

## 2.5 Bange - l'Eau Morte

### Critère P

Le critère protection se subdivise en 3 sous critères : le sol, l'épikarst et la zone non saturée. Le critère sol est proposé figure 5.21 a. Les forêts de feuillus et les forêts mixtes ont un indice de vulnérabilité moyen (2). Les forêts de conifères, les pâturages et les prairies ont été assignés d'un indice de vulnérabilité plus important (3). Les formations superficielles consistent en des éboulis et dépôts glaciaires et de molasses correspondant à un indice de vulnérabilité faible (1).

La carte de vulnérabilité selon le critère épikarstique (Figure 5.21 b) se définit en prenant compte deux formations calcaires. Le faciès urgonien où l'épikarst est plus ou moins continu latéralement et peu stocker temporairement de l'eau à proximité de la surface, il possède ainsi un indice de vulnérabilité faible (1). Le second faciès est de type calcaire gris ou roux à rognon de silex, ici, l'épikarst est moyennement développé et discontinu avec une capacité de stockage en surface moyenne, ce faciès possède donc un indice de vulnérabilité moyen (2).

La carte de vulnérabilité selon le critère zone non saturée est présentée figure 5.21 c. Les formations urgoniennes étant épaisses, très développées et très fracturées ont reçu un indice de vulnérabilité fort (4). Les calcaires du Barrémien inférieur, moins fracturés et développées que les calcaires de l'Urgonien, possèdent un indice de vulnérabilité moyen (3). Enfin les marnes hauteriviennes de forte épaisseur ont un indice de vulnérabilité très faible (0).

La carte finale du critère P (Figure 5.21 d) montre que dans l'ensemble, le bassin d'alimentation de la source karstique de Bange - l'Eau Morte est très peu vulnérable. Le côté Ouest est très faiblement vulnérable et la partie Est faiblement vulnérable. Seul le centre est considéré comme moyennement vulnérable. Néanmoins, quelques zones au Nord et à l'Est sont définies comme très vulnérables.

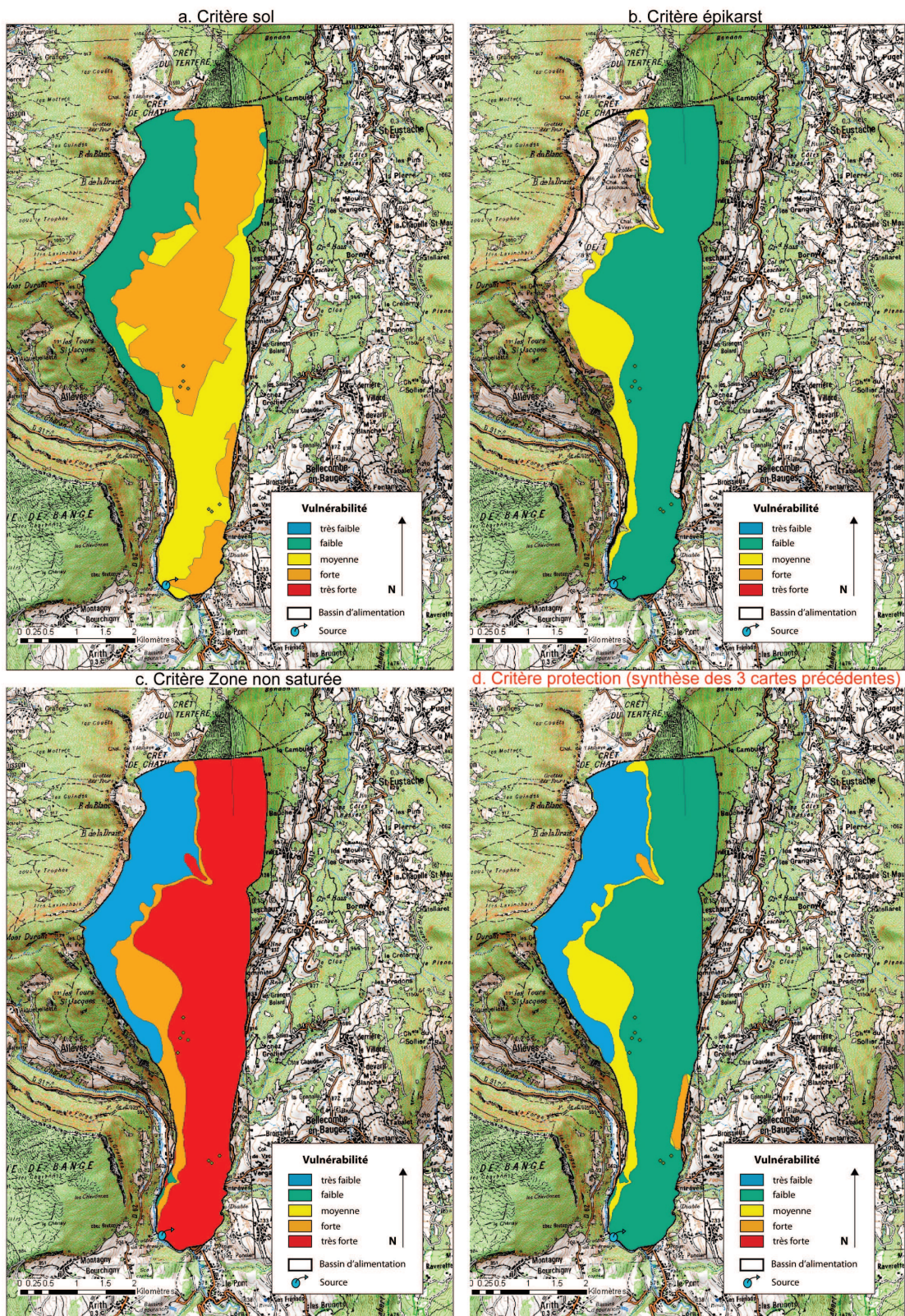


FIGURE 5.21 – Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte

**Critère R**

les différents faciès associés aux niveaux de vulnérabilité sont présentés dans le tableau 5.13 :

Tableau 5.13 – Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de Bange - l'Eau Morte

Formation	Faciès	Classe Vulnérabilité
Crétacé Sup.	calcaires	2
Urgonien	calcaires	3
Hauterivien	marnes	0

La carte de vulnérabilité selon le critère roche (Figure 5.22) montre deux catégories de vulnérabilité :

- ◇ très faible à l'Est due à la présence de marnes ;
- ◇ forte à l'Ouest liée aux calcaires de l'Urgonien.

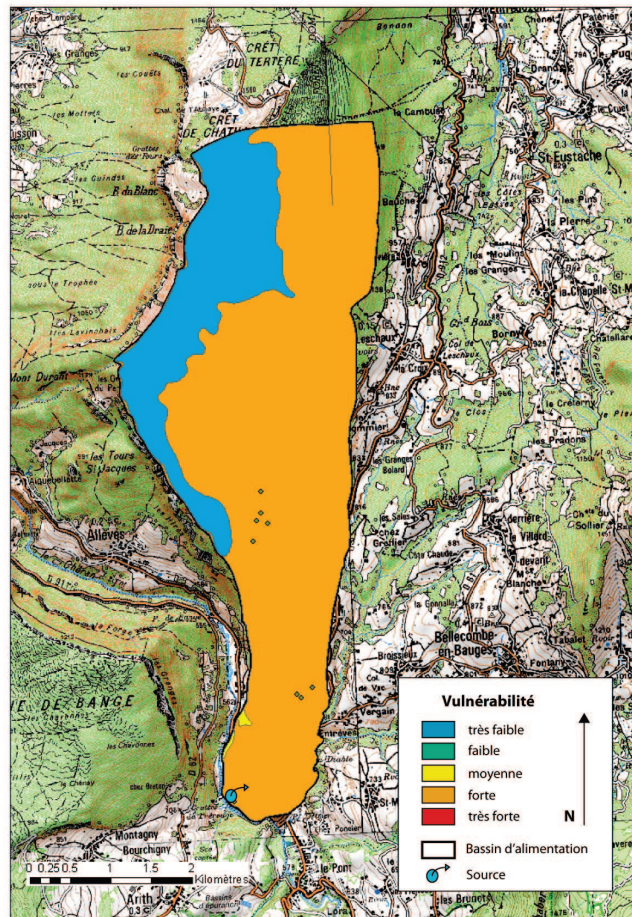


FIGURE 5.22 – Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte

### Critère I

Le résultat du critère I (Figure 5.23) montre que le bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte est essentiellement de faible vulnérabilité. Cependant deux zones au Nord - Ouest et au Sud - Est sont définies par des vulnérabilités moyennes à faibles. Les bassins d'alimentation des pertes sont, dans le secteur, négligeables.

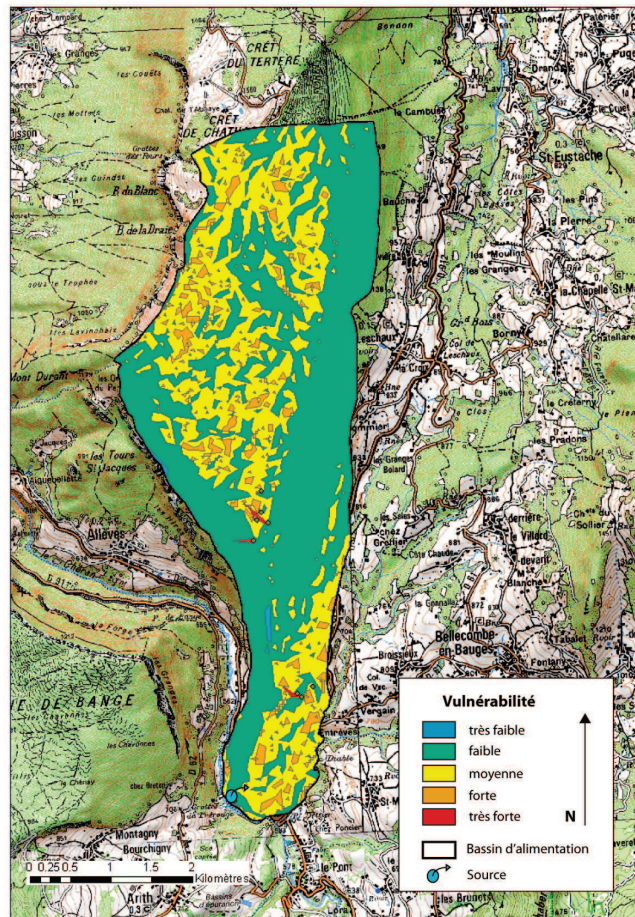


FIGURE 5.23 – Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte

### Critère Ka

Le système karstique de Bange - l'Eau Morte se caractérise par un réseau de drainage très développé avec une zone noyée peu importante. Il est selon la classification de Mangin de type 2. Ainsi, le critère Ka pour ce bassin d'alimentation possède un indice de vulnérabilité de 2, correspondant à une vulnérabilité moyenne.

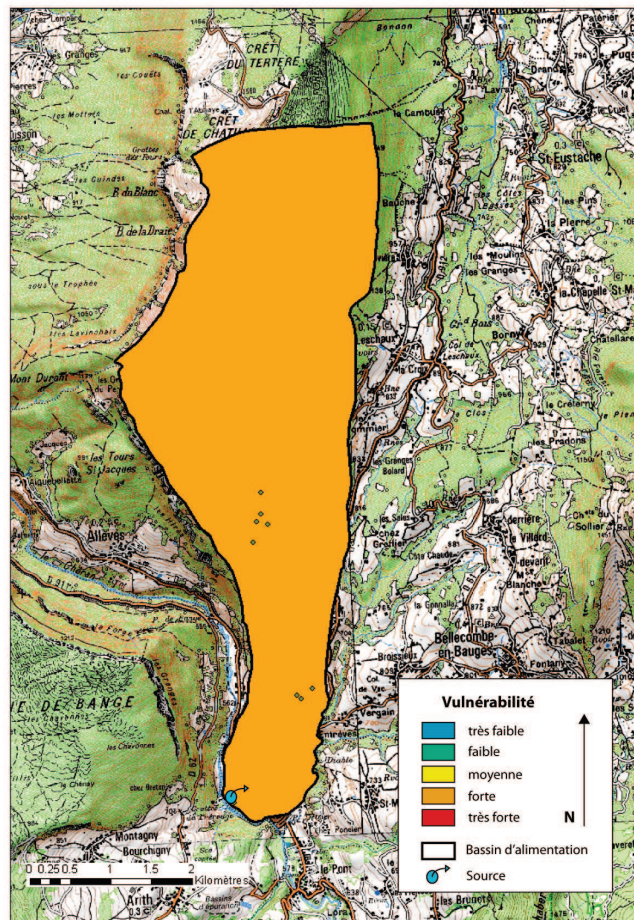


FIGURE 5.24 – Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte

### Cartes de vulnérabilités finales

Les cartes finales de vulnérabilité sont réalisées selon les pondérations du tableau 5.10. Elles montrent dans l'ensemble deux grandes zones (Figure 5.25). La première à l'Ouest possède une vulnérabilité faible à moyenne en fonction de la pondération. Le reste de la carte présente une vulnérabilité essentiellement moyenne à forte. Le centre et le Sud correspondent à des zones de vulnérabilité forte, ces deux régions devront faire l'objet d'une protection plus surveillée.

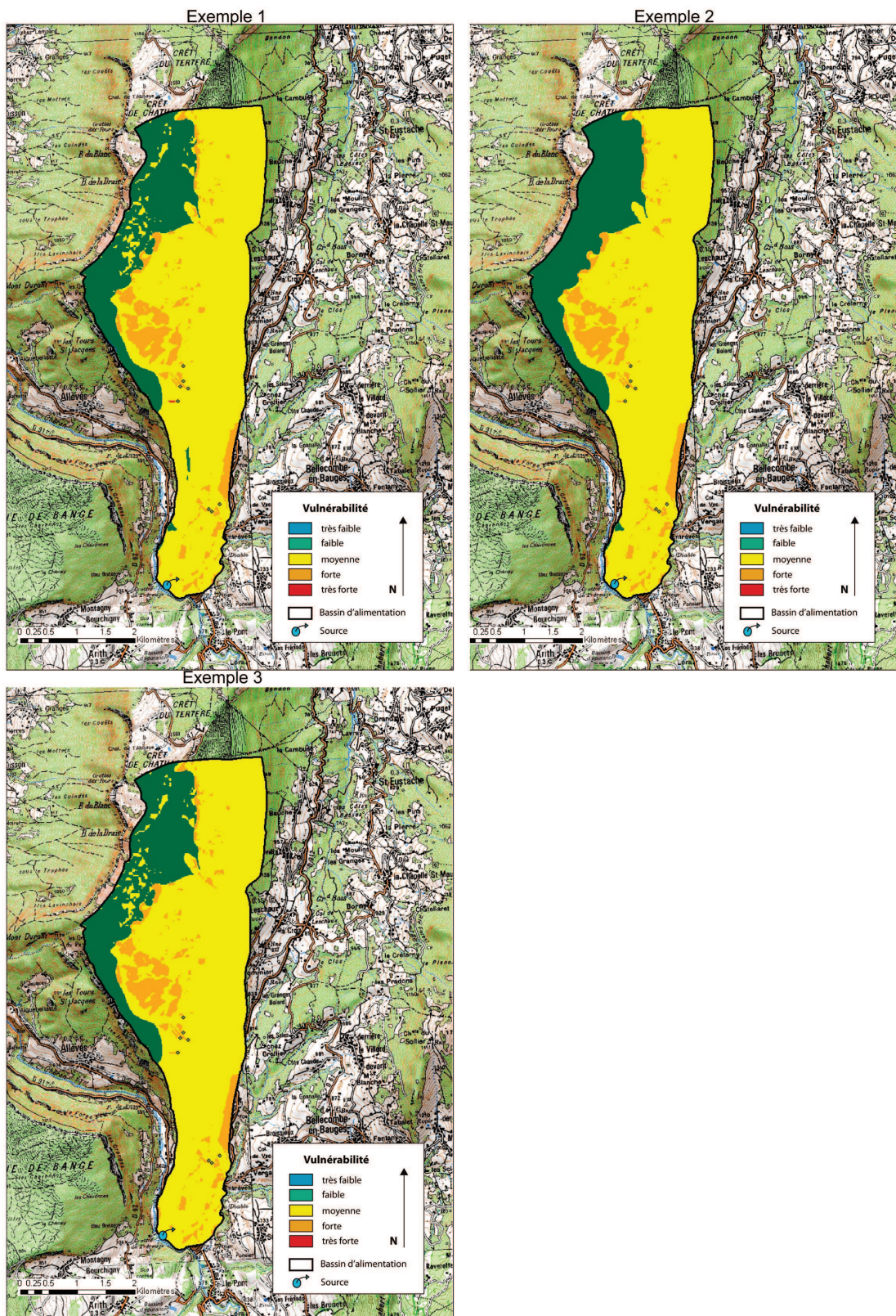


FIGURE 5.25 – Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte

### 3 Conclusion : bilan de la méthode pour les petits bassins d'alimentation karstiques

La méthode PaPRIKa est généralement utilisée sur des karsts de taille relativement importante et dans des régions plus sèches (Méditerranée, grands causses). Pour la première fois, elle a été appliquée, ici, à des petits karsts de moyenne montagne. Nous allons donc détailler, critère par critère les particularités de la méthode appliquées aux karsts de moyenne montagne.

L'application du critère infiltration sur les bassins d'alimentation des sites d'étude montre des variations importantes (de faible à très fort) au niveau de la vulnérabilité. Ce critère s'adapte bien pour les petits karsts de montagne ne présentant pas de fortes pentes. Toutefois, nous pensons qu'il devrait tenir compte de la végétation jouant un rôle non négligeable sur l'infiltration. Bien que les pentes des bassins d'alimentation soient fortes ( $> 15\%$ ), le ruissellement n'est pas important dans la région, l'eau s'infiltrerait facilement. Le ruissellement se produit surtout sur des karsts sans végétation. Pour les karsts de moyennes montagnes, il serait donc intéressant de réadapter les limites de classe des pentes car celle qui définit les pentes entre 15-50% est inappropriée.

Les systèmes karstiques étudiés ont une taille réduite, ils sont donc composés par des faciès lithologiques relativement homogènes. Pour le cas du mont Peney, le critère roche n'est pas discriminant car le site est essentiellement composé de calcaires urgoniens. L'application de ce critère aux autres sites permet de mettre en évidence les zones de vulnérabilités au sein des bassins d'alimentation. Ces derniers sont composés généralement par des marnes et des calcaires, les vulnérabilités des systèmes karstiques varient donc entre très faible et forte.

Le critère sol, dans les régions pré-alpines et jurassiennes, présente peu de variation au niveau de la vulnérabilité, elle est définie entre faible et forte. Ce critère n'est pas toujours pertinent. Dans le cas du système karstique de La Combe, le sol se développe en fonction du faciès sur lequel il repose. Pour ce site, le critère montre une redondance avec le critère roche. Pour les autres sites, il n'est pas assez mis en valeur, car le sol des forêts des moyennes montagnes est un bon épurateur face aux polluants. La pondération de ce critère devrait être plus importante.

Les critères épikarst et zone non saturée peuvent être analysés ensemble. La présence de la végétation très abondante ne permet pas de déterminer si la roche calcaire sous-jacente est très fracturée. L'absence de piézomètres, la forte pente des bassins d'alimentation et les faciès lithologiques peu variés ne permettent pas d'estimer le niveau d'eau. Les indices de vulnérabilité oscillent, pour les deux critères, entre très faible et très fort. Toutefois, appliqués sur le site de Fontaine Noire, les deux critères ne sont pas pertinents car le site est composé d'un unique faciès géologique. Ils présentent une carte unie caractérisée par une vulnérabilité moyenne sur l'ensemble du mont Peney.

Composé des indices les plus protecteurs des critères sol, épikarst et zone non sa-

turé, le critère protection donne dans les cas de La Roche Saint Alban, de La Combe et de Bange - l'Eau Morte une carte nouvelles. Dans l'étude des sites de Fontaine Froide et de Fontaine Noire, la carte finale est identique à la carte du critère sol ou à la carte du critère épikarst. Nous proposons qu'à défaut de choisir l'indice le plus protecteur, le critère protection devrait être obtenu par pondération des critères sol, épikarst et zone non saturée, comme pour la réalisation de la carte finale. Pour les systèmes karstiques de moyenne montagne, le critère sol devrait avoir le coefficient de pondération le plus important ou faire l'objet d'un critère à part entière.

Les cartes réalisées à partir du critère karstification ne sont pas les plus pertinentes. Bien que les systèmes possèdent un degré de karstification élevé, elles ne présentent qu'une vulnérabilité faible ou moyenne basée sur les analyses des courbes de récession. Le critère propose d'ajouter les drains karstiques avec une très forte vulnérabilité. Toutefois, dans la région, les conduits karstiques sont bien connus et topographiés, mais ils représentent des drains fossiles, ils sont donc peu utiles pour les cartes de vulnérabilité.

En prenant l'exemple des résultats obtenus sur le bassin d'alimentation de Bange - l'Eau Morte, la méthode PaPRIKa ainsi appliquée ne semble pas prendre en compte les liens fonctionnels entre les zones. Certaines zones sans être visible en elle-même peuvent engendrer de la vulnérabilité en aval (en alimentant les pentes par exemple) et doivent donc faire l'objet de protection pour les activités humaines.

Malgré quelques points à redéfinir, la méthode PaPRIKa est un bon outil pour définir les zones en fonction du degré de vulnérabilité sur le bassin d'alimentation d'un système karstique de moyenne montagne. Elle peut permettre aux gestionnaires de l'eau de mieux évaluer la vulnérabilité d'un captage. Ainsi, si des travaux de sylviculture devaient avoir lieu sur le bassin d'alimentation d'un captage, la vulnérabilité face à un potentiel risque pourrait être plus facilement appréhendée. Nous aborderons dans le Chapitre 6, l'impact des activités sylvicoles sur les bassins d'alimentation de trois captages (La Roche Saint Alban, La Combe et Fontaine Noire) ayant fait une étude de la vulnérabilité par de la méthode PaPRIKa. Cette étude nous permettra d'évaluer les résultats de la méthode et d'en définir sa robustesse.



# Chapitre 6

## Vulnérabilité spécifique liée à la remobilisation anthropique ou naturelle des sols

### 1 Suivi des indicateurs pédologiques dans les eaux des systèmes karstiques étudiés

#### 1.1 Validation du suivi en continu de la matière organique fluorescente

Le suivi de la matière organique fluorescente s'est effectué essentiellement sur deux sites : La Roche Saint Alban et La Combe. Pendant quelques semaines, l'émergence de la source karstique de Fontaine Noire a, elle aussi, été équipée. Cependant les données obtenues sur cette courte période ne sont pas exploitables. Le suivi de la matière organique a été réalisé à l'aide de deux fluorimètres de terrain GGUN-FL30©. Ce type de fluorimètre est initialement prévu pour repérer et caractériser la présence de fluorescence lors de campagne de traçage. Néanmoins, les deux fluorimètres ont été, ici, adaptés pour détecter la matière organique naturelle fluorescente. Deux catégories de matière organique sont observées dans les eaux karstiques des moyennes montagnes pré-alpines : le type humique et le type protéique. Le fluorimètre a donc été équipé d'un couple d'excitation et d'émission 250/400-700 nm pour les types protéiques et 310/300-700 nm pour le type humique.

Afin de vérifier que les fluorimètres détectaient les deux types de matière organique fluorescente, nous avons couplé les valeurs de suivi de l'appareil de terrain avec des mesures de fluorescence réalisées en laboratoire avec un spectrofluorimètre [Tissier *et al.* 2011b]. Dans ce cas d'étude, nous pouvons comparer les deux types de mesure. Bien que la première méthode mesure la totalité de la matière organique (dissoute et en suspension) alors que la deuxième ne mesure que les matières dissoutes, les eaux karstiques des sources étudiées sont caractérisées par un carbone organique dissous expliquant plus de 97 % du carbone organique total. La figure 6.1 présente le résultat du croisement des données obtenues par le fluorimètre de terrain à 310 nm et par le spectrofluorimètre de laboratoire à 330 nm. Nous observons que

pour le système karstique de La Roche Saint Alban (représenté par des ronds sur la figure) la corrélation entre les deux mesures est de 0.91, tandis que pour les données de La Combe (défini par les croix sur la figure) la corrélation est de 0.82 (Figure 6.1). Cette moins bonne corrélation peut s'expliquer par le fait que le fluorimètre de terrain a été installé dans un bac de décantation. A l'intérieur du bac, l'eau ne circule pas assez vite et les matières en suspension mettent plus de temps à être évacuées.

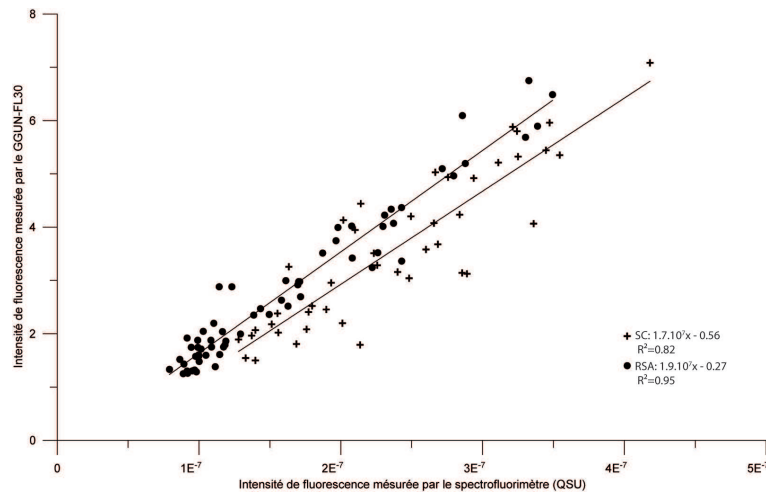


FIGURE 6.1 – Représentation de l'intensité du type humique suivi à 310 nm par le fluorimètre de terrain en fonction de la concentration du type humique mesurée en spectrofluorimétrie 3D (mol/L. QSU)

Le rendement quantique des photodiodes du fluorimètre de terrain a été superposé aux mesures du spectrofluorimètre (Figure 6.2). Nous pouvons observer (Figure 6.2 b) que le rendement quantique est assez bon pour la photodiode à 310 nm, ainsi il est possible de suivre en continu la matière organique du type humique (caractérisé par deux fluorophores Cf chapitre 3). Cependant, l'équipement du fluorimètre de terrain pour suivre les matières du type protéique n'a pas été possible. En effet, le rendement quantique de la photodiode est trop faible pour identifier le type protéique (Figure 6.2 a). La corrélation entre les mesures des photodiodes à 310 et 280 nm est de  $R^2=0.98$ .

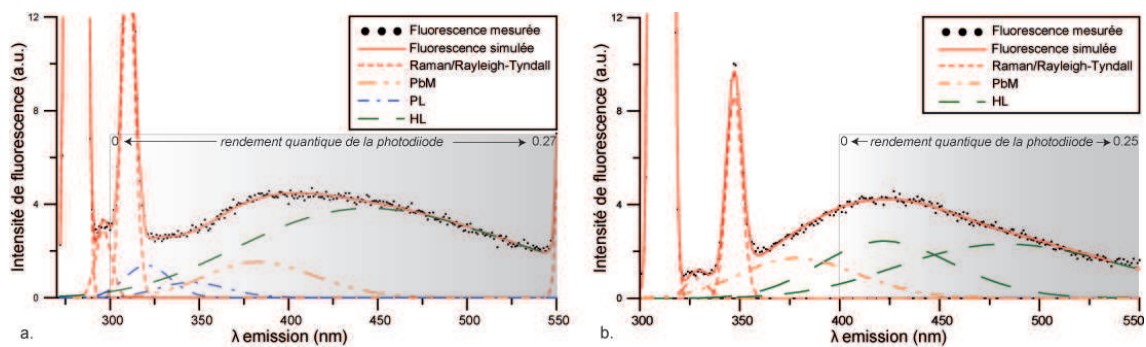


FIGURE 6.2 – Superposition du seuil de détection du fluorimètre de terrain avec les mesures du spectrofluorimètre (a.) à 280 nm et (b.) à 310 nm d'excitation Avec : PL=protéine like, HL=humique like, PbM=produit microbiologique

## 1.2 Etat des lieux des matières en suspension et dissoutes dans les eaux karstiques

### 1.2.1 Les espèces fluorescentes retrouvées dans les eaux karstiques

La recherche des matières organiques fluorescentes a été réalisée sur 4 sources karstiques de moyenne montagne. Tous les sites présentent les mêmes espèces fluorescentes avec des concentrations qui varient en fonction des sites. Les espèces fluorescentes sont présentées dans le tableau 6.1, elles sont caractérisées par les types tyrosines, tryptophanes, humiques et par des matières issues de la production microbiologique.

Tableau 6.1 – Présentation des espèces fluorescentes identifiées dans les eaux des sources karstiques de La Roche Saint Alban, La Combe, Fontaine Noire et Fontaine Froide.

Avec : *Ex*=excitation, *Em*=émission et *FWHM*=Full width at half maximum

site	Tyrosine			Tryptophane		
	Ex (nm)	Em (nm)	FWHM (nm)	Ex (nm)	Em (nm)	FWHM (nm)
La Roche Saint Alban	280	320 ± 1.9	29 ± 2.8	280	345 ± 1.5	45 ± 2.9
La Combe Saint Cassin	280	320 ± 0.96	28.8 ± 3.2	280	344 ± 0.87	45 ± 2.05
Fontaine Noire St Jean d'Arvey	280	320 ± 0.85	30 ± 2.03	280	345 ± 0.75	45.35 ± 0.44
Fontaine Froide Les Echelles	280	320 ± 0.71	29.25 ± 1.7	280	345 ± 2.68	45.25 ± 1.12

site	Prod. microb.			humique		
	Ex (nm)	Em (nm)	FWHM (nm)	Ex (nm)	Em (nm)	FWHM (nm)
La Roche Saint Alban	280	383 ± 1.6	72 ± 5	330	421 ± 3.6 482 ± 5.9	77 ± 5 130 ± 5
La Combe Saint Cassin	280	383 ± 0.66	71 ± 7.15	330	422 ± 2.4 483 ± 4.36	77.7 ± 2.6 132 ± 5.09
Fontaine Noire St Jean d'Arvey	280	383 ± 0.7	72.47 ± 0.38	330	421 ± 4.2 481 ± 5.9	73.84 ± 5.12 128 ± 4.3
Fontaine Froide Les Echelles	280	383 ± 1.34	72.04 ± 0.8	330	422 ± 2.34 483 ± 3.8	78.3 ± 4.7 131 ± 5.5

### 1.2.2 Relation des matières organiques fluorescentes - débit

#### a. La Roche Saint Alban

Nous avons vu, Chapitre 3, que le temps de réponse des systèmes karstiques était très rapide face aux précipitations (de quelques heures à quelques jours). Afin de comprendre le transfert de la matière organique, nous avons réalisé un corrélogramme croisé entre pluie/débit et pluie/matière humique. Le corrélogramme croisé annuel (Figure 6.3) montre un pic avec un décalage de 1 jour entre les venues en eaux et les venues en matières organiques du type humique avec des  $r(k)$  respectifs de 0.55 et de 0.5. Contrairement au débit, l'effet mémoire des venues des matières organiques

est faible avec 6 jours contre 12 jours. Afin d'affiner le résultat, nous avons analysé plus en détail trois périodes hydrogéologiques typiques (été, automne et hiver) avec un pas de temps de 6 heures.

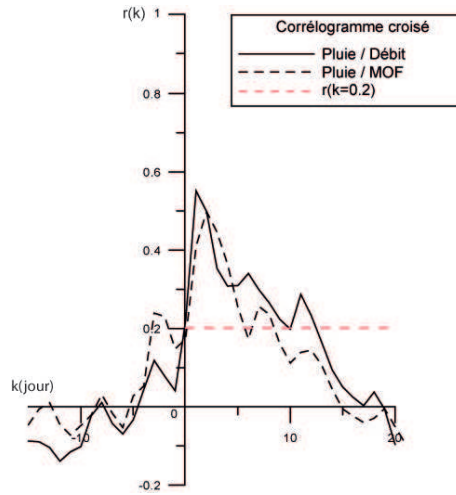


FIGURE 6.3 – Corrélogrammes croisés annuel pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés pour le système karstique de La Roche Saint Alban

L'analyse corrélatoire croisée a été réalisée sur une durée de 15 jours pendant les périodes de basses eaux d'été, de moyennes eaux d'hiver et de hautes eaux de printemps. Les trois graphiques (Figure 6.4) présentent les résultats les plus significatifs de l'ensemble des corrélogrammes croisés réalisés pour chaque période. Le pas de temps de 6 heures permet d'améliorer la résolution temporelle des délais. Le temps de réponse du maximum des corrélations change pour chaque période, et pour chaque relation pluie/débit et pluie/matière organique fluorescente. Un retard de 1.5 jours est observé entre les débits et la matière organique fluorescente pendant les périodes d'automne et d'été (Figure 6.4 a et b). Ce phénomène n'est pas retrouvé pour la période des hautes eaux où le débit et la matière organique fluorescente du type humique ont une relation avec les pluies très similaires, que ce soit au niveau qualité, du délai ainsi que de l'effet mémoire (Figure 6.4 c).

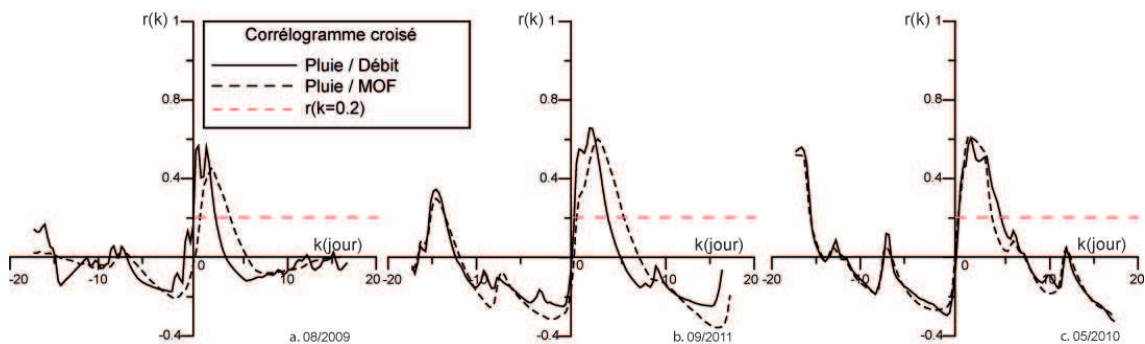


FIGURE 6.4 – Corrélogrammes croisés pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés en (a) basses eaux, (b) moyennes eaux et (c) hautes eaux pour le système karstique de La Roche Saint Alban

L'analyse corrélatoire croisée montre que les matières organiques fluorescentes de type humique arrivent avec le même délais (2.5 jours environ) alors que les venues en eau varient en fonction des saisons. La non stationnarité du transfert des matières organiques fluorescentes par rapport aux débits peut être expliquée soit par un changement de ratio entre l'infiltration et le ruissellement (effet de dilution) soit par un délai induit pour le transfert de la matière organique fluorescente provenant du sol. Les deux raisons peuvent se produire et s'associer pour expliquer ces changements. L'absence de délai entre la réponse du débit et de la matière organique fluorescente suite aux précipitations pourrait s'expliquer par une haute humidité du sol. Les pluies entraîneraient directement un transfert de la matière organique fluorescente du type humique.

Les mesures en continu de la matière de type humique à l'émergence du système karstique de La Roche Saint Alban mettent en évidence un transfert en relation avec les débits (Figure 6.5). De manière générale, l'intensité de fluorescence augmente avec le débit. Bien que les venues des matières organiques du type humique soient indépendantes des débits, nous observons une baisse du ratio matières organiques/débits des basses aux hautes eaux. La relation entre les deux paramètres permet d'identifier trois périodes qui correspondent à un état de saturation du système karstique. La première période, été/automne (en gris clair sur la figure 6.5), correspond aux basses eaux. Pendant cette période, le taux d'export de matières organiques est très important et atteint un plateau de valeur maximale de  $5 \cdot 10^{-7}$  mol.L<sup>-1</sup> équivalent Quinine Sulfate pour une moyenne de  $2.5 \cdot 10^{-7}$  mol.L<sup>-1</sup>. La seconde période, hiver/printemps (en noir sur la figure 6.5) caractérise les hautes eaux où le ratio entre matières organiques et débits est moins important. Deux raisons peuvent expliquer cette baisse de ratio, soit il y a peu de matières organiques transportées, soit il existe des phénomènes de dilution. Les valeurs sont de l'ordre de  $4.2 \cdot 10^{-7}$  mol.L<sup>-1</sup> pour une moyenne de  $2 \cdot 10^{-7}$  mol.L<sup>-1</sup>. Entre les deux périodes se situe une zone transitionnelle (en gris foncé sur la figure 6.5) exposant des valeurs de transport de matière organique intermédiaire.

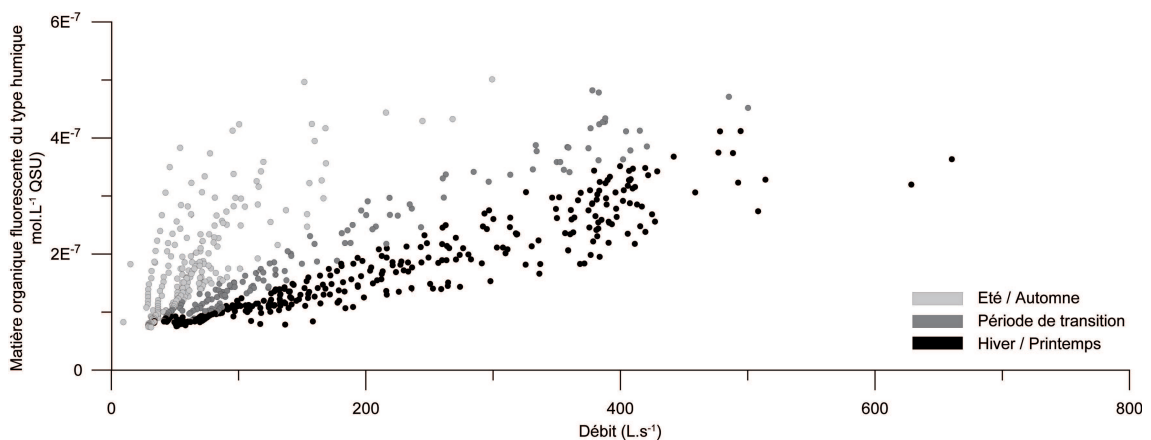


FIGURE 6.5 – Relation entre l'intensité de fluorescence des matières organiques fluorescentes du type humique en fonction du débit pour le système karstique de La Roche Saint Alban

### b. La Combe

Un suivi similaire à celui de La Roche Saint Alban a été réalisé à l'émergence du système karstique de La Combe. L'analyse du corrélogramme croisé annuel des pluies/débit et des pluies/matières organiques fluorescentes est présentée figure 6.6. Nous observons sur le graphique qu'au bout d'un jour, un pic de venues en eaux apparaît avec un  $r(k)$  d'environ 0.6. Le pic de transfert de la matière organique est atteint au bout de deux jours avec un  $r(k)$  de 0.4 qui semble stagner pendant 5 jours. Cette dernière observation peut avoir pour cause l'emplacement du fluorimètre de terrain dans le bac de décantation. L'effet mémoire des transferts est de 11 jours pour les matières organiques et de 8 jours pour les débits. Afin de vérifier si le plateau atteint par le transfert de la matière organique a pour origine un mauvais positionnement du fluorimètre de terrain, nous avons étudié plus en détail deux périodes hydrologiques avec un pas de temps de 6 heures.

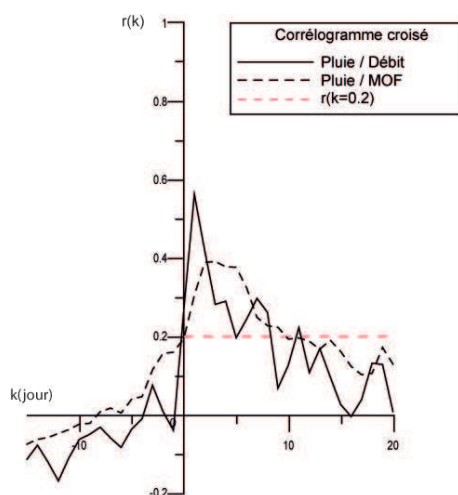


FIGURE 6.6 – Corrélogrammes croisés annuel pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés pour le système karstique de La Combe

L'analyse corrélatrice croisée a été réalisée sur une durée de 15 jours pendant l'hiver et le printemps. Les deux graphiques, représentés figure 6.7, sont les plus significatifs de toutes les analyses corrélatrices réalisées. Les corrélogrammes pluies/débits et pluies/matières organiques fluorescentes, réalisés sur une période de moyennes eaux au printemps (Figure 6.7 a), montrent un décalage de trois jours, les  $r(k)$  respectifs sont de 0.7 et 0.35. L'effet mémoire des deux transferts est assez proche avec un  $r(k=0.2)$  de 4.5 jours. Sur les analyses réalisées lors de la période des hautes eaux en hiver (Figure 6.7 b), les deux courbes se juxtaposent. Le  $r(k)$  est de 0.75 et l'effet mémoire est de 5 jours.

Comme observées à la source de La Roche Saint Alban, en fonction des périodes hydrologiques, les analyses des corrélogrammes croisés montrent des différences. Ils confirment que les venues de matières organiques à l'intérieur du karst ne sont pas en relation directe avec le débit. Ceci peut s'expliquer par un changement dans la nature de la matière organique au cours des saisons, et/ou des niveaux de dilution plus ou moins importants au cours des cycles hydrologiques. L'effet du bac de décantation du captage ne semble pas influencé les analyses pour les deux périodes étudiées.

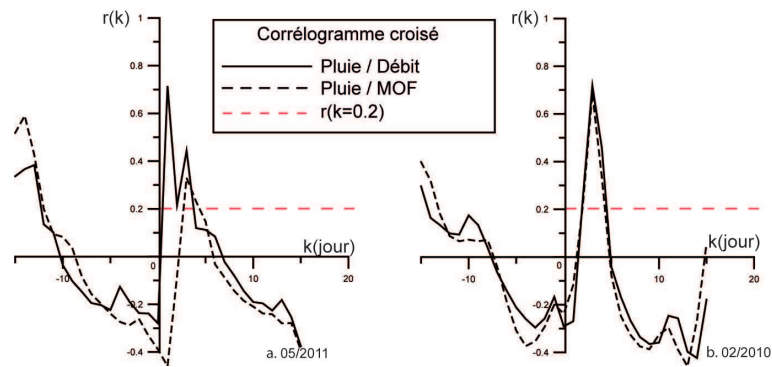


FIGURE 6.7 – Corrélogrammes croisés pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés en (a) Mai 2011 et (b) février 2010 pour le système karstique de La Combe

Les mesures en continu de la matière organique du type humique à l'émergence en relation avec le débit (Figure 6.8) ne permettent pas d'identifier des tendances au cours des cycles hydrologiques contrairement à la source de La Roche Saint Alban. Ceci est en partie causé par différents problèmes rencontrés avec le fluorimètre de terrain (batterie se déchargeant trop vite ou encore défaut d'interrupteur). De plus, au cours de l'étude, le fluorimètre de terrain a été déplacé sur le site de Fontaine Noire, entraînant une lacune importante de données (3 mois) sur la période de basses eaux. Le manque de données sur la période Aout-Novembre 2009, et les nombreuses lacunes sur la période 2010 - 2011, ne permettent pas de confirmer un comportement saisonnier sur le site d'étude.

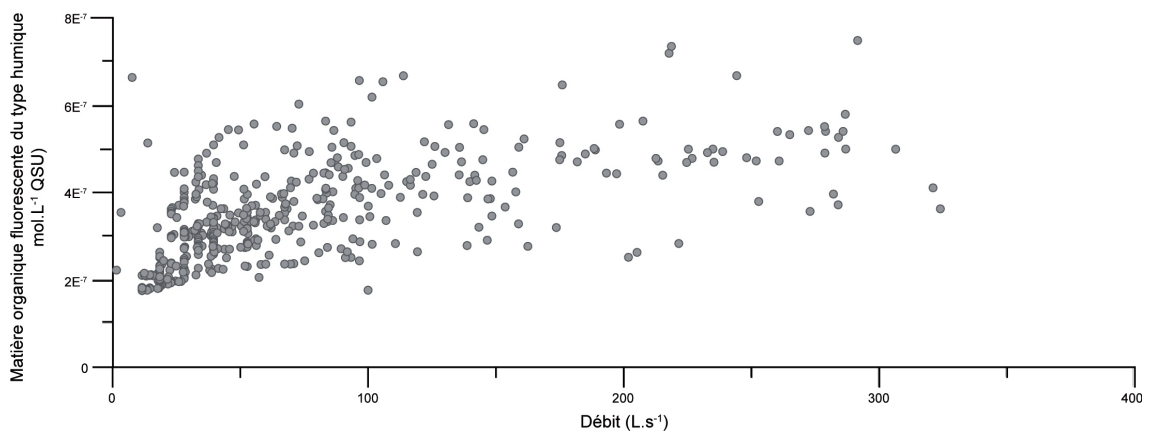


FIGURE 6.8 – Relation entre l'intensité de fluorescence des matières organiques fluorescentes du type humique en fonction du débit pour le système karstique de La Combe

En résumé, des tendances similaires sont visibles sur les deux systèmes karstiques. Le transfert de la matière organique fluorescente de type humique se fait de façon différente selon la période de l'année. En période de basses eaux, les transports sont plus importants (par rapport au débit) alors qu'en période de hautes eaux (sous couvert neigeux) le rapport matière organique/débit est plus faible. Il y a donc des phénomènes de dilution et/ou des changements de nature de la matière organique fluorescente.

### 1.2.3 Relation matières organiques fluorescentes - turbidité

#### a. La Roche Saint Alban

Nous avons cherché à identifier la composition de la turbidité, constituée de matières minérales et/ou organiques, à l'aide de courbes d'hystérésis représentant la turbidité en fonction de la matière organique (Figure 6.9). La première courbe d'hystérésis (en noir figure 6.9) correspond à la double crue d'Aout 2009 survenue en période de basses eaux. Nous observons une petite montée très rapide de la turbidité (de 1 à 2.5 NTU) tandis que les valeurs de matières organiques n'augmentent que très faiblement (de 1.1 à 1.2 u.a). La composition de la turbidité est donc essentiellement d'origine minérale issue vraisemblablement d'effets de piston ou de chasse au sein du système. Les valeurs de turbidité continuent à augmenter pour ensuite atteindre une valeur maximale (15 NTU) alors que les valeurs en matières organiques fluorescentes restent faibles (3.5 u.a.). Cette période montre une turbidité encore essentiellement composée par des matières minérales. Les eaux suivies à la source proviennent soit de l'endokarst soit de la surface en ne transportant que très peu de matières organiques. La turbidité montre ensuite un palier alors que l'intensité des matières organiques augmente de façon importante (de 2.5 à 8.5 u.a). La turbidité est donc caractérisée majoritairement par des matières organiques provenant de la surface. Sur cette période, nous observons une seconde augmentation très rapide de la turbidité (15 NTU) correspondant à la deuxième crue et caractérisée par un apport majoritairement minéral. Enfin, les teneurs en turbidité et en matière organique fluorescente décroissent de façon linéaire, il n'y a plus d'influence de la pluie, le karst se vide. L'analyse de la courbe d'hystérésis montre qu'au cours de cette double crue, il y a eu une reprise endokarstique puis une venue exokarstique des matières minérales et organiques.

La courbe d'hystérésis réalisée sur la période printanière 2010 (en rouge figure 6.9) montre un comportement différent dans la composition de la turbidité. Nous observons une petite montée de la turbidité sans variation de la matière organique. La turbidité est donc essentiellement composée de matière minérale provenant d'un effet de chasse ou de piston. La turbidité et la conductivité augmentent ensuite de façon linéaire (de 1 à 15 NTU pour la turbidité et de 2 à 8 u.a. pour la matière organique). La turbidité est donc soit composée d'autant de matière minérale que de matière organique, soit majoritairement de matières organiques. Toutefois, la baisse des valeurs de turbidité (de 15 à 2.7 NTU) alors que les valeurs de matière organique ne changent pas tend à dire que la turbidité était composée sur la montée en majorité par de la matière minérale. Cet apport cesse peu après au détriment de la matière organique. Enfin, la décroissance des valeurs de turbidité et de matière organique s'effectue toujours d'une façon linéaire, caractérisant la vidange du système karstique.

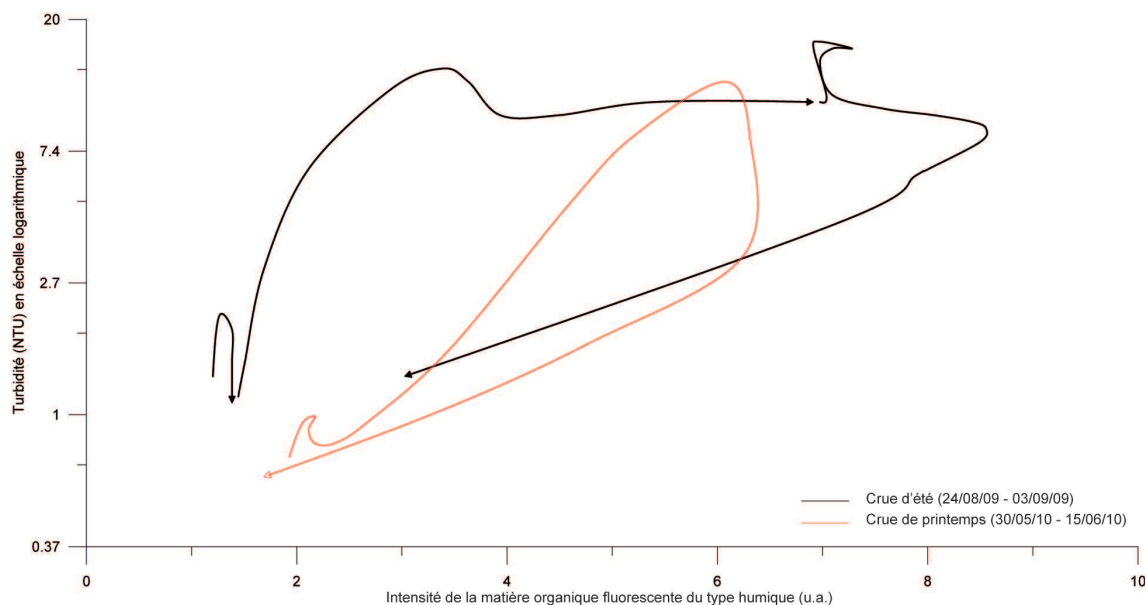


FIGURE 6.9 – Courbes d’hystérésis de la turbidité en fonction de l’intensité de fluorescence de le matière organique du type humique sur 2 périodes hydrologiques : en basses eaux (noir) et en moyennes eaux (rouge) sur le système karstique de La Roche Saint Alban

Pour poursuivre l’étude des courbes d’hystérésis de la turbidité en fonction de la matière organique fluorescente, nous avons caractérisé de façon qualitative, la composition des matières en suspension. Pour cela, nous avons prélevé des échantillons de 40 L d’eau à l’émergence du site de La Roche Saint Alban en période de crue. Après filtration à  $0.45 \mu\text{m}$ , nous avons en moyenne  $0.02 \text{ mg}$  de matière. Les eaux de la source de La Roche Saint Alban comportent donc peu de matières en suspension. Toutefois, les quantités ont été suffisantes pour être analysées à l’infrarouge (Figure 6.10). L’interprétation des spectres infrarouges montre que les sédiments recueillis peuvent être réunis en trois groupes.

Le premier groupe représente un type de sédiment riche en carbonate, matière organique et silice mais pauvre en argile. Ce sédiment caractérise la crue du 18/01/2010 qui présente une faible valeur de turbidité ( $0.98 \text{ NTU}$ ).

Le deuxième présente une composition plus pauvre en carbonate que la première catégorie mais assez riche en matière organique, en argile et en silice. Ce type de sédiment est plus important, il est retrouvé lors des crues du 03/11/2009 ( $3.35 \text{ NTU}$ ), du 04/11/2009 ( $4.27 \text{ NTU}$ ), du 08/12/2009 ( $1.27 \text{ NTU}$ ), du 05/02/2010 ( $0.72 \text{ NTU}$ ), du 01/04/2010 ( $0.9 \text{ NTU}$ ) et du 06/11/2010 ( $0.74 \text{ NTU}$ ).

Le dernier groupe est défini par des sédiments plutôt pauvres en carbonate et en matière organique mais riche en silice et en argile. Il est identifié sur trois crues, ayant eu lieu les 26/02/2010 ( $1.15 \text{ NTU}$ ), 03/05/2010 ( $2.13 \text{ NTU}$ ) et le 08/06/2011 ( $1.41 \text{ NTU}$ ).

CHAPITRE 6. VULNÉRABILITÉ SPÉCIFIQUE LIÉE À LA REMOBILISATION ANTHROPIQUE OU NATURELLE DES SOLS

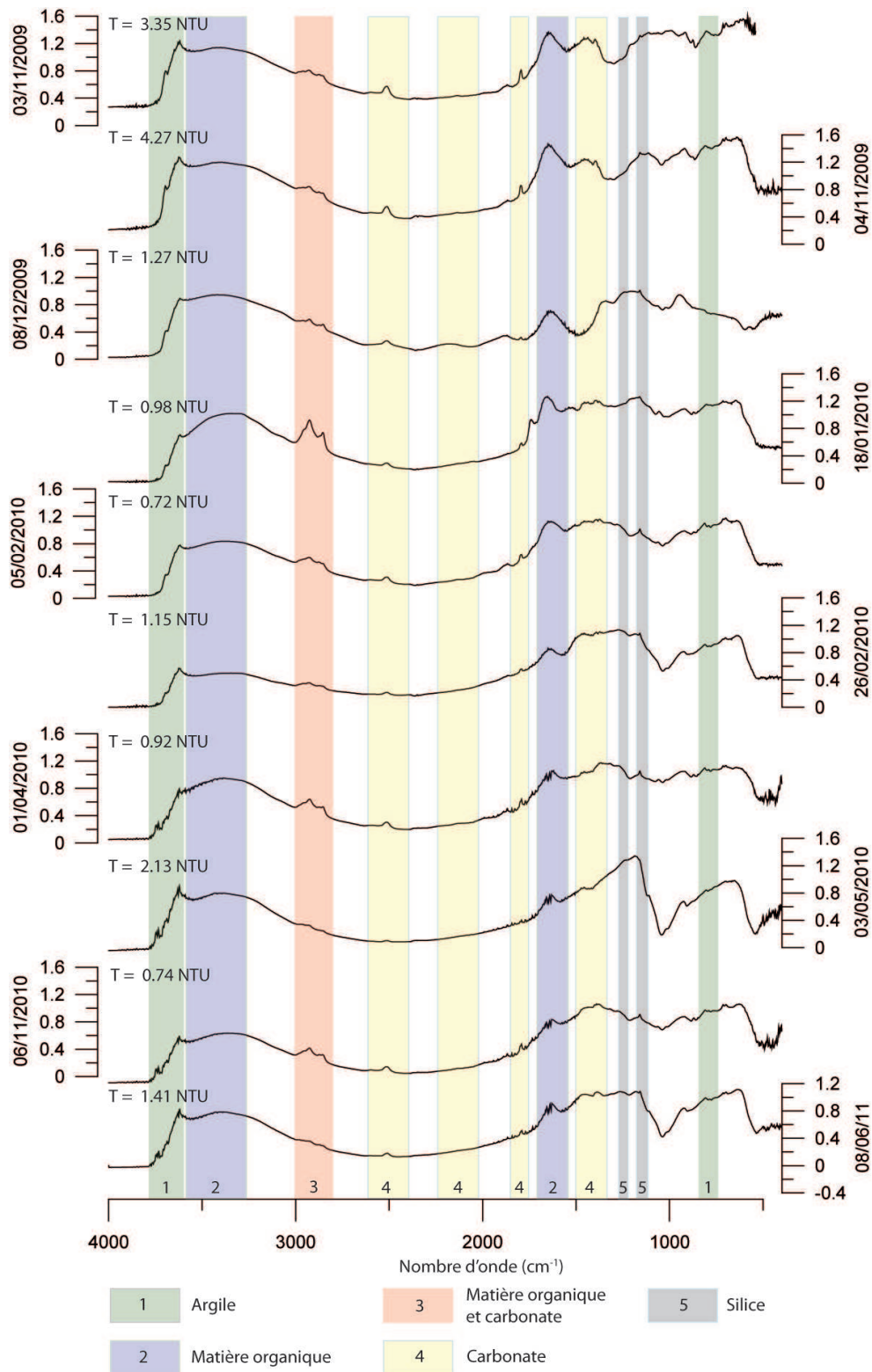


FIGURE 6.10 – Analyses infrarouges des sédiments de la source de La Roche Saint Alban

La composition des matières en suspension n'est donc pas homogène. Il n'existe pas de relation marquée entre la valeur de turbidité et sa composition. Toutefois, les deux premiers groupes de sédiments arborent le même spectre que ceux des horizons de surface obtenus lors de l'analyse des sols (Chapitre 4). Ils pourraient caractériser des apports de matière exokarstique. Le dernier groupe présente majoritairement de la silice et des argiles, et peu de matière organique et de carbonate. Il pourrait définir des apports de matière endokarstique.

Pour déterminer l'origine des matières en suspension et dissoutes lors d'une crue, nous avons couplé les mesures en continu de fluorescence à la turbidité [Tissier *et al.* 2011b]. La turbidité est un indicateur général, elle caractérise des venues des matières d'origine endo et exokarstiques tandis que la matière du type humique est un indicateur d'arrivée d'eau de surface ayant traversée le sol. Le rapport des deux paramètres turbidité sur matières organiques fluorescentes peut permettre de discriminer les origines des matières composant la turbidité. En prenant l'exemple de la crue double du mois d'août 2009 (Figure 6.11), nous observons deux pics de turbidité (Figure 6.11 a), le premier de 13 NTU arrive à la fin de la première crue et le second, plus important de 17 NTU est atteint en début de la seconde crue. La matière organique du type humique arrive vers la fin du premier pic de crue puis devient plus importante avec la seconde venue en eau. En comparant la turbidité avec les mesures d'intensité des matières du type humique, nous pouvons observer que le rapport Turbidité sur Fluorescence (T/F sur la figure 6.11 b) est plus important lors de la première venue en eau. Ceci nous permet de faire comme première hypothèse que les arrivées de matières sont d'origine endokarstique pour la première crue. Pour la seconde crue, bien que la turbidité mesurée soit plus importante le rapport T/F est beaucoup plus faible. Cette observation nous permet de formuler comme deuxième hypothèse que l'origine des matières transportées est exokarstique. Cette arrivée de matières organiques de type humique peut être, par ailleurs, atténuée par un effet de filtre interne lié à la turbidité de l'eau (diffusion de l'excitation et de l'émission atténuant le signal réel).

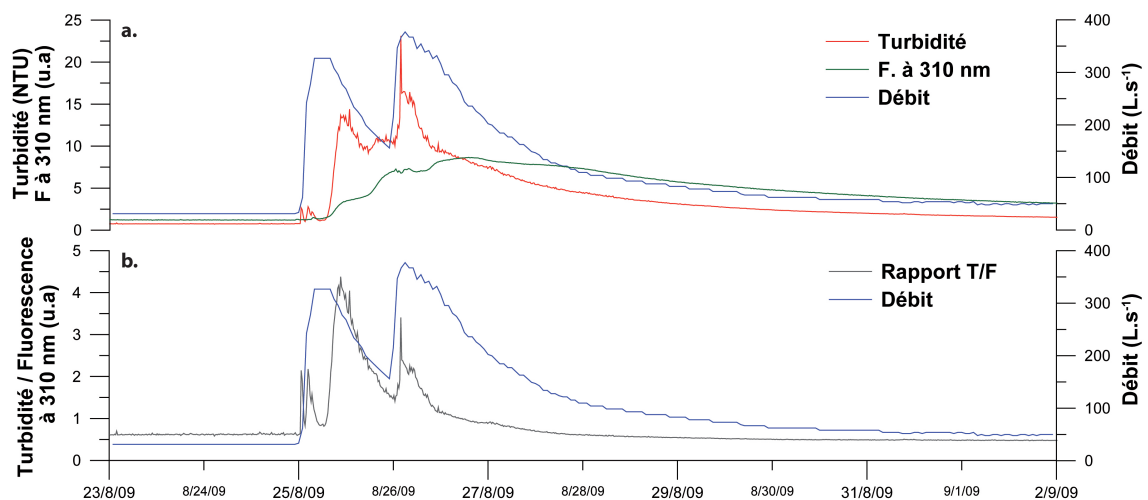


FIGURE 6.11 – Etude des arrivées des matières organiques du type humique et des matières en suspension (a) évolution du rapport turbidité sur fluorescence (T/F) (b) lors d'une crue d'été sur le système karstique de La Roche Saint Alban

### b. La Combe

Comme pour le site de La Roche Saint Alban, nous avons regardé la composition de la turbidité à partir d'une courbe d'hystérésis représentant la turbidité en fonction de la matière organique fluorescente (Figure 6.12). Pour cela, nous avons analysé une double crue s'étant produite sur le site de La Combe du 01/09 au 06/10/11. La première partie de la courbe montre une augmentation importante des valeurs de turbidité alors que la teneur en matière organique n'évolue que très légèrement. Ceci montre que la composition de la turbidité est principalement minérale d'origine endokarstique. Suite à cette montée de la turbidité, les matières fluorescentes augmentent alors que les valeurs de turbidité se stabilisent aux alentours des 7 NTU. La composition de la turbidité est donc plus organique provoquée par une influence des venues exokarstiques. La seconde crue se caractérise par une montée importante de la turbidité avec une légère augmentation des matières organiques. Une arrivée de matières minérales permet d'expliquer cette augmentation soudaine. Puis, les matières fluorescentes augmentent tandis que les teneurs de turbidité se stabilisent de nouveau, la turbidité est maintenant caractérisée par des matières organiques. Enfin, les valeurs de turbidité décroissent bien que les teneurs en matière organique restent à leur plus haut niveau (6.5 u.a.). Sur cette période, les venues de matière organique restent constantes alors que l'apport de matières minérales baissent. La courbe d'hystérésis s'achève avec une décroissance très rapide des matières organiques alors que la turbidité est déjà basse (2 NTU), le karst se vidange. La seconde crue est donc caractérisée par des venues exokarstiques plus importantes que pour la première avec une contribution non négligeable de l'endokarst.

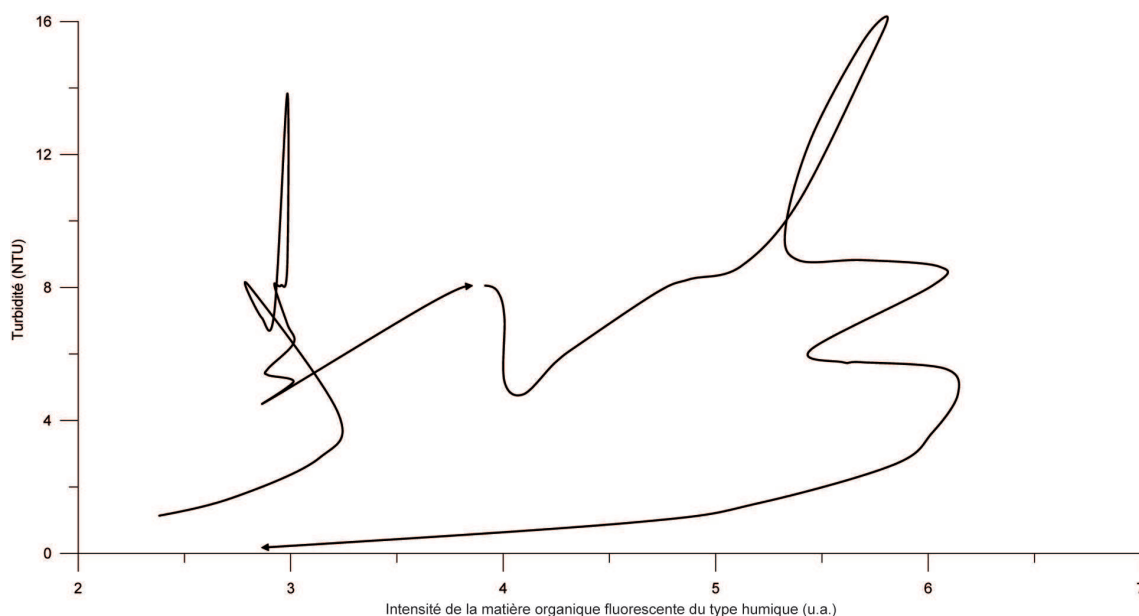


FIGURE 6.12 – Courbe d'hystérésis de la turbidité en fonction de l'intensité de fluorescence de la matière organique du type humique en automne 2011 sur le système karstique de La Combe

Les conditions de prélèvement des matières en suspension ont été identiques à celles du site de La Roche Saint Alban. Ainsi, sur le captage de La Combe les 40 L d'eau ont permis d'obtenir en moyenne 0.03 mg. Les quantités étant suffisantes, nous avons pu réaliser des analyses infrarouges sur les matières en suspensions (Figure 6.13). Comme pour l'étude du site de La Roche Saint Alban, les échantillons peuvent être regroupés en trois catégories.

La première représente un type de sédiment riche en carbonate, en matière organique et en silice, cependant le sédiment est pauvre en argile. Ce sédiment caractérise la crue du 18/01/2010, la valeur de turbidité est de 1.68 NTU.

Le deuxième type de sédiment est composé de peu de carbonate mais présente en majorité des matières organiques, des argiles et de la silice. C'est le type de sédiment le plus représenté. Il apparaît au cours des crues du 18/11/2009 (0.99 NTU), du 08/12/2009 (3.44 NTU), du 18/02/2010 (0.82 NTU) et du 03/05/2011 (0.23 NTU).

Le dernier groupe de sédiments ne comporte que peu de carbonates et de matières organiques mais il est riche en silice et en argile. Il est identifié les 26/02/2010 (3.31 NTU), 11/06/2010, et le 04/12/2011 (0.65 NTU).

L'analyse des sédiments de La Combe présente les mêmes résultats obtenus à La Roche Saint Alban. Il n'existe pas à première vue de relation entre les valeurs de la turbidité et sa composition. De plus, les deux premiers groupes de sédiments ont un signal identique à ceux des horizons de surface caractérisant vraisemblablement des apports de matière exokarstique. Le dernier groupe composé majoritairement de la silice et des argiles pourrait définir des apports de matière endokarstique.

De plus, les dates de présence des catégories de sédiments concordent avec celles de La Roche Saint Alban. Ce résultat vient conforter l'idée que la composition des sédiments seraient en accord avec des transferts saisonniers. Pour rappel, la première catégorie est présente le 18/01/2010. Le deuxième type de sédiment apparaît majoritairement sur la période Novembre - mi Février, période de hautes eaux. La dernière catégorie est un peu plus répartie dans le temps, mais elle semble définir des crues apparaissant après une période d'étiage, donc une période de basses eaux.

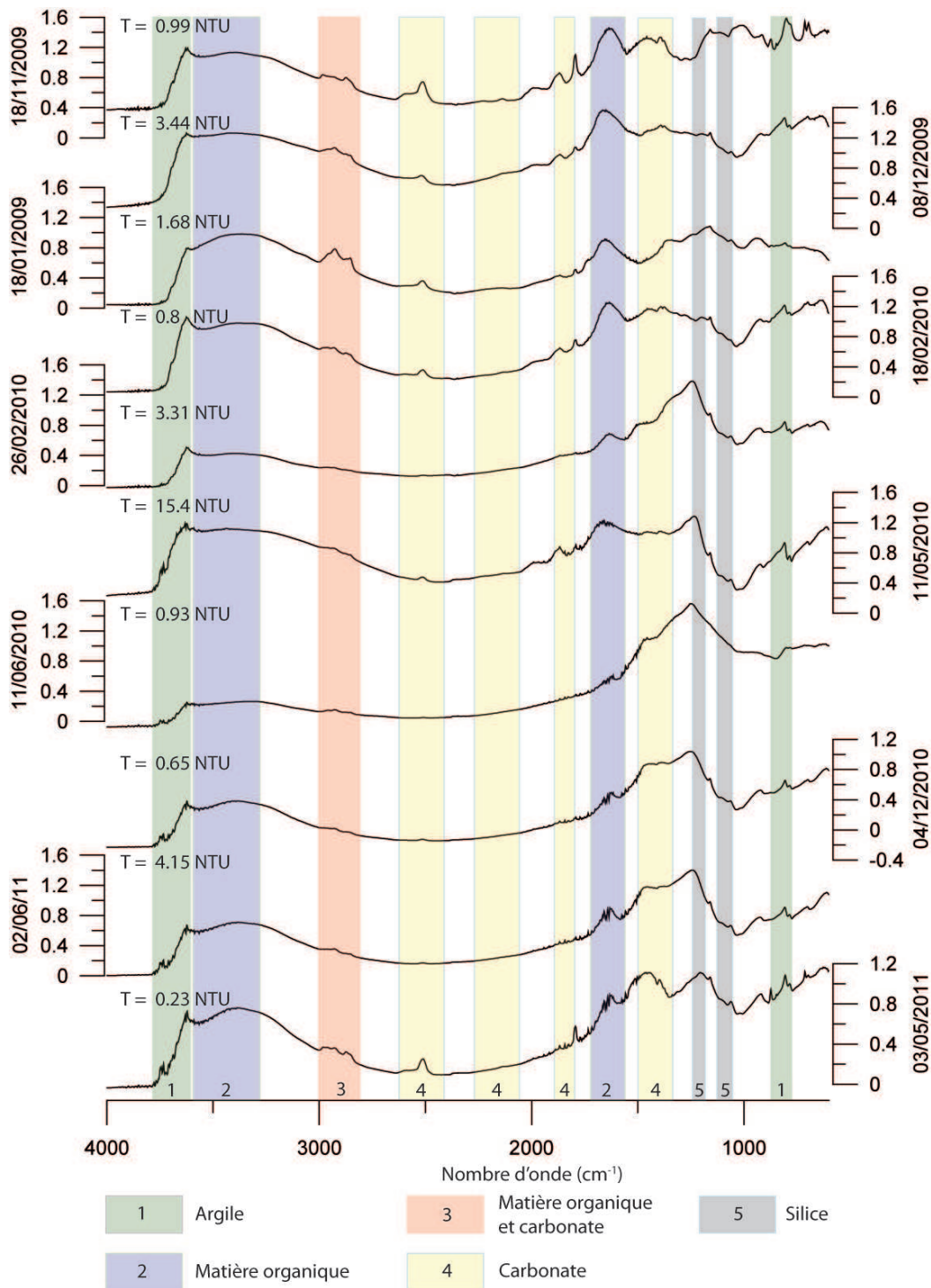


FIGURE 6.13 – Analyses infrarouges des sédiments de la source de La Combe

Le rapport turbidité sur fluorescence T/F a été également étudié sur le site de La Combe afin de vérifier si la méthode est applicable et reproductible sur un autre système karstique. Nous avons choisi deux crues très proches dans le temps et faisant suite à une période sèche durant les mois de Septembre-Octobre 2011. La figure 6.14.a montre que la turbidité arrive peu après le pic de crue et atteint les 13 NTU. Un deuxième pic de turbidité le précède avec une valeur plus faible de 7 NTU. Lors de la seconde crue, la turbidité se présente de façon synchrone avec le débit avec un pic de 16 NTU, donc plus important que le premier pic, puis il est suivi d'un second pic, plus petit, de 9 NTU. La matière organique du type humique montre une légère augmentation de 3 à 4 u.a. lors de la première crue, puis atteint les 6 u.a. lors de la seconde crue. Elle présente un petit pic synchrone au pic de crue et est suivie d'une légère augmentation lors de la récession. Le rapport T/F (Figure 6.14.b) montre que lors de la première crue, l'origine des matières est essentiellement endokarstique. Le second petit pic de la première venue en eau s'estompe, les matières ont donc toujours une origine endokarstique mais sont mélangées avec des venues exokarstiques. Pendant la seconde crue, il apparaît que le rapport T/F est plus faible que pour la première crue. Il y a donc eu un lessivage exokarstique bien qu'il reste du matériel mobilisable à l'intérieur du système karstique. Les origines des matières en suspension sont donc double, endo et exokarstique, avec une dominante exokarstique.

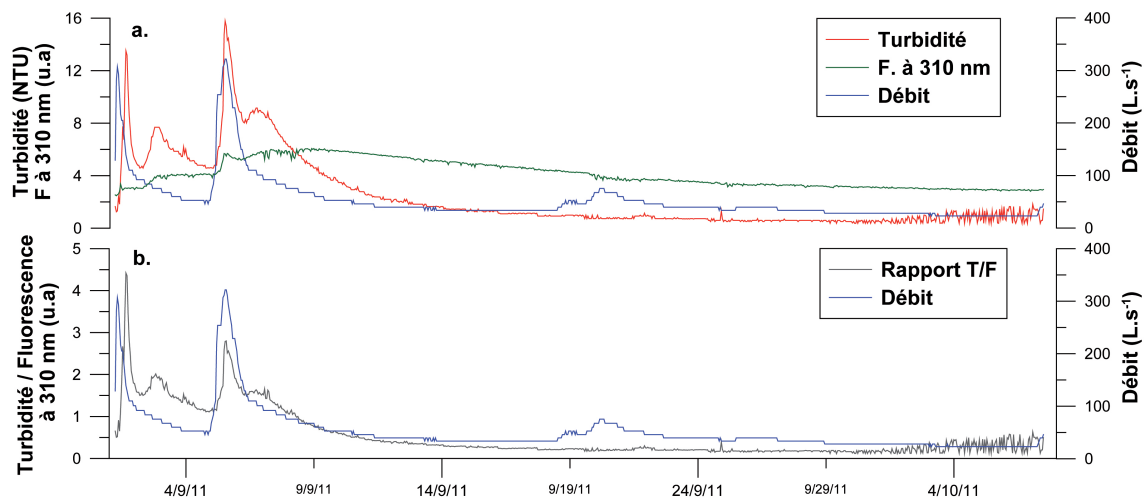


FIGURE 6.14 – Etude des arrivées de matières organiques du type humique et de MES (a) évolution du rapport turbidité sur fluorescence (b) lors d'une crue d'automne sur le système karstique de La Combe

#### 1.2.4 Relation matières organiques fluorescentes - carbone organique total

De nombreux travaux ont montré que la matière organique fluorescente était bien corrélée avec le carbone organique total dans les eaux de surface [Ferrari *et al.* 1996; Cumberland et Baker 2007; Spencer *et al.* 2007]. Le fluorimètre de terrain a été proposé comme un outil pour suivre en continu le COT [Savoy 2007; Pronk *et al.* 2007; Charlier *et al.* 2010]. La relation entre la matière organique fluorescente du type humique avec le COT obtenu par analyse manuelle a été étudiée (Figure 6.15) sur le site de La Roche Saint Alban. Bien qu'aucune relation n'est observable

sur toute la période, trois relations significatives entre les deux paramètres ont été identifiées en fonction de chaque période hydrologique. Pour les périodes de hautes eaux ( $R^2=0.92$ ,  $N=25$ ) et de moyennes eaux ( $R^2=0.95$ ,  $N=26$ ), la matière organique fluorescente de type humique est un bon indicateur du COT. Les pentes des régressions linéaires sont respectivement égales à  $6.7 \cdot 10^6$  et  $1.4 \cdot 10^7$ . De plus, les régressions linéaires sont très proche de l'origine, ce qui signifie que la quasi totalité du COT est fluorescente. Pendant la période de basses eaux, la corrélation entre les deux paramètres est moins significative ( $R^2=0.52$ ,  $N=21$ ). La pente de la régression linéaire ( $1.1 \cdot 10^7$ ) est semblable à celle obtenue en période de moyennes eaux. L'intersection avec l'axe des ordonnées ne passe pas par l'origine mais la régression linéaire coupe l'axe à  $1.76 \text{ mg.L}^{-1}$  de COT. Ceci peut être expliqué par le fait qu'une partie du COT n'est pas fluorescente. Les différences de pente pourraient être dues à un changement dans la qualité de la matière organique fluorescente. La plus faible pente durant les hautes eaux montre une meilleure efficacité de la fluorescence par rapport aux périodes de basses et moyennes eaux. Ceci pourrait être du aussi bien par une modification du temps de transfert induit par un changement biotique ou abiotique des microorganismes, ou par une variation de la source de matières organiques provenant d'horizon plus profond (plus aromatique). Quelque soit l'origine du changement, ces relations spécifiques peuvent être utilisées pour obtenir un bon suivi du COT par la mesure de la fluorescence de la matière organique.

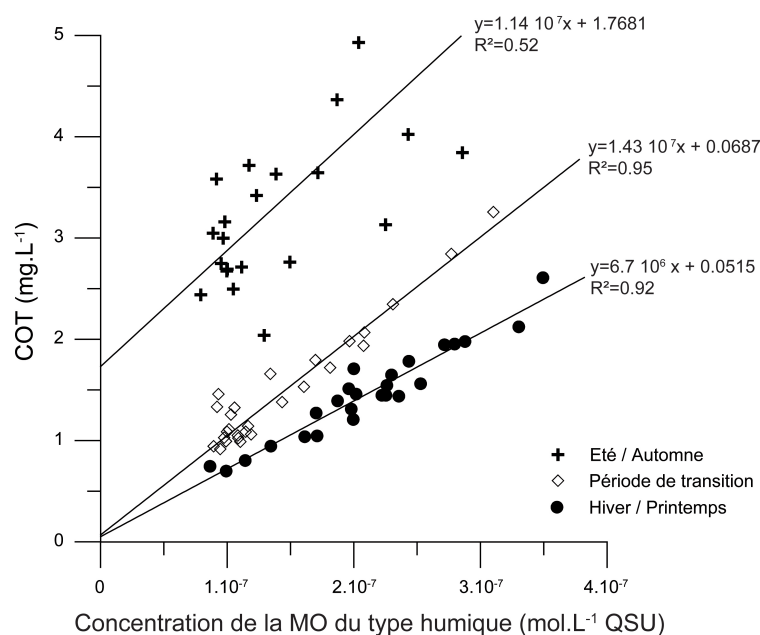


FIGURE 6.15 – Etude des relations entre le carbone organique total (COT) et la concentration de matières organiques fluorescentes du type humique pour le système karstique de La Roche Saint Alban

La relation COT en fonction de la matière organique fluorescente du type humique a été étudiée pour le site de La Combe (Figure 6.16) afin de corroborer les résultats observés sur le système de La Roche Saint Alban. Nous pouvons observer que la majorité des points ( $N=40$ ) s'alignent sur une droite d'équation  $y = 6.69 \cdot 10^6x + 0.19$  possédant un coefficient de corrélation  $R^2=0.91$ . Toutefois, 14 points (les croix sur la figure 6.16) ne montrent pas de relation particulière entre eux. Ces points

dispersés sont aussi observés sur les sites de Fontaine Noire et de Fontaine Froide, et principalement pendant les périodes de basses eaux. Au cours de ces périodes, la matière organique fluorescente du type humique présente vraisemblablement un changement dans sa nature. De ce fait, toutes les matières organiques du type humique ne fluorescent pas. Ces résultats montrent, comme observés sur le site de La Roche Saint Alban, que la relation COT/matières organiques fluorescentes varie au cours des cycles hydrologiques et qu'il paraît peu envisageable de suivre le COT tout au long de l'année hydrologique avec la même relation. Pour déterminer les autres relations potentielles entre le COT et la matière organique fluorescente du type humique, un suivi plus complet doit être réalisé sur le site de La Combe.

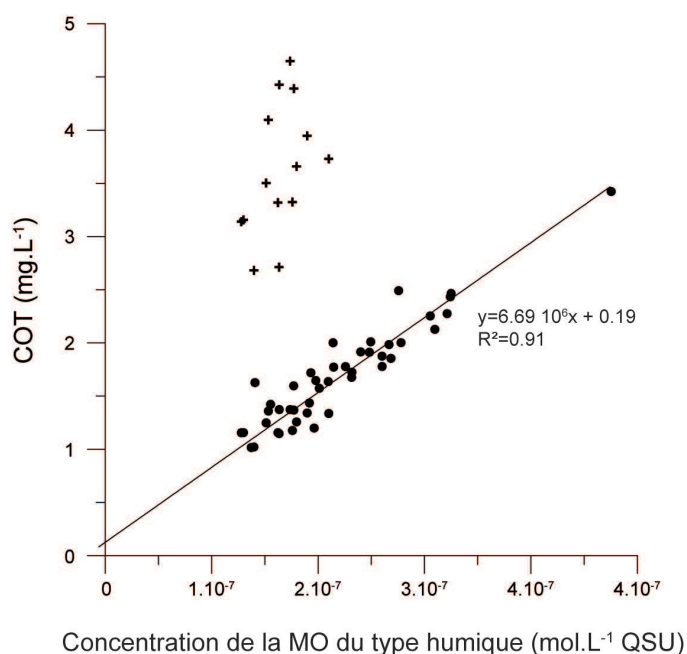


FIGURE 6.16 – Etude des relations entre le carbone organique total (COT) et la concentration de matière organique fluorescente du type humique pour le système karstique de La Combe

### Reconstitution du flux de COT

La relation entre la matière organique fluorescente et le COT a été utilisée pour estimer le flux de carbone organique en fonction des trois périodes hydrologiques. Le résultat est présenté figure 6.17. Le flux moyen annuel est d'environ 15 kg/ha/y, ce résultat est en accord avec les valeurs déterminées dans les eaux de surface forestières [Clair and Ehrman 1996, Sarkkola *et al.* 2009]. Quelque soit la période, les pluies sont suivies par des venues en eaux chargées en carbone organique. Le flux de carbone maximum est identifié pendant la période où le karst possède un niveau d'eau moyen, cette période correspond à la recharge du sol en matière organique fraîche suite liée à la sénescence des feuilles.

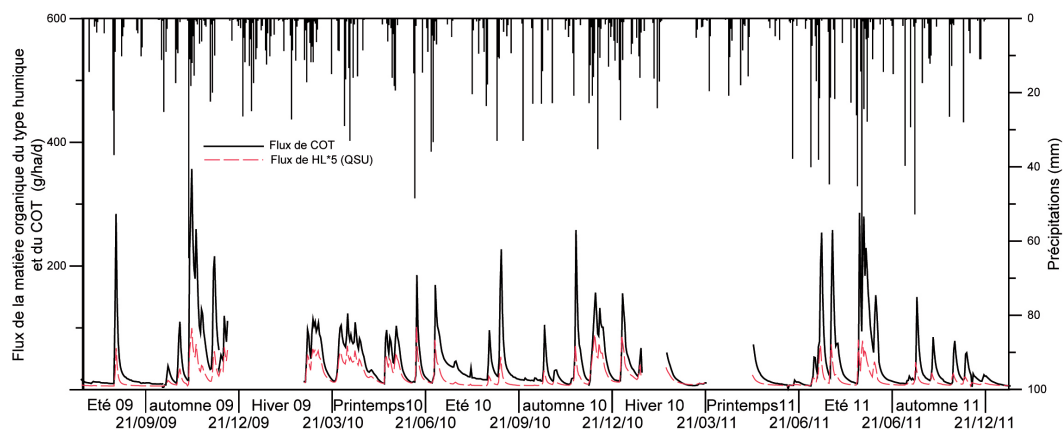


FIGURE 6.17 – Reconstitution de la chronique du flux de carbone organique total en fonction du cycle hydrologique sur le système karstique de La Roche Saint Alban

### 1.2.5 Suivi des matières organiques au cours d'une crue

Nous avons suivi sur une même période deux crues à un pas de temps très réduit afin d'observer le comportement des venues en matières organiques et la présence des bactéries fécales et revivifiables. Pour cela, nous avons installé un préleveur automatique à l'exutoire des sources de La Roche Saint Alban et de La Combe pour échantillonner les eaux à un pas de temps de 6 heures. Les résultats sont présentés figure 6.18.

L'analyse de la crue de la source karstique de La Roche Saint Alban (Figure 6.18a.) montre que la turbidité présente deux pics de 1.1 NTU. Le premier en tout début de crue, ayant probablement une origine endokarstique, et le deuxième apparaissant avec le début de la décrue pouvant marquer une origine exokarstique. Le nombre de bactéries est très important lors du second pic de turbidité (45 E. Coli et 20 bactéries revivifiables et Entérocoques) et, pour l'ensemble des espèces le nombre décroît avec la récession (30 E. Coli et 10 bactéries revivifiables et Entérocoques). La proportion des bactéries présentes dans les eaux est en accord avec les teneurs de turbidité et des venues en matières organiques fluorescentes du type humique. Le COT et les matières organiques du type humique montrent un comportement similaire avec une augmentation assez synchrone pendant le second pic de turbidité. Les valeurs d'azote, ne présentent pas, ici, de variation significative. Enfin les matières organiques du type protéique ont un pic important lors du second pic de turbidité, puis diminuent aussitôt pour réaugmenter légèrement après. Il est difficile pour cette événement pluvieux de comprendre le comportement et l'origine des matières organiques du type protéique.

La crue de La Combe (Figure 6.18b.) est un peu plus difficile à analyser que celle de La Roche Saint Alban. Certains points ont été supprimés suite à un mauvais rinçage des flacons du préleveur automatique rendant les échantillons inexploitable. La crue se présente en deux venues. La première très légère est marquée par un palier à  $40 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , alors que la seconde venue en eau atteint un débit maximum de  $140 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ . La première venue n'est pas turbide, les valeurs restent proches des valeurs de base, cependant la seconde venue en eau apporte des matières en suspension (3 NTU)

mais présentent un décalage avec le pic de crue. Le nombre de bactérie suit bien l'allure de la courbe de turbidité et des matières organiques fluorescentes du type humique. Le COT et les matières organiques du type humique augmentent aussi avec l'arrivée du second pic de turbidité. Les valeurs de COT sont maximales au début du pic de crue ( $7.5 \text{ mg.L}^{-1}$ ) puis diminuent le reste de la crue. Les matières organiques du type humique présentent une bonne relation avec le débit. Toutefois lors de la récession, le suivi est marqué par une hausse des valeurs pouvant être imputée à la localisation du fluorimètre de terrain dans le bac de décantation. Les valeurs d'azote total ne varient pas de manière significative. Les matières organiques du type protéique ont une valeur importante avant le début de crue et chutent avec l'arrivée des premières eaux. Pendant la seconde venue, les valeurs remontent avant l'arrivée du second pic de turbidité puis diminuent avec la décrue pour encore une fois réaugmenter à la toute fin de la récession. Il semblerait que les matières organiques du type protéique seraient plus importantes en récession ou en période de basses eaux. Elles marqueraient un écoulement lent ou non dilué.

NB : nous ne présentons pas les matières organiques issues d'une production microbiologique (Figure 6.18) car l'analyse de ces matières a été impossible. Tous les échantillons de l'étude ont été analysés par un spectrofluorimètre différent, il possédait des fentes optiques plus grande que le Cary Eclipse Varian habituellement utilisé (10 nm au lieu de 5 nm). Les matières issues d'une production microbiologique n'ont donc pas pu être identifiées.

## CHAPITRE 6. VULNÉRABILITÉ SPÉCIFIQUE LIÉE À LA REMOBILISATION ANTHROPIQUE OU NATURELLE DES SOLS

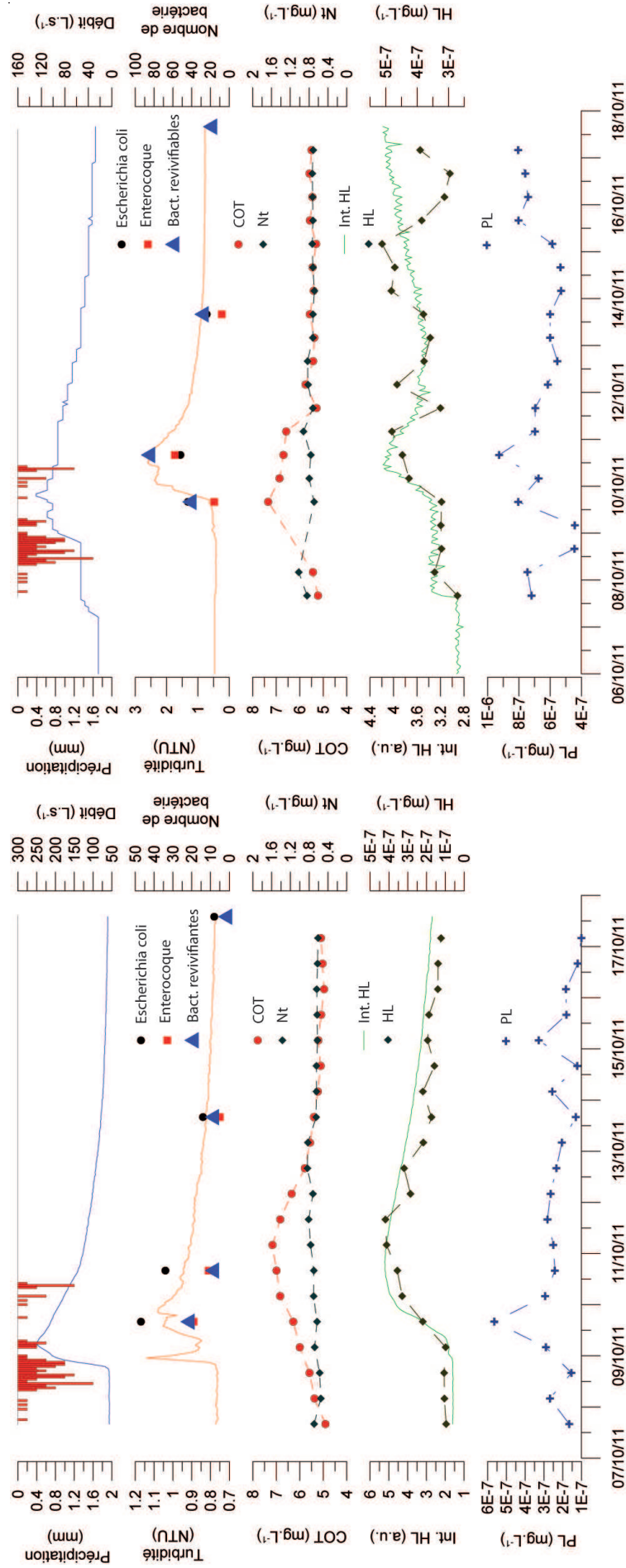


FIGURE 6.18 – Suivi de la turbidité, du nombre de bactéries, du COT, de Nt, et des matières organiques fluorescentes au cours d'une crue d'Octobre 2011 sur les sites de (a) La Roche Saint Alban et de (b) La Combe  
Avec :  $PL$ =protéine like,  $HL$ =humique like,  $Int. HL$ =intensité des humiques mesuré par le fluorimètre de terrain,  $COT$ =Carbone Organique Total,  $Nt$ =Azote totale