

# Processus hydrologiques dans l'aquifère crayeux karstifié de Haute Normandie, conséquences en matière de vulnérabilité des ressources en eau

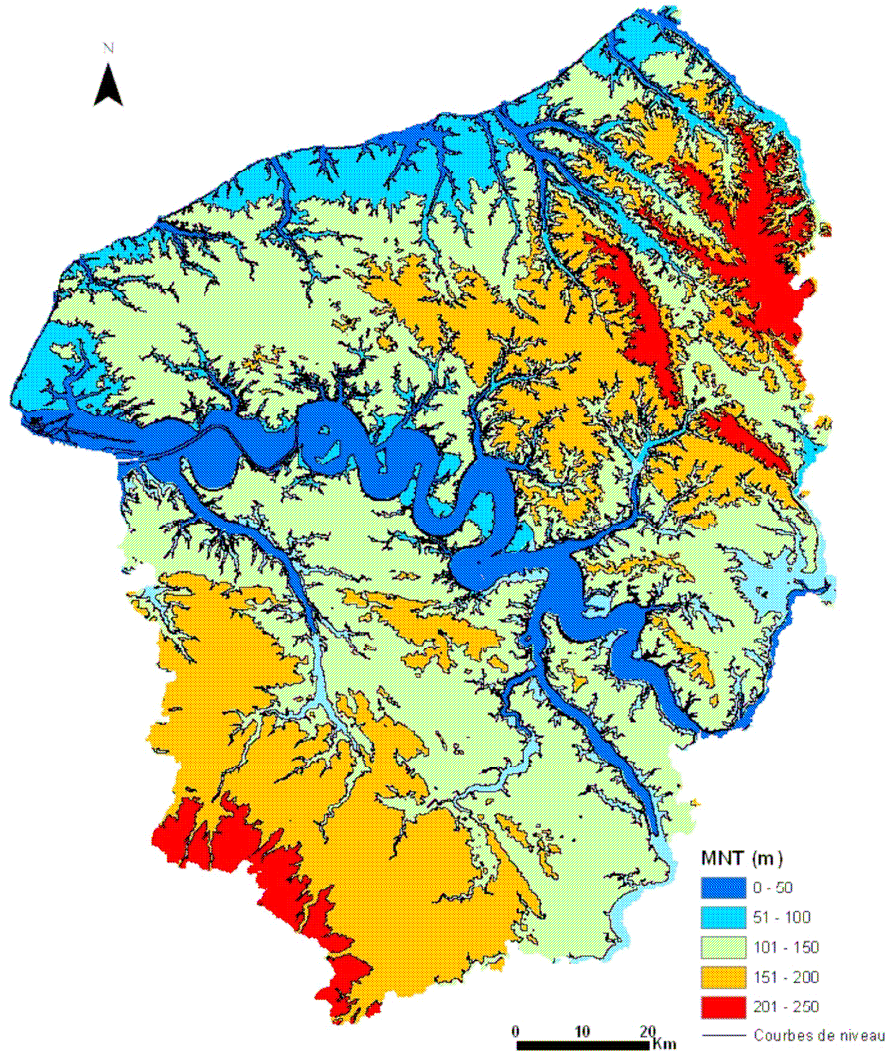
Jean-Paul Dupont,  
UMR CNRS 6143 M3C,  
Conférence organisée par l'AREAS



Jean-Paul Dupont, 10/09/09

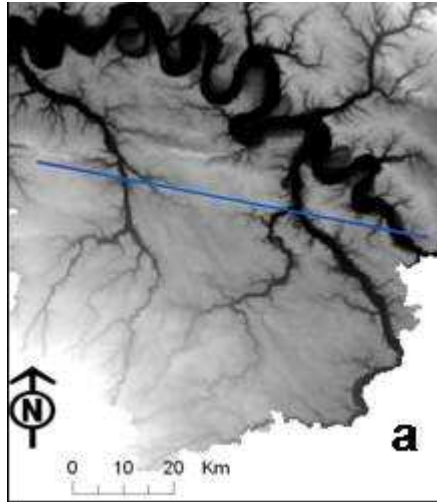


# Le paysage karstique de Haute Normandie

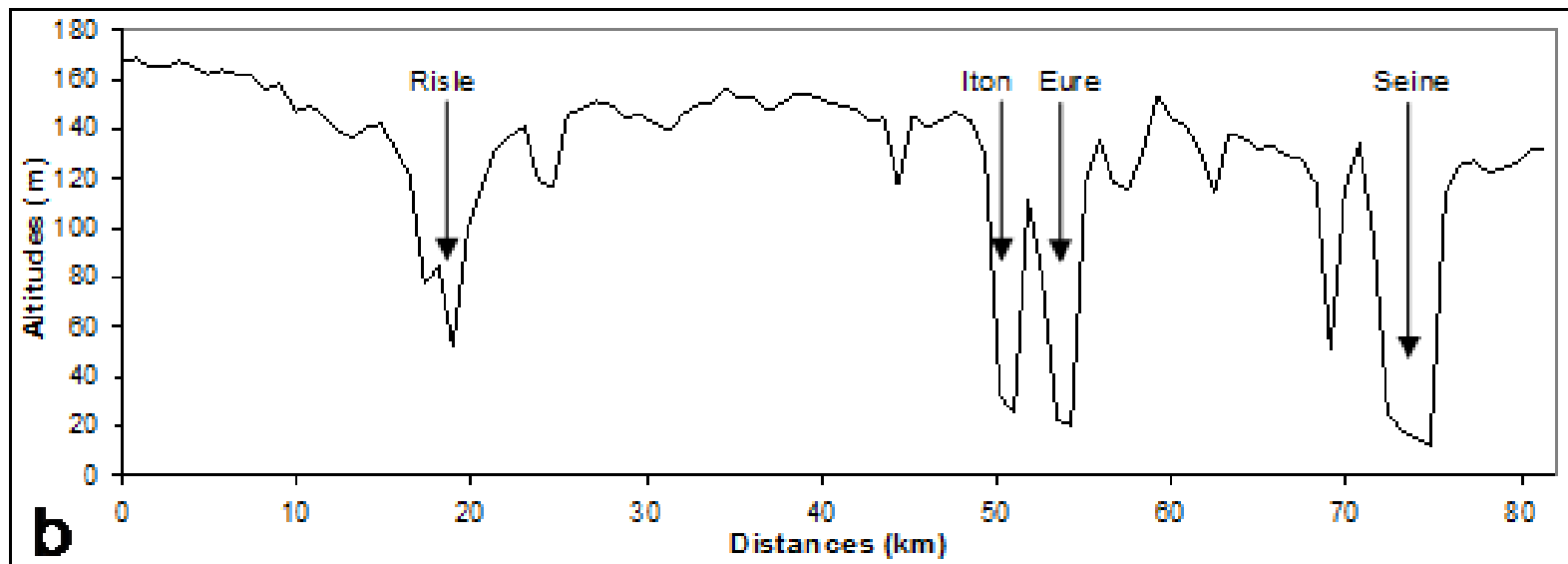


- La topographie régionale est caractérisée par de vastes plateaux d'altitudes modérées (< 300 m) profondément incisés par des vallées étroites.

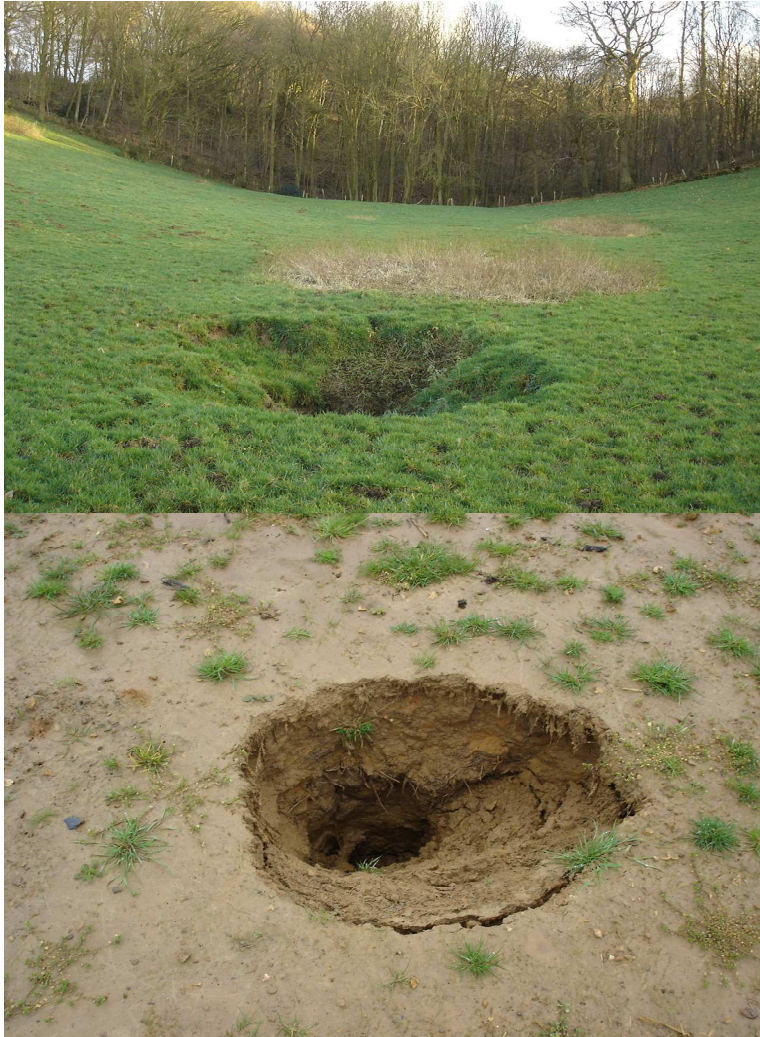
# Le paysage karstique de Haute Normandie



- Dans ce contexte, le profil topographique transversal aux vallées illustre ce contraste morphologique de l'incision profonde des vallées dans le paysage plus monotone des plateaux ou « pays ».
- Le modelé régional n'est donc pas le résultat du ruissellement et de l'érosion



# Le paysage karstique de Haute Normandie



- Dans la morphologie monotone des plateaux, les ruissellements sont, le plus souvent, circonscrits à des petits bassins versants ou impluviums de plateau qui sont drainés par des points d'engouffrement ou dolines (régionalement, appelés bétoires).

# Le paysage karstique de Haute Normandie



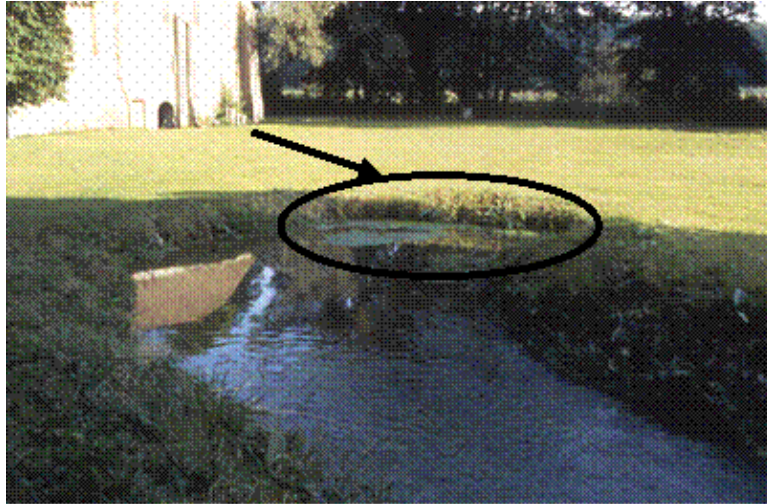
- Ces bétoires sont connectées avec les conduits karstiques de la craie et constituent les chemins préférentiels d'introduction des eaux infiltrées et de ruissellement vers l'aquifère de la craie sous-jacent.

# Le paysage karstique de Haute Normandie



- Les cavités karstiques peuvent être subdivisées en deux principales familles :
- l'une qui est à l'origine de conduits relativement importants, quasi verticaux, sous les plateaux qui correspondent au karst d'introduction (en relation avec les dolines ou bétoires),
- l'autre, qui fournit des conduits de taille moins importante avec des sections souvent ovales et des développements longitudinaux parfois importants, qui correspond, principalement au karst de restitution (aboutissant aux sources observées dans les vallées).

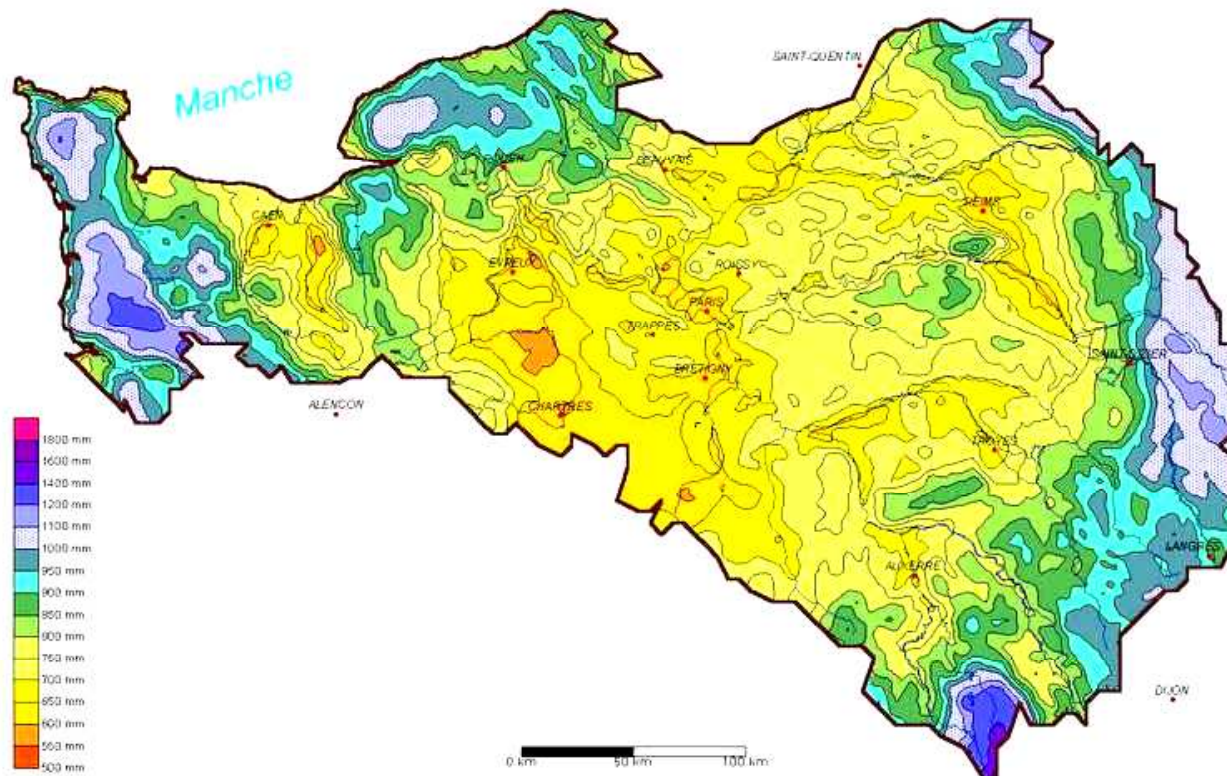
# Le paysage karstique de Haute Normandie



- Les relations entre les rivières et les eaux souterraines sont complexes. Les rivières sont alimentées principalement par les sources qui sont les exutoires karstiques des eaux souterraines de la craie.
- Inversement, dans certaines zones, les rivières peuvent contribuer à l'alimentation des nappes d'eaux souterraines. Les pertes de l'Iton, en période estivale, constituent la meilleure illustration avant que le fleuve Iton ne réapparaisse quelques kilomètres en aval .

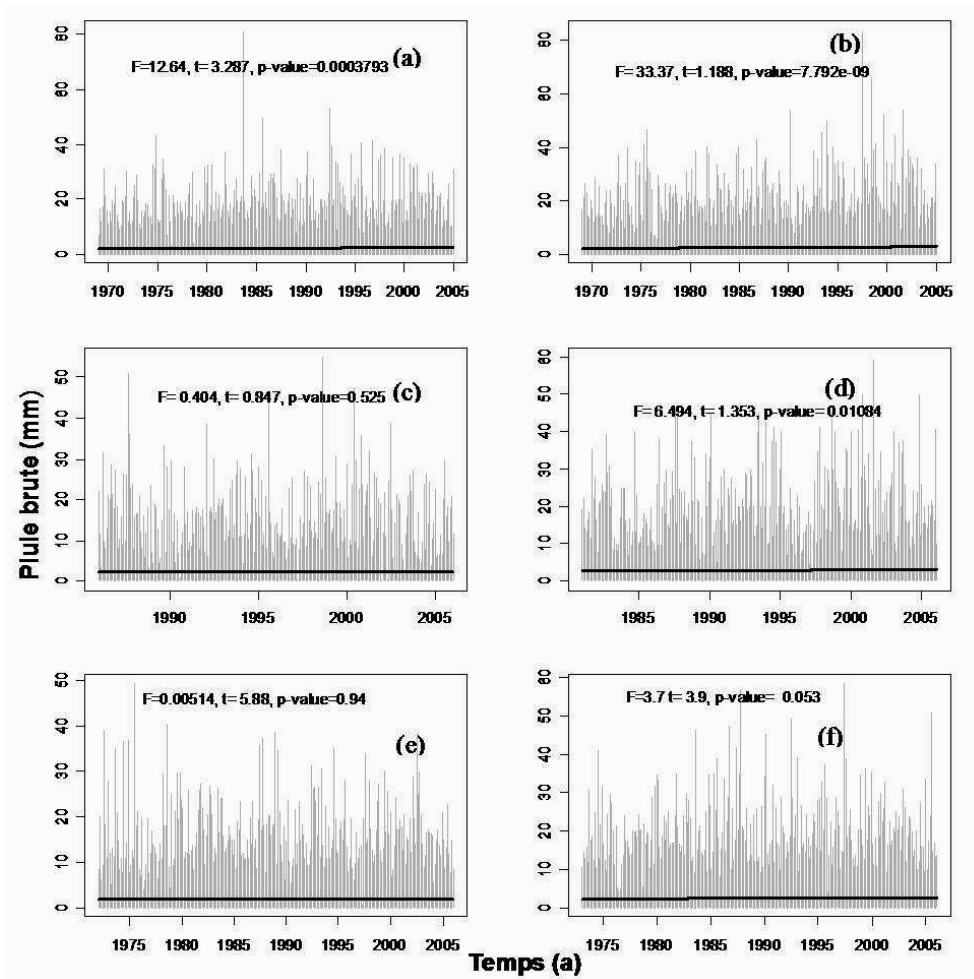
# Le contexte climatique

- Le bassin Seine Normandie est caractérisé par un climat de type tempéré océanique avec une température moyenne annuelle proche de 13°C. La carte des hauteurs de précipitations annuelles calculées sur trente ans (Figure 16) indique une pluviométrie régionale annuelle comprise entre 550 et 1100 mm.





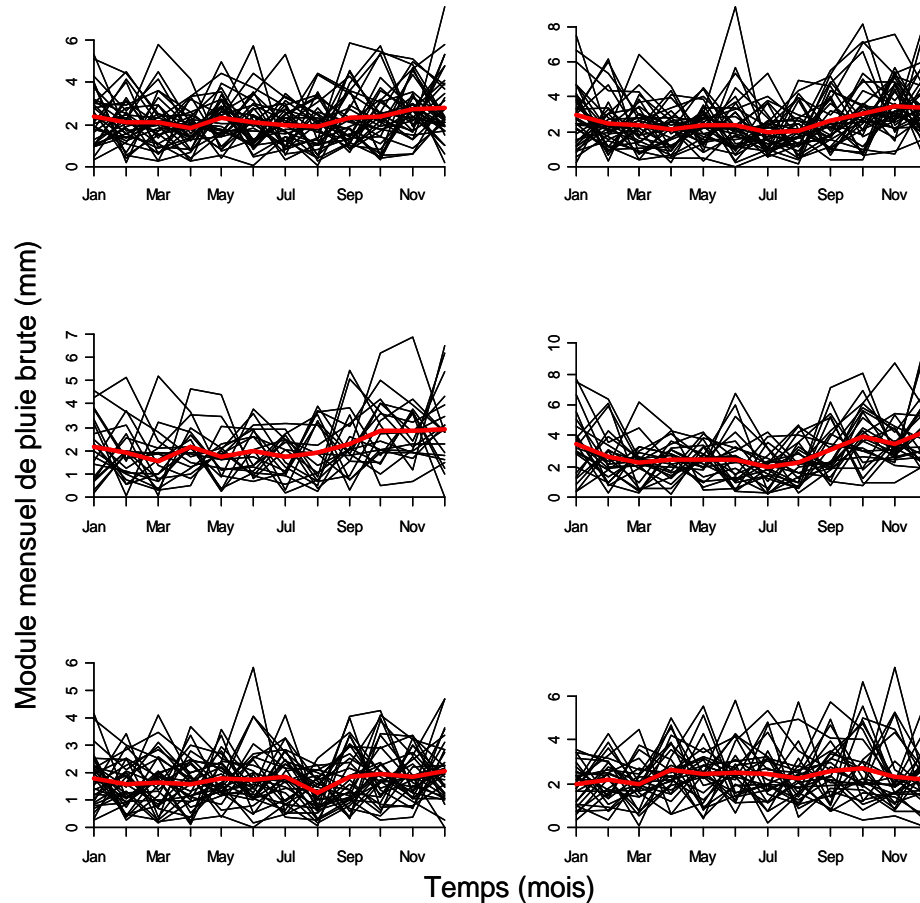
# Le contexte climatique



- Les signaux climatiques de pluie brute sont composés d'une part relativement aléatoire événementielle, d'un cycle saisonnier plus ou moins marqué et d'une fluctuation pluriannuelle

Chroniques de pluie brute ainsi que les tendances et les significativités statistiques (F ; T et p-value) : a) Rouen ; b) Lyons ; c) Dieppe ; d) Bolbec ; e) Evreux; f) Goupillières

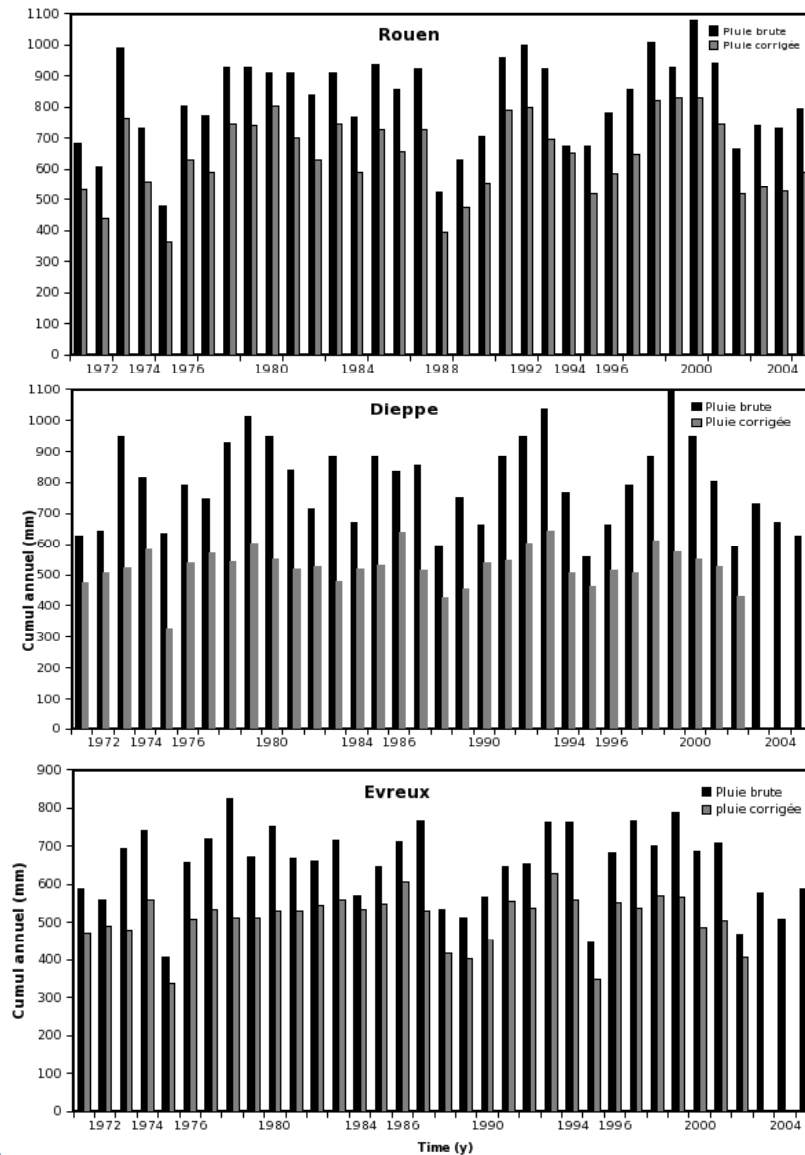
# Le contexte climatique



Régimes pluviométriques pour les bassins Normands pour chaque année sur toute la période d'étude et régime pluviométrique moyen interannuel : a) Rouen ; b) Lyons; c) Dieppe ; d) Bolbec; e) Evreux ; f) Goupillières

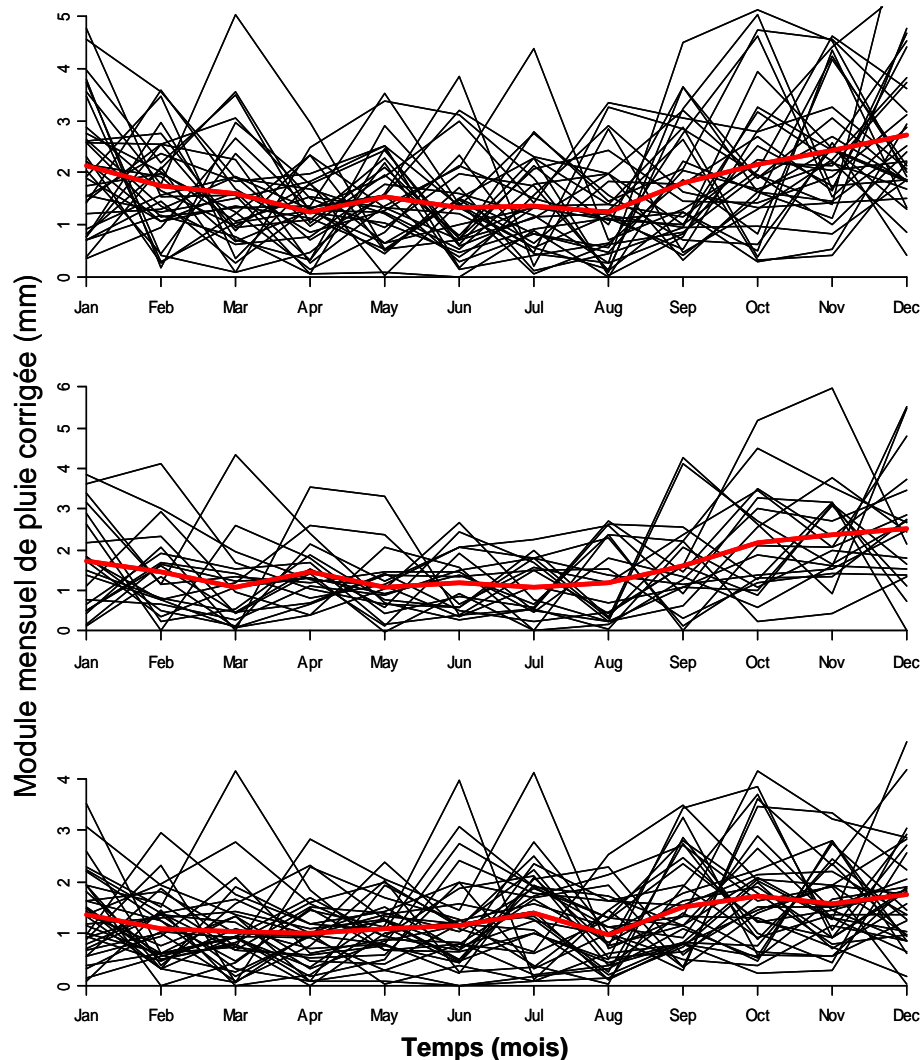
- Les valeurs de modules mensuels des 6 stations présentées, exprimées en précipitations moyennes journalières de chaque mois. Elle illustre les régimes pluviométriques mensuels pour chaque année et ce, pour les 30 dernières années ainsi que la moyenne interannuelle (identifiée par son trait épais). Les données expriment une grande variabilité interannuelle avec, en moyenne, une distribution mensuelle des précipitations quasi aléatoire avec, une légère augmentation des précipitations en automne-hiver qui est toutefois moins évidente pour les stations de Goupillières et d'Evreux.

# Le contexte climatique



- Le signal des pluies brutes ne traduit pas la contribution réelle au cycle hydrologique puisque l'apport des précipitations doit intégrer les processus d'évapotranspiration qui interviennent dans la modification du signal d'entrée hydrologique. Les données d'ETP journalière de Météo France sont utilisées pour corriger le signal brut des pluies.

# Le contexte climatique

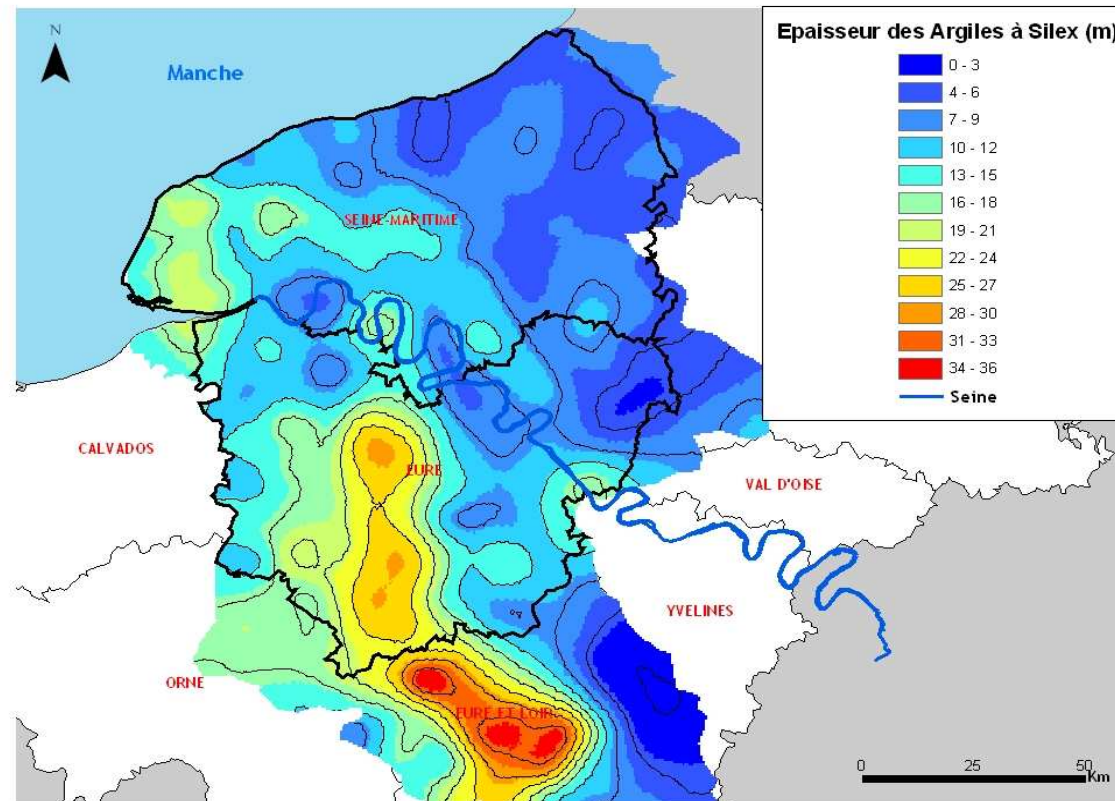


Régimes mensuels pluviométriques corrigés pour chaque année et le régime pluviométrique moyen corrigé annuel : a) Rouen, b) Dieppe et c) Evreux.

- Le signal des pluies brutes ne traduit pas la contribution réelle au cycle hydrologique puisque l'apport des précipitations doit intégrer les processus d'évapotranspiration qui interviennent dans la modification du signal d'entrée hydrologique. Les données d'ETP journalière de Météo France sont utilisées pour corriger le signal brut des pluies.

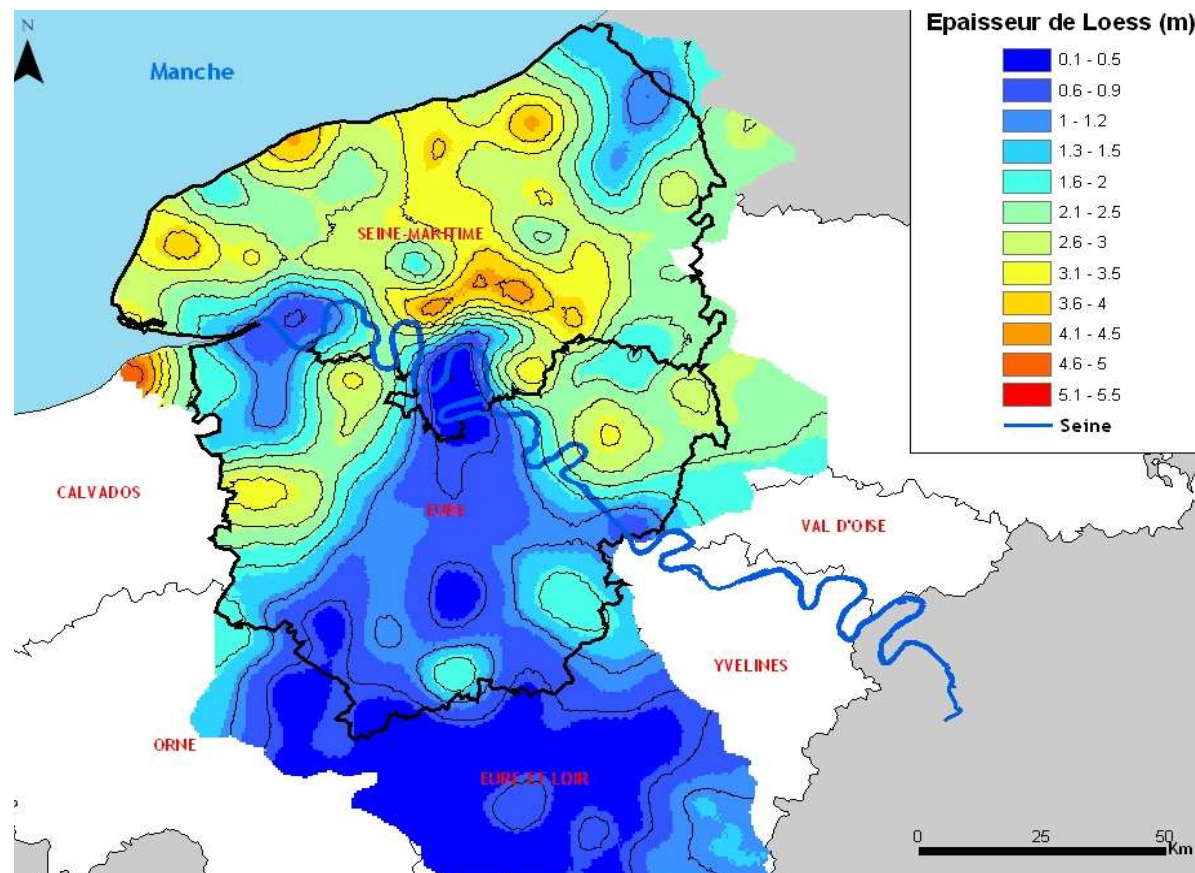
# Le rôle hydrologique des formations superficielles

- La craie de l'Ouest du Bassin de Paris est recouverte par une formation d'altérites à silex qui provient essentiellement de l'accumulation des produits de dissolution des craies sous-jacentes (insolubles des craies). Ces argiles à silex sont appelées : formation résiduelle à silex (notées RS dans les cartes géologiques).

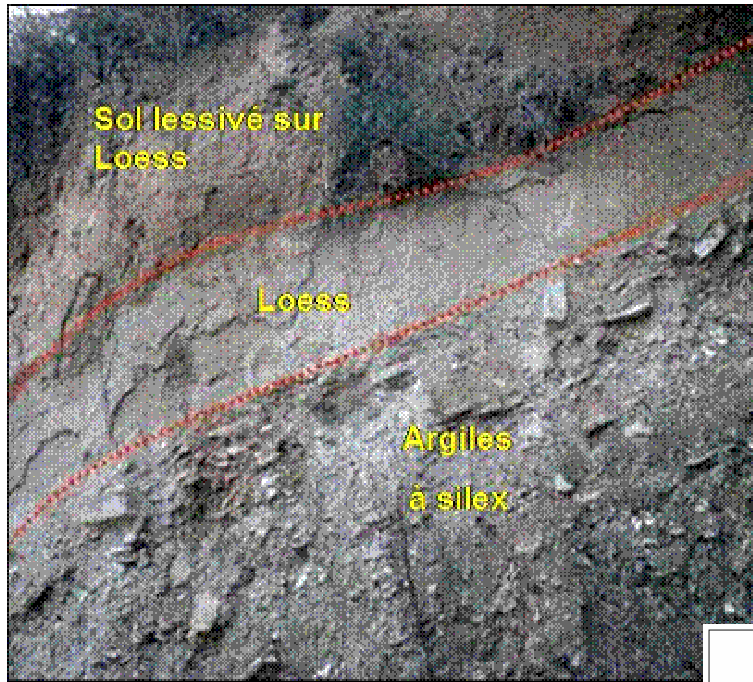


# Le rôle hydrologique des formations superficielles

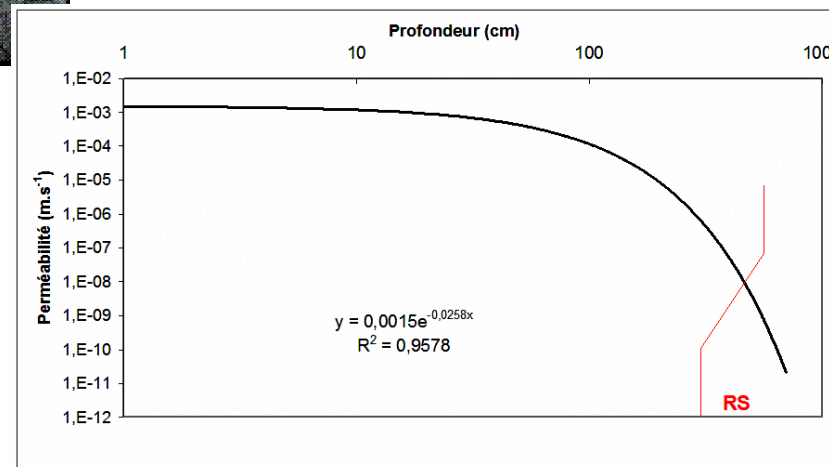
- Les plateaux sont aussi recouverts d'un « manteau » plus ou moins épais de limons des plateaux ou loess. Ce sont des dépôts sédimentaires meubles continentaux, d'origine éolienne. Ils sont composés principalement de grains de quartz de la taille des silts dont la taille moyenne est située aux alentours de 20  $\mu\text{m}$ .



# Le rôle hydrologique des formations superficielles



- Ces limons des plateaux constituent le substrat des sols. Il s'agit de sols meubles, propices aux cultures, plus ou moins lessivés ce qui témoigne de leur perméabilité.
- Globalement, la perméabilité des sols permet l'infiltration des eaux de pluies, en surface, avec des vitesses d'infiltration de l'ordre de cm/jour. Elle diminue en profondeur, au fur et à mesure de la compaction des formations superficielles.



# Le rôle hydrologique des formations superficielles

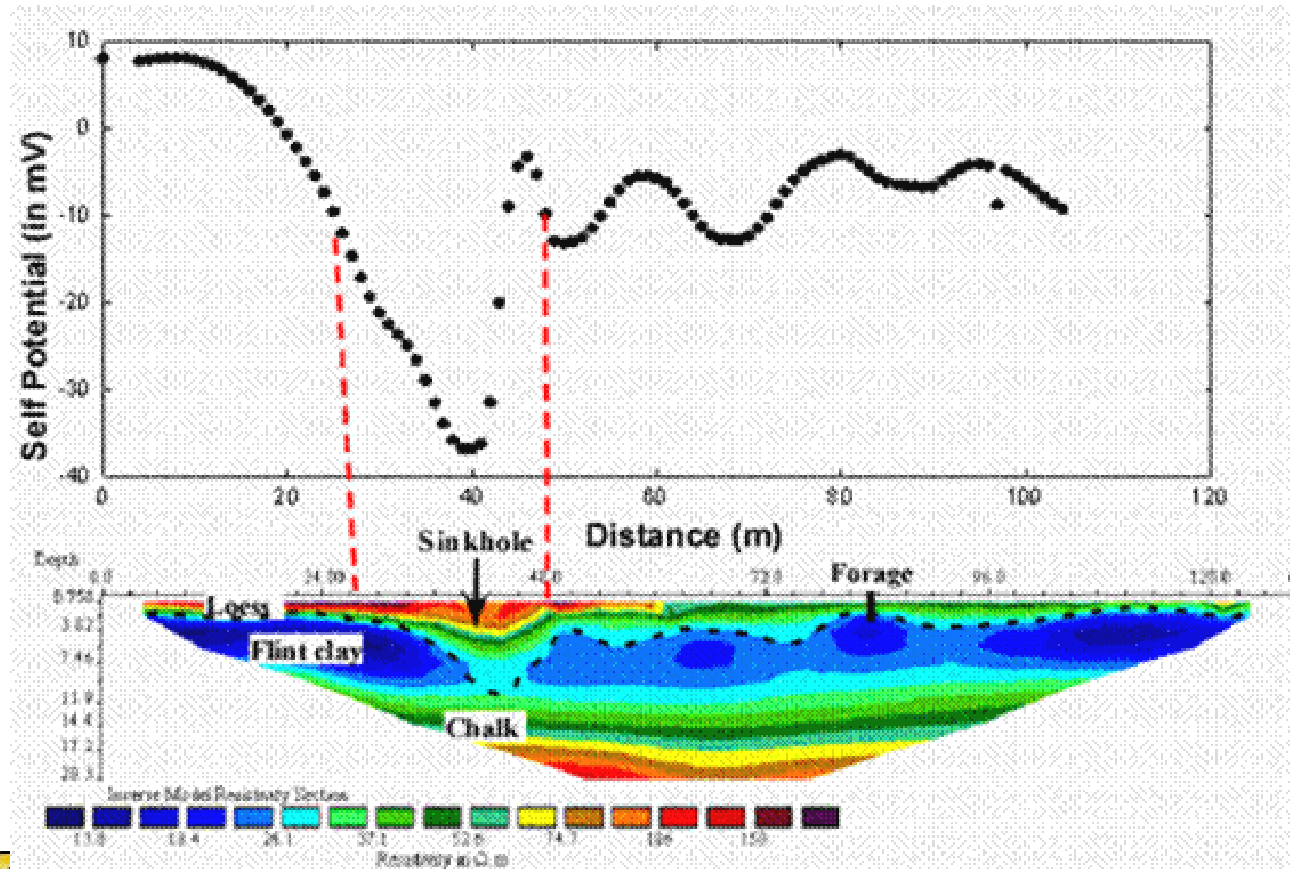


- Localement, les pratiques agricoles peuvent être à l'origine de la réalisation de « croûtes de battance » qui peuvent favoriser les processus de ruissellement (travaux de l'INRA). Dans la morphologie monotone des plateaux, les ruissellements sont, le plus souvent, circonscrits à des petits bassins versants ou impluviums de plateau qui sont drainés par des points d'engouffrement ou dolines (régionalement, appelés bétoires).

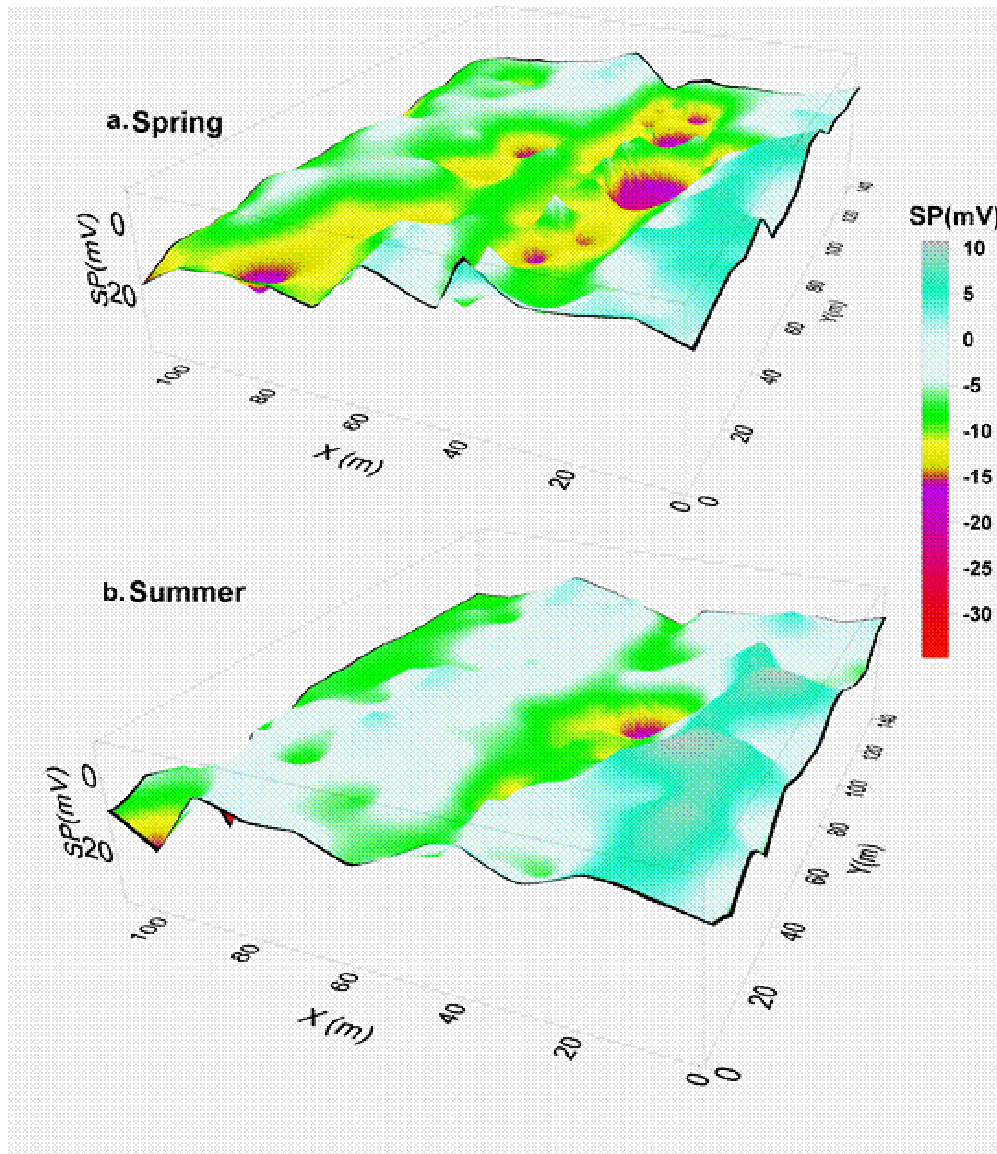


# Le rôle hydrologique des formations superficielles

- Au niveau de la béttoire ou doline principale, la tomographie électrique permet de visualiser la coupe géologique.
- Le profil de PS traduit les écoulements de sub-surface, en particulier de leur surface piézométrique.
- Ces données permettent de localiser les béttoires et les « cryptobéttoires », non visibles en surface.



# Le rôle hydrologique des formations superficielles

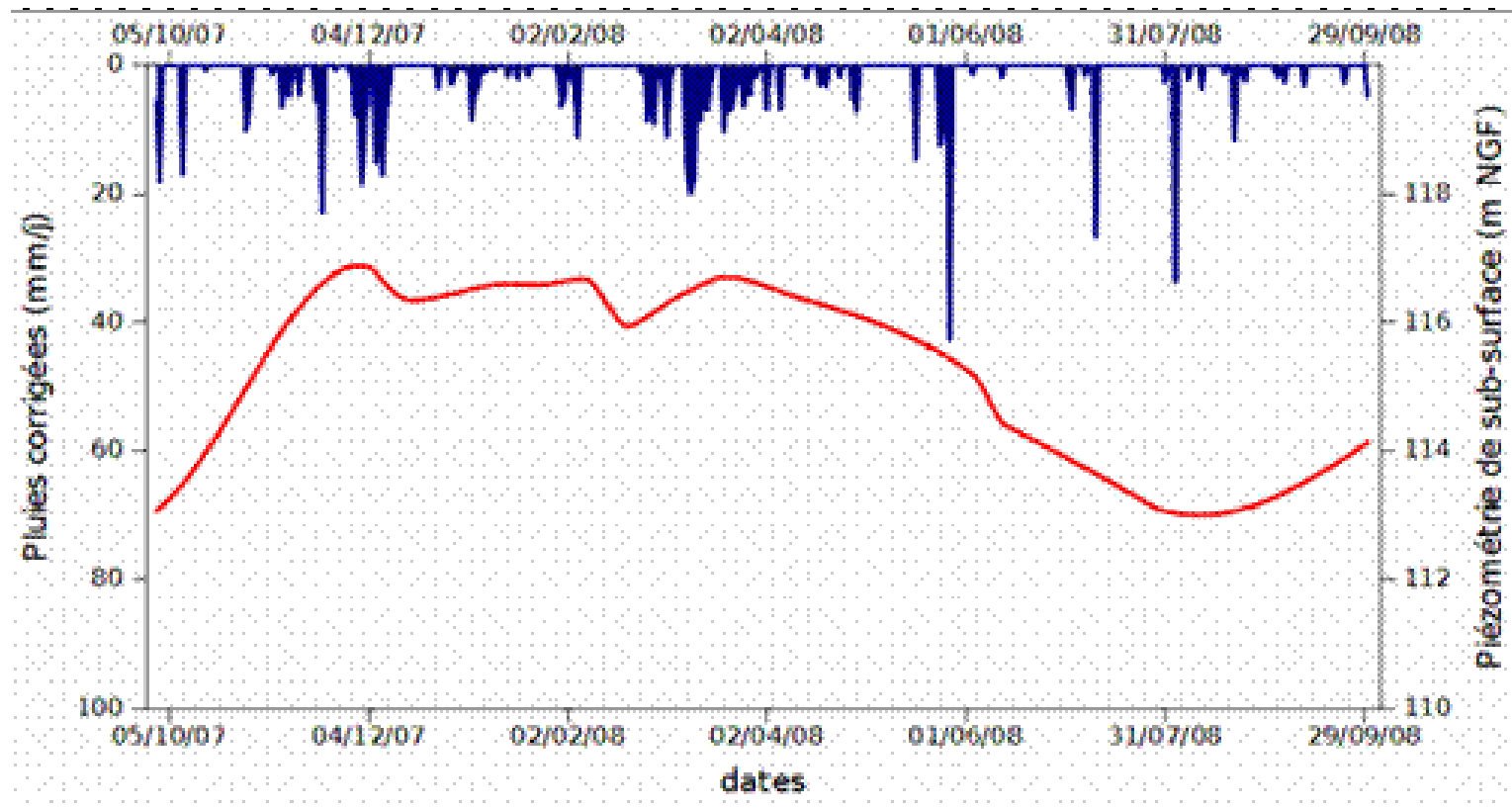


- La comparaison des cartes de PS réalisées au printemps et en été permet de montrer :

- L'abaissement des niveaux piézométriques entre printemps et été ;
- la présence d'un « entonnoir piézométrique » bien marqué, tant au printemps qu'en été, au niveau de la bétairie ;
- la présence d'autres « entonnoirs piézométriques » plus ou moins marqués au printemps qui s'estompent, en été, ; ces petits « entonnoirs piézométriques » correspondent à des points d'infiltration secondaires (cryptobétaires) qui sont susceptibles d'évoluer en bétaires (par dissolution et développement de vides karstiques) si la bétairie principale vient à s'obstruer de manière naturelle ou artificielle.

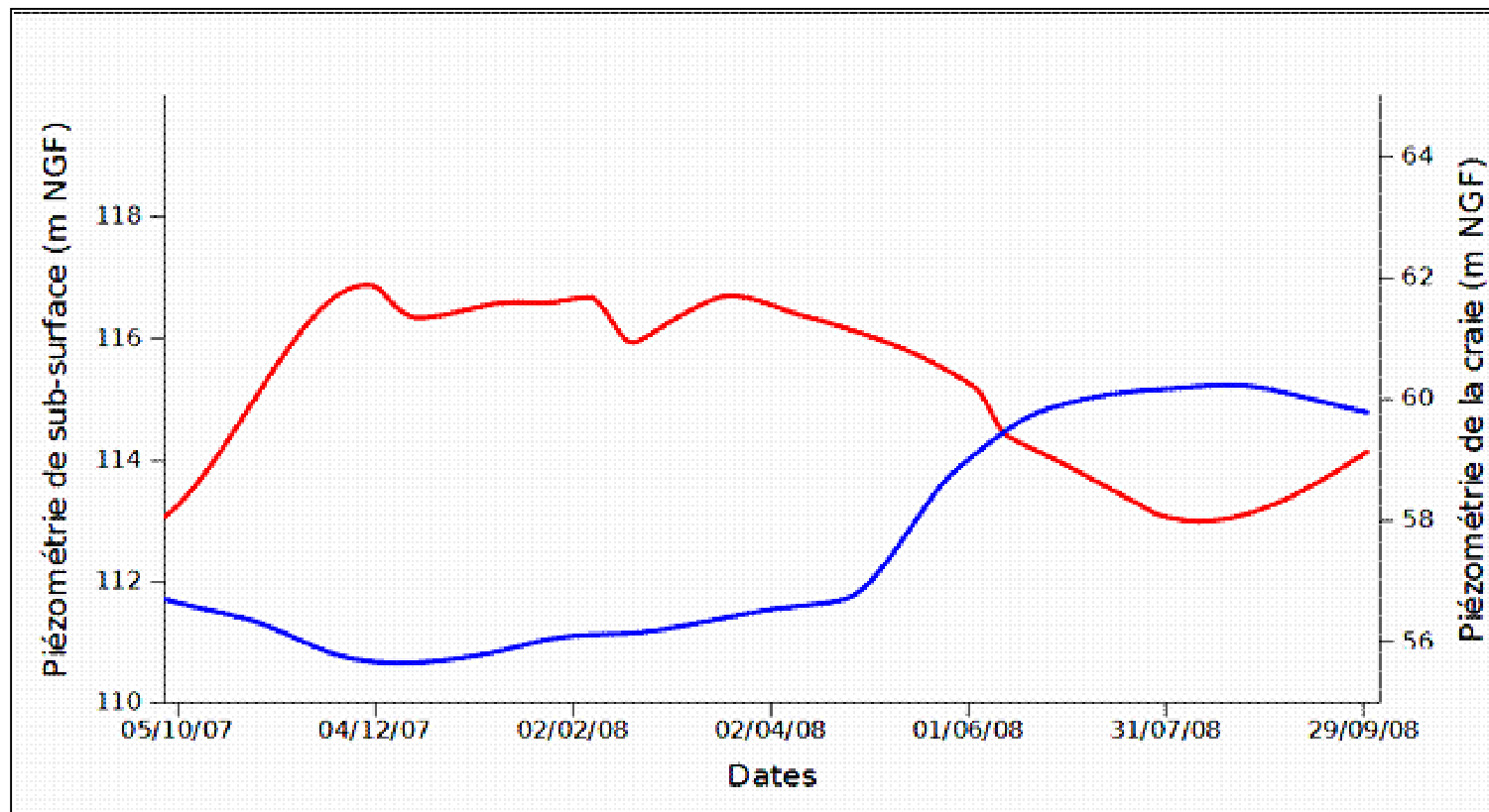
# Le rôle hydrologique des formations superficielles

- Le suivi des niveaux d'eaux accumulées dans les formations superficielles permet d'illustrer la réponse hydrologique de l'aquifère de sub-surface aux pluies efficaces.



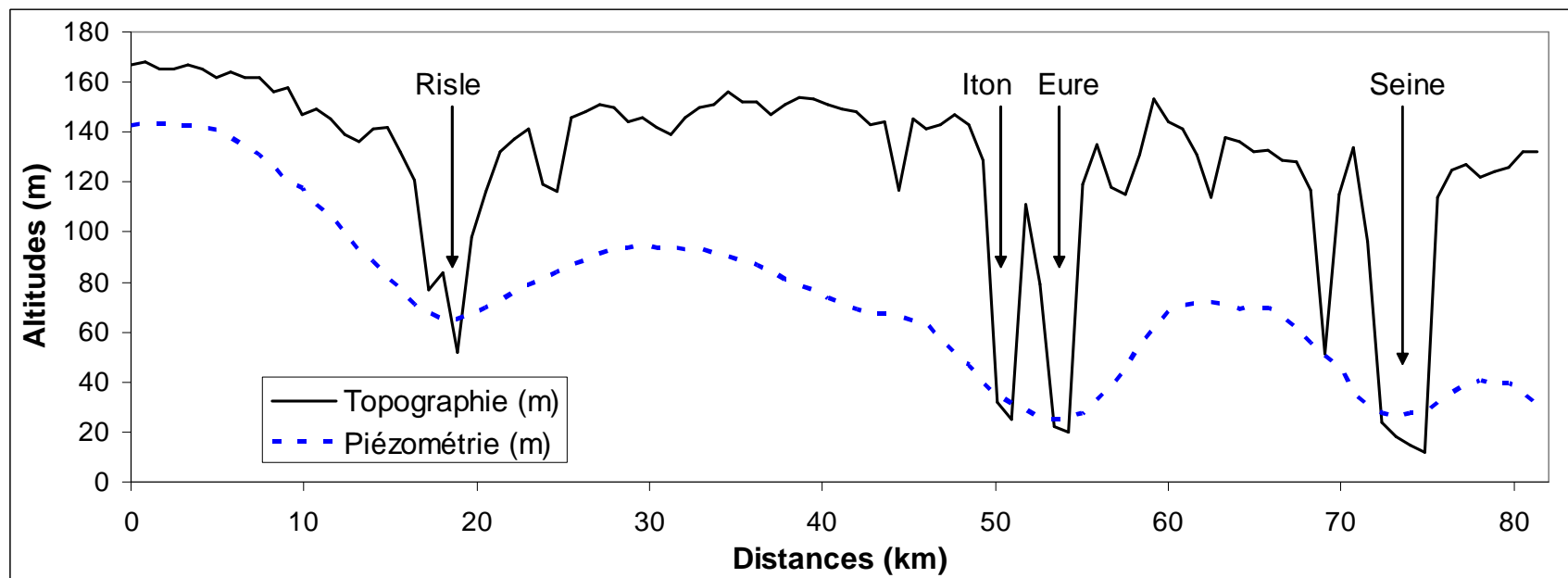
# Le rôle hydrologique des formations superficielles

- La comparaison des chroniques piézométriques de l'aquifère superficiel et de l'aquifère de la craie sous-jacent illustre le décalage entre les cycles crue-étiage de l'aquifère superficiel et de l'aquifère de la craie et, explique le retard entre la période pluvieuse et la recharge de l'aquifère de la craie.



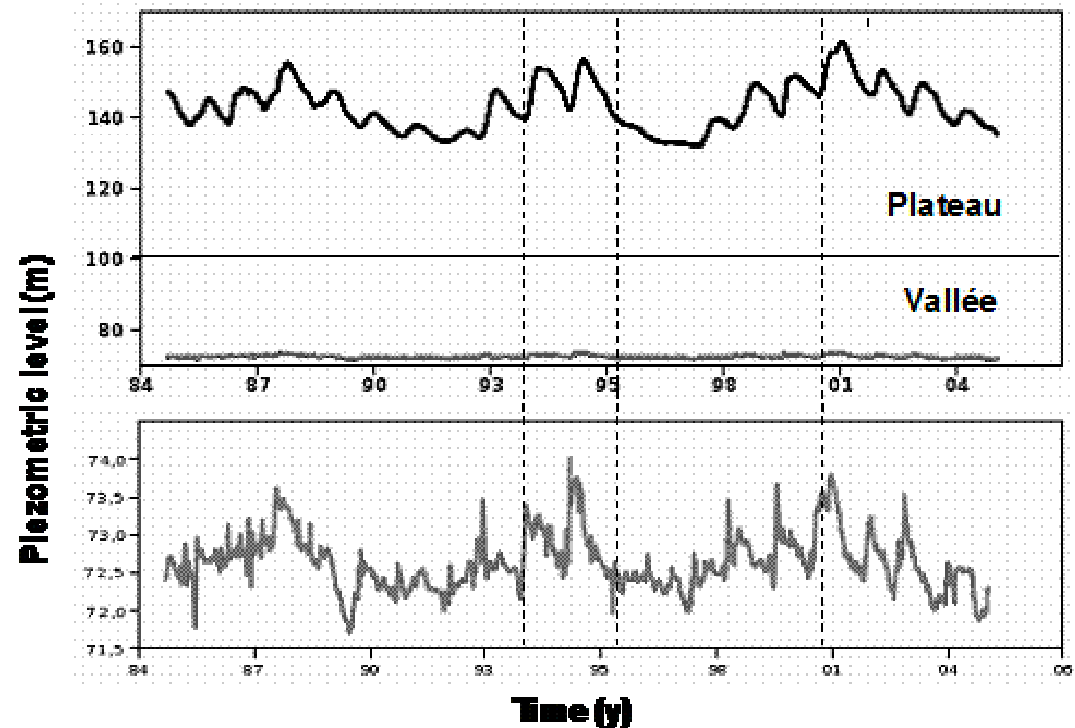
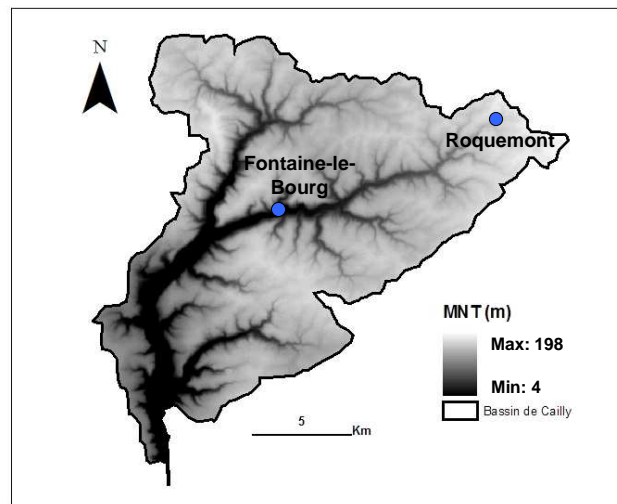
# Le fonctionnement hydrologique à l'échelle des bassins versants

- La superposition des profils topographiques et piézométriques démontre que le creusement morphologique des vallées (érosion au cours du Quaternaire) est contrôlé à la fois par le niveau de base de l'exutoire marin de la Seine, qui draine l'ensemble des systèmes hydrologiques et, localement, et par les profils piézométriques des bassins versants.
- A l'échelle des bassins versants, les profils piézométriques transversaux présentent des gradients hydrauliques qui traduisent l'écoulement des eaux souterraines vers le drain morphologique des vallées



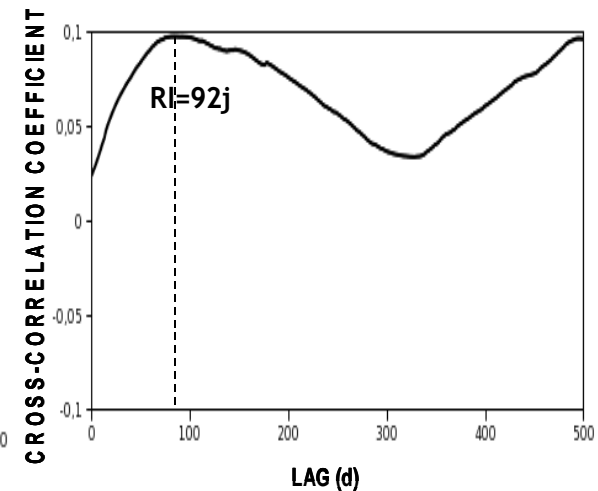
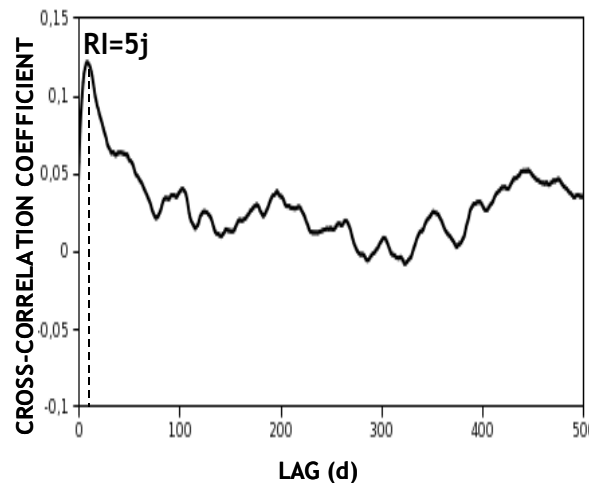
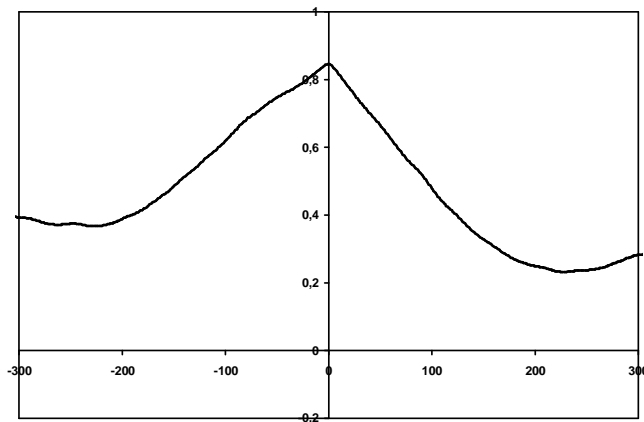
# Le fonctionnement hydrologique à l'échelle des bassins versants

- Les fluctuations piézométriques sont beaucoup plus importantes dans le piézomètre de plateau que dans le piézomètre de vallée et traduisent la fonction de recharge, annuelle, voire interannuelle des réserves amont de l'aquifère.



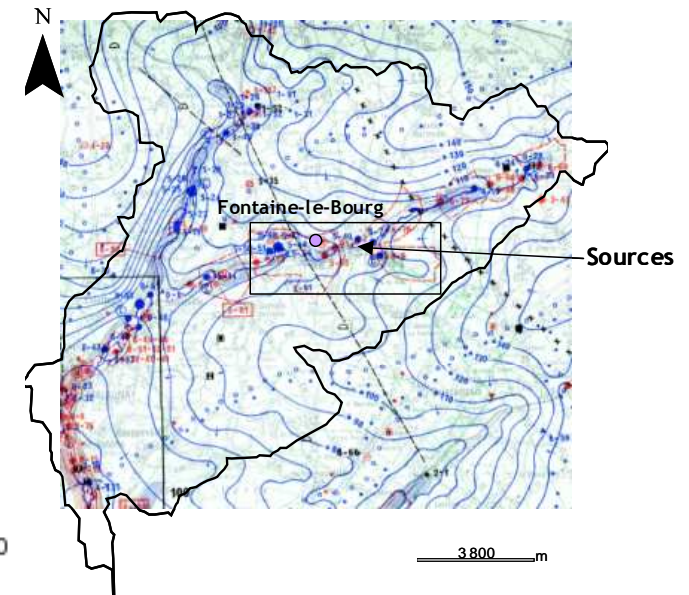
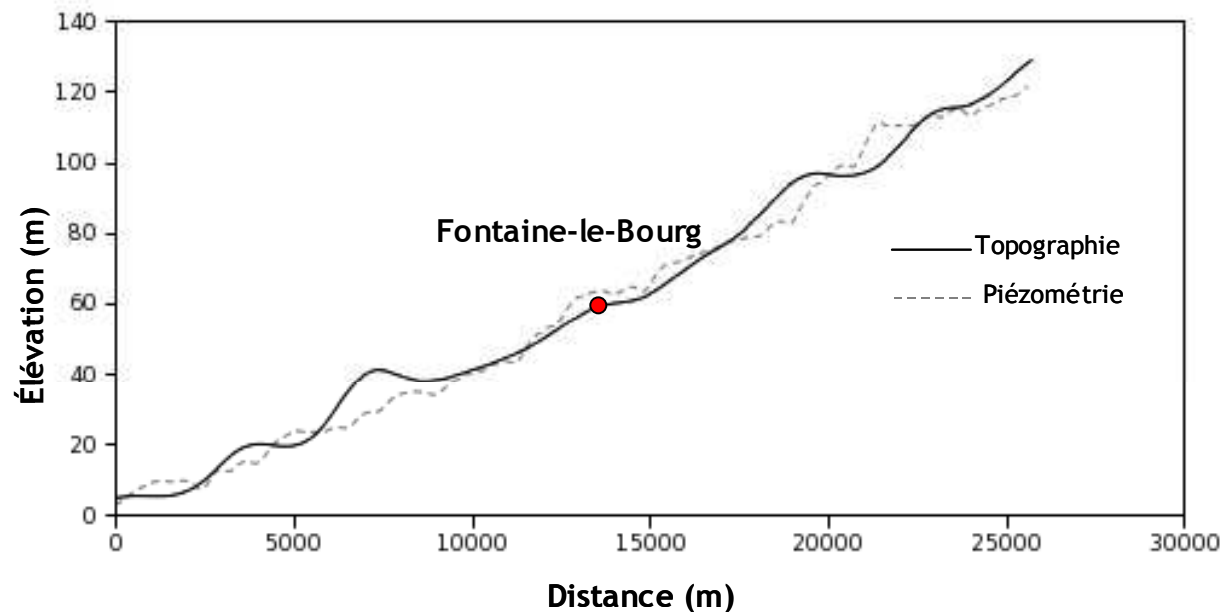
# Le fonctionnement hydrologique à l'échelle des bassins versants

- Les intercorrélations Pluies : Piézométrie confirme la fonction retard au niveau des plateaux (à droite) et l'existence de réponses événementielles au niveau du karst de restitution, en vallée (au centre).
- La bonne corrélation entre la piézométrie de vallée et les débits de la rivière (à gauche) confirme l'alimentation des rivières par le karst de restitution, en vallée.



# Le fonctionnement hydrologique à l'échelle des bassins versants

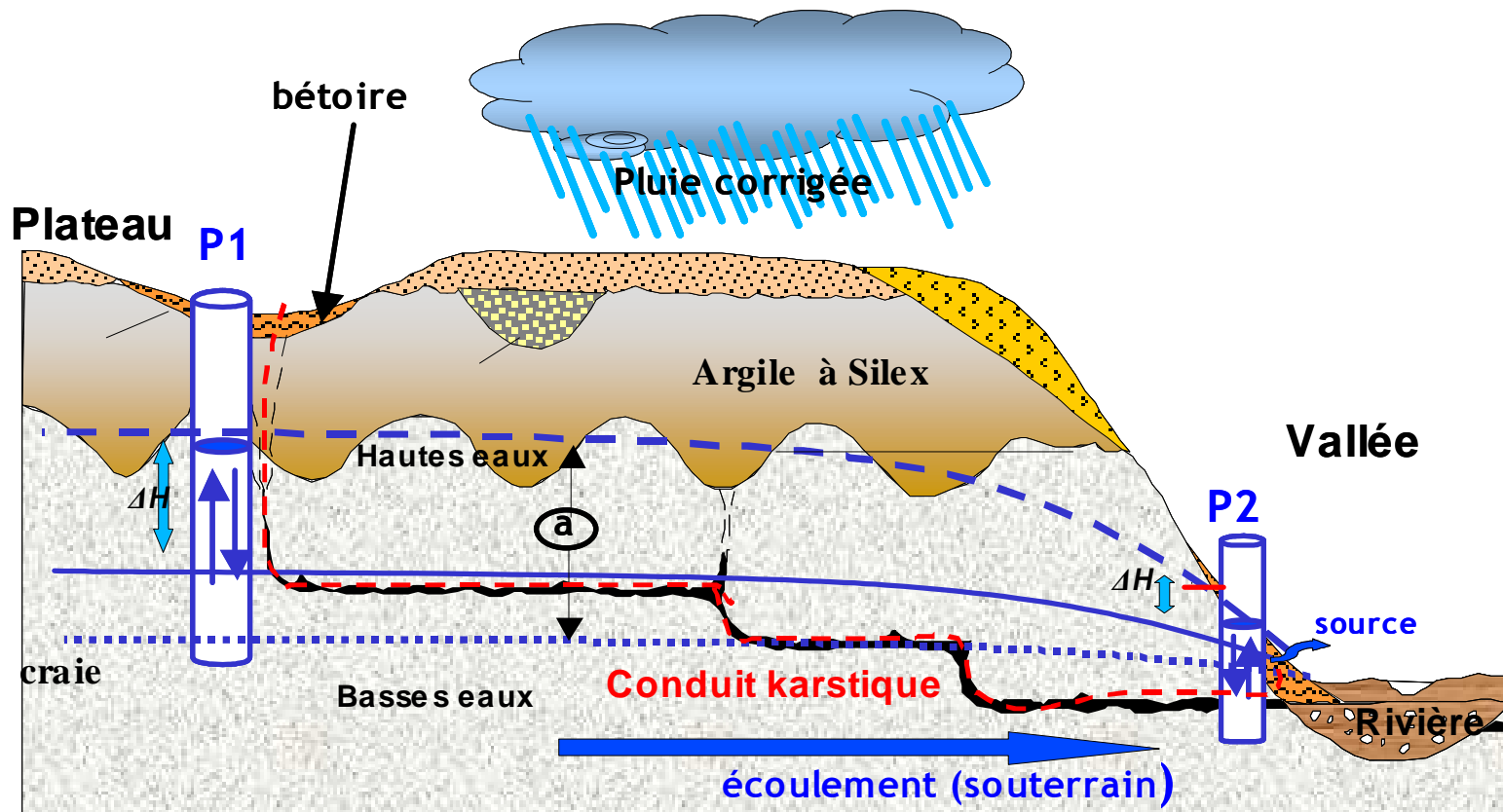
- Les relations nappe-rivière sont illustrées par les profils en long de la piézométrie et de la topographie du fond de vallée du Cailly et par l'émergence de nombreuses sources dans les secteurs où l'aquifère est en charge dans la vallée.





# Le fonctionnement hydrologique à l'échelle des bassins versants

- La coupe schématique illustre le fonctionnement hydrologique de l'aquifère de la craie au niveau des bassins versants drainés par les rivières.

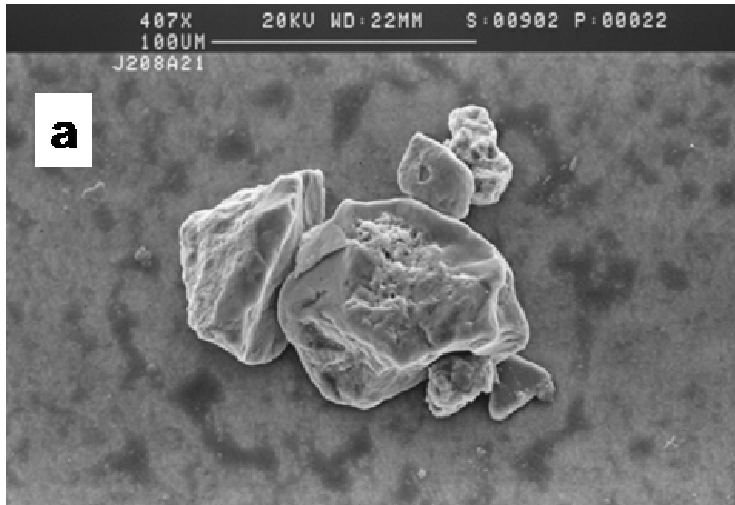


# Les épisodes turbides, une conséquence du karst de restitution en vallée

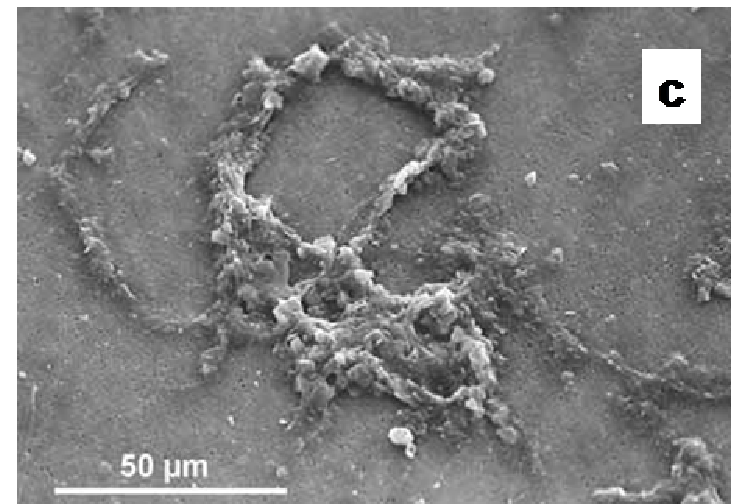
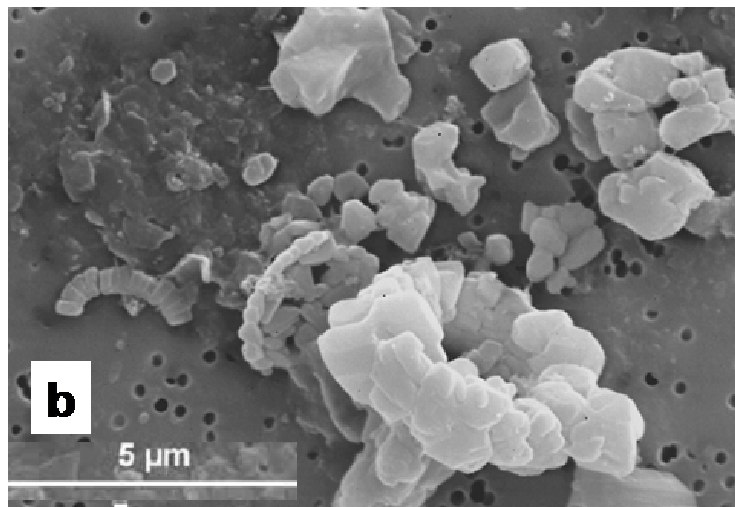


- Le développement de conduits karstiques des bêtaires aux sources et forages exploités en vallée conduit au transfert rapide des contaminants susceptibles d'affecter l'environnement immédiat des bêtaires.
- A la suite des périodes pluvieuses, les épisodes de restitution des eaux turbides constituent une preuve de la vulnérabilité des ressources d'eaux souterraines.

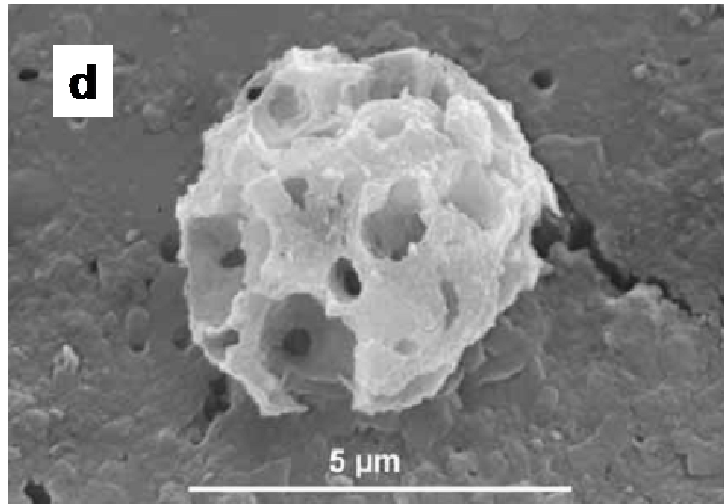
# Les épisodes turbides, une conséquence du karst de restitution en vallée



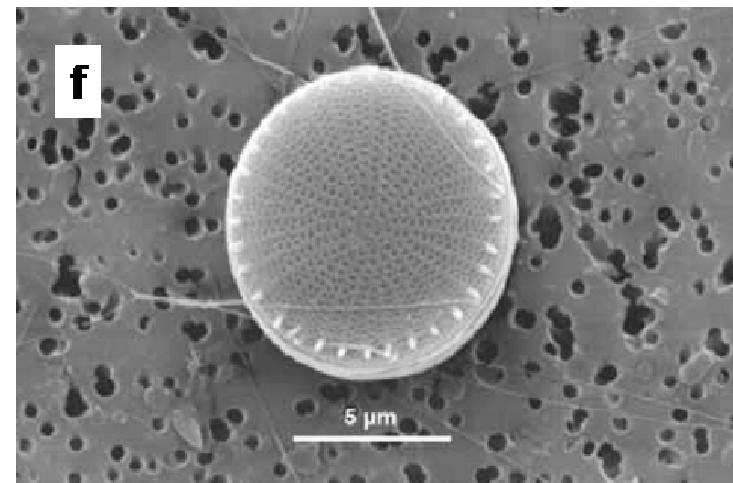
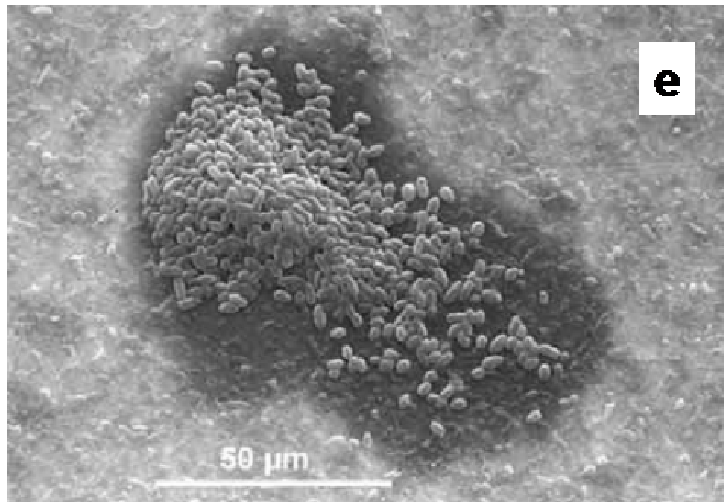
- La détermination, au MEB, des particules en suspension dans les exutoires karstiques exploités permet de montrer que les matériaux fins proviennent de l'érosion et du lessivage des sols des plateaux, mais aussi de reprises intrakarstiques



# Les épisodes turbides, une conséquence du karst de restitution en vallée

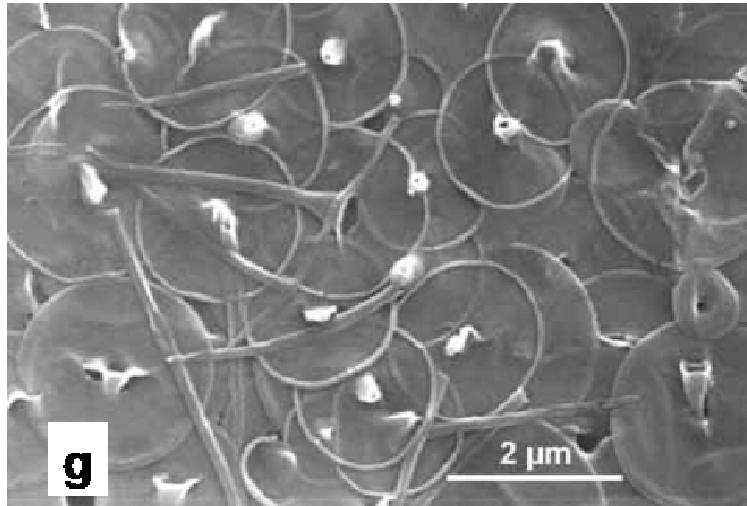


- La détermination, au MEB, des particules en suspension dans les exutoires karstiques exploités permet de montrer que les matériaux fins proviennent de l'érosion et du lessivage des sols des plateaux, mais aussi de reprises intrakarstiques

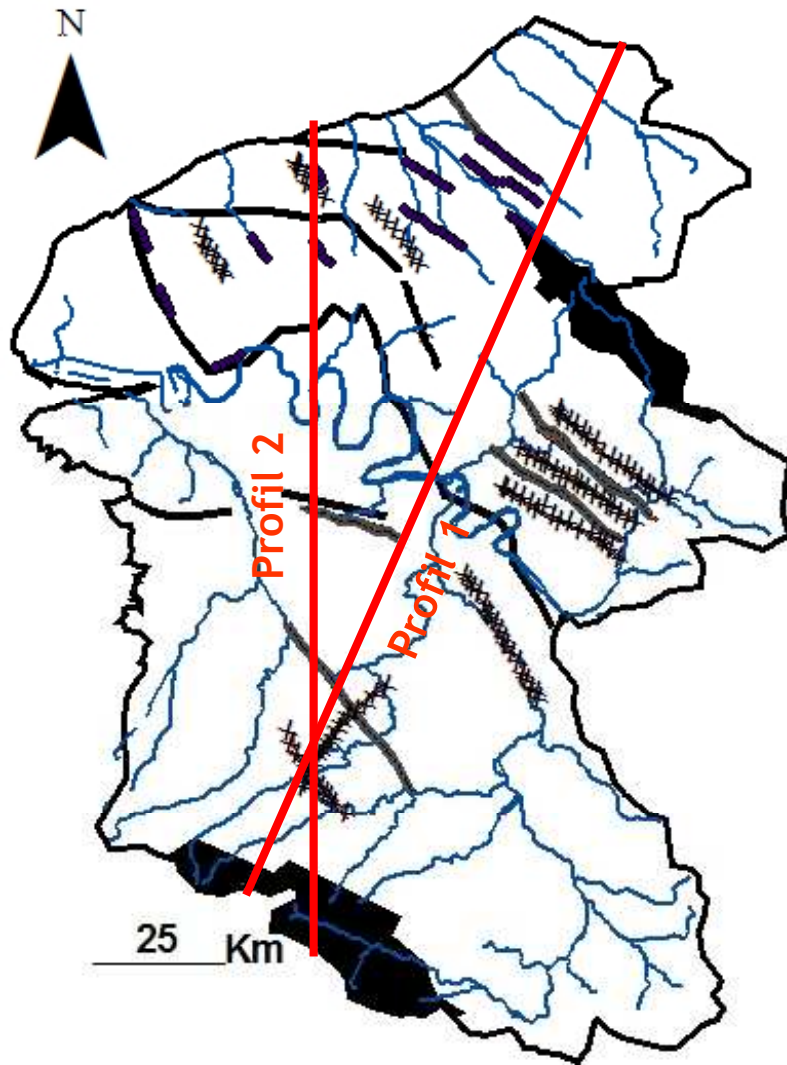


# Les épisodes turbides, une conséquence du karst de restitution en vallée

- Avec des problèmes de contamination de la ressource en eau...

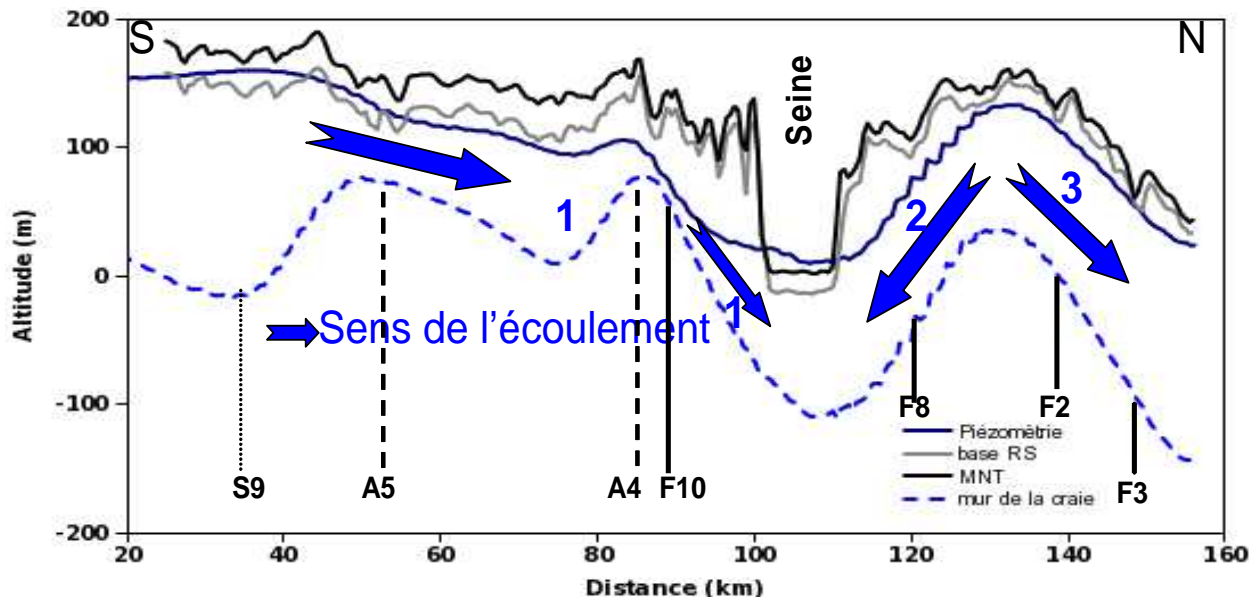
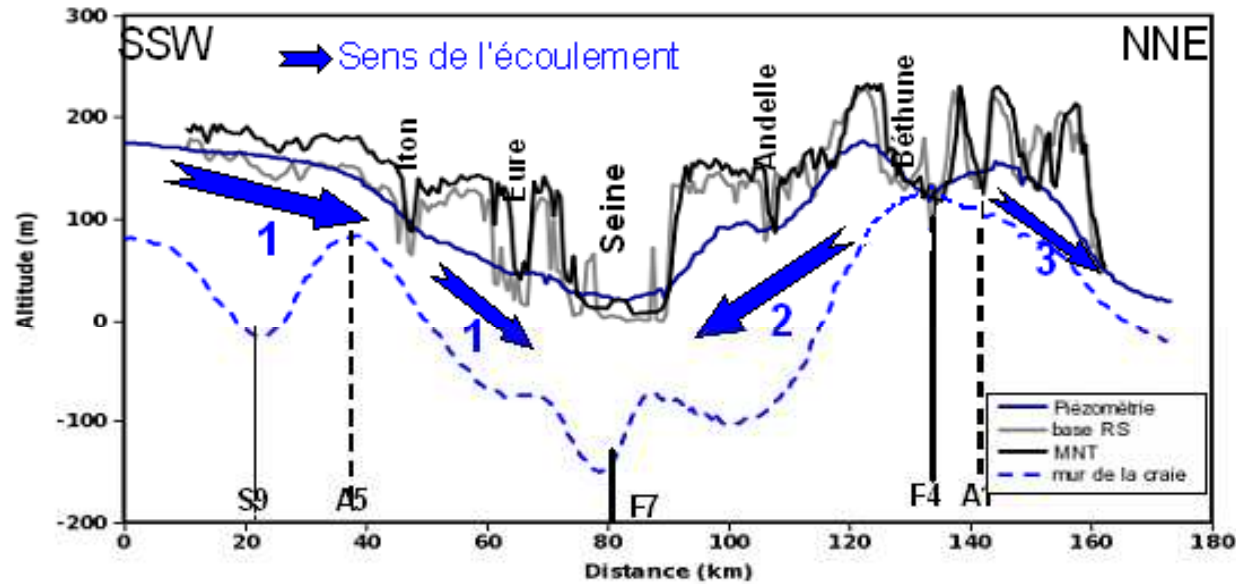


# Le fonctionnement hydrologique à l'échelle des grands écoulements

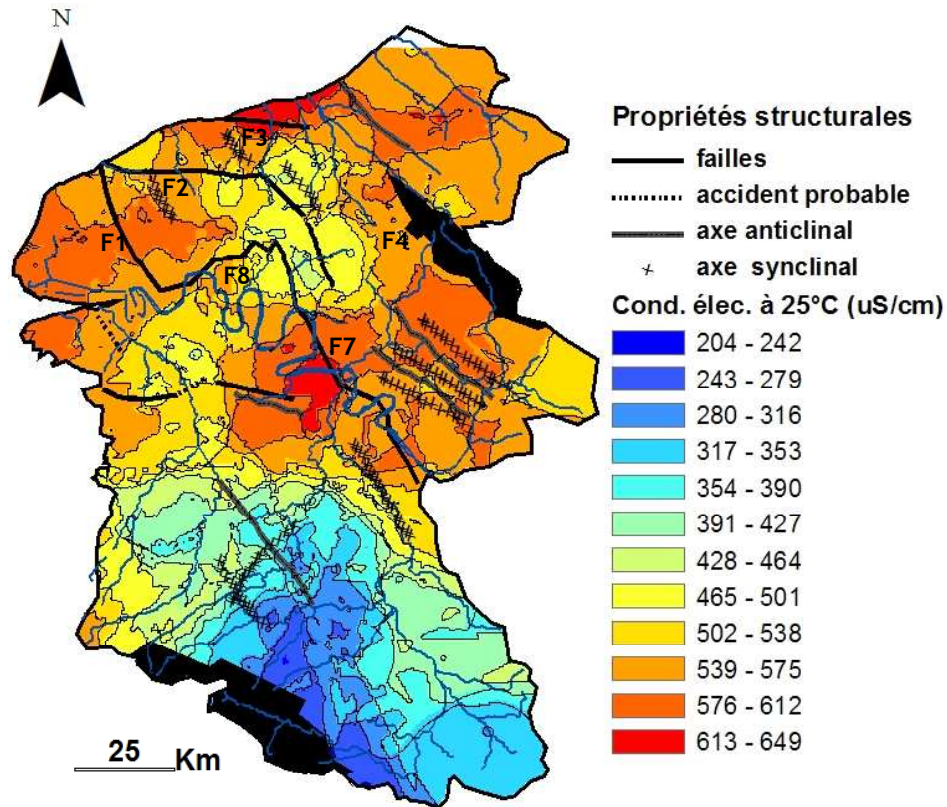


- Les coupes hydrogéologiques qui débutent au Sud, au niveau de la limite de passage latéral entre les sables du Perche et les craies du Cénomaniens et se termine, au Nord, sur le domaine côtier permettent d'illustrer la géométrie de l'aquifère dans le contexte structural et géomorphologique régional.

# Le fonctionnement hydrologique à l'échelle des grands écoulements



# Le fonctionnement hydrologique à l'échelle des grands écoulements

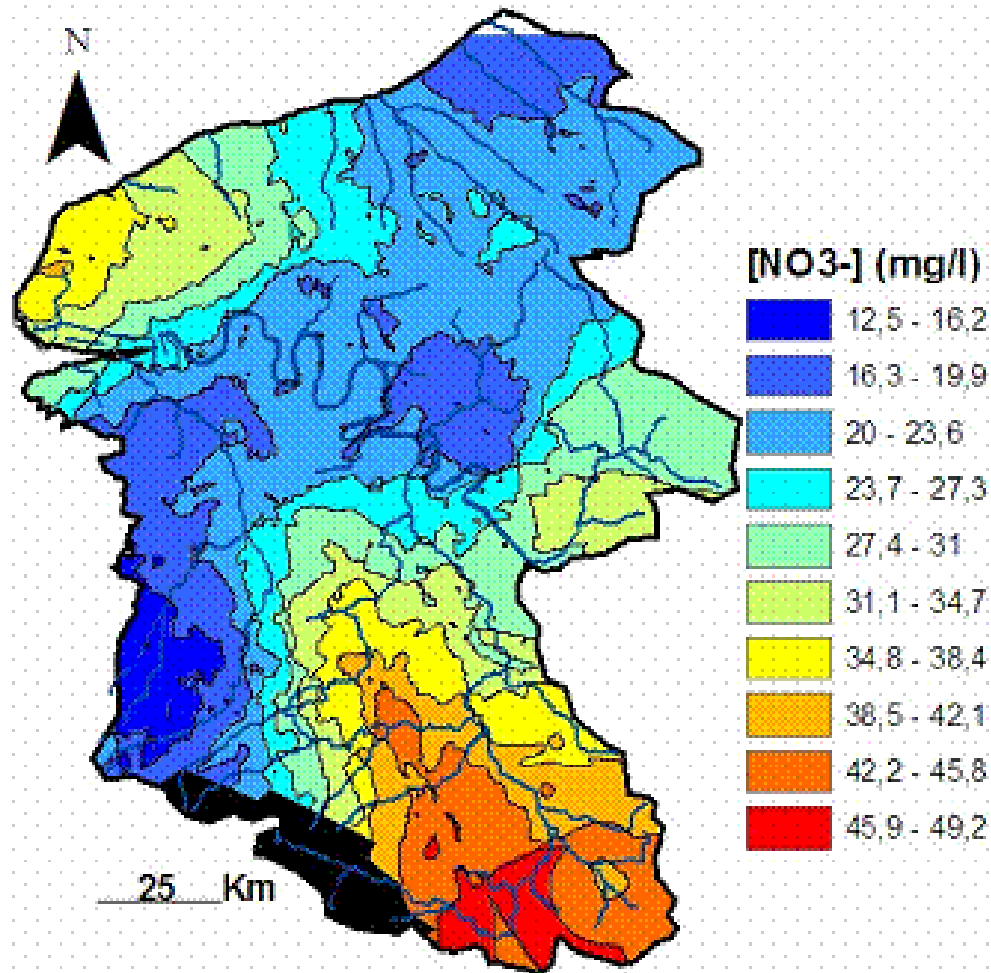


- Les cartes de distribution de la géochimie des eaux sont la résultante des grands écoulements.

La conductivité électrique exprime le taux de minéralisation de l'eau. Cette variable est bien organisée spatialement : un continuum de minéralisation globalement du Sud vers le Nord, en rive gauche de Seine avec les eaux les moins minéralisées dans la partie Sud (infiltration abondante des eaux dans les sables Cénomaniens des collines du Perche). L'augmentation de la minéralisation du Sud vers le Nord est ensuite la traduction de la minéralisation croissante des eaux qui traversent les formations de la craie.



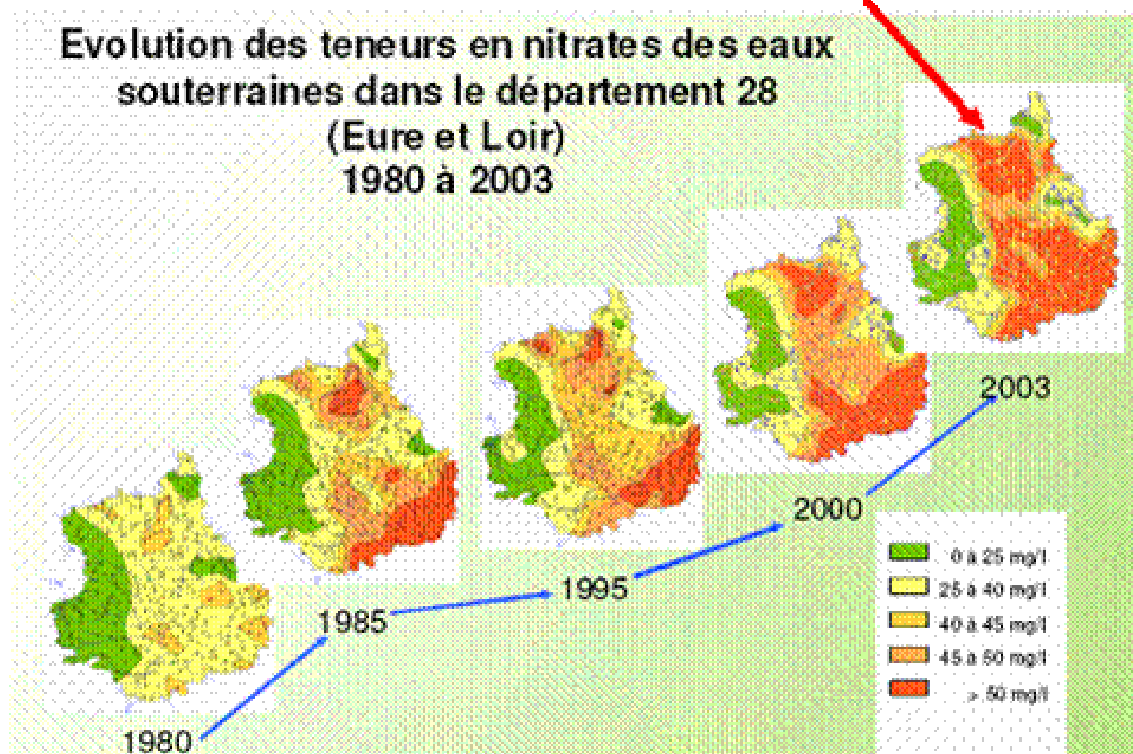
# Le fonctionnement hydrologique à l'échelle des grands écoulements



- La carte de distribution des concentrations en nitrates témoigne d'un accroissement des concentrations vers le Sud-Est qui s'amorce, en amont de l'Eure, en Eure et Loir dans le secteur de la Beauce qui est connu pour ses fortes concentrations en nitrates des eaux souterraines.

# Le fonctionnement hydrologique à l'échelle des grands écoulements

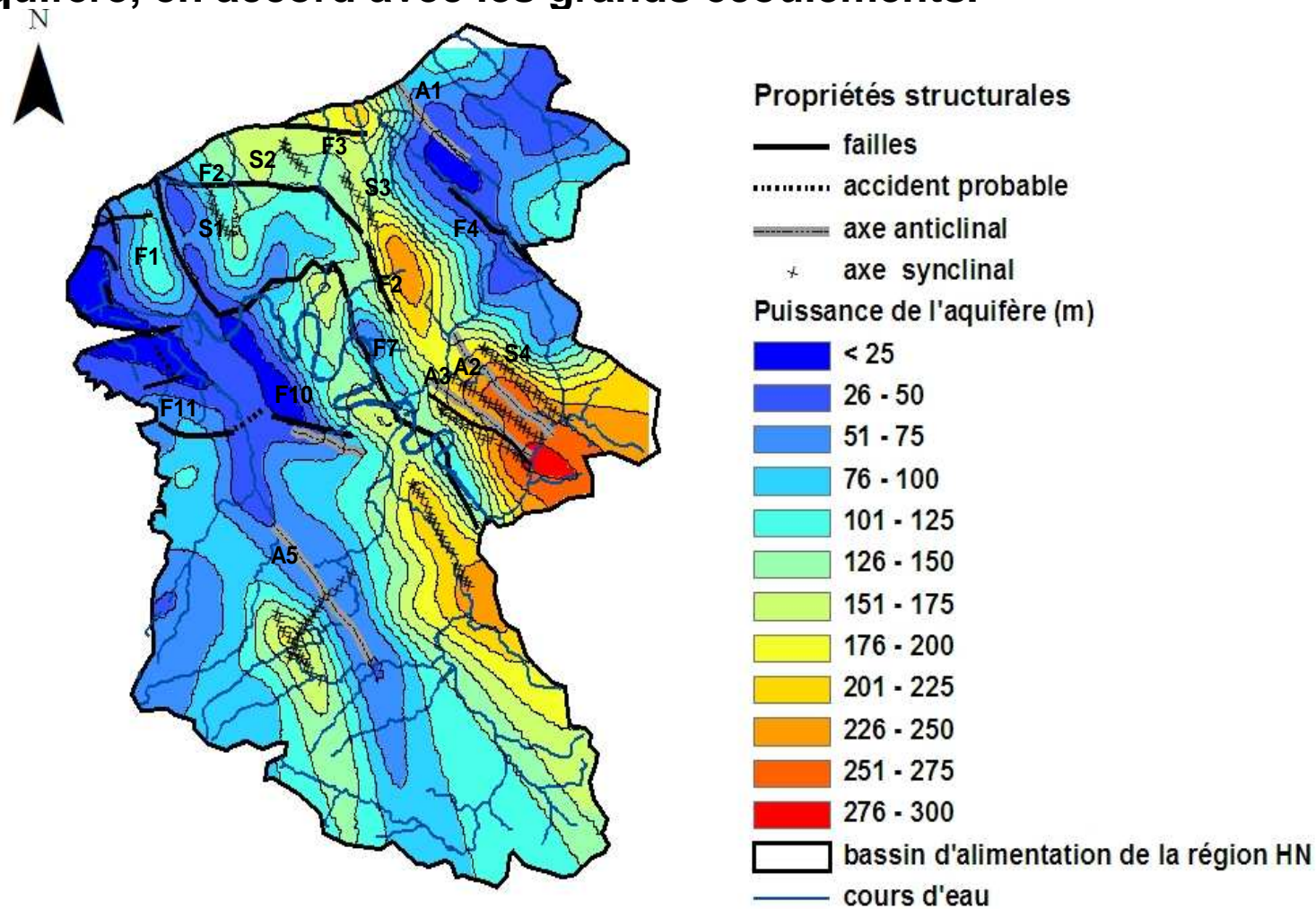
**Limite Sud-Est du département de l'Eure**



- Parallèlement à la faille de la Seine (F1), les écoulements Sud-Est / Nord-Ouest, transversaux aux bassins versants de surface de l'Eure, de l'Avre et de l'Iton, sont à l'origine de l'enrichissement en nitrates des eaux souterraines du Sud-Est de l'Eure. Dans un tel contexte, le problème des nitrates ne devra être abordé qu'à une échelle interrégionale incluant la maîtrise des flux croissant provenant de l'Eure et Loir .

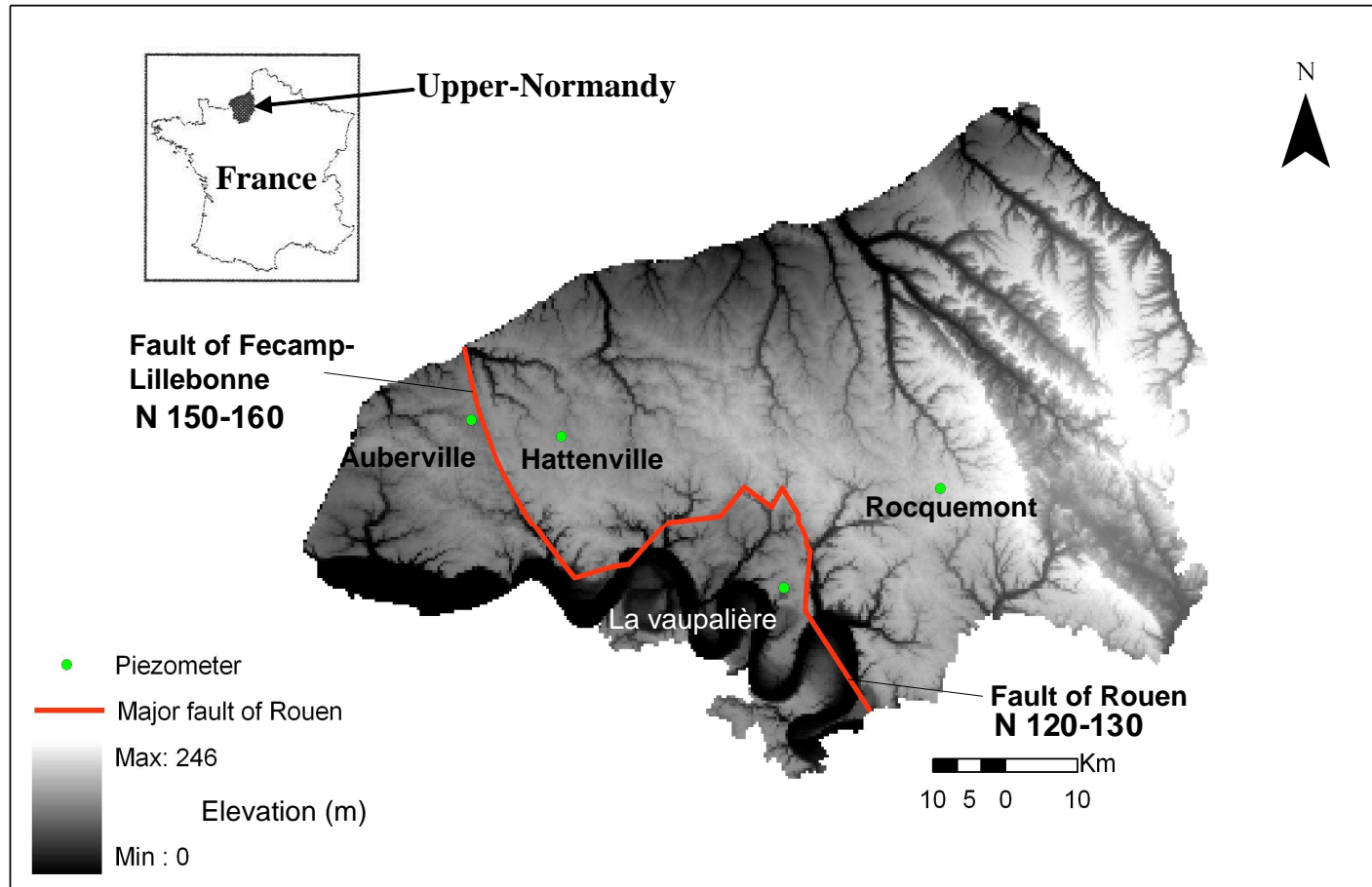
# L'influence du contexte structural

- Le contexte structural exerce un contrôle sur la puissance de l'aquifère, en accord avec les grands écoulements.



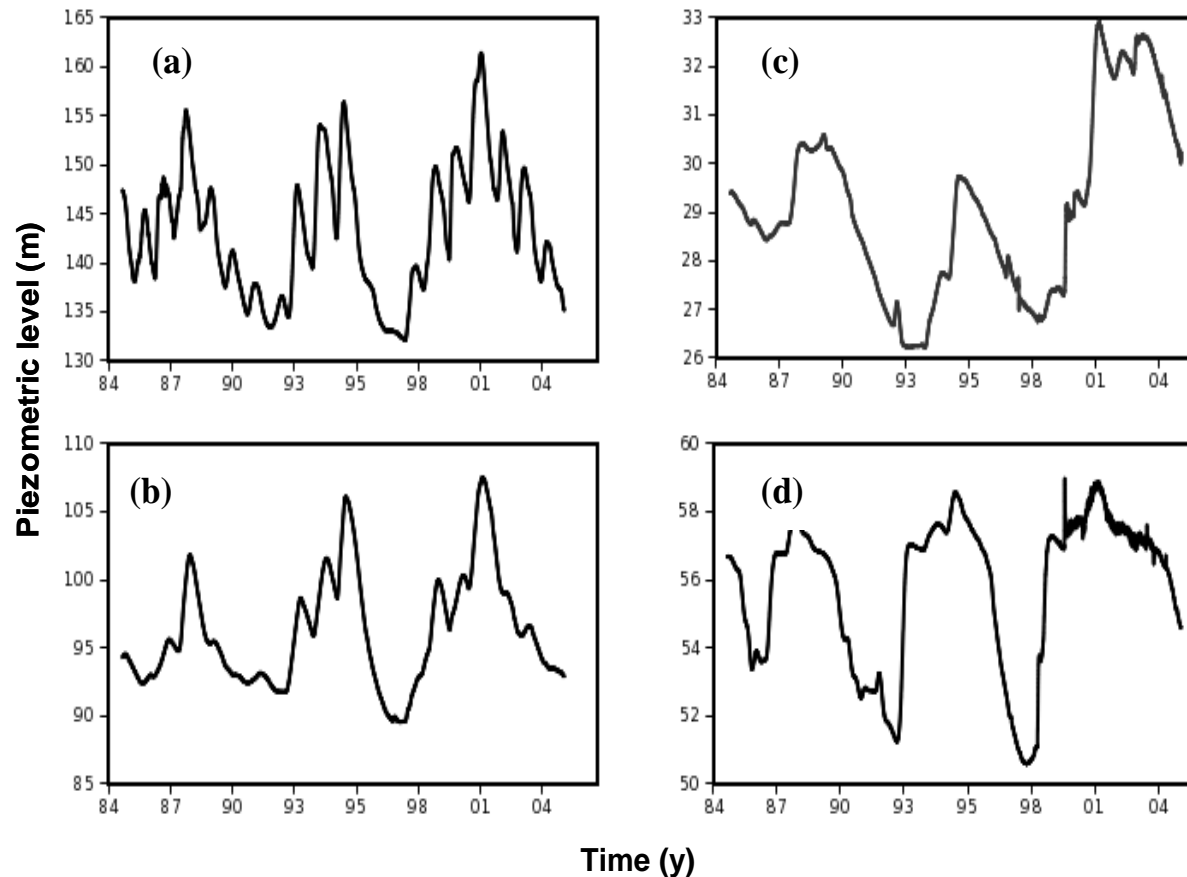
# L'influence du contexte structural

- Elle peut être illustrée par la comparaison des chroniques hydrologiques de part et d'autre de la faille de la Seine relayée par la faille de Lillebonne-Fécamp



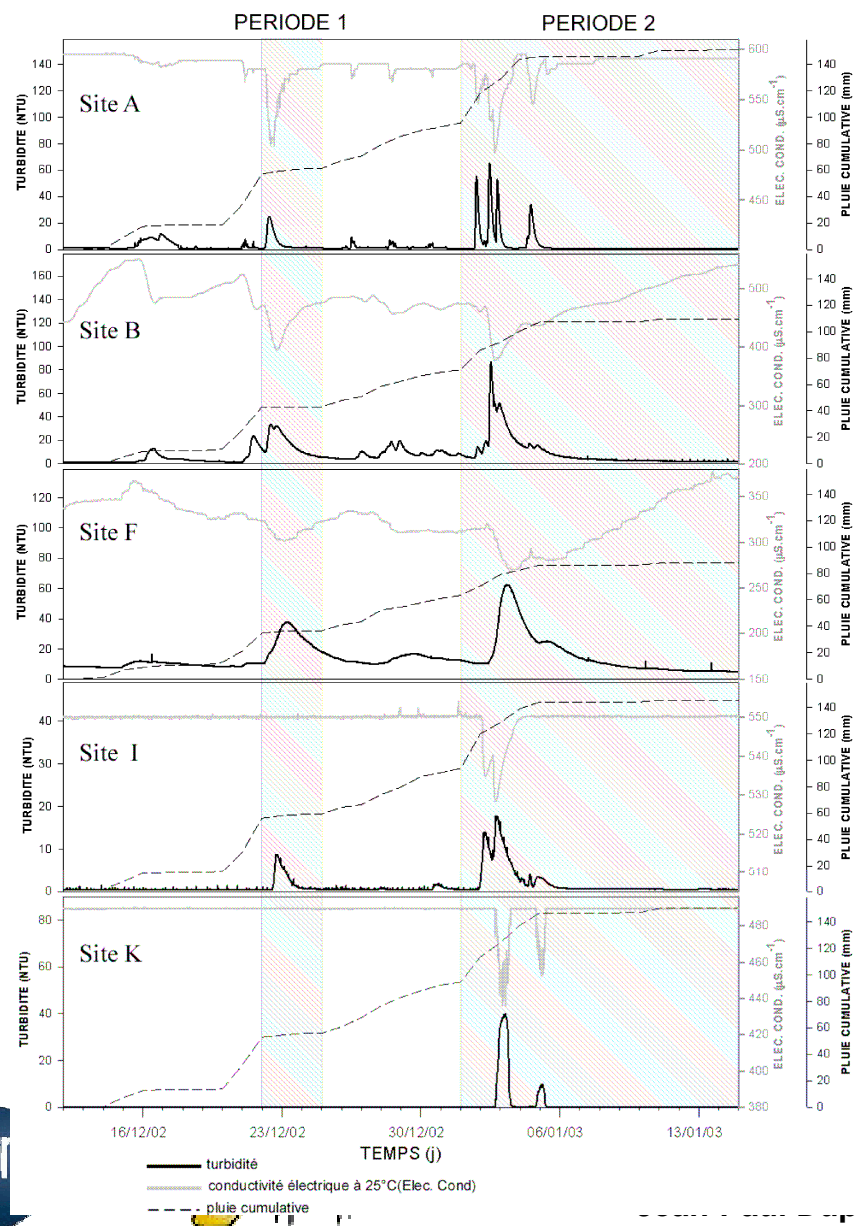
# L'influence du contexte structural

- Elle peut être illustrée par la comparaison des chroniques hydrologiques de part et d'autre de la faille de la Seine relayée par la faille de Lillebonne-Fécamp



Chroniques piézométriques brutes. Compartiment surélevé : (a) Rocquemont, (b) Hattenville ; compartiment affaissé : (c) Vaupalière, (d) Auberville

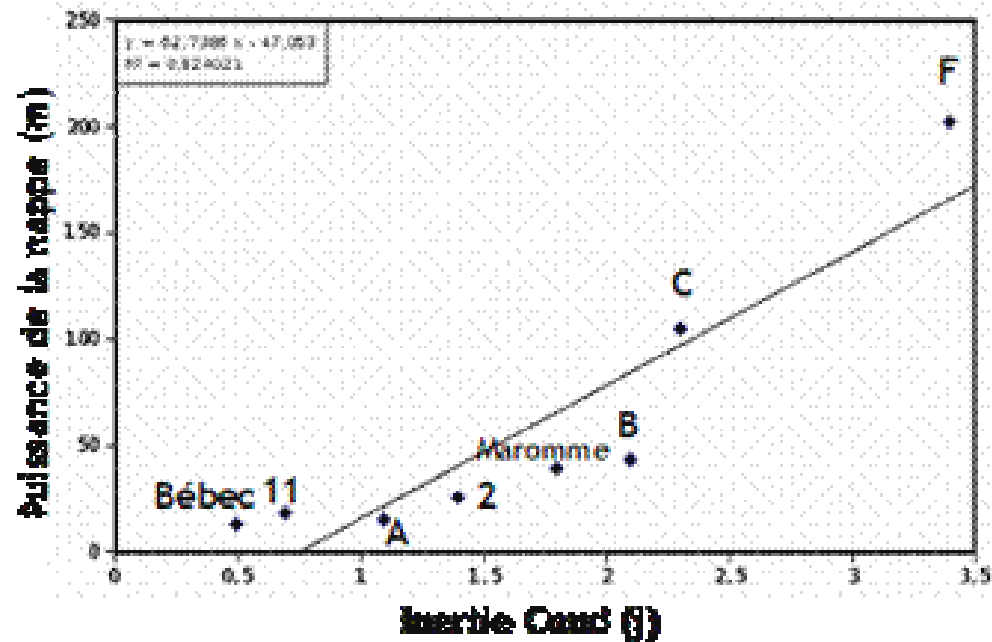
# L'influence du contexte sur la karstification et les restitutions turbides



- Suite à des épisodes pluvieux efficaces, le suivi de la qualité des eaux des exutoires karstiques (Fig.3) montre une baisse de la conductivité électrique (apports dissous), qui traduit l'apport d'eaux de surface peu minéralisées et, une montée de turbidité (apports particuliers).
- Les réponses hydrologiques sont plus ou moins rapides et longues et ces types de réponse dépendent largement du contexte hydrostructural.

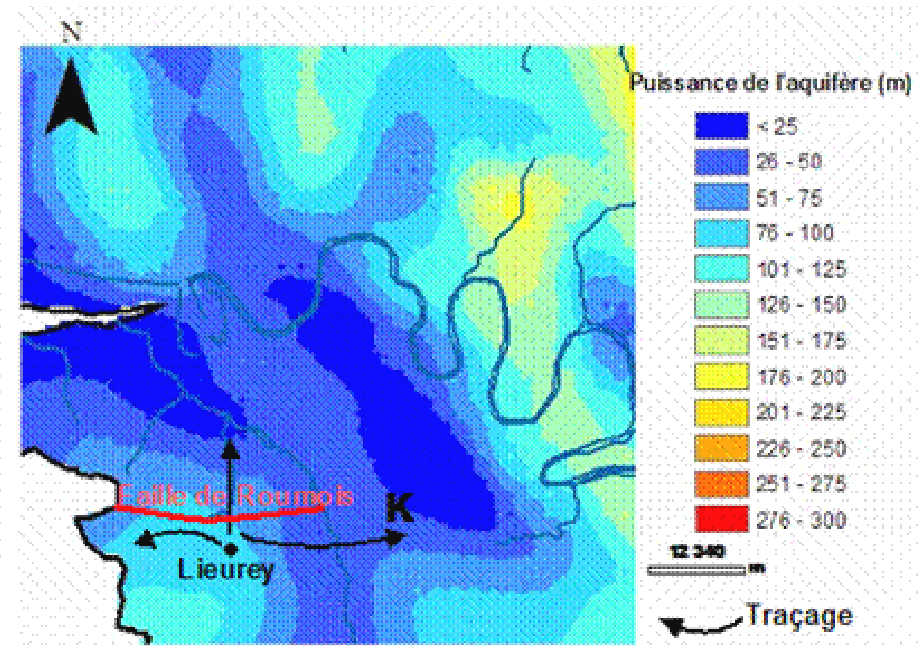
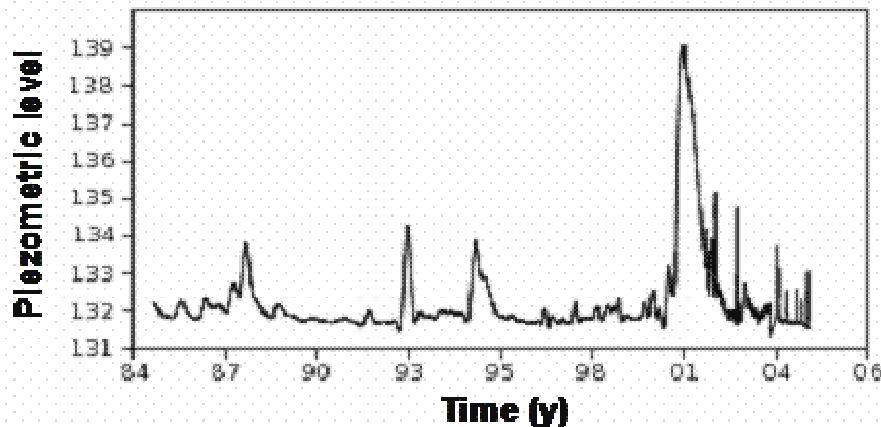
# L'influence du contexte sur la karstification et les restitutions turbides

- La durée des réponses hydrologiques et, des épisodes turbides associés, aux épisodes pluvieux, sera d'autant plus longue que la puissance locale de l'aquifère est plus importante.
- Pour les exploitants, c'est un aspect fondamental pour prévoir la durée des périodes de vulnérabilité de la qualité des ressources en eau en fonction des événements pluvieux efficaces.



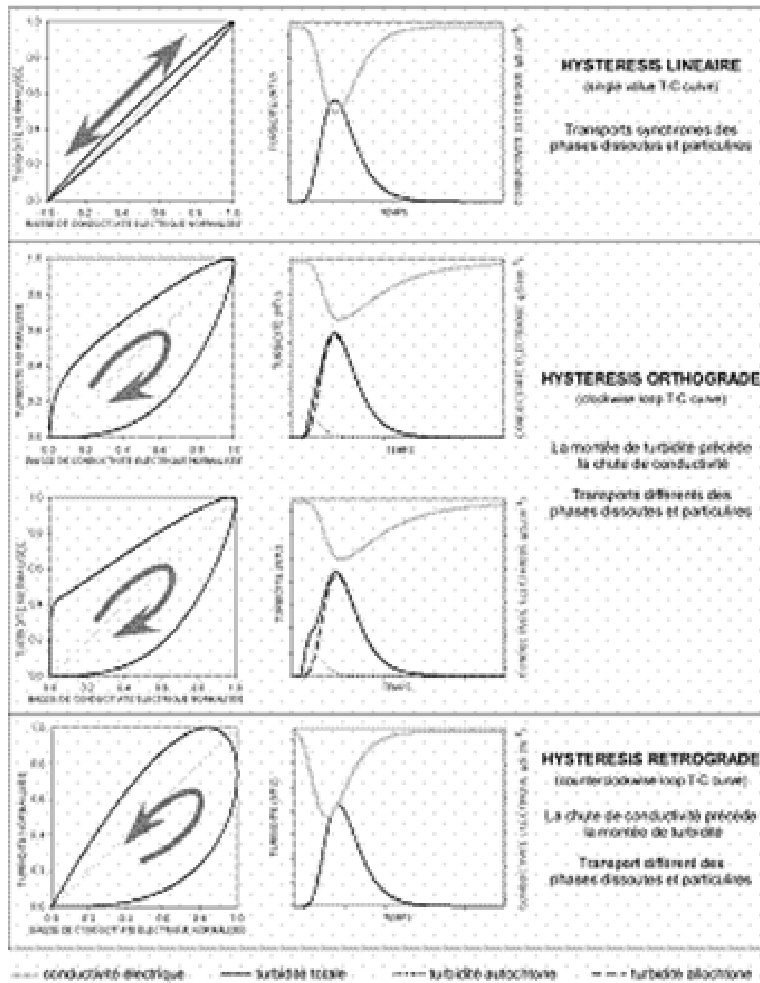
# L'influence du contexte sur la karstification et les restitutions turbides

- Les réponses hydrologiques rares mais fortes et symétriques du site K (fiche Turbidité), suggèrent un système de conduits tributaires d'un seuil hydrologique du système karstique. Cette interprétation est confortée par la chronique du piézomètre de plateau le plus proche : Lieurey. Bien qu'en situation de zone de recharge en plateau, la chronique piézométrique n'enregistre pas de réelles fluctuations pluriannuelles mais des réponses hydrologiques annuelles plus ou moins fortes avec des réponses de courtes durée, comme les épisodes pluvieux).



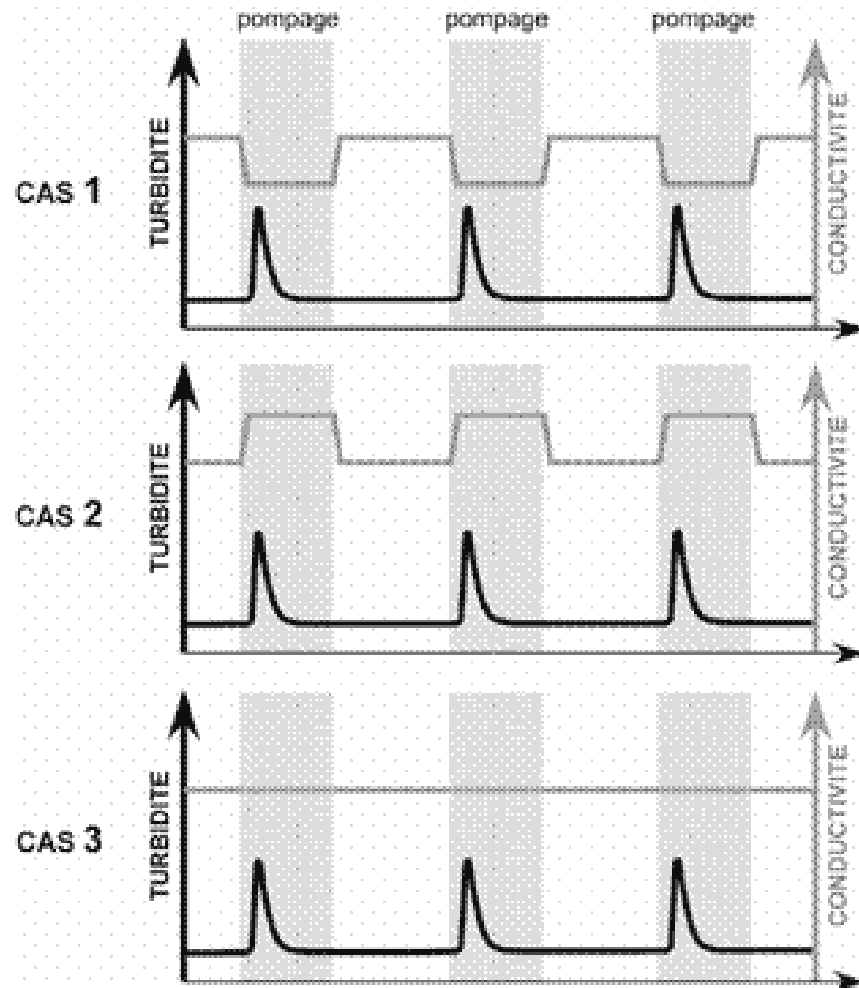


# L'influence du contexte sur la karstification et les restitutions turbides



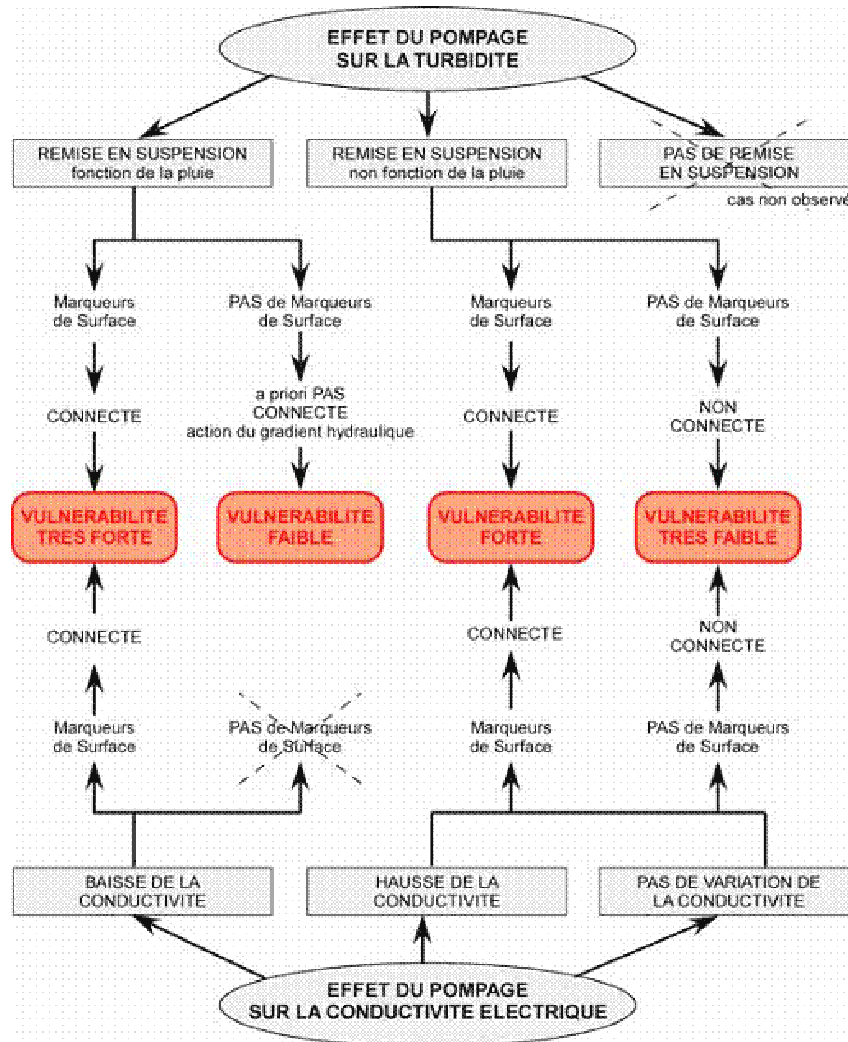
- La réalisation d'hystérésis turbidité-conductivité électrique est une méthode pour décrire la dynamique des transports dissous et particulaires : transport direct (hystérésis linéaires), remise en suspension intrakarstique-transport direct-décantation (hystérésis rétrogrades) et, pic des apports dissous de surface avant l'arrivée des apports particulaires de la surface (hystérésis orthogrades). Ces hystérésis témoignent donc des processus de transport direct, d'érosion et de dépôt qui affectent les particules au sein de leur transit dans les conduits karstiques.

# L'influence de l'exploitation sur la vulnérabilité de la ressource



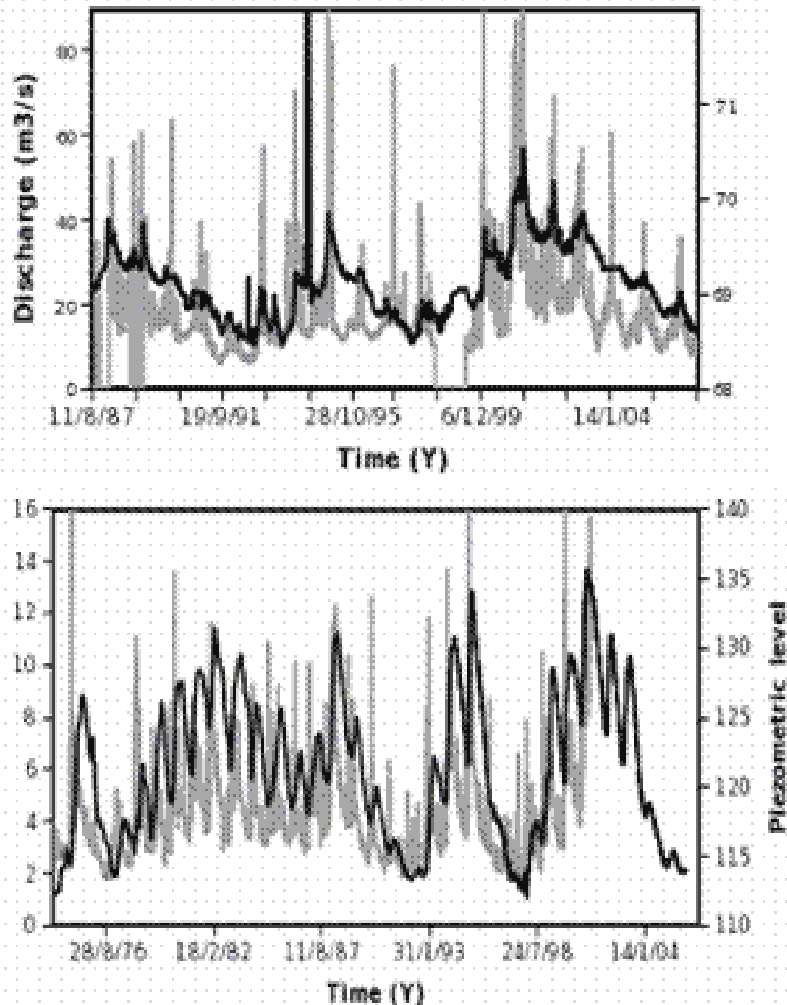
- La mise en route du pompage se traduit par une hausse de turbidité, le plus souvent en début de pompage, mais parfois sur toute la durée de l'exploitation. C'est l'augmentation des vitesses de transport provoquée par le pompage qui implique la remise en suspension du matériel intra-karstique disponible dans le réseau de conduits ou dans la fracturation, ce qui provoque des pics de turbidité.
- En ce qui concerne la phase dissoute (représentée par la conductivité électrique), les réponses sont différentes d'un système à l'autre. En effet certains systèmes ne montrent aucune variation d'autres, une augmentation ou encore une baisse de la conductivité électrique en période de pompage.

# L'influence de l'exploitation sur la vulnérabilité de la ressource



- Certains sites ont démontré leur fortes vulnérabilité vis à vis des contaminations de surface de par leur réponses aux forçages climatiques que constituent les épisodes pluvieux. A ceux-là doivent s'ajouter des systèmes non réactifs aux pluies dont la vulnérabilité peut être évaluée par l'étude de leur réactivité au pompage et notamment les variations de la conductivité électrique dont une synthèse est proposée. Indépendamment des manifestations d'une connexion plus ou moins active avec la surface, cette réactivité indirecte aux pluies est à associer à l'influence des pluies sur les gradients hydrauliques de l'aquifère.

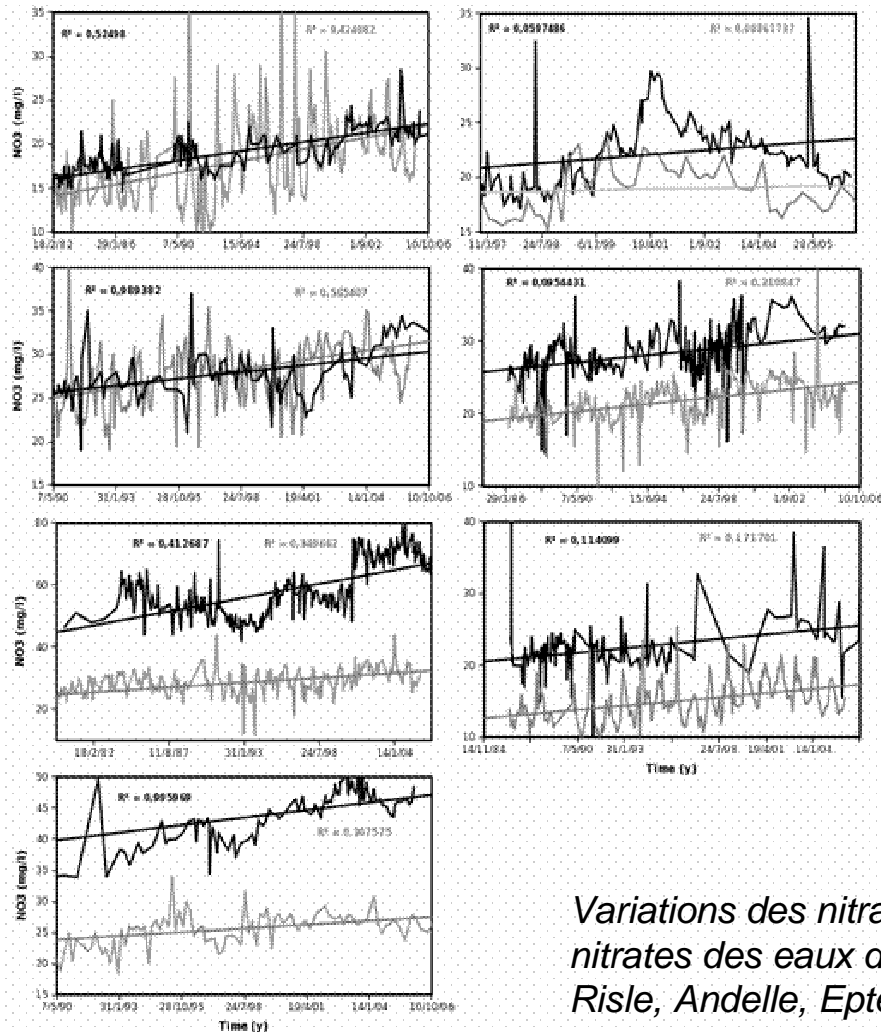
# La problématique des nitrates



- Nous focalisons sur 2 bassins versants : l'Eure qui subit une influence des apports d'Eure et Loir et l'Andelle, au Nord de la Seine, qui est exempte des apports d'Eure et Loir.
- Dans les 2 cas, nous observons une assez bonne relation entre les chroniques pluriannuelles de piézométrie du bassin versant et de débit des rivières (Figure 2) ce qui rappelle que le cycle hydrologique des rivières est hérité du cycle hydrologique de l'aquifère de la craie.

*Comparaison des chroniques de piézométrie (en noir, échelle à droite en m NGF) et de débit des rivières (en gris, échelle à gauche en m3s-1) dans les bassins versants : Eure, en haut, Andelle, en bas.*

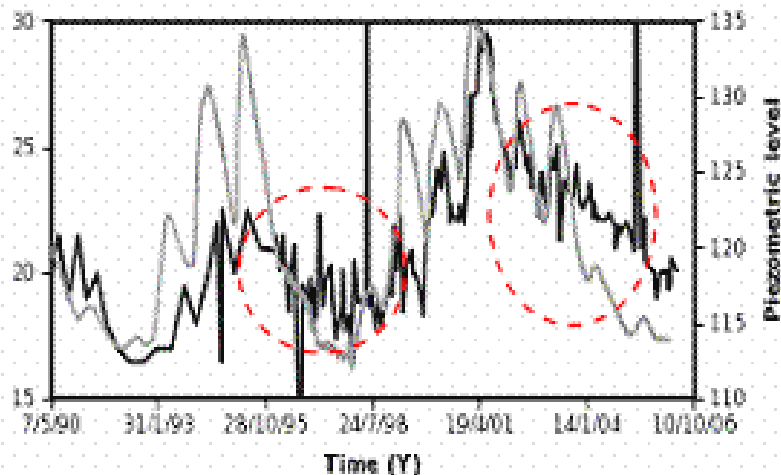
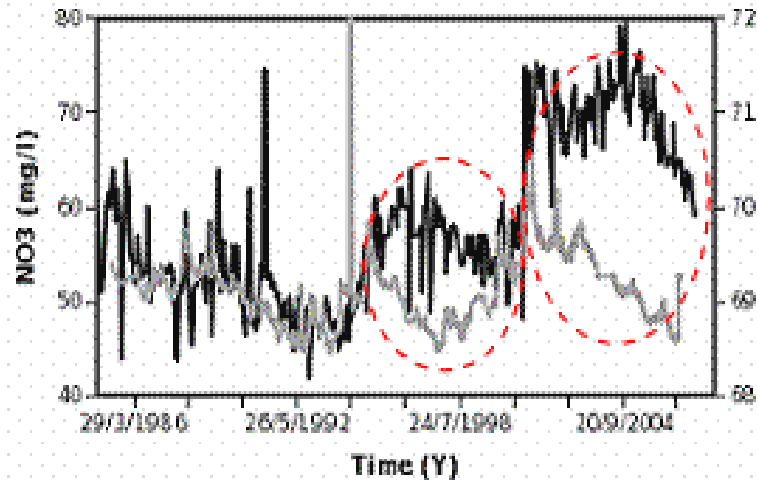
# La problématique des nitrates



- La comparaison de chroniques de teneurs en nitrates dans les eaux souterraines et les eaux des rivières de 7 bassins versants de Haute Normandie montre des tendances évolutives à une augmentation des teneurs en nitrates avec, des niveaux de concentration généralement plus élevés dans les eaux souterraines par rapport aux eaux de rivière.

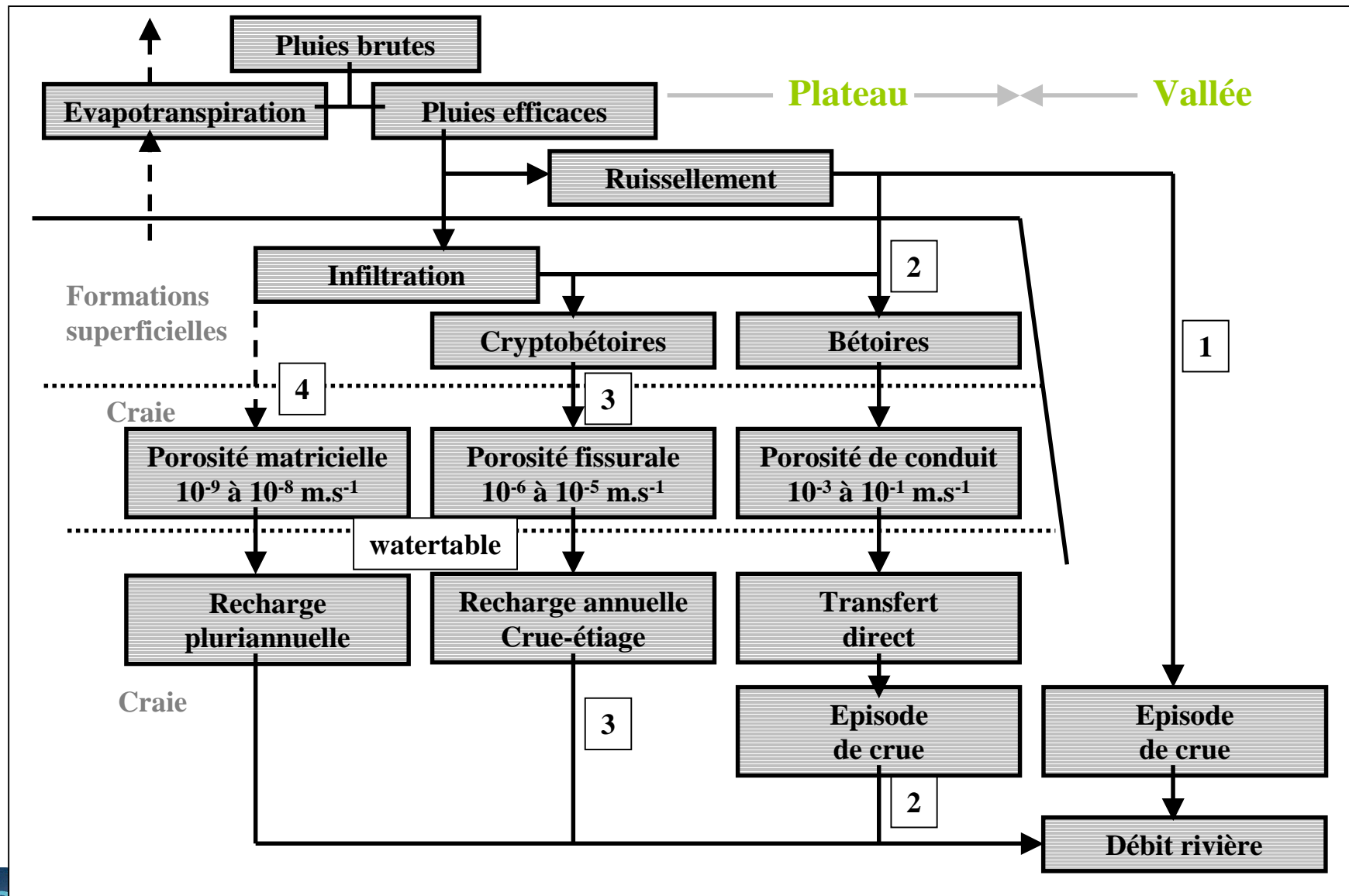
*Variations des nitrates des eaux souterraines (en noir) avec les nitrates des eaux de rivière (en gris) dans les bassins versants : Risle, Andelle, Epte, Austreberthe, Eure, Arque et Durdent.*

# La problématique des nitrates



- La confrontation entre les fluctuations des teneurs en nitrates des eaux souterraines et celles des niveaux piézométriques montre qu'il n'y a pas une réelle corrélation entre les teneurs en nitrates et la piézométrie. Nous constatons, en revanche, que l'augmentation des teneurs moyennes en nitrates s'observent à la suite des maxima piézométriques de 1995 et de 2001.
- En conclusion, le stock de nitrates serait contenu dans la zone vadose (zone non saturée de l'aquifère), en particulier dans la zone capillaire située au dessus de la zone saturée ce qui permet une restitution accrue de nitrates, à la suite de la remontée des niveaux piézométriques. La restitution étalée sur plusieurs années au cours de la récession hydrologique suggère que les stocks anciens de nitrates seraient contenus, lessivés et circulent dans la porosité fissurale (perméabilités de l'ordre de  $10^{-4}$  m.s<sup>-1</sup> à  $10^{-6}$  m.s<sup>-1</sup> soit des vitesses de transfert de l'ordre de quelques mètres par mois)

Comparaison des chroniques de piézométrie (en gris, échelle à droite en m NGF) et de teneurs en nitrates des eaux souterraines (en noir, échelle à gauche en mg.l<sup>-1</sup>) dans les bassins versants : Eure, en haut, Andelle, en bas



# Merci de votre attention

- Cette synthèse a été réalisée à la faveur des études financées par l'Agence de l'Eau Seine Normandie, la Région Haute Normandie, le Département de l'Eure, de Fonds FEDER et du soutien Etat-Région dans le cadre du CPER.
- Elle repose sur les données acquises dans le cadre des travaux des thèses de : N. Masséi, L. Dussart-Baptista, D. Valdès, M. Fournier, A. Jardani, S. Slimani et, des thèses en cours de J. Brown et J. Raux et, des publications internationales de l'équipe d'hydrologie de l'UMR 6143 de l'Université de Rouen :



Jean-Paul Dupont, 10/09/09

