



Document public

Rapport d'expertise :

Avis sur les affaissements et les modifications de sols constatés à Saint-Germain-sur-Sèves (Manche)

BRGM/RP-58970-FR

Septembre 2010

Cadre de l'expertise :

Appuis aux administrations

Appuis à la police de l'eau

Date de réalisation de l'expertise : 09/2010

Localisation géographique du sujet de l'expertise : Saint Germain-sur-Sèves (50) aux lieux-dits Ferme de la Bergerie et Ferme de Bray

Auteurs BRGM : P. Ollivier, P.-Y. David

Demandeur : DDTM 50

1.89 3740.46 -625.5



Géosciences pour une Terre durable

brgm

L'original du rapport muni des signatures des Vérificateurs et Approbateurs est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Ce rapport est le produit d'une expertise institutionnelle qui engage la responsabilité civile du BRGM.

Ce document a été vérifié et approuvé par :

Approbateur : Eric Gomez 	Date : 24/09/2010
Vérificateur : Laurence Gourcy 	Date : 21/09/2010

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : expertise – appuis à la police de l'eau – affaissements – marais – Sainteny - Manche

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Ollivier P., David P.-Y. (2010) – Avis sur les affaissements et les modifications de sol constatés à Saint-Germain-sur-Sèves (50). Rapport BRGM/RP-58970-FR. 24 p., 6 ill.

Synthèse

Contexte

Date de la formulation de la demande d'expertise au BRGM : 01/06/2010

Demandeur : DDTM 50 – Service Environnement

Nature de l'expertise / question posée : Avis sur les affaissements et les modifications de sols sur les lieux dits de la Ferme de la Bergerie et de la Ferme de Bray (commune de St Germain-sur-Sèves)

Situation du sujet : Commune de St Germain-sur-Sèves (Manche)

Nature de l'intervention du BRGM : Examen sur documents

Faits constatés

Des affaissements et des modifications de sols ont été identifiés sur la commune de Saint-Germain-sur-Sèves, sur les lieux dits de la Ferme de Bray et de la Ferme de la Bergerie, dans les zones humides situées au-dessus de l'aquifère sédimentaire du sous-bassin de Sainteny.

La DDTM 50 a donc sollicité le BRGM dans le cadre de l'appui à la Police des eaux souterraines du département de la Manche afin de 1- Synthétiser les études précédemment entreprises sur ces sites ou dans un contexte environnemental similaire, 2- Identifier les causes possibles des modifications de sols observées dans les zones humides situées au-dessus de l'aquifère de Sainteny, 3- Proposer des études à engager pour déterminer l'origine de ces affaissements et 4- Cibler les actions à mettre en place pour réduire les impacts sur les sols de marais.

Recommandations du BRGM

Plusieurs études à engager conjointement pourraient permettre d'estimer la part des différents phénomènes incriminés dans les affaissements de sols observés sur la commune de St Germain-sur-Sève : 1- Cartographier précisément la tourbe, effectuer des relevés topographiques précis dans la région et recenser les zones affectées par des affaissements même mineurs, 2- Calculer les bilans hydrologiques et réaliser une étude géochimique dans les zones affectées par les affaissements et sur des sites non affectés à proximité de ces affaissements, 3- Etudier la composition chimique des sols/tourbes affectés et non affectés par ces affaissements, 4- Caractériser la structure de la tourbe et 5- Le sens des écoulements de l'eau dans cette tourbe, et 6- Mettre en place des mesures conservatoires pour assurer la pérennité de la tourbière.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Contexte géologique, hydrogéologique et hydrologique.....	8
3. Synthèse sur les études existantes.....	10
4. Diagnostic	18
5. Recommandations	20
6. Bibliographie	22

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation des sites S et G le long de la rivière Holerotte (Auterive, 2007)	10
Illustration 2 : Plan d'implantation des piézomètres dans la tourbe et les argiles, localisation du forage d'exploitation F1 et des forages d'observation des sables G et Pz4	11
Illustration 3 : Schéma des relations nappes de la tourbe / rivières sur les sites G et S durant les périodes de hautes et basses eaux au cours de la période de suivi 2003-2005 (Auterives , 2007)	12
Illustration 4 : Gradient hydraulique vertical entre les aquifères de la tourbe et des sables (Auterives , 2007).....	13
Illustration 5 : Pluies journalières (a) et fluctuation des niveaux piézométriques durant les 2 ans de suivi sur le site de référence G (b) et le site de pompage (S) en rive droite (c) et le site de pompage (S) en rive gauche (d)	14
Illustration 6 : Simulation de la charge hydraulique des sables (ligne pleine) et de la tourbe (ligne tiretée) dans le forage F1 dans des conditions variables : pas de pompage (a), situation actuelle (b), recharge accrue (c)	16

1. Introduction

Des affaissements et des modifications de sols ont été identifiés sur la commune de Saint-Germain-sur-Sèves, sur les lieux dits de la Ferme de Bray et de la Ferme de la Bergerie, dans les zones humides situées au-dessus de l'aquifère sédimentaire du sous-bassin de Sainteny, un des aquifères majeurs de l'Isthme du Cotentin. Ces aquifères font l'objet de prélèvements substantiels pour l'alimentation en eau potable du centre Manche. L'exploitation de ces aquifères pose à l'heure actuelle des questions d'ordre environnemental. Ces bassins sédimentaires sont recouverts d'une couverture holocène constituée de marais et de tourbières. L'évolution du matériau tourbeux est préoccupante. En effet, un assèchement prononcé de la tourbière de Vesly Pissot reposant sur l'aquifère exploité de Lessay dans la vallée de l'Ày a pu être observé. L'exploitation de l'aquifère est désignée par la population locale comme responsable de l'abaissement du niveau d'eau dans le marais. Cependant, jusqu'alors, aucune étude ne mettait en cause la responsabilité de l'exploitation. De plus, d'autres facteurs environnementaux et/ou anthropiques pourraient être à l'origine de cet assèchement. En effet, les pratiques agricoles (pratiques extensives de fauche et de pâtures, défrichements, labours) et les importants aménagements hydrauliques (réseau de drainage dense, aménagement des cours d'eau) exercent déjà une forte contrainte sur le milieu. L'évolution climatique pourrait également jouer un rôle dans l'abaissement du niveau du marais.

La DDTM 50 a donc sollicité le BRGM dans le cadre de l'appui à la Police des eaux souterraines du département de la Manche afin de 1- Synthétiser les études précédemment réalisées sur ces sites ou dans un contexte environnemental similaire, 2- Identifier les causes possibles des modifications de sols observées dans les zones humides situées au-dessus de l'aquifère de Sainteny, 3- Proposer des études à engager pour déterminer l'origine de ces affaissements et 4- Cibler les actions à mettre en place pour réduire les impacts sur les sols de marais.

Les données présentées dans les paragraphes 2 et 3 sont des données bibliographiques issues d'études existantes.

2. Contexte géologique, hydrogéologique et hydrologique

Les zones affectées par les affaissements et les modifications de sols sont localisées sur les lieux-dits de la Ferme de Bray et de la Ferme de la Bergerie, dans les zones humides situées au-dessus de l'aquifère de Sainteny, au cœur du bassin sédimentaire de Sainteny-Marchésieux, le plus étendu (135 km²) et le plus épais (250m) des cinq bassins aquifères de l'isthme du Cotentin. C'est un bassin d'effondrement, à remplissage sédimentaire néogène et quaternaire, à structure en hemi-graben basculé vers le sud.

Le bassin du Centre-Cotentin est un domaine subsidient où s'accumulent d'épais dépôts sableux plio-pléistocènes au sein de petits grabens kilométriques (Baize, 1998; Dugué et al., 2000; Lagarde et al., 2000 ; Dugué, 2003) constituant à l'heure actuelle des réserves aquifères d'un intérêt majeur et exploitées pour l'alimentation en eau potable.

Les sols de marais sont limono-argileux en surface, très organiques, de couleur gris foncé fortement tachée de rouille. Ils reposent sur des horizons tourbeux très épais et gorgés d'eau. L'hydromorphie y est permanente et l'épandage inapte.

Les tourbières du Cotentin constituent une partie de la couverture holocène recouvrant les bassins sédimentaires au remplissage marin plio-pléistocène. De nombreux sondages ont mis en évidence une couche d'argile bleue plastique sous la tourbe (Elhaï, 1963). Ces argiles caractérisées par diffractométrie aux rayons X sont constituées essentiellement de chlorite et d'illite.

Les affaissements de sols s'observent dans les tourbières alors que les sols sableux, n'étant pas affectés par ces affaissements, apparaissent dans le paysage en relief comme des bosses.

Les tourbières dans les marais du Cotentin ne sont plus actives exception faite de quelques zones localisées. Des aménagements hydrauliques importants (régulation des cours d'eau, dense réseau de drainage) montrent une forte anthropisation des marais. Cependant il a été suggéré jusqu'alors que les tourbières ont évolué en équilibre avec les activités humaines et ont ainsi préservé une riche biodiversité.

La tourbière est principalement alimentée par les précipitations. Cependant, il apparaît que les eaux sont fortement minéralisées avec un faciès carbonaté calcique. Cette tourbière minérotrophe aurait été alimentée par des flux souterrains venant de l'aquifère sous-jacent dans une période antérieure à la mise en exploitation de la nappe.

La nappe de la tourbe se décrit en deux horizons bien distincts directement dépendants des caractéristiques hydrologiques de la tourbe :

- un horizon supérieur : l'acrotelm. Il est situé dans la zone de battement de la nappe où l'alternance des conditions oxydantes/réductrices favorisent les processus d'oxydation/réduction des éléments N et S et la minéralisation de la matière organique,
- un horizon profond : le catotelm. Les faibles perméabilités de ce niveau favorisent des circulations lentes associées à une saturation permanente du milieu, les conditions sont plus réductrices.

Les zones affectées par les affaissements et les modifications de sols sont localisées sur la commune de Saint-Germain-sur-Sèves, sur les lieux-dits de la Ferme de Bray et de la Ferme de la Bergerie, à 1,7 km à l'Ouest et à 600 m au Sud-ouest respectivement des forages F1 et F4 du SYMPEC.

Les forages du SYMPEC sont localisés dans le sous-bassin néogène de Sainteny, d'une superficie d'environ 35 km², en partie recouverte par les marais. Ils sollicitent principalement les formations de Faluns blancs à bryozoaires de Bléhou (Miocène moyen) qui est la formation la plus couramment rencontrée dans les forages. Elles reposent généralement sur les argiles rouges du Permien et sont recouverts le plus fréquemment par des dépôts fluviaux pléistocènes ou des sédiments plio-quatérnaires.

Le SYMPEC exploite actuellement 5 forages répartis sur le territoire des communes de Sainteny et de Saint-Germain-sur-Sèves, à raison de 10000m³/j en moyenne pour l'ensemble, et de 15000m³/j en période de pointe. Deux forages se situent nettement sur le plateau (F3 et F5), deux sont implantés en limite de marais (F1 et F4), et un en zone intermédiaire (F2). Les ouvrages sont tous de grande profondeur (entre 72 et 87 m) et équipés d'une pompe dont la capacité d'exhaure varie entre 180 à 200 m³/h. Les prélèvements ont progressivement augmenté entre 1990 (démarrage de l'opération) et 1999, pour se stabiliser ensuite autour de 3,6 Mm³/an sachant que sa capacité totale de prélèvement a été estimée à 7 Mm³, sans entamer les stocks de la réserve disponible (Freslon, 1988, rapport DDAF de la Manche, 2009). L'estimation de cette ressource renouvelable a été évaluée entre 8 et 9 Mm³ sur une superficie voisine de 40 km².

Les forages F1 et F4, situés en bordure de la zone humide, ont vu leurs prélèvements diminuer progressivement à partir de 1999, pour passer de 2 Mm³/an à 1,65 Mm³/an en 2008. La baisse est significative à partir de 2003, année de la mise en service du forage F5.

Les études d'incidence des forages (CDHAT, 2001 ; Planis, 2006 ; rapport DDAF de la Manche, 2009) signalent qu'au-delà de 100 mètres du forage, l'influence des pompages sur la nappe profonde est faible (environ 30 cm) et très faible au-delà de 300 mètres (<10 cm). Les pertes de charge linéaires varient de 0,0011 à 0,0028 h/m² pour une moyenne de 0,002 h/m², et les pertes quadratiques varient de 1,78 x 10⁻⁶ à 3,6 x 10⁻⁶ h²/m⁵ pour une moyenne de 2,56 x 10⁻⁶ h²/m⁵. Les transmissivités sont très élevées ; de 0,27 à 0,62 m²/s. Les coefficients d'emmagasinement varient de 1 x 10⁻³ à 1 x 10⁻⁵, caractéristiques d'une nappe semi-captive à captive. Les rabattements sont toujours inférieurs à 1 m à l'aplomb des forages. Compte tenu de la présence d'une couche argilo-sableuse entre l'aquifère profond et l'aquifère superficiel, la baisse de niveau dans ce dernier est très amortie et l'affaissement théorique est négligeable (possible de quelques centimètres à 100 mètres à un ou deux centimètres à 300 mètres) (rapport DDAF de la Manche, 2009).

Les études piézométriques ont montré que les pompages dans les forages d'exploitation AEP créent une petite dépression piézométrique. L'influence de pompage la plus forte est ressentie au droit des forages d'exploitation du Marais F1 et F4 (rapport DDAF de la Manche, 2009).

Le renouvellement des eaux souterraines ne s'effectue qu'à partir des apports provenant des précipitations, dans les aires d'alimentation de la nappe du bassin de Sainteny-Marchésieux.

A proximité des forages F1 et F4 coule la rivière *Holerotte* du sud vers le nord. Elle traverse la zone tourbeuse.

3. Synthèse sur les études existantes

Une première étude a été menée en 2001 (Tortrat, 2001). Dans la vallée de l'Ay, une tourbière repose sur l'aquifère de Lessay, dont la superficie couvre 18 km² et qui est exploité à hauteur de 750 000 m³.an⁻¹. Les résultats ont montré :

- l'existence d'échanges entre la tourbière et l'aquifère des sables,
- l'inversion des circulations tourbe-sables en fonction des périodes hautes eaux – basses eaux et de leur éloignement de la station de pompage,
- la dépendance des processus biogéochimiques vis-à-vis des conditions hydrologiques du milieu.

Ces résultats préliminaires ont conduit à des investigations de plus grande ampleur sur l'aquifère de Sainteny-Marchesieux (135 km²). Une étude a été réalisée en 2005-2007 sur les relations « eaux souterraines – eaux de surface – tourbières » (Auterives, 2007) afin de déterminer l'influence éventuelle d'un pompage sur le fonctionnement du marais, comprendre les relations entre la nappe de la tourbe et la rivière et identifier les flux au sein de la tourbe à proximité de la station de pompage. Deux sites localisés à l'aplomb de l'aquifère de Sainteny-Marchesieux, dans la tourbière de la vallée de *La Sèves*, au nord de St-Germain-Sur-Sèves et le long de la rivière *Holerotte*, ont été étudiés. Le premier (site S) est localisé à proximité de la station de pompage F1 de SYMPEC, là où l'influence de forage d'exploitation est maximum, le second (site G) est situé à 1,3 km en aval (au nord) du premier site, et est soumis à une influence non significative (de l'ordre du centimètre) du puits de pompage (site de référence) (Illustration 1).

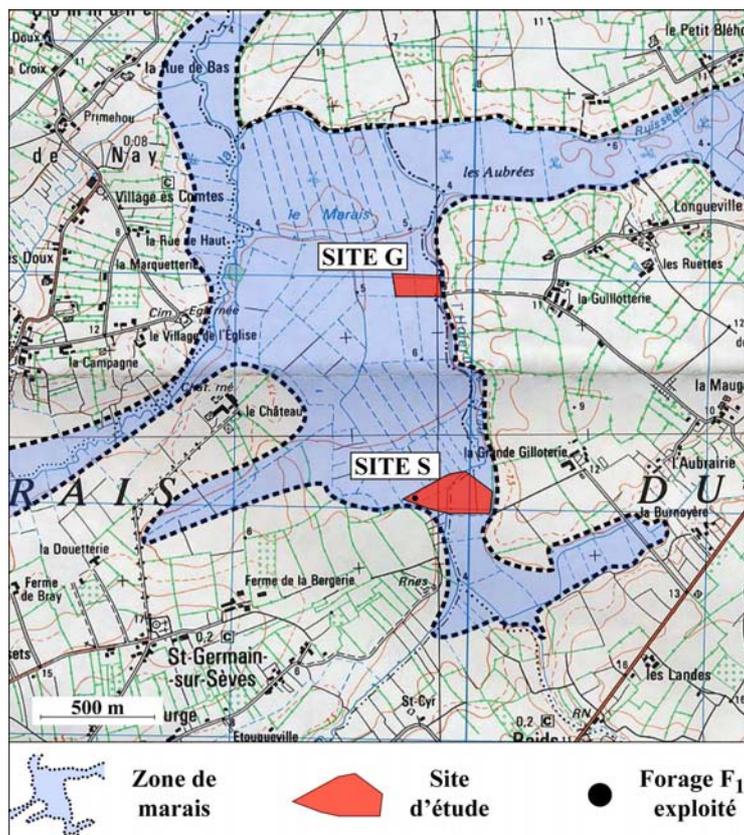


Illustration 1 : Localisation des sites S et G le long de la rivière Holerotte (Auterive, 2007)

Pour suivre le niveau piézométrique de la nappe de la tourbe, 21 piézomètres ont été installés (Illustration 2). La piézométrie des sables a été relevée dans les piézomètres de la DDAF (Direction Départementale de l'Agriculture et des Forêts) : Pz4 sur le site S et le piézomètre/forage d'observation G sur le site G. Le suivi hydrogéologique des différentes nappes a été réalisé d'avril 2003 à mars 2005 afin de caractériser les directions d'écoulement en fonction des différentes périodes clefs : Hautes eaux et Basses eaux et de déterminer les relations eaux superficielles / eaux souterraines. Deux règles limnimétriques, installées sur les sites, ont permis de suivre l'évolution du niveau dans la rivière.

L'étude hydrogéologique de terrain a également consisté en une caractérisation de la perméabilité de la tourbe afin de quantifier les flux souterrains.

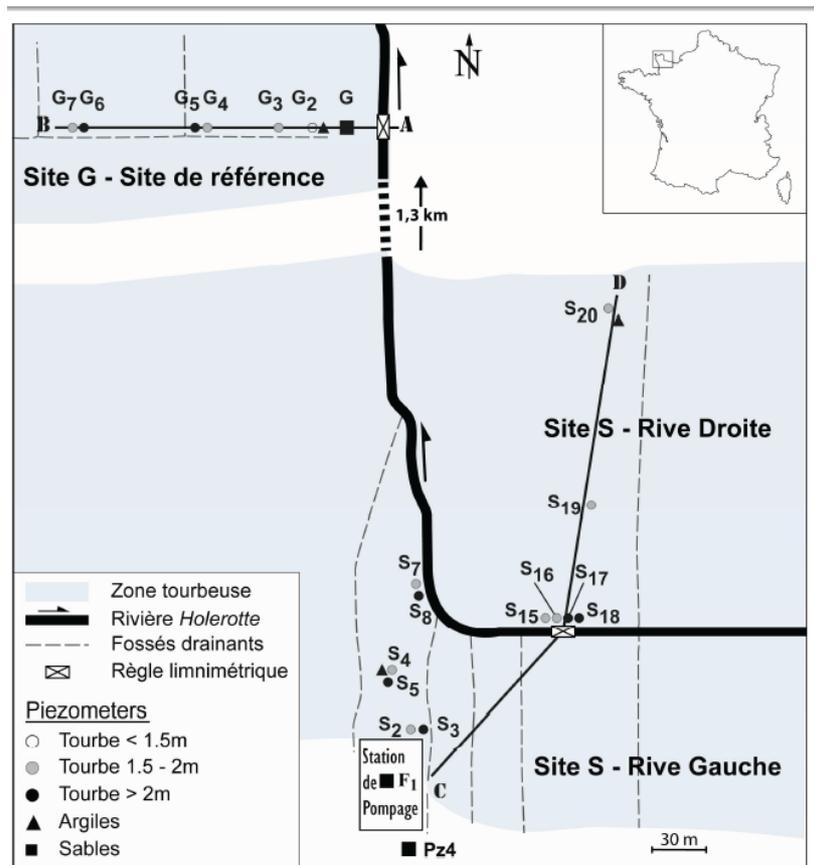


Illustration 2 : Plan d'implantation des piézomètres dans la tourbe et les argiles, localisation du forage d'exploitation F1 et des forages d'observation des sables G et Pz4

Le suivi piézométrique de la tourbe sur ces 2 années (Illustration 5) a montré que le niveau d'eau du ruisseau est resté au-dessus du niveau piézométrique de la tourbe sur le site de référence (site G), et durant presque toute la période sur le site pompé (site S). La rivière a drainé la tourbière durant seulement trois courtes périodes sur le site S.

Durant les périodes de hautes-eaux, la rivière constitue un drain pour la tourbière sur le site S et une source d'alimentation sur le site G. Durant les périodes de basses eaux, la rivière constitue une source d'alimentation de l'aquifère de la tourbe sur le site S et n'est plus connectée à l'aquifère de la tourbe sur le site G (Illustration 3).

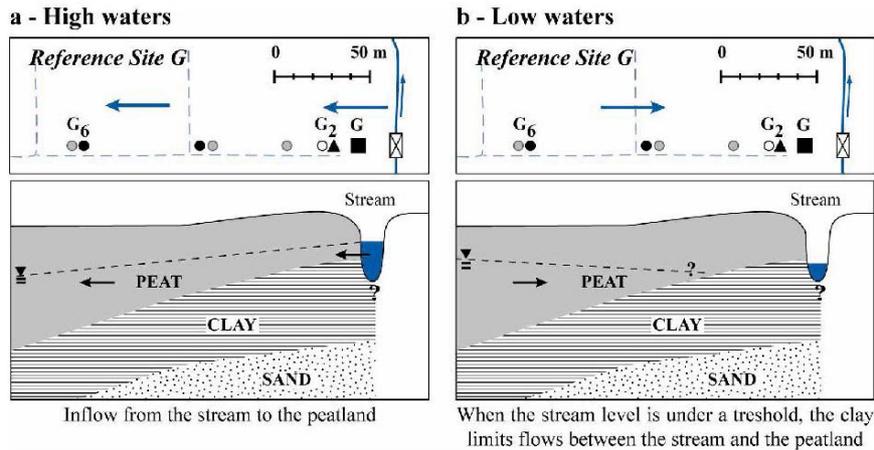


Figure II - 5: Schematic detail of groundwater flow between the stream and the peat on reference site G

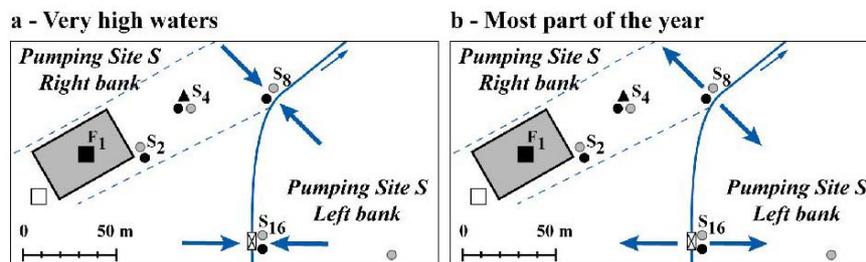


Figure II - 6: Schematic detail of groundwater flow between the stream and the peat on pumping sites S

Illustration 3 : Schéma des relations nappes de la tourbe / rivières sur les sites G et S durant les périodes de hautes et basses eaux au cours de la période de suivi 2003-2005 (Auterives , 2007)

Les directions d'écoulement horizontal des eaux souterraines dans la tourbe s'inversent entre les périodes sèches et humides, bien que le niveau d'eau du ruisseau reste principalement au-dessus du niveau piézométrique de la tourbe (Auterives, 2007).

Les études de terrain et le bilan hydrologique montrent que la perméabilité de la couche d'argile séparant la tourbe des sables est trop élevée (de $1,7 \cdot 10^{-8}$ à $2,6 \cdot 10^{-8}$ m/s) pour constituer une barrière hydraulique efficace entre la tourbière et l'aquifère des sables. Elle a été évaluée par un slug test réalisé dans des piézomètres mis en place dans les argiles sur les sites S et G. Les aquifères des sables et de la tourbe sont donc hydrogéologiquement connectés (Auterives, 2007).

Le suivi du niveau piézométrique des différents sites montre que le niveau piézométrique des sables est toujours inférieur au niveau piézométrique de la tourbe sur la période étudiée (Illustration 5). Le gradient hydraulique vertical moyen (i.e. différence entre le niveau piézométrique de la tourbe et le niveau piézométrique des sables divisé par l'épaisseur des argiles) est toujours positif quelque soit le site (S rive droite, S rive gauche ou G) (Illustration 4). Sur la période étudiée les flux verticaux potentiels sont toujours descendants (de la tourbière vers l'aquifère des sables). L'évolution globale du gradient hydraulique vertical est relativement similaire pour les trois sites : des valeurs plus élevées sont observées pendant les périodes des hautes eaux (d'Octobre à Janvier) laissant suggérer des flux plus importants. De légères différences peuvent également être observées entre les sites : des valeurs plus élevées sur le site du pompage (site S - rive droite) et des valeurs plus basses dans le site de référence G. Cette différence peut être liée à l'influence de la station de pompage (Auterives, 2007).

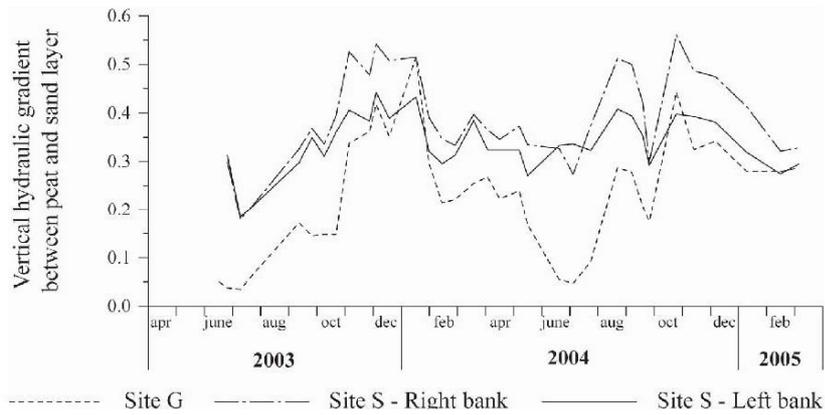


Illustration 4 : Gradient hydraulique vertical entre les aquifères de la tourbe et des sables (Auterives , 2007)

Les principales composantes du bilan hydrologique de la tourbe sont les précipitations pour les flux entrant, l'évapotranspiration et le flux vers l'aquifère des sables pour les flux sortant. Les flux sortant vers les sables, qui peuvent représenter plus de 30% de l'apport des précipitations, dépendent du gradient hydraulique vertical et de la perméabilité des argiles. Les flux venant de la rivière vers les tourbes, représentent une composante mineure du bilan hydrologique, mais jouent un rôle important car ils maintiennent le niveau piézométrique et le gradient hydraulique horizontal dans la tourbe (Auterives, 2007).



Illustration 5 : Pluies journalières (a) et fluctuation des niveaux piézométriques durant les 2 ans de suivi sur le site de référence G (b) et le site de pompage (S) en rive droite (c) et le site de pompage (S) en rive gauche (d)

Auterives (2007) développe également un modèle hydrogéologique qui simule le fonctionnement hydrologique de la zone humide et apprécie la sensibilité de la tourbière aux effets du climat (variabilité de la recharge) et de la pression anthropique (variabilité du débit de pompage de l'aquifère). La modélisation montre que la nappe de la tourbe et l'aquifère des sables sont connectés, l'exploitation de l'aquifère induit donc un rabattement dans les sables qui se répercute directement sur la nappe de la tourbe. La direction des flux est modifiée et le niveau piézométrique moyen de la tourbière s'abaisse. Les résultats de la simulation montrent que l'effet conjoint de faibles précipitations pendant la période 2003 – 2005 et de l'exploitation de l'aquifère affecte fortement le fonctionnement hydrologique de la zone humide :

- l'exploitation du forage F1 conduit à l'apparition d'un cône de rabattement dans les sables, transmis directement à la nappe de la tourbe. La surface libre de la nappe de la tourbe est abaissée à plus de 80 cm sous la surface du sol au niveau du forage F1 (site S) et durant une majeure partie de la période 2003-2005 (Illustration 6). Cette valeur seuil de 80 cm sous le sol est le niveau minimum de la surface libre au-delà duquel le stress hydrique imposé à la tourbe affecte sa structure et ses propriétés (Laplace-Dolonde, 1994) ;
- dans le secteur de F1 la surface libre est abaissée en-dessous du niveau de la rivière qui ne joue plus un rôle de drainage de la zone humide en particulier en période de hautes eaux mais au contraire devient une source d'alimentation. En termes de débit, cette alimentation est négligeable mais elle a montré des conséquences importantes sur les caractéristiques hydrochimiques du milieu.

Les simulations ont également montré que :

- en considérant une recharge plus importante et une absence de pompage, on observe une prédominance de flux ascendants des sables vers la tourbière. La période 2003 – 2005 est déficitaire en précipitations. La zone humide est principalement alimentée par les précipitations et a montré au cours des simulations une sensibilité à l'évolution de la recharge ;
- les précipitations alimentent essentiellement la zone humide. Une diminution des précipitations abaisse nécessairement le niveau de la surface libre et conduit à une désaturation accentuée de la tourbe ; un accroissement du débit pompé en F1 implique nécessairement une augmentation des flux sortant de la tourbière. Dans les deux cas (diminution de la recharge ou augmentation des prélèvements), le niveau général de la surface libre s'abaisse. Les zones « critiques » où la surface libre est à une profondeur supérieure à 80 cm sous le sol sont plus étendues et plus fréquentes. L'abaissement de la surface libre contribue également à accroître l'influence locale de la rivière. Les gradients tourbe-rivière sont accentués et contribuent à des débits plus importants transitant de la rivière vers la tourbe.

Le bilan hydrologique de la nappe de la tourbe obtenu par la modélisation sur les deux sites (S et G) a montré que les flux entrants sont les précipitations et la rivière. Les flux sortants sont l'évapotranspiration et un flux vertical descendant vers l'aquifère des sables à travers la couche d'argiles. Dans le modèle d'Auterives (2007), la recharge correspond aux précipitations totales amputées de l'évapotranspiration réelle. Ce bilan hydrologique signale que la recharge constitue plus de 97 % du flux total entrant dans la zone humide tourbeuse, la rivière *Holerotte* contribuant à peine à 2,3 % du flux total entrant. Le débit sortant vers les sables représente 87 % à 120 % du flux total entrant en fonction de la période considérée. La variation des stocks d'eau de la tourbe est comprise entre – 22 % et + 1 % du flux total entrant.

Compte-tenu des niveaux de calage du modèle, ces simulations apportent des informations concernant les processus hydrogéologiques en jeu, qui seront précisées dans le cadre de la seconde thèse en cours.

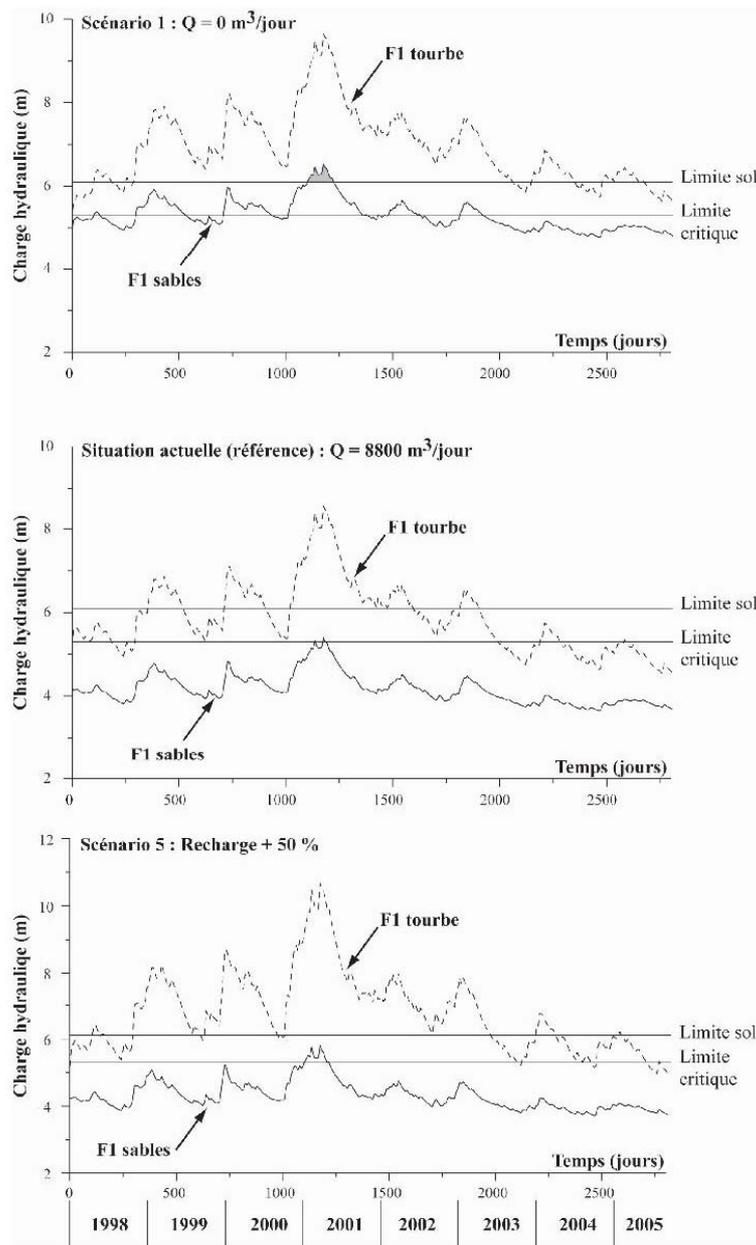


Illustration 6 : Simulation de la charge hydraulique des sables (ligne pleine) et de la tourbe (ligne tirée) dans le forage F1 dans des conditions variables : pas de pompage (a), situation actuelle (b), recharge accrue (c)

Toujours d'après les travaux d'Auterives (2007), les flux verticaux sont actuellement descendants entre la nappe de la tourbe et la nappe des sables pour la zone étudiée (proximité des forages F1 et F4). Cependant, les concentrations en Na, Cl et Ca ainsi que le pH indiquent clairement que la tourbière est minérotrophe avec un faciès carbonaté calcique et suggèrent que la nappe de la tourbe a été alimentée auparavant par des flux venant des sables. Les conditions hydrologiques actuelles ne permettent pas d'envisager de tels flux mais les résultats de la modélisation ont montré l'existence de flux ascendants sans pompage et avec une recharge élevée. Des travaux antérieurs, dans le même contexte (vallée de l'Ay, aquifère de Lessay, (Tortrat, 2001)) ont permis de caractériser pendant l'année 2001 (précipitations annuelles élevées) des flux descendants

tourbe-sables à proximité de la station de pompage et des flux ascendants sables-tourbe sur le site éloigné en aval de la station. Les caractéristiques chimiques, la modélisation hydrogéologique et les observations de terrain sont concordantes avec l'hypothèse que la nappe des sables avant la mise en exploitation de la nappe pouvait soutenir la nappe de la tourbe. La tourbière ne repose pas sur un substratum imperméable mais la présence de l'aquifère, en alimentant la tourbe, a contrôlé son développement et son maintien jusqu'alors (Auterives, 2007).

De plus, Auterives (2007) souligne que les années observées, 2003 – 2005, sont des années particulièrement sèches avec de faibles précipitations. La recharge est limitée et les températures élevées augmentent le taux d'évapotranspiration. L'auteur souligne que si de telles conditions climatiques perduraient ou se répétaient fréquemment, elles pourraient grandement influencer le fonctionnement hydrologique et hydrochimique de la tourbière. Les conditions hydrologiques (notamment un horizon non-saturé en permanence par absence de submersion), les caractéristiques hydrochimiques extrêmes en solution (SO_4 , pH, etc.), les faibles valeurs du rapport C/N et les concentrations élevées de la tourbe solide (Ca, Mg, Fe, Na) conduisent à s'interroger sur le devenir de la tourbe.

Le modèle d'Auterives (2007) a permis d'envisager différents scénarii afin de tester la sensibilité de la tourbière à une exploitation variable de l'aquifère des sables et une recharge modifiée. Les résultats obtenus ont mis clairement en évidence que les conditions critiques de la tourbière observée entre 2003 et 2005 sont la résultante d'une exploitation de l'aquifère et d'une période marquée par un déficit piézométrique. Il est également clairement montré que bien que le cône de rabattement des sables soit faible à l'échelle de l'aquifère des sables il est loin d'être négligeable à l'échelle de la nappe de la tourbe. Les simulations montrent que l'exploitation de la nappe des sables a modifié le fonctionnement hydrologique de la zone humide dans la zone d'influence des forages :

- un cône de rabattement dans les sables peu marqué et relativement plat ;
- des flux verticaux descendants de la nappe de la tourbe vers celle des sables ;
- la rivière *Holerotte* alimente la nappe de la tourbe localement.

Trois profils pédologiques ont été effectués par Auterives (2007) à environ 1,3 km en aval (au nord) de la station de pompage. Les trois profils présentent un horizon supérieur très sec traduisant un assèchement important de la tourbe pouvant atteindre 40 cm. Ceci est dû à la profondeur importante de la nappe qui se situe entre 55 et 90 cm de profondeur. Le maintien et la croissance d'une tourbière dépendent essentiellement de ses caractéristiques hydrologiques et en particulier de la profondeur de la surface libre et de la durée et de la fréquence des périodes de submersion (Laplace-Dolonde, 1994). Les conditions de stress hydrique imposé au matériau tourbeux sont à l'origine d'une réorganisation du matériel qui limite sa capacité de réhumectation.

Une nouvelle thèse est engagée depuis 2008 au sein de l'Université de Rennes afin de tenter de généraliser les résultats obtenus sur l'ensemble du bassin de Sainteny-Marchésieux et d'essayer de proposer des scénarii de gestion des aquifères et des eaux superficielles après modélisation (Maître d'ouvrage : Parc des Marais ; comité de pilotage : CG, AESN, DDTM, DREAL).

4. Diagnostic

Les affaissements de sols s'observent dans les tourbières alors que les sols sableux ne sont pas affectés, ils apparaissent dans le paysage en relief comme des bosses.

Les tourbières sont essentiellement alimentées par les précipitations. Le développement et le maintien des tourbières dépendent des conditions hydrologiques notamment de la fréquence et de la durée des périodes de submersion. La désaturation de la tourbe peut conduire à une modification de sa structure physique (Minkkinen et Laine, 1998 ; Holden et Burt, 2002b). L'assèchement et la dessiccation de la tourbe conduisent **à un abaissement de la topographie** et à une modification de la macroporosité dans l'horizon supérieur (Minkkinen et Laine, 1998; Holden et Burt, 2002b). A long terme les équilibres chimiques peuvent être affectés compte tenu de la relation qui existe entre la porosité de la tourbe et les processus biogéochimiques par l'intermédiaire de microsites (Pauwels et al., 1998 ; Parry et al., 1999; Casey et al., 2004). L'accroissement de la macroporosité favorise l'expansion des microhabitats aérobies où la minéralisation de la tourbe est favorisée (Baldwin et Mitchell, 2000). L'abaissement de la surface libre s'accompagne d'une diminution du taux d'humidité de la tourbe dans la zone non-saturée qui influence également l'existence et la connectivité entre ces microsites (Luo et al., 1999). Un assèchement et une dessiccation prononcée peuvent contribuer au développement d'un niveau hydrophobe qui réduirait la capacité d'infiltration et modifierait les écoulements de surface et de subsurface dans la zone humide (Evans et al., 1999 ; Holden et Burt, 2002a ; Holden, 2003).

L'occurrence de périodes sèches peut modifier les propriétés physiques et chimiques de la tourbe. Cette dernière peut acquérir des propriétés hydrophobes irréversibles. Cette hypothèse implique cependant de longues ou/et fréquentes périodes sèches. Les périodes sèches de 1996 à 1997 et de 2003 à 2005, ne paraissent toutefois pas suffisantes pour induire de telles modifications à la tourbe. De plus, il nous a été communiqué quelques chroniques de niveaux piézométriques dans la nappe de surface. Ces chroniques ne concernent pas les zones affectées par les affaissements de sols mais permettent d'acquérir des informations générales pour la zone étudiée. Il apparaît des variations saisonnières du niveau piézométrique mais pas de tendance générale vers une diminution significative. Les niveaux les plus bas sont atteints pendant les périodes sèches mais ils remontent les années qui suivent. Il est donc difficile d'incriminer un changement climatique qui engendrerait un assèchement de la tourbe et par la même un affaissement des sols. Cependant, l'étude des profils pédologiques montre que le dessèchement et la décomposition de la tourbe peut être significative par endroit. Des études complémentaires doivent donc être menées, notamment un suivi piézométrique dans les zones affectées par les affaissements de sols.

Les travaux d'Auterives (2007) montrent que l'exploitation du forage F1 conduit à l'apparition d'un cône de rabattement dans les sables, transmis directement à la nappe de la tourbe. La modélisation a montré que le niveau de la surface libre de la tourbe diminue autant que la baisse enregistrée dans les sables. Le modèle hydrogéologique développé par l'auteur montre également que l'effet conjoint de faibles précipitations et de l'exploitation de l'aquifère affecte fortement le fonctionnement hydrologique de la zone humide. La surface libre de la nappe de la tourbe (au droit du forage F1) serait abaissée sous la limite des « 80 cm sous la surface du sol ». Cette limite est le niveau minimum de la surface libre au-delà duquel le stress hydrique imposé à la tourbe affecte sa structure et ses propriétés. L'exploitation des forages a donc un impact sur la zone humide de surface. Cependant, les lieux dits de la Ferme de Bray et de la Ferme de la Bergerie où ont été observés des affaissements significatifs des sols sont localisés à environ 600 m et 1700 m des forages F1 et F4 de SYMPEC. Ces distances sont significativement supérieures à la limite de 300 m autour des forages définie comme étant la limite maximale de la zone sous influence

significative des pompages. Les impacts directs des pompages sont donc loin d'être évidents. Si la contribution de l'exploitation des forages peut engendrer des modifications des sols comme en atteste les travaux de Auterives (2007), il n'y a pas d'éléments qui permettent d'affirmer ou d'infirmier l'hypothèse qu'ils soient responsables des affaissements observés sur les lieux dits de la Ferme de Bray et de la Ferme de la Bergerie. Des études complémentaires sont donc nécessaires.

5. Recommandations

Plusieurs études à engager conjointement pourraient permettre d'estimer la part des différents phénomènes incriminés dans les affaissements de sols observés sur la commune de St Germain-sur-Sève : 1- Cartographier précisément la tourbe, effectuer des relevés topographiques précis dans la région et recenser les zones affectées par des affaissements même mineurs, 2- Calculer les bilans hydrologiques et réaliser une étude géochimique dans les zones affectées par les affaissements et sur des sites non affectés à proximité de ces affaissements, 3- Etudier la composition chimique des sols/tourbes affectés et non affectés par ces affaissements, 4- Caractériser la structure de la tourbe et 5- le sens des écoulements de l'eau dans cette tourbe, et 6- Mettre en place des mesures conservatoires pour assurer la pérennité de la tourbière.

1- Nous suggérons d'effectuer une étude cartographique précise afin de cibler les zones d'affaissements actuelles et futures dans la commune de St Germain-sur-Sève mais également au-delà. L'objectif étant de définir les zones qui sont ou qui pourraient potentiellement être affectées par les affaissements de terrain. Dans le cadre de cet appui, nous nous sommes focalisés sur les affaissements qui concernent la commune de St Germain-sur-Sèves mais des affaissements auraient également été observés sur la commune de Sainteny. Il serait également judicieux d'effectuer des relevés topographiques des tourbes le long de deux ou trois transects qui couvrent des zones affectées par les affaissements, et ce à des périodes différentes de l'année, afin de suivre l'évolution de ces affaissements dans le temps.

2- Réaliser un bilan hydrologique. Cette étude peut se faire par la mise en place d'un suivi des niveaux piézomètres sur les sites affectés par les affaissements et sur les sites non affectés à proximité des zones d'affaissement. Le suivi devra concerner la nappe de surface mais également la nappe profonde où sont puisées les ressources en eau. Ce suivi doit être relié à un suivi des conditions de précipitations et d'évaporations sur ces sites afin d'effectuer des bilans hydrologiques détaillés. Une étude des chroniques de précipitations (passées et actuelles) associées à ce bilan hydrologique permettrait de retenir ou réfuter l'hypothèse d'une détérioration de la tourbe suite à des modifications climatiques (périodes sèches prolongées). En complément du bilan hydrologique, l'interprétation d'analyses géochimiques des eaux et d'analyses isotopiques (isotopes stables de la molécule d'eau (O et H) et les isotopes du strontium (Sr)) sur des points représentatifs (piézomètres installés dans la tourbière et dans la nappe profonde sur les sites affectés par les affaissements et sur les sites non affectés à proximité des zones d'affaissement), peut permettre de caractériser et d'estimer les directions et les taux d'échange d'eau au sein de la tourbière. Ce type d'étude a déjà été menée, avec succès, pour des problématiques similaires en Haute-Loire (Brenot et al., 2008).

3- Il est primordial d'obtenir des informations sur la composition chimique et sur les conditions physico-chimiques des sols affectés par les affaissements afin de déterminer le degré de dégradation (minéralisation) de la tourbe. Ces données doivent être comparées aux résultats obtenus sur des sols localisés à proximité des zones d'affaissement mais non affectés. Pour cela, nous suggérons l'étude de profils pédologiques et l'analyse de la composition chimique (éléments majeurs, carbone, azote...) du sol/tourbe sur son épaisseur et des eaux interstitielles (cations et anions, carbone organique et inorganique, azote...).

4- La déstabilisation de la structure de la tourbe, quelque soit la cause, peut-être responsable de son effondrement et de l'affaissement des sols. Les études géophysiques sont très utiles pour obtenir des informations sur la structure des sols. Nous proposons donc d'effectuer des profils de

résistivité électrique sur les sites affectés et non affectés (à proximité) par les affaissements. Il est important d'obtenir des informations sur la charge hydrique de la tourbe afin d'interpréter convenablement les profils.

5- Le bilan hydrologique et les informations sur la structure de la tourbe peuvent s'avérer insuffisants pour comprendre la dynamique du système étudié. Il nous semble donc important d'obtenir également des informations sur le sens des écoulements de l'eau dans la tourbe et sur la variation spatiale et temporelle de ces écoulements. Pour cela, l'étude du potentiel spontanée peut apporter une réponse adéquate. Cette étude peut-être menée en parallèle des profils de résistivité électrique. Les relations nappe de surface – nappe profonde – eau de rivière seraient alors plus facilement contraints. Cette étude est complémentaire à l'étude géochimique.

6- A ce stade, il est important d'agir pour assurer la pérennité de la tourbière. Les conditions hydrologiques et hydrochimiques décrites dans les travaux d'Auterives (2007) montrent que si les conditions de sécheresse et de faible niveau piézométrique étaient pérennes, elles conduiraient à une minéralisation importante de la tourbière, minéralisation qui semble avoir déjà débutée compte tenu des rapports C/N mesurés. Dans cette situation, une interrogation se pose sur les interventions qui pourraient être faites pour limiter ce phénomène. Il est clair que les cycles de désaturation et resaturation importante de la tourbe sont à l'origine de sa déstabilisation chimique. Les conditions oxydantes favorisent la minéralisation de la matière organique. Pour améliorer les conditions hydrologiques et hydrochimiques de la tourbière, il faudrait restaurer des conditions réductrices dans le milieu notamment en assurant une submersion prolongée de la zone humide. Dans l'hypothèse d'une inondation de la zone humide même si les flux entrant étaient oxydants, la saturation complète de l'horizon tourbeux favoriserait à terme l'installation de conditions réductrices. En d'autres termes, il est important d'agir pour que la zone humide retrouve des périodes de submersion totale et prolongée afin d'assurer la pérennité de la tourbière.

6. Bibliographie

Auterives, C., (2007). Influence des flux d'eau souterraine entre une zone humide superficielle et un aquifère profond sur le fonctionnement hydrochimique des tourbières : Exemple des marais du Cotentin, Basse-Normandie. Thèse de doctorat. Université de Rennes 1. 261p.

Baize, S., J. L. Lagarde, E. Laville, O. Dugué (1998), Géomorphologie d'un plateau littoral (Cotentin - Normandie) : Enregistrements des signaux tectoniques et climatiques, *Bulletin de la Société Géologique de France*, **169**(6), 851-866.

Baldwin, D. S., A. M. Mitchell (2000), The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river-floodplain systems: a synthesis, *Regulated Rivers: Research & Management*, **16**(5), 457-467.

Brenot A, Négrel Ph., Bertin C., Millot R. (2008) Caractérisation isotopique et hydrogéologique du site des Narcès de la Sauvetat (Haute-Loire) : programme de recherche préliminaire à l'aménagement du site. Rapport final, BRGM/RP-56282-FR, 99 pp, 51 ill., 1 ann.

CDHAT (2001), Forage d'exploitation ; « Le Marais (2) », « Beaumarais », « la Gilloterie », « la Renarderie », communes de Sainteny et St Germain-sur-Sèves. Forages du SYMPEC, étude d'incidence au titre de la loi sur l'eau. 25p.

Casey, R. E., M. D. Taylor, S. J. Klaine (2004), Localization of denitrification activity in macropores of a riparian wetland, *Soil Biology and Biochemistry*, **36**(4), 563-569.

Dugué, O., N. Poupinet, S. Baize, J. P. Auffret, C. J.P., J. C. Ozouf, M. Clet-Pellerin (2000), Stratigraphie du Plio-Pléistocène inférieur de Normandie (France) : les séries marines et fluviatiles des bassins du seuil du Cotentin, *Géologie de la France*, **3**, 99-124.

Dugué, O. (2003), The Pliocene to Early Pleistocene marine to fluviatile succession of the seuil du Cotentin basins (Armorican Massif, Normandy, France), *Journal of Quaternary Science*, **18**(3-4), 215-226.

Elhaï, H. (1963), La Normandie Occidentale entre la Seine et le golfe Normand-Breton : Etude morphologique, pp. 581, Paris.

Evans, M. G., T. P. Burt, J. Holden, J. K. Adamson (1999), Runoff generation and water table fluctuations in blanket peat: evidence from UK data spanning the dry summer of 1995, *Journal of Hydrology*, **221**(3-4), 141-160.

Freslon, M., (1988), recherche hydrogéologique dans la région de Sainteny, rapport DDAF, 87/DDAF/3/HYD, 36p.

Holden, J. (2003), Runoff production in blanket peat covered catchments, *Water Resources Research*, **39**(7), 1191.

Holden, J., T. P. Burt (2002a), Infiltration, runoff and sediment production in blanket peat catchments: implications of field rainfall simulation experiments, *Hydrological Processes*, **16**, 2537-2557.

Holden, J., an T. P. Burt (2002b), Laboratory experiments on drought and runoff in blanket peat, *European Journal of Soil Science*, **53**, 675-689.

Lagarde, J. L., S. Baize, D. Amorese, B. Delcaillau, M. Font, P. Volant (2000), Active tectonics, seismicity and geomorphology with special reference to Normandy (France), *Journal of Quaternary Science*, **15**(7), 745-758.

Laplace-Dolonde, A. (1994), L'histosol, descripteur privilégié du marais tourbeux, *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, **1994**(3), 295-306.

Luo, J., R. W. Tillman, P. R. Ball (1999), Factors regulating denitrification in a soil under pasture, *Soil Biology and Biochemistry*, **31**(6), 913-927.

Minkinen, K., J. Laine (1998), Long-term effect of forest drainage on the peat carbon stores of pine mires in Finland, *Canadian Journal of Forest Research*, **28**, 1267-1275.

Parry, S., P. Renault, C. Chenu, R. Lensi (1999), Denitrification in pasture and cropped soil clods as affected by pore space structure, *Soil Biology and Biochemistry*, **31**(4), 493-501.

Pauwels, H., W. Kloppmann, J.-C. Foucher, A. Martelat, V. Fritsche (1998), Field tracer test for denitrification in a pyrite-bearing schist aquifer, *Applied Geochemistry*, **13**(6), 767-778.

Planis, 2006. Complément à l'étude d'incidence d'octobre 2001 des forages d'exploitation du SYMPEC. 16p.

Rapport DDAF de la Manche (2009). Influence des forages d'exploitation du bassin de Sainteny sur les marais et la zone tourbeuse. Note synthétique. \\Srv_fichiers\service_2\07_Hydrogeologie - Ressource_en_eau\Protection-Preservation_ressource_en_eau\Divers_sympec\Influence des forages_tourbe.doc/MF/14/05/2009.

Tortrat, F. (2001), Etude hydrologique et hydrochimique de la tourbière de la basse vallée de l'Ay, Mémoire de DEA, Université de Rennes 1, Rennes. pp. 30



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France
Tel. 02 38 64 34 34

Service Géologique Régional de Basse-Normandie
4, avenue de Cambridge
14200 Hérouville Saint Clair – France
Tél. : 02 31 06 66 40

