	489	10	50	80
05848X0003	Sédim	Saint Hilaire la forêt	Le Pré Bas	7,27	21,7	1581	25	200	280
06073X0010	Sédim	Saint Vincent sur Jard	Les Aires	7,1	17,5	999	75	84	80
06074X0045	Sédim	Longeville sur mer	La Raisinière	6,98	16,5	1171	75	0	100
1b	Socle	Grosbreuil	La Gachetière	6,08	18,2	466	75	0	80
13	Sédim	Talmont saint hilaire	La Bourrie	7,29	17,1	1961	0	200	320

Tableau 28 - Résultats des analyses semi-quantitatives sur les eaux souterraines

Les conductivités apparaissent relativement élevées dans l'ensemble. En milieu sédimentaire, une apparente corrélation semble lier des conductivités hautes et la présence de chlorures et sulfates en solution (influence marine).

3.7.4. Essai de modélisation de la surface piézométrique

Une modélisation de l'ensemble de la surface piézométrique a été réalisée afin de comprendre les phénomènes dans leur globalité. La méthode générale pour réaliser une carte piézométrique consiste à mesurer de façon synchrone, le niveau d'eau dans les piézomètres puis à interpoler les valeurs pour obtenir la surface piézométrique.

Le comportement des eaux souterraines en domaine de socle et en domaine sédimentaire étant différent, deux méthodes de représentation ont été utilisées. En domaine de socle, nous avons fait appel à la méthode mise au point et validée par Robert Wyns (Wyns, 1998 ; Wyns & al., 2004) tandis que pour le domaine sédimentaire, la méthode classique de représentation a été utilisée.

Principe de la modélisation

En domaine sédimentaire, la méthode classique consiste à réaliser une interpolation par krigeage entre les points repérés en coordonnées Lambert II et qui ont fait l'objet de relevés avec la sonde. Les points représentant la surface de base des thalwegs sont également pris en compte. Cette opération est réalisée à l'aide du logiciel Surfer 7.0 et une carte piézométrique est obtenue.

En domaine de socle où la piézométrie suit globalement la topographie, la méthode traditionnelle crée d'importantes erreurs d'interpolation au niveau des vallées et des plateaux si la densité de mesures est trop faible (cf. figure 53).

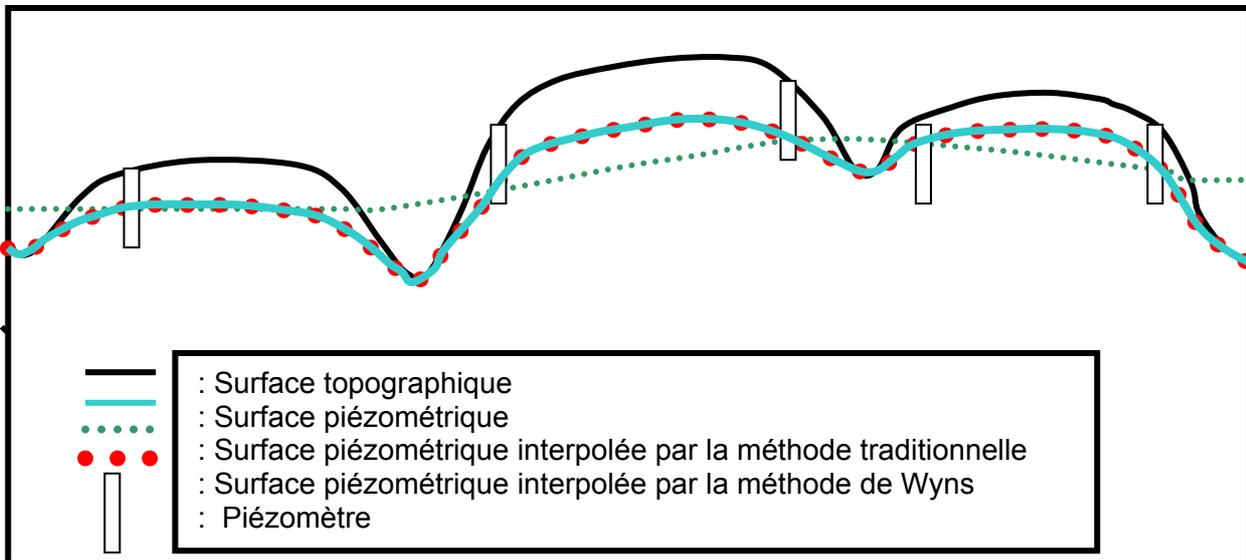


Figure 53 - Erreurs dues à l'interpolation par la méthode traditionnelle.

La théorie utilisée est alors différente. Elle est basée sur une relation linéaire entre l'altitude de la surface piézométrique, l'altitude de la surface de base de thalwegs à cours d'eau permanents (SBT) et l'altitude du sol. On considère que les rivières pérennes représentent les zones d'affleurement de la surface piézométrique qui remonte sous les plateaux lorsque l'on s'écarte des vallées. De ce fait, la surface piézométrique est toujours comprise entre la surface topographique et la surface enveloppe de base des thalwegs.

Cette corrélation linéaire relie d'une part la dénivellation entre l'altitude topographique et l'altitude de la SBT (« a » sur la figure 54) et d'autre part la dénivellation entre l'altitude de la surface piézométrique et celle de la SBT (« b » sur la figure 54).

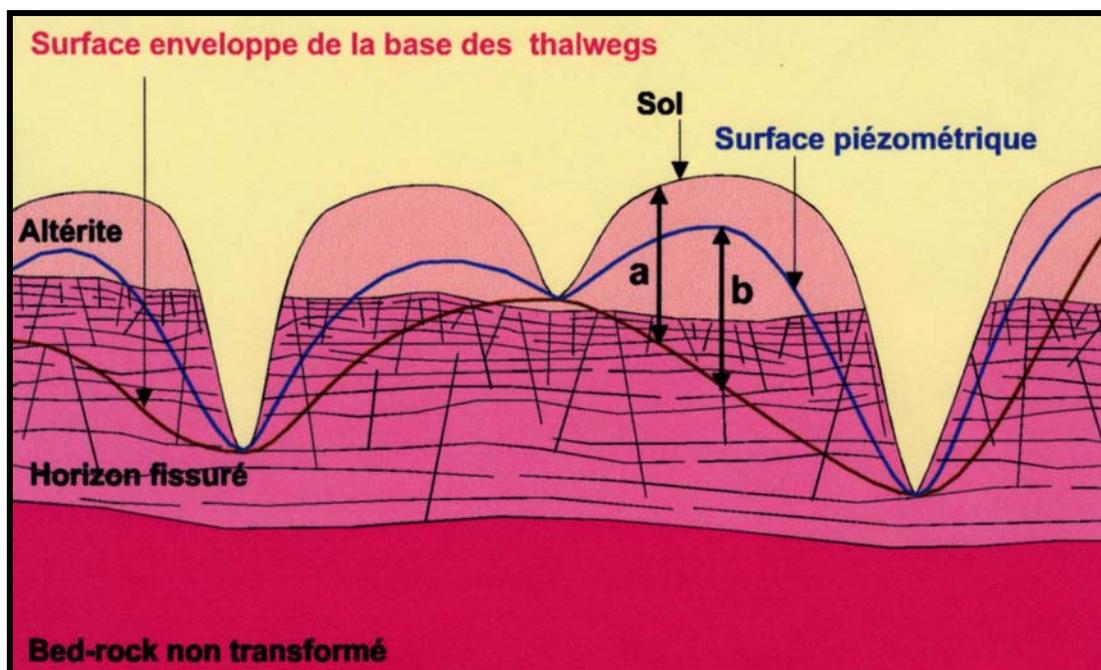


Figure 54 - Principe de modélisation de la surface piézométrique en domaine de socle.

Elle est déterminée de façon expérimentale avec les points réels de mesures et permet de calculer en tout point l'altitude de la surface piézométrique à partir de l'altitude du sol et de l'altitude de la surface enveloppe de base des thalwegs.

La surface enveloppe de base des thalwegs a été obtenue par :

- ✓ Discrétisation manuelle du réseau hydrographique pérenne issu de la BD carthage en utilisant le logiciel MapInfo 7.0 comme support.
- ✓ Croisement du semi de points avec le scan 25 de l'IGN pour obtenir l'altitude des points représentatifs du réseau hydrographique pérenne.
- ✓ Krigeage de l'altitude de ce semi de points à l'aide du logiciel Surfer 7.0 de façon à obtenir l'altitude de la SBT pour chaque maille de la grille générée.

La surface topographique est fournie par interpolation des données du modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 50 mètres. La même grille en X et en Y a été générée par krigeage avec Surfer 7.0.

Les données piézométriques mesurées sur le terrain sont ensuite intégrées. Pour chaque point de mesure sont calculés la distance a et la distance b . Ces valeurs sont ensuite reportées dans un diagramme binaire où « b » est fonction de « a ». Les points s'alignent suivant une droite dont il est possible de déterminer l'équation et le

coefficient de corrélation. La piézométrie est alors calculée en tout point à partir de la relation linéaire et des surfaces topographiques et de la base des thalwegs.

Au final, une carte a pu être établie pour chaque domaine. La dernière étape a permis l'obtention d'une carte unique en associant les valeurs de piézométrie obtenues dans la zone de socle et les valeurs obtenues dans la zone sédimentaire.

Surfaces piézométriques obtenues

Conformément à la méthodologie décrite précédemment, les deux surfaces nécessaires que sont la topographie (MNT) et la surface de base des thalwegs (SBT) ont été modélisées. Cette dernière a pu être interpolée à partir de 240 points repérés en X, Y et en Z. Pour chacun des 20 forages qui ont fait l'objet de mesure en domaine de socle, les valeurs en Z de la topographie et de la surface enveloppe de base des thalwegs ont pu être extraites et mises en relation avec la piézométrie observée lors des trois campagnes de terrain.

Cependant, avant de déterminer les corrélations $b = f(a)$ représentatives des trois instants de mesures, il convient de faire le calcul d'une valeur unique de l'ordonnée à l'origine de la droite de corrélation qui traduit l'encaissement de la rivière par rapport à ses berges. En théorie, lorsque l'on se situe au niveau des thalwegs à écoulement permanent, les valeurs de « a » et de « b » devraient être nulles. Les valeurs négatives de « b » que l'on obtient par le calcul représentent cet encaissement. Ceci peut s'expliquer par le fait que les valeurs de la topographie sont obtenues à partir de données numériques moyennées sur 50 m, et donc surévaluées dans les vallées tandis que la piézométrie est issue du terrain et donc plus proche de la réalité. Cet encaissement ne pouvant varier dans le temps, une valeur unique doit être choisie.

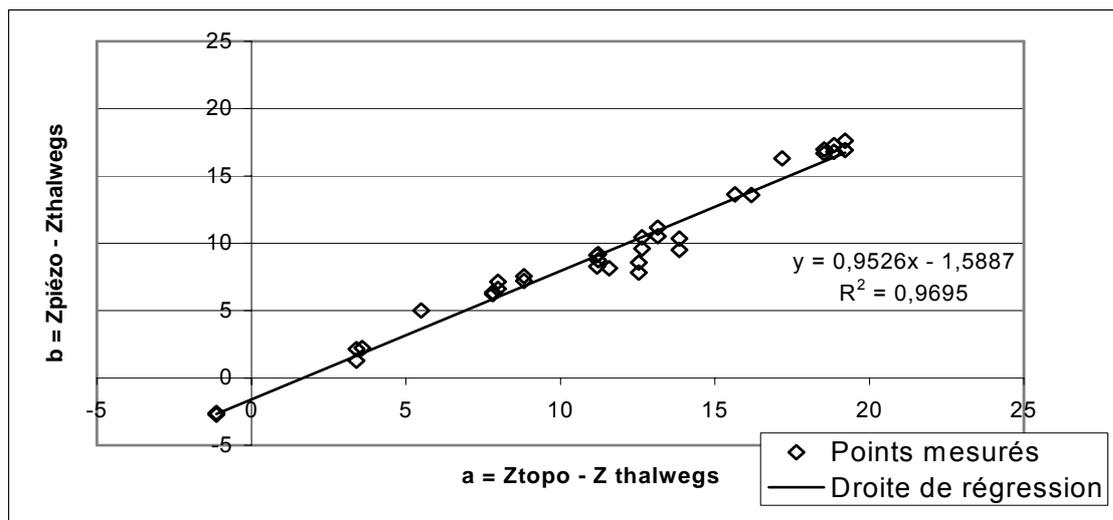


Figure 55 - Régression linéaire permettant d'obtenir l'encaissement moyen.

L'équation de régression linéaire entre « a » et « b » a ainsi pu être approchée afin d'obtenir l'encaissement moyen en utilisant les données récoltées lors des campagnes d'avril et de juin. Les résultats sont présentés sur la figure 56. La valeur retenue est de - 1,59 m.

En fixant cette valeur d'encaissement, les trois corrélations $b = f(a)$ ont pu être établies. Les résultats sont présentés sur la figure 56 et font apparaître les équations obtenues. Ainsi, les cartes de modélisation de la piézométrie ont pu être représentées sur l'ensemble de la zone de socle selon la méthode applicable dans ce domaine.

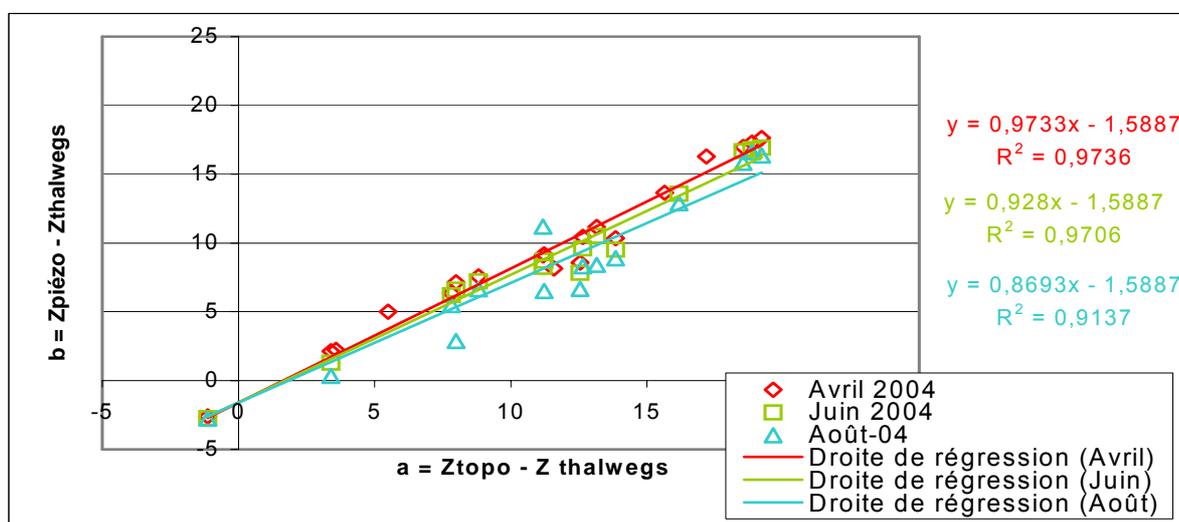


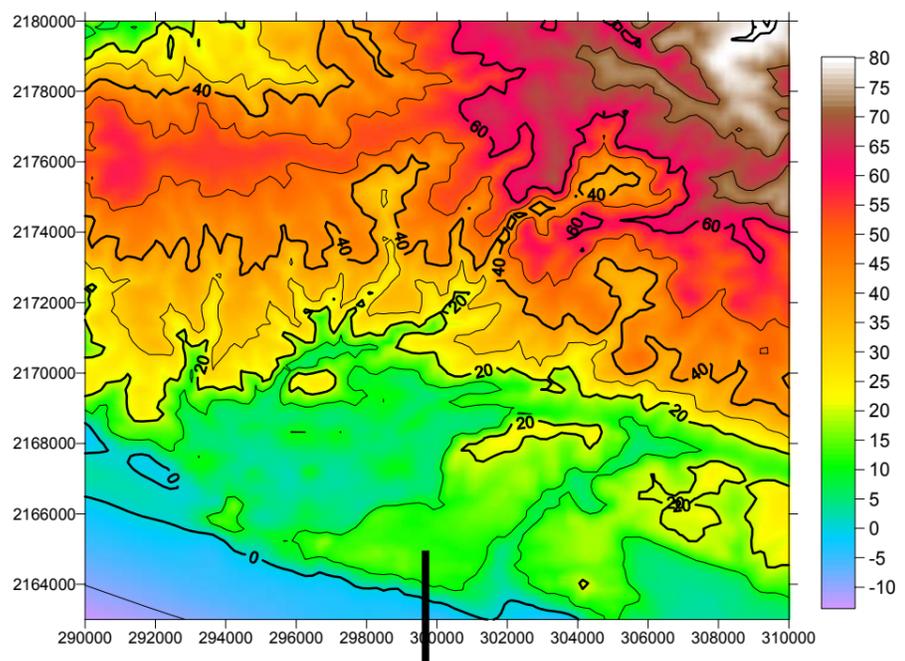
Figure 56 - Régression linéaire entre « a » et « b » pour chacune des trois campagnes.

Une modélisation a également été réalisée en se basant sur la méthode classique. Les points ayant fait l'objet de mesures ont été ajoutés aux points de la SBT. La carte piézométrique obtenue est alors valable sur les terrains sédimentaires uniquement.

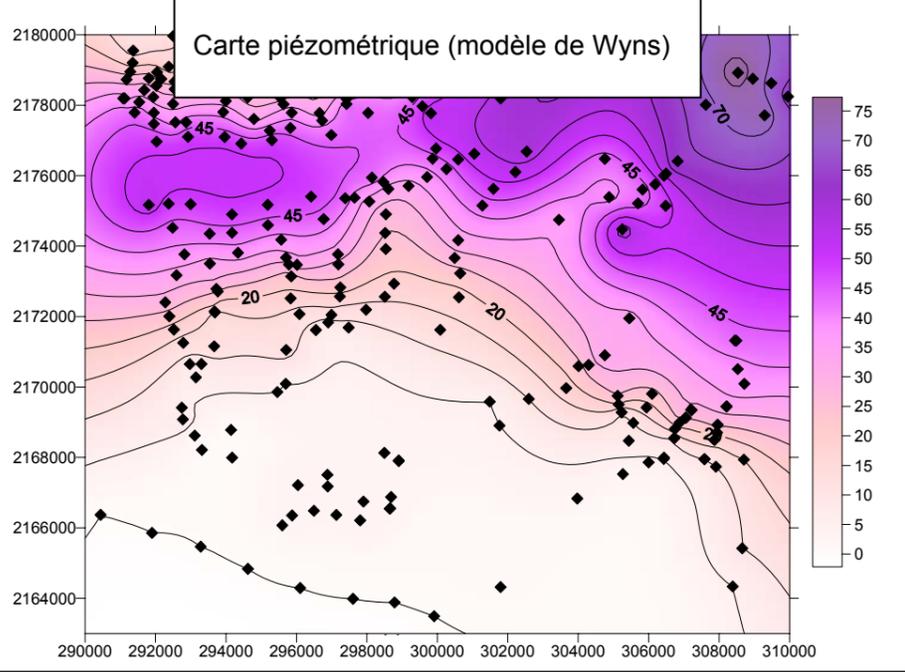
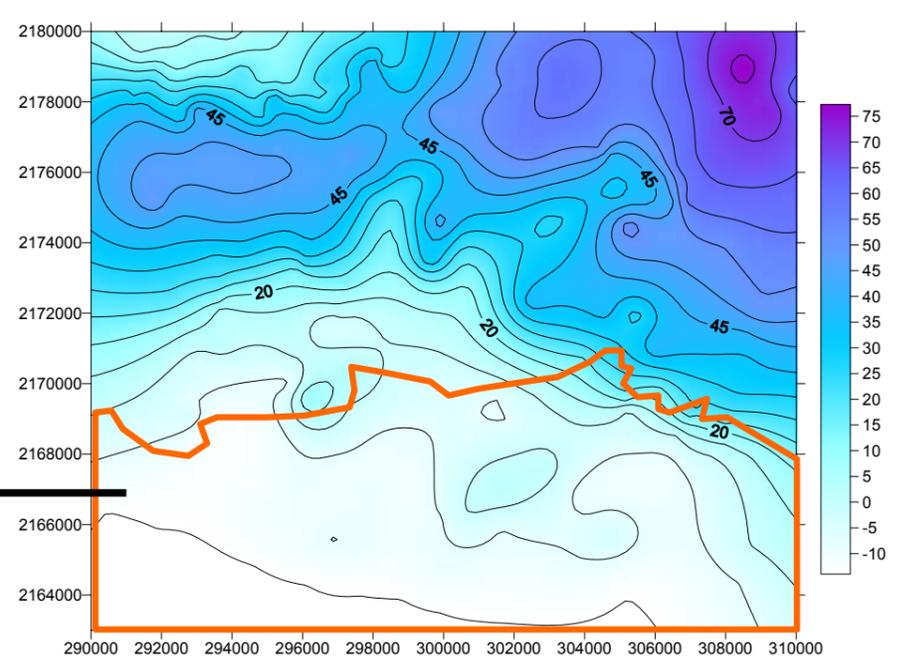
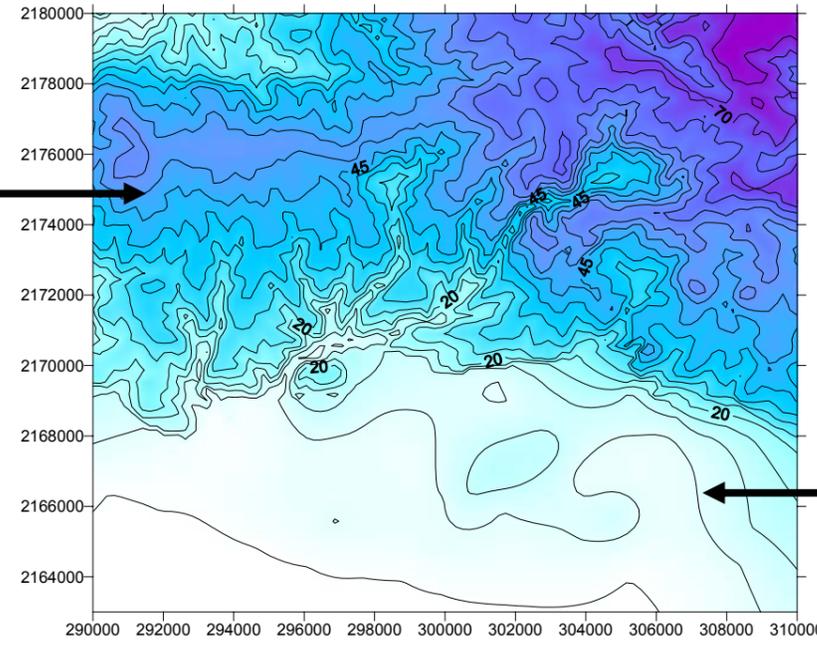
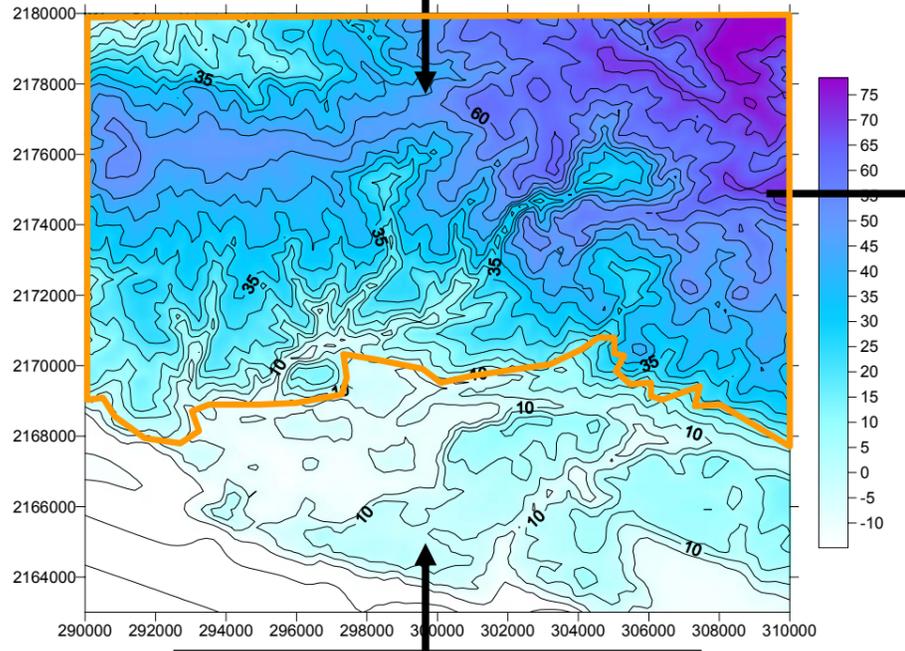
En associant les valeurs obtenues pour les deux types de modèles à leurs zones géographiques respectives, la carte piézométrique finale a pu être reconstituée. Le schéma récapitulatif de cette démarche cartographique est consultable sur la figure 57. Elle présente les résultats obtenus pour le mois d'avril 2004. Les deux autres cartes obtenues pour les campagnes du 7 et 8 juin ainsi que pour les 17 et 18 août 2004 sont présentées sur la figure 58. 2005 ayant été une année atypique (sècheresse exceptionnelle, d'où également des pompages plus importants ayant perturbé les piézométries) les données correspondantes n'ont pas été traitées.

Les trois surfaces piézométriques reconstituées font apparaître des différences de piézométrie non négligeables sur la période d'étude de quatre mois. Il est cependant difficile de les localiser et de les estimer avec précision. Pour cela, le raisonnement se pose en termes de variations piézométriques.

Afin de cartographier cette information, deux représentations ont à nouveau été réalisées à partir des données interpolées sur l'ensemble de la zone d'étude. La démarche cartographique reste la même que celle décrite précédemment.



: Cartographie de la topographie (m NGF)



Carte piézométrique intégrant les deux modèles

Carte piézométrique (modélisation traditionnelle)

Figure 57 - Schéma de la démarche cartographique de la piézométrie dans le Talmondais.
Exemple tiré de la campagne de relevés d'avril 2004.

: Interpolation de la surface enveloppe de base des thalwegs (m NGF)

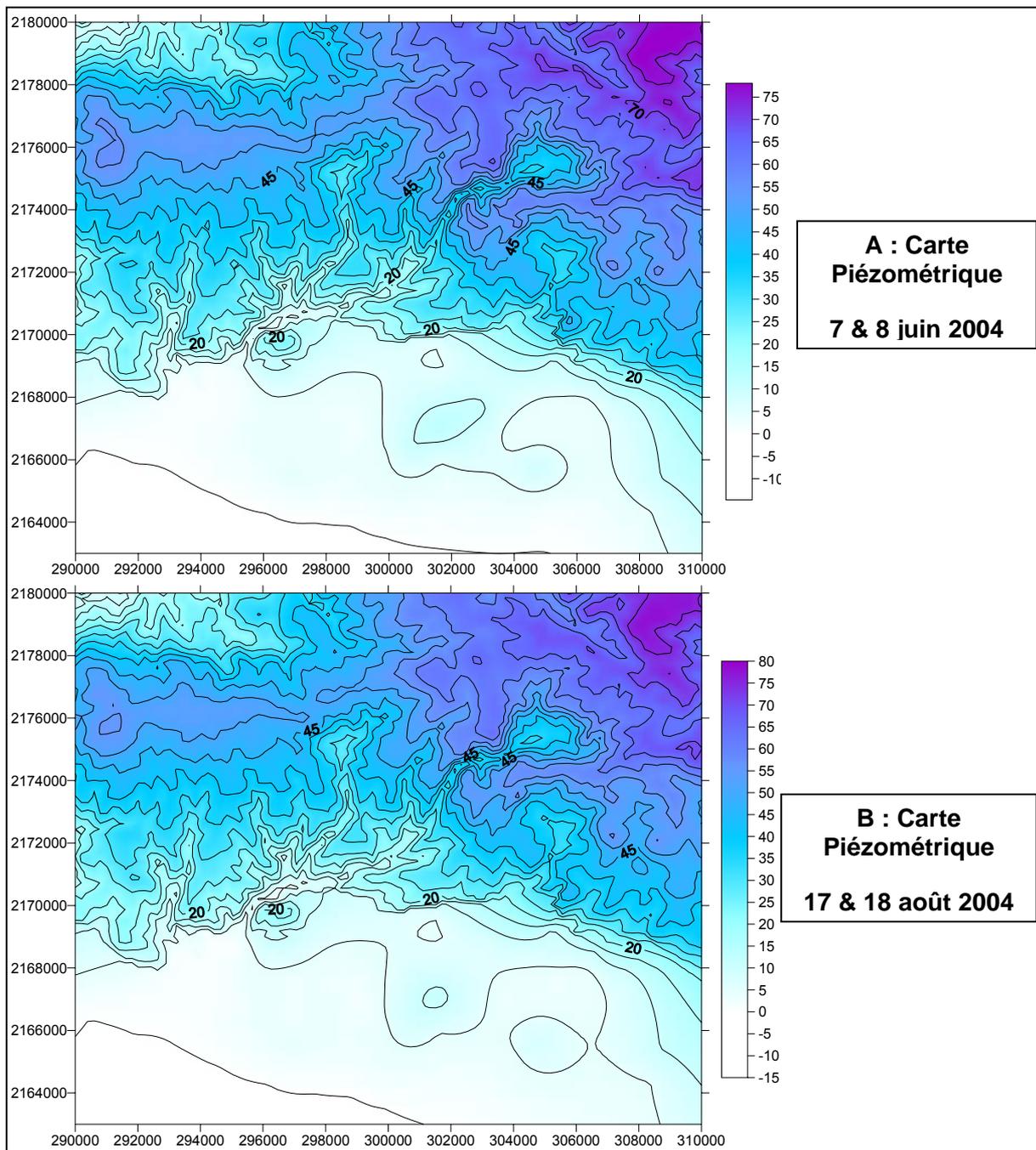


Figure 58 - Surfaces piézométriques interpolées entre avril et juin (A) et entre juin et août 2004 (B)

Etude des variations du niveau piézométrique

Les 2 cartes obtenues sont consultables sur la figure 59. La carte A présente les variations piézométriques modélisées entre avril et juin tandis que la carte B présente les variations entre juin et août.

Les résultats obtenus sont en accord avec les observations effectuées jusque là puisque les toits des nappes montrent une baisse générale. Quelques rares zones ont quant à elles vu leur niveau augmenter légèrement (en vert). Celles-ci sont localisées dans les fonds de vallées dans la portion amont du bassin versant et dans le domaine sédimentaire en zone marécageuse. En dehors de cette dernière observation de +1,29 mètre mis en évidence sur la carte B, ces hausses peuvent être mises en relation avec une possible interception locale de la topographie par la surface de base des thalwegs. L'incertitude du modèle doit également être prise en compte.

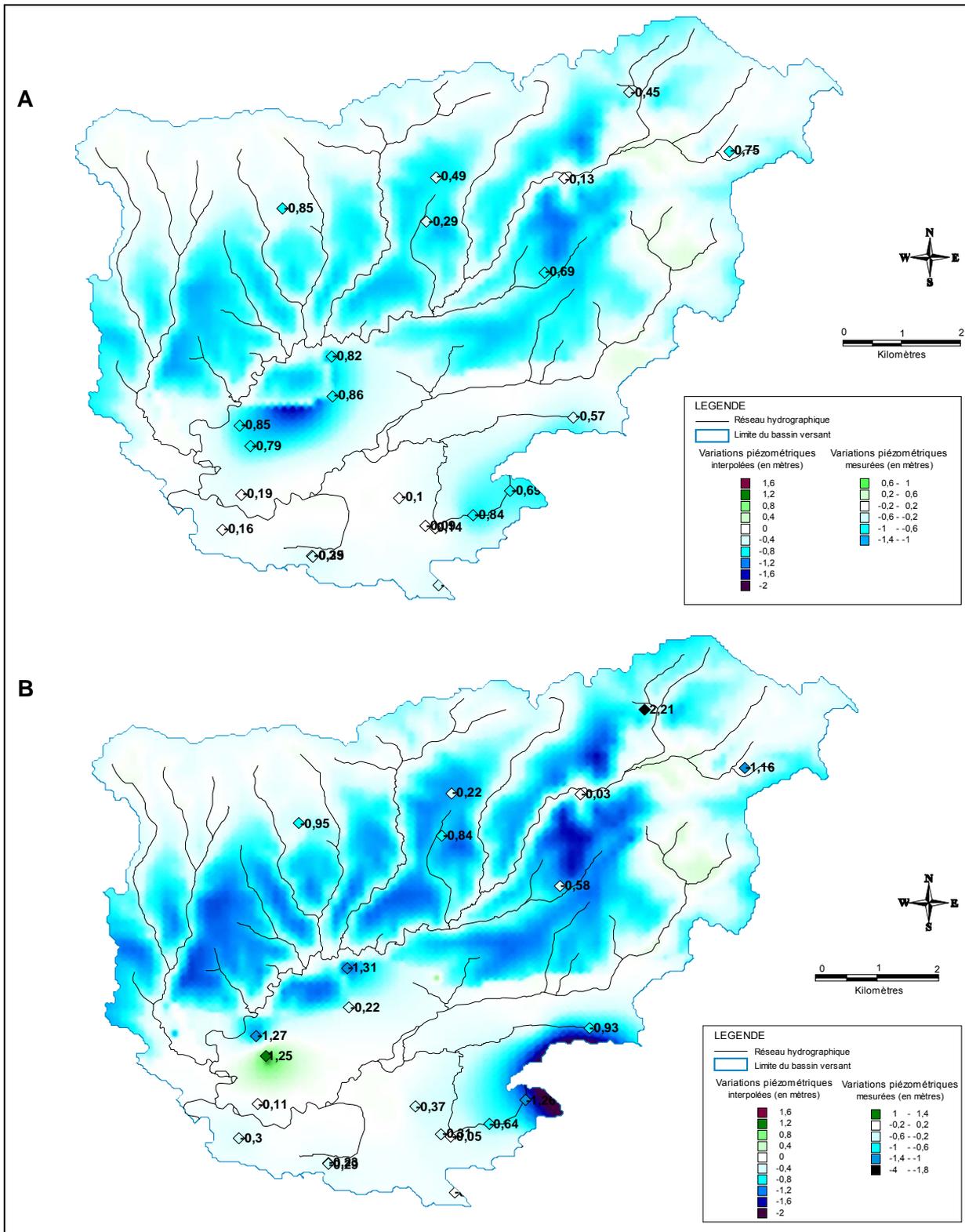


Figure 59 - Variations piézométriques interpolées entre avril et juin (A) et entre juin et août 2004 (B).

Les amplitudes de variations retenues sont de - 1,20 mètres au maximum durant les deux premiers mois et de - 1,80 mètres au cours des deux mois suivant. Ces variations maximum sont observées dans les zones de plateau aux interfluves tandis que les variations les plus faibles sont localisées au Sud du bassin versant dans le domaine sédimentaire et à proximité du réseau hydrographique du Payré.

Les résultats de cette modélisation ont ensuite été mis en relation avec les mesures effectuées *in situ*. Il en ressort que les interpolations sont généralement conformes aux observations. Il existe tout de même quelques points montrant des différences notables. La portion Nord-Est du bassin versant montre deux points dont les amplitudes observées sont supérieures au modèle. Elles ont été précédemment expliquées par l'exploitation agricole des forages situés à proximité. De plus, le point n°4, localisé sur le sous-bassin versant alimentant le ruisseau des rosais montre une baisse du niveau piézométrique supérieure à celle expliquée par le modèle. Les résultats de la campagne hydrologique de juillet 2004 avaient montrés que ce bras était à sec alors que les autres affluents situés dans les schistes montraient des débits spécifiques similaires de l'ordre de 0,15 l/s/km². Il semble donc qu'il puisse exister une spécificité particulière sur cet affluent qu'il faudra préciser dans la suite de l'étude. Des mesures complémentaires devront donc être réalisées afin d'expliquer ce phénomène.

Validité des modèles

Il s'agit enfin de discuter de la validité du modèle mis en place. Pour cela trois coupes (cf. figure 60), dont une Sud-Nord et deux Est-Ouest faisant apparaître la topographie, la surface de base des thalwegs ainsi que les trois courbes piézométriques interpolées, ont été réalisées.

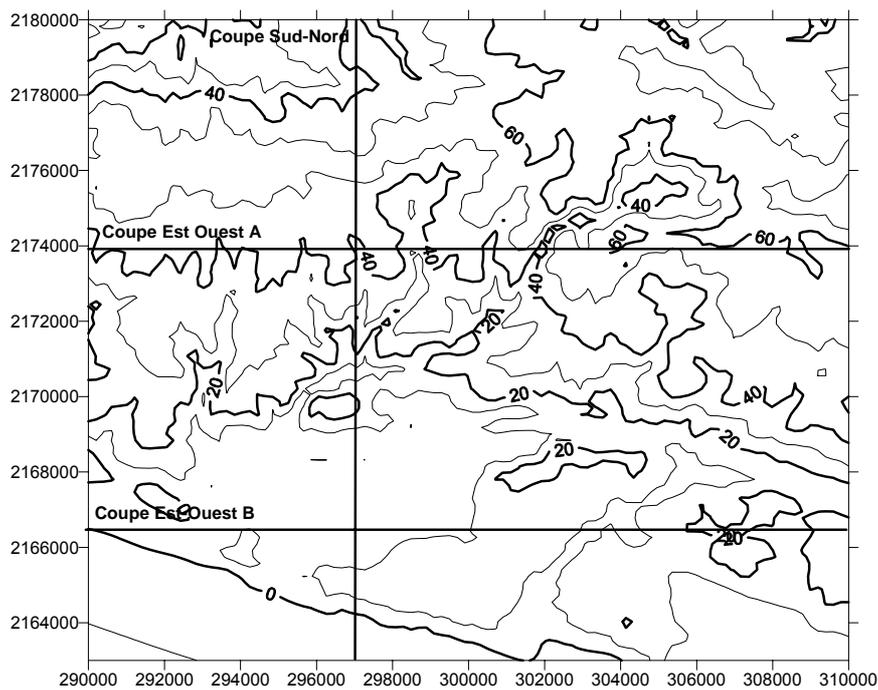


Figure 60 - Coupes verticales Sud-Nord et Est-Ouest

La coupe Sud Nord permet de visualiser les deux types de modélisation en même temps alors que les deux coupes Est-Ouest permettent de visualiser uniquement la modélisation en domaine de socle (coupe A) ou en domaine sédimentaire (coupe B).

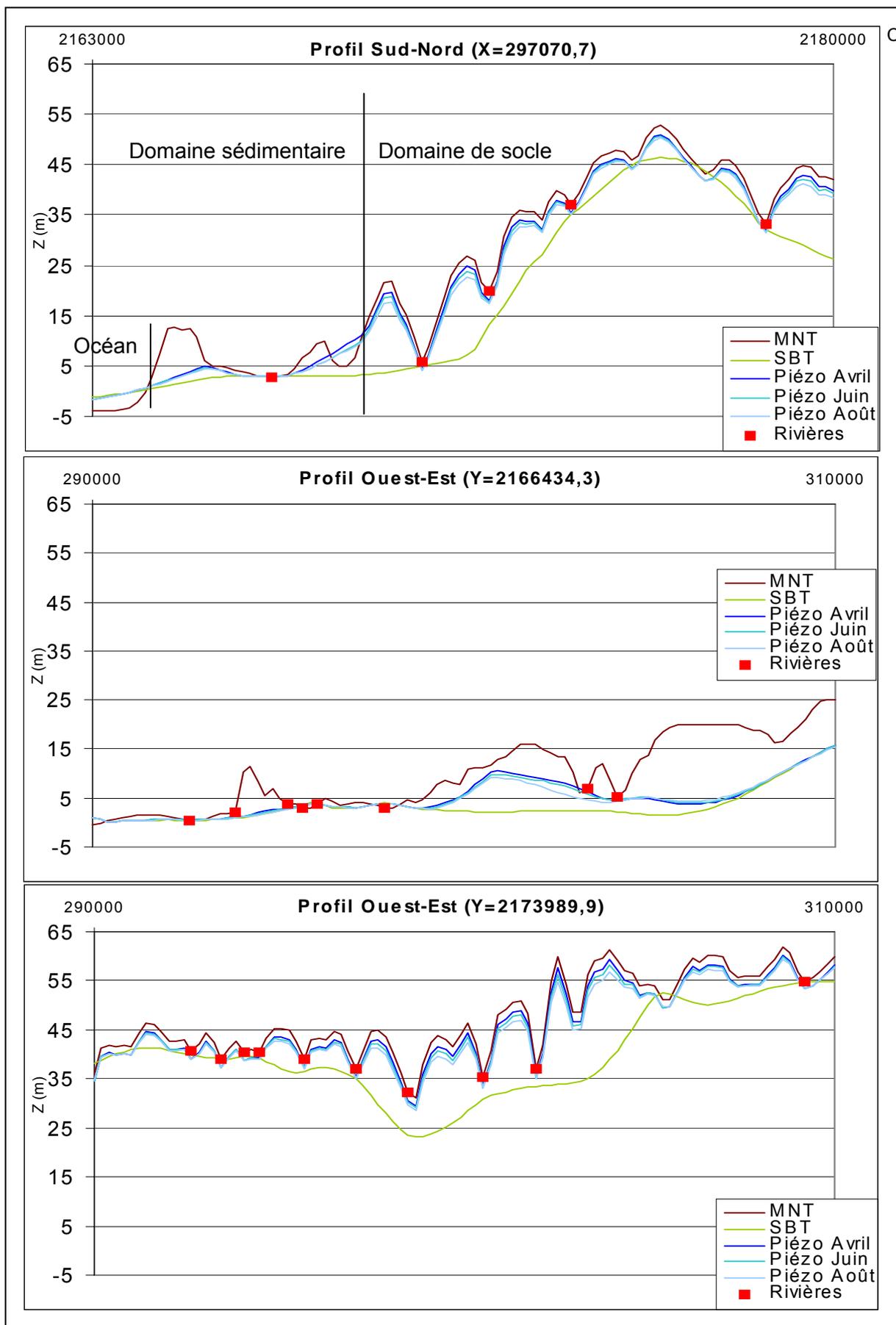


Figure 61 - Localisation des trois coupes verticales Sud-Nord et Est-Ouest (SBT : surface de base des thalwegs).

Globalement, les trois coupes (figure 61) permettent de montrer que sur l'ensemble des coupes, la SBT tangente la topographie au niveau de la majeure partie des points de rivières (17 sur 23). En conséquence, « a » s'annule dans les vallées et la valeur de l'encaissement est respectée puisque la piézométrie ne se situe jamais plus bas que la valeur de -1,58 m. Cependant, deux problèmes majeurs peuvent être mis en évidence. En effet, on remarque que la surface piézométrique intercepte la topographie au niveau de certaines zones sédimentaires. Cela peut s'expliquer par un manque de mesures piézométriques sur le terrain et par un manque de données concernant la surface de base des thalwegs. Enfin, la méthode de krigeage peut être également mise en cause. Le second problème est que la surface de base des thalwegs est parfois sous-estimée par rapport au MNT (6 sur 23).

Etant à l'origine de la détermination de la surface piézométrique par le calcul de l'indice « a », ce décalage peut entraîner des approximations de la piézométrie. Cette sous-estimation peut quant à elle s'expliquer par une origine des données différentes. En effet, la topographie est obtenue à l'aide du MNT tandis que la SBT est générée à partir du scan 25.

3.8. SUIVI DE LA SEDIMENTATION EN ZONE ESTUARIEENNE

3.8.1. Présentation et objectifs

L'activité ostréicole s'est développée dans l'estuaire du Payré au niveau de la confluence de ses différents affluents. C'est donc dans cette zone estuarienne que se situe l'enjeu le plus important. Face aux problématiques d'envasement et d'ensablement des parcs à huîtres auxquels font face les ostréiculteurs, il s'avère nécessaire de mettre en évidence la dynamique hydrologique qui contrôle la mise en place des différents faciès de sédimentation rencontrés sur les bords et au fond des berges. L'origine et la nature des matériaux qui sont rencontrés dans cet estuaire doivent donc être mises en évidence, de même que l'existence et la localisation des zones d'érosion et de sédimentation.

Afin d'acquérir ces informations, une campagne de prélèvement des sédiments superficiels a été entreprise. Elle a permis le prélèvement de sédiments sur berge au niveau de 33 points différents. 29 de ces points sont localisés en zone influencée par la marée dynamique et les 4 points restants sont en dehors de son influence. Les analyses granulométriques ainsi que les teneurs en matière organique ont été déterminées sur l'ensemble des points. Les teneurs en carbonates et les compositions chimiques en éléments majeurs et traces ont été analysées sur 7 échantillons.

3.8.2. Localisation des prélèvements de sédiments superficiels

La Figure 62 et le tableau 29 présentent l'ensemble des points qui ont fait l'objet de prélèvements sédimentaires superficiels (localisations et analyses effectuées). Pour le

point 19, deux prélèvements (le second est noté « BIS ») ont été réalisés afin d'éviter au maximum une possible contamination par le sédiment qui glisse des berges autour des piles du pont tandis que pour le point 22, deux prélèvements ont été nécessaires afin de différencier un sédiment superficiel argileux de quelques millimètres d'épaisseur (22BIS), d'un second sédiment sableux situé en dessous (22).

Unité hydrologique	N° prélèvement	X LII	Y LII	G	MO	Chimie
Estuaire	1	293579	2166298	Oui	Oui	Oui
	2	293531	2166639	Oui	Oui	Oui
	3	293452	2166996	Oui	Oui	-
	4	293684	2166818	Oui	Oui	-
	5H	293934	2166666	Oui	Oui	-
	5B	293879	2166666	Oui	Oui	-
	6	294143	2167012	Oui	Oui	-
	7	294190	2167115	Oui	Oui	-
	8	294291	2166996	Oui	Oui	-
	9	294558	2167084	Oui	Oui	-
	10	294296	2167366	Oui	Oui	-
Bras Ouest : Petit chenal des hautes mers au Payré	11	294317	2167505	Oui	Oui	-
	12	294363	2167620	Oui	Oui	-
	13	293756	2167981	Oui	Oui	Oui
	14	293113	2168612	Oui	Oui	-
	15	293073	2170164	Oui	Oui	Oui
Bras Talmont : Chenal du Payré	16	294490	2168596	Oui	Oui	Oui
	17	295213	2169112	Oui	Oui	-
	18	296193	2170137	Oui	Oui	Oui
	19	297825	2170799	Oui	Oui	-
	19bis	297857	2170831	Oui	Oui	-
Bras Sud : Ruisseau de l'île Bernard	20	294490	2166885	Oui	Oui	-
	21	294649	2166854	Oui	Oui	-
	22	294950	2166750	Oui	Oui	-
	22bis	294974	2166734	Oui	Oui	-
	23	295145	2166710	Oui	Oui	Oui
	24	295177	2166603	Oui	Oui	-
	25	295483	2166452	Oui	Oui	-
	26	295836	2166337	Oui	Oui	-
	27	296432	2167016	Oui	Oui	-
	28	297527	2167596	Oui	Oui	-
	29	299230	2168267	Oui	Oui	-
	30	300207	2169430	Oui	Oui	-

Tableau 29 - Localisation des points de prélèvements de sédiments superficiels et analyses pratiquées (XLII : X Lambert II, Y LII : Y Lambert II, G : granulométrie, MO : matière organique)



Figure 62 - Localisation des points de prélèvements de sédiments superficiels (Payré)

3.8.3. Analyses granulométriques

Résultats des mesures

Le Tableau 30 montre les principaux résultats obtenus par granulométrie laser. Les tailles moyennes, les médianes et le mode principal ainsi que le coefficient de dispersion D75/D25 de chacun des échantillons sont précisés. De plus, les prélèvements sont présentés par unité hydrologique.

La taille moyenne des particules renvoie à la tendance centrale d'un échantillon. Le mode correspond quant à lui à la classe granulométrique la plus représentée, c'est à dire, la plus fréquente, tandis que la médiane définit la taille pour laquelle il existe autant de particules plus fines que de particules plus grossières. Enfin, le coefficient de dispersion (D75/D25) correspond au rapport entre le diamètre faisant passer 75% du poids de l'échantillon (D75) sur le diamètre faisant passer 25% du poids de l'échantillon (D25). Il permet de caractériser l'évasement de la courbe granulométrique du prélèvement étudié, et donc le tri. Plus sa valeur est proche de 1 et plus l'échantillon est homogène et bien trié.

Le tableau 30 fait apparaître des faciès sédimentaires très différents selon leur milieu de dépôt et les caractéristiques géométriques, dynamiques et énergétiques de celui-ci. Il est en effet possible de faire ressortir un ensemble de 12 points sableux (1, 2, 4, 5B, 5H, 6, 8, 9, 10, 20, 22 et 23) et de 21 points vaseux à tendance limoneuse (3, 7, 11 à 19BIS, 21, 22BIS et 24 à 30). Les 4 bandes grisées repérées sur le tableau permettent de visualiser les deux sédiments les plus grossiers (en gris clair) et les deux sédiments les plus fins (en gris sombre). Ainsi, la taille moyenne des particules d'un échantillon passe de 473 μm pour le point 5B à 5 μm pour le point 27.

De plus, deux modes principaux ont été individualisés permettant d'identifier deux types de sédiments différents. Le mode représentant les particules les plus grossières oscille autour de diamètres de particules de 350 μm et 280 μm et renvoie à des sables moyens tandis que le second mode, d'environ 15 μm , renvoie à un sédiment limoneux. Enfin, pour le coefficient de dispersion, les valeurs obtenues sont comprises entre 1,42 pour le point 5H et 5,69 pour le point 30.

La Figure 63 et la Figure 64 permettent de visualiser la répartition de ces différents faciès sédimentaires en faisant apparaître la taille moyenne des particules et le coefficient de dispersion. On observe alors deux grands ensembles sédimentaires.

Unité hydrologique	N° prélèvement	Moyenne (µm)	Médiane (µm)	Mode principal (µm)		D75/D25
				Sable	Limon	
Estuaire	1	465	426	335	-	2,22
	2	299	288	282	-	1,44
	3	7	8	-	9	3,46
	4	448	419	373	-	1,79
	5B	473	417	356	-	2,10
	5H	276	272	269	-	1,42
	6	307	325	295	-	1,77
	7	8	10	-	10	3,87
	8	295	318	315	-	1,50
	9	336	310	295	-	1,56
	10	332	312	295	-	1,50
Bras Ouest : Petit chenal des hautes mers au Payré	11	8	9	-	10	3,74
	12	8	10	-	14	3,55
	13	8	10	-	11	3,74
	14	8	10	-	11	3,72
	15	26	26	-	25	4,46
Bras Talmont : Chenal du Payré	16	8	9	-	11	3,73
	17	8	9	-	10	3,90
	18	8	10	-	12	3,72
	19	15	17	-	20	4,10
	19 BIS	13	15	-	16	4,37
Bras Sud : Ruisseau de l'île Bernard	20	230	281	269	-	1,58
	21	31	34	234	-	23,46
	22	161	279	282	-	1,85
	22 BIS	9	11	-	18	4,09
	23 (*)	175	-	300	-	38,75
	24	5	6	-	12	3,69
	25	9	10	-	12	3,87
	26	7	9	-	10	3,78
	27	5	6	-	13	3,92
	28	8	9	-	17	4,54
	29	6	7	-	18	4,08
	30	20	22	-	19	5,69

Tableau 30 - Tableau récapitulatif des principaux résultats de l'analyse granulométrique

* : un problème analytique ayant entaché la mesure pour ce point, le profil du point 23 n'est pas représenté sur les figures qui suivent.

Le premier ensemble est situé à l'aval de l'estuaire. Il est composé essentiellement de faciès sableux dont la taille moyenne est comprise entre 250 μm et 480 μm , tandis que les coefficients de dispersion sont relativement faibles (de l'ordre de 1,5). Le tri granulométrique peut alors être considéré comme bon. Les points 1, 4 et 5B sont les plus grossiers (environ 470 μm) et les moins bien classés (environ 2).

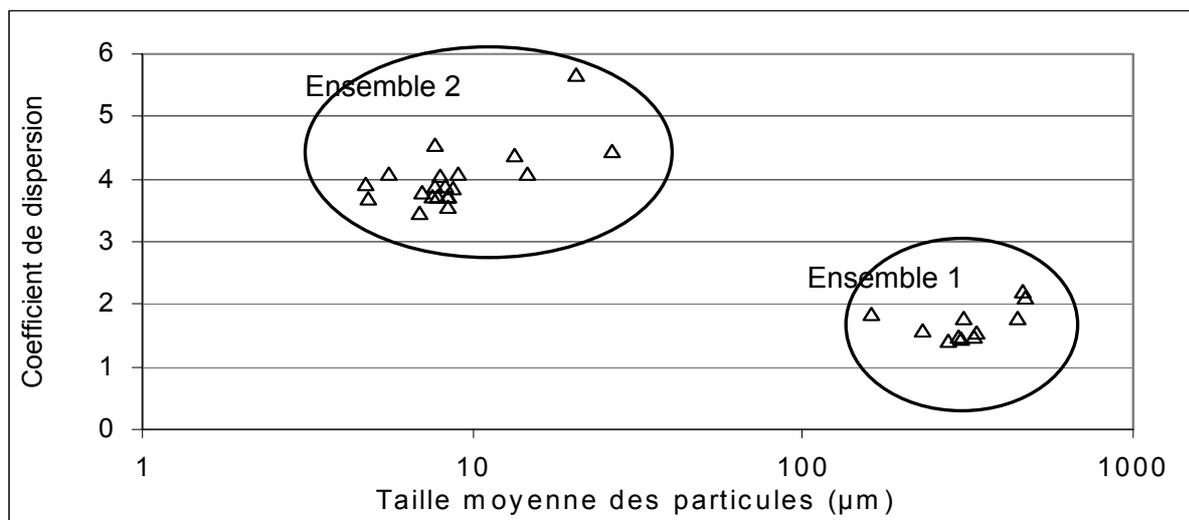


Figure 63 - Diagramme binaire montrant la relation entre la moyenne et la coefficient de dispersion des échantillons

Toutefois, deux points se démarquent au sein de cette unité. En effet, les points 3 et 7 sont en réalité des vases composées en grande majorité de limons et d'argiles dont les moyennes sont de 7 et 8 μm et dont les coefficients de dispersion montrent des valeurs plus élevées (3,46 et 3,87).

Le second ensemble sédimentaire est situé quant à lui plus à l'amont. La taille moyenne des particules est alors d'environ 5 à 20 μm tandis que le coefficient de dispersion est de l'ordre de 4. Il s'agit alors des faciès vaseux.

De plus, la zone de transition entre ces deux ensembles se situe entre les points 11, 21, 22, 22BIS et 23. Cette zone se localise au niveau de la confluence des différents affluents, soit un peu plus de 2 kilomètres en amont du trait de côte. Cependant, les sables marins remontent plus loin le long du bras Sud. En effet, ils sont observés jusqu'au point n°23. Cela peut s'expliquer par la configuration du chevelu qui engendre une dynamique hydrologique plus importante et permet donc la remontée des sables plus haut dans le cours d'eau.

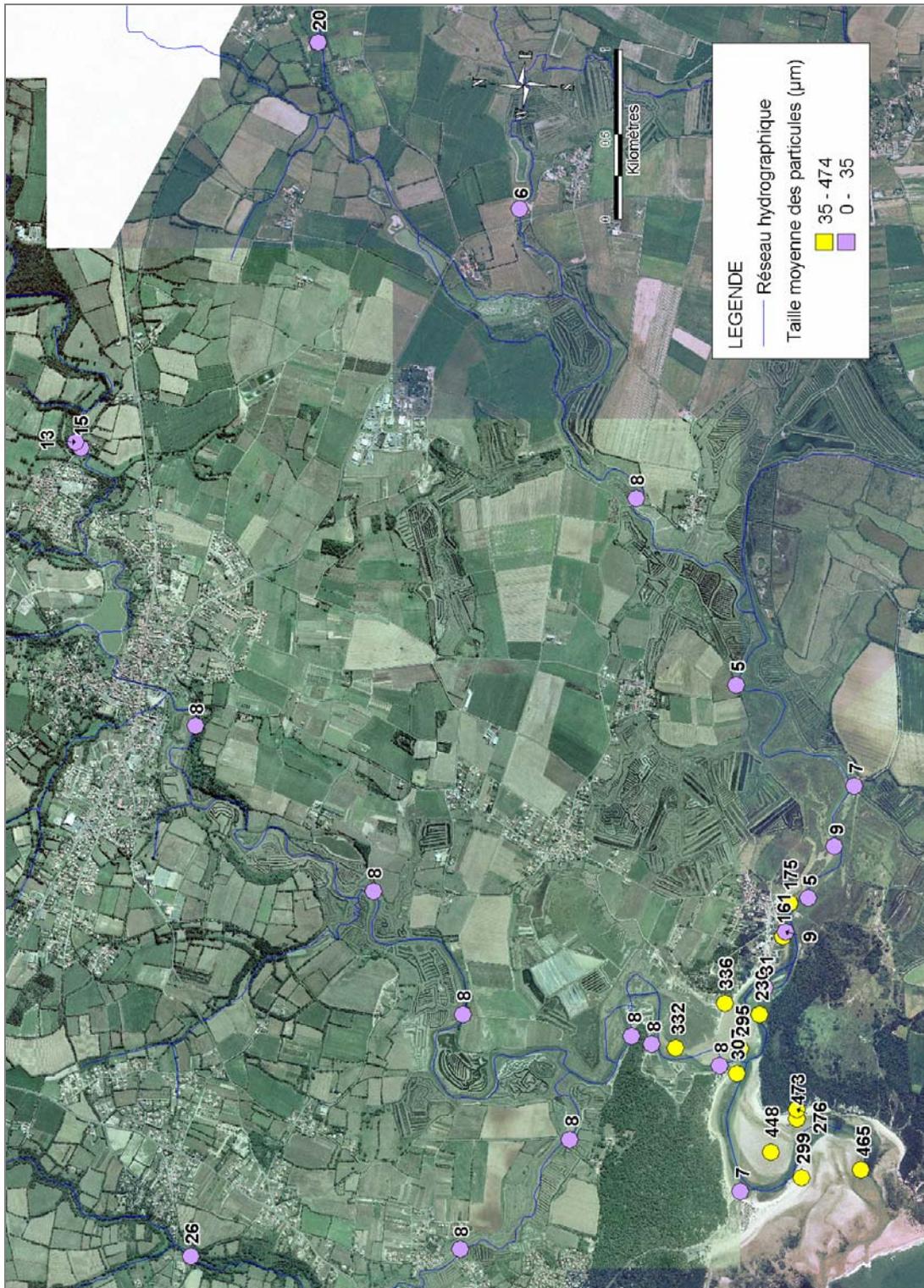


Figure 64 - Répartition des différents faciès sédimentaires rencontrés sur la zone (Payré) et taille moyenne des particules

• Apport des analyses granulométriques

Finalement deux types de faciès sédimentaires ont été mis en évidence ; des sables à l'aval et des vases argileuses à l'amont. Cette répartition est logique puisque les apports fluviaux amènent des particules fines à l'estuaire. Les sables rencontrés plus à l'aval ont donc une origine marine. Afin de caractériser plus précisément le fonctionnement du système estuarien et la mise en place des faciès rencontrés, il s'agit de détailler davantage les résultats granulométriques obtenus. Les deux grands ensembles sédimentaires vont donc être précisés avant de s'intéresser aux zones où sont implantés les parcs à huître.

Ensemble sédimentaire sableux

• Caractérisation de l'ensemble sédimentaire sableux

Afin de caractériser les bancs sableux se trouvant à l'intérieur de l'estuaire, et dans le but de préciser l'origine des particules les composant, trois prélèvements à l'entrée du système (estuaire) ont été réalisés.

Tout d'abord, le point n°1 correspond au sable de la plage du Veillon. Ce prélèvement a été effectué au bout de la flèche sableuse à proximité du chenal afin de se rapprocher au maximum du point d'entrée d'eau marine dans le système. Ensuite, les deux autres points, n°2 et n°5H, correspondent à des sables dunaires. Le point n°2 a été prélevé sur la dune du Veillon et le point n°5H sur la dune dite « du Maroc » en référence au lieu dit situé à proximité. La Figure 65 permet de visualiser les courbes granulométriques obtenues pour ces trois points ainsi que pour les huit autres faciès sableux.

Le sable de la plage du Veillon montre un mode principal de 335 μm . Ce mode est unique et il représente une population sédimentaire. Cependant il est possible de distinguer une autre population de particules plus grossières, malgré l'absence de mode secondaire. La taille des particules est alors d'environ 700 μm pour des teneurs avoisinant les 4%.

Les sables formant les dunes sont quant à eux plus fins car ils sont composés de particules mobilisées par déflation éolienne à partir de la plage, lorsque les conditions atmosphériques sont favorables. Ainsi, pour les points n°2 et n°5H, les courbes qui sont relativement identiques, montrent des modes principaux plus fins (282 et 269 μm). On note cette fois un mode secondaire à 787 μm dont les teneurs de 1,75% pour le point n°2 et 0,50% pour le point n°5H sont relativement faibles. Néanmoins, il convient de dire que ces trois sables sont relativement similaires.

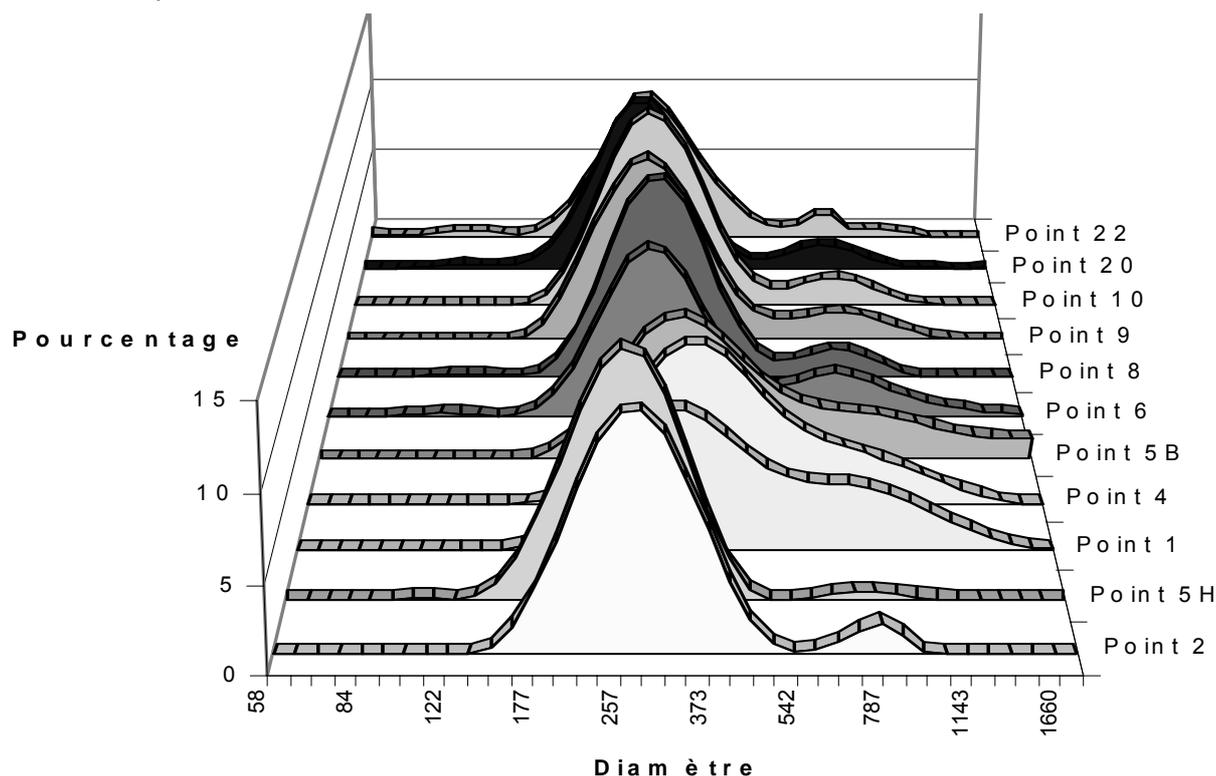


Figure 65 - Courbes granulométriques des points n°2, 5H, 1, 4, 5B, 6, 8, 9, 10, 20 et 22

Il s'agit désormais de mettre en relation ces trois points d'entrées potentielles dans le système avec les résultats obtenus pour les différents prélèvements sableux estuariens. Il ressort de la figure 65 et du tableau 31 qui suit, un seul type de dépôts sableux intra-estuariens.

Point	4	5B	6	8	9	10	20	22	23
Mode 1^{re} (ϕ en μm)	373	356	295	315	295	295	269	282	300
Mode 1^{re} (%)	9,57	8,73	10,60	12,70	11,95	12,90	11,50	9,93	6,68
Mode 2^{re} (ϕ en μm)	-	-	717	717	790	790	717	790	*
Mode 2^{re} (%)	-	-	2,78	1,82	1,80	1,75	1,78	1,61	*

Tableau 31 - Caractéristiques modales des points n°4, 5B, 6, 8, 9, 10, 20 et 22

* : Le diamètre limite du granulomètre laser de la 2^{nde} analyse est de 500 μm .

L'ensemble des 9 faciès montre des caractéristiques identiques, c'est à dire un mode sableux principal extrêmement représenté tandis qu'une seconde population plus grossière et peu présente est mise en évidence. Enfin, on peut noter l'existence d'un troisième mode, composé de particules fines (environ 10 à 20 μm) qui est uniquement présent dans les sables situés les plus en amont dans l'estuaire. Ce mode est cependant représenté dans des proportions extrêmement faibles (au maximum 0,5% pour le point 22).

La figure 66 permet de visualiser les variations de la moyenne, du mode principal ainsi que celles du coefficient de dispersion des sables étudiés. Il en ressort que la taille moyenne et que le mode principal sont de plus en plus faibles de l'aval vers l'amont de l'estuaire tout comme le coefficient de dispersion. Ainsi le tri opéré est meilleur en remontant plus haut dans l'estuaire. Le point n°22 situé le plus à l'amont montre quant à lui un D75/D25 très élevé.

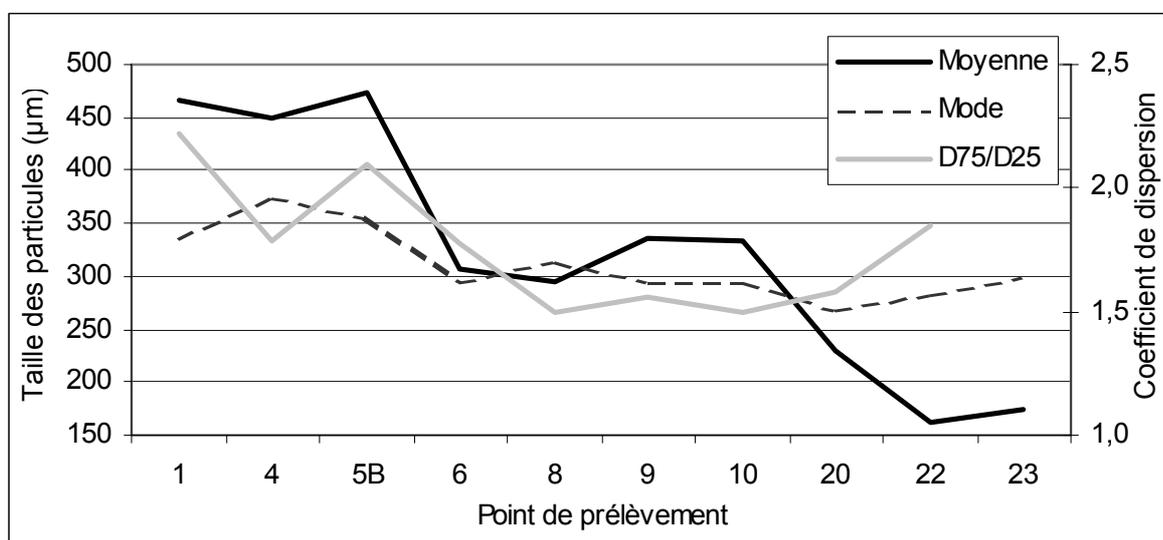


Figure 66 - Répartition amont-aval des moyennes, modes et coefficients de dispersion des faciès sableux intra-estuariens

En effet, les deux points se trouvant le plus à l'aval de l'estuaire (4 et 5B) montrent les moyennes et les coefficients de dispersion les plus élevés. Le point n°5B est situé à proximité du chenal, en barre extérieure de méandre. Les conditions hydrodynamiques locales sont donc maximales. La mobilisation des particules est intense et seules les plus grossières peuvent se déposer. Le point n°4 est quant à lui situé sur un banc sableux qui correspond en fait au delta de flot. Les sables associés sont alors ceux de la plage et ils sont soumis à la dynamique de marée. Cela confirme que ces sables ont une origine marine.

La diminution de la moyenne, du mode et du coefficient de dispersion observée ensuite en remontant l'estuaire peut s'expliquer par le fait que la capacité de transport des

sables par les courants de marée est de plus en plus faible en remontant l'estuaire. Un processus de dépôt progressif des particules les plus grossières à l'aval et de sélection des particules les plus fines permet d'expliquer les variations amont-aval observées.

En revanche, on peut également émettre l'hypothèse qu'une certaine proportion des sables retrouvés dans l'estuaire puisse être entraînée par déflation éolienne à partir des dunes. Les sables remonteraient alors le chenal pour se déposer plus en amont sur les berges et pour former des bancs sableux importants.

• Observations à la loupe binoculaire

Afin de confirmer les interprétations faites à partir des résultats des analyses granulométriques, certains échantillons sableux ont été observés à loupe binoculaire. La Figure 67 permet de visualiser les quatre sables étudiés.

Les observations macroscopiques puis à la loupe binoculaire de ces quatre sables ont permis de valider l'origine commune de ces sables estuariens ainsi que les zones de dépôts privilégiés. En effet, la plage du Veillon a montré des sables de taille moyenne composés en grande majorité de quartz translucides et plutôt anguleux à sub-anguleux. Des débris coquilliers généralement plus grossiers ont été observés (bivalves et gastéropodes le plus souvent). Des feldspaths, des débris de schistes en décomposition et quelques micas noirs (biotite) ont été plus rarement mis en évidence. Le sable prélevé sur le delta de flot (n°4) a montré les mêmes caractéristiques confirmant l'origine commune de ces deux sables. Quelques grains de muscovite ont aussi été aperçus.

Le sable de la dune du Veillon montre des caractéristiques semblables. Les minéraux de quartz observés sont identiques à ceux du sable de la plage mais en revanche, seuls les plus fins sont observés. Ils ont été transportés par déflation éolienne à partir de la plage. Les débris coquilliers sont plus rares et ils sont généralement de la même taille que les minéraux siliceux ayant subi la déflation. Enfin, quelques feldspaths et quelques micas blancs sont présents. L'échantillon n°8 représentant le sable accumulé sur le banc à la confluence montre des caractéristiques similaires au sable dunaire du point de vue des minéraux siliceux. La fraction biogénique montre quant à elle la présence de quelques débris coquilliers de taille relativement plus importante. Ces observations semblent confirmer l'origine de ces sables par ségrégation des particules les plus fines en remontant le cours d'eau.

Il faut enfin noter que le second mode plus grossier observé sur l'ensemble des sables (700 µm environ) peut s'expliquer par la présence de débris coquilliers observés à la loupe binoculaire.

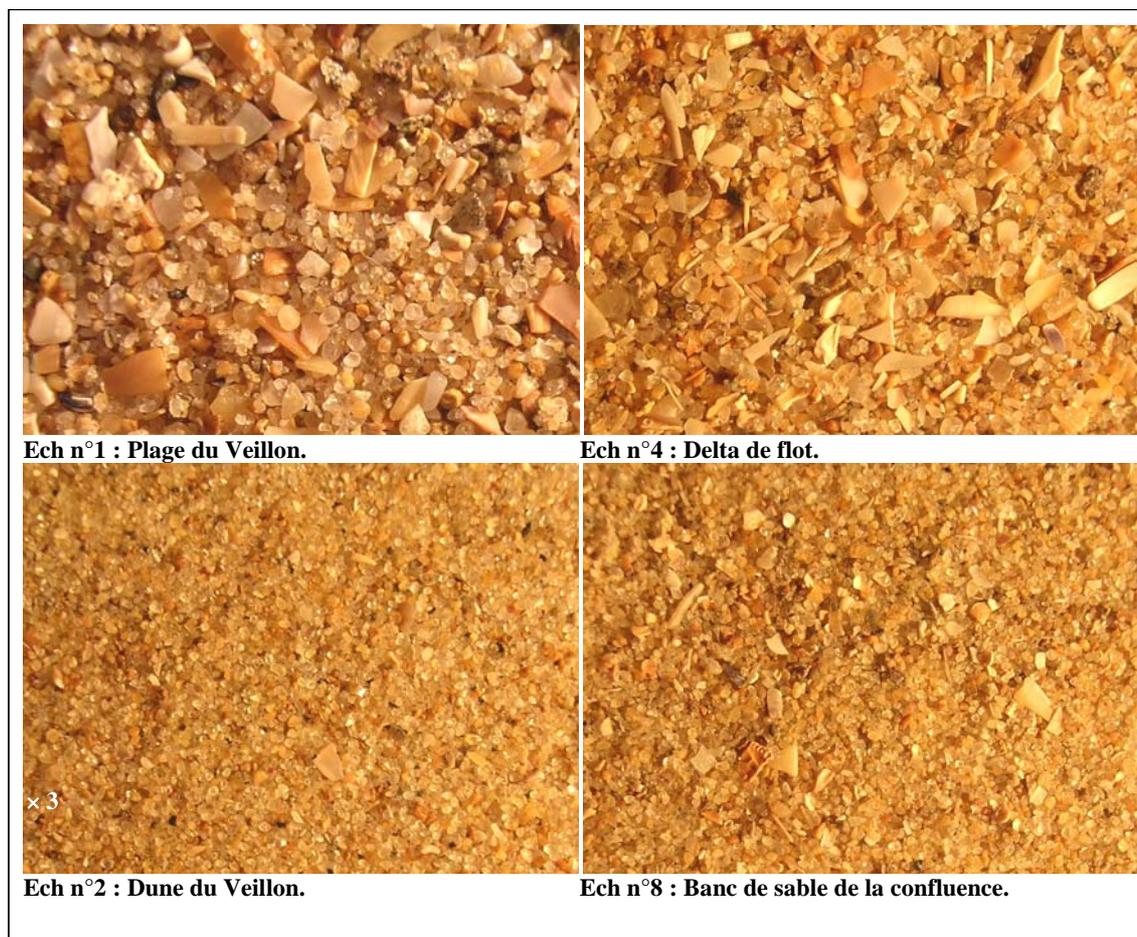


Figure 67 - Planche d'observation des échantillons 1, 2, 4 et 8 à la loupe binoculaire ($\times 3$)

• Les points particuliers

En marge de ces deux systèmes sableux, les points 3 et 7 sont localisés dans des zones favorisant les dépôts de particules fines. Le point 3 est caractérisé par des dépôts limoneux et argileux dont la taille moyenne est de $7 \mu\text{m}$. Situé en barre extérieure de méandre comme le point 5B, la situation du point 3 peut sembler paradoxale. Pourtant cette sédimentation peut s'expliquer par la mise en œuvre il y a quelques années de trois épis dans cette zone. Ils ont été mis en place dans le but de prévenir l'érosion et une éventuelle ouverture de la flèche sableuse par le chenal. Ces ouvrages ont donc pu modifier les conditions hydrodynamiques locales et favoriser une décantation des particules fines.

Le point 7, est situé quant à lui dans une zone abritée en arrière d'une pointe. De plus, la géométrie du cours d'eau provoque, lors des courants de flot, un écoulement principalement canalisé vers l'affluent Sud et non vers les deux autres. Ceci peut

expliquer la sédimentation observée sur le point 7 (8 μm en moyenne), mais cela peut également permettre de mettre en évidence une sédimentation d'origine marine remontant le Payré sur une distance plus importante sur cet affluent Sud (jusqu'au point 22) que sur les autres (jusqu'au point 6).

Ensemble sédimentaire limoneux

De la même manière que pour la sédimentation marine, des points à l'entrée amont du système ont été choisis. Ils ont tous été prélevés en dehors de la zone d'influence de la marée. Ces 4 points (n°15, 19, 19BIS et 30) correspondent à chacun des trois affluents du Payré. Le point n°15 est localisé sur l'affluent Ouest dit « le petit chenal des hautes mers au Payré ». Les points n°19 et 19BIS sont quant à eux localisés au Nord-Est de Talmont sur « le chenal du Payré » et le point n°30 est situé sur l'affluent Sud au niveau du « ruisseau de l'île Bernard ». Les courbes granulométriques des points 19 et 19BIS étant similaires, seuls trois courbes ont été représentées sur la Figure 68.

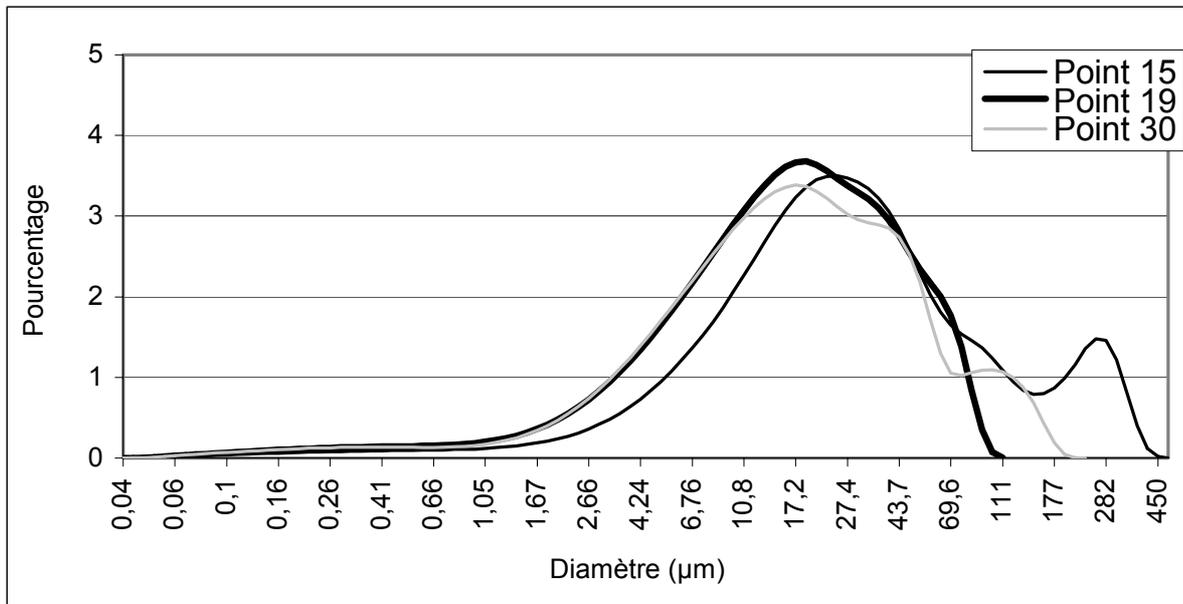


Figure 68 - Courbes granulométriques des points n°15, 19 et 30

Dans l'ensemble, ces trois courbes sont plus ou moins identiques. Le mode principal correspond à un limon d'environ 20 μm (25 μm pour le point 15, 20 μm pour le point 19 et de 19 μm pour le point 30), tandis que l'on observe une présence relativement homogène et en faible quantité de particules argileuses sur chacune des courbes. En revanche, il existe des différences non négligeables sur les particules plus grossières. Le point n°19 contient très peu de sables puisque le diamètre maximum observé est de l'ordre de 100 μm tandis que les deux autres pôles montrent un deuxième mode de 256 μm pour le point n°15 et de 101 μm pour le point n°30.

Les différences observées sur les particules sableuses peuvent s'expliquer par la nature différente des produits de l'érosion et par la représentativité des prélèvements. Les zones où ces échantillons ont été prélevés montrent une sédimentation très faible qui est parfois perturbée par la mise en place d'éboulis le long des berges. Cela a pu modifier les profils observés notamment pour les sables.

Il s'agit alors de mettre en relation les profils obtenus pour chacun des trois points références avec la sédimentation observée le long des trois affluents. La Figure 69 présente les résultats granulométriques obtenus pour l'ensemble de ces affluents. Le diamètre moyen, le mode principal ainsi que le coefficient de dispersion sont représentés.

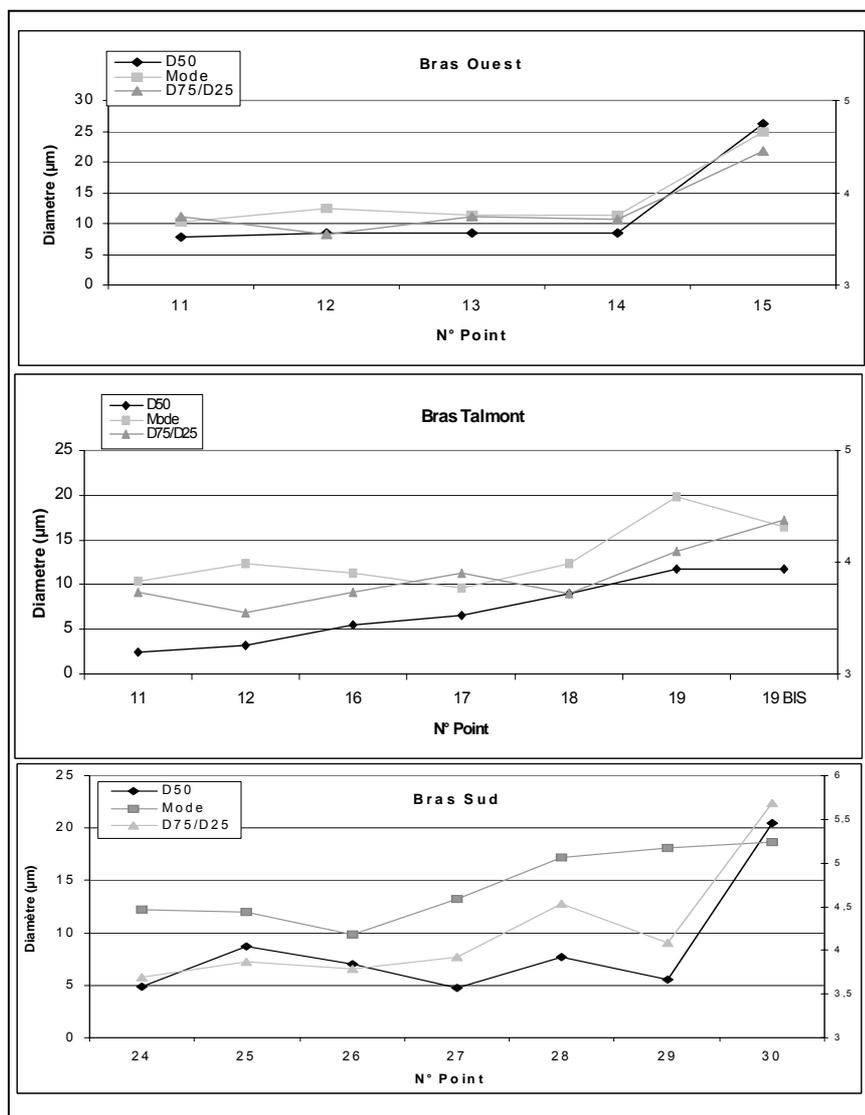


Figure 69 - Evolution Amont-Aval de la moyenne du mode et du coefficient de dispersion des trois affluents du Payré

Ces valeurs montrent une sédimentation vaseuse et relativement homogène sur l'ensemble des cours d'eau. Pourtant, il semble se dégager une tendance entre l'amont et l'aval sur le bras de Talmont et sur le Bras Sud. On observe ainsi une baisse du diamètre moyen des particules qui passe de plus ou moins 20 μm à l'amont, à environ 5 μm à l'aval. Cette tendance se retrouve également pour le mode comme pour le coefficient de dispersion. Le rapport D75/D25 passe de 5 à l'amont un peu plus de 3 à l'aval. Dans ce cas là, les courbes sont moins « dispersées ».

Finalement, après avoir caractérisé le fonctionnement sédimentologique de l'estuaire, il est intéressant de regarder de plus près les observations faites au niveau des deux zones ostréicoles.

Sédimentation dans les zones ostréicoles.

• Port La Guittière

La première zone ostréicole implantée au Port La Guittière se trouve sur l'affluent Sud au niveau des points n°20, 21, 22, 22BIS et 23. Elle semble donc située au niveau de la zone de transition entre les influences marines majeures à l'aval et les influences continentales majeures à l'amont. Les résultats obtenus pour cette zone sont compilés sur la Figure 70.

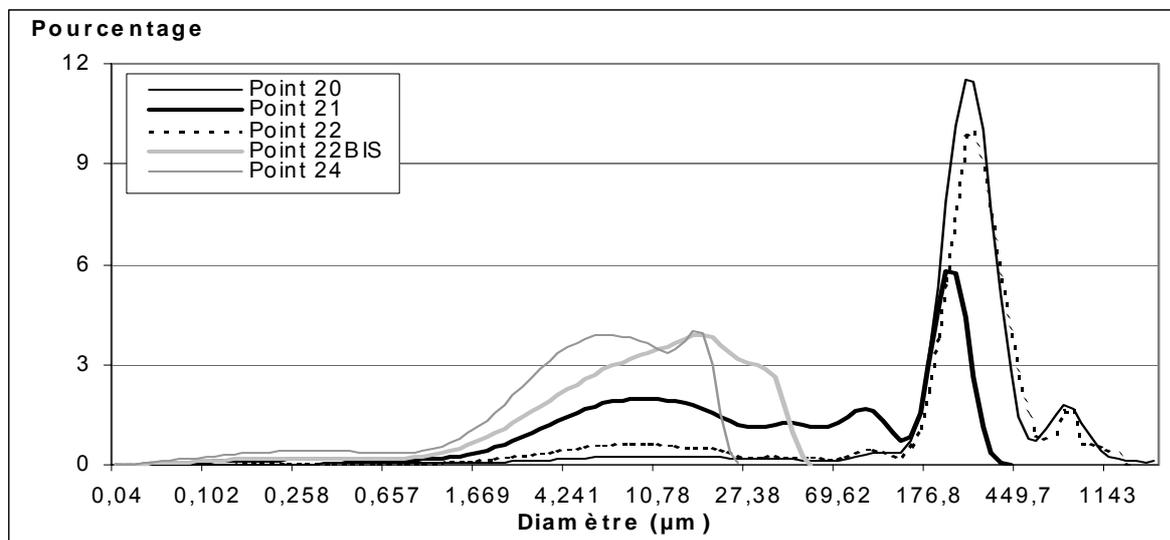


Figure 70 - Profils granulométriques des points n°20, 21, 22, 22BIS et 24 (Le point 24 est utilisé comme référence hors zone ostréicole)

Les répartitions granulométriques de ces 5 points sont très différentes. Il est possible de distinguer deux ensembles. Le premier regroupe les points n°20, 21 et 22 dont les courbes sont multi modales auxquels il faut associer le point 23. Par exemple, pour le point n°20, on dénombre jusqu'à 6 modes différents, en passant des argiles aux sables grossiers. Néanmoins, le mode de sables moyens qui est commun à ces trois échantillons, et dont la taille est comprise entre 213 μm pour le point 21 et 309 μm pour le point 20, est celui qui est le plus représenté et il atteint jusqu'à 12% en proportion. Cette granulométrie témoigne d'une influence marine forte tandis que le mode limoneux d'environ 20 μm témoigne tout de même de la présence de sédiments d'origine continentale en quantité importante.

Cette sédimentation ne correspond absolument pas à celle observée plus en aval de l'estuaire ou plus haut dans le cours d'eau. On se situe dans une zone de mélange. La localisation des points, à proximité des concessions, sur la rive droite pour les points 22 et 23 et sur la rive gauche pour les points 20 et 21, peut permettre de penser que les sédiments prélevés ont également été remaniés. En effet, activité ostréicole provoque le passage de nombreux tracteurs sur les berges. De plus, de nombreux dragages ont pu être réalisés sur les concessions pour aller relarguer le matériel à proximité. Dans cet ensemble, le point n°21 reste particulier. Il est situé à proximité de l'écoulement mineur d'un bras isolé et en voie de comblement. L'activité ostréicole y est désormais inexistante. La quantité relativement importante de particules fines témoigne de ce comblement en cours.

Le second ensemble correspond au point 22BIS, c'est à dire au sédiment superficiel épais de quelques millimètres seulement. Sa courbe granulométrique a été mise en relation avec celle observée sur le point n°24. Elles sont plus ou moins similaires ce qui pourrait venir confirmer que les sédiments décrits plus haut sont remaniés et que ce point 22BIS témoigne d'une reprise de sédimentation fine en « discordance » sur des sédiments plus grossiers.



Figure 71 - Photo de la flèche sableuse du Veillon (Cliché daté du 6 mai 2004)

Finalement, il semblerait que les problèmes rencontrés sur les concessions de Port La Guittière témoignent prioritairement d'apports sableux en provenance de la mer plus que d'apports en particules fines. La disparition subite des sables au-delà du point n°23 semble indiquer qu'il est possible que la présence des parcs perturbe la dynamique hydrologique et bloque la progression des sables plus en amont de l'estuaire. Pour valider cette hypothèse, il faudrait pouvoir effectuer des carottages en amont des parcs afin de valider ou non la présence de sables sous les argiles témoignant d'apports sableux ayant eu lieu avant la mise en place de l'activité ostréicole. Cependant, il est possible que la sédimentation dans le chenal au niveau des parcs soit totalement différente. Pour cela, il serait intéressant de pouvoir réaliser des prélèvements dans le lit de la rivière au niveau des parcs soumis à cette dynamique d'ensablement et d'envasement afin de confirmer ou d'infirmer les observations faites ici.

Le Veillon

Enfin, il est également nécessaire de s'intéresser aux parcs ostréicoles situés sur l'autre affluent du Payré. Dans ce cas, hormis le banc sableux présent à la confluence et remontant sur la rive gauche jusqu'au point 10, les sédiments prélevés au niveau de ces concessions (points 7, 11 et 12) sont constitués de particules fines de limons et d'argiles. Le point n°12 a tout de même montré une courbe plus perturbée car des particules sableuses plus grossières sont rencontrées (Cf. Figure 72). Néanmoins, elles semblent pouvoir correspondre aux particules rencontrées sur le point amont n°15.

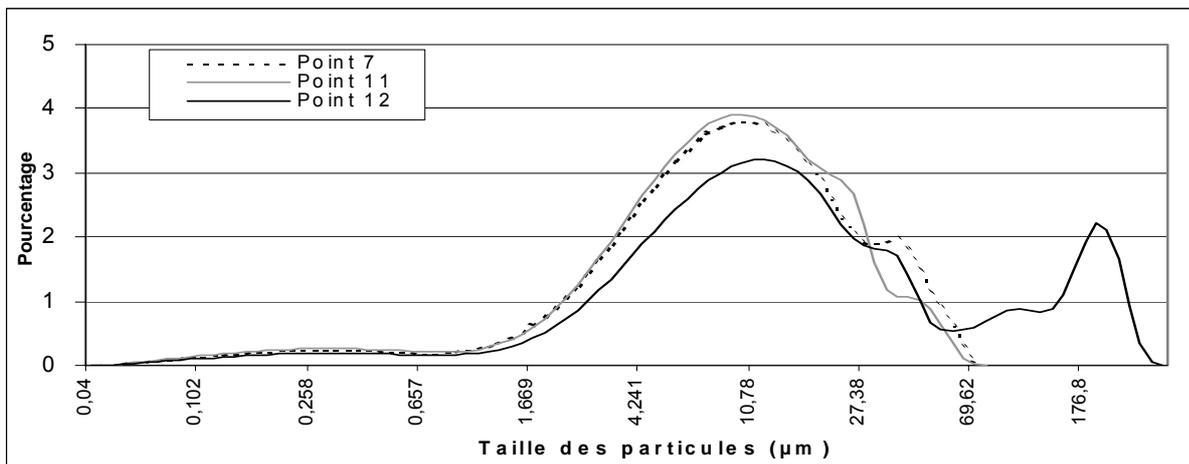


Figure 72 - Courbe granulométrique des points n°7, 11 et 12

L'influence marine dans la sédimentation se faisant moins ressentir, les problèmes rencontrés au niveau des parcs semblent avoir une origine plus continentale malgré la présence du banc sableux remontant la rive gauche (point 10).

• Conclusion provisoire de l'analyse sédimentologique :

Il existe 2 ensembles sédimentaires différents ; des sables à l'aval de l'estuaire et des vases plus en amont.

- L'ensemble sableux est caractérisé par :
 - un mode principal d'environ 300 μm ;
 - un mode secondaire d'environ 700 μm composé de débris coquilliers ;
 - une origine marine des particules ;
 - une décroissance de la taille moyenne des particules de l'aval vers l'amont ;
 - un meilleur tri granulométrique de l'aval vers l'amont ;
 - une remontée plus haut le long du bras Sud du Payré (entre les points 23 et 24) ;
 - les points 3 et 7 se démarquent de l'ensemble par une sédimentation fine due à leur localisation dans une zone de calme hydrodynamique favorisant la décantation des fines.

- L'ensemble vaseux est caractérisé par :
 - un mode principal compris entre 5 et 30 μm ;
 - une origine continentale des particules ;
 - une sédimentation homogène le long des trois affluents majeurs ;
 - le bras de Talmont montre néanmoins une sédimentation plus fine vers l'aval.

Les parcs ostréicoles :

- Le Port La Guittière constitue une zone de mélange entre les particules fines d'origine continentale et les particules sableuses d'origine marine ;
- La sédimentation des concessions implantées à proximité du Veillon est essentiellement d'origine continentale.

3.8.4. Teneurs en matière organique

Les résultats obtenus pour les teneurs en matière organique sont compilés dans le Tableau 32. Le poids des échantillons avant et après réaction chimique au peroxyde d'hydrogène sont présentés ainsi que le poids et le pourcentage en matière organique.

Les résultats montrent des teneurs très faibles pour l'ensemble des sédiments situés dans l'estuaire (>0,7 %). Cette observation peut être expliquée par la nature sableuse des particules d'une part peu favorables au développement de matière organique et d'autre part correspondant à un contexte hydrodynamique de dépôt peu favorable à la sédimentation de particules organiques (légères). L'échantillon n°7 possède quant à lui une concentration en matière organique de près de 4 % expliquée par la nature abritée et vaseuse de la zone.

En revanche, les sédiments récoltés le long des 3 affluents montrent des teneurs en matière organique plus élevées puisqu'elles sont généralement comprises entre 1,5 et 5 %. Les teneurs moyennes retenues pour le bras Ouest et pour le bras de Talmont sont très légèrement plus élevées (3,88 % et 3,42 %) que celle retenue pour le bras Sud (2,34 %). Ce phénomène peut être expliqué en partie par une influence anthropique plus forte. En effet, l'affluent Ouest se situe à l'aval du rejet des fosses sceptiques du village de la Dagoterie qui n'est pas équipé du tout à l'égout tandis que les points prélevés sur le cours principal du Payré sont situés à l'aval du rejet des eaux traitées par la station d'épuration et à l'aval de Talmont Saint Hilaire. Il faut tout de même noter que les valeurs mesurées pour les points n°15, n°19bis et n°30 n'ont pas été pris en compte dans le calcul de cette moyenne.

Enfin, les points non pris en compte précédemment et qui sont situés en dehors de la zone d'influence marine montrent les concentrations les plus fortes (19,98%, 8,29% et 6,62%). La teneur de près de 20% observée au point n°15 montre bien l'influence locale des rejets. Les deux autres teneurs peuvent quant à elles témoigner d'une production locale plus importante du fait de la nature davantage terrigène des particules.

Des analyses chimiques des éléments majeurs et des éléments traces ont ensuite été réalisées.

Unité hydrologique	N° prélèvement	Poids total avant réaction (g)	Poids total après réaction (g)	Poids en matière organique (g)	Teneur en matière organique (%)
Estuaire	1	2,26313	2,26020	0,00293	0,13
	2	2,92199	2,92135	0,00064	0,02
	3	2,65047	2,63889	0,01158	0,44
	4	2,34051	2,33176	0,00875	0,37
	5H	1,71788	1,71512	0,00276	0,16
	5B	2,98046	2,97958	0,00088	0,03
	6	2,71543	2,69612	0,01931	0,71
	7	2,30829	2,21899	0,08930	3,87
	8	3,05763	3,05205	0,00558	0,18
	9	2,88426	2,88246	0,00180	0,06
	10	3,03838	3,03300	0,00538	0,18
Bras Ouest : Petit chenal des hautes mers au Payré	11	1,33871	1,28576	0,05295	3,96
	12	2,37963	2,32964	0,04999	2,10
	13	0,90550	0,85372	0,05178	5,72
	14	0,98344	0,94654	0,03690	3,75
	15	2,84949	2,28005	0,56944	19,98
Bras Talmont : Chenal du Payré	16	1,63669	1,57336	0,06333	3,87
	17	0,74001	0,69827	0,04174	5,64
	18	0,95590	0,93066	0,02524	2,64
	19	1,99959	1,96913	0,03046	1,52
	19bis	2,32890	2,13575	0,19315	8,29
Bras Sud : Ruisseau de l'île Bernard	20	2,64206	2,59945	0,04261	1,61
	21	2,04206	1,99090	0,05116	2,51
	22	1,69097	1,67782	0,01315	0,78
	22bis	1,99825	1,95469	0,04356	2,18
	23	1,74989	1,71798	0,03191	1,82
	24	1,45628	1,40068	0,05560	3,82
	25	2,16907	2,06557	0,10350	4,77
	26	1,91629	1,84882	0,06747	3,52
	27	1,32533	1,31205	0,01328	1,00
	28	1,92636	1,89857	0,02779	1,44
	29	1,34127	1,30991	0,03136	2,34
	30	1,59824	1,49250	0,10574	6,62

Tableau 32 : Teneurs en matière organique.

3.8.5. Analyses chimiques des éléments majeurs et traces des sédiments

Ces analyses chimiques ont été réalisées sur sept points qui ont été choisis en fonction de leur localisation. Cinq points ont été sélectionnés afin de représenter des points d'entrée dans le système estuarien et les deux points restant car ils sont proches de sources potentielles de pollution :

- ✓ Point n°1 et 2 : Ils témoignent des points d'entrée des éléments d'origine marine car ils sont localisés le plus à l'aval de l'estuaire.
- ✓ Points n°13, 16 et 23 : Ces trois points sont ceux qui témoignent des apports à l'estuaire de chacun des trois sous bassin versant du Payré.
- ✓ Point n°15 : Il est localisé à l'aval du rejet des fosses septiques des villages de la Dagoterie et de la Doubletère qui ne sont pas équipés du tout à l'égout.
- ✓ Point n°18 : Ce point est situé à une vingtaine de mètres à l'aval des eaux traitées rejetées par la station d'épuration de la SAUR.

Caractère polluant des sédiments estuariens

Dans un premier temps, il semble intéressant de statuer sur le caractère polluant de ces sédiments. Pour cela, les valeurs présentées dans le guide de gestion des sites potentiellement pollués publiés par le MEDD (ISBN 2-71590899-7 version Mars 2000) ont été utilisées.

Deux types de valeurs doivent être distingués :

- ✓ Les Valeurs de Définition de Source-Sol (VDSS) : Valeur guide française, spécifique d'une substance, devant servir à identifier une source de pollution constituée de sols, et à délimiter sa surface.
- ✓ Les Valeurs de Constat d'Impact (VCI) : Valeur guide française générique, spécifique d'une substance, permettant de constater l'impact de la pollution d'un milieu, en fonction de son usage.

En fait, il s'agit de valeurs seuils dont le dépassement ne signifie pas forcément l'existence d'une pollution. En revanche, les éléments concernés devront être examinés avec attention.

L'ensemble des résultats d'analyse est présenté dans le Tableau 33.

Les teneurs en éléments trace sont cartographiés sur la Figure 73.

N° Prélèvement	Lieu	Date	Perte de masse à 450°C (%)	Eléments majeurs (%) *								
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	MnO	TiO ₂	
Entrée Marine												
1	Plage du Veillon	04/05/2004	1,09	76,6	2,6	<1	11,6	<1	1,00	0,02	0,04	
2	Dune du Veillon	04/05/2004	0,38	85,3	2,6	<1	5,3	<1	0,90	0,02	0,09	
Entrée continentale												
13	Bras Ouest	04/05/2004	12,00	57,8	11,4	4,4	7,6	3,0	2,20	0,08	0,58	
16	Bras Talmont	04/05/2004	9,41	61,8	10,2	3,7	6,9	2,5	2,00	0,08	0,49	
23	Bras Sud	04/05/2004	4,48	75,8	5,0	1,7	9,4	1,4	1,40	0,06	0,21	
Pollution potentielle												
15	Fosses sceptiques	04/05/2004	2,46	75,5	10,9	5,1	<1	1,5	2,10	0,09	0,58	
18	STEP	04/05/2004	10,70	56,3	15,3	6,3	2,9	2,5	2,50	0,12	0,73	
Limite de Quantification (%)				1	1	1	1	1	0,5	0,01	0,01	

* : Les 8 éléments majeurs sont exprimés sous forme d'oxyde afin de boucler le bilan massique lors de l'ICP. En fait, seuls les cations sont réellement dosés (Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Mn et Ti)

N° Prélèvement	Lieu	Date	Eléments traces (mg/kg)												
			P ₂ O ₅	Li	Be	B	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Y
Entrée Marine															
1	Plage du Veillon	04/05/2004	640	10	<2	34	20	40	6	12	<5	24	90	360	<20
2	Dune du Veillon	04/05/2004	653	<10	<2	77	13	21	6	<10	<5	23	55	142	<20
Entrée Continentale															
13	Bras Ouest	04/05/2004	1930	62	2	114	138	100	10	14	18	252	66	188	20
16	Bras Talmont	04/05/2004	1606	55	2	88	116	84	10	<10	12	116	61	167	<20
23	Bras Sud	04/05/2004	963	25	2	81	44	37	6	<10	<5	81	58	202	<20
Pollution potentielle															
15	Fosses sceptiques	04/05/2004	1349	40	2	53	98	83	13	19	21	113	23	64	<20
18	STEP	04/05/2004	3661	84	4	116	175	116	12	24	27	216	63	131	29
Limite de Quantification (mg/kg)			100	10	2	10	10	10	5	10	5	5	20	5	20
VDSS mg/kg MS					250	280	65	120	70	95	4500	19			
VCI sol usage sensible					500	560	130	240	140	190	9000	37			
VCI sol usage non sensible					500	plv	7000	1200	900	950	120				

N° Prélèvement	Lieu	Date	Eléments traces (mg/kg)												
			Nb	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	W	Pb	Bi	Zr
Entrée Marine															
1	Plage du Veillon	04/05/2004	<20	<5	<0,2	<2	<10	34	266	74	<10	<10	24	10	28
2	Dune du Veillon	04/05/2004	<20	<5	<0,2	<2	<10	21	292	23	<10	<10	17	<10	30
Entrée Continentale															
13	Bras Ouest	04/05/2004	22	<5	<0,2	<2	10	36	426	48	60	<10	48	24	224
16	Bras Talmont	04/05/2004	20	<5	<0,2	<2	<10	27	380	33	49	<10	43	18	173
23	Bras Sud	04/05/2004	<20	<5	<0,2	<2	<10	21	410	<20	13	<10	23	<10	73
Pollution potentielle															
15	Fosses sceptiques	04/05/2004	<20	<5	<0,2	<2	<10	13	506	34	36	<10	25	19	187
18	STEP	04/05/2004	27	<5	<0,2	<2	12	25	459	69	98	<10	59	29	233
Limite de Quantification (mg/kg)			20	5	0,2	2	10	10	10	20	10	10	10	10	20
VDSS mg/kg MS				100	10	50	312				200				
VCI sol usage sensible				200	20	100	625				400				
VCI sol usage non sensible				1000	60	250	3125				2000				

Tableau 33 : Résultats des analyses chimiques des éléments majeurs et traces pratiqués sur les sédiments

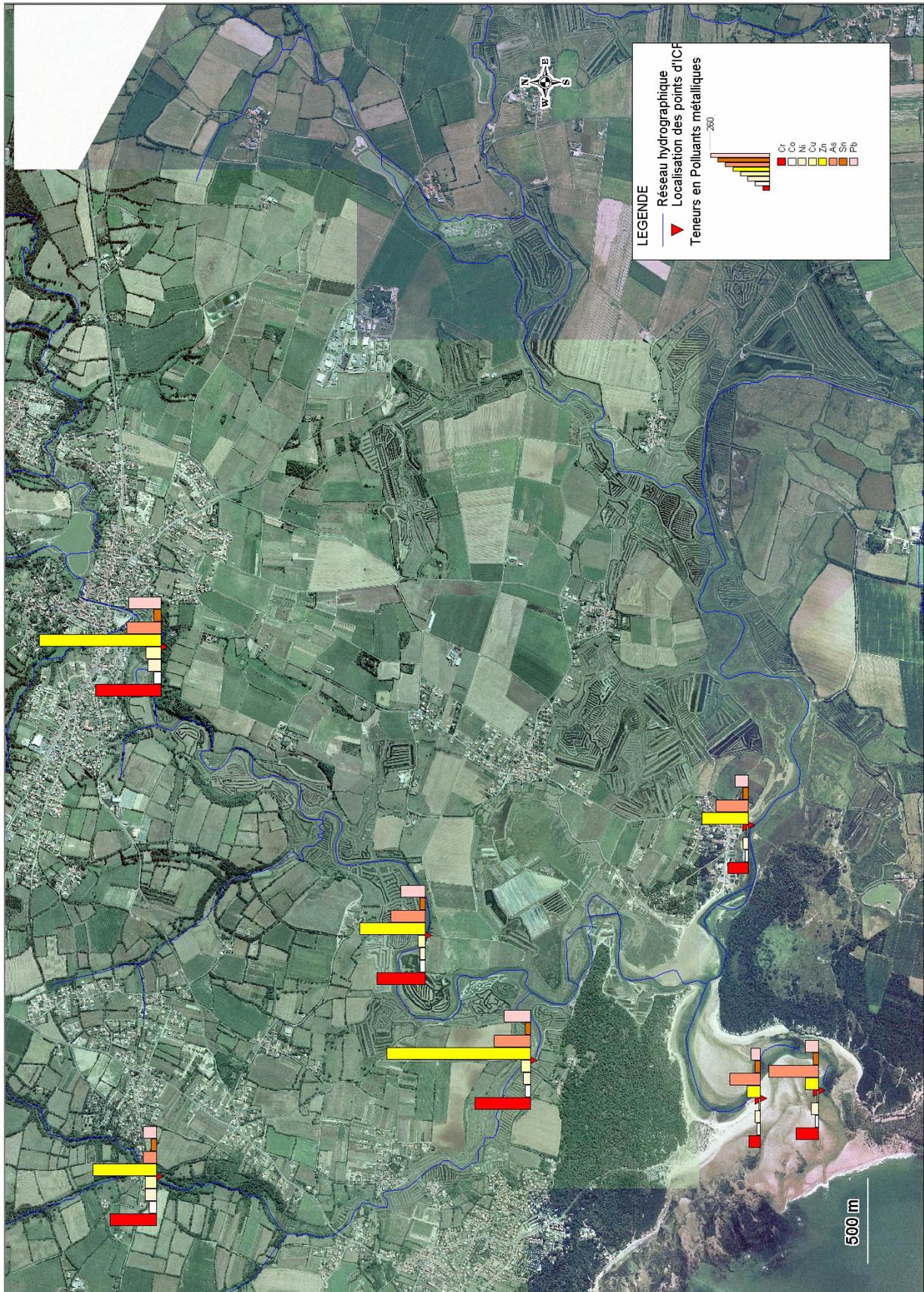


Figure 73 : Teneurs en polluants métalliques dans les 7 sédiments de berge analysés.

• Des teneurs élevées en arsenic, en chrome, en baryum...

Les résultats des ICP Multi-élémentaires montrent des teneurs conformes aux VDSS et aux VCI pour 31 des 34 éléments dosés. En revanche, les teneurs en baryum, en chrome et en arsenic sont supérieures aux seuils décrits. On note ainsi des teneurs moyennes de 59 mg/kg en arsenic, de 391 mg/kg en baryum et de 69 mg/kg en chrome.

Ces teneurs élevées peuvent toutefois être mises en relation avec le fond géochimique régional. La carte géologique n°584 des Sables d'Olonne montre la présence de minerai de plomb argentifère au Lieu-dit La Mine à proximité de l'estuaire du Payré. L'étude des minéralisations par le BRGM dans les années 80 a montré l'existence d'un horizon de 2 à 3 mètres de puissance. Il est composé de barytine et de sulfures (pyrite) pouvant expliquer la présence de baryum, de chrome et d'arsenic dans les sédiments estuariens.

Afin d'obtenir une vision complète du contexte, les sources anthropiques potentielles pouvant être à l'origine des trois éléments incriminés ont été recherchées. Pour cela une extraction de l'Inventaire Historique Régional des anciens sites industriels (IHR) de Vendée a été réalisée. Il apparaît peu d'activités pouvant être à l'origine des teneurs observées. Ces sources potentielles sont cartographiées sur la Figure 74.

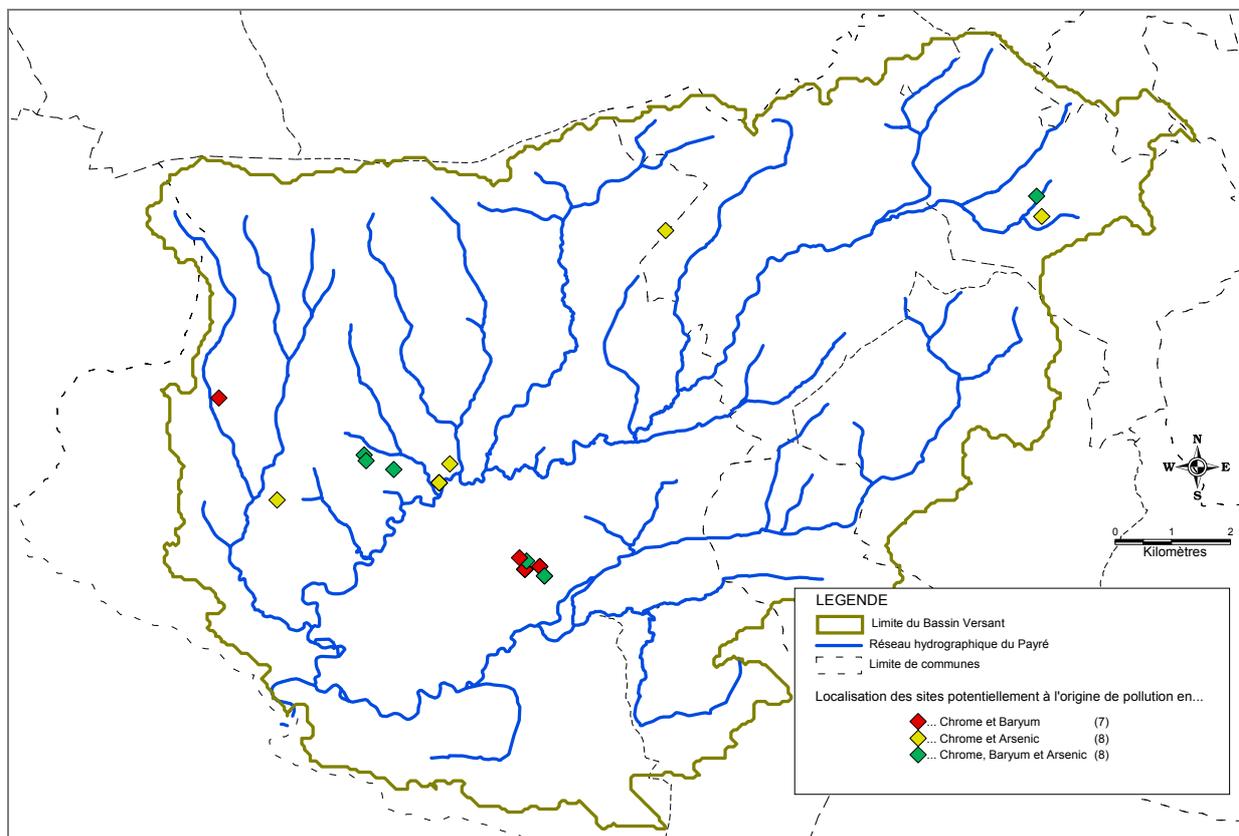


Figure 74 : Localisation des sites industriels susceptibles d'être à l'origine du baryum, du chrome et de l'arsenic.

Finalement, au vue des informations décrites dans les paragraphes précédents, il semble très probable que les teneurs élevées en baryum, en chrome et en arsenic soient en grande partie d'origine naturelle.

• ... et en phosphates

Les deux sous-bassins versant des Hautes mers et du Payré (Bras Ouest et bras de Talmont) montrent des concentrations en phosphates (>1600 ppm) très supérieures à celles observées sur le bras Sud (963 ppm) et sur les points d'entrée marine (640 et 653 ppm). Un pic à plus de 3600 ppm est même observé en aval du rejet de la STEP. Ainsi, les concentrations les plus importantes sont observées à l'amont de l'estuaire. Elles diminuent ensuite vers l'aval.

Deux hypothèses peuvent expliquer ce phénomène ; soit les phosphates sont dilués vers l'estuaire extérieur, soit ils sont consommés par des organismes tels que les algues. La consommation d'oxygène engendrée par cette seconde hypothèse pourrait perturber l'activité ostréicole.

Etude géochimique multi-élémentaire

Dans un second temps, il est possible de s'intéresser aux relations existant entre les 34 éléments dosés. Pour cela une étude géochimique multi-élémentaire a été réalisée afin de comprendre les relations existantes entre les différents éléments et dans le but d'identifier des groupes d'éléments.

• Valeurs statistiques élémentaires

Le Tableau 34 montre les valeurs statistiques telles que la concentration moyenne (en % pour les éléments majeurs et en mg/kg pour les éléments mineurs), ainsi que le coefficient de variation, les valeurs minimales et maximales observées et l'étendue de mesures pour chacun des 34 éléments dosés.

Ce tableau fait apparaître des variations de concentrations de la plupart des éléments. Ces variations sont importantes entre les éléments mais également selon les teneurs retenues pour les différents échantillons (n = 7). Ainsi, les coefficients de variations (cdv) varient de 0 à plus de 75%. Quatre ensembles peuvent ainsi être décrits.

Le premier ensemble représente les éléments montrant de fortes variations des teneurs. Ce groupe de 16 éléments (Fe, Al, Ca, Mn, Ce, Zn, V, Ti, Li, P₂O₅, Cu, Zr, Cr, Sr, La et Pb) montre des variations comprises entre 42 et 76%. Cette limite d'environ 40% a été mise en place en regard avec les valeurs minimum, maximum et donc de l'étendue observée pour chacun des éléments.

Le second ensemble montre des variations inter-échantillons faibles. Les coefficients de variations sont compris entre 30,6% pour le béryllium et 6,8% pour l'étain. Les coefficients de variations relativement élevés pour l'antimoine et pour le baryum ont été relativisés grâce à l'observation des autres paramètres statistiques. Ce groupe est composé de 7 éléments (Si, Be, Sb, Ba, Y, Nb et Sn) dont 4 sont présents le plus souvent en dessous de la limite de quantification (Be, Y, Nb, et Sn). Ces 4 éléments ne seront donc pas pris en compte dans la suite de l'étude. En effet, il semble difficile de statuer sur leur comportement du fait du manque d'un nombre suffisant de données chiffrées.

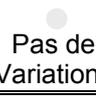
Eléments		Moyenne	cdv	Min	Max	Etendue	
Majeurs (%)		TiO2	0,39	64,72	0,04	0,73	0,69
		Fe2O3	3,31	58,98	1	6,3	5,3
		Al2O3	8,29	54,90	2,6	15,3	12,7
		CaO	6,39	53,06	1	11,6	10,6
		MnO	0,07	50,80	0,02	0,12	0,1
		MgO	1,84	40,70	1	3	2
		K2O	1,73	33,55	0,9	2,5	1,6
Traces (mg/kg)	 Fortes variations	SiO2	69,87	14,77	56,3	85,3	29
		Ce	39,43	76,61	10	98	88
		Zn	117,86	69,39	23	252	229
		V	86,29	66,60	13	175	162
		Li	40,86	63,18	10	84	74
		P2O5	1543,14	63,03	640	3661	3021
		Cu	13,29	62,16	5	27	22
	 Variations moyennes	Zr	135,43	61,14	28	233	205
		Cr	68,71	48,45	21	116	95
		Sr	179,14	47,37	64	360	296
		La	43,00	46,28	20	74	54
		Pb	34,14	42,77	17	59	42
		Bi	17,14	40,94	10	29	19
		Ni	14,14	35,54	10	24	14
	 Faibles Variations	B	80,43	34,44	34	116	82
		Co	9,00	30,86	6	13	7
		As	59,43	30,78	23	90	67
		Be	2,29	30,62	2	4	2
		Sb	25,29	29,19	13	36	23
		Ba	391,29	20,49	266	506	240
		Y	21,29	14,80	20	29	9
 Pas de Variations	Nb	21,29	11,43	20	27	7	
	Sn	10,29	6,80	10	12	2	
	Ag	0,20	0,00	0,2	0,2	0	
	Cd	2,00	0,00	2	2	0	
	Mo	5,00	0,00	5	5	0	
	W	10,00	0,00	10	10	0	

Tableau 34 : Variabilité des éléments chimiques estuariens analysés (cdv: coefficient de variation).

Le troisième groupe montre quant à lui des variations intermédiaires comprises entre 30 et 40%. Il s'agit de 7 éléments (Mg, K, Bi, Ni, B, Co et As).

Enfin, le dernier groupe est composé de 4 éléments : l'argent, le cadmium, le molybdène et le tungstène. Ils sont toujours situés en dessous de la limite de quantification.

Il convient d'étudier désormais les corrélations binaires afin de montrer l'existence de relations entre les éléments permettant d'expliquer les variations observées.

• Corrélations binaires

Les corrélations binaires (R) entre les éléments a et b et entre les éléments et la distance à la côte ont été déterminées à l'aide du logiciel Xlstat. Il s'agit de corrélations au sens de Pearson, c'est à dire qu'elles permettent de montrer l'existence d'une relation linéaire entre les deux paramètres considérés.

D'après Ph. Negrel (*Géochimie multi-élémentaire des sédiments de l'estuaire de la Loire*, 1994), « les corrélations ou absences de corrélations ne montrent que la présence relative de différentes phases porteuses de ces éléments chimiques et ne renseignent en aucun cas sur les sources de particules ou sur les mécanismes intra-estuariens. »

Le nombre d'échantillons étant faible (n = 7), il convient de déterminer un coefficient de corrélation significatif permettant de caractériser les valeurs obtenues pour les différentes corrélations entre les éléments et la distance à la côte. Ce coefficient significatif a valeur de seuil, c'est à dire que lorsque la valeur de corrélation entre deux éléments est supérieure au coefficient significatif, alors la relation entre les deux éléments est avérée. Dans le cas contraire, la relation est inexistante. La valeur significative retenue pour R est de **0,76** au seuil $\alpha = 0,05$.

Les résultats obtenus sont compilés dans le Tableau 35 faisant apparaître l'ensemble des corrélations.

Dans un premier temps, il est possible de s'intéresser aux relations entre les différents éléments et la distance à la côte (D). 3 comportements sont ainsi mis en évidence. Un premier groupe de 16 éléments chimiques est corrélé positivement avec D. Cela signifie que ces éléments sont plus concentrés à l'amont de l'estuaire qu'à l'aval. Il s'agit de Mn, Fe, Ti, Al, K, Co et Cu dont les corrélations sont supérieures à 0,9 et de P₂O₅, Li, V, Cr, Ni, Ba, Ce, Bi et Zr dans une moindre mesure.

Un second groupe est quant à lui corrélé négativement avec la distance à la côte. Il s'agit d'un composant majeur : le calcium (Ca) qui fait partie des carbonates. La corrélation est de - 0,76. La concentration en calcium augmente donc de la zone fluviale vers la zone estuarienne et marine. Les 9 autres éléments dosés (Si, Mg, B, Zn, As, Sr, Sb, La et Pb) ne montrent aucune relation avec la distance à la côte.

Il est également intéressant de regarder le comportement des métaux. La plupart montrent des corrélations positives avec la distance D (Cr, Co, Ni, Cu, Fe, Al, Ti, Bi, etc.). Les teneurs en polluants métalliques diminuent donc du bassin versant amont vers l'estuaire extérieur. Plusieurs hypothèses ont été mises en avant dans diverses études antérieures afin d'expliquer ce phénomène. Parmi ces hypothèses, reprises par Ph. Negrel, on peut citer « une dilution de ces composés par les particules d'origine marine telles que les sables (Robbe et al., 1985 ; Etcheber, 1983), la variation des régimes hydrauliques et le recyclage des particules en milieu de salinité variable (Boust, 1981 ; Jouanneau, 1982 ; Frenet, 1981) ou encore une minéralisation de la matière organique (De Groot & al, 1976) ».

Cependant, certains métaux ne montrent pas de corrélations avec D malgré des variations notables des concentrations amont - aval (Pb = 0,70, Sr = - 0,70 et Zn = 0,71). Les hypothèses émises ne sont donc pas valides pour l'ensemble des éléments métalliques.

Dans un second temps, il est possible de s'intéresser aux régressions linéaires entre les éléments qui sont elles aussi très variables. De nombreux couples d'éléments sont corrélés très fortement comme par exemple les couples Li-V (R = 0,99), Al-K (R = 0,99) ou encore Ti-Zr (R = 0,99), tandis que d'autres ne le sont pas. Par exemple, les couples La-Co et As-Y montrent un R respectivement de 0,12 et 0,08. Les graphiques de la Figure 75, numérotés

de A à H, présentent les relations linéaires de chacun des 8 éléments majeurs avec les 18 autres éléments dits traces. Il ressort de ces graphiques que les 8 composants majeurs des sédiments estuariens n'ont pas tous le même comportement vis à vis des éléments traces.

Six composants (Mn, Al, Fe, Mg, K et Ti) montrent de nombreuses corrélations positives avec les traces. Deux mécanismes peuvent être à l'origine de ce phénomène. Les éléments traces peuvent être fixés par les éléments majeurs, par exemple grâce à des mécanismes d'adsorption-désorption, mais ils peuvent également être portés au sein de leur structure atomique. Cinq éléments traces (Zr, V, Cr, Li et Bi) sont très fortement liés à la présence de ces 6 composants majeurs et cinq autres éléments traces semblent l'être dans une moindre mesure (Co, Ni, Ce, Ba et P_2O_5). Il n'est donc pas possible d'affecter ces différents éléments à l'un de ces six majeurs. En revanche, certains éléments semblent être reliés plus spécifiquement à un composant majeur plutôt qu'aux autres. Ainsi, le plomb et le zinc sont plus fortement associés avec le magnésium (Cf. figure 75 E). De la même manière, les teneurs en cuivre sont mieux corrélées avec les teneurs en fer (Cf. figure 75 C). Le Cuivre semble donc être majoritairement lié au Fer et dans une proportion plus faible avec les autres majeurs étudiés.

En revanche, le silicium ne montre que des corrélations négatives avec les éléments traces cités précédemment Pb, Li, V, Cr, Cd, Bi, Zr et P_2O_5 . La présence de cet élément et donc de la silice est antagoniste à celle des six autres composants majeurs. Ces 7 éléments se dissocient en deux groupes de comportement.

Les carbonates montrent des régressions linéaires significatives avec le strontium ($R = 0,92$) et l'arsenic ($R = 0,81$). Il semble donc que leur comportement soit plus ou moins similaire.

Enfin, il est intéressant de noter que le lanthane (La) ne montre aucune relation avec aucun autre élément.

	D	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Li	B	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Sb	Ba	La	Ce	Pb	Bi	Zr
D	1																										
SiO ₂	-0,67	1																									
Al ₂ O ₃	0,95	-0,85	1																								
Fe ₂ O ₃	0,96	-0,76	0,99	1																							
CaO	-0,76	0,14	-0,62	-0,71	1																						
MgO	0,62	-0,95	0,82	0,73	-0,20	1																					
K ₂ O	0,93	-0,86	0,99	0,97	-0,57	0,84	1																				
MnO	0,98	-0,79	0,97	0,96	-0,62	0,74	0,97	1																			
TiO ₂	0,95	-0,81	0,99	0,99	-0,67	0,81	0,99	0,97	1																		
P ₂ O ₅	0,83	-0,83	0,90	0,86	-0,49	0,73	0,85	0,87	0,85	1																	
Li	0,87	-0,93	0,97	0,92	-0,47	0,90	0,95	0,93	0,94	0,94	1																
B	0,52	-0,73	0,66	0,56	-0,26	0,81	0,64	0,62	0,64	0,74	0,78	1															
V	0,88	-0,92	0,99	0,95	-0,50	0,90	0,98	0,94	0,97	0,91	0,99	0,73	1														
Cr	0,87	-0,91	0,98	0,95	-0,49	0,86	0,97	0,91	0,96	0,87	0,96	0,61	0,98	1													
Co	0,92	-0,61	0,91	0,96	-0,78	0,60	0,90	0,87	0,93	0,70	0,79	0,35	0,84	0,88	1												
Ni	0,80	-0,48	0,77	0,84	-0,69	0,34	0,71	0,75	0,74	0,81	0,68	0,30	0,70	0,73	0,78	1											
Cu	0,92	-0,71	0,95	0,98	-0,73	0,66	0,92	0,91	0,95	0,87	0,88	0,52	0,91	0,93	0,93	0,91	1										
Zn	0,71	-0,89	0,88	0,83	-0,34	0,92	0,89	0,82	0,87	0,81	0,91	0,81	0,92	0,90	0,68	0,58	0,81	1									
As	-0,53	-0,16	-0,33	-0,42	0,81	0,02	-0,34	-0,40	-0,42	-0,04	-0,13	-0,01	-0,19	-0,17	-0,57	-0,30	-0,39	-0,09	1								
Sr	-0,70	0,13	-0,56	-0,61	0,92	-0,27	-0,54	-0,60	-0,63	-0,38	-0,44	-0,40	-0,46	-0,40	-0,67	-0,44	-0,59	-0,36	0,89	1							
Sb	-0,34	-0,45	-0,04	-0,14	0,68	0,41	-0,02	-0,18	-0,09	0,09	0,14	0,21	0,12	0,15	-0,26	-0,21	-0,12	0,29	0,86	0,72	1						
Ba	0,89	-0,49	0,81	0,85	-0,69	0,52	0,85	0,89	0,85	0,59	0,69	0,42	0,73	0,72	0,84	0,66	0,80	0,68	-0,70	-0,73	-0,44	1					
La	0,12	-0,43	0,27	0,27	0,15	0,19	0,22	0,16	0,18	0,45	0,31	-0,03	0,32	0,41	0,19	0,52	0,37	0,27	0,59	0,49	0,58	-0,12	1				
Ce	0,84	-0,89	0,94	0,90	-0,50	0,83	0,90	0,88	0,90	0,98	0,98	0,75	0,97	0,94	0,76	0,76	0,90	0,87	-0,06	-0,40	0,16	0,61	0,44	1			
Pb	0,70	-0,97	0,87	0,79	-0,24	0,90	0,84	0,79	0,81	0,92	0,95	0,77	0,93	0,90	0,62	0,59	0,76	0,87	0,17	-0,18	0,40	0,46	0,49	0,96	1		
Bi	0,85	-0,87	0,97	0,95	-0,56	0,84	0,94	0,89	0,95	0,93	0,96	0,71	0,97	0,97	0,84	0,79	0,95	0,92	-0,17	-0,46	0,13	0,69	0,41	0,97	0,91	1	
Zr	0,89	-0,86	0,98	0,96	-0,57	0,88	0,99	0,93	0,99	0,82	0,94	0,66	0,97	0,97	0,90	0,68	0,92	0,92	-0,34	-0,55	0,03	0,82	0,20	0,89	0,84	0,95	1

Tableau 35 : Coefficients de corrélation au sens de Pearson entre les éléments et entre les éléments et la distance à la côte (D: Distance à la côte).

NB : En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil $\alpha=0,050$ (test bilatéral).

Les quatre éléments toujours présents en dessous du seuil de quantification (Molybdène, Argent, Cadmium et Tungstène) n'ont pas été représentés. Xlstat n'accepte pas les constantes dans les calculs d'ACP.

Les éléments qui ont été détectés trop rarement (Béryllium, Yttrium, Niobium et Etain) ont également été éliminés.

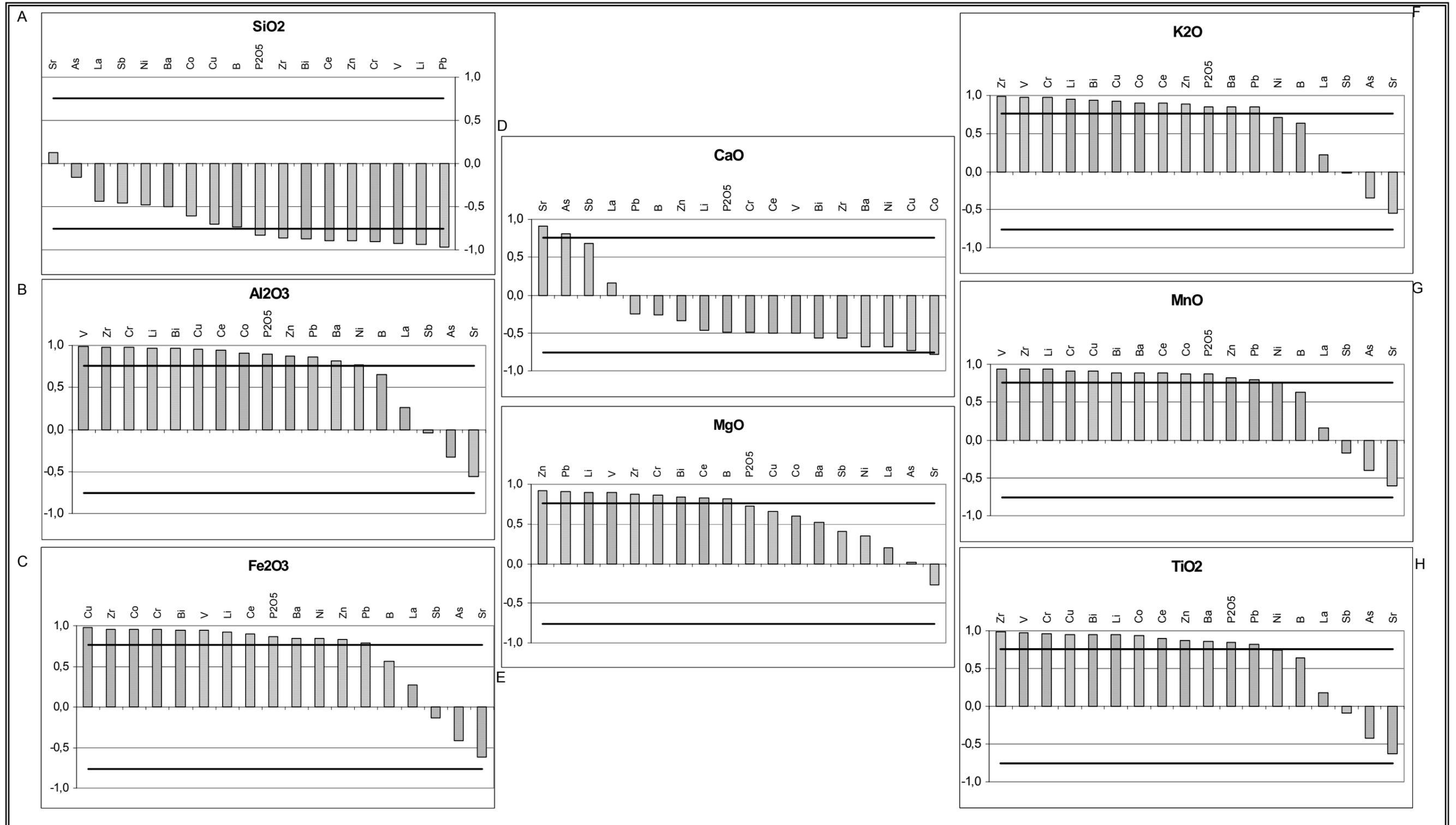


Figure 75 : Relations linéaires existantes entre chacun des 8 éléments majeurs avec les 22 éléments traces dosés.

Finalement, il est possible de déduire de l'étude de ces corrélations qu'il existe au moins 3 groupes de comportements élémentaires différents. Le premier groupe est composé de la grande majorité des éléments (majeurs et traces) et donc de la plupart des métaux. Elle se concentre à l'amont de l'estuaire. Les deux autres groupes sont composés d'un seul élément majeur (CaO d'une part et SiO₂ d'autre part). Cependant, afin de pouvoir identifier l'ensemble des éléments constitutifs de chacun de ces 3 groupes, l'étude de l'ensemble des données est nécessaire. Pour cela, les facteurs d'enrichissements ont été calculés et une analyse en composante principale a été réalisée.

• Facteurs d'enrichissement

Le concept de facteur d'enrichissement consiste à utiliser un échantillon désigné comme référence. Dans le cas des études sur les estuaires, ce prélèvement est celui qui est situé le plus à l'amont du cours d'eau. Il représente alors la composition chimique des sédiments continentaux. Les facteurs d'enrichissement FE sont ensuite déterminés plus à l'aval en calculant le rapport existant entre les teneurs élémentaires de chacun des prélèvements estuariens sur les teneurs élémentaires du point de référence ($FE_x = [X]_n/[X]_{réf}$).

Dans le cas de notre étude, les deux échantillons localisés les plus à l'amont sont proches de sources potentielles de pollution. Cependant, les teneurs observées pour chacun des 34 éléments dosés sur ces 2 points sont similaires aux teneurs observées sur les 5 autres (sauf pour les phosphates). Le point 18 situé à proximité de la STEP peut donc servir de point de référence. La Figure 76 présente les résultats obtenus et le graphique b montre l'évolution de ces facteurs d'enrichissement pour les 8 éléments majeurs en fonction de la distance à la côte.

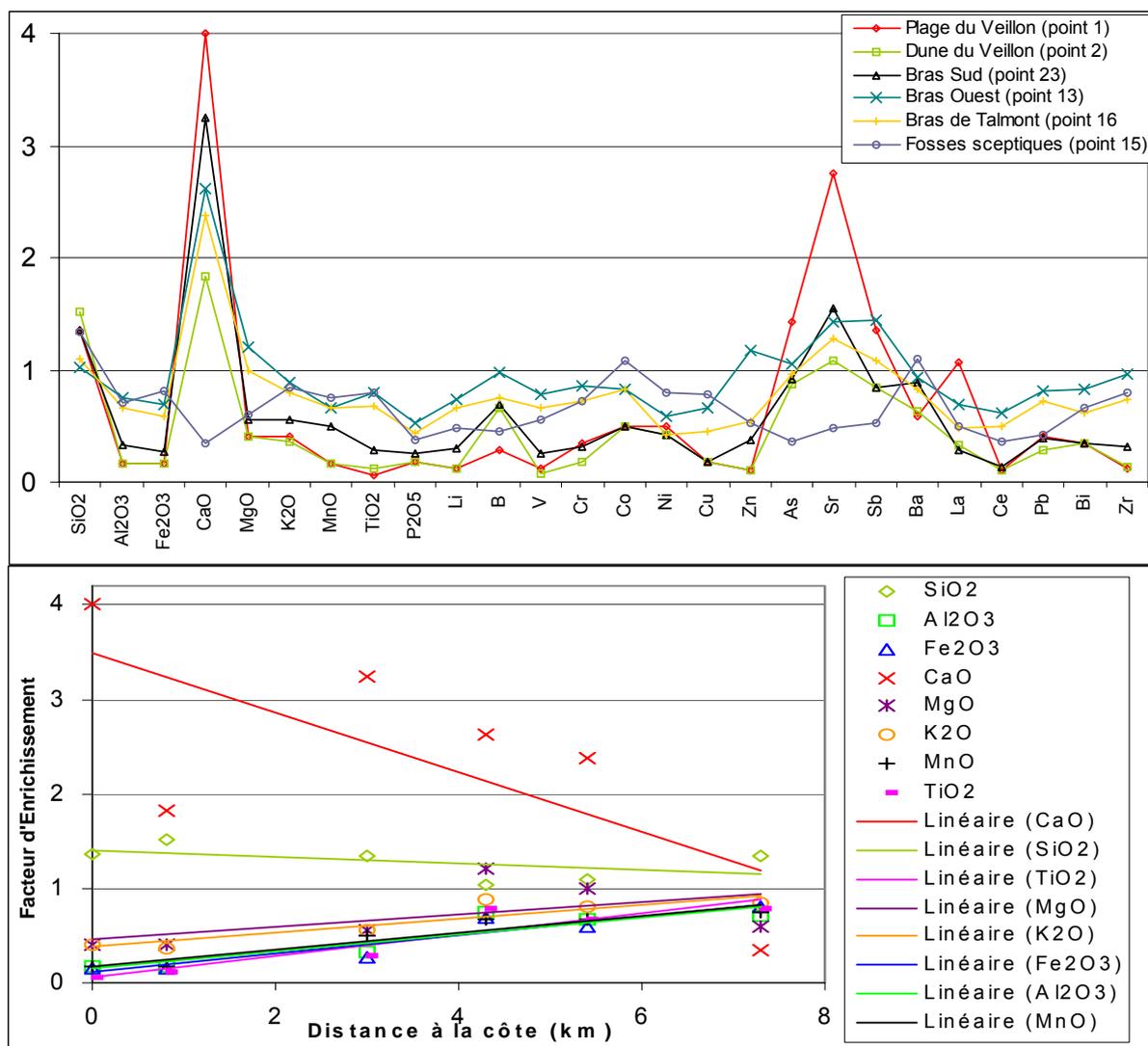


Figure 76 : a) Evolution des facteurs d'enrichissement pour les 30 éléments montrant des variations amont-aval de leurs teneurs et b) Evolution des FE pour les 8 éléments majeurs en fonction de la distance à la côte

Il ressort de ces deux graphiques que la quasi-totalité des éléments dosés montrent des variations de leurs facteurs d'enrichissements. 21 éléments dont les 6 éléments majeurs évoqués plus haut (Mn, Al, Fe, Mg, K et Ti) montrent des facteurs d'enrichissement qui diminuent vers l'aval du cours d'eau, ce qui témoigne d'un appauvrissement. Celui-ci peut être mis en relation avec les hypothèses reprises par Ph. Negrel qui ont été évoquées précédemment. De plus, on observe un

enrichissement vers l'estuaire de 3 éléments. Il s'agit des oxydes de calcium (CaO) et du strontium (Sr), et à un degré moindre de la silice (SiO₂).

Des valeurs de FE constantes et proches de 1 sont mises en évidence pour 3 éléments. Il s'agit de l'arsenic, de l'antimoine (Sb) et du lanthane (La). Les oscillations observées peuvent être assimilées à un bruit de fond.

L'analyse des facteurs d'enrichissement montre donc 2 groupes ayant un comportement différent lors des transits intra-estuariens. Le premier groupe a un comportement dit « conservatif ». Les FE associés à ces éléments ne sont pas modifiés notablement. Le second groupe est quant à lui caractérisé par un comportement dit « non-conservatif ». Certains éléments sont enrichis tandis que d'autres sont appauvris lors des transits intra-estuariens. Ces éléments peuvent être mis en relation avec les éléments montrant des corrélations significatives avec la distance D tandis que les éléments conservatifs sont à relier avec ceux ne montrant pas de relation linéaire avec D.

Afin d'identifier avec certitude les éléments communs à chacun des groupes, l'Analyse en Composantes Principales (ACP), a ensuite été effectuée à l'aide d'XLSTAT.

• Analyse en Composantes Principales

L'analyse en composantes principales est une analyse factorielle qui permet de mettre en évidence à partir d'une base de données comportant n variables (30 éléments) et m individus (7 sédiments), la structure des relations existant entre les données. Les directions préférentielles d'allongement du nuage à n dimensions sont déterminées et l'ensemble des points est ensuite projeté dans le plan déterminé par les axes factoriels. Le premier axe est celui qui permet d'expliquer le plus grand pourcentage de variance. Les autres expliquent la variance résiduelle.

Dans le cas des sédiments estuariens du Payré, les résultats de l'ACP ont mis en évidence un certain nombre d'axes factoriels. L'axe principal F1 permet à lui seul d'expliquer 69 % des variations des teneurs des 30 éléments considérés sur les 7 points pris en compte. Les résultats pour les axes F1 et F2 sont présentés sur la Figure 77. Les axes en violet représentent la relation avec la distance à la côte, tracés à partir du carré violet intitulé D représentant la distance à la côte. Finalement, 4 groupes de comportement distincts ressortent de cette analyse.

- ◆ Le premier groupe est en relation étroite avec la distance à la côte D. Cela signifie que les éléments constitutifs de ce groupe sont principalement rencontrés en amont. Il est composé de 20 éléments dont 6 majeurs (Mn, Al, Fe, Mg, K et Ti) et 14 traces (Zr, V, Cr, Li, Bi, Co, Ni, Ce, Ba, P₂O₅, Zn, B, Cu et Pb). Le sédiment étudié étant le plus proche de cette phase est le point n°18 (STEP) qui est également celui localisé le plus à l'amont de l'estuaire tandis que deux points

témoignant des apports de deux sous bassins versant (bras ouest et bras de Talmont) restent proches de ce pôle. Il s'agit donc des éléments constitutifs des vases d'origine continentale.

- ◆ Le second groupe est constitué de 3 éléments traces ; le lanthane, l'antimoine et l'arsenic. Il s'agit des 3 éléments ayant un comportement conservatif se retrouvant indifféremment dans l'ensemble des sédiments estuariens.
- ◆ Les troisièmes et quatrièmes groupes sont constitués par la silice d'une part et par les oxydes de calcium et le strontium d'autre part. Ces trois éléments sont ceux qui sont enrichis vers l'estuaire extérieur. En mettant en relation ces 2 phases avec les individus étudiés, il s'avère que le pôle constitué par la silice est proche du sable dunaire et du point 23, situé à proximité des parcs, tandis que le pôle constitué de CaO et Sr est plus proche du sable de plage. Les analyses granulométriques avaient montré la présence en quantité importante d'une fraction biogénique carbonatée dans le sable de la plage en opposition avec celui des dunes. Ainsi, ces deux phases correspondent aux fractions siliceuses et aux fractions biogéniques des sables.

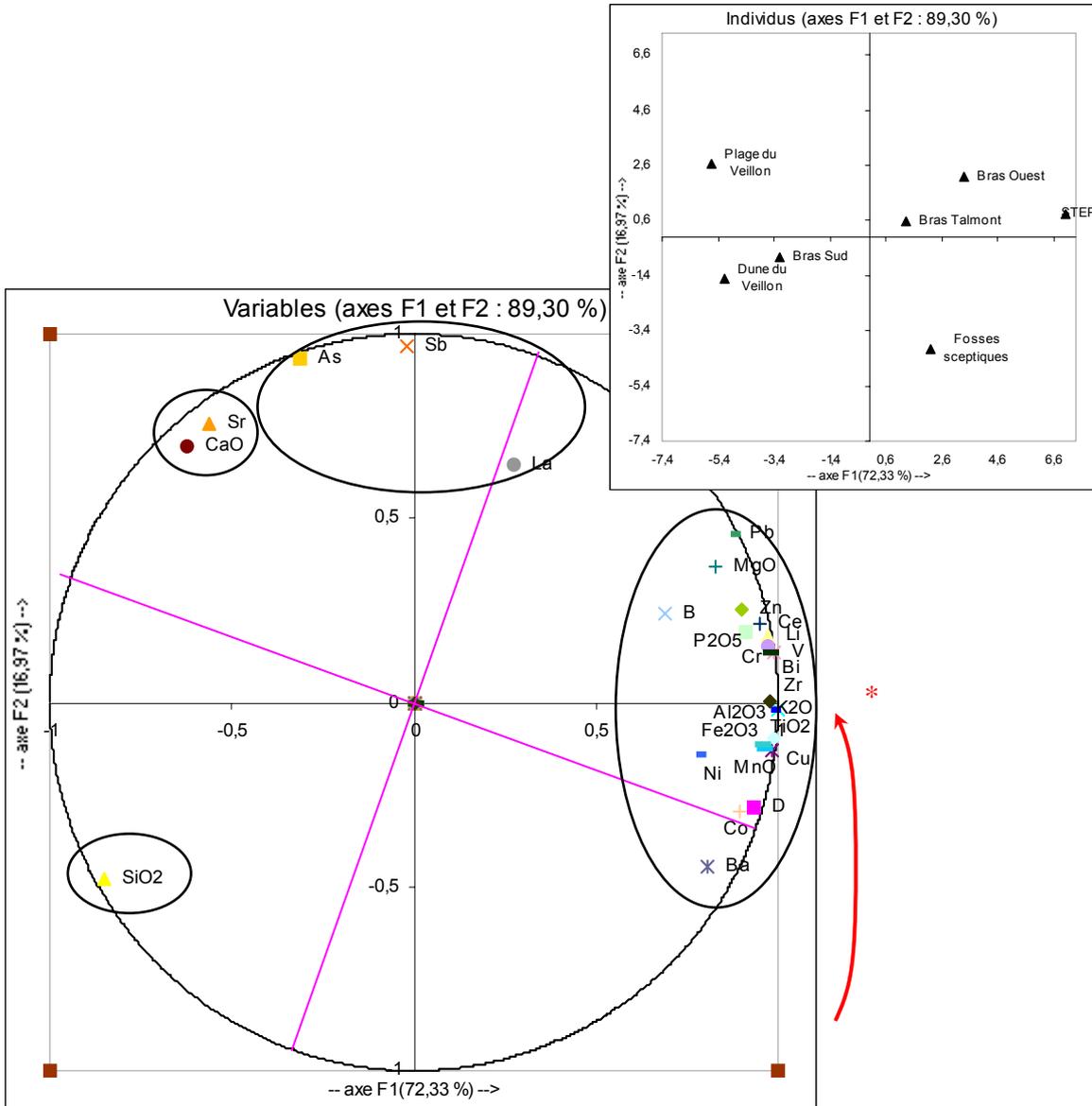


Figure 77 : Diagramme dans le plan principal selon les axes F1 et F2.

* : La flèche rouge présente sur le graphique montre la perte progressive de l'influence de la distance D sur les différents éléments constitutifs du premier groupe d'éléments.

3.9. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES SUR LE BASSIN VERSANT DU PAYRE

Dans le cadre du projet CYCLEAU, l'étude du bassin versant du Payré comprenait les volets suivants :

- contribution à la caractérisation physique du bassin (carte géologique, données de sondages, modèle numérique de terrain...);
- approche du fonctionnement hydrodynamique du bassin (bilan hydrique, mesures de débit);
- identification des apports des sous bassins versants aux flux arrivant à l'estuaire (réseau de suivi de la qualité de l'eau, campagnes de prélèvements et d'analyses, interprétation des données);
- érosion/sédimentation en lien avec l'activité ostréicole.

Caractérisation physique

Le Payré s'écoule sur une distance d'environ vingt kilomètres selon une direction NE-SO et se jette dans l'océan Atlantique à proximité de la ville de Talmont Saint Hilaire. Son cours peut être décomposé en trois affluents principaux alimentés par quelques ruisseaux. Le contour du bassin versant a été réalisé à partir du MNT au pas de 50 m.

Le bassin versant se situe en Vendée à l'extrémité sud du Massif armoricain au contact avec la bordure septentrionale du bassin d'Aquitaine. Il présente ainsi une zone de socle, topographiquement haute et constituée principalement de schistes, micaschistes et granites. La partie sédimentaire, topographiquement basse, comprend des calcaires, des argiles et des sables.

Fonctionnement hydrodynamique

En l'absence de station de mesure sur le bassin versant du Payré, une première approche du fonctionnement hydrodynamique a été effectuée à partir des données disponibles sur un bassin versant voisin aux caractéristiques proches. Un bilan hydrique préliminaire a tout d'abord été réalisé. Il a permis de faire une estimation des volumes annuels s'écoulant dans le lit du Payré. D'autre part, la méthode de Thornwaite modifiée a permis à partir des données de pluviométrie efficace (déduite des pluies brutes, de l'évapo-transpiration et d'une évaluation des réserves utiles) et de débits d'estimer à environ 50 % - 50 % la répartition entre les écoulements d'eau en surface et l'infiltration en souterrain dans la zone de socle du bassin versant. Les chiffres obtenus à l'aide de données différentes aboutissent au même ordre de grandeur. Ils semblent donc indiquer que les écoulements annuels du Payré soient de l'ordre de 50 millions de m³.

Afin d'affiner cette approche, un réseau de mesure a été implanté, tant pour les eaux de surface que pour les eaux souterraines. Le réseau comprend 7 points de mesure de débits de rivière et 39 points de mesure de niveau piézométrique. Le réseau a été implanté en fonction de la répartition géologique et parfois des contacts entre les formations, de l'arborescence du réseau hydrographique et du suivi de certaines confluences. Les campagnes de mesures ont été effectuées en hautes et basses eaux sur les années 2004 et 2005.

En conclusion des études hydrologiques, il s'avère que l'interprétation détaillée des débits dans le bassin versant se trouve confrontée à plusieurs obstacles majeurs, rendant les corrélations illusoirs :

- Des pompages dans les ruisseaux ou dans leurs environnements immédiats, pouvant conduire parfois à des tarissements partiels,
- Un cours d'eau majeur du bassin versant, dont le débit (point B3) est complètement influencé par un barrage (Finfarine) et témoigne de la politique de gestion des lâchés d'eau.

Une modélisation de l'ensemble de la surface piézométrique a permis une approche globale des eaux souterraines. Le comportement des eaux souterraines en domaine de socle et en domaine sédimentaire étant différent, deux méthodes de représentation ont été utilisées. En domaine de socle, nous avons fait appel à la méthode mise au point et validée par Robert Wyns (Wyns, 1998 ; Wyns et al., 2004) tandis que pour le domaine sédimentaire, la méthode classique de représentation a été utilisée. Les résultats obtenus ont été croisés avec les différents points de mesures pour vérifier la validité du modèle. Celui-ci a permis de localiser les zones de baisse maximale du niveau piézométrique (sur les plateaux), les zones de baisse minimale (en domaine sédimentaire et à proximité du lit des rivières) et de quantifier ce battement.

Le suivi piézométrique a mis en évidence un niveau de la nappe calcaire nettement plus bas que celui des nappes situées dans les autres formations géologiques. Ceci peut être lié à des différences de propriétés des formations. Il se peut aussi que ce niveau plus bas soit lié à une exploitation plus importante de l'aquifère. Compte tenu de l'intérêt de l'aquifère, il apparaît important de vérifier son niveau d'exploitation. En effet, la surexploitation pourrait entraîner une progression du biseau salé vers l'intérieur des terres et à terme mettre en danger la qualité de l'eau (salinisation).

Apports des sous bassins versants

Pour identifier les apports des sous bassins versants, un réseau de suivi de la qualité de l'eau a été mis en place. Les campagnes de prélèvements et d'analyses ont concerné les matières en suspension (MES) et la turbidité (7 points de mesure), le pH et la conductivité (16 points de mesure) pour les eaux de surface. Une campagne d'analyses physico-chimiques en basses eaux a été également planifiée.

Les mesures ont montré une influence forte de pompages. En effet, les débits des ruisseaux étant relativement faibles, tout pompage se manifeste par une altération très

sensible du flux. La présence d'un barrage sur un cours d'eau majeur, les incertitudes sur les débits et l'impossibilité de pouvoir établir des bilans sur ces derniers empêche toute analyse fine des flux de MES. La sécheresse marquée de l'été 2005 a empêché en outre une partie du suivi. Il en est de même pour la chimie de l'eau.

Compte tenu de la complexité et de l'ampleur des interventions anthropiques sur les flux des sous bassins versant, une approche plus détaillée (incluant une enquête auprès des différents usagers de l'eau, une quantification des pompages,...) serait nécessaire pour permettre d'établir un bilan complet.

Erosion/sédimentation

Afin d'évaluer l'état de l'érosion sédimentation sur la partie basse du bassin versant en lien avec les problèmes rencontrés par les ostréiculteurs, une campagne d'analyse des sédiments a été réalisée.

Les analyses granulométriques réalisées ont permis de caractériser le fonctionnement hydrologique et sédimentaire de l'estuaire. En effet, les différents faciès ont pu être individualisés de même que les zones d'influences marines et continentales ont pu être délimitées. Les teneurs en matière organique ainsi que les analyses chimiques des éléments majeurs et des éléments traces (ICP multi-élémentaire), ont par la suite permis de statuer sur le caractère polluant de certains de ces sédiments. Il en est ressorti des teneurs importantes en arsenic, en chrome et en baryum. Leur présence en forte quantité a pu être expliquée par deux hypothèses ; le fond géochimique local qui semble l'hypothèse la plus probable et la présence d'activités industrielles pouvant être à leur origine. Des teneurs importantes en phosphates ont également été identifiées. Enfin, une analyse statistique a permis d'identifier 4 groupes d'éléments fonctionnant de manière distincte.

4. Méthodologie CYCLEAU - Apports du BRGM

La figure 78 présente les actions menées par le BRGM en fonction des problématiques des deux bassins versants Français (Bélon et Payré).

Ces actions sont tout à fait applicables aux cas des bassins Anglais et Irlandais du projet CYCLEAU.

Ces actions seront intégrées dans le CD-Rom détaillant la méthodologie CYCLEAU, CD réalisé par l'Environment Agency (leader du projet). Ces actions seront rassemblées sous les thèmes : Processus Physiques et Pollutions diffuses.

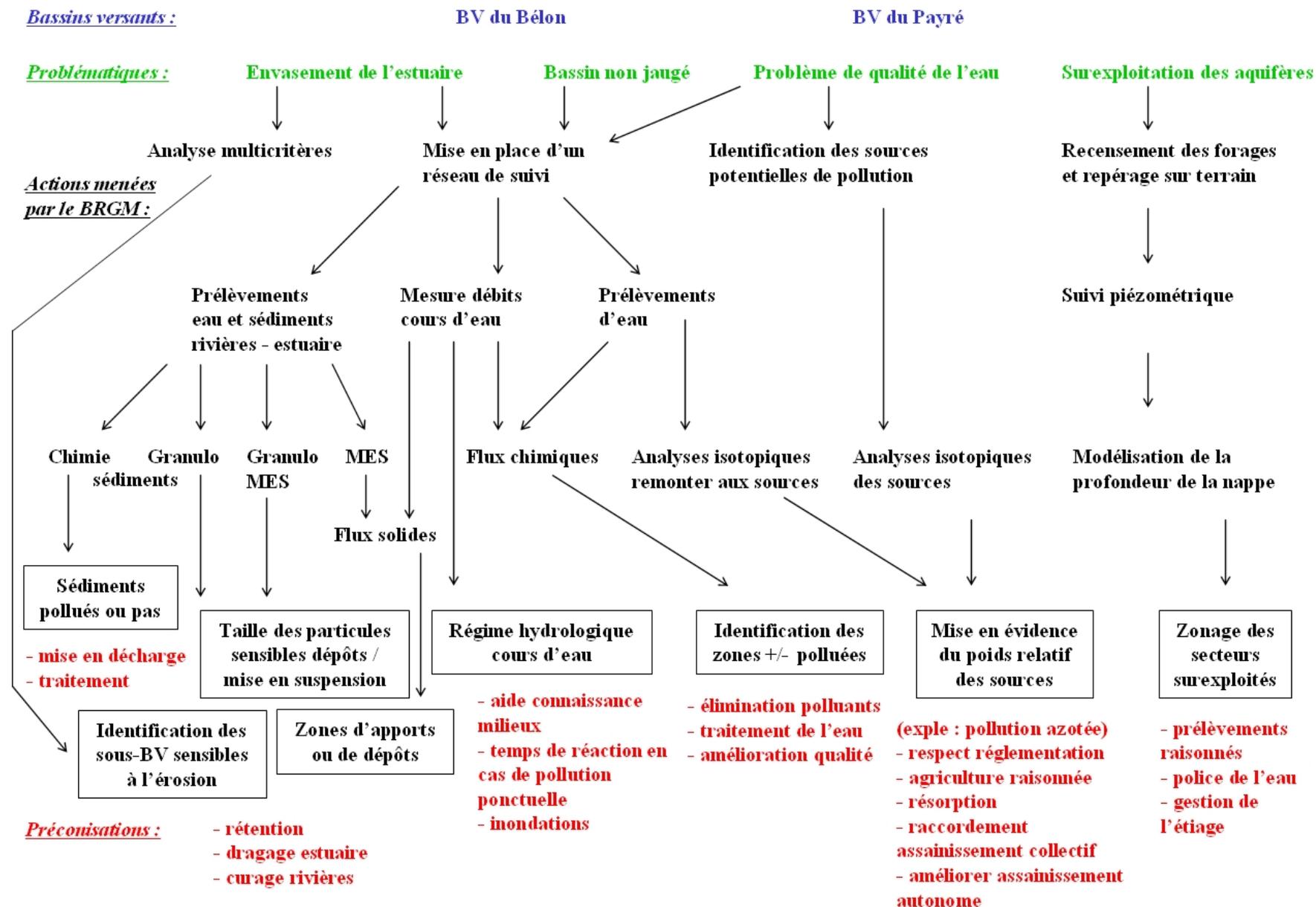


Figure 78 - Méthodologie du BRGM dans le cadre du projet CYCLEAU

5. Conclusion

Le programme CYCLEAU est un projet Européen (INTERREG IIIB ENO) mené sur 11 bassins versants : 2 en France, 8 en Angleterre et 1 en Irlande. Le BRGM est entré dans le projet en juin 2004. La fin du projet est fixée au 31 décembre 2006, donc après 2,5 années d'études pour le BRGM.

Ce rapport compile l'ensemble des résultats obtenus par le BRGM dans le cadre du programme CYCLEAU. Les travaux du BRGM ont porté, en parallèle, sur deux bassins versants :

- le Bélon en Bretagne (Sud-Est du Finistère),
- et le Payré en Pays de la Loire (Sud-Ouest de la Vendée).

Sur chacun de ces bassins, 4 thèmes principaux ont été abordés (résultats exposés dans les différents chapitres du rapport) :

- contribution à la caractérisation physique du bassin (carte géologique, données de forages, modèle numérique de terrain...);
- approche du fonctionnement hydrodynamique du bassin (installation d'échelles limnimétriques, mesures de débit, flux d'eau arrivant à l'estuaire...);
- identification des apports des sous bassins versants aux flux solides et polluants arrivant à l'estuaire (réseau de suivi de la qualité de l'eau, campagnes de prélèvements et d'analyses, interprétation des données);
- identification et estimation relative des contributions des différentes sources de pollution azotée (bovins, poulets, cochons, station d'épuration, engrais chimiques...) par analyses isotopiques.

L'ensemble des objectifs ci-dessus, correspond aux thèmes 2.2 « Processus Physiques » et 2.3 « Pollutions diffuses » tels que définis dans le programme INTERREG III B, et plus particulièrement aux actions 2.2.1, 2.2.4 et 2.3.3.

6. Bibliographie

Barth S. (1993) - Boron isotope variations in nature : a synthesis, *Geol Rundsch*, 82, 640-651

Barth S. (1998) – Application of boron isotopes for tracing sources of anthropogenic contamination in groundwater, *Water Research*, 32, 685-690.

Berner-Kay and Berner 1987 - The global water cycle - Geochemistry and Environment - Prentice Hall Edition

Cantanzaro E.J., Champion,C.E., Garner,E.L., Marienko,O., Sappenfield,K.M., et Shields,W.R. (1970) - Boric acid, isotopic and assay standard reference materials, 260-17, U.S.National Bureau of Standards

Chery L. - Editions BRGM 2006 - Guide technique - Qualité naturelle des eaux souterraines - Méthodes de caractérisation des états de référence des aquifères Français

Junk G. et Svec H.J. (1958) - The absolute abundance of the nitrogen isotopes in the atmosphere and compressed gas from various sources, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 14, 234-243

Mougin B. et Le Guern C. collaboration **Leclercq M., Conil P., Thomas E. et Jégou J-P.** (2004) - Projet CYCLEAU - Caractérisation initiale des bassins versants du Bélon et du Payré (France) - Rapport d'avancement de l'année 2004 - BRGM/RP-53520-FR - 76 p., 16 tab., 30 fig., 1 annexe.

Mougin B., Leclercq M. et Conil P. collaboration **Jégou J-P.** (2005) - Projet CYCLEAU - Caractérisation initiale des bassins versants du Bélon (Finistère) et du Payré (Vendée) - Rapport d'avancement de l'année 2005 - BRGM/RP-54258-FR - 57 p., 21 tab., 20 fig., 4 annexes.

Negrel P. - Géochimie multi-élémentaire des sédiments de l'estuaire de la Loire, 1994
Ce rapport intègre les références bibliographiques suivantes : Robbe et al. 1985, Etcheber 1983, Boust 1981, Jouanneau 1982, Frenet 1981, De Groot & al 1976.

Rabu D., Chantraine J. et Béchenec F., 2001. Carte géologique du Massif Armoricaïn à 1/ 250 000. BRGM.

Widory D., Chéry L., Mougin B. et al (2001) – Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines : cas du bassin de l'Arguénon (Côtes-d'Armor). Rapport BRGM/RP-51091-FR.

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)

Annexe 1

Protocoles analytiques

Les échantillons ont été analysés dans les laboratoires d'analyses du BRGM à Orléans selon des méthodes et normes en vigueur.

Matières en suspension (MES)

Les analyses ont été effectuées sur de l'eau brute filtrée sur filtre Sartorius type 13440 selon la norme NF EN 872 d'avril 1996.

La technique utilisée consiste à passer les échantillons de 1L sur des filtres à l'aide d'une pompe à vide. Les MES se déposent ainsi sur les filtres. La masse correspondante (mg/L) est obtenue par différence entre la masse du filtre avant et après filtration et séchage.

Turbidité

Les mesures ont été effectuées en utilisant le matériel Turbiquant® 1500T de MERCK. Après calibrage de l'appareil (à l'aide de trois tubes étalons de 0.02, 10 et 1000 NTU Formazine), le turbidimètre est utilisé conjointement avec un agitateur magnétique. Ce protocole permet d'éviter les fluctuations des mesures causées par la décantation des particules. La turbidité retenue pour un échantillon correspond à la moyenne algébrique de 12 valeurs enregistrées pendant 1 minute toutes les 5 secondes.

Température, pH, conductivité

Ces paramètres ont été mesurés sur place, au moyen d'équipements de terrain : pH mètre JENWAY 3150 (pH et température) et conductimètre WTW LF 318. Le pH mètre est étalonné avant chaque mission de mesure et vérifié également au retour.

Chimie des majeurs et traces

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.

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.

Le dosage des chlorures, 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 et NF EN ISO 10304-2 (Septembre 1996) pour les eaux usées, par évaluation des aires des pics.

Le dosage des éléments traces s'est fait par ICP/MS selon le mode opératoire MO108.

Isotopes

Azote $\delta^{15}\text{N}$

Concentration des espèces azotées par évaporation puis réduction des nitrates par l'alliage de Devarda ; l'ammoniac est piégé sous forme NH_4Cl dans de l'acide chlorhydrique. Réaction du NH_4Cl formé avec LiOBr et piégeage de l'azote dégagé sur charbons actifs. Analyse par spectrométrie de masse en phase gazeuse. Rapport isotopique $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ exprimé en « δ ‰ vs Air », précision de l'ordre de 0,3 ‰.

Bore $\delta^{11}\text{B}$

Mesure du $\delta^{11}\text{B}$ par analyse sur mono filaments de Ta en ions positifs

Les traceurs isotopiques

Contrairement aux propriétés chimiques liées au cortège électronique, les propriétés physiques d'un élément dépendent de son noyau. Les isotopes des éléments, possédant le même nombre de protons, mais un nombre variable de neutrons, auront des propriétés chimiques identiques, mais des propriétés physiques telles que la viscosité, la pression de vapeur ou encore la masse, différentes.

La minéralisation biologique de la matière organique du sol se fait en deux étapes. L'ammonification se traduit par la production d'ammonium (NH_4^+) à partir de protéines puis la nitrification ou formation de nitrates (NO_3^-). Dans les sols naturels ou sans fertilisation azotée notable, la teneur en ^{15}N des nitrates est comprise entre +6 et +9 ‰. La teneur en NO_3^- de l'eau des sols est faible. La teneur en ^{15}N des engrais chimiques de synthèse (à partir de N_2 atmosphérique) est comprise entre 0 et +3 ‰. Celle des nitrates dérivant des rejets humains ou animaux (pollution organique) est comprise entre +10 et +20 ‰. Dans les nappes profondes lorsque tout l'oxygène dissous a été consommé, peut commencer la dénitrification où les ions NO_3^- sont réduits en azote moléculaire N_2 . L'azote produit est appauvri en ^{15}N et les NO_3^- restants sont enrichis, l'enrichissement isotopique est compris entre -5 et -30 ‰. L'étude de la variabilité naturelle et induite par diverses activités anthropiques des valeurs de ^{15}N permet de déterminer l'origine de la pollution des eaux par les nitrates.

Les concentrations et les teneurs isotopiques du bore ($\delta^{11}\text{B}$) sont susceptibles de tracer des contaminations ponctuelles de différentes origines (Barth, 1993). Le bore est un élément trace possédant deux isotopes stables ^{10}B et ^{11}B extrêmement solubles dans les fluides aqueux. La grande différence relative de masse entre ses isotopes stables ainsi que sa forte réactivité géochimique entraîne un fractionnement isotopique important et une large gamme des valeurs naturelles du $\delta^{11}\text{B}$ de l'ordre de 90 unités delta. Les rapports isotopiques du bore (40 ‰ d'écart) sont très différents pour les eaux souterraines, les eaux issues d'eaux résiduelles urbaines ou d'eaux d'irrigation par exemple (Barth, 1998). Le bore est un traceur conservatif en raison de sa forte solubilité en solution aqueuse (sous forme d'acide borique), et de l'absence d'effets associés à l'évaporation, l'oxydo-réduction et la volatilisation. Des fractionnements peuvent être liés cependant à des phénomènes de sorption. Le bore présente ainsi un

fort potentiel de signature isotopique en terme de mélange ou de processus spécifiques.

Lorsque les produits d'une réaction présentent des compositions isotopiques distinctes de celles des produits d'origine, on parle de fractionnement isotopique. Les écarts de composition isotopique étant souvent très faibles, on préfère utiliser la notation δ (delta) qui exprime la différence relative (en ‰) d'atomes de l'isotope léger entre l'échantillon et un standard international :

$$\delta^{15}N = \left(\frac{\left(\frac{^{15}N}{^{14}N} \right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{15}N}{^{14}N} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad \text{ou} \quad \delta^{11}B = \left(\frac{\left(\frac{^{11}B}{^{10}B} \right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{11}B}{^{10}B} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

Le rapport isotopique est donné en déviation pour mille.

Pour l'azote, la notation $\delta^{15}N$ est utilisée (isotopes : ^{15}N et ^{14}N). Le standard est l'air : $^{15}N/^{14}N = 3675,5 \cdot 10^{-6}$ (Junk et Svec, 1958).

Dans le cas du bore, la notation $\delta^{11}B$ est utilisée (isotopes : ^{11}B et ^{10}B). Le standard est le standard NBS-951 ($^{11}B/^{10}B = 4,04362$; Cantanzaro *et al.*, 1970).

La valeur obtenue sur 18 déterminations du standard NBS-951 durant cette période est de 4,05025 +/- 139 (2 σ) (reproductibilité externe = +/- 0.3 en ‰). Cette incertitude analytique totale de +/- 0.3 ‰ (2 σ) est attribuée à chaque détermination individuelle de $\delta^{11}B$ dans le cadre de cette étude.

Le fractionnement isotopique

L'origine du N est le N_2 atmosphérique de rapport isotopique N^{15}/N^{14} de 0.0036765.

Le N des eaux souterraines vient de l'atmosphère, et de la contamination humide ou sèche (N_2 et NO_x), fertilisants minéraux, matière organique. Ce sont des processus microbiens qui interviennent dans les phénomènes de nitrification, dénitrification, fixation biologique et minéralisation de l'azote organique. Du fait de la complexité des phénomènes biogéochimiques il n'est pas possible d'utiliser les isotopes du NO_3 de manière quantitative.

Les processus principaux dans le domaine hydrologique sont la nitrification, la dénitrification et la fixation de l'azote (transformation du N_2 en N organique). Les fractionnements isotopiques sont forts dans ces trois cas.

Quasiment tous les processus de fractionnement dans la nature où intervient le N^{15} sont cinétiques. Seule la dissolution du N_2 dans l'eau (fractionnement à l'équilibre) et la diffusion du N_2 sont des processus non biologiques.

Trois phénomènes fondamentaux contrôlent la composition isotopique des composés azotés: le fractionnement à l'équilibre, le fractionnement cinétique et le mélange des deux.

Le fractionnement isotopique à l'équilibre contrôle la dissolution de l'ammonium. La réaction réversible NH_3 (gaz) + H^+ = NH_4^+ à un facteur de fractionnement isotopique ($\delta\text{NH}_4\text{-NH}_3$) de +25 à +35 ‰ alors que la dissolution irréversible de l'ammonium dans l'eau possède un facteur de fractionnement isotopique négatif.

La dénitrification bactérienne (de NO_3^- à N_2) fractionne les isotopes de ($\delta\text{N}_2\text{-NO}_3$) de -25 à -35 ‰ et peut s'écrire suivant la distillation de Rayleigh pour un système ouvert. Le nitrate résiduel a donc une valeur plus élevée de ^{15}N .

La minéralisation du N organique des sols en ions nitrates se fait à travers divers processus. Le facteur global de fractionnement isotopique ($\delta\text{NO}_3\text{-N}_{\text{org}}$) de cette réaction complexe se situe entre 0 et -35 ‰ selon les dominantes du processus.

L'utilisation des isotopes de l'azote pour les études de contamination tient compte de l'ensemble des processus mais ne permet pas de les isoler. La résultante est un mélange complexe de diverses sources et des processus de dénitrification ou nitrification microbienne.

Annexe 2

Photographies prises lors de la campagne de février 2006



Sondes de mesures du pH, de la conductivité, du potentiel Redox et de l'oxygène dissous



Filtration d'un échantillon d'eau de rivière (Bélon)



Prélèvements d'eau du Bélon (pour analyses chimiques, isotopiques, MES et turbidité)



Mesure du débit au micromoulinet sur le point L (Castel Coudiec, Bélon)



Mesure in-situ de l'oxygène dissous au point L (Castel Coudiec, Bélon)



Sonde de mesure in-situ de l'oxygène dissous au point L (Castel Coudiec, Bélon)

Annexe 3

Rapport de l'entreprise CASPEO (Rapport 2005/MVD/136 - Décembre 2005)



Au service de vos procédés
www.caspero.net

Projet CYCLEAU Bilan de bassin versant

Rapport 2005/MVD/136
Décembre 2005



Au service de vos procédés
www.caspeo.net

Projet CYCLEAU Bilan de bassin versant

Rapport 2005/MVD/136
Décembre 2005

MV DURANCE – S. BROCHOT

3, avenue Claude Guillemin
BP 6009
45060 ORLEANS CEDEX 2 - FRANCE
Tel : 02 38 64 31 96 – Fax : 02 38 25 97 42
E-mail : info@caspeo.net

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
1. Méthodologie	5
1.1 Le bilan matière.....	5
1.2 La réconciliation des données	5
a) Principe	5
b) Théorie	6
2. Application sur les données du projet Cycleau.....	8
2.1 Graphe de circulation	8
2.2 Bilan eau	11
a) Le Dourdu.....	11
b) Le Bélon	13
c) L'ensemble du bassin.....	14
2.3 Suivi des MES.....	15
2.4 Bilan des espèces en solution	17
a) Nitrate.....	18
b) Sulfates	22
c) Chlore.....	25
d) Fer	28
e) Silice.....	32
CONCLUSION.....	35

INTRODUCTION

Caspeo est une entreprise innovante, dont la spécialité est l'analyse des procédés industriels. Dans ce contexte, elle a développé un savoir-faire dans l'analyse des réseaux de circulation de flux solides et liquides par la mise en œuvre de techniques avancées de bilan matière. Le BRGM-Service Géologique Régional (SGR) de Bretagne a donc demandé à Caspeo de mettre en œuvre cette compétence dans l'analyse des réseaux hydrologiques de deux bassins versants, Bélon (29) et Payré (85) objets du projet CYCLEAU.

L'objectif est de vérifier et éventuellement adapter l'utilisation des bilans matière et de la méthode de réconciliation des données pour l'analyse des bassins versants.

Le déficit hydrique de l'année 2005 n'a pas permis de réaliser les mesures et échantillonnage sur le bassin du Payré. L'étude s'est donc portée sur le bassin du Bélon.

1. Méthodologie

1.1 Le bilan matière

La méthode du bilan matière utilise le principe de conservation de la matière. Cette méthode est issue du génie des procédés. Elle est utilisée pour analyser le fonctionnement des installations industrielles à travers la description plus ou moins fine de la matière qui y circule.

Plus largement, l'approche par bilan matière s'applique à différents domaines. Partout où l'on trouve des réseaux de transport ou de transformation de matière, cette approche permet la détermination de données non mesurées et une connaissance plus fines des flux de matière.

Un système donné est représenté par son graphe de circulation, constitué de nœuds et d'arcs (cf. figure 1, p.7), et un ensemble de grandeurs à suivre. Parmi les grandeurs rencontrées on peut citer :

- des débits,
- des compositions chimiques élémentaires ou en espèces,
- des taux de matières en suspension.

Le bilan matière a pour objet la détermination des valeurs de chaque grandeur choisie pour chacun des arcs en tenant compte à la fois des valeurs obtenues par la mesure et des lois de conservation de la matière. Une fois déterminées, ces valeurs sont utilisées pour calculer des rendements ou des taux de contributions.

Dans le cas de l'analyse d'un bassin versant, cette méthode permet de valider les apports respectifs de chaque source (cours d'eau, ruissellement, précipitation) en termes de débits d'eau et de débits partiels de constituants.

1.2 La réconciliation des données

a) Principe

Partout où existent des relations, théoriques ou empiriques, entre des paramètres mesurés, apparaît un problème de réconciliation de données. En raison des erreurs de

mesure, les données expérimentales sont incohérentes : elles ne vérifient pas les relations théoriques ou empiriques (Hodouin, et Everell., 1980, Herbst, et autres, 1988, Fourniguet, et autres, 1997).

L'objectif de la réconciliation de données est de trouver un ensemble d'estimateurs des valeurs mesurées qui soient aussi proche que possible des mesures et qui vérifient les relations théoriques. Quand ces relations sont les lois de conservation de la matière, le problème peut être résolu en utilisant la réconciliation de données par équilibrage de bilan matière.

Cette approche apporte un complément important à la démarche d'échantillonnage en associant à la connaissance de l'erreur d'échantillonnage en chacun des points d'un réseau, la connaissance des relations entre les flux et les liens entre les mesures effectuées (dimensions, teneurs, humidité, etc.). La redondance qui peut être générée par ces informations permet alors de fournir des estimateurs cohérents plus précis que les mesures isolées. Cette approche permet de détecter des valeurs aberrantes et de compenser les erreurs induites par la prise d'échantillon et la mesure.

b) Théorie

L'objectif de la réconciliation des données par bilan matière cohérent est de trouver un jeu d'estimateurs:

1. complet (tous les flux sont parfaitement décrits),
2. aussi proche que possible des valeurs expérimentales
3. respectant les lois de conservations de la matière.

Pour chaque flux, la décomposition de la matière qui circule est la suivante :

- Q_{pi} débit de la phase p dans le flux i
- X_{pig} teneur massique de l'élément g

Les valeurs mesurées \bar{Q}_{pi} et \bar{X}_{pig} ne vérifient jamais les contraintes de conservation de la matière en raison de l'incertitude des mesures. Le bilan matière va calculer des estimateurs Q_{pi} et X_{pig} qui, premièrement, respectent les contraintes de conservations et, deuxièmement, sont les plus probables. Ce dernier point est pris en compte en recherchant des estimateurs Q_{pi} et X_{pig} aussi proches que possible des valeurs mesurées \bar{Q}_{pi} et \bar{X}_{pig} , en tenant compte des erreurs associées à chaque mesure.

Mathématiquement, cela revient à minimiser la « fonction objectif » suivante :

$$J(Y) = \sum_i \sum_p J_{pi}(Y)$$

en respectant les contraintes de conservation (voir ci-dessous). Y est le vecteur des estimateurs (Q_{pi} , X_{pig}) et $J_{pi}(Y)$ est la fonction objectif de la phase p dans le flux i (Le Guirriec, et al., 1995, Le Guirriec, 1996). J s'exprime comme suit:

$$J_{pi}(Y) = \left(\frac{Q_{pi} - \bar{Q}_{pi}}{\sigma_{\bar{Q}_{pi}} \bar{Q}_{pi}} \right)^2 + \sum_g \left(\frac{X_{pig} - \bar{X}_{pig}}{\sigma_{\bar{X}_{pig}} \bar{X}_{pig}} \right)^2$$

Avec $\sigma_{\bar{Q}_{pi}}$ l'erreur sur la mesure du débit Q_{pi} et $\sigma_{\bar{X}_{pig}}$ l'erreur sur la teneur X_{pig}

Les contraintes sont de deux types :

Les contraintes de conservation de la matière

Les contraintes définies en fonction de la nature du nœud.

Les contraintes de conservation de la matière sont spécifiques à chaque nœud. Les lois de bases sont les suivantes :

- conservation de la quantité globale de la phase p autour du nœud j :

$$\sum_i M_{ij} Q_{pi} = 0$$

où M est la matrice d'incidence du graphe : $M_{ij} = 1$ si le flux i arrive au nœud j ,

$M_{ij} = -1$ si le flux i sort du nœud j , $M_{ij} = 0$ si le flux i ne passe pas par le nœud j .

- conservation de la quantité partielle de la classe k de la phase p autour du nœud j :

$$\sum_i M_{ij} Q_{pi} X_{pik} = 0$$

Il est possible de sommer certaines contraintes de conservation autour d'un nœud j pour obtenir une nouvelle contrainte de conservation pour prendre en compte, par exemple, le changement de phase d'un constituant au cours d'une précipitation.

La résolution du système est basé sur un formalisme Lagrangien et un algorithme itératif du type Newton-Raphson ou Ito-Kunish (Le Guirriec, 1996)

c) Exemple

On considère un graphe de circulation très simple correspondant à la confluence de deux cours d'eau.

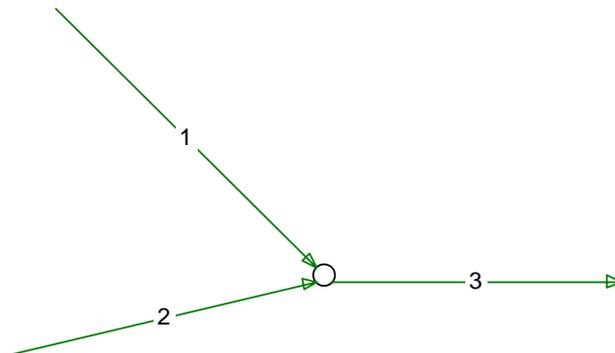


Figure 1 – Graphe de circulation

On réalise des mesures de débits sur chacun des trois flux ainsi que des prélèvements sur lesquels on analyse la silice et le chlore.

Le tableau 1 présente les résultats obtenus ainsi que les écarts (entrées-sortie) observés par rapport aux lois de conservation de la matière. Ces écarts sont dus aux erreurs de mesures, d'échantillonnage et d'analyse et figure également dans le tableau.

N° Flux	Eau		Cl			SiO2		
	Débit (m ³ /h)	Erreur (%)	(mg/l)	Erreur (%)	Débit (kg/h)	(mg/l)	Erreur (%)	Débit (kg/h)
1	200	10	30	5	6.00	17	5	3.40
2	450	10	40	5	18.00	21	5	9.45
3	675	20	34	10	22.95	16	10	10.80
Ecart	-25				1.05			2.05

Tableau 1 – Exemple : Valeurs expérimentales

Le tableau suivant présente les résultats obtenus par réconciliation des données.

N° Flux	Eau		Cl			SiO2		
	Débit (m ³ /h)	Erreur (%)	(mg/l)	Erreur (%)	Débit (kg/h)	(mg/l)	Erreur (%)	Débit (kg/h)
1	203.1	9.7	29.9	5.0	6.1	16.7	5.0	3.4
2	446.9	9.5	39.4	4.7	17.6	20.1	4.8	9.0
3	650.0	7.1	36.4	3.7	23.7	19.1	3.7	12.4
Ecart	0				0			0

Tableau 2 – Exemple : Valeurs cohérentes

La réconciliation des données a produit des valeurs cohérentes avec les lois de conservation de la matière, avec une meilleure précision que les valeurs mesurées.

2. Application sur les données du projet Cycleau

2.1 Graphe de circulation

Basé sur les points d'échantillonnage et de mesures définis sur le secteur, le graphe de circulation permet de faire une représentation des phénomènes de transport de l'eau. La figure 2 présente le graphe établi pour le bassin du Bélon. Sur un point d'échantillonnage donné on prend ainsi en compte les flux du cours principal, amont et aval, les apports en eau de pluie et de ruissellement et les apports éventuels du réseau souterrain.

Au niveau des terrains, le ruissellement génère un lessivage du sol : un nœud représente alors l'ensemble des terrains compris entre deux points successifs. Au niveau de ce nœud, on prend alors en compte les réactions de solubilisation des éléments solides. Au niveau de chacun des points d'échantillonnage on peut également prendre en compte les phénomènes de sédimentation ou de précipitation.

Ce schéma prend également en compte les échanges avec le réseau souterrain. Les flux en rose présentent alors un débit positif dans le cas d'infiltration des eaux de surface et négatif si le réseau apporte une contribution au réseau de surface.

Bien évidemment cette représentation n'est qu'un modèle simplifié du bassin. Il prend en compte les flux les plus simples à suivre. Il est effectivement difficile de prendre en compte l'ensemble des flux existant ; pour le suivi des solides cette opération est particulièrement délicate. Comment suivre par exemple les flux de sédimentation des particules ou au contraire les flux de remise en suspension des MES ? On sait qu'une grosse partie des solides, les particules les plus grossières notamment, se déplace en fond de rivière, par saltation. Il est impossible avec des méthodes classiques de mesure d'avoir accès à ces flux, de mesurer leur débit ou de les échantillonner. Il est de même difficile de mettre en équation leur conservation car leur régime de transport est loin d'être stationnaire.

Sur la figure 2 sont précisés les flux qui ont fait l'objet de mesures de débits et de prélèvements et analyses. Il apparaît clairement que, par rapport à la complexité du schéma, peu de flux ont pu être pris en compte par le monitoring. Le réseau souterrain en particulier n'a pas été du tout analysé et on n'a pas de données de pluviométrie.

Des raisons techniques et économiques, empêchent généralement de mener des campagnes très intensives. Les données collectées ne font donc pas apparaître de redondance : aucune valeur de débit ou de concentration ne peut être calculée par plusieurs équations de conservation. Des hypothèses supplémentaires vont même devoir être faites pour déterminer les débits d'eau. La réconciliation des données ne peut donc apporter aucune amélioration sur la précision des mesures. On se limitera à la reconstitution des bilans matière.

Les résultats présentés tiennent compte de ces difficultés. Chaque résultat sera donc commenté par rapport à son apport à la connaissance du bassin mais également par rapport aux hypothèses utilisées pour l'obtenir et donc à ses limites de validité.

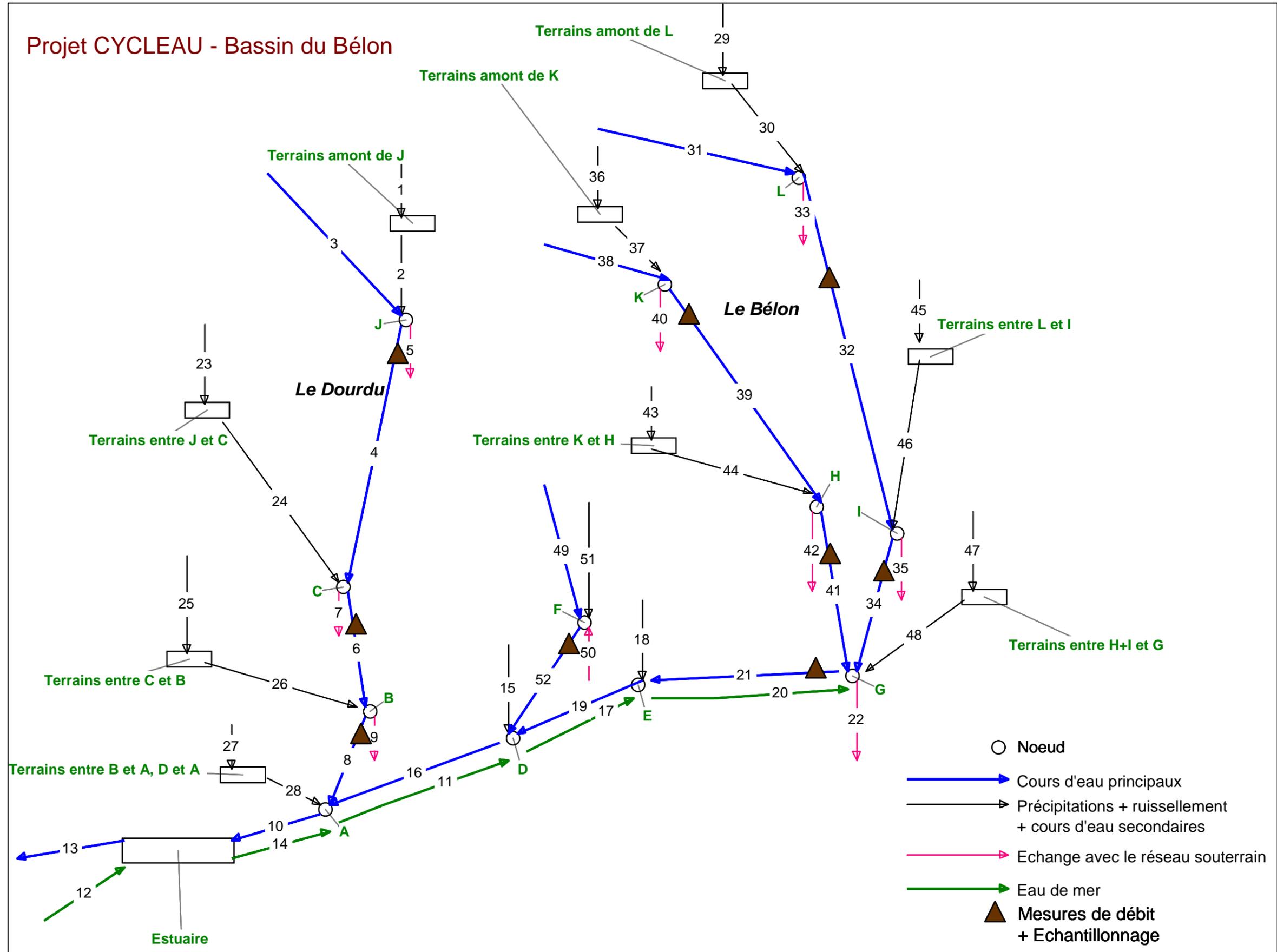


Figure 2 – Graphe de circulation du bassin versant du Bélon

2.2 Bilan eau

a) Le Dourdu

Les valeurs de débits mesurés sont présentées en m³/j dans le tableau 3.

N°Flux	Localisation	juin-04	août-04	oct.-04	déc.-04	févr.-05	avr.-05	juin-05	août-05	oct.-05
4	J	1374	4847	2972	4156	3577	2246	2022	622	665
6	C	4933	16217	24659	12830	12442	8243	6895	2817	3957
8	B	5556	18852	19146	14705	14679	9789	8148	2791	4216

Tableau 3 – Débit d'eau du Dourdu pour chaque campagne (m³/j).

En négligeant les échanges avec le réseau souterrain, en première approximation, ces mesures permettent de recalculer l'apport en eau entre les points J et C et entre les points C et B.

Au point C on a l'équation de conservation :

$Q_4 + Q_{24} = Q_6 + Q_7$. A l'échelle du prélèvement on peut négliger les échanges avec la nappe Q_7 . On détermine alors $Q_{24} = Q_6 - Q_4$ avec Q_i , le débit d'eau du flux i .

Le même type de calcul est réalisé au nœud B. On obtient les résultats suivants :

N° Flux	Localisation	juin 04	août 04	oct. 04	déc. 04	févr. 05	avr. 05	juin 05	août 05	oct. 05
24	J à C	3560	11370	21686	8675	8865	5996	4873	2195	3292
26	C à B	622	2635	-5512	1875	2238	1547	1253	-26	259

Tableau 4 – Apports en eau vers le Dourdu pour chaque campagne (m³/j).

On observe sur ces résultats des débits négatifs. C'est-à-dire une diminution de la quantité d'eau entre les points C et B. Au mois d'août 2005, la diminution n'est que de 26 m³/j. On peut penser qu'il s'agit d'une erreur de mesure sur l'un des deux points. Compte tenu des faibles débits et de la difficulté de mesure que ceci implique, une erreur de 10% n'est pas impossible.

Dans le cas du mois d'octobre 2004, la simple erreur de mesure n'est pas suffisante à expliquer la diminution de plus de 5000 m³/j entre le point C et le point B. En fait la mesure au point C a été réalisée le 26 octobre, celle au point B le 25 octobre. Il serait intéressant de pouvoir observer la pluviométrie autour de ces dates. Il est possible qu'une forte pluie ait augmenté le débit au point C. Le 26 octobre, IFREMER a effectué une mesure de débit au point B. Cette mesure est effectivement plus élevée (0.35 au lieu de 0.22 m³/s) que celle du 25 et permet de déterminer pour cette période d'octobre les débits suivants :

N° Flux	Localisation	oct. 04
4	J	2972
6	C	24659
8	B	30240
24	J à C	21686
26	C à B	5581

Tableau 5 – Bilan eau sur le Dourdu pour la campagne d'octobre (m³/j).

D'un point de vue méthodologique, il y a deux façons d'aborder un bilan matière :

- le bilan sur une période donnée (par exemple un mois), prenant en compte les quantités de matière transportées tout au long de cette période. Dans ce cas, il

est nécessaire d’avoir des mesures et échantillonnages fréquents prenant en compte la pluviométrie, l’évapotranspiration, les échanges avec la nappe et le ruissellement et de les intégrer sur la période.

- Le bilan à un instant donné, représentatif d’une période. Dans ce cas les mesures de débits doivent être faites dans un laps de temps suffisamment court pour supposer une stabilité du système. Il faut s’affranchir de tout événement (principalement les précipitations) venant perturber significativement cette stabilité.

Les données de la campagne d’octobre ne pourront donc pas être exploitées par la suite en utilisant la donnée de débit IFREMER puisque l’échantillonnage des MES a été réalisé le 25 octobre et n’est donc pas représentatif du 26. Pour celle du mois d’août 2005, l’utilisation des données est également difficile.

On observe le taux d’apport par rapport au débit final (arrivé dans l’estuaire) entre chaque point. Le tableau présente également les proportions du bassin drainées par chacun des flux.

N° Flux	Localisation	juin 04	août 04	oct. 04	déc. 04	févr. 05	avr. 05	juin 05	oct. 05	Superficie
4	J	25%	26%	10%	28%	24%	23%	25%	16%	19%
24	J à C	64%	60%	72%	59%	60%	61%	60%	78%	64%
26	C à B	11%	14%	18%	13%	15%	16%	15%	6%	17%

Tableau 6 – Répartition des apports en eau vers le Dourdu pour chaque campagne.

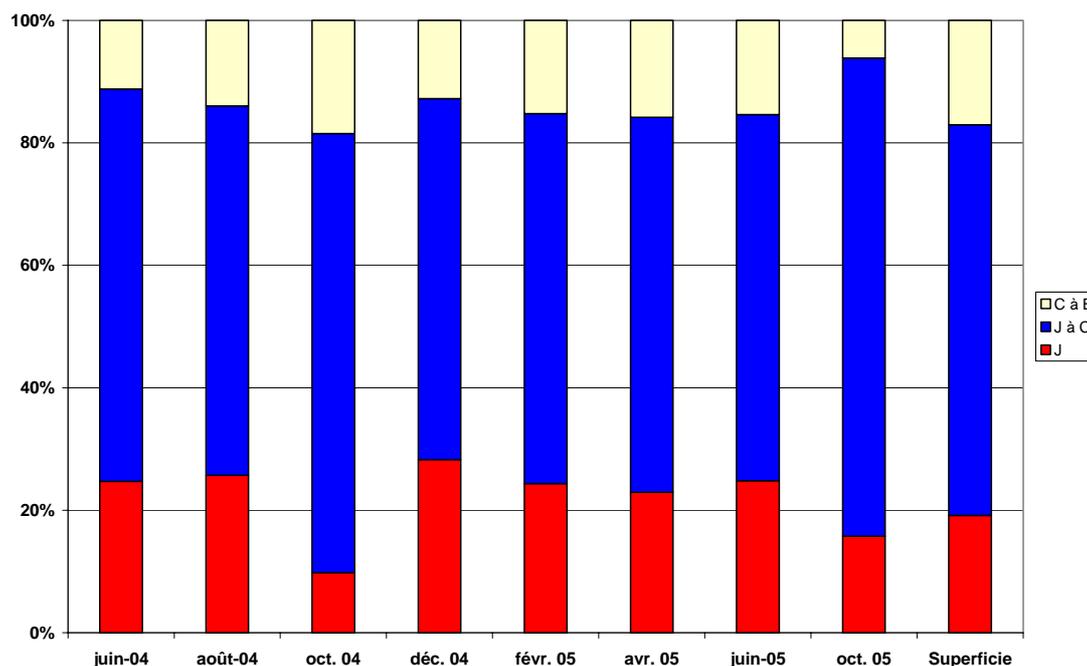


Figure 3 - Répartition des apports en eau vers le Dourdu

Les résultats sont assez homogènes. Quelque soit la période, les apports de chaque zone sont répartis de la même manière sauf en octobre 2005 qui fait suite à une longue période de sécheresse qui a pu modifier le comportement des sols (végétation, perméabilité).

La répartition semble proportionnelle à la longueur du cours d’eau principal, ce qui laisse penser que les terrains traversés par le Dourdu ont un comportement relativement homogènes par rapport à la circulation d’eau. La comparaison entre répartition des débits d’eau et proportion des surfaces drainées montre que l’on se

situé dans le même ordre de grandeur. Les différences peuvent être expliquées par des taux d'urbanisation différents.

b) Le Bélon

Le même type d'analyse est réalisé sur le cours du Bélon. Les mesures en m³/j sont présentées dans le tableau 7 :

N° Flux	Localisation	juin 04	août 04	oct. 04	déc. 04	févr. 05	avr. 05	juin 05	août 05	oct. 05
39	K	354	1227	1106	899	985	691	78	95	156
41	H	5590	16736	24270	15206	22732	9876	15535	2117	4156
32	L	259	1944	2903	5789	2601	674	43	12	251
34	I	8640	26983	30214	16839	16615	11845	23630	3292	5314
21	G	12856	61102	35277	45939	11811	25419	40124	5460	12442

Tableau 7 – Débit d'eau du Bélon pour chaque campagne (m³/j).

Le calcul des différents apports est présenté dans le tableau ci-dessous.

N° Flux	Localisation	juin 04	août 04	oct. 04	déc. 04	févr. 05	avr. 05	juin 05	août 05	oct. 05
44	K à H	5236	15509	23164	14308	21747	9184	15457	2022	4000
46	L à I	8381	25039	27311	11051	14014	11172	23587	3280	5063
48	(H+I) à G	-1374	17384	-19207	13893	-27536	3698	959	52	2972

Tableau 8 – Apports en eau vers le Bélon pour chaque campagne (m³/j).

Comme sur le Doudu on trouve sur certaines périodes des apports calculés négatifs, probablement dus à la non-stationnarité du système au moment de la mesure. Pour juin 2004, la mesure réalisée par IFREMER au point G le lendemain de la mesure BRGM montre un débit de 0.495 au lieu de 0.149 m³/s. En octobre 2004, La mesure IFREMER au point G est de 0.63 au lieu de 0.41 m³/s.

En février 2005, aucune mesure IFREMER n'a été réalisée à la période de mesure du BRGM. La mesure au point G a été réalisée à cette date alors que la marée était haute, ce qui limite l'écoulement depuis le point G et réduit donc le débit.

Enfin pendant la campagne de juin 2005, un épisode pluvieux s'est déroulé juste avant les mesures aux points H, I et G. Il semble que les mesures aux points H et I aient subi l'influence de cette pluviométrie alors que la mesure au point G n'a pas encore été totalement impactée par l'ajout d'eau. Les points K et L ont été mesurés la veille par temps secs.

Ces observations montrent l'instabilité du système. Elles devraient être complétées par une observation de la pluviométrie.

En utilisant les données IFREMER pour juin et octobre 2004, on calcule les contributions de chaque entrée du système (tab. 7 et fig. 4).

N° Flux	Localisation	juin 04	août 04	oct. 04	déc. 04	avr. 05	juin 05	août 05	oct. 05	Superficie
39	K	0.8%	2.0%	2.0%	2.0%	2.7%	0.2%	1.7%	1.3%	3.0
32	L	0.6%	3.2%	5.3%	13%	2.7%	0.1%	0.2%	2.0%	6.8
44	K à H	12%	25%	43%	31%	36%	39%	37%	32%	38.7
46	L à I	20%	41%	50%	24%	44%	59%	60%	41%	36.3
48	(H+I) à G	67%	28%	-0.1%	30%	15%	2.4%	0.9%	24%	15.2

Tableau 9 – Répartition des apports en eau vers le Bélon pour chaque campagne.

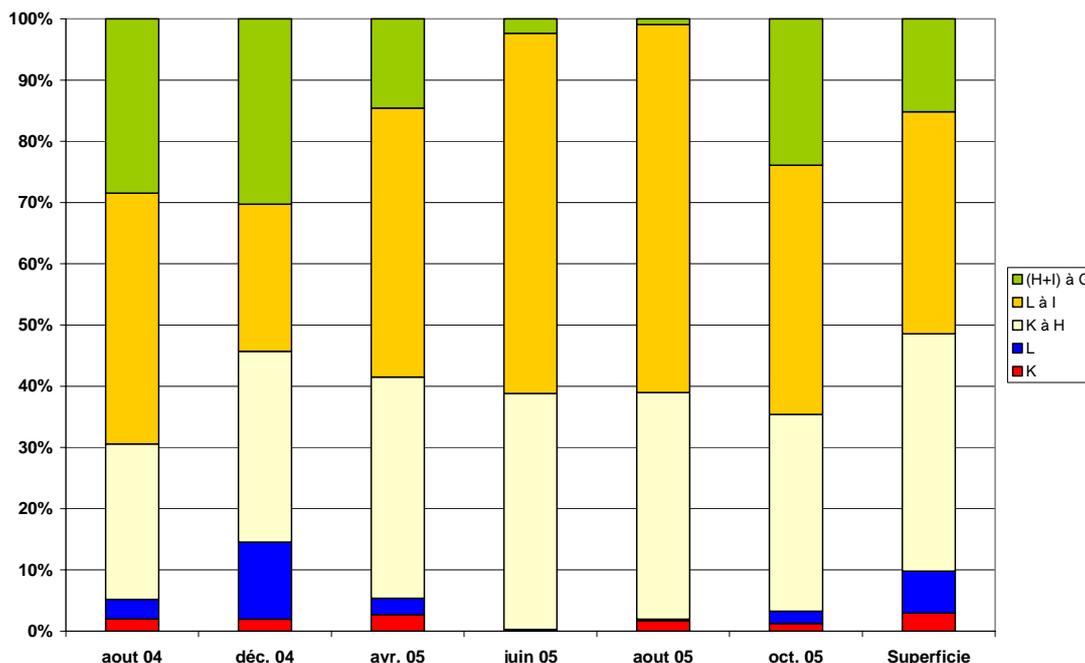


Figure 4 – Répartition des apports en eau vers le Bélon.

Contrairement au Dourdu, d'une période à l'autre on n'observe pas de répartition constante des apports. De ce fait il est difficile de faire une comparaison entre ces répartitions et les proportions du bassin drainées par chaque flux. Il semble qu'on soit tout de même fréquemment dans le même ordre de grandeur.

Les données de juin et octobre 2004 notamment montrent des valeurs qui révèlent l'instabilité du système. On ne les utilisera pas ultérieurement. Les données de la campagne d'août 2005, en raison de la période de déficit hydrique et des erreurs relatives qu'elle entraîne sur les mesures de débits, devront être utilisées avec précaution.

c) L'ensemble du bassin

Le tableau 10 et la figure 5 récapitule les apports vers l'estuaire du Dourdu, du Bélon et de l'affluent de l'Anse de Kéristinec pour les périodes observables.

N° Flux	Localisation	juin 04	août 04	oct. 04	déc. 04	avr. 05	juin 05	août 05	oct. 05
8	B	29.3%	23.0%	33.1%	23.3%	26.6%	15.8%	33.5%	24.9%
21	G	87.5%	74.6%	70.6%	72.7%	69.1%	77.6%	65.6%	73.5%
52	F	3.0%	2.4%	6.0%	4.1%	4.2%	6.6%	0.8%	1.6%
Total (m ³ /j)		48 902	81 899	77 060	63 219	36 763	51 710	8 320	16 926

Tableau 10 - Répartition des apports en eau des principaux contributeurs à l'estuaire

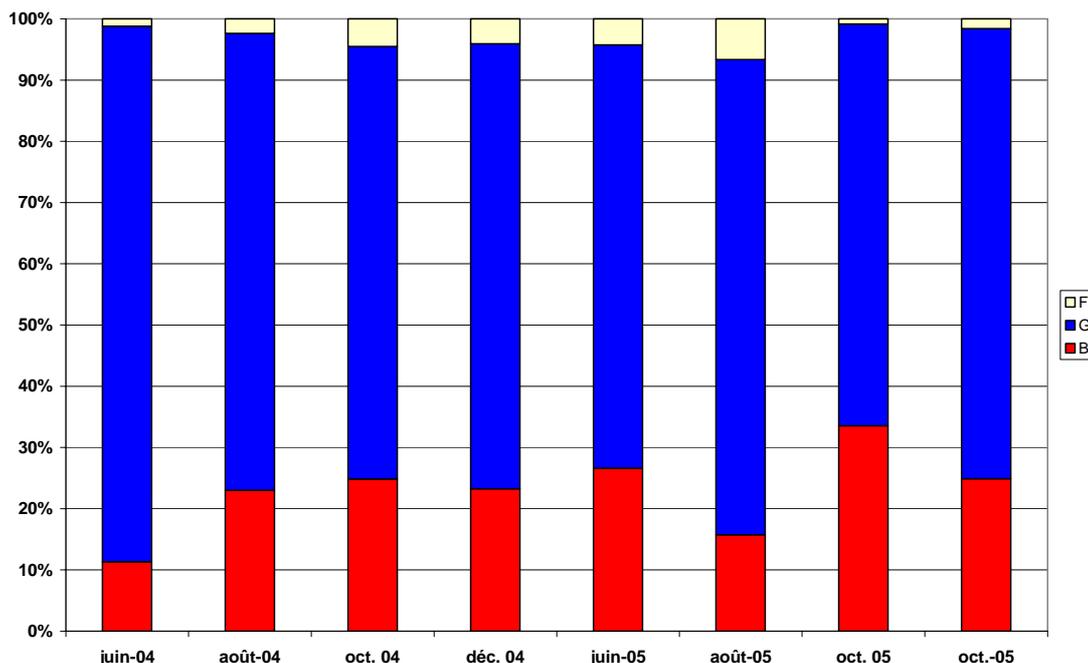


Figure 5 - Répartition des apports en eau des principaux contributeurs à l'estuaire

Le Bélon est toujours le principal contributeur à l'estuaire. Il représente en moyenne sur la période étudiée 74% des apports en eau ; le Dourdu constitue 23% et l'affluent de Kéristinec, 3%. La moyenne de l'alimentation en eau douce de l'estuaire est de 48 100 m³/j. Ce chiffre néglige les apports de la rive gauche au sud du bassin versant.

2.3 Suivi des MES

Comme il a été précisé plus haut, le suivi des flux de solides est particulièrement délicat. Des déterminations des MES ont été réalisées à chaque période de mesure de débit (1 fois tous les 2 mois). Les tableaux ci-dessous présentent les débits quotidiens de MES calculés à chaque point d'échantillonnage et pour chaque période pour le Dourdu et pour le Bélon pour les données validées par l'analyse des débits d'eau.

Certains échantillons présentaient des teneurs en MES inférieures à la limite de détection de 2mg/l. Des débits maximums ont donc été calculés en prenant en compte le débit d'eau mesuré et cette limite de détection.

N° Flux	Localisation	juin 04	août 04	oct. 04	déc. 04	avr. 05	juin 05	août 05	oct. 05
4	J	< 2.75	9.69	8.31	17.88	< 4.49	26.28	1.24	1.33
6	C	< 9.87	48.65	51.32	87.09	16.49	20.68	< 5.63	7.91
8	B	11.11	< 37.71	44.11	102.76	138.24	105.91	8.37	12.65

Tableau 11 – Débit de MES dans le Dourdu pour chaque campagne (kg/j).

N° Flux	Localisation	août 04	déc. 04	févr. 05	avr. 05	juin 05	août 05	oct. 05
39	K	28.22	2.70	2.95	3.46	3.97	< 0.14	6.38
41	H	< 33.47	< 30.41	< 45.46	< 19.75	295.16	0.86	8.31
32	L	< 3.89	34.73	7.80	< 1.35	0.22	< 10.92	10.02
34	I	107.93	134.71	116.30	35.54	283.56	0.23	21.25
21	G	122.20	183.76	59.05	50.84	160.50	9.88	< 24.88

Tableau 12 – Débit de MES dans le Bélon pour chaque campagne (kg/j).

Que ce soit sur l'un ou l'autre des cours d'eau il n'y a aucune similitude entre les deux années, ni de grandes tendances. Les données sont difficilement exploitables par la méthode des bilans car on ne peut pratiquement jamais considérer un régime stationnaire comme il est possible de le faire pour l'eau. Pour analyser les mécanismes de transport de ces particules, des données plus fréquentes, permettant d'étudier la dynamique du système seraient nécessaires. Il serait intéressant de vérifier si des corrélations existent entre la quantité de MES, la taille des particules et la vitesse de l'eau afin de construire un modèle plus avancé que la simple conservation de la matière. Il en est de même pour les particules plus grossières qui sont probablement transportées en fond de rivière.

Pour cela des moyens de mesure et d'analyse plus conséquents seraient à mettre en place.

On a cependant établi, pour les périodes retenues précédemment, les apports des trois cours d'eau à l'estuaire en maximisant les concentrations en MES inférieure à la limite de détection à 2 mg/l.

N° Flux	Localisation	août 04	déc. 04	avr. 05	juin 05	août 05	oct. 05	Moyenne
8	B	22.5%	18.3%	24.6%	27.4%	43.6%	30.2%	28
21	G	72.9%	76.3%	63.7%	41.5%	34.3%	59.5%	58
52	F	4.6%	5.3%	11.7%	31.1%	22.1%	10.2%	14
Total (kg/j)		168	241	80	387	19	42	156

Tableau 13 - Répartition des apports en MES des principaux contributeurs à l'estuaire

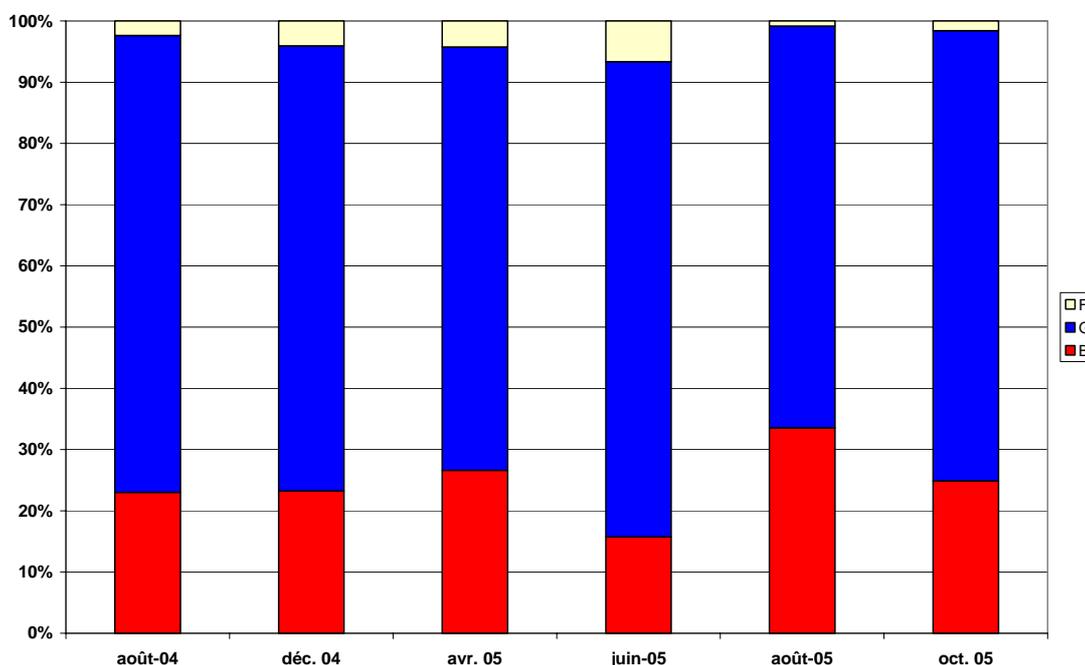


Figure 6 - Répartition des apports en MES des principaux contributeurs à l'estuaire

Le Bélon reste le principal contributeur en termes de MES. Cependant, on constate que l'affluent de Kéristinec et le Dourdu sont relativement plus chargés puisqu'ils représentent en moyenne respectivement 14% des apports (3% de l'eau) et 28% (23%).

Il est intéressant de constater que les apports en MES dans l'estuaire sont

extrêmement variables d'une période à l'autre et relativement faibles : en moyenne 156 kg/j, ce qui représente une quantité inférieure à 60t par an. En considérant la valeur maximale obtenue, 387 kg/j on atteint un maximum de 141t/an. Cette quantité est à répartir sur la surface de l'estuaire et à comparer avec les apports en sédiments marins. Il ne faut cependant pas oublier que les apports en MES ne constituent pas l'intégralité des apports en solides du bassin versant. On sait que des particules plus grossières sont transportées également en fond de rivière. A noter également que les bilans réalisés l'ont été sur des campagnes sèches. Il serait intéressant de compléter ces résultats par un bilan sur campagne humide.

2.4 Bilan des espèces en solution

L'approche par bilan matière, à travers l'étude des débits partiels, permet de considérer la contribution en quantité de chaque source pour chaque élément sur une période donnée. D'un point de vue de l'impact à long terme, cette étude peut révéler des apports importants que la simple étude des teneurs ne met pas en évidence.

Trois campagnes d'échantillonnage ont fait l'objet d'analyses chimiques, entre autres pour les éléments suivants : nitrate, sulfate, chlore, fer et silice

Le tableau ci-dessous présente les résultats pour chaque campagne sur le Dourdu et le Bélon.

Campagne	N° flux	Loc.	Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Cl (mg/l)	Fe (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)
Août 2004 Dourdu	4	J	4847	36.3	9.2	30.5	0.41	15.8
	6	C	16217	30.4	13.5	34	0.41	15.9
	8	B	18852	30.4	13	35.5	0.43	16.5
Août 2004 Bélon	39	K	1227	35.2	7.7	32.1	0.57	17.2
	41	H	16736	34.2	11.3	31.5	0.38	17.9
	32	L	1944	40.6	6.7	31.9	0.91	19.1
	34	I	26983	39.5	10.1	30.1	0.4	17.8
	21	G	61102	34.9	11.4	31.9	0.36	18.1
Avril 2005 Dourdu	4	J	2246	44.4	8.4	28.9	0.24	13.2
	6	C	8243	36.7	15.9	34.4	0.18	13.1
	8	B	9789	34.3	13.1	32.1	0.21	13.3
Avril 2005 Bélon	39	K	691	34.4	6.5	29	0.24	12.8
	41	H	9876	36.6	10.1	29.8	0.19	13.7
	32	L	674	47.4	6.5	29.4	0.13	14.9
	34	I	11845	40	8.8	27.8	0.12	13.7
	21	G	25419	37.8	10.5	30.9	0.16	13.9
Août 2005 Dourdu	4	J	622	46.2	7.5	28.3	0.1	14
	6	C	2817	35.7	26.9	40.3	0.1	15.9
	8	B	2791	9.3	29.6	41	0.09	16.3
Août 2005 Bélon	39	K	95	48.3	6.6	30.9	0.13	13.4
	41	H	2117	38.6	10	31.3	0.08	17
	32	L	12	0.5	2.7	45.9	3.91	22
	34	I	3292	36.8	8	29.5	0.09	14.9
	21	G	5460	31.2	13	33.8	0.12	14.4

Tableau 14 – Résultats analytique pour les prélèvements de chaque campagne

Sur ces cinq éléments une étude par bilan matière a été réalisée afin d'identifier des sources possibles de ces divers constituants.

L'observation rapide des teneurs permet de mettre en évidence quelques points particuliers :

En août 2005, le point L fait apparaître des teneurs en nitrate très faibles. Compte-tenu de la période sèche, on suppose être en présence d'une réaction de dénitrification. Ce qui pourrait se confirmer par une forte concentration en fer. Deux réactions de dénitrification peuvent être envisagées : l'une est autotrophe et consomme entre autre de la pyrite pour libérer du fer et des sulfates (on n'observe pas ici de forte teneur en sulfate) ; l'autre est une réaction hétérotrophe intervenant fréquemment dans les milieux marécageux.

a) Nitrate

▪ Le Dourdu

Le tableau ci-dessous montre les débits de nitrate sur le Dourdu pour chacune des périodes.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (kg/j)
4	J	4847	176.0	2246	99.7	622	28.7
6	C	16217	493.0	8243	302.5	2817	100.6
8	B	18852	573.1	9789	335.8	2791	26.0

Tableau 15 – Débits de nitrate dans le Dourdu pour chaque campagne.

Les concentrations mesurées à chaque point aux trois périodes sont relativement homogènes, sauf au point B en août 2005. Elle est particulièrement basse. On savait déjà que la période d'août 2005 présentait une imperfection sur le bilan eau. La faible concentration en nitrate à cette période amplifie cette incohérence sur le bilan nitrate. Par contre, cette incohérence ne peut pas être expliquée par une simple erreur d'échantillonnage ou d'analyse. La présence de microorganismes consommateurs des nitrates, favorisée par le faible débit d'eau peut expliquer cette faible teneur.

Pour les périodes d'août 2004 et avril 2005, les autres flux du système sont calculés dans le tableau suivant :

N° Flux	Localisation	Août 2004			Avril 2005		
		Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (kg/j)	NO ₃ (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (kg/j)	NO ₃ (mg/l)
24	J à C	11370	317.1	27.9	5996	202.8	33.8
26	C à B	2635	80.1	30.4	1547	33.3	21.5

Tableau 16 – Apports en nitrate vers le Dourdu pour les deux campagnes.

Les contributions à l'estuaire du Dourdu de chacune des entrées du système sont les suivantes :

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005	
		Débit eau	NO ₃	Débit eau	NO ₃
4	J	26%	30.7%	23%	29.7%
24	J à C	60%	55.3%	61%	60.4%
26	C à B	14%	14.0%	16%	9.9%

Tableau 17 – Répartition des apports en nitrate vers le Dourdu pour les deux campagnes.

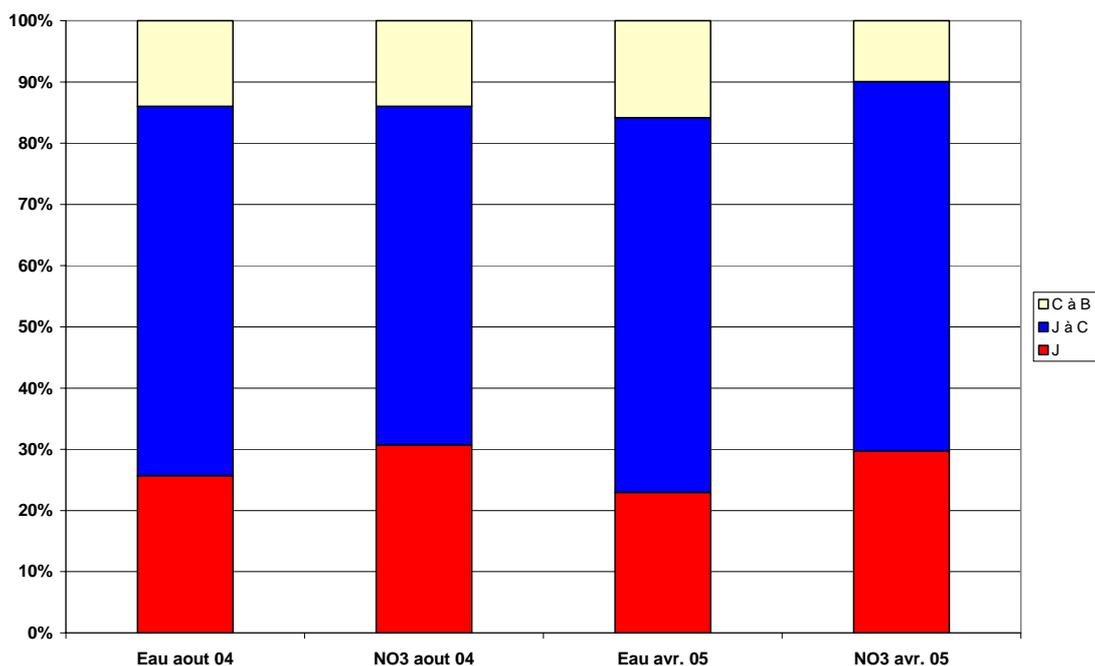


Figure 7 – Répartition des apports en nitrate vers le Dourdu.

On peut considérer que sur ces deux périodes, la répartition des apports en nitrate est sensiblement la même que celle des apports en eau. On n'identifie aucune source particulière.

On montre par contre l'intérêt de cette approche par bilan matière. Sur la période d'avril 2005, par exemple, les mesures et analyses réalisées sur le Dourdu, montrent des teneurs en NO₃ en dessous de la limite normative de 50mg/l (cf. figure 8) avec une décroissance de l'amont vers l'aval.

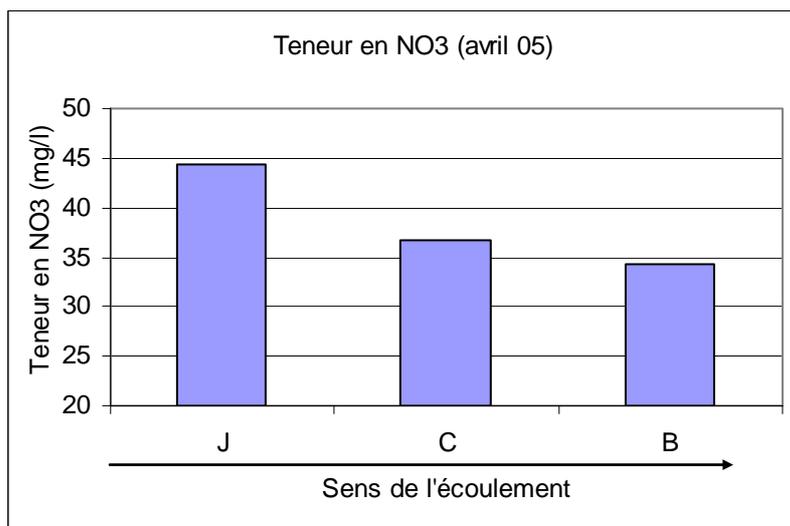


Figure 8 - Teneur en NO₃ (mg/l) sur le Dourdu

L'observation des débits partiels de NO₃ à la même période (cf. figure 9) montre qu'entre les points J et B les quantités de nitrate augmentent pour atteindre près de 350 kg de nitrate déversés chaque jour dans l'estuaire.

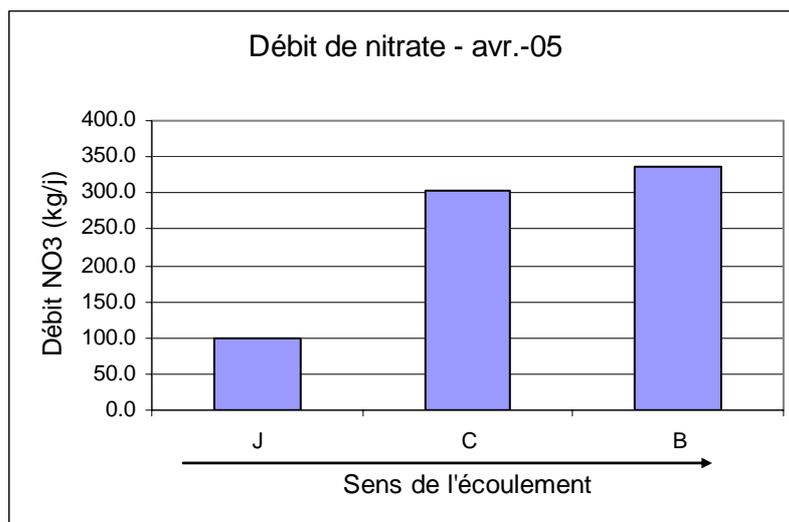


Figure 9 - Débits de NO₃ (kg/j) sur le Dourdu

- Le Bélon

Les débits de nitrate sur le cours du Bélon ainsi que les apports calculés sont présentés respectivement dans les tableaux 18 et 19.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (kg/j)
39	K	1227	43.2	691	23.8	95	4.6
41	H	16736	572.4	9876	361.4	2117	81.7
32	L	1944	78.9	674	31.9	12	0.0
34	I	26983	1065.8	11845	473.8	3292	121.1
21	G	61102	2132.5	25419	960.8	5460	170.4

Tableau 18 – Débits de nitrate dans le Bélon pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004			Avril 2005			Août 2005		
		Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (kg/j)	NO ₃ (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (kg/j)	NO ₃ (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	NO ₃ (kg/j)	NO ₃ (mg/l)
44	K à H	15509	529.2	34.1	9184	337.7	36.8	2022	77.1	38.1
46	L à I	25039	986.9	39.4	11172	441.9	40.0	3280	121.1	36.9
48	(H+I) à G	17384	494.3	28.4	3698	125.6	34.0	52	-32.5	-

Tableau 19 – Apports en nitrate vers le Bélon pour chaque campagne.

De même que sur le Dourdu, et sans doute par les mêmes raisons, on observe en août une diminution de la quantité de nitrate de l'amont vers l'aval.

La répartition des apports en nitrate pour les campagnes d'août 2004 et avril 2005 (Cf. Tableau 20 et figure 10) montre une similitude avec les apports en eau. Ces apports sont donc probablement liés au lessivage des sols. On n'identifie pas d'autres sources.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005	
		Débit eau	NO ₃	Débit eau	NO ₃
39	K	2.0%	2.0%	2.7%	2.5%
32	L	3.2%	3.7%	2.7%	3.3%
44	K à H	25.4%	24.8%	36.1%	35.1%
46	L à I	41.0%	46.3%	43.9%	46.0%
48	(H+I) à G	28.5%	23.2%	14.5%	13.1%

Tableau 20 – Répartition des apports en nitrate vers le Bélon pour chaque campagne.

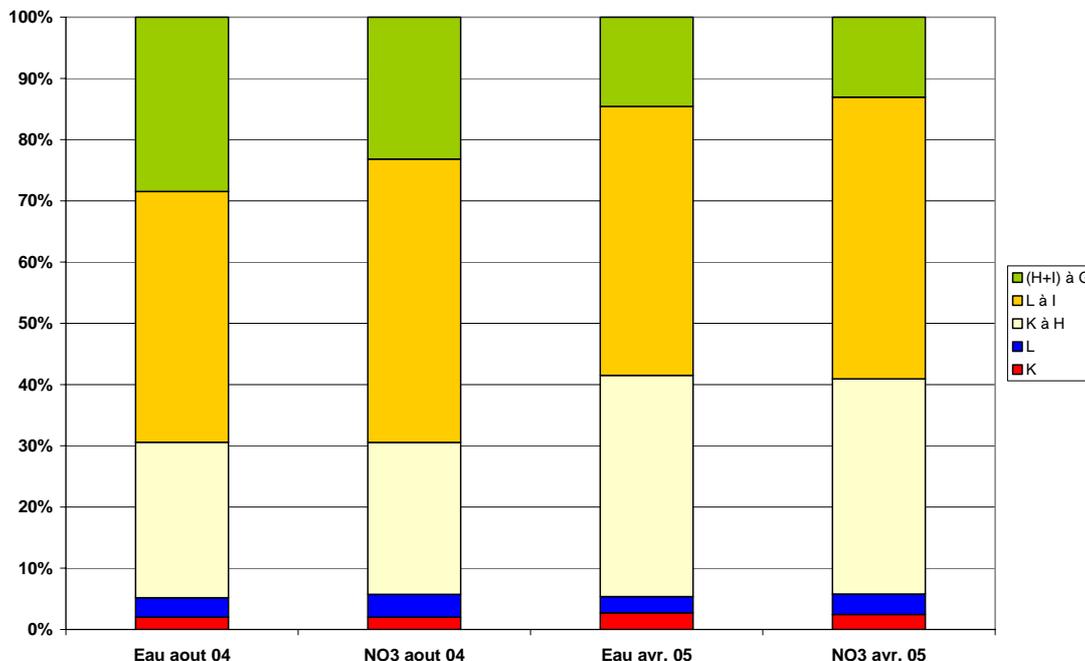


Figure 10 - Répartition des apports en nitrate vers le Bélon.

- L'ensemble du bassin

Le tableau 21 récapitule les apports en nitrate dans l'estuaire pour les trois périodes analysées. Ces apports sont extrêmement variables d'une période à l'autre, mais ils peuvent atteindre des valeurs importantes : près de 3t par jour.

N° Flux	Localisation	Août 2004	Avril 2005	Août 2005
8	B	20.9%	25.2%	13.2%
21	G	77.6%	72.2%	86.5%
52	F	1.5%	2.6%	0.3%
Total (kg/j)		2747	1331	197

Tableau 21 - Répartition des apports en nitrate des principaux contributeurs à l'estuaire

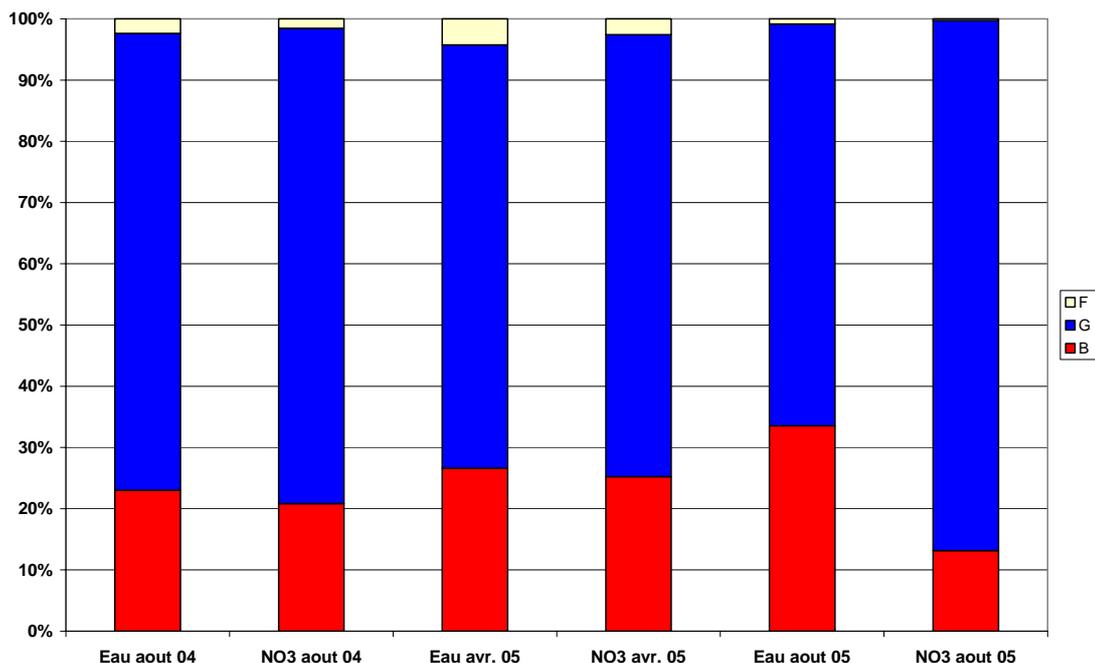


Figure 11 - Répartition des apports en nitrate des principaux contributeurs à l'estuaire

b) Sulfates

▪ Le Dourdu

Les débits de sulfate sur le cours du Dourdu ainsi que les apports calculés sont présentés respectivement dans les tableaux 22 et 23.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)
4	J	4847	44.6	2246	18.9	622	4.7
6	C	16217	218.9	8243	131.1	2817	75.8
8	B	18852	245.1	9789	128.2	2791	82.6

Tableau 22 – Débits de sulfate dans le Dourdu pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004			Avril 2005			Août 2005		
		Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	SO ₄ (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	SO ₄ (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	SO ₄ (mg/l)
24	J à C	11370	174.3	15.3	5996	112.2	18.7	2195	71.1	32.4
26	C à B	2635	26.1	9.9	1547	-2.8	-	-26	6.8	-

Tableau 23 – Apports en sulfate vers le Dourdu pour chaque campagne.

Les contributions dans l'estuaire de chacune des entrées du système sont les suivantes :

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)
4	J	26%	18.2%	23%	14.7%	22%	5.6%
24	J à C	60%	71.1%	61%	87.5%	79%	86.1%
26	C à B	14%	10.7%	16%	-2.2%	-1%	8.3%

Tableau 24 – Répartition des apports en sulfate vers le Dourdu pour chaque campagne.

Malgré l'anomalie sur les débits constatée pour août 2005, le bilan sulfate est satisfaisant. La proportion des apports est proche de celle d'août 2004. Par contre le mois d'avril 2005 montre un bilan imparfait, avec une diminution de la quantité de sulfate entre les points C et B. En l'absence de conditions physico-chimiques favorisant une précipitation des sulfates, cette diminution, peu importante, semble plutôt liée à l'accumulation des erreurs de mesure, d'échantillonnage et d'analyse.

Sur la période d'août 2004, on constate que les contributions en sulfate ne sont pas corrélées aux contributions en eau. Le flux 24 représente 71% des apports, alors qu'il ne correspond qu'à 60% des apports en eau. Une source de sulfate, naturelle ou artificielle, est probablement présente dans cette zone. Les répartitions des mois d'avril et août 2005 semblent confirmer cette hypothèse. Les erreurs dont elles sont entachées ne permettent cependant pas de l'affirmer. Comme on l'a évoqué plus haut, les sulfates peuvent être générés par la réaction de dénitrification qui permet de libérer les sulfates. On suppose qu'entre les points J et C il existe des zones plus favorables à cette réaction.

- Le Bélon

Les tableaux 25 à 27 présentent les différents débits de sulfates et leurs contributions respectives pour le cours du Bélon.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)
39	K	1227	9.4	691	4.5	95	0.6
41	H	16736	189.1	9876	99.7	2117	21.2
32	L	1944	13.0	674	4.4	12	0.0
34	I	26983	272.5	11845	104.2	3292	26.3
21	G	61102	696.6	25419	266.9	5460	71.0

Tableau 25 – Débits de sulfate dans le Bélon pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004			Avril 2005			Août 2005		
		Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	SO ₄ (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	SO ₄ (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	SO ₄ (kg/j)	SO ₄ (mg/l)
44	K à H	15509	179.7	11.6	9184	95.2	10.4	2022	20.5	10.2
46	L à I	25039	259.5	10.4	11172	99.9	8.9	3280	26.3	8.0
48	(H+I) à G	17384	234.9	13.5	3698	62.9	17.0	52	23.5	453.0

Tableau 26 – Apports en sulfate vers le Bélon pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau	SO ₄	Débit eau	SO ₄	Débit eau	SO ₄
39	K	2.0%	1.4%	2.7%	1.7%	1.7%	0.9%
32	L	3.2%	1.9%	2.7%	1.6%	0.2%	0.0%
44	K à H	25.4%	25.8%	36.1%	35.7%	37.0%	28.9%
46	L à I	41.0%	37.3%	43.9%	37.4%	60.1%	37.1%
48	(H+I) à G	28.5%	33.7%	14.5%	23.6%	0.9%	33.1%

Tableau 27 – Répartition des apports en sulfate vers le Bélon pour chaque campagne.

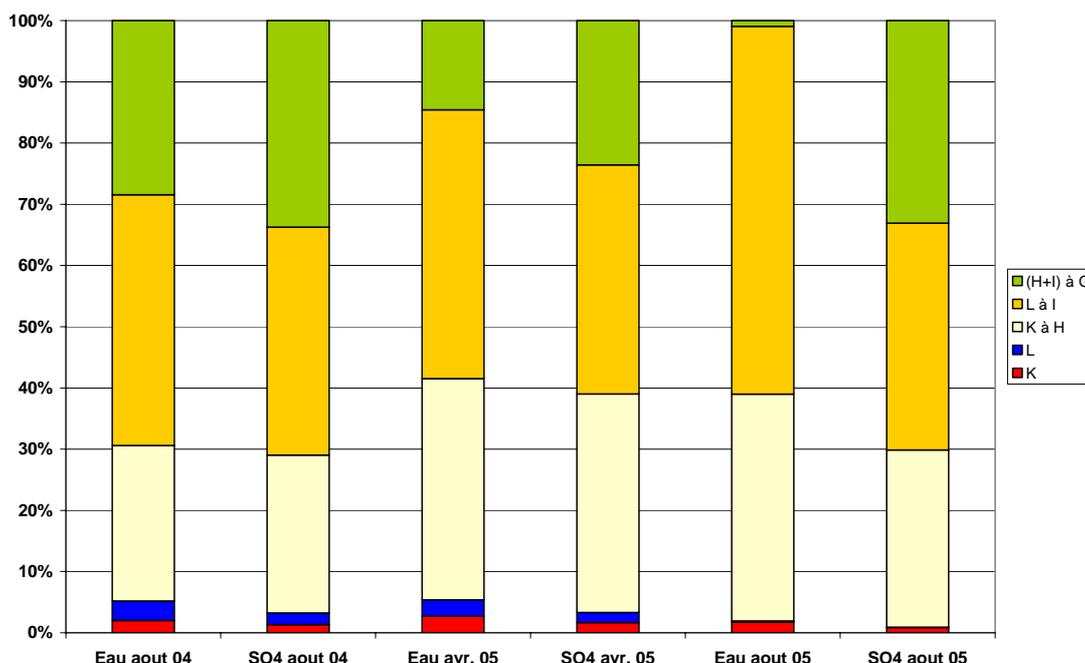


Figure 12 – Répartition des apports en sulfate vers le Bélon.

Sur l'ensemble des trois campagnes, on établit des bilans satisfaisants sur le Bélon. On ne note pas d'anomalie particulière. La répartition des apports en sulfate n'est pas parfaitement corrélée aux apports en eau. Il semble qu'une source en sulfate se trouve entre les points (H+I) et G. La teneur aberrante calculée en août 2005 sur le flux 48, est révélatrice d'erreurs de mesure de débits sur cette période.

- L'ensemble du bassin

Le tableau 28 récapitule les apports en sulfate dans l'estuaire pour les trois périodes analysées. Comme pour les nitrates, les apports sont extrêmement variables d'une période à l'autre. Sur les périodes observées, ils restent inférieurs à 1 t par jour.

N° Flux	Localisation	Août 2004	Avril 2005	Août 2005
8	B	25.1%	30.4%	52.6%
21	G	71.3%	63.2%	45.2%
52	F	3.6%	6.4%	2.3%
Total (kg/j)		977	422	157

Tableau 28 - Répartition des apports en sulfate des principaux contributeurs à l'estuaire

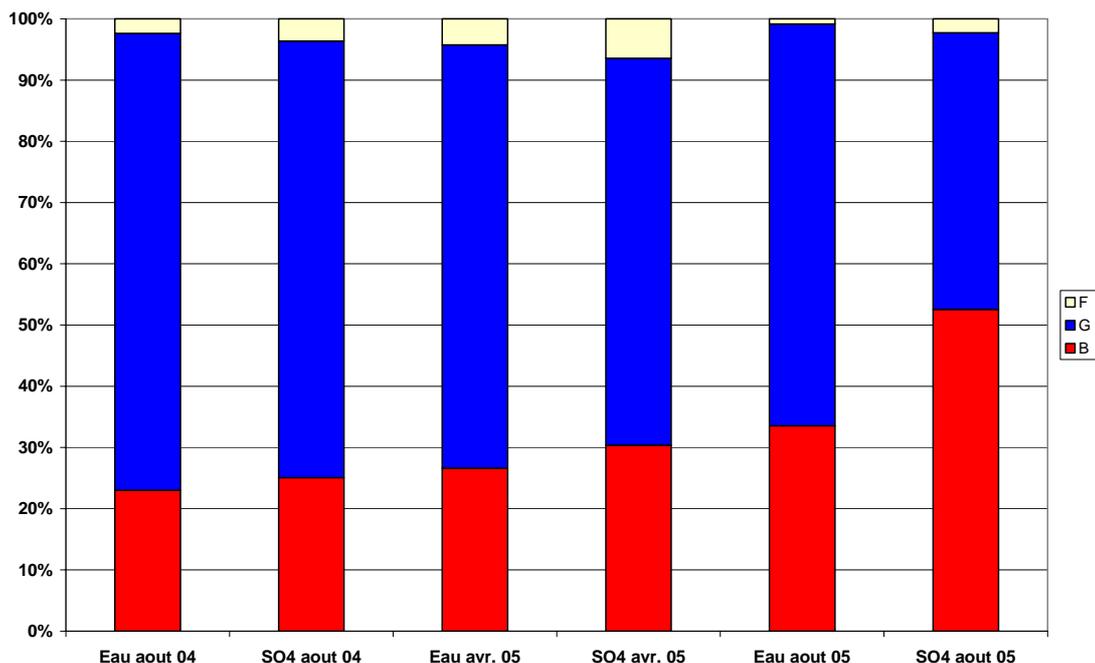


Figure 13 - Répartition des apports en sulfate des principaux contributeurs à l'estuaire

c) Chlore

- Le Douurdu

Les tableaux 29 à 31 présentent les différents débits de chlore et leurs contributions respectives pour le Douurdu.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau (m ³ /j)	Cl (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	Cl (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	Cl (kg/j)
4	J	4847	147.8	2246	64.9	622	17.6
6	C	16217	551.4	8243	283.5	2817	113.5
8	B	18852	669.3	9789	314.2	2791	114.4

Tableau 29 – Débits de chlore dans le Douurdu pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004			Avril 2005			Août 2005		
		Débit eau (m ³ /j)	Cl (kg/j)	Cl (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	Cl (kg/j)	Cl (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	Cl (kg/j)	Cl (mg/l)
24	J à C	11370	403.6	35.5	5996	218.6	36.5	2195	95.9	43.7
26	C à B	2635	117.9	44.7	1547	30.7	19.8	-26	0.9	-

Tableau 30 – Apports en chlore vers le Douurdu pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005	
		Débit eau	Cl	Débit eau	Cl
4	J	26%	22.1%	23%	20.7%
24	J à C	60%	60.3%	61%	69.6%
26	C à B	14%	17.6%	16%	9.8%

Tableau 31 – Répartition des apports en chlore vers le Douurdu pour chaque campagne.

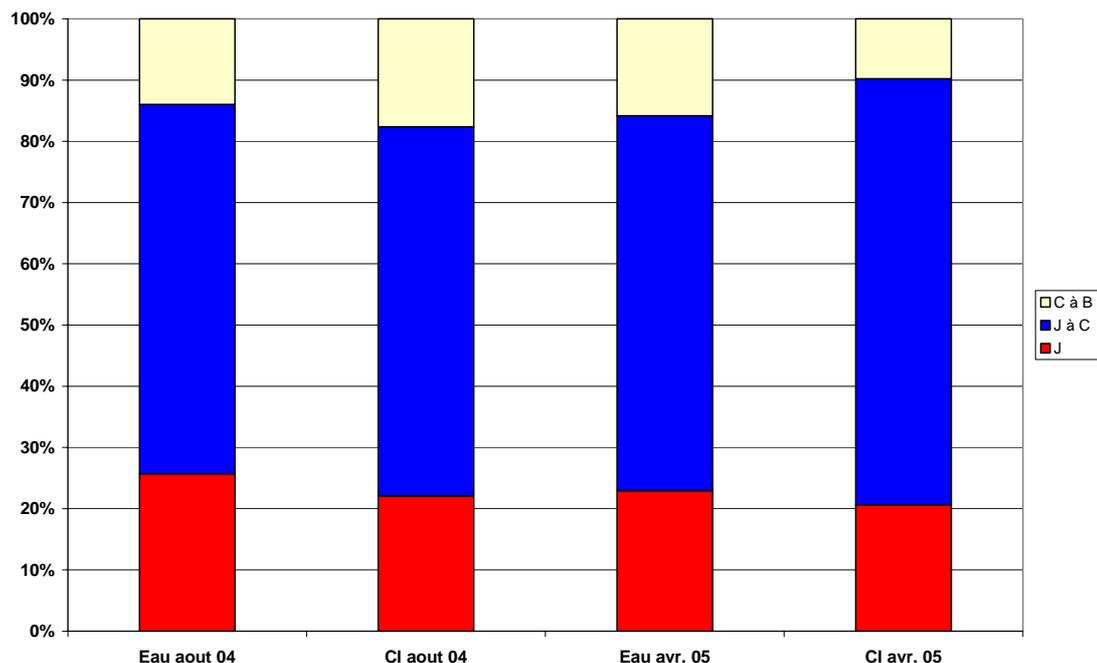


Figure 14 – Répartition des apports en chlore vers le Dourdu

Sur les deux campagnes d'août 2004 et 2005, la répartition des apports en chlore est conforme à celle des apports en eau. Il n'existe donc pas de source particulière de chlore sur la zone. Ceci permet en particulier de confirmer que, sur ces périodes, il n'y a pas de remontée d'eau de mer.

- Le Bélon

Les tableaux 32 à 34 présentent les différents débits de chlore et leurs contributions respectives pour le Bélon.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau (m³/j)	Cl (kg/j)	Débit eau (m³/j)	Cl (kg/j)	Débit eau (m³/j)	Cl (kg/j)
39	K	1227	39.4	691	20.0	95	2.9
41	H	16736	527.2	9876	294.3	2117	66.3
32	L	1944	62.0	674	19.8	12	0.6
34	I	26983	812.2	11845	329.3	3292	97.1
21	G	61102	1949.2	25419	785.4	5460	184.6

Tableau 32 – Débits de chlore dans le Bélon pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004			Avril 2005			Août 2005		
		Débit eau (m³/j)	Cl (kg/j)	Cl (mg/l)	Débit eau (m³/j)	Cl (kg/j)	Cl (mg/l)	Débit eau (m³/j)	Cl (kg/j)	Cl (mg/l)
44	K à H	15509	487.8	31.5	9184	274.2	29.9	2022	63.3	31.3
46	L à I	25039	750.2	30.0	11172	309.5	27.7	3280	96.5	29.4
48	(H+I) à G	17384	609.8	35.1	3698	161.8	43.8	52	21.2	408.9

Tableau 33 – Apports en chlore vers le Bélon pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau	Cl	Débit eau	Cl	Débit eau	Cl
39	K	2.0%	2.0%	2.7%	2.6%	1.7%	1.6%
32	L	3.2%	3.2%	2.7%	2.5%	0.2%	0.3%
44	K à H	25.4%	25.0%	36.1%	34.9%	37.0%	34.3%
46	L à I	41.0%	38.5%	43.9%	39.4%	60.1%	52.3%
48	(H+I) à G	28.5%	31.3%	14.5%	20.6%	0.9%	11.5%

Tableau 34 – Répartition des apports en chlore vers le Bélon pour chaque campagne.

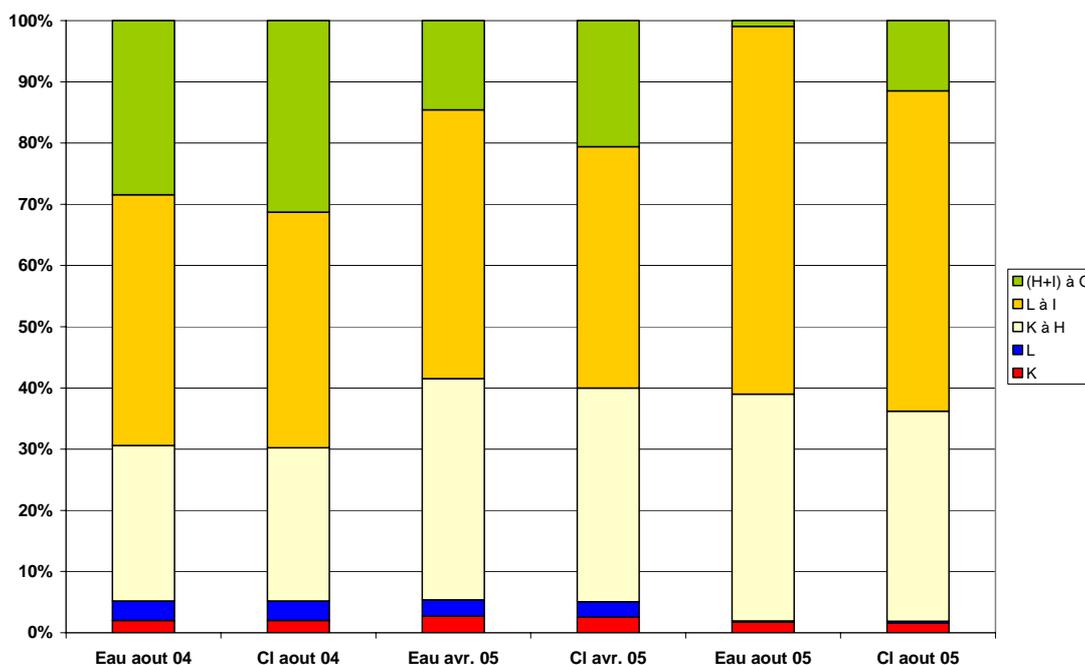


Figure 15 – Répartition des apports en chlore vers le Bélon.

De même que pour le Doudu, on n'identifie pas de source de chlore particulière sur la zone du Bélon. Les répartitions des apports en chlore et en eau sont bien corrélées, du moins sur les deux périodes d'août 2004 et d'avril 2005. Sur août, la différence et la très forte concentration calculée s'expliquent par les erreurs de mesure de débits.

- L'ensemble du bassin

Le tableau 35 récapitule les apports en chlore dans l'estuaire pour les trois périodes analysées. Sur les périodes les plus fiables (août 2004 et avril 2005) la répartition des apports en chlore est conforme à celle des apports en eau. Comme pour les nitrates on atteint des valeurs importantes.

N° Flux	Localisation	Août 2004	Avril 2005	Août 2005
8	B	24.9%	27.2%	37.3%
21	G	72.5%	68.0%	60.1%
52	F	2.6%	4.8%	2.6%
Total (kg/j)		2687	1155	307

Tableau 35 - Répartition des apports en chlore des principaux contributeurs à l'estuaire

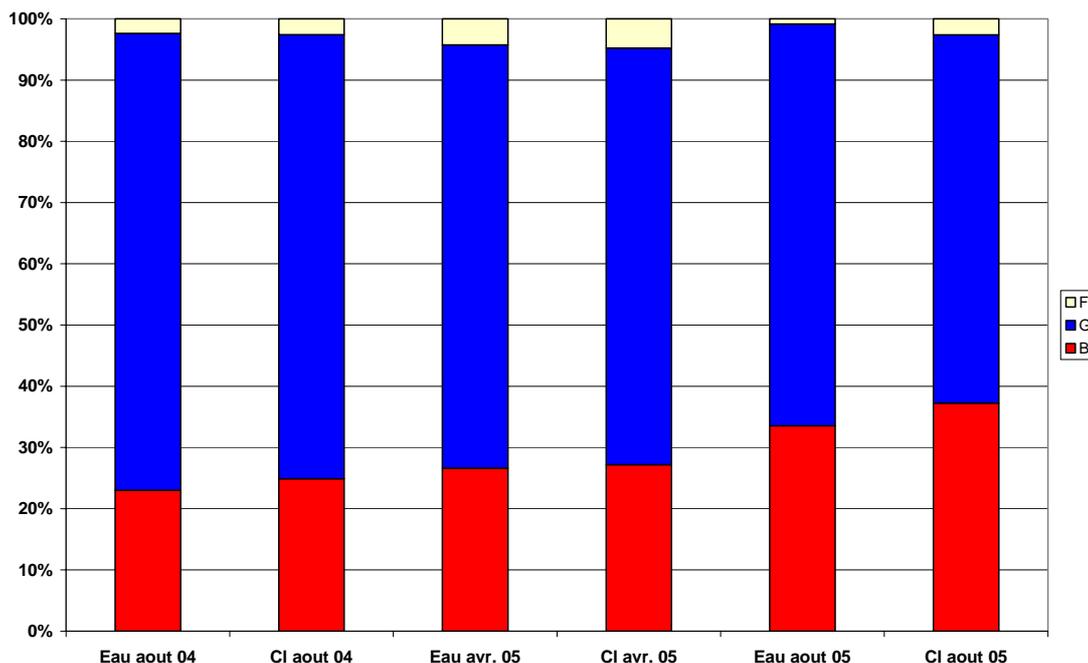


Figure 16 - Répartition des apports en chlore des principaux contributeurs à l'estuaire

d) Fer

On remarque que les teneurs en fer dans l'eau sont toujours très basses ce qui implique des risques d'erreurs relatives importantes. Par ailleurs, l'observation des analyses en fer, réalisées en avril 2005 sur les sédiments des cours d'eau, des berges et de l'estuaire, (Cf. tableau 36) montrent du fer dans les sédiments des berges et de l'estuaire, mais pas dans les sédiments des cours d'eau. Deux hypothèses peuvent être proposées :

- le fer des berges est lixivié puis transporté dans l'eau avant de précipiter dans l'estuaire sous l'effet des changements de conditions physico-chimiques.
- Les phases minérales porteuses de fer sont entraînées sélectivement sous forme de MES, puis une floculation-sédimentation intervient dans l'estuaire sous l'effet de la salinité.

Une analyse chimique des MES pourrait fournir des indications sur le phénomène dominant. Dans tous les cas, ces changements de phases rendent délicate l'interprétation des résultats.

Lieu	Cours d'eau	Fe ₂ O ₃ t %
A	Estuaire	1
D	Estuaire	1.1
E	Estuaire	2.2
B	Dourdu	< 1
C	Dourdu	< 1
J	Dourdu	< 1
F	Affluent	< 1
G	Bélon	< 1
H	Bélon	< 1
I	Bélon	< 1
K	Bélon	< 1
L	Bélon	< 1
NIZO	Berge	3.3
BAYE	Berge	2.4
RIEC	Berge	1.3
LANM	Berge	1.7

Tableau 36 – Teneur en fer des échantillons de sédiments collectés en avril 2005

- Le Dourdu

Les débits de fer sur le cours du Dourdu ainsi que les apports calculés sont présentés respectivement dans les tableaux 37 et 38.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)
4	J	4847	1.99	2246	0.54	622	0.06
6	C	16217	6.65	8243	1.48	2817	0.28
8	B	18852	8.11	9789	2.06	2791	0.25

Tableau 37 – Débits de fer dans le Dourdu pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004			Avril 2005			Août 2005		
		Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)	Fe (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)	Fe (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)	Fe (mg/l)
24	J à C	11370	4.66	0.41	5996	0.94	0.16	2195	95.9	0.10
26	C à B	2635	1.46	0.55	1547	0.57	0.37	-26	0.9	-

Tableau 38 – Apports en fer vers le Dourdu pour chaque campagne.

La campagne d'août 2005 semble difficilement exploitable pour cet élément. Pour les deux autres campagnes, les contributions dans l'estuaire de chacune des entrées du système sont les suivantes :

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005	
		Débit eau	Fe	Débit eau	Fe
4	J	26%	24.5%	23%	26.2%
24	J à C	60%	57.5%	61%	45.9%
26	C à B	14%	18.0%	16%	27.8%

Tableau 39 – Répartition des apports en fer vers le Dourdu pour chaque campagne.

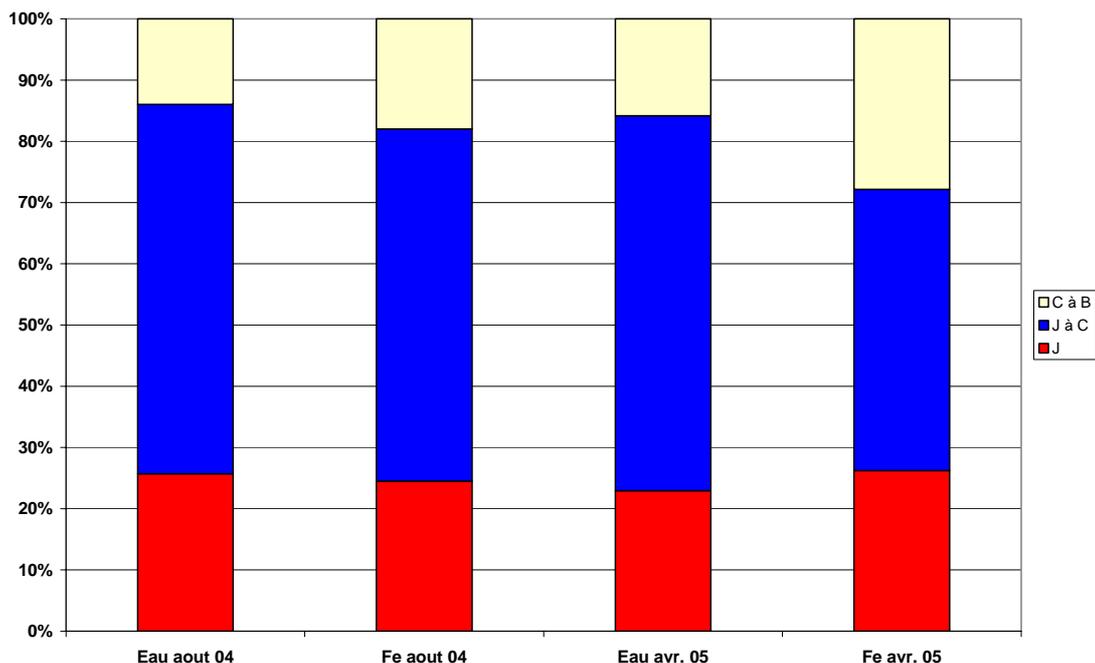


Figure 17 – Répartition des apports en fer vers le Dourdu.

Sur la campagne d'août 2004, les contributions en fer sont réparties conformément aux contributions en eau. Ce n'est pas le cas pour la campagne d'avril. Compte-tenu des précautions exposées plus haut, il est difficile de conclure.

- Le Bélon

Les tableaux 40 à 42 présentent les différents débits de fer et leurs contributions respectives pour le Bélon.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)
39	K	1227	0.70	691	0.17	95	0.01
41	H	16736	6.36	9876	1.88	2117	0.17
32	L	1944	1.77	674	0.09	12	0.05
34	I	26983	10.79	11845	1.42	3292	0.30
21	G	61102	22.00	25419	4.07	5460	0.66

Tableau 40 – Débits de fer dans le Bélon pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004			Avril 2005			Août 2005		
		Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)	Fe (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)	Fe (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	Fe (kg/j)	Fe (mg/l)
44	K à H	15509	5.66	0.36	9184	1.71	0.19	2022	0.16	0.08
46	L à I	25039	9.02	0.36	11172	1.33	0.12	3280	0.25	0.08
48	(H+I) à G	17384	4.84	0.28	3698	0.77	0.21	52	0.19	3.66

Tableau 41 – Apports en fer vers le Bélon pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau	Fe	Débit eau	Fe	Débit eau	Fe
39	K	2.0%	3.2%	2.7%	4.1%	1.7%	1.9%
32	L	3.2%	8.0%	2.7%	2.2%	0.2%	7.4%
44	K à H	25.4%	25.7%	36.1%	42.1%	37.0%	24.0%
46	L à I	41.0%	41.0%	43.9%	32.8%	60.1%	37.9%
48	(H+I) à G	28.5%	22.0%	14.5%	18.9%	0.9%	28.9%

Tableau 42 – Répartition des apports en fer vers le Bélon pour chaque campagne.

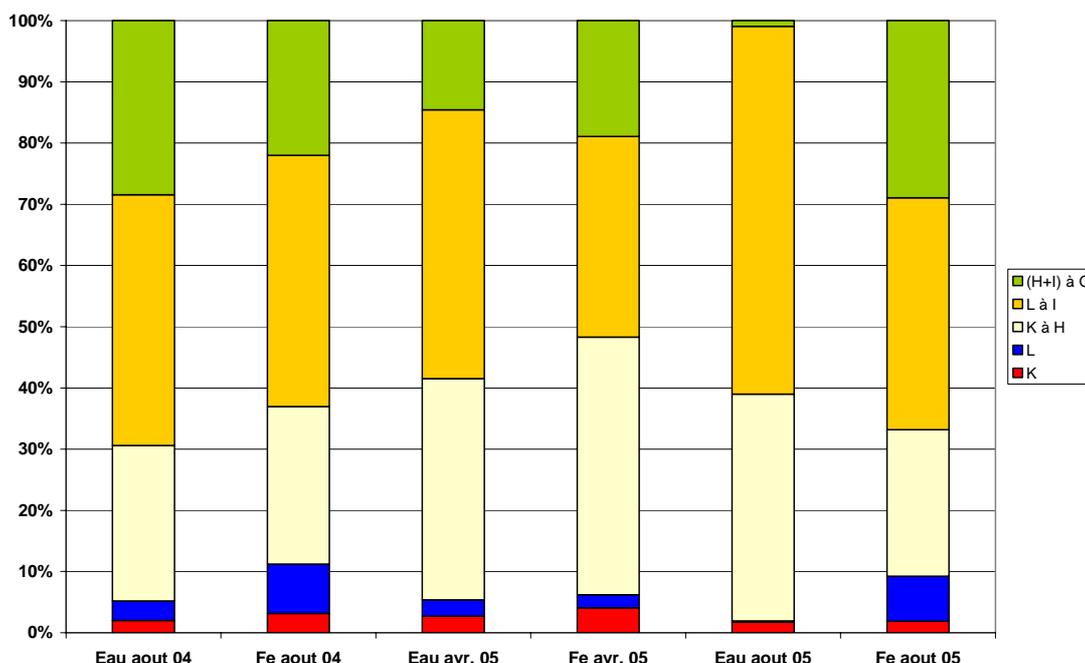


Figure 18 – Répartition des apports en fer vers le Bélon.

Les observations faites pour le Douurdu sont sensiblement les mêmes que celles qui peuvent être faites pour le Bélon. Il semble peu probable qu'une source de fer autre que le fond géochimique local existe, même si les contributions en fer ne sont pas parfaitement corrélées aux contributions en eau. Il est possible que les teneurs en fer soient liées à la dénitrification qui intervient de manière variable d'une saison à l'autre.

- L'ensemble du bassin

Le tableau 43 présente les apports en fer dans l'estuaire pour les trois périodes analysées. La répartition des apports est relativement conforme à celle des apports en eau. Les valeurs restent très faibles.

N°Flux	Localisation	Août 2004	Avril 2005	Août 2005
8	B	26.5%	32.1%	27.0%
21	G	72.0%	63.5%	70.6%
52	F	1.5%	4.4%	2.4%
Total (kg/j)		31	6	1

Tableau 43 - Répartition des apports en fer des principaux contributeurs à l'estuaire

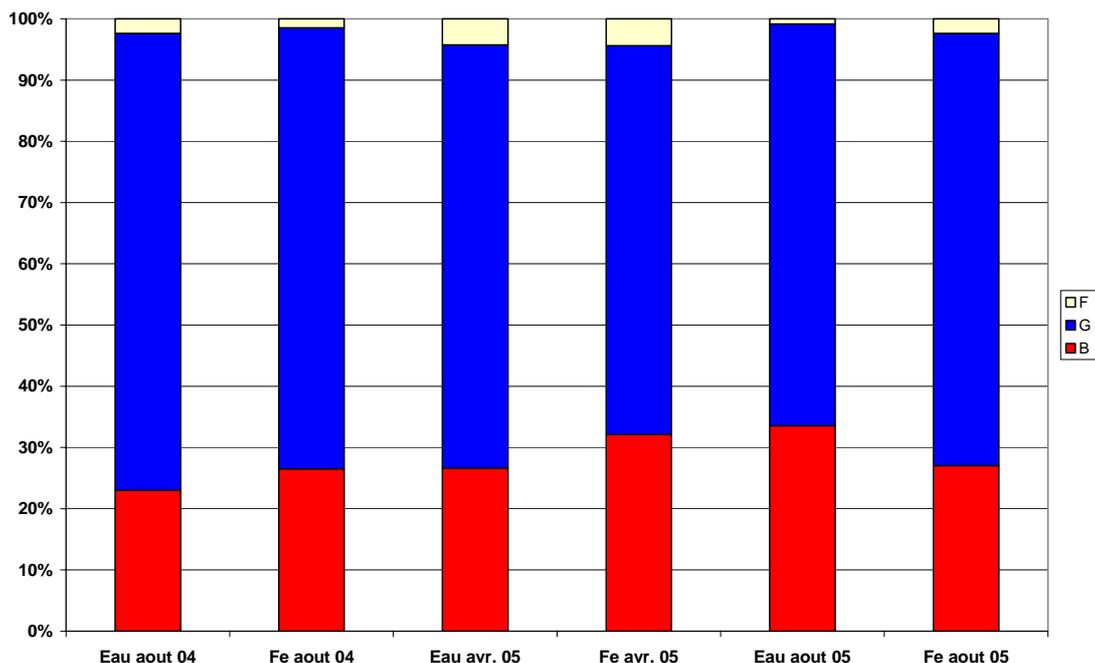


Figure 19 - Répartition des apports en fer des principaux contributeurs à l'estuaire

e) Silice

▪ Le Doudu

Les tableaux 44 à 46 présentent les différents débits de silice et leurs contributions respectives pour le Doudu.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)
4	J	4847	76.6	2246	29.7	622	8.7
6	C	16217	257.9	8243	108.0	2817	44.8
8	B	18852	311.1	9789	130.2	2791	45.5

Tableau 44 – Débits de silice dans le Doudu pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004			Avril 2005			Août 2005		
		Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)	SiO ₂ (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)	SiO ₂ (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)	SiO ₂ (mg/l)
24	J à C	11370	181.3	15.9	5996	78.3	13.1	2195	36.1	16.4
26	C à B	2635	53.2	20.2	1547	22.2	14.4	-26	0.7	-

Tableau 45 – Apports en silice vers le Doudu pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005	
		Débit eau	SiO ₂	Débit eau	SiO ₂
4	J	26%	24.6%	23%	22.8%
24	J à C	60%	58.3%	61%	60.2%
26	C à B	14%	17.1%	16%	17.1%

Tableau 46 – Répartition des apports en silice vers le Doudu pour chaque campagne.

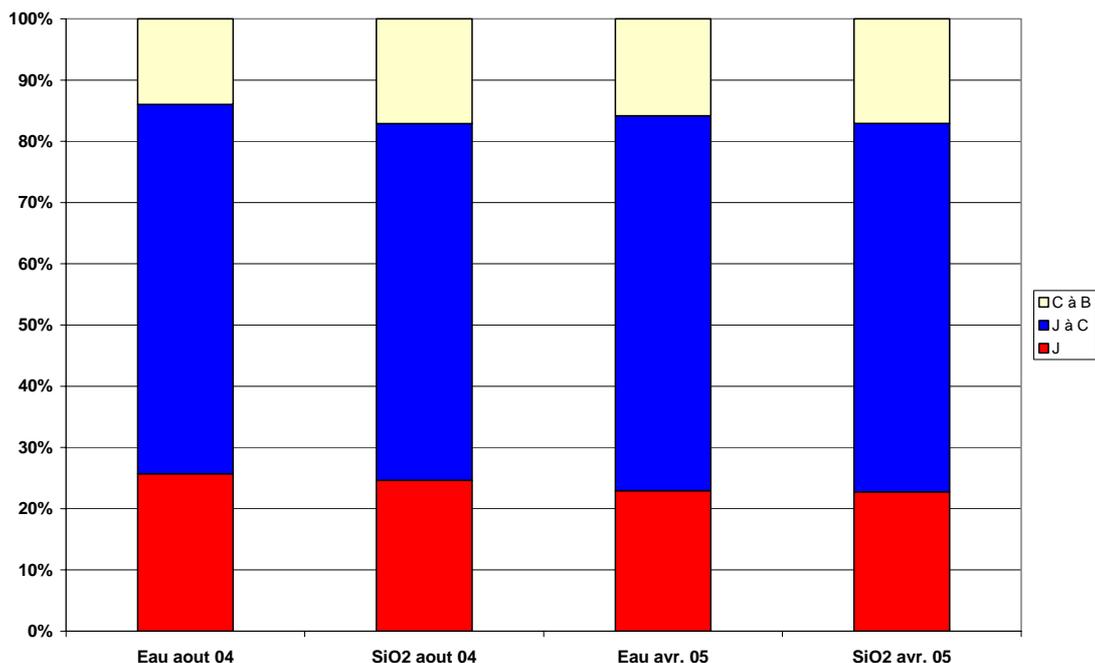


Figure 20 – Répartition des apports en silice vers le Dourdu.

Sur le bassin du Dourdu, la répartition des contributions en silice est parfaitement corrélée à celle des contributions en eau sur les deux périodes observables.

▪ Le Bélon

Les tableaux 47 à 49 présentent les différents débits de silice et leurs contributions respectives pour le Bélon.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005		Août 2005	
		Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)	Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)
39	K	1227	21.1	691	8.8	95	1.3
41	H	16736	299.6	9876	135.3	2117	36.0
32	L	1944	37.1	674	10.0	12	0.3
34	I	26983	480.3	11845	162.3	3292	49.0
21	G	61102	1105.9	25419	353.3	5460	78.6

Tableau 47 – Débits de silice dans le Bélon pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004			Avril 2005			Août 2005		
		Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)	SiO ₂ (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)	SiO ₂ (mg/l)	Débit eau (m ³ /j)	SiO ₂ (kg/j)	SiO ₂ (mg/l)
44	K à H	15509	278.5	18.0	9184	126.4	13.8	2022	34.7	17.2
46	L à I	25039	443.2	17.7	11172	152.2	13.6	3280	48.8	14.9
48	(H+I) à G	17384	326.1	18.8	3698	55.7	15.1	52	-6.4	-

Tableau 48 – Apports en silice vers le Bélon pour chaque campagne.

N° Flux	Localisation	Août 2004		Avril 2005	
		Débit eau	SiO ₂	Débit eau	SiO ₂
39	K	2.0%	1.9%	2.7%	2.5%
32	L	3.2%	3.4%	2.7%	2.8%
44	K à H	25.4%	25.2%	36.1%	35.8%
46	L à I	41.0%	40.1%	43.9%	43.1%
48	(H+I) à G	28.5%	29.5%	14.5%	15.8%

Tableau 49 – Répartition des apports en silice vers le Béton pour chaque campagne.

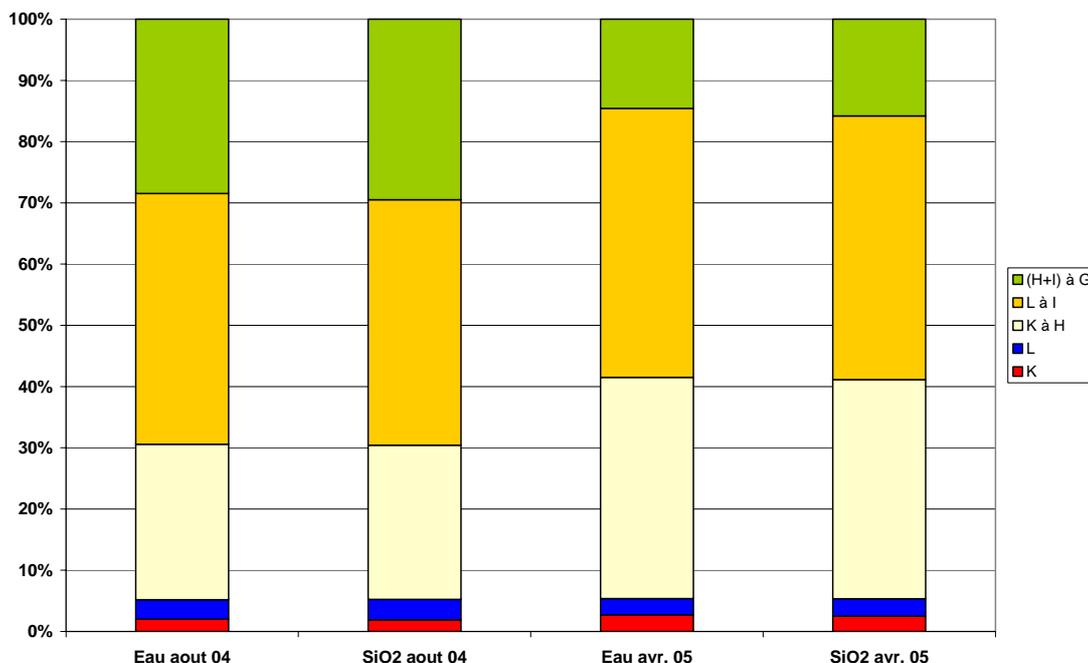


Figure 21 – Répartition des apports en silice vers le Béton.

De même que pour le Douurdu, on observe pour les périodes d'août 2004 et avril 2005, une excellente corrélation entre la répartition des apports en eau et celle en silice.

- L'ensemble du bassin

Le tableau 50 présente les apports en silice dans l'estuaire pour les trois périodes analysées. La répartition des apports est parfaitement conforme à celle des apports en eau, ce que l'on observait également sur chacun des cours d'eau.

N° Flux	Localisation	Août 2004	Avril 2005	Août 2005
8	B	21.4%	25.6%	36.2%
21	G	76.0%	69.5%	62.5%
52	F	2.6%	5.0%	1.3%
Total (kg/j)		1 455	509	126

Tableau 50 - Répartition des apports en silice des principaux contributeurs à l'estuaire

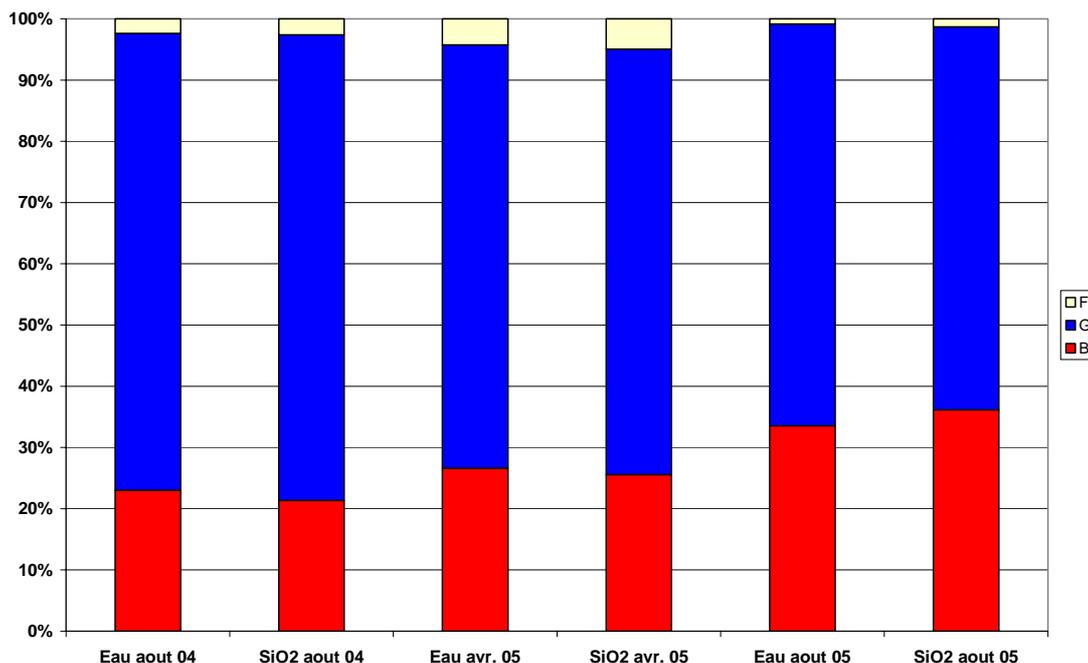


Figure 22 - Répartition des apports en silice des principaux contributeurs à l'estuaire

CONCLUSION

Cette étude, menée dans le cadre du projet CYCLEAU, a permis de tester la mise en œuvre de la méthode du bilan matière à l'analyse des flux circulant dans un bassin versant.

D'un point de vue méthodologique, il y avait deux façons d'aborder le bilan matière :

- le bilan sur une période donnée (par exemple un mois), prenant en compte les quantités de matière transportées tout au long de cette période. Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir des mesures et échantillonnages fréquents prenant en compte la pluviométrie, l'évapotranspiration, les échanges avec la nappe et le ruissellement et de les intégrer sur la période.
- Le bilan à un instant donné, représentatif d'une période. Dans ce cas les mesures de débits doivent être faites dans un laps de temps suffisamment court pour supposer une stabilité du système. Il faut s'affranchir de tout événement (principalement les précipitations) venant perturber significativement cette stabilité.

Les données disponibles correspondaient à la seconde méthode, bien que pour certaines campagnes, la contrainte de stabilité n'était pas respectée.

En plus du bilan hydrique, des bilans pour les éléments suivants ont été établis : nitrate, sulfate, chlore, fer et silice ainsi que les matières en suspension.

Concernant les apports en solides dans l'estuaire, les mesures des MES étant faibles et fréquemment en dessous des limites de détection, le bilan est difficile à établir. On peut simplement conclure que les apports annuels en MES sont faibles et qu'ils ne peuvent pas expliquer à eux seuls la dynamique d'ensablement. Par contre, des sédiments peuvent être apportés par saltation.

L'étude montre que pour la plupart des éléments chimiques dissouts, la répartition des différents apports au système est comparable à celle des apports en eau. Reste à vérifier si ces apports sont proportionnels à la surface drainée par le bassin.

On a pu mettre en évidence, sous réserve de validité des mesures et analyses, une source de sulfate sur le Dourdu et une sur le Bélon.

Le bilan de cette étude amène aux remarques méthodologiques suivantes :

Dès que l'on s'intéresse aux apports en sédiments et éléments chimiques d'un bassin versant sur une cible (estuaire), on ne peut pas se passer d'un bilan matière. Une simple étude des teneurs ne suffit pas. Cet objectif doit être pris en compte dès l'organisation des campagnes de mesures et d'échantillonnage. L'approche bilan matière nécessite particulièrement :

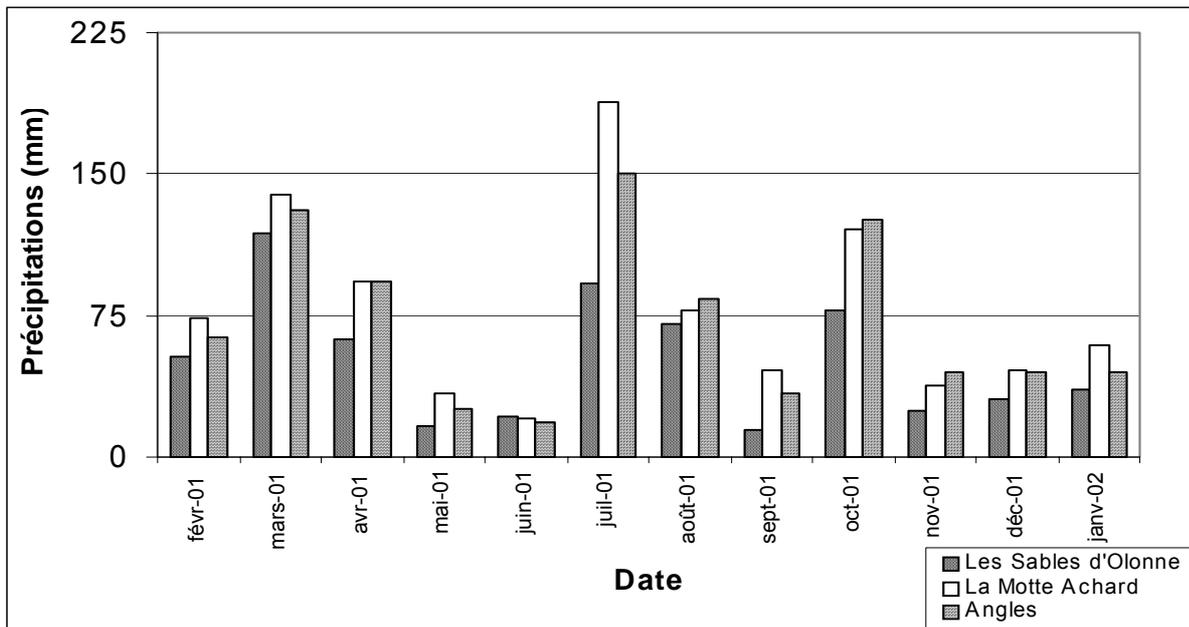
- l'identification de l'ensemble des flux et de leurs importances relatives,
- le choix de la méthode (intégration sur une période ou instantané représentatif d'une période) en précisant bien les précautions à prendre,
- le choix des périodes,
- la sélection des points de mesures et la fréquence,
- des éléments à analyser pour lesquels ne se pose pas de problème de conservation (telle la silice dans cette étude).

Annexe 4

Données hydrologiques pour le bassin du Payré (détermination de la pluie efficace)

Pluviométrie brute

La comparaison des données recueillies permet de conclure sur la représentativité des données dans l'espace, par rapport au bassin versant étudié. Le graphique ci dessous semble montrer que les valeurs de pluviométrie sont relativement homogènes entre les trois stations hormis pour 4 mois (mai, juillet, septembre et octobre 2001) où des différences notables apparaissent, vraisemblablement en lien avec le caractère très localisé d'épisodes de type orageux.



Graphique n°1 : Représentativité des valeurs de pluviométrie.

Le tableau suivant montre que la pluviométrie brute moyenne de l'année est de **805,1 mm** pour ces trois stations. Il vient aussi confirmer les écarts notés plus haut. En fait, on note que sur l'ensemble de la période considérée, la pluviométrie brute totale à la Motte Achard est la plus importante des trois. Elle est de **936,2 mm** contre 617,6 mm aux Sables et 861,5 mm à Angles. La faible valeur observée aux Sables peut en partie être expliquée par la proximité avec l'océan. L'écart type observé est de 166,6 mm entre la station des Sables et celle de la Motte. Cela représente une différence de plus de 330 mm de pluie. Cette différence représente en fait une variation des précipitations de plus ou moins **20,7%**.

PRECIPITATIONS MENSUELLES (mm)						
DATE	P brute (Angles)	P brute (Sables)	P brute (La Motte)	P brute moyenne	Ecart type (\pm)	Coef variation ($\pm\%$)
févr-01	63,9	53,0	73,6	63,5	10,3	16,2
mar-01	131,1	118,6	139,4	129,7	10,5	8,1
avr-01	93,3	62,0	93,4	82,9	18,1	21,8
mai-01	25,7	16,8	33,6	25,4	8,4	33,1
juin-01	18,2	21,6	20,8	20,2	1,8	8,8
juil-01	150,5	92,2	188,2	143,6	48,4	33,7
août-01	84,2	70,8	77,8	77,6	6,7	8,6
sept-01	33,5	14,0	45,8	31,1	16,0	51,6
oct-01	126,1	77,6	120,2	108,0	26,5	24,5
nov-01	44,6	24,6	38,0	35,7	10,2	28,5
déc-01	44,9	31,0	46,0	40,6	8,4	20,6
janv-02	45,5	35,4	59,4	46,8	12,1	25,8
TOTAL	861,5	617,6	936,2	805,1	166,6	20,7

Tableau n°1 : Représentativité des valeurs de pluviométrie (moyennes et écarts types).

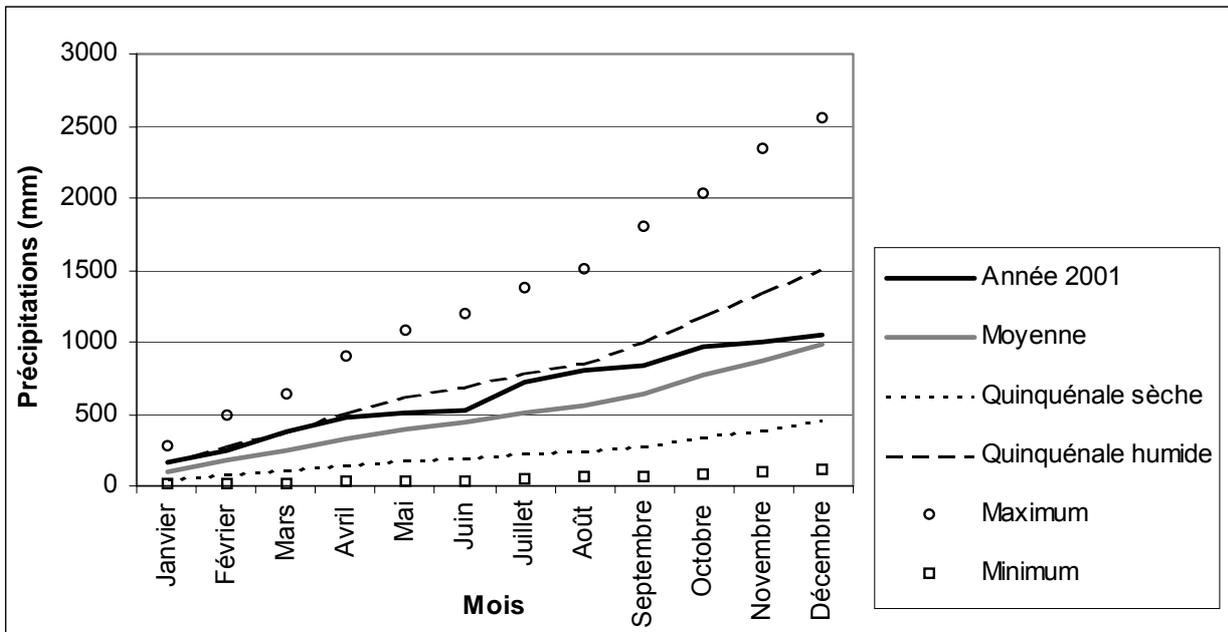
Enfin, les mois de mai, juillet, septembre et octobre montrent des coefficients de variation importants, respectivement de 33,1%, 33,7%, 51,6% et 24,5%.

Il est également intéressant de recadrer la représentativité des données pluviométriques acquises au cours de l'année 2001, dans le temps. Pour cela, elles ont été comparées avec la pluviométrie observée sur cette même station depuis 1980.

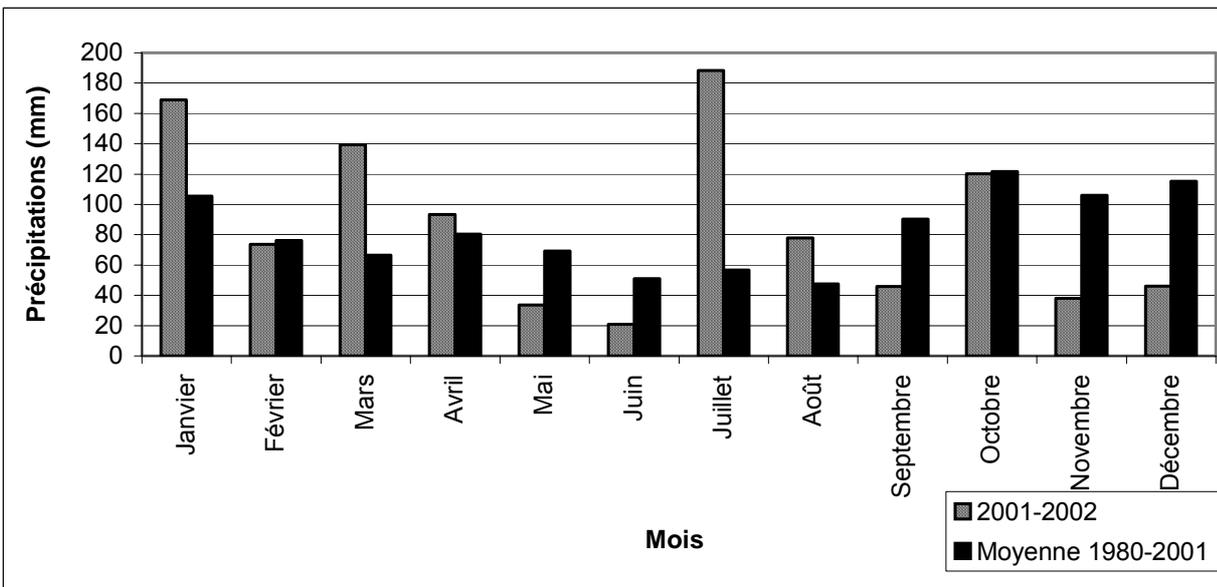


Graphique n°2 : Précipitations annuelles sur la station 85152001 entre 1980 et 2001

La figure précédente permet de visualiser la représentativité de la pluviométrie de l'année 2001 par rapport aux vingt et un dernières années. Il ressort de ces graphiques que l'année prise en compte montre une pluviométrie assez moyenne. En effet, 1045 mm sont tombés cette année là pour une moyenne de 986 mm depuis 1980.



Graphique n°3 : Pluies cumulées de 2001 et valeurs statistiques.



Graphique n°4 : Comparaison des pluies mensuelles de 2001 et des pluies moyennes depuis 1980.

Les graphiques 3 et 4 ci-dessus permettent d'une part, de comparer la pluviométrie cumulée observée en 2001 avec les valeurs statistiques (moyennes, quinquennales et extrêmes), et d'autre part, les précipitations mensuelles moyennes depuis 1980 à celles de 2001. En fait, l'année 2001 est considérée comme une année très pluvieuse puisque, sur l'ensemble de la métropole, les quatre premiers mois de l'année ont connu les précipitations les plus importantes depuis 1950. Sur la zone d'étude, les deux graphiques confirment cette tendance. La courbe des précipitations de 2001 suit la quinquennale humide jusqu'en avril. Il s'agit alors de la quatrième année la plus pluvieuse depuis 1980 derrière 1988, 1994 et 1995. En revanche le reste de l'année est moins pluvieux que la moyenne, à l'exception des mois de juillet, d'août et d'octobre qui montrent des pluies plus importantes. Le mois de juillet est même exceptionnel avec plus de 180 mm de pluie, soit trois fois plus que la moyenne sur 21 ans. A partir du mois de septembre, les précipitations deviennent relativement faible, et la courbe cumulée des précipitations de 2001 s'éloigne de la quinquennale humide pour se rapprocher progressivement de la moyenne.

Le cycle hydrologique d'observation commence donc par une période de quatre mois qui est très pluvieuse. Cette quantité importante de pluie au début de l'année fait également suite à une fin d'année 2000 très pluvieuse dont il faudra tenir compte lors de l'établissement du bilan et de l'interprétation des résultats. Le reste de l'année est en revanche peu pluvieux, avec des précipitations inférieures à la moyenne. Enfin, au sein de cet épisode sec, la période estivale extrêmement pluvieuse est hors norme.

Finalement, les données de pluviométrie utilisées sont considérées comme représentatives de la zone d'étude malgré la variabilité spatio-temporelle mise en évidence, et dont il faudra tenir compte lors de l'exploitation du bilan hydrologique.

Pluviométrie - février 2001 - janvier 2002												
	févr-01			mars-01			avr-01			mai-01		
Décade	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
P (mm)	49,2	1,8	22,6	30,2	61,0	48,2	38,0	3,4	52,0	20,0	13,2	0,4
Total	73,6			139,4			93,4			33,6		
	juin-01			juil-01			août-01			sept-01		
Décade	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
P (mm)	6,6	13,6	0,6	111,0	73,8	3,4	49,6	18,0	10,2	1,8	9,0	35,0
Total	20,8			188,2			77,8			45,8		
	oct-01			nov-01			déc-01			janv-02		
Décade	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
P (mm)	57,2	33,6	29,4	10,2	3,4	24,4	8,4	0,0	37,6	8,2	27,0	24,2
Total	120,2			38,0			46,0			59,4		
Pluie totale (mm)	336,2						936,2					

Tableau n°2 : Valeurs décadaires et mensuelles de la pluviométrie en mm en 2001-2002 (station 85152001).

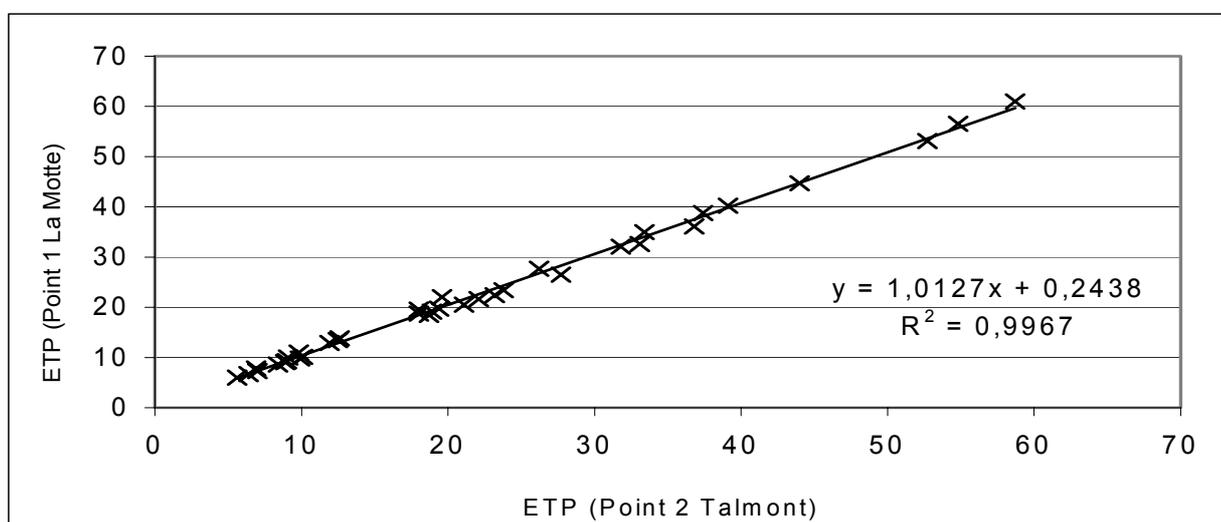
Les valeurs décadaires ont été retenues pour la détermination des pluies efficaces (Cf. tableau n°2). On peut noter que les décades les plus sèches sont les troisièmes décades de mai et de juin et la seconde décade de décembre. A l'opposé, les décades les plus humides sont paradoxalement les deux premières de juillet où il tombe 184 mm.

L'évapotranspiration

L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau précipitée puis rejetée dans l'atmosphère par évaporation directe ou par transpiration végétale. On distingue l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui correspond à la consommation d'un couvert végétal dont le développement n'est pas limité par les conditions hydriques, de l'évapotranspiration réelle (ETR) qui dépend des précipitations et de la réserve en eau des sols.

Si les précipitations sont supérieures à l'ETP alors $ETP = ETR$ et l'excédent des précipitations sur l'ETP est emmagasiné dans le sol dont il augmente les réserves jusqu'à ce qu'il soit saturé. La partie de l'excédent dépassant éventuellement la réserve se trouve alors disponible pour l'écoulement de surface et l'alimentation des nappes. Si les précipitations sont inférieures à l'ETP, l'évapotranspiration réelle est alors représentée par la somme des précipitations et de tout ou partie de la réserve d'eau du sol. Si la réserve antérieure d'humidité du sol est assez forte pour combler l'insuffisance des précipitations, l'ETR est encore égale à l'ETP ; les réserves du sol sont alors réduites à la différence entre l'ETP et les précipitations. Si la réserve d'humidité dans le sol est insuffisante pour satisfaire l'ETP, l'ETR reste inférieure à celle-ci et est égale à la somme des précipitations et des réserves disponibles.

Les valeurs d'ETP mises à disposition par Météo France ont été calculées à partir de la formule de Penman-Monteith. Cette ETP est calculée en point de grille régulière sur la France métropolitaine avec une maille de 0,125 (soit environ 12 kilomètres). Il ne s'agit pas, contrairement aux autres données, de valeurs issues d'un appareillage fixe. Le calcul se fait à partir des paramètres de base (température minimale, température maximale, vitesse moyenne du vent à 10m ou 2m, tension de vapeur moyenne, insolation, rayonnement global), interpolés par une méthode de type inverse de la distance au carré, au niveau du point de grille, à l'aide des valeurs des 5 stations les plus proches, sans tenir compte de l'altitude. Le point choisi pour le bilan est le point 1 qui se situe à proximité du village de La Motte Achard.



Graphique n°5 : Représentativité des données d'ETP de La Motte Achard.

Les valeurs décennales obtenues pour le point 1 ont pu être comparées avec celles du point 2 situé dans le bassin versant du Payré, pour la période d'étude considérée. La corrélation obtenue est de 0,9967. Cela permet de dire que les valeurs entre les deux points évoluent de façon quasiment identique. L'équation définissant la droite de corrélation permet quant à elle d'affirmer ou non si les valeurs d'ETP sont identiques. Une représentativité parfaite est obtenue lorsque $y = x$. Ici, l'équation est très proche de ce résultat avec une ordonnée à l'origine représentant en moyenne, 0,24 mm d'ETP en plus pour les valeurs de La Motte Achard par rapport aux valeurs de Talmont Saint Hilaire. Les données utilisées pour le calcul des pluies efficaces peuvent donc être considérées comme représentatives.

ETP - février 2001 - janvier 2002												
	févr-01			mars-01			avr-01			mai-01		
Décade	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ETP (mm)	9,3	11,0	8,6	12,9	13,8	19,1	18,5	23,4	21,6	19,7	32,1	56,5
Total	28,9			45,8			63,5			108,3		
	juin-01			juil-01			août-01			sept-01		
Décade	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ETP (mm)	35,0	38,8	61,0	40,2	32,6	53,1	26,5	36,1	44,7	22,4	20,5	27,7
Total	134,8			125,9			107,3			70,6		
	oct-01			nov-01			déc-01			janv-02		
Décade	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ETP (mm)	19,5	22,0	18,7	10,1	9,8	6,0	6,7	9,1	7,3	10,0	7,8	13,5
Total	60,2			25,9			23,1			31,3		
ETP totale (mm)	825,6											

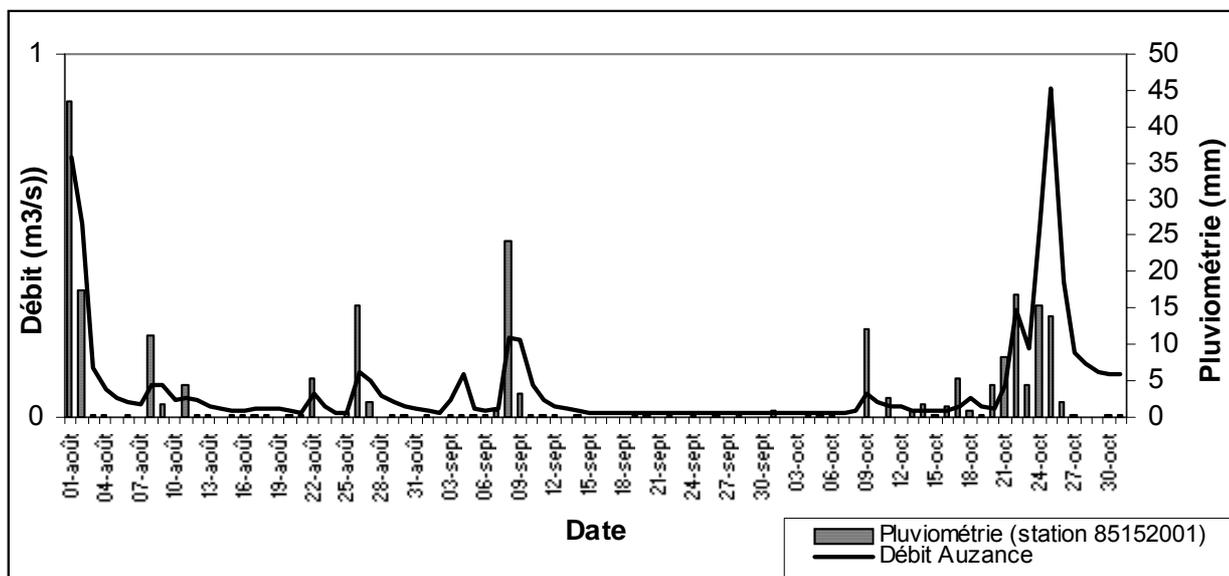
Tableau n°3 : Valeurs décadaires de l'ETP Penman en mm en 2001-2002 à La Motte Achard (point 1).

Les valeurs brutes quotidiennes obtenues ont été redéfinies en décadaire afin d'harmoniser les données avec les valeurs de pluviométrie. Elles sont consignées dans le tableau précédent. Les valeurs minimales décadaires sont observées lors de la troisième décade de novembre et la première décade de décembre 2001 tandis que les valeurs maximales au cours des troisièmes décades de juin et de juillet 2001.

La réserve utile équivalente

La réserve utile équivalente correspond à la quantité d'eau contenue dans le sol qui est mobilisable pour l'évapotranspiration.

Nous avons voulu estimer cette réserve utile à partir de la quantité de pluie induisant une augmentation notable du débit. Pour cela, les pluies journalières mesurées sur la station 85152001 et les débits quotidiens mesurés à la station de Vairé ont été mis en parallèle. Cette méthode doit permettre d'isoler une séquence pluviométrique sèche combinée avec une ETP élevée induisant un assèchement de la réserve utile. Le retour d'un épisode pluvieux entraînant des conséquences sur le débit indique une reconstitution totale de réserve en eau des sols qui peut alors être estimé.



Graphique n°6 : Evolution des débits de l'Auzance en fonction de la pluviométrie (Aout-Octobre 2002).

Le graphique précédent montre la séquence climatique observée entre septembre et octobre 2002 qui est la plus parlante. En effet, **3,8 mm** de pluie ont été mesurés entre le 10 septembre et le 8 octobre alors que pendant la même période, l'évapotranspiration a été évaluée à **65,8 mm**. La réserve en eau du sol peut alors être considérée comme nulle.

Cependant, lors de l'épisode pluvieux du 9 octobre, 12 mm d'eau tombent et ils sont suffisants pour induire une réaction observable sur les débits. La réserve utile serait donc estimée à une dizaine de millimètres ce qui est très peu. Un épisode orageux et brutal provoquant un ruissellement important peut expliquer ce résultat.

De nouvelles informations ont été recherchées auprès de la chambre d'agriculture de Vendée et de l'INRA afin d'estimer la RU. Cependant aucune étude précise n'a été faite sur ce secteur. Cette réserve a finalement été estimée à **50 mm** en se basant sur les données de débits et sur les informations fournies par M. Chauvin (Chambre d'agriculture).

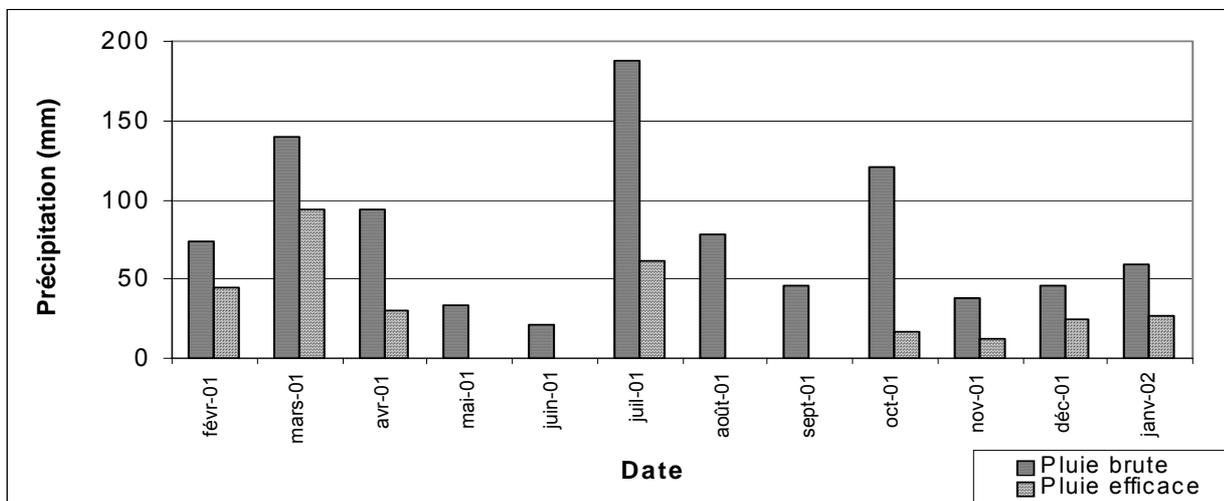
Les pluies efficaces

Les pluies efficaces ont finalement pu être calculées à partir des données de pluviométrie brute de La Motte Achard, de l'ETP Penman au point définit plus haut et de la réserve équivalente estimée à 50 mm. Cette réserve est considérée comme saturée au 1^{er} février 2001 (cf. tableau n°4).

Les pluies efficaces représentent **310,9 mm** sur les 936,2 mm tombés au cours du cycle hydrologique observé, soit **33,2%**. Ces pluies brutes ont été suffisantes pour générer une percolation et un ruissellement huit mois sur douze. L'automne et l'hiver sont favorables à l'apparition de pluies efficaces (entre octobre et avril) tandis que le reste de l'année, les précipitations sont en totalité soumises à l'évapotranspiration. Le mois de juillet montre tout de même 62 mm de précipitations efficaces expliquées par les deux premières décades au cours desquelles sont tombées 111,0 et 73,8 mm ce qui a permis la reconstitution de la RU. Au cours de cette même période, l'évapotranspiration réelle a été de **625,3 mm**.

Pluie efficace - février 2001- janvier 2002												
Décade	févr-01			mars-01			avr-01			mai-01		
P (mm)	49,2	1,8	22,6	30,2	61,0	48,2	38,0	3,4	52,0	20,0	13,2	0,4
ETP (mm)	9,3	11,0	8,6	12,9	13,8	19,1	18,5	23,4	21,6	19,7	32,1	56,5
P-ETP (mm)	39,9	-9,2	14,0	17,3	47,2	29,1	19,5	-20,0	30,4	0,3	-18,9	-56,1
RU (mm)	50,0	40,8	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	30,0	50,0	50,0	31,1	0,0
*RU (mm)	0,0	-9,2	9,2	0,0	0,0	0,0	0,0	-20,0	20,0	0,0	-18,9	-31,1
ETR (mm)	9,3	11,0	8,6	12,9	13,8	19,1	18,5	23,4	21,6	19,7	32,1	31,5
P eff (mm)	39,9	0,0	4,8	17,3	47,2	29,1	19,5	0,0	10,4	0,3	0,0	0,0
Total (mm)	44,7			93,6			29,9			0,3		
Décade	juin-01			juil-01			août-01			sept-01		
P (mm)	6,6	13,6	0,6	111,0	73,8	3,4	49,6	18,0	10,2	1,8	9,0	35,0
ETP (mm)	35,0	38,8	61,0	40,2	32,6	53,1	26,5	36,1	44,7	22,4	20,5	27,7
P-ETP (mm)	-28,4	-25,2	-60,4	70,8	41,2	-49,7	23,1	-18,1	-34,5	-20,6	-11,5	7,3
RU (mm)	0,0	0,0	0,0	50,0	50,0	0,3	23,4	5,3	0,0	0,0	0,0	7,3
*RU (mm)	0,0	0,0	0,0	50,0	0,0	-49,7	23,1	-18,1	-5,3	0,0	0,0	7,3
ETR (mm)	6,6	13,6	0,6	40,2	32,6	53,1	26,5	36,1	15,5	1,8	9,0	27,7
P eff (mm)	0,0	0,0	0,0	20,8	41,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total (mm)	0,0			62,0			0,0			0,0		
Décade	oct-01			nov-01			déc-01			janv-02		
P (mm)	57,2	33,6	29,4	10,2	3,4	24,4	8,4	0,0	37,6	8,2	27,0	24,2
ETP (mm)	19,5	22,0	18,7	10,1	9,8	6,0	6,7	9,1	7,3	10,0	7,8	13,5
P-ETP (mm)	37,7	11,6	10,7	0,1	-6,4	18,4	1,7	-9,1	30,3	-1,8	19,2	10,7
RU (mm)	40,0	50,0	50,0	50,0	43,6	50,0	50,0	40,9	48,2	46,4	50,0	50,0
*RU (mm)	32,7	10,0	0,0	0,0	-6,4	6,4	0,0	-9,1	7,3	-1,8	3,6	0,0
ETR (mm)	19,5	22,0	18,7	10,1	9,8	6,0	6,7	9,1	7,3	10,0	7,8	13,5
P eff (mm)	5,0	1,6	10,7	0,1	0,0	12,0	1,7	0,0	23,0	0,0	15,6	10,7
Total (mm)	17,3			12,1			24,7			26,3		
Pluie efficace totale (mm)	310,9											

Tableau n°4 : Pluies efficaces pour la période Février 2001 – Janvier 2002.



Graphiquen°7 : Pluies brutes et des pluies efficaces pour la période Février 2001 – Janvier 2002.

Cette valeur de 310,9 mm est supérieure aux pluies efficaces attendues. Cela peut être en partie expliqué par les valeurs des données de la station 85152001 qui sont en moyenne légèrement supérieures à celles des deux autres stations. Cette estimation de 310,9 mm peut aussi être expliquée par les importantes précipitations du début de l'année qui représentent 168,2 mm efficaces en trois mois. Enfin, l'épisode orageux du mois de juillet vient également gonfler le bilan avec 62 mm de pluies efficaces.



Centre scientifique et technique
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

Service géologique régional Pays de la Loire
1, rue des Saumonières
B.P. 92342
44323 – Nantes – France
Tél. : 02 51 86 01 51