

Eco-hydrologie des zones humides tourbeuses dans un contexte de changement climatique

-

L'exemple de la Réserve Naturelle Nationale de la Tourbière des Dauges

Arnaud DURANEL

EVS-ISTHME UMR 5600 CNRS / Université J. Monnet St-Etienne (France)

Wetland Research Unit, Geog. Dep., University College London (GB)

arnaud.duranel.09@ucl.ac.uk

Partenaires :



Financement :



Contexte

- Les tourbières acides:
 - Des habitats rares et menacés, un enjeu prioritaire de conservation;
 - Des services éco-systémiques importants (biodiversité, séquestration des polluants, stockage du carbone, régulation des débits (?), archives paléo-environnementales, etc.)
 - Dépendants du maintien d'une nappe superficielle dans la tourbe, notamment en été.
- Les tourbières acides du Massif Central:
 - Des milieux peu connus;
 - Une localisation à la limite sud-ouest de l'aire de distribution de ces milieux en Europe occidentale: probablement les plus à risque par rapport aux changements climatiques en cours.

Problématiques de recherche

- L'hydrologie est-elle le facteur déterminant expliquant la distribution de la végétation dans ces milieux?
 - Analyse à large échelle des corrélations entre végétation et facteurs environnementaux
- Peut-on modéliser la végétation sur la base d'un modèle hydrologique distribué?
 - Modélisation hydrologique d'une tourbière et de son BV
- Quelles seront les conséquences du changement climatique sur l'hydrologie de ces sites? Une gestion adaptative est-elle possible?
 - Analyse de scénarii au moyen du modèle hydrologique
- Quel est l'impact de ces milieux sur les débits en aval?
 - Analyse de scénarii au moyen du modèle hydrologique

La thèse a essentiellement visé à développer un modèle hydrologique de la tourbière et de son bassin versant, permettant de travailler sur les 3 points encadrés en rouge.

Impact du changement climatique: le modèle est calibré et validé sur les observations météorologiques (précipitations et évapotranspiration) actuelles, puis forcé avec les données climatiques issues des modèles climatiques régionalisés pour l'époque de référence et pour le futur, ce qui permet de prédire l'impact sur les flux d'eaux dans le BV et la tourbière, et les niveaux moyens de nappe dans la tourbière.

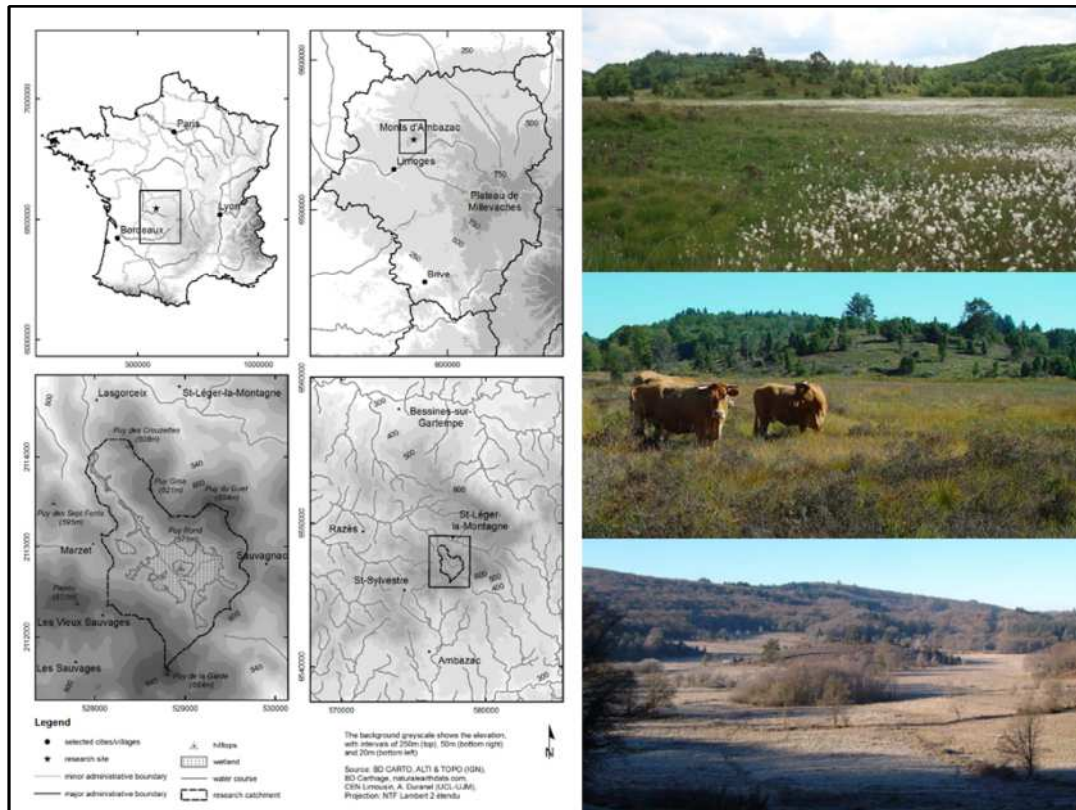
Gestion adaptative du bassin versant: le remplacement des boisements feuillus par des landes sèches permettrait-il de diminuer les pertes évaporatives au niveau du BV, qui devraient s'accroître avec le changement climatique, et donc d'augmenter les apports vers la tourbière? Peut-être utilisé de façon fine pour les choix de gestion sur la tourbière., mais les résultats généraux sont valides pour toutes les tourbières du Limousin, voire sur substrat de roche cristalline fissurée de façon générale.

L'impact des tourbières sur les débits en aval a surtout été évalué en comparant les hydrogrammes enregistrés à l'aval de BV considérés comme identiques sauf pour la présence de ZH. Or, comment expliquer cette différence si les BV sont identiques? Comment attribuer les différences observées à la présence de la zone humide et non aux caractéristiques générales du BV? La seule expérience scientifiquement correcte pour évaluer cet effet (pour autant que la météo soit constante tout au long de l'expérimentation) serait « d'enlever » la zone humide, ce qui est évidemment problématique! La modélisation du BV et de la zone humide permet en théorie

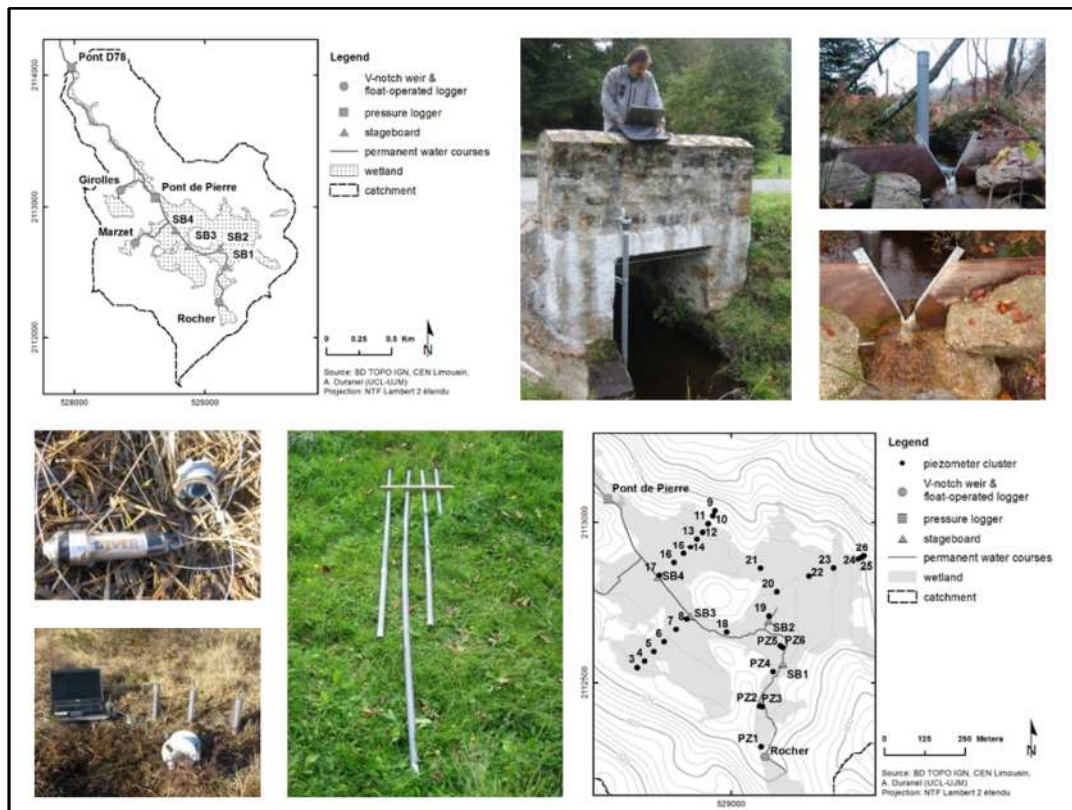
d'effectuer cette expérience de façon virtuelle.

Le modèle MikeSHE a été choisi parce qu'il est distribué (permettant une modélisation des débits et des niveaux piézométriques en tout point du BV et de la tourbière) et à base physique (donc en théorie plus robuste pour l'extrapolation au-delà des conditions climatiques rencontrées au cours de la calibration et de la validation).

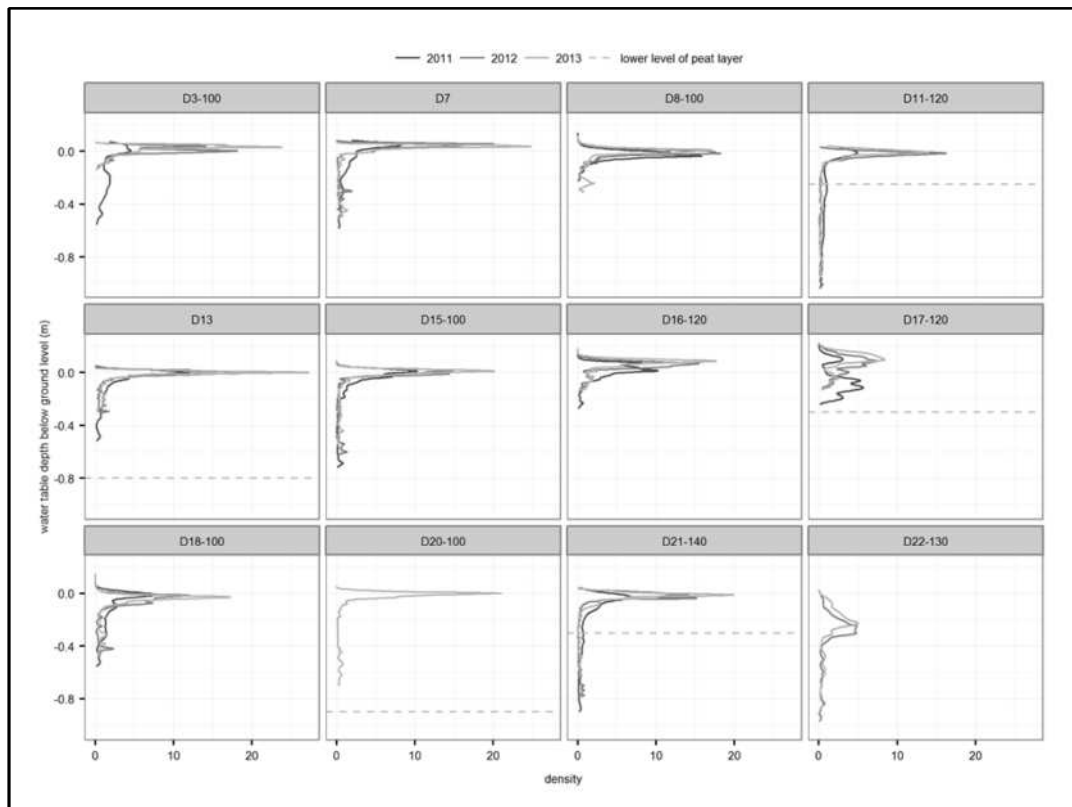
Mais ce choix a un coût: de très nombreux paramètres doivent être renseignés et/ou calibrés. Un très gros travail de collecte de données a donc été nécessaire.



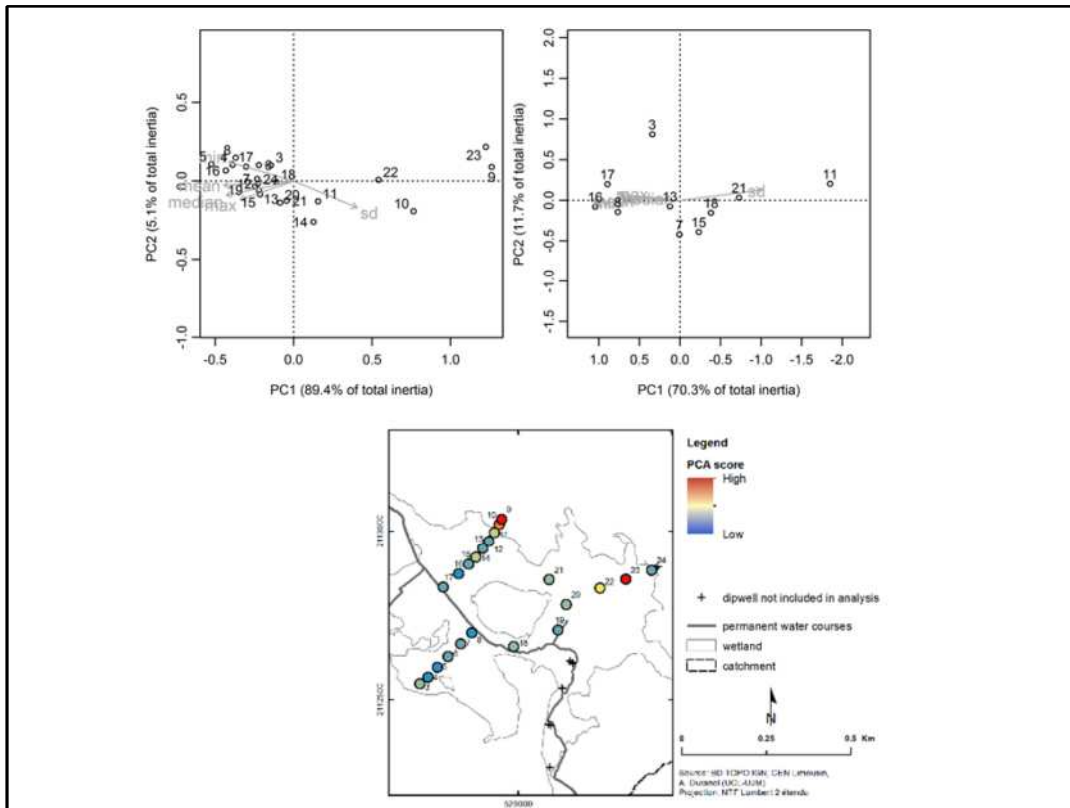
La tourbière des Dauges a été choisie comme site d'étude essentiellement pour des raisons pratiques (présence de personnel sur place en permanence pouvant assurer un suivi régulier du matériel) et d'intérêt des résultats en terme de choix de conservation de ce site classé RNN et Natura2000. Elle est certes localisée à une altitude légèrement inférieure à la majorité des tourbières limousines, mais son fonctionnement hydro-géologique est a priori similaire: sur substrat granitique, en position de fond d'alvéole.



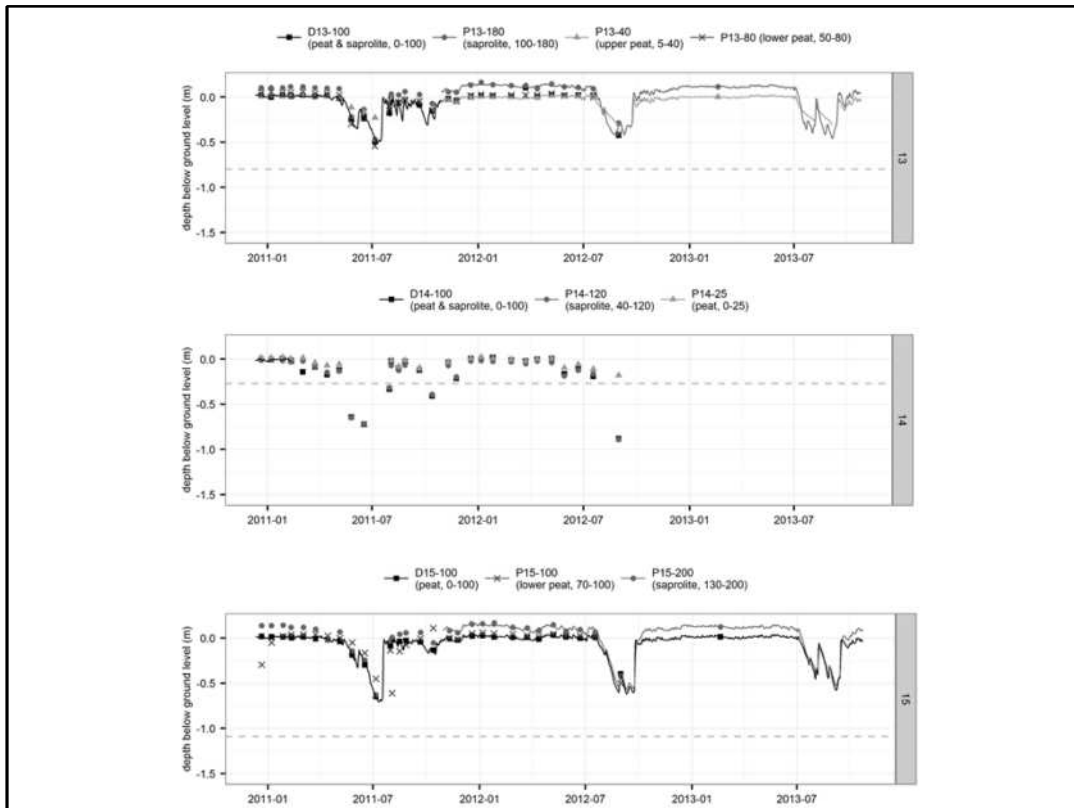
Le premier travail effectué a été d'installer et d'entretenir un réseau de suivi météorologique (précipitations et évapotranspiration potentielle), hydrologique (débits des ruisseaux entrant et sortant de la tourbière, en haut) et piézométrique (niveaux de nappe dans la tourbe, niveaux piézométriques dans les formations minérales sous-jacentes, en bas). Pour évaluer les flux verticaux entre la tourbe et les formations minérales sous-jacentes, des « nids » de piézomètres ont été installés à plusieurs profondeurs. Une quinzaine de piézomètres ont été équipés d'enregistreurs automatiques. « Automatique » ne veut pas dire qu'il n'y a pas besoin de moyens humains sur site, au contraire! Les enregistreurs piézométriques ont par exemple montré des dérives allant jusqu'à 20cm sur deux ans. Des contrôles manuels réguliers sont donc indispensables pour pouvoir corriger les données a posteriori, d'où l'intérêt d'une collaboration gestionnaire (sur place) / chercheur (toujours trop loin!). Le suivi sur les Dauges a duré un peu moins de trois ans, avec un nombre non négligeable de données manquantes liées aux contraintes des suivis en tourbière. Faute de moyens financiers et techniques, il n'a malheureusement pas été possible de suivre les niveaux piézométriques à plus grande profondeur dans le granite du bassin versant, on va voir que cela aurait été très utile pour mieux quantifier les flux entre le BV et la tourbière.



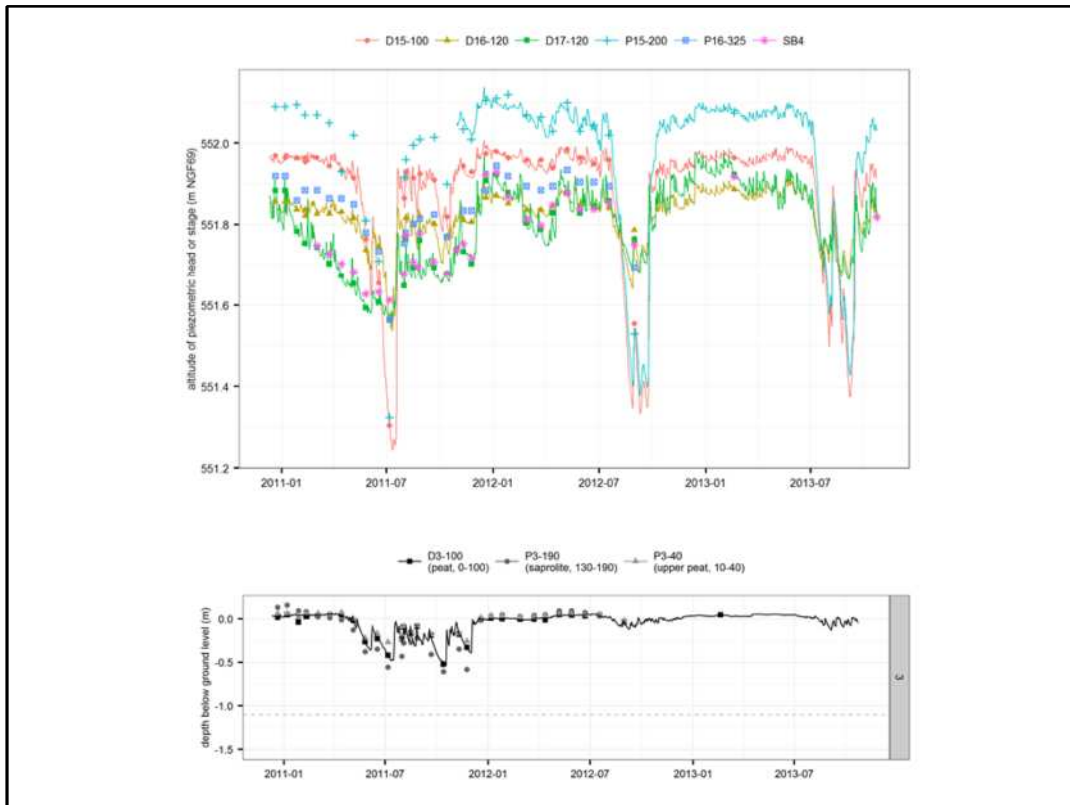
Ce graphique montre la distribution au cours de l'année des niveaux de nappe dans la tourbe, pour les piézomètres équipés d'enregistreurs automatiques. La nappe est affleurante pendant la majeure partie de l'année, à l'exception des 2-3 mois les plus chauds, et ne descend pas en dessous de 0.4-0.8m. Deux piézomètres ont un comportement un peu différent: le D17, qui est influencé par le ruisseau comme on va le voir, et le D22, où la nappe est plus profonde et plus variable qu'ailleurs (cf ci-après).



Les deux graphiques en haut sont issus d'une analyse en composante principale des niveaux de nappe dans la tourbe (à gauche: relevés manuels, à droite: relevés automatiques). En bref, l'ACP permet de résumer sur un graphique en deux dimensions les comportements des piézomètres (les données ayant autant de dimensions que de dates d'enregistrement). Plus les piézomètres sont proches sur le graphique, plus ils ont un comportement semblable, notamment en terme de profondeur moyenne et de variabilité de la nappe. Les statistiques descriptives telles que le minimum, le maximum, la moyenne, la médiane et l'écart-type pour chaque piézomètre ont ensuite été projetées passivement sur le graphique pour aider à l'interprétation de chacun des axes du graphique. Les deux graphiques montrent essentiellement le même phénomène: on observe de gauche à droite un gradient entre d'une part des nappes superficielles et stables et d'autre part des nappes profondes et variables. Ce gradient explique la grande majorité de la variance des données. Si on projette chaque piézomètre sur ce gradient, on obtient un score qui résume donc de la meilleure façon possible son comportement. Ces scores sont positionnés sur la carte en bas, le rouge correspondant aux nappes profondes et variables, le bleu aux nappes superficielles et stables. De façon générale, le gradient principal correspond donc à un gradient entre les piézomètres situés sur sol minéral ou en périphérie de la tourbière (avec des nappes plus profondes et plus variables) et ceux situés au centre et en aval de la tourbière (avec des nappes peu profondes et stables). On observe toutefois quelques exceptions. Le piézomètre 14 par exemple, situé entre les piézomètres 13 et 15, enregistre des niveaux plus profonds et plus variables que ceux-ci.



Ces graphiques montrent les séries piézométriques enregistrées à différentes profondeurs pour ces trois points de mesure. On voit nettement que, dans le cas des piézomètres 13 et 15, les niveaux piézométriques dans les formations minérales sous-jacentes sont supérieurs à ceux dans la tourbe et supérieurs au niveau du sol pendant la majeure partie de l'année. En été, les niveaux piézométriques dans les formations s'affaissent, et ceux dans la tourbe suivent. Ceci suggère que la nappe dans la tourbe est maintenue affleurante par un mouvement d'eau vertical depuis les formations sous-jacentes vers la tourbe, et que ce mouvement se fait assez facilement (la tourbe est relativement perméable). Ce phénomène n'existe pas ou de façon moindre au niveau du piézomètre 14 et la nappe est donc plus profonde et plus variable.



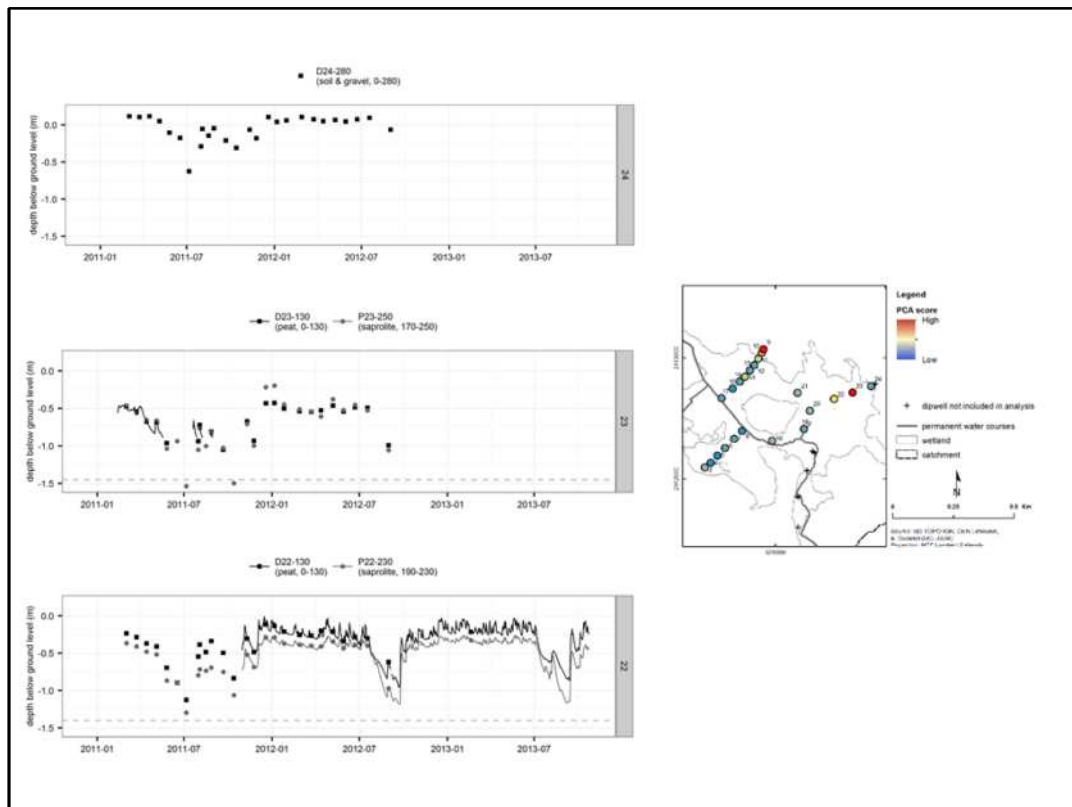
On retrouve ce phénomène sur le graphique en haut, qui montre la partie basse du transect au nord du Puy-Rond: au niveau du groupe de piézomètres 15, le niveau piézométrique dans les formations minérales sous la tourbe (P15-200) sont supérieurs au niveau du sol et au niveau piézométrique dans la tourbe (D15-100) la majeure partie de l'année. En période sèche les niveaux sont quasi-identiques.

Ce transect montre aussi que les niveaux d'eau dans la partie aval de la tourbière (D17-120 et D16-120) sont maintenus à un haut niveau en période estivale par l'infiltration d'eau du ruisseau (SB4) vers les alluvions graveleuses mêlées à la tourbe.

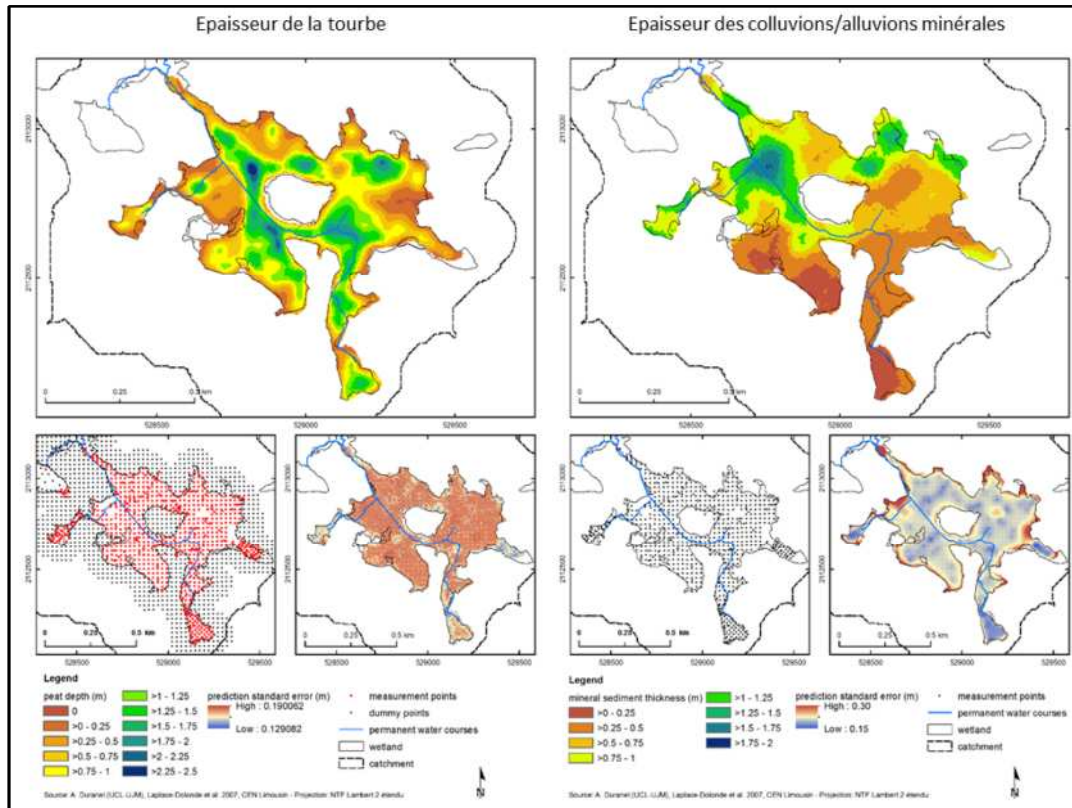
Le graphique en bas montre les niveaux piézométriques au niveau du groupe de piézomètres 3, en bordure sud-ouest de la tourbière. Celui-ci se distingue de tous les autres par des niveaux de nappe dans la tourbe plus profonds au cours de la sécheresse 2011, mais très superficiels pendant les étés suivants. On retrouve le même phénomène de gradient hydraulique vertical entre les formations minérales et la tourbe.

Malheureusement les suivis manuels des niveaux dans les formations minérales ont été arrêtés à la fin de l'été 2012, mais la seule mesure disponible pendant la période sèche 2012 montre que le niveau était haut et au même niveau que celui dans la tourbe. Au contraire, pendant la sécheresse de 2011, le niveau dans les formations sous-jacentes était inférieur à celui mesuré dans la tourbe, et bas. Cela montre donc que les niveaux dans la tourbe sont dépendants de ceux dans les formations sous-jacentes, et maintenus à un haut niveau par ceux-ci. La tourbière des Dauges est donc alimentée essentiellement par les écoulements souterrains issus du bassin versant, sauf peut-être en aval du Puy-Rond où les infiltrations depuis le ruisseau jouent un rôle important, notamment en été. Il s'agit donc bien d'une tourbière basse même si la faible minéralisation des eaux souterraines permet le développement d'une végétation

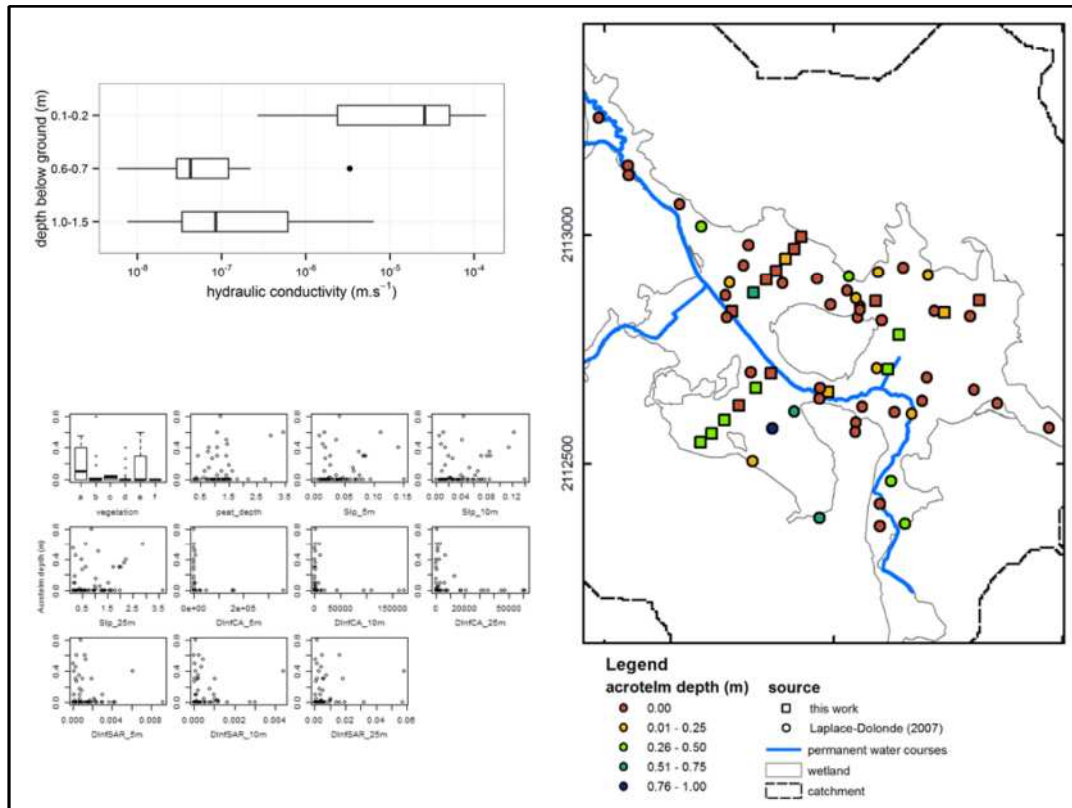
oligotrophe (« poor fen »), et même si des microtopes ombrotrophes peuvent exister de manière limitée par endroits.



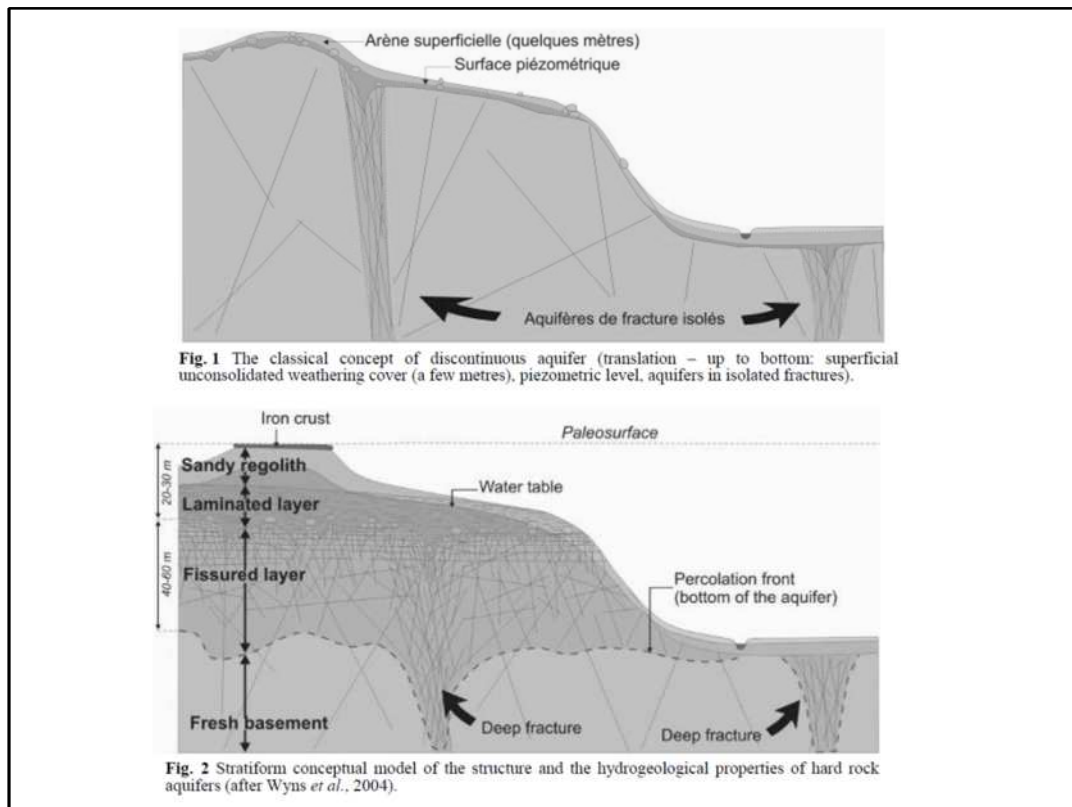
Il existe toutefois des exceptions à ces observations générales, notamment au nord-est de la tourbière (carte à droite). Les 3 graphiques à gauche montrent les niveaux piézométriques à ce niveau. Le piézomètre 24, pourtant installé en limite de tourbière dans des colluvions graveleuses, montre une nappe superficielle et stable, alors que les deux piézomètres installés en contre-bas dans une tourbe profonde ont des niveaux plus profonds et plus variables. A ce niveau la tourbe est oxydée en surface, et la végétation ne présente plus d'espèces caractéristiques des tourbières actives. Nous interprétons ces phénomènes comme la conséquence de la présence d'un réseau ancien et assez dense de rigoles sur ce secteur, ayant entraîné un affaissement progressif de la tourbe et de la nappe. Même si elles ne font que 15-30 cm de profondeur, elles ont été régulièrement entretenues et maintenues à ce niveau par rapport à la surface de la tourbe alors que celle-ci s'affaissait progressivement. A l'heure actuelle il existe une différence d'un peu plus d'un mètre entre le fond des rigoles et la tourbe environnante. Ceci témoigne de l'impact cumulé que la présence de rigoles même peu profondes mais régulièrement entretenues peut avoir à long terme sur les tourbières.



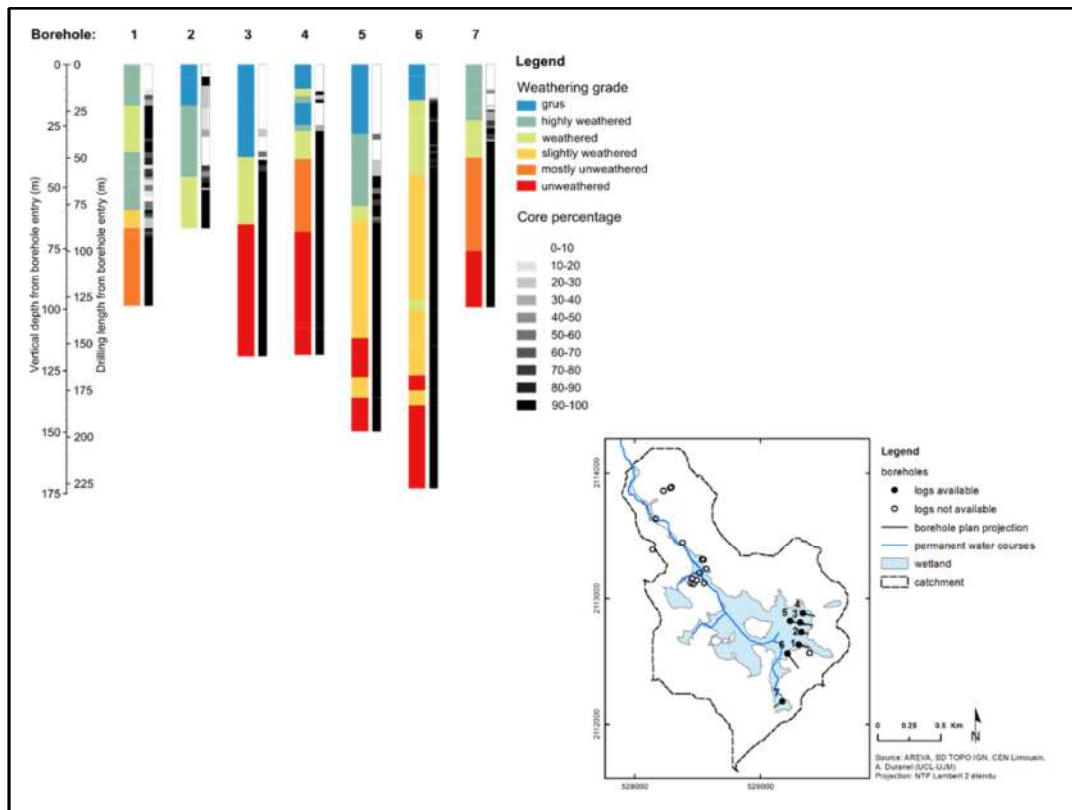
La distribution spatiale des sédiments tourbeux et minéraux a été caractérisée par carottage manuel et sondage à la tige. Le volume de tourbe est de 293000 mètres cubes, soit environ 14000 tonnes de carbone (soit l'équivalent des émissions annuelles de 7000 français). La carte de droite montre l'existence de colluvions en bas de pente au nord-est de la tourbière, ainsi que de dépôts alluvionnaires sablo-graveleux assez conséquents avant le goulot d'étranglement en sortie d'alvéole. De façon générale, on observe très souvent la présence d'alluvions et de colluvions sablo-graveleuses dans la colonne de tourbe, notamment le long des ruisseaux et en périphérie de la tourbière. Au sud par contre, la roche dure est affleurante.



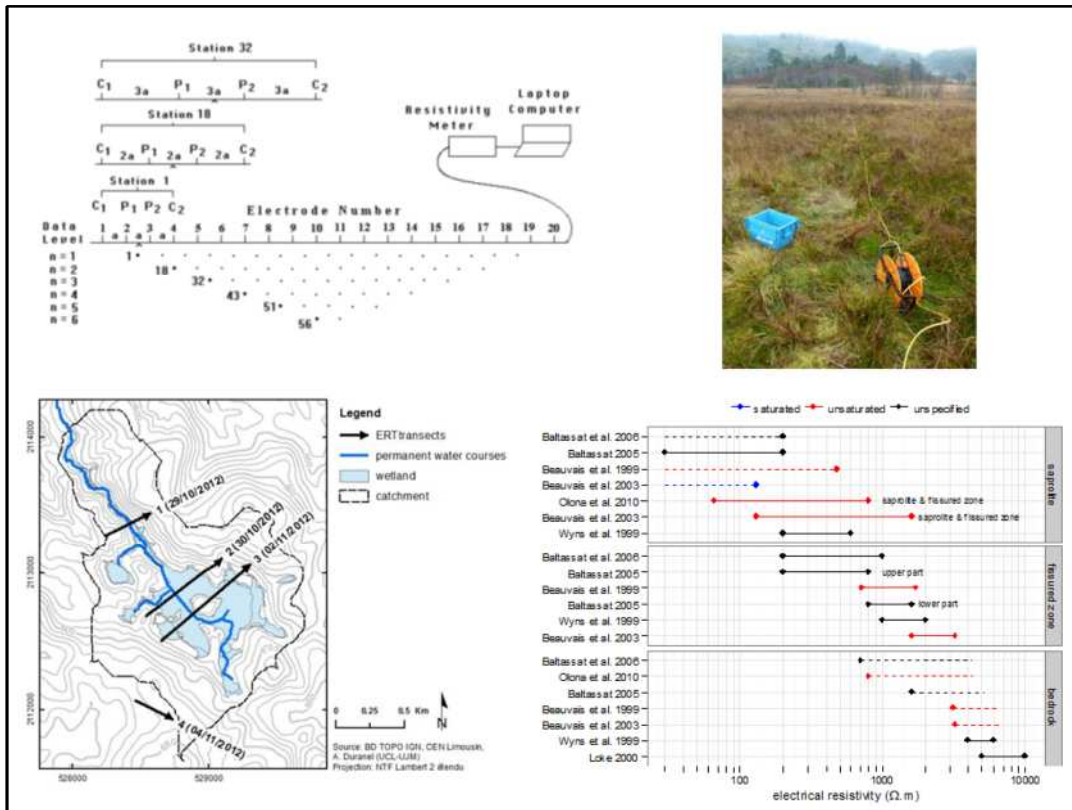
Les mesures de conductivité hydraulique (en haut à gauche) montrent l'existence de deux couches aux propriétés hydrauliques contrastées dans la tourbière: l'acrotelme (perméable, en surface) et le catotelme (moins perméable, en profondeur), en accord avec la plupart des études disponibles. Les mesures sont semblables à celles citées dans la littérature scientifique, mais la conductivité hydraulique dépend de l'échelle spatiale considérée et la méthode utilisée sous-estime la conductivité à l'échelle de la tourbière, comme montré par les séries piézométriques qui suggèrent que la couche de tourbe est, dans son ensemble, globalement perméable. Il est possible que la présence de nombreux dépôts sablo-graveleux au sein de la colonne de tourbe explique cette plus forte perméabilité à plus large échelle. La présence de « tuyaux » et de macropores permettant une circulation plus rapide de l'eau localement peut aussi être envisagée. Afin de modéliser la profondeur de l'acrotelme, nous avons tenté de corrélérer la profondeur de celui-ci (ici défini comme la profondeur maximale de tourbe peu décomposée, avec un indice de Von Post inférieur à 4, carte de droite) avec des variables explicatives potentielles (végétation, profondeur de la tourbe, pente et indices topographiques calculés à plusieurs résolutions, cf. nuages de points en bas à gauche), mais sans succès, les variations locales étant trop importantes. L'acrotelme a donc été modélisé comme une couche uniforme de 20cm d'épaisseur en s'appuyant sur les mesures de conductivité hydraulique.



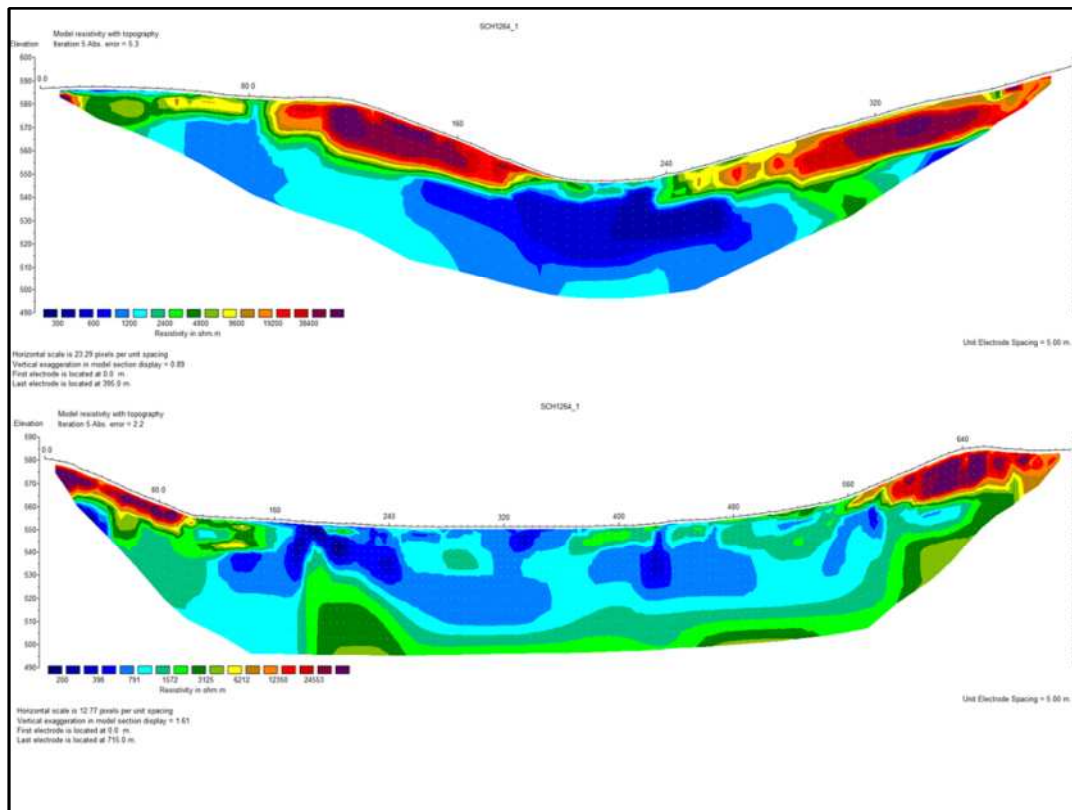
La seule présence limitée d'alluvions sablo-graveleuses sous la tourbe ne permet pas d'expliquer le gradient hydraulique vertical observé, il a donc été nécessaire de caractériser l'hydro-géologie du bassin versant. Jusqu'à récemment, le granite était considéré comme quasiment imperméable, à l'exception d'une mince couche d'arènes superficielles et de quelques couloirs de fracturation (schéma du haut). Les travaux initiés par le BRGM dans les années 1990 ont en fait montré la présence d'un véritable aquifère continu dans une zone densément fissurée de 40-60-(100)m d'épaisseur située entre le granite sain et l'arène, avec une porosité de 1-5% et une conductivité hydraulique assez forte et anisotropique (10^{-5} m/s horizontalement, 10^{-6} verticalement). Lorsqu'elle est présente, l'arène constitue la partie capacitive de l'aquifère, et la zone fissurée, la partie transmissive. Les relations hydrologiques entre BV et ZH sont donc à réviser totalement dans ce contexte, et les caractéristiques de la zone fissurée en particulier prennent une importance considérable dans le fonctionnement hydrologique de la ZH. Les tests de sensibilité du modèle hydrologique développé au cours de ce travail ont ainsi montré que les paramètres les plus importants pour expliquer à la fois les niveaux piézométriques dans la tourbe et le débit dans les ruisseaux entrant et sortant de la tourbière ne sont pas ceux décrivant la tourbe, mais ceux décrivant la zone fissurée: conductivités hydrauliques verticales et horizontales et épaisseur. La caractérisation détaillée des formations d'altération du granite sur le BV est donc primordiale.



Du fait de l'exploitation passée d'uranium sous le BV, nous disposons de quelques sondages géologiques profonds, qui ont été réinterprétés pour caractériser les formations superficielles. Ils montrent des épaisseurs d'arène très variables (0-30m) et une zone fissurée atteignant environ 40-60m (ce qui correspond à peu près à l'épaisseur habituellement citée dans la littérature). Malheureusement ces sondages ont tous été effectués à l'est de la tourbière, le long d'une zone fracturée uranifère, et ne peuvent pas être considérés comme représentatifs de l'ensemble du BV.



Nous avons donc utilisé la tomographie de résistivité électrique, qui permet de mesurer la résistance des formations du sous-sol au passage d'un courant électrique. Cette résistance peut être en partie corrélée au degré d'altération de la roche (synthèse bibliographique en bas à droite). 4 transects ont été réalisés.

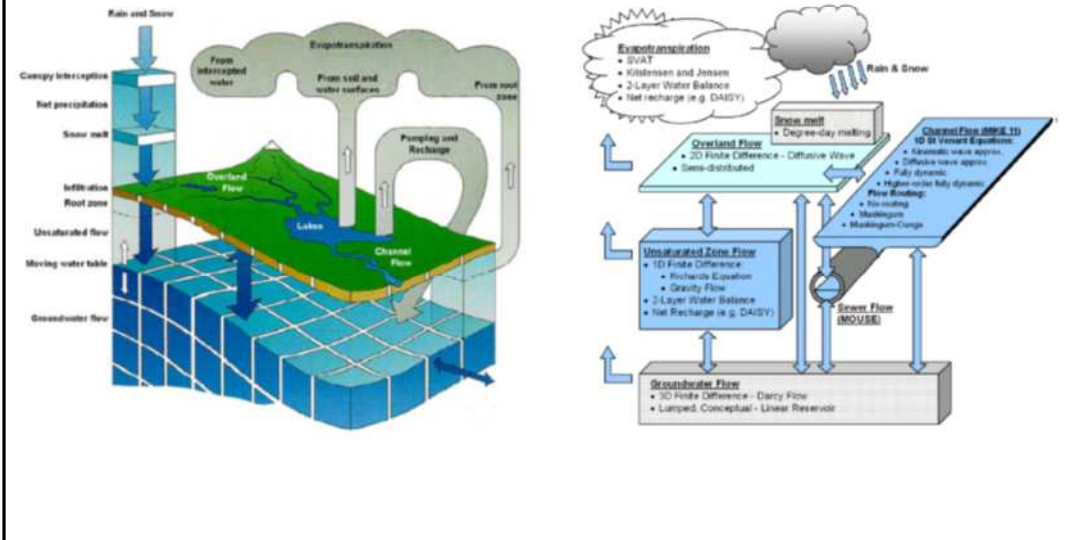


Ces deux graphiques montrent les profils de résistivité à l'exutoire de la tourbière (en haut) et dans la partie aval de la tourbière (en bas). La résistivité estimée est représentée par une échelle de couleurs, du bleu foncé (peu résistif) au rouge foncé (très résistif). L'aspect le plus frappant est la très forte baisse de la résistivité avec la profondeur notamment sur les pentes (traverse en haut), alors qu'on en attendrait le contraire (les formations plus altérées sont en général plus conductrices). Ceci s'explique par le fait que la quasi-intégralité du profil coupe au travers de la zone fissurée. En surface, les fissures sont remplies d'air (très résistif), alors qu'en profondeur elles sont saturées (plus conductrices). La limite entre le bleu-vert et le jaune-rouge correspond à la surface de la nappe. On a donc bien un aquifère d'au minimum 50-55m de profondeur. Les points où celui-ci coupe la surface correspondent exactement aux limites de la tourbière, ce qui témoigne encore une fois du fait que la tourbière est alimentée par l'aquifère. Le granite sain n'est (peut-être) atteint que par endroits dans la partie inférieure du transect du bas, 50 à 55m sous la surface.

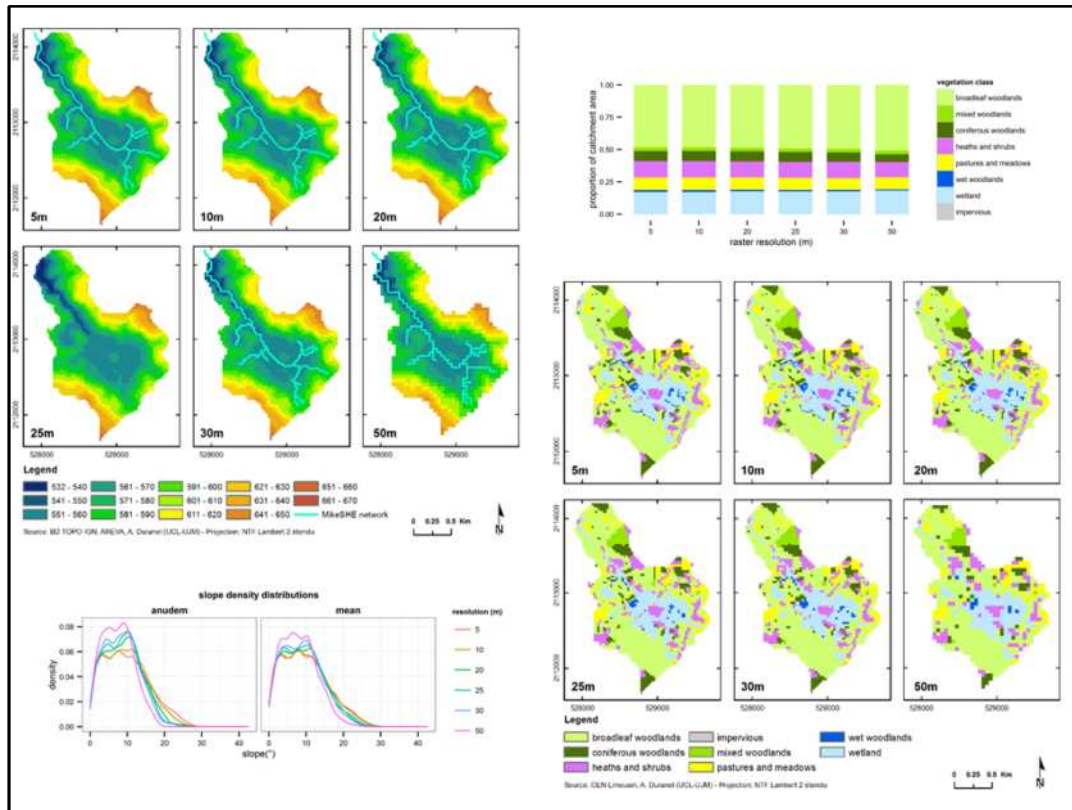
En haut à gauche, on voit une mince couche plus conductrice sur le replat en haut de colline, qui correspond à une mince couche d'arène (1-2m maximum). C'est le seul endroit où l'arène a pu être détectée sur ce transect. Elle est également totalement indétectable (et donc d'une épaisseur inférieure à environ 1m) sur tous les autres transects, notamment sur celui effectué en situation de replat sur un sommet périphérique. La couche de tourbe n'est pas assez épaisse pour être visible ici (elle l'est sur un autre transect). Il n'est malheureusement pas possible de se prononcer avec certitude sur la présence ou non de quantités significatives d'arène sous la tourbière. On n'en voit aucune trace sur les transects, mais il est possible que la conductivité électrique de l'arène saturée soit semblable à celle du granite fissuré, auquel cas elle ne

peut pas être distinguée. Il serait nécessaire de vérifier cela par des sondages au carottier à percussion.

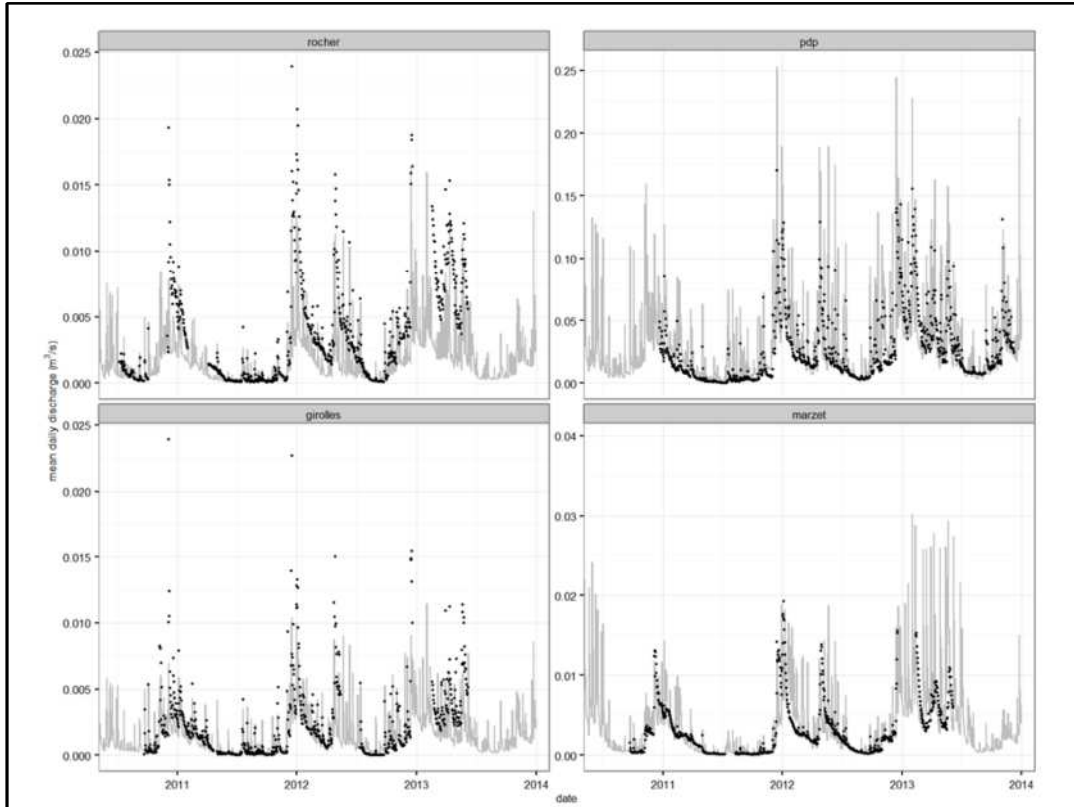
Modélisation hydrologique



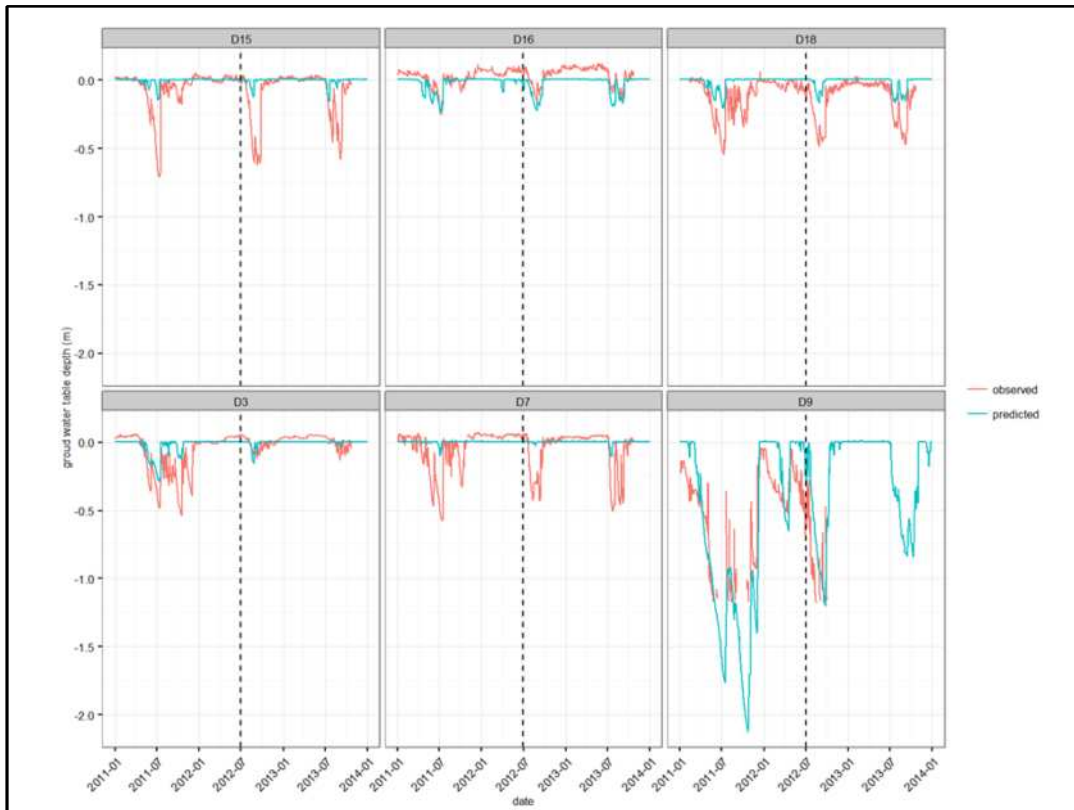
Sur la base des analyses précédentes, un modèle géologique en 3 dimensions a été construit, et a servi de base à la modélisation hydrologique. Celle-ci a utilisé le modèle MikeSHE, un modèle distribué à base physique qui permet en théorie de représenter tous les processus physiques impliqués dans le cycle de l'eau au niveau du bassin versant, et donc d'extrapoler de façon plus robuste au-delà des conditions climatiques rencontrées lors de la calibration et de la validation.



Dans les faits, il y a toujours un compromis à faire entre la précision du modèle d'une part, et la qualité des données et la puissance de calcul disponibles d'autre part. Différentes résolutions ont donc été testées. Les graphiques sur cette page montrent l'effet de la résolution du modèle sur la forme du réseau hydrographique et sur la distribution des pentes (à gauche) d'une part, et sur la distribution des classes d'usage des sols d'autre part (à droite). La contrainte principale réside dans le temps de calcul. Un modèle avec une résolution de 10m prend environ 1h40 pour modéliser 3 ans de données avec un pas de temps quotidien, alors que le même modèle avec une résolution de 30m nécessite seulement 4 minutes. La calibration des paramètres du modèle nécessitant de répéter les calculs plusieurs milliers de fois, le choix de la résolution du modèle n'est pas anodin.



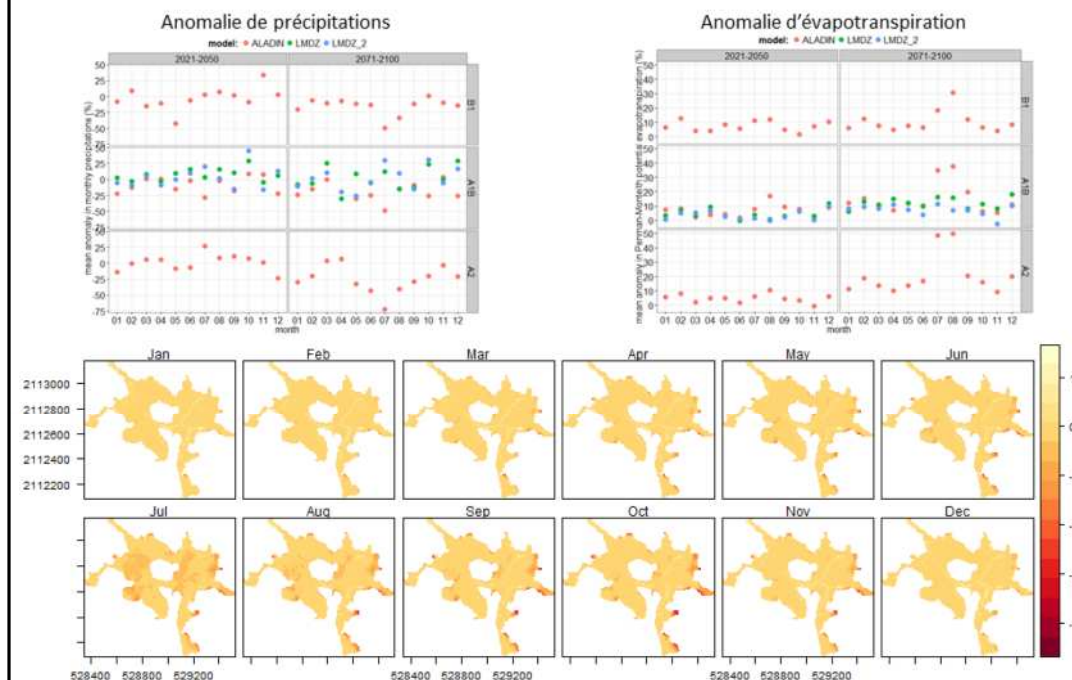
La calibration demande énormément de capacité de calcul et de temps, le modèle devant tourner plusieurs milliers de fois. Plusieurs stratégies de calibration ont été testées. Ces graphiques montrent les derniers résultats obtenus pour les débits (en gris les débits simulés, en noir les débits observés). La période de calibration s'arrête au 31/06/2012). Les résultats sont relativement corrects.



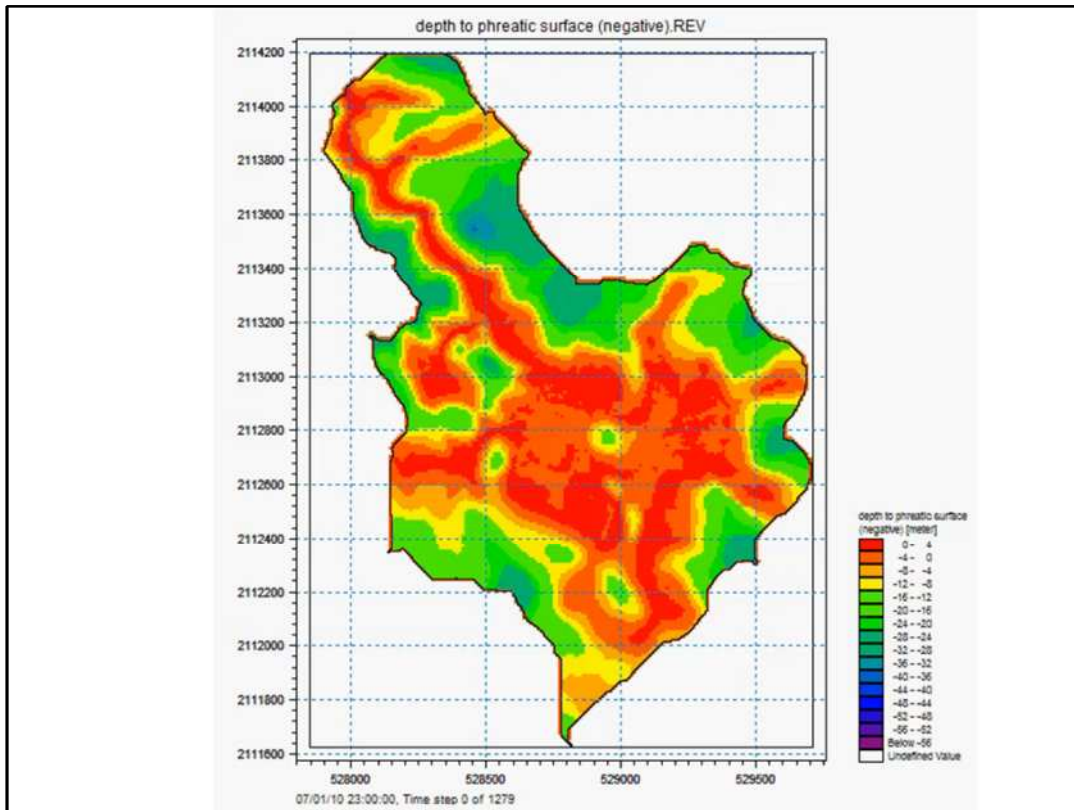
Cependant, le modèle prévoit pour l'instant une nappe trop élevée dans la tourbe, causée par un flux vertical trop important dans le fond de l'alvéole. Une nouvelle stratégie de calibration est actuellement testée pour essayer de régler ce problème.

Changements climatiques

Données expérience SCAMPEI pour le secteur des Dauges



Une fois le modèle calibré et validé de manière satisfaisante, l'objectif est de le forcer avec des séries de précipitations et d'évapotranspiration issues des derniers modèles climatiques disponibles. Par exemple, les deux graphiques du haut montrent les anomalies de précipitations et d'évapotranspiration (Penman-Monteith FAO) attendues pour le secteur des Dauges par rapport à la période de référence 1961-1990 selon l'expérience de descente d'échelle SCAMPEI, disponibles avec une résolution spatiale de 8km et un pas de temps quotidien. L'expérience SCRATCH08 a utilisé une autre méthode de descente d'échelle basée sur les types de temps et les données disponibles seront également utilisées. Ces données ont un pas de temps quotidien et peuvent être directement utilisées pour forcer le modèle hydrologique et calculer des statistiques décrivant les caractéristiques moyennes de la nappe dans la tourbe sur les périodes 2021-2050 et 2071-2100, en tout point de la zone humide (cartes du bas, données pour l'instant uniquement à titre d'illustration, le modèle n'ayant pas encore été calibré et validé de manière satisfaisante). Ces cartes permettront aux gestionnaires d'identifier de façon fine les secteurs les plus à risque et de prendre en compte les changements climatiques dans leurs choix de gestion. Les prévisions pourront être affinées relativement aisément au fur et à mesure de l'amélioration des modèles climatiques.



Vidéo montrant la profondeur de la nappe en tout point de la zone humide et du bassin versant d'après le modèle hydrologique actuel.

MERCI DE VOTRE ATTENTION.

Partenaires :



Financement :

