LES CAHIERS TECHNIQUES

La connaissance de l'hydrologie

pour la gestion des zones humides

CONTEXTE

GESTION

SITES

RHÔNE-ALPES

L'origine de ce cahier technique

Traditionnellement la description d'une zone humide pour établir ses modalités de gestion s'appuie sur deux types de documents : la carte des habitats, d'une part, la liste des espèces remarquables, d'autre part. Ces documents, indispensables au diagnostic phytoécologique, ne sont pas suffisants pour passer du diagnostic à la spatialisation du fonctionnement, voire aux fonctions remplies par ces écosystèmes. Pour cela, il faut s'intéresser à leurs caractéristiques abiotiques et plus particulièrement à leur hydrologie et leur pédologie. Ces éléments mis en avant par la loi sur l'eau et plus particulièrement par l'arrêté de délimitation des zones humides doivent aujourd'hui être mieux pris en compte.

Ce cahier technique essaie donc de répondre aux besoins des gestionnaires qui réclament des outils de diagnostic et de suivi adaptés à la complexité des milieux. Il présente des réflexions et des techniques simples en géographie, pédologie et hydrologie s'appuyant sur des méthodologies connues et éprouvées. L'instrumentation et le suivi n'étant pas une fin en soi, nous devons toujours garder à l'esprit ces questions : « Qu'est-ce que je veux mesurer ? Pourquoi ? Comment ? ». En conséquence, ce sont autant des méthodes, des outils et des protocoles de suivis que des principes et des réflexions sur la manière de prendre en compte les aspects hydrologiques et pédologiques de la gestion des zones humides que nous mettrons en avant. Ce cahier technique s'articule avec deux ouvrages, « ***Tourbière de plaine*** » et « ***Tourbières des montagnes française*** »[1] où certains aspects évoqués ici trouvent des développements plus conséquents.

Il a donc la prétention de faire avancer la connaissance afin de mieux élaborer les plans de gestion, de mieux cibler les manques de connaissance pour susciter des recherches ultérieures bien ciblées, trop peu nombreuses jusqu'à maintenant.

Arrêté du 1er octobre 2009 modifiant l'arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides

« Pour la mise en œuvre de la rubrique 3. 3. 1. 0 de l'article R. 214-1 du code de l'environnement, une zone est considérée comme humide si elle présente l'un des critères suivants :

1. Les sols correspondent à un ou plusieurs types pédologiques, exclusivement parmi ceux mentionnés dans la liste figurant à l'annexe 1. 1 et identifiés selon la méthode figurant à l'annexe 1. 2 au présent arrêté. Pour les sols dont la morphologie correspond aux classes IV d et V a, définis d'après les classes d'hydromorphie du groupe d'étude des problèmes de pédologie appliquée (GEPPA, 1981 ; modifié), le préfet de région peut exclure l'une ou l'autre de ces classes et les types de sol associés pour certaines communes, après avis du conseil scientifique régional du patrimoine naturel.

2. Sa végétation, si elle existe, […] »

SOMMAIRE

- **LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES SITES**
  - Le bilan hydrologique des zones humides
  - Les différents types de fonctionnement des zones humides
  - Les fonctions hydrologiques des zones humides
- **EVALUER L'ETAT HYDROLOGIQUE, COMPRENDRE LE FONCTIONNEMENT, FAIRE UN DIAGNOSTIC**
  - Evaluer l'état de fonctionnement hydrologique
  - Principes à respecter pour comprendre le fonctionnement hydrologique
  - Préparer l'intervention
  - Prendre en compte les propriétés hydrauliques du sol
  - Concevoir le suivi
- **MODALITES DE GESTION DE L'HYDRAULIQUE**
- **LES SITES DE REFERENCE**
  - Les Enverses, Savoie
  - Les Creusates, Savoie
  - Rougemont, Ain
  - Gimel, Loire
  - Charvas, Isère
  - Mées, Landes
- **RÉFÉRENCES**

LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES SITES

La connaissance du fonctionnement hydrologique est un préalable et une nécessité pour une gestion efficace. Toutefois, les paramètres du bilan de l'eau et les processus en jeu ne sont pas simples à prendre en compte, tant ils font intervenir des échelles spatiales et temporelles qui peuvent dépasser le cadre et le temps d'intervention du gestionnaire.

Comme le souligne *J.N Degorce [1995]*[2] à propos de la connaissance des zones humides « la seule certitude est qu'on y trouve de l'eau ». Cette présence d'eau de manière temporaire ou permanente dans le milieu se traduit par la présence d'espèces (faune et flore) spécifique, mais également par des faciès spécifiques du sol dont nous parlerons plus loin. Travailler sur le fonctionnement hydrologique des sites c'est donc décrire, caractériser et comprendre les paramètres qui déterminent la saturation en eau du milieu. Ce fonctionnement n'est pas statique, il s'inscrit dans des dynamiques à long terme, mais répond également à des variations à court terme. Il s'insère aussi dans différents niveaux d'échelle spatiale, du site au bassin versant, dont il faut avoir conscience.

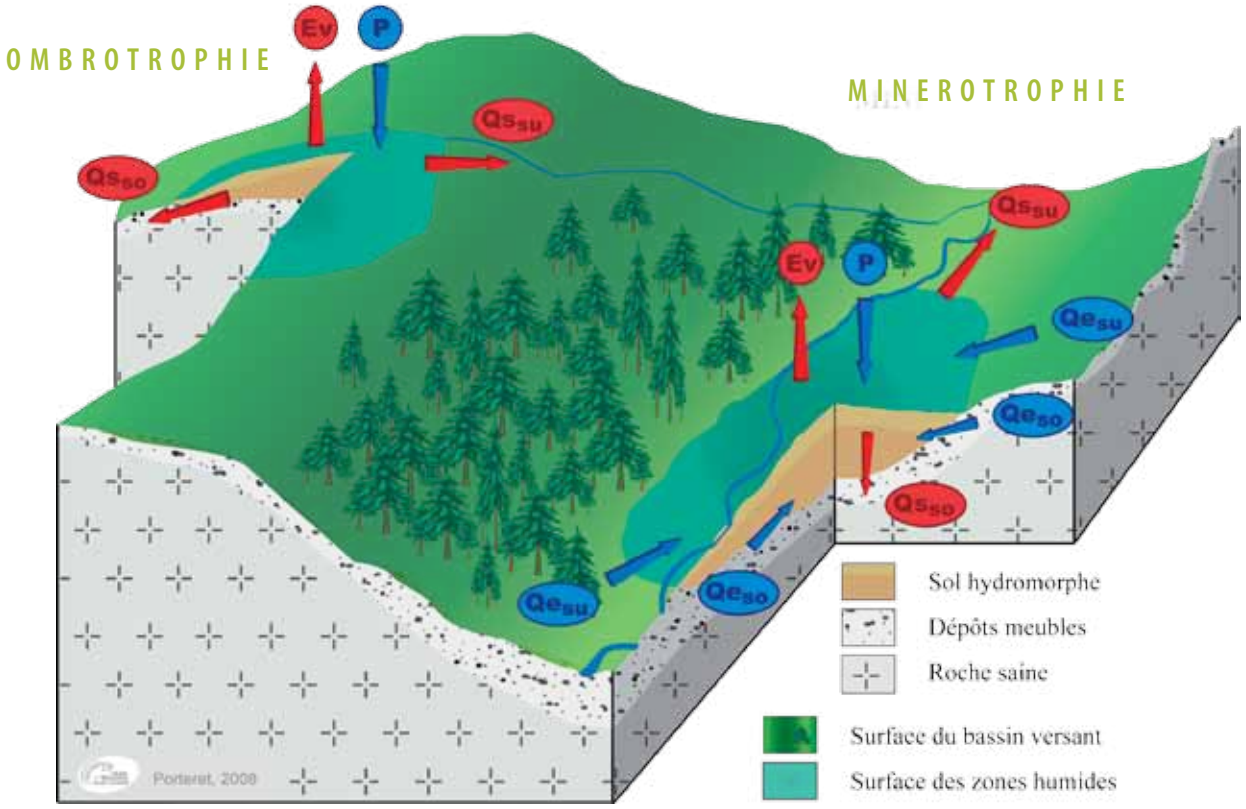
LE BILAN HYDROLOGIQUE DES ZONES HUMIDES

Suivant une approche systémique, les zones humides sont des hydrosystèmes ou des portions d'espace, dans lesquels circulent des flux hydriques. Le fonctionnement hydrologique de ces hydrosystèmes peut alors être décrit et étudié par l'intermédiaire du bilan de l'eau, concept qui vise à établir une comptabilité des entrées et des sorties d'eau de l'unité hydrologique au cours d'une période de temps donnée *[Cosandey et Robinson 2012]*[3]. Compte tenu de la variété des modes d'alimentation et des échanges d'eau entre la zone humide et son bassin versant, l'équation du bilan peut s'écrire de la manière suivante *[Price 2001]*[4] :

$$(P + Qe_{su} + Qe_{so}) - (Ev + Qs_{su} + Qs_{so}) = \Delta R$$

Elle peut être illustrée par le schéma ci-dessous.

S'il est très difficile au gestionnaire d'établir un bilan de l'eau précis d'une zone humide, tant les paramètres quantitatifs à prendre en compte sont nombreux et complexes à mesurer, la bonne conscience de ses paramètres est primordiale. Avoir une idée approximative ou relative est un minimum pour identifier les leviers d'action pour la gestion hydraulique du milieu. Nous pouvons donc les détailler ci-derrière.



© J. Porteret - Cen Savoie

Précipitations sur les zones humides du plateau de Trizac (Cantal).

Les apports d'eau des zones humides (p, qesu, qeso)

Il s'agit des précipitations (P), des écoulements de surface (Qesu) et des écoulements souterrains (Qeso).

La quantité d'eau précipitée (précipitations), sous forme liquide ou solide, est un paramètre de plus en plus accessible au gestionnaire. Au-delà des données de Météo France, des réseaux de suivi amateurs se sont développés récemment avec la baisse des coûts du matériel électronique et les outils de partage et de mise en réseau d'internet.

Le type de précipitation joue un rôle déterminant dans la dynamique hydrologique *[Porteret 2008]*[5]. Pour exemple, on peut citer le cas de la condensation des brouillards ou l'impact de la fonte des neige dans la recharge des nappes.

Où vont les précipitations ?

Toute l'eau précipitée n'arrive pas à la zone humide. Une partie de cette eau est interceptée par le feuillage et retourne directement à l'atmosphère par évaporation. L'interception par la végétation dépasse 20% pour des boisements de Bouleau [*Päivänen 1966*] et atteint 25 à 35% pour des boisements de sapin [*Price 2001*].

Les écoulements de surface et souterrains

La quantification des volumes d'eau est complexe à mettre en œuvre en routine et reste *a priori* du domaine des spécialistes. Ils correspondent au ruissellement de surface mais également aux écoulements concentrés du réseau hydrographique ou aux écoulements de la nappe souterraine. S'il existe des réseaux de mesure des débits, les localisations des stations sur les grands cours d'eau ne permettent que rarement l'utilisation des données pour l'établissement du bilan de l'eau. Par conséquent, ces paramètres sont généralement ceux pour lesquels on dispose du moins de données pour la gestion des sites. Toutefois, des mesures ponctuelles sur de petits cours d'eau sont réalisables par le gestionnaire pour estimer la gamme de débit.

Les sorties d'eau des zones humides (ev, qssu, qsso)

Le processus d'évapotranspiration nécessite un apport énergétique important, fourni par la radiation solaire. La température, l'humidité de l'air et la vitesse du vent sont des facteurs importants du pouvoir évaporant de l'atmosphère. Localement l'exposition et les effets d'ombrage liés à la végétation ou au relief jouent un rôle important. Mais l'efficacité de l'évapotranspiration est conditionnée par la disponibilité pour la végétation de l'eau dans le sol ou la présence de nappe d'eau libre *[Cosandey et Robinson 2012]*[6]. C'est là que se trouve la spécificité des zones humides puisqu'il s'agit de milieux gorgés d'eau avec une nappe proche de la surface la plus grande partie de l'année. Le gestionnaire peut approcher la quantification de ce paramètre en utilisant des formules de calcul qui reposent sur les processus physiques qui produisent l'évapotranspiration (l'équation du bilan d'énergie de Bowen par exemple). Toutefois, cela nécessite de mesurer ou de disposer de nombreuses données météorologiques (température, vent, hygrométrie, radiation solaire, etc.). Météo France calcule ce paramètre pour certaines stations de mesure.

L'évapotranspiration

correspond à la part de l'eau qui passe à l'état gazeux et qui retourne à l'atmosphère par l'évaporation et la transpiration des végétaux.

© J. Porteret - Cen Savoie

Station météorologique (barrage du Mont-Cenis).

Les sorties par écoulement

De la même manière que pour les volumes d'eau entrant dans la zone humide, une partie des volumes d'eau sortant correspondent à des écoulements en surface ou en profondeur. Ces paramètres sont tout aussi complexes à quantifier, même si la canalisation et la rectification des cours d'eau dans de nombreuses zones humides peuvent faciliter des mesures ponctuelles ou l'instrumentation. Pour ce qui concerne les ruissellements de surface, il faut noter que les zones humides possèdent un comportement spécifique en raison des propriétés hydrauliques des sols hydromorphes. En effet, la génération d'écoulement à la surface des zones humides est déterminée par la capacité d'infiltration de l'eau dans la partie non saturée.

Ruissellement sur la tourbière de Roche Gourgon (Loire).

Le ruissellement peut se produire suivant deux processus distincts :

- **par dépassement du seuil d'infiltration** lorsque l'intensité de précipitations est plus grande que la vitesse d'infiltration. L'écoulement de surface se compose donc de l'eau qui ne pénètre pas dans le sol ;
- **par dépassement du seuil de saturation** lorsque le sol est complètement saturé. En zone humide, il peut se produire à des intensités faibles de précipitations. Compte tenu de la saturation en eau du sol, celui-ci ne peut plus emmagasiner l'eau qui ruisselle en surface. Ce type de ruissellement peut perdurer longtemps après que les précipitations aient cessé.

Stockage de l'eau à la surface de la tourbière du Grand Leyat (Savoie).

Ombrotrophes ou minétrophes ?

Au-delà des aspects quantitatifs, l'origine de l'eau et, par conséquent, de la richesse minérale de l'eau est primordiale dans la dynamique écologique des zones humides. Pour exemple, on distingue dans les tourbières deux types de processus d'alimentation en eau, l'ombrotrophie et la minérotrophie.

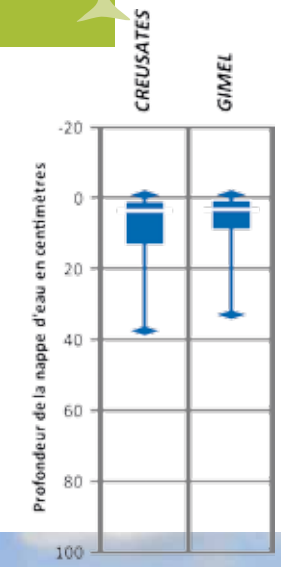
- **Les tourbières ombrotrophes**, déconnectées des apports de la nappe phréatique ou des écoulements de versant, sont alimentées par les apports pluviométriques. Cette déconnexion peut s'expliquer par la position topographique en contexte climatique hyper-océanique, mais peut également apparaître, dans d'autres contextes, avec un bombement de la surface lié à l'accumulation de tourbe.
- **Les tourbières minérotrophes**, qui présentent généralement une surface topographique relativement plane, sont alimentées par les précipitations mais également par les écoulements de surface et/ou les écoulements souterrains. L'eau provenant des versants circule et se répand à la surface de la tourbière où une partie s'infiltre. Le rôle des écoulements concentrés est plus difficile à établir, les ruisseaux et rivières jouant au cours de l'année et suivant les situations un rôle d'alimentation ou de drainage de la nappe.

Capacité de stockage (δr)

Les variations du stock d'eau des zones humides est le paramètre du bilan de l'eau le plus généralement appréhendé par le gestionnaire. Pour cela, il met en place des suivis piézométriques. Toutefois, la mesure de niveau relatif ou de l'altitude réelle de la nappe n'est que très rarement convertie en variation du volume d'eau stockée par la zone humide. En effet, cette conversion nécessite une connaissance relativement précise des caractéristiques hydrauliques du sol (stratigraphie, porosité efficace, etc.). Il n'en demeure pas moins que la connaissance de la dynamique de la nappe est fondamentale pour la bonne prise en compte du fonctionnement hydrologique de la zone humide. Résultante de l'équation du bilan de l'eau, elle traduira toute évolution ou action de gestion sur les entrées ou sorties d'eau de la zone humide. Afin de mieux cerner la part des fluctuations climatiques interannuelles, de la part des interventions anthropiques, les suivis doivent être envisagés sur le long terme.

Toutefois, si, par les suivis de la nappe, le stockage à moyen et long termes est bien pris en compte, il ne faudrait pas oublier que, derrière cette question, différentes échelles de temps doivent être envisagées. En effet, un stockage rapide et efficace a lieu à la surface de la zone humide dans de petites dépressions (difficiles à percevoir en période sèche).

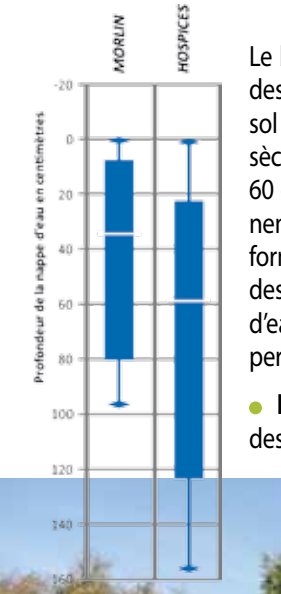
LES DIFFERENTS TYPES DE FONCTIONNEMENT DES ZONES HUMIDES



Sans vouloir être exhaustif, nous décrivons ici quelques situations caractéristiques des types de fonctionnement hydrologique des zones humides. Nous illustrons ces cas par une représentation graphique de la distribution annuelle des valeurs de profondeur de la nappe issue des enregistrements piézométriques réalisés dans le cadre du projet RhoMéO *(cf page 8)*.

- **Les sites à nappe sub-affleurante permanente** : tourbières des Creusates (Savoie), tourbière de Gimel (Loire).

© J. Porteret - Cen Savoie



Le bilan hydrique est excédentaire et se traduit par des niveaux de nappe qui affleurent à la surface du sol une bonne partie de l'année. Lors des périodes sèches, la nappe s'abaisse peu, rarement au-delà de 60 centimètres de profondeur. Ce type de fonctionnement hydrologique se traduit généralement par la formation de sol organique (histosol) caractéristique des tourbières. En altitude, l'importance des apports d'eau en précipitations, une eau peu minéralisée, permet l'apparition du phénomène d'ombrotrophie.

- **Les sites à forte amplitude de la nappe :** marais des Hospices (Haute-Savoie) et de Morlin (Rhône)

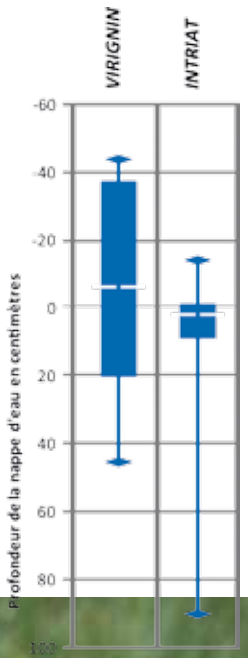
© F. Didier - Cen RA

Très sensible aux apports par précipitations, la nappe réagit fortement aux pertes par évapotranspiration et connaît de fortes variations. L'amplitude de la nappe est très forte entre les périodes les plus humides et les plus sèches. En l'absence de saturation permanente le sol est de type rédoxique ; seuls les horizons profonds, où la présence de la nappe est permanente, montrent un faciès réductique.

© L. Renard - Cen RA

Les sites à submersion : marais de Virignin et de Intriat (Ain),

La dynamique hydrologique de ces zones humides est marquée par une phase de submersion plus ou moins fréquente liée à des apports des cours d'eau qui les bordent ou les traversent (crue). Comme le cas évoqué précédemment, l'amplitude de la nappe est importante, même si elle peut être soutenue par les apports souterrains.



Derrière ces grands types de fonctionnement se cache une très grande variété de situation liée au facteur anthropique. Les actions des sociétés sur l'hydraulique des milieux humides sont anciennes, multiples et plus fréquentes qu'on ne le croit. L'Homme a pu agir positivement (rétention de l'eau) ou négativement (prélèvement, drainage) sur le bilan de l'eau. Mais cet impact ne doit pas uniquement être recherché sur le site. Une prise en compte de la situation globale à l'échelle du bassin versant d'alimentation de la zone humide est nécessaire. Toute zone humide où

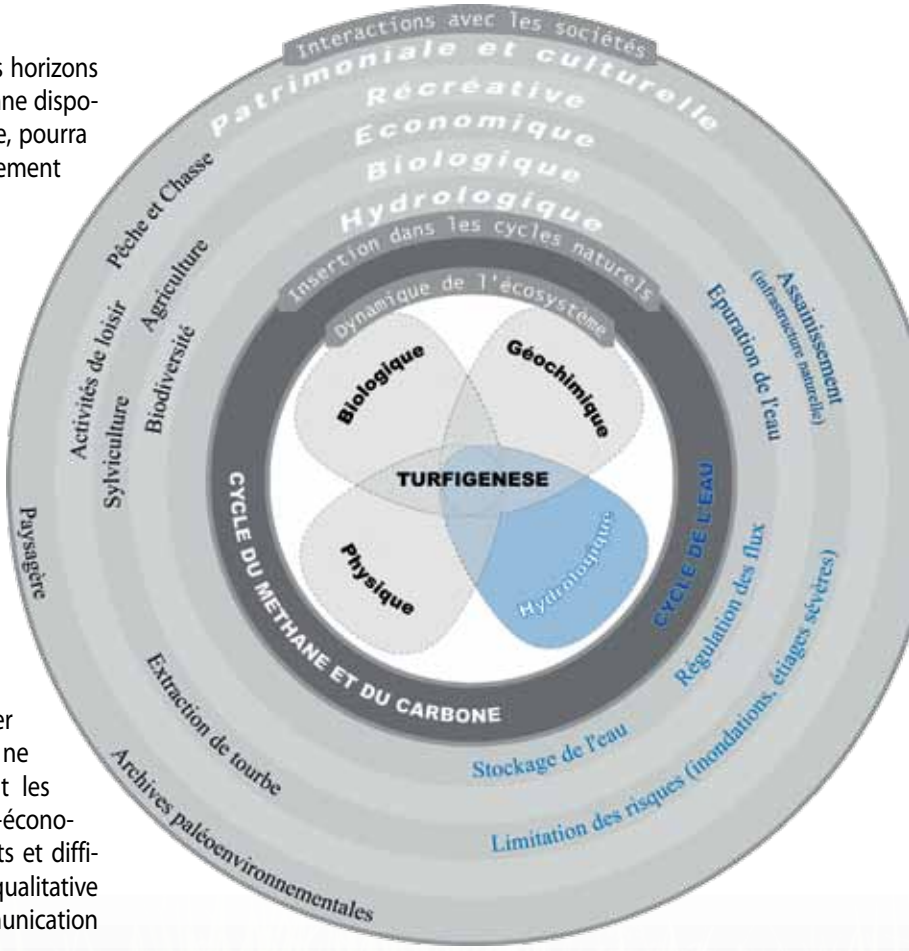
© J. Porteret - Cen Savoie

la nappe n'atteint jamais ou très rarement les horizons supérieurs du sol, ne permettant pas une bonne disponibilité de l'eau pour la végétation hygrophile, pourra être considérée comme ayant un fonctionnement hydrologique dégradé.

LES FONCTIONS HYDROLOGIQUES DES ZONES HUMIDES

Il s'agirait ici de savoir si les caractéristiques physiques la zone humide assurent des fonctions vis-à-vis de la société *(voir schéma ci-contre)*.

Nous ne développerons pas cet aspect. Si lister les fonctions potentiellement remplies par le milieu est possible et souhaitable, évaluer si elles sont efficacement remplies ou non ne peut être envisagé par le gestionnaire tant les paramètres physiques, écologiques et socio-économiques à prendre en compte sont importants et difficiles à confronter. Toutefois une évaluation qualitative peut-être utile et importante pour la communication avec les acteurs locaux.



Fonctionnement, fonctions et usages

Ces termes qui traduisent des notions assez différentes sont souvent confondus. Il apparait donc nécessaire de bien les repréciser ici.

- **Une ambiguïté dans le terme de fonction *(d'après C.SACCA 2009)*** [7]

D'une manière générale, c'est « le rôle d'un élément dans un ensemble ». En biologie, c'est « l'ensemble des propriétés actives concourant à un même but, chez l'être vivant ». Par assimilation, le terme s'est appliqué aux écosystèmes. Les fonctions contribuent alors, de manière globale, à son fonctionnement. Dans une approche systémique où l'homme prend une place centrale dans le fonctionnement de la Terre, ce sont les rôles utiles joués par les milieux naturels qui sont alors regroupés sous la notion de fonctions.
Le terme "fonctions" recouvre simultanément les processus intrinsèques au fonctionnement de l'écosystème et la contribution de ce dernier au fonctionnement des niveaux supérieurs de la biosphère mais l'intégration du facteur humain élargit le sens des fonctions. Ainsi, la dynamique des écosystèmes contribue au fonctionnement des sociétés. L'expression se caractérise par une dimension d'utilité, ce qui explique en grande partie sa connotation positive.
La fonction ne doit pas être confondue avec l'usage. Les fonctions confèrent une valeur d'usage c'est-à-dire une capacité à satisfaire certains besoins et certaines attentes de la société. Ainsi, l'usage traduit l'expression sociale de la fonction mais sa manifestation ou non ne remet pas en cause la fonction. Cette dernière existe indépendamment de l'usage alors que celui-ci est tributaire d'elle.

- **Fonctionnement et espace de fonctionnalité des zones humides**

Si les fonctions jouées par les zones humides justifient la mise en place d'actions, celles-ci ont pour objectifs de garantir leur bon fonctionnement. Derrière le terme de fonctionnement, on identifiera des processus qui conduisent à l'hydromorphie du sol ainsi qu'au développement d'une végétation hygrophile. Si le critère hydrologique est déterminant, il n'est pas le seul à prendre en compte puisque la dynamique de l'écosystème « zone humide » est liée à la combinaison de processus biologiques, géochimiques, physiques et hydrologiques.

La délimitation de l'espace de fonctionnalité a donc pour objectif d'identifier la zone dans laquelle la perturbation d'un certain nombre de paramètres hydrologiques, physiques, biologiques ou géochimiques affecte directement le fonctionnement de la zone humide. Il correspond au contour du bassin versant du point de vue hydrologique ; il intègre les notions de corridor écologique ou de trames vertes et bleues du point de vue biologique. C'est donc un espace polymorphe, difficile à délimiter mais qui doit constituer une zone de vigilance où les modes de gestion doivent garantir la pérennité des zones humides.

© F.Dubet - Cen PA

EVALUER L'ETAT HYDROLOGIQUE, COMPRENDRE LE FONCTIONNEMENT, FAIRE UN DIAGNOSTIC

Au-delà du bilan de l'eau, qui, nous l'avons vu, est complexe à établir, il existe différentes méthodes de diagnostic pour évaluer l'état hydrologique et mieux comprendre le fonctionnement des zones humides.

EVALUER L'ETAT DE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

Le bon fonctionnement hydrologique d'une zone humide se traduit par la présence d'une végétation hydrophile et d'un sol hydromorphe. Aussi, avant toute instrumentation hydrologique, un diagnostic peut être réalisé par des méthodes floristiques et pédologiques. Ensuite, l'équipement des sites avec un dispositif de suivi piézométrique peut permettre de noter l'évolution de la nappe.
Pour exemple, nous présentons les indicateurs de la boite à outils des zones humides. Conçus pour le suivi de l'état des zones humides, ces outils issus du travail de formalisation et de standardisation des protocoles menés dans le cadre du projet RhoMéO, peuvent être adaptés pour le suivi de l'effet de la gestion. L'ensemble des éléments techniques est consultable sur :
http://www.rhomeo-bao.fr/

Indicateur d'humidité du sol

L'indicateur définit un niveau d'humidité du sol de la zone humide, en attribuant aux horizons supérieurs du sol une note basée sur le type de trait d'hydromorphie observé. Les différents types de sols hydromorphes sont définis par les critères de l'arrêté de délimitation des zones humides du 1er octobre 2009 *(classes d'hydromorphie - GEPPA)*.

© J. Porteret - Cen Savoie

Indicateur de la dynamique de la nappe

Le fonctionnement hydrologique des zones humides peut être approché par la connaissance de la dynamique de la nappe d'eau dans le sol. Celle-ci correspond à la différence entre les entrées et les sorties d'eau du bilan hydrique à l'échelle du site. Cette dynamique détermine la présence des espèces hygrophiles et des sols hydromorphes.
L'indicateur caractérise la distribution des valeurs annuelles de la nappe pour un suivi à moyen et long terme de la dynamique hydrologique.

© J. Porteret - Cen Savoie

Le diagnostic fonctionnel,

d'après Goubet P. [8]

Le diagnostic fonctionnel est un cadre conceptuel, un protocole général, pour l'établissement du modèle de fonctionnement à l'échelle du site. En effet, la compréhension du fonctionnement des écosystèmes doit être envisagée suivant un type de système écologique basé sur des modèles généraux, adaptés au contexte du site pour établir un modèle local. La synthèse est donc toujours faite au regard du fonctionnement de l'écosystème en vigueur.
Si le modèle local est conforme au modèle général, c'est tant mieux ! Sinon on s'adapte au modèle local, lequel enrichira aussi le modèle général.
Il ne s'agit plus de travailler par disciplines mais avec des données correspondant à trois pôles :

- la structure : relief et masse tourbeuse, unités fonctionnelles (sols et végétation), réseau hydrographique, éléments structurants divers, environnement (géologie, géomorphologie) ;
- les transferts : flux d'eau, éléments minéraux (bases), éléments trophiques (N & P), tourbe (matière organique), matière minérale solide ;
- l'histoire et la paléoécologie : histoire locale, traces d'activité, palynologie, macrorestes, autres méthodes paléoécologiques.

L'ensemble donne une synthèse fonctionnelle qui repose sur les fondamentaux de l'écologie des écosystèmes suivant une approche systémique. Ce diagnostic doit générer une image virtuelle du site de qualité suffisante pour permettre d'une part la compréhension du fonctionnel actuel et, d'autre part, une comparaison avec un état futur. La description doit donc se concentrer sur les marqueurs à forte valeur explicative.

Indicateur floristique d'engorgement

© J. Porteret - Cen Savoie

La présence d'une nappe d'eau dans le sol constitue une contrainte pour les végétaux, contrainte à laquelle les espèces sont plus ou moins tolérantes ou adaptées. Il est donc possible d'évaluer de manière simplifiée, sur une échelle ordinale, l'optimum de chaque espèce vis-à-vis du niveau moyen de la nappe : c'est sa valeur indicatrice. Les végétaux peuvent donc être utilisés pour évaluer le niveau de la nappe à travers un indice, que nous appelons indice de niveau d'engorgement.

DES PRINCIPES A RESPECTER POUR COMPRENDRE LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

Le bilan du fonctionnement passé et actuel de la zone humide permet de placer les interventions dans le cadre de la restauration, du renforcement ou du maintien de l'hydromorphie. Cet état des lieux est indispensable pour définir les attendus des interventions sur le milieu.

Prendre en compte les différentes échelles spatiales

Dès que l'on considère les questions hydrologiques, différentes échelles d'analyse s'articulent :

- **le bassin versant**, échelle des principaux facteurs déterminant le fonctionnement hydrologique (climat, géologie, topographie, etc.) ;
- **le territoire**, échelle de la gestion de l'espace et de l'aménagement par les sociétés humaines ;
- **le site *sensu stricto***, échelle d'intervention pour la gestion hydraulique.

Ainsi, à une échelle bien plus large que le site géré, des modifications des paramètres hydrologiques peuvent avoir un impact sur le bilan de l'eau de la zone humide.

Les notions de restauration / réhabilitation / régénération,

d'après Magnon G. Tourbières des Montagnes françaises, 2010

Toute action du gestionnaire sur le fonctionnement hydrologique consiste à recréer artificiellement une situation favorable à la dynamique de la zone humide, dynamique qui n'existait plus, afin de faciliter la recolonisation d'un milieu nouvellement mis à disposition. Cette action doit donc être replacée dans une perspective temporelle élargie, depuis la formation de la zone humide. A cette échelle de temps, ces définitions ont finalement moins d'importance, l'homme ayant souvent laissé son empreinte sur les milieux depuis le Néolithique. Les perturbations anthropogènes étant souvent très anciennes, l'action du gestionnaire n'est donc qu'un bref épisode dans une longue séquence de cycles de «perturbations/reconstructions».

Toutefois, comme il est illusoire de vouloir restaurer l'écosystème originel en raison de la multiplicité des paramètres mis en jeux, il serait plus pertinent de parler de réhabilitation. En effet, les expériences de gestionnaires visent à relancer une nouvelle dynamique du milieu, parce que la précédente était soit perturbée, soit avait cessé. Il s'agit bien de recréer les conditions hydrologiques favorables aux milieux, aux habitats et/ou aux espèces choisies, en se rapprochant, si possible, au maximum des modèles fonctionnels validés par la communauté scientifique.

C'est le cas, par exemple, du changement climatique qui modifie directement les précipitations ou l'évapotranspiration, mais également de l'imperméabilisation des surfaces urbaines qui modifie les écoulements et accélère les vitesses de transferts de l'eau dans les bassins versants. L'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant de la zone humide doit être regardée avec attention. A cette échelle de travail, il faut mobiliser l'information géographique spatialisée (voir tableau), comme, par exemple, le référentiel à grande échelle de l'IGN (RGE).

BD Cartage	IGN
BD Topo	
Carte topographique	
Photo aérienne	
Carte géologique (scan ou carte vectorisée)	BRGM
MNT	NASA, IGN

L'étude des diatomées.

D'après Spicuzza-Mocellin 2010 [9] et Schmitt 2010 [10]

Les diatomées sont des microalgues brunes unicellulaires (de 2 µm à 1 mm) munies d'une enveloppe externe siliceuse qui sont présentes dans les eaux douces et marines, sous forme planctonique ou benthique. A l'heure actuelle, environ 100 000 espèces ont pu être recensées et leur nombre est certainement encore sous-estimé.

Les diatomées constituent donc un excellent bio-indicateur et sont utilisées en routine dans de nombreux pays afin d'indiquer, la plupart du temps, la qualité des cours d'eau (indice de polluosensibilité spécifique, indice biologique diatomées.

Si les assemblages de diatomées possèdent un faible potentiel d'enregistrement des changements aux échelles régionale et mondiale, il est important au niveau des habitats eux-mêmes. Les diatomées offrent ainsi des possibilités encore peu exploitées pour fournir des données hydrobiologiques précises, très utiles pour la gestion et la conservation des milieux humides. Leur utilisation en tant qu'outil de gestion permet d'avoir une vision plus large de l'état écologique d'un milieu. Tout d'abord les caractères écologiques des communautés de diatomées permettent de retrouver l'écologie du milieu. Ensuite, des indices écologiques de diversité et de régularité, basés sur la présence ou non d'une perturbation au sein même de la distribution spécifique des cortèges, permettent d'évaluer la stabilité du milieu.

La position topographique

Il faut porter une attention particulière à la question de la topographie. La position de la zone humide par rapport aux versants et au système de pente influe directement sur son alimentation et les vitesses de transit de l'eau. Même lorsque la zone humide paraît quasiment plane, l'analyse de la topographie peut permettre de repérer seuils ou verrous topographiques.

Il est aujourd'hui possible grâce aux modèles numériques de terrain (MNT) et aux outils d'analyse spatiale des logiciels SIG de mieux caractériser les formes topographiques et d'appréhender les relations hydrauliques entre les différentes parties des bassins versants. Cette approche permet une meilleure prise en compte des conditions géomorphologiques.

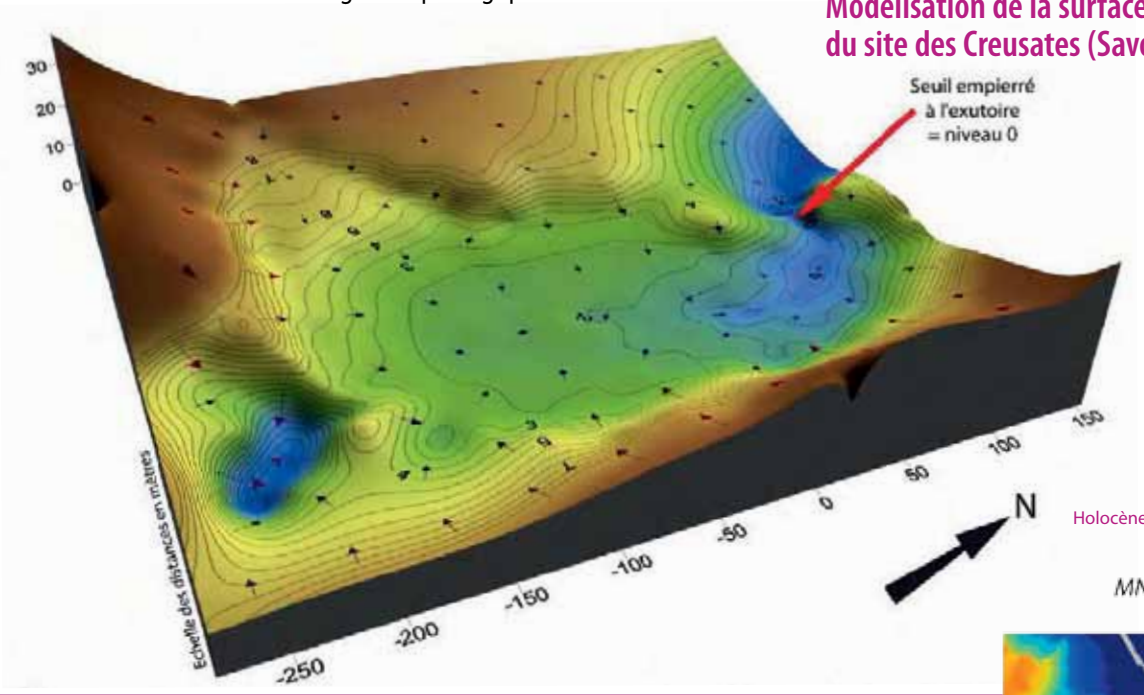
La géologie du bassin versant

La prise en compte de la géologie pour le fonctionnement hydrologique de la zone humide doit répondre à deux questions :

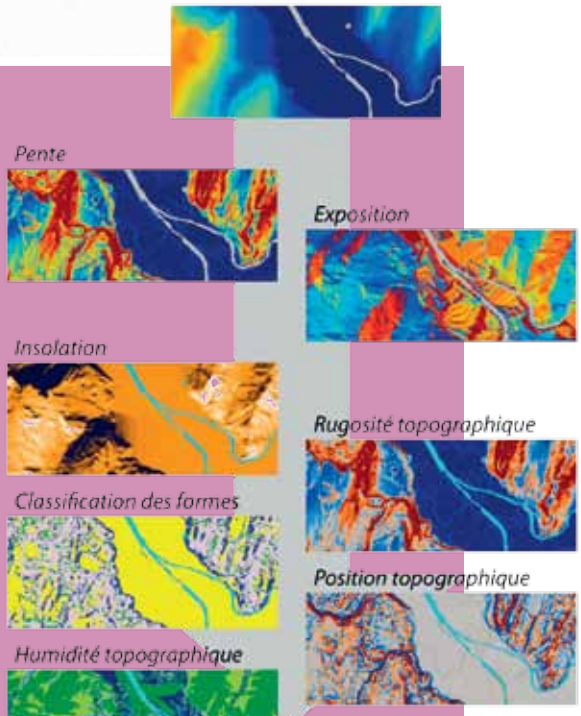
- Quels sont les différents substratums et où se situent les contacts de couches ?
- De quelle nature sont les formations superficielles ?

Ces éléments déterminent les circulations d'eau souterraines (apports et pertes), mais également les propriétés physico-chimiques (minéralisation) de l'eau qui alimente la zone humide. Il ne suffit donc pas de consulter la carte géologique, mais de se plonger dans sa notice détaillée qui apporte généralement des informations plus précises.

Modélisation de la surface topographique du site des Creusates (Savoie).



source : Holocène environnement



Méthodes et techniques d'analyse topographique.

D'après SACCA C., MAZAGOL P.-O., ETLICHER B. (2012), Cartographie de la présence potentielle de zones humides dans le bassin versant de la Dore - Rapport, Parc Naturel Régional Livradois-Forez, 37p

Le développement de zones humides résulte de la combinaison d'un certain nombre de facteurs naturels tels que l'altitude, la pente, la nature géologique (formations superficielles et faciès des terrains sous-jacents), du contexte climatique ainsi que de l'histoire géologique et géomorphologique. Avec un MNT, on peut ainsi caractériser les formes du terrain pour identifier les surfaces planes, convexes ou concaves et définir les talwegs, les crêtes et les différents types de modelés : plaines, vallées, plateaux... *(Mazagol 2006)*[11].

Ces formes jouent un rôle déterminant dans le fonctionnement hydrologique comme la pente qui est le moteur de l'écoulement. Dès que la pente devient suffisante, au-dessus de 7°, soit 12.3%, l'écoulement s'organise et un réseau de vallons se met en place. Il est également possible de calculer un indice topographique. Celui-ci repose sur l'idée qu'au sein d'un bassin versant toutes les zones ne contribuent pas de la même façon aux flux d'eau (concept des aires contributives). Inspiré de l'indice de Beven Kirkby, il est obtenu à partir d'un algorithme qui considère la partie amont de chaque pixel (aire contributive) ainsi que la pente locale.

Parmi les facteurs qui rendent possible la saturation permanente ou temporaire des sols en eau, il y a sans conteste le facteur climatique, lui-même lié à l'altitude. A l'aide des outils des SIG, il est possible de spatialiser cette information sur l'ensemble d'un territoire en interpolant les valeurs ponctuelles des stations météo. Il en est de même pour les indices climatiques comme l'indice de Gaussen qui synthétise les deux paramètres fondamentaux que sont les précipitations et les températures sous la forme du rapport P/2T (P=précipitations et T=températures).

On cherchera :

- la nature minéralogique des roches (acides, sédimentaires, calcaires, métamorphiques, volcaniques) qui a une influence directe sur la chimie des eaux ;
- leur degré d'altération et/ou de fracturation (roches massives, fissurées, fracturées) qui a une influence directe sur les circulations souterraines de l'eau et leur capacité d'emmagasinement de l'eau.

Caractéristiques des formations géologiques

Les roches primaires qui constituent le socle des massifs anciens sont cristallines (granites s.l.) et métamorphiques (gneiss, schistes, micaschistes, etc.). Elles ont une très faible porosité originelle. Elles se caractérisent par une perméabilité de fissures et de fractures. Les régions de socle sont caractérisées par la présence de nombreuses sources de débordement dispersées géographiquement. Ce sont les altérations qui confèrent aux roches de socle leurs propriétés aquifères et qui peuvent être à l'origine de zones humides.

Les roches secondaires, calcaires, ont une forte porosité de fissures. Leur altération a été plus poussée au Tertiaire et au Quaternaire. Les calcaires forment souvent des zones de karst avec de nombreux écoulements souterrains. On oppose ces perméabilités de fissures à une perméabilité générale, à l'instar de ce qui existe dans les sables où la circulation s'effectue autour de chaque grain.

Les roches qui ont des propriétés aquifères importantes sont les grès, les sables, les graviers et alluvions, les roches carbonatées fissurées et les basaltes récents.

Prendre en compte les dynamiques temporelles

Les zones humides sont des milieux qui s'inscrivent dans des dynamiques à long terme. Les tourbières en sont l'exemple le plus marquant puisqu'elles se sont mises en place il y a plusieurs milliers d'années *(Cubizolle 2007)*[12]. Leur fonctionnement actuel s'inscrit dans une dynamique historique, notamment du point de vue

© J. Porteret - Cen Savoie

de leur utilisation par les sociétés humaines. Intégrer à la réflexion l'ensemble des informations concernant la gestion passée du milieu est un préalable indispensable pour déterminer la capacité de remédiation aux disfonctionnements observés.

De plus en plus de documents d'archive sont numérisés et diffusés au grand public (plan, carte, texte et illustration). On citera, par exemple, l'accès aux cartes et photographies aériennes anciennes sur le site Géoportail de l'IGN. Au-delà de la physionomie du site et de son bassin versant, on peut avoir des informations précieuses sur les modes de gestion ou les aménagements hydrauliques passés.

L'histoire plus ancienne de la formation et du développement des zones humides peut être connue par des travaux scientifiques abordant les paléoenvironnements *(Cubizolle 2009)*[13]. Elle éclaire souvent la connaissance du fonctionnement actuel.

Cette connaissance du passé est souvent indispensable pour comprendre les perceptions des acteurs locaux et des riverains vis-à-vis des projets de gestion. Après des siècles de drainage et d'assèchement des milieux humides pour l'aménagement agricole ou la maîtrise des risques, l'émergence de projets de réhydratation passe parfois par un long processus d'acceptation locale.

Extrait de la carte d'état major disponible sur Géoportail - IGN.

PREPARER L'INTERVENTION

Toutes les informations permettant d'identifier l'origine et les volumes des flux d'eau qui transitent par la zone humide sont utiles pour la gestion du site. Mais connaitre les caractéristiques géométriques et les propriétés physiques du sol est un préalable aux interventions sur l'hydraulique pour ne pas engager des opérations à l'efficacité incertaine.

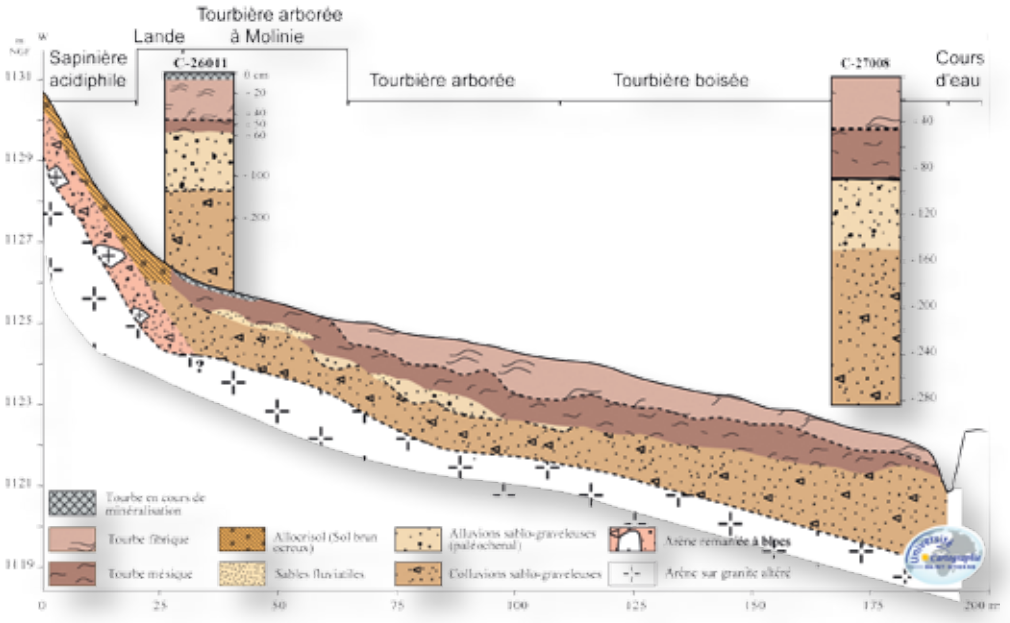
© J. Porteret - Cen Savoie

Quelle emprise spatiale est concernée ?	**L'ensemble de la zone humide**	
	Une partie, un habitat, une parcelle de la zone humide	
Quels sont les objectifs de l'intervention ?	**Restaurer un fonctionnement pour conserver des espèces et/ou des habitats**	
	Modifier la dynamique de fonctionnement pour diversifier les espèces et/ou les habitats	
Quels sont les leviers d'action ?	**Limiter les pertes**	Ralentir les écoulements de surface
		Créer des zones de stockage de l'eau
		Limiter l'évapotranspiration
	Réguler les niveaux	Mettre en place un système de répartition de l'eau
	Augmenter les apports	Prélever l'eau de la nappe profonde
		Restaurer les connexions hydrauliques

Etablir la géometrie de la zone humide

Une zone humide est un objet en trois dimensions, les échanges d'eau ayant lieu à la surface du sol mais également sous le sol.
Afin d'agir sur les écoulements de surface, il est nécessaire d'acquérir des données topographiques de la surface de la zone humide beaucoup plus précises que celles fournies par les cartes topographiques ou les modèles numériques de terrain (IGN, SRMT, ASTER, Lidar). Cette information est indispensable pour bien caler les hauteurs de seuils, évaluer les zones de déversement de l'eau ou les surfaces inondées par exemple.
Pour cela, des levés topographiques sont nécessaires. Ils permettent de réaliser des profils topographiques ou de reconstruire des modèles numériques de surface par interpolation des données. Ces derniers pourront alimenter tous les outils d'analyse spatiale et de modélisation hydraulique.

L'épaisseur du sol hydromorphe et la profondeur de l'horizon imperméable sont des éléments souvent mal connus qui nécessitent des investigations spécifiques. Ils sont pourtant déterminants pour comprendre les circulations, les secteurs de dispersion ou d'accumulation de l'eau dans la zone humide (*Porteret 2008*). Des méthodes simples existent pour acquérir cette information. Ce sont, par exemple, les sondages à la barre métallique, particulièrement efficaces dans les tourbières, mais également les sondages et descriptions pédologiques.



Connaître la qualité des eaux

Connaître les caractéristiques physico-chimiques de l'eau qui circule permet :

- **d'identifier des modes d'alimentation** : l'eau ayant transité par la nappe a un niveau de minéralisation (conductivité électrique) supérieur à l'eau de précipitations ;
- **de vérifier que l'eau utilisée pour réhumidifier le milieu n'est pas polluée** ou possède des caractéristiques compatibles avec l'objectif souhaité de maintien des espèces/habitats (caractère acide ou alcalin).

Les mesures peuvent être réalisées avec des sondes portatives, sous-traitées à des laboratoires d'analyse après prélèvement sur le terrain. Compte tenu de la variabilité saisonnière de ces paramètres, plusieurs campagnes sont nécessaires à un bon état des lieux.

Autour de ce point se pose la question de l'arbitrage entre qualité et quantité d'eau. En effet, des eaux de mauvaise qualité, bien qu'ayant un impact sur l'état du milieu peuvent être indispensable au bon état hydrique de la zone humide. Soustraire du bilan de la zone humide un volume d'eau de mauvaise qualité comporte un risque difficile à évaluer de dégradation de l'équilibre hydrique pouvant aboutir à son assèchement.

© J. Porteret - Cen Savoie

Méthodes et techniques d'acquisition de données topographiques.

D'après A. Tourman

Pour étudier avec précision la micro-topographie de la surface d'une zone humide, nous utilisons généralement un tachéomètre laser permettant d'obtenir une précision centimétrique voir millimétrique lorsque les conditions le permettent. Il s'agit de quadriller la surface concernée sous forme d'un maillage, l'espacement entre les levées topographiques peut varier selon le degré de précision souhaité. Plus la surface topographique est hétérogène, plus il est conseillé d'augmenter la densité de points. Ces données sont géoréférencées puis traitées numériquement sous forme d'isolignes et/ou de modèles numériques de terrain. La principale contrainte de cette méthode est la fermeture du milieu par les ligneux qui réduit, voire limite parfois considérablement les prises de points, c'est pourquoi il est préférable de prévoir ce type d'étude hors période végétative.

© J. Porteret - Cen Savoie

D'après G. Curt

Dans le cadre de projet de recherche appliquée (thèse de géomatique, partenariat CIFRE entre l'Ingénierie SNCF et le laboratoire de recherche ISTHME de l'Université Jean Monnet), des techniques expérimentales d'acquisition de données micro-topographiques sont en cours de développement. Les procédés utilisent les technologies de photogrammétrie pour construire un modèle 3D de la zone, lequel est ensuite exploité par les outils d'analyse topographique et hydrologique des logiciels SIG (calcul des zones d'accumulation d'eau, des ruissellements de surfaces théoriques…).

Différentes méthodes et techniques de prises de vue aériennes sont testées et améliorées pour réaliser des clichés à basse altitude et à haute résolution en s'adaptant aux conditions météorologiques et aux types de terrains rencontrés (ballon hélium ou solaire, cerfs-volants, perche, drones). A partir des clichés, les techniques photogrammétriques permettent d'obtenir une topographie fine de la zone humide (modèle numérique de surface, d'élévation et de terrain) et une orthophoto de haute précision (centimétrique).

© J. Porteret - Cen Savoie

Relevé de la topographie couplé à des sondages radars sur la toubière de la Verrerie (Loire).

Ces sont des techniques reproductibles dans le temps sans devoir faire appel à des levées aéroportées classiques de type LIDAR, plus lourdes à mettre en œuvre. Elles sont potentiellement plus économiques que les levées classiques dans la mesure où elles peuvent permettre de couvrir des superficies importantes en un temps de terrain réduit. Des prestataires commencent à proposer des solutions de mesures et de rendus de ce type (quasi exclusivement par drones pour l'heure).

Au-delà des aspects purement techniques, ces recherches, en améliorant la connaissance de l'hydrologie de surface des zones humides permettront de faire des propositions opérationnelles pour la gestion des zones humides (identification des dysfonctionnements hydrologiques, restauration de l'hydromorphie des zones dégradées, etc.).

PRENDRE EN COMPTE LES PROPRIETES HYDRAULIQUES DU SOL

A travers les caractéristiques physiques du sol, il s'agit de s'intéresser à sa perméabilité. On cherchera principalement à évaluer :

- **la porosité** et plus particulièrement la celle efficace, par analyse d'échantillons en laboratoire ;
- la **conductivité hydraulique**, par des tests *in situ*.

Ces deux paramètres déterminent la capacité de stockage de l'eau de la zone humide et son comportement vis-à-vis des écoulements.

Si ces paramètres ne peuvent pas être mesurés, des tests simples de terrain peuvent permettre de caractériser le sol et de chercher des valeurs de référence de porosité et de conductivité hydraulique dans la bibliographie *(tableau ci-dessous)*. C'est le cas, par exemple, de la méthode de détermination de l'indice de Von-Post pour les horizons organiques. De même, des tests simples de caractérisation de la composition granulométrique existent pour les sols minéraux.
Le comportement hydrique du sol hydromorphe est fortement influencé par sa composition granulométrique et botanique lorsqu'il s'agit d'horizon organique. Lors de perturbations avec des phases d'assèchement sévère, certains sols hydromorphes ne peuvent plus être réhumidifiés. C'est le cas de la tourbe ; il faut alors avoir conscience que l'intervention ne se traduira pas par un retour au fonctionnement antérieur, mais à une nouvelle dynamique.

Notion de KTH

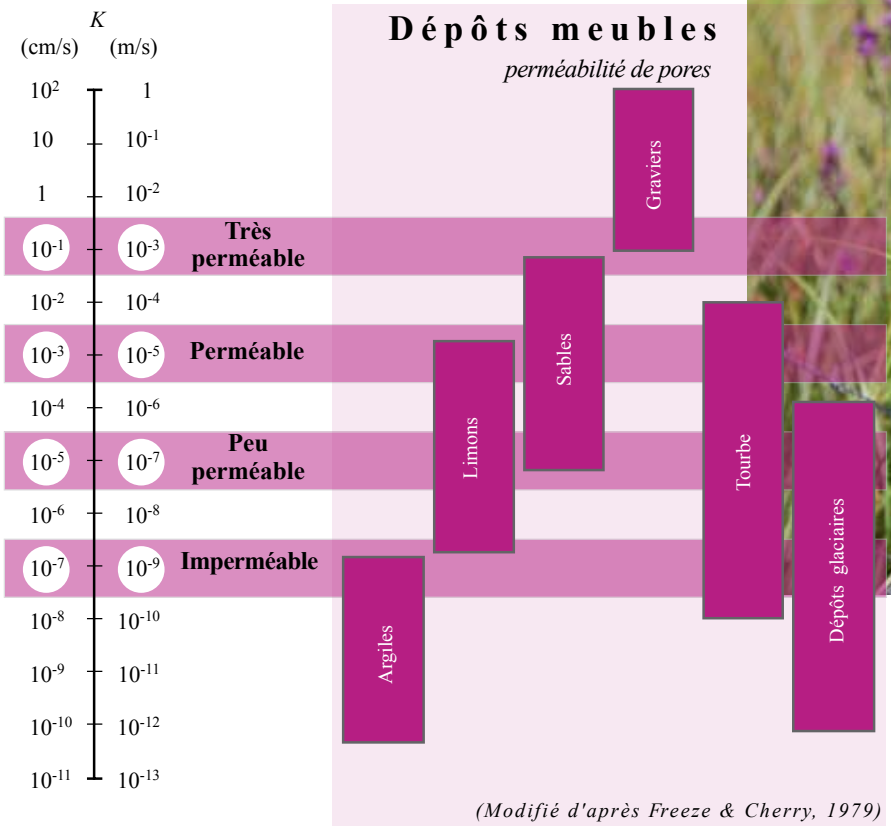
***D'après P Goubet*[8]**
Le pâturage peut engendrer la formation d'un horizon pédologique spécifique appelé KTH.

Il apparaît que cet horizon compacté par le piétinement marque une rupture majeure dans la trajectoire de l'écosystème. En modifiant les propriétés physiques du sol, la formation de cet horizon n'est pas sans conséquence sur les processus hydrologiques.

Les caractéristiques hydrauliques du sol varient avec la profondeur. La limite entre la zone qui connaît des battements de la nappe et celle qui reste saturée en permanence se traduit généralement par des comportements hydrauliques différents. Comme les travaux de gestion interviennent sur la zone de battements de la nappe, appelée acrotelme pour les tourbières, c'est cette tranche de sol qu'il faut étudier. La connaissance de la dynamique des fluctuations de la nappe dans cette zone est toujours intéressante. Elle devrait s'appuyer sur plusieurs années d'enregistrements piézométriques avant travaux.

© F. Didier - Cen RA

Perméabilité et conductivité hydraulique des formations superficielles



Caractériser la matière organique.

d'après Arlette Laplace-Dolonde

Les coupes de sol en zone humide sont rares. Comme il est difficile de réaliser des fosses pédologiques dans les sols gorgés d'eau, pour décrire le sol et plus particulièrement les matériaux d'accumulation organique, il faut utiliser des outils de prélèvement qui n'entraînent pas de remaniement des horizons du sol. Ce sont des tarières gouges ou des carottiers dits « russe » qui permettent de prélever 50 cm à 1 m de sol. Les premières, qui restent ouvertes, sont difficilement utilisables pour les sols trop meubles ou trop humides. Les secondes, qui se ferment avec un clapet après prélèvement, ne pénètrent facilement que dans la tourbe. Les périodes correspondant à l'étiage (fin d'été) sont propices aux observations pédologiques, mais certains prélèvements ou mesures des caractéristiques hydrauliques nécessitent d'être effectués à saturation totale, c'est-à-dire en fin d'hiver.

Pour effectuer des analyses en laboratoire, les échantillons sont prélevés dans la masse de sol et stockés dans un sac plastique sur lequel sont notés le lieu, la date, le numéro du sondage et le niveau de prélèvement. Les papiers dans le sac sont à bannir. Le sac doit être fermé et les échantillons, provenant d'un même sondage, groupés. Les échantillons de tourbe ne doivent pas sécher avant les analyses (taux de fibre, humidité, etc.). Il est conseillé de les garder au frais, l'idéal étant le réfrigérateur. Pour les analyses physiques, le stockage peut être long, ce qui n'est pas le cas pour les analyses chimiques (un mois environ).

On décrit sur le terrain :

- **la couleur,** indicateur du taux de matière organique dans les sols à dominante minérale, de la composition floristique et de son niveau de dégradation dans les sols tourbeux. La charte internationale des couleurs, dite charte Munsell, est d'usage. La couleur des horizons tourbeux doit être notée sur le terrain dès la sortie de l'échantillon de la tarière, voire sur la tarière elle-même, la mise à l'air des niveaux anaérobies provoquant une oxydation rapide qui modifie et atténue les couleurs ;
- **l'odeur,** résultat de la saturation permanente et de l'anaérobiose en milieu confiné réducteur. Les processus de minéralisation sont alors considérablement ralentis ce qui produit de l'hydrogène sulfuré (odeur d'œuf pourri) signe d'un très faible renouvellement de l'eau. De même, les horizons superficiels oxygénés régulièrement présentent une odeur d'humus, de moisi, de champignons, signe de minéralisation de la matière organique et donc d'arrêt du processus de tourbification.
- **l'état de dégradation d'un sol organique,** apprécié sur échantillon saturé ou ressuyé grâce à une échelle de valeur, l'indice de Von Post. Cet état est fonction à la fois du matériel parental (herbacé, bois, feuilles, mousses, sphaignes...), de l'âge de la formation, des conditions hydriques et pédo-climatiques. La description du niveau de dégradation le long du profil stratigraphique apporte des indications sur l'évolution de la dynamique du milieu. Par ailleurs, l'expérience a montré que lorsqu'il impossible de pratiquer le test de Von Post, l'humidité du sol atteint alors le point de flétrissement.

On mesure également *in situ* **la conductivité hydraulique** par la méthode de mesure du temps de retour de la nappe (Slug test) après ajout ou retrait d'eau dans un piézomètre. Cette méthode est la plus courante et la plus facile à mettre en œuvre. Les valeurs de conductivité hydraulique sont déterminées à partir des vitesses de remontée du niveau d'eau après pompage. Les mesures ont donc été effectuées dans les horizons du sol choisis afin de connaître leur comportement hydraulique.

En laboratoire on s'intéressera aux paramètres influençant les écoulements et le stockage de l'eau dans le sol à savoir :

- **le taux de fibre des tourbes,** la base même de la classification des histosols. En laboratoire, une fibre se définit comme un refus de tamis de 200 microns. On distingue les niveaux sapriques (taux de fibre inférieur à 10%), mésiques (10 et 40%) et fibriques (plus de 40%). Le taux de fibres est le résultat du processus de décomposition de la matière organique, influencé par les variations historiques de l'hydromorphie ;
- **la teneur en matière organique** par calcination (appelée perte au feu) d'un échantillon sec à 600°C pendant 2 heures, après deux paliers successifs d'une heure à 350 et 450°C. Elle permet une bonne estimation des teneurs réelles en matières organiques qui varient fortement en fonction de la végétation d'origine et du degré de décomposition. Un horizon est considéré comme tourbeux lorsque la teneur en cendres est inférieure à 50 % mais au-delà de 20 % de matière minérale on estime que la tourbe a subi une contamination allochtone *(Menut, 1974).*
L'indice pyrophosphate sert à mesurer le degré de décomposition du matériel végétal par extraction des composants organiques solubles dans le pyrophosphate de sodium.
- **la densité apparente** qui détermine le comportement hydraulique du milieu, l'ensemble des porosités du sol n'étant pas libre pour la circulation de l'eau.

Taille des fibres d'un échantillon de tourbe.

CONCEVOIR LE SUIVI

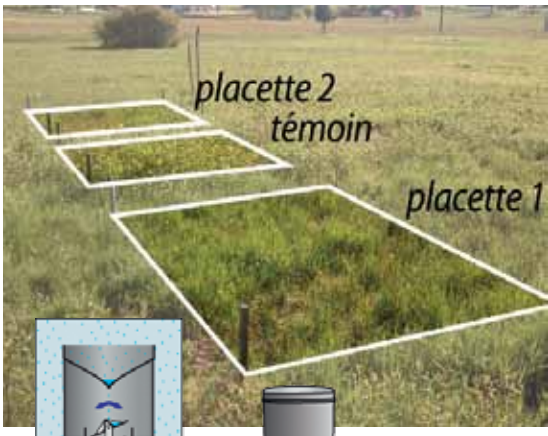
Il faut distinguer différents types de suivi.

- **Le suivi de l'efficacité des travaux**

Ainsi par exemple, on cherchera à vérifier qu'un seuil retenant bien l'eau permet de rehausser le niveau de la nappe à proximité. La difficulté ici est de disposer d'un état initial avant travaux fiable. La mise en place de piézomètres, par exemple, doit être effectuée très en amont de la programmation des travaux. *A minima*, une année de suivis préalables aux travaux est requise pour pouvoir analyser l'évolution des valeurs avant et après au regard de l'évolution du contexte climatique. Si les données météorologiques sont de plus en plus accessibles, il est parfois nécessaire d'instrumenter le site, si l'on ne dispose pas de données locale (pas de station météorologique proche, dans la même gamme d'altitude, sur le même versant, etc.).

- **Le suivi de l'efficacité de la gestion**

Ici, il s'agit de voir si les opérations de gestion de l'eau produisent les effets attendus sur le milieu (espèces/habitats). Dans ce cas, les protocoles de suivi d'espèces par placette sont bien adaptés, mais doivent être programmés à moyen et long terme, pour pouvoir enregistrer la réponse du milieu. Toutefois, ce type de suivi ne peut être interpréter sans une prise en compte ou un contrôle des autres paramètres d'évolution du milieu, le climat et le mode de gestion de la végétation.

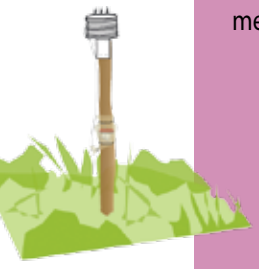


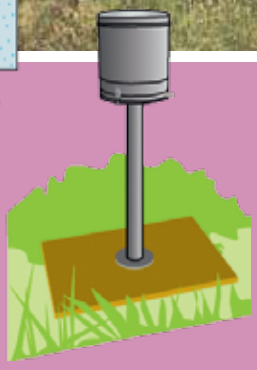
© J. Porteret - Cen Savoie

L'instrumentation pour la mesure des paramètres hydrologiques : un exemple de mise en place d'un site expérimental.

Modifié d'après PORTERET, L'écho des tourbières 2006

Il s'agit dans un premier temps d'effectuer la mesure des paramètres nécessaires à la réalisation du bilan de l'eau. Le total des apports d'eau atmosphérique peut être mesuré à l'aide d'un pluviomètre.




Fonctionnement d'un pluviographe à augets basculeurs

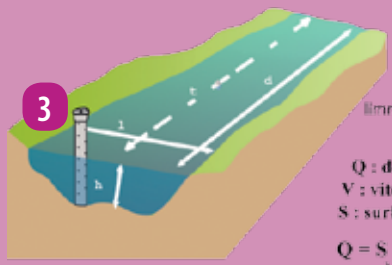
1

2

La mesure des quantités d'eau qui sont évapotranspirées est beaucoup plus complexe. Nous utilisons, par exemple, la formule de Penman-Monteih qui nécessite la mesure de différents paramètres comme les températures (thermomètre), l'hygrométrie (hygromètre), la radiation solaire (albédomètre) ou la vitesse de vent (anémomètre). L'installation de tout ce matériel pose parfois quelques problèmes, comme c'est le cas pour les tourbières du fait de l'irrégularité et de l'instabilité de la surface. Pour s'assurer du bon fonctionnement des appareils, qui nécessitent d'être mis à niveau pour éviter les erreurs de mesure, il est possible d'utiliser la technique des pilotis. Une plaque de bois, traitée pour résister aux intempéries, sert de base à l'installation. Elle est fixée sur quatre pieux enfoncés de 50 cm à 100 cm dans la tourbe. Cette base stable sert de support.

Les écoulements à l'entrée et à la sortie de la zone humide sont mesurés grâce à l'installation de codeurs limnimétriques à flotteur. Ces appareils qui sont installés dans des tubes en PVC de 125 mm de diamètre et qui font office de puits de tranquillisation, enregistrent les hauteurs d'eau dans le ruisseau. Une courbe de tarage établie à partir de mesures ponctuelles permet d'établir la relation entre les hauteurs d'eau enregistrées et les débits effectifs.

3



4

Un réseau de piézomètres permet de suivre l'évolution des niveaux de la nappe d'eau. Il s'agit de tubes en PVC perforés de 50 mm de diamètre dont le niveau d'eau est relevé, soit manuellement par un opérateur, soit automatiquement par une sonde. Plusieurs piézomètres sont positionnés suivant les axes longitudinaux et transversaux du site. Ils sont complétés par d'autres piézomètres localisés au niveau d'habitats spécifiques ou représentatifs. Certains piézomètres, équipés de sondes d'enregistrement automatique par capteur de pression, permettent, de connaître les variations horaires de la hauteur d'eau dans la zone humide.

MODALITES DE GESTION DE L'HYDRAULIQUE

Toute gestion hydraulique ne peut s'envisager sans un cadre foncier et socio-économique favorable. Au-delà de l'intérêt environnemental, ce sont souvent les capacités d'intervention qui déterminent la mise en place d'une gestion de l'eau dans les zones humides.

Le bilan hydrologique permet d'envisager trois types de leviers pour améliorer le fonctionnement de la zone humide. Nous développons ici différentes modalités d'interventions pour la gestion hydraulique des sites.

Les apports en eau

Il s'agit d'augmenter le volume d'eau entrant dans la zone humide.
S'il n'est pas possible d'intervenir sur la quantité d'eau précipitée d'une manière générale, il reste possible d'améliorer le ratio entre eau précipitée et eau atteignant la surface du sol. Pour cela, il s'agit de limiter les pertes liées à l'évaporation en agissant sur le couvert végétal, comme nous l'indiquons dans le point suivant.
Pour les zones humides où un historique d'aménagements a provoqué l'assèchement, il s'agit tout d'abord de rechercher la restauration des entrées d'eau.

© J. Porteret - Cen Savoie

Avec l'urbanisation et le développement des infrastructures, la dynamique des écoulements le long des versants a souvent été considérablement perturbée. L'eau est en effet captée, détournée, canalisée et rejetée en utilisant des réseaux qui s'affranchissent de la topographie. La collecte des eaux pluviales en est un bon exemple, tout comme les réseaux de fossés qui bordent les routes et entraînent parfois d'importantes déconnexions.

Des déconnexions des écoulements sont constatées entre l'amont et l'aval, notamment avec l'urbanisation. Dans les plaines alluviales, les digues ont souvent déconnectés les zones humides des cours d'eau supprimant l'effet de petites crues les plus fréquentes.

© J. Porteret - Cen Savoie

L'intervention est difficile. Ces déconnexions se situent généralement hors des sites gérés et nécessiteraient des travaux importants, y compris de génie civil. Elles nécessitent la concertation d'une multitude d'acteurs pour une bonne acceptation sociale.

Les exemples existent, notamment dans les secteurs de plaine alluviale où la recherche de champs d'expansion de crue donne l'opportunité de reconnecter zone humide et cours d'eau. Toutefois, l'intérêt pour la prévention des risques n'est pas toujours directement conciliable avec l'intérêt environnemental (seuil de crue au-delà duquel ces connexions fonctionnent).

Lorsque l'équilibre hydrique est rompu, des solutions de réhydratation par des apports d'eau gravitaire, voir par des apports en eau pompés dans une nappe profonde peuvent être envisagées. La question éthique de la viabilité de ces aménagements est alors préoccupante.

Les pertes en eau

D'un point de vue théorique, il serait possible d'intervenir sur la quantité d'eau évapotranspirée en intervenant sur le type de couvert végétal. S'il est généralement admis que l'évapotranspiration d'un couvert forestier est supérieure à celle d'une prairie, c'est au-delà du développement foliaire de l'arbre, parce que son système racinaire très développé peut aller puiser dans la nappe beaucoup plus profondément que les espèces herbacées en période sèche.
Si cet avantage existe, il est à relativiser lorsque la disponibilité de l'eau de la nappe pour les espèces herbacées n'est pas un facteur limitant.

Ainsi, on considère généralement que, dans les zones humides, l'évapotranspiration réelle est équivalente à l'évapotranspiration potentielle. Il n'en demeure pas moins que les pratiques de fauche ralentissent, au moins temporairement, le processus en réduisant la surface foliaire. L'intérêt d'une intervention sur les ligneux ne peut être affirmé tant il dépend du contexte local et doit être envisagé à titre expérimental (les publications scientifiques sur la question en zone humide sont rares).

Le ralentissement des écoulements

L'ensemble des interventions sur les écoulements dans la zone humide ne contribue qu'à ralentir la vitesse de transit de l'eau entre son entrée et sa sortie. Toute action limitant la vitesse d'écoulement favorise le bon fonctionnement hydrique de la zone humide. Pour les fossés et drains, il s'agit ainsi de mettre en place des seuils (batardeaux) ou tout autre aménagement pour bloquer ou réduire la vitesse d'écoulement, voire de les reboucher. Lorsqu'il s'agit de cours d'eau traversant la zone humide, qui ont pu être rectifié ou recalibré, des opérations de renaturation de plus grande ampleur doivent être envisagées pour restaurer les fonctionnalités de l'hydrosystème.

© Gorius - Cen RA

Enfin, il peut s'agir également de favoriser la rugosité de la végétation de surface qui est un frein à l'écoulement.

Différentes propositions techniques de barrages seuils

D'après Dupieux, la gestion conservatoire des tourbières de France, 1998

La mise en place d'une série de seuils le long d'un fossé est un moyen efficace de réduire son pouvoir drainant. Les problèmes les plus fréquents concernent l'étanchéité des ouvrages. La bonne localisation des ouvrages, leur ancrage, leur espacement et la réalisation de trop-pleins sont des solutions pour éviter les dysfonctionnements.

Ces barrages seuils peuvent être réalisés :

- avec le matériel tourbeux ou minéral prélevés in situ,
- avec des panneaux de bois,
- avec des rondins de bois, ou des pierres,
- avec des palplanches métalliques ou en PVC.

Des systèmes de vannes doivent parfois être mis en place pour gérer les niveaux d'eau et permettre de concilier les usages.

La solution la plus chère mais la plus efficace reste le comblement des drains et fossés. Comme il ne peut pas toujours être total des sections de fossés sont conservées pour créer des mares.

Paleplanche

Seuil en pierre

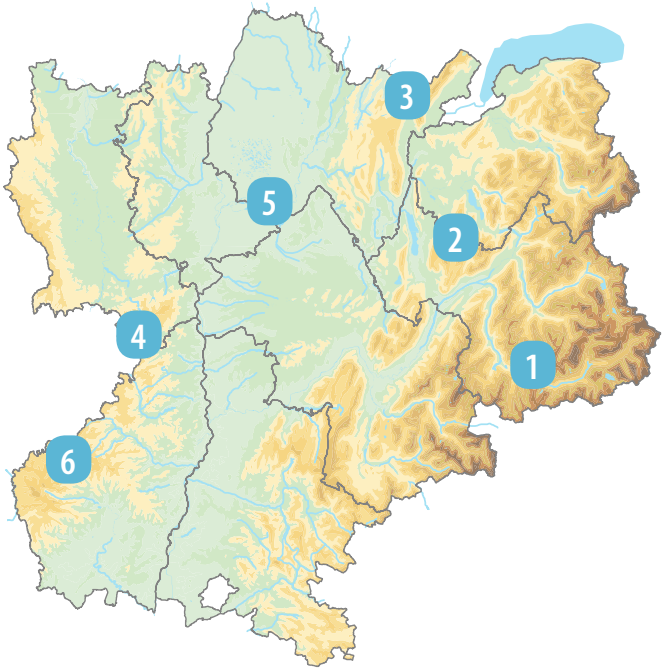
Seuil en planches

Batardeau en métal

Batardeau

© J. Porteret - Cen Savoie

LES SITES DE REFERENCE



1 ZONE HUMIDE DES ENVERSES

Commune : Saint Martin de Belleville (Savoie)
Altitude : 2050 mètres

Au niveau d'un replat, la zone humide est traversée par une piste de ski stratégique pour l'exploitation du domaine. Pour cette raison, des fossés de drainage étaient régulièrement entretenus par le service des pistes pour évacuer l'eau des sources situées en amont et éviter la formation de croûte de glace en début d'hiver. Légèrement en dévers, il était également envisagé, dans le prolongement d'un tronçon plus en amont de terrasser l'ensemble du secteur pour faciliter l'entretien de la piste et le retour des skieurs à la station.

Suite au diagnostic mené par le CEN Savoie dans le cadre du plan d'actions communal en faveur des zones humides (2009), le secteur des Enverses a été désigné par le comité technique, rassemblant l'ensemble des partenaires (Commune, SEVABEL, service des pistes, CEN et Parc national de la Vanoise), comme prioritaire pour engager une action pilote de gestion hydraulique afin de concilier les usages et l'intérêt environnemental.

Le projet a été conçu sur une idée simple de partage de l'eau. A cette altitude, les besoins en eau de la zone humide sont principalement en été et en début d'automne, période pour laquelle il n'y a pas d'enjeu pour l'exploitation de la piste de ski. A contrario, l'hiver lorsque le manteau neigeux se met en place et recouvre la zone humide, l'alimentation des sources n'est pas primordiale pour la zone humide, l'eau de fonte de la neige percolant dans celle-ci par la surface.

Il a donc été choisi de mettre en place des canalisations qui permettent l'évacuation de l'eau des sources de novembre à mai, mais qui peuvent être obstruées et permettre la diffusion de l'eau dans la zone humide durant la saison végétative.

- **Les travaux effectués**

En 2011, les vieux drains ont été bouchés et trois conduits souterrains les ont remplacés. Un système de bonde a été conçu pour permettre l'ouverture et la fermeture de ces conduits. A la fin du printemps, lorsque les conduits sont obturés, trois petits bassins se remplissent d'eau et débordent par surverse. L'eau ruisselant en nappe améliore l'hydratation de la zone humide.

© J. Porteret - Cen Savoie

- **Evaluation**

Les visites de terrain effectuées en 2012 et 2013 ont confirmé l'efficacité opérationnelle du dispositif et permis de réaliser quelques ajustements avec la collaboration active du service des pistes. Les indicateurs RhoMéO mis en place sur le site permettront à terme d'évaluer l'efficacité du dispositif en termes de fonctionnement du milieu.

Les résultats de cette expérimentation permettent aujourd'hui d'envisager la reproduction de cette méthode ailleurs sur le domaine skiable.

Contact : info@cen-savoie.org

Haemopis sanguisuga, la sangsue du cheval.

2 LA TOURBIÈRE DES CREUSATES

Commune : Saint-François-de-Sales (Savoie)
Altitude : 1320 mètres

La tourbière a fait l'objet de travaux de gestion à partir de 1995, suite au diagnostic d'assèchement réalisé par Manneville & Baïer (1993). Cet assèchement consécutif à l'incision des écoulements par érosion régressive entraînait une régression des groupements hygrophiles pionniers. En conséquence, un barrage seuil a été construit sur l'emplacement d'un ancien barrage de bois et de terre, dans une partie très resserrée à l'exutoire. Il a permis d'optimiser la retenue à l'amont en minimisant l'emprise et la hauteur de l'ouvrage. Au-delà de ces travaux, facilitant la recréation d'une zone en eau, l'intervention sur les chenaux d'écoulements incisés dans la tourbe en amont de ce barrage seuil a été envisagée dès 1999. L'évolution des méthodes et techniques nous a conduits en 2012 à tester la mise en place d'un système de palplanche PVC à l'image des méthodes de restauration couramment utilisées dans les régions de tourbière anglo-saxonnes.

© J. Porteret - Cen Savoie

- **Evaluation**

L'opérationnalité du dispositif est très satisfaisante, tant du point de vue de la mise en œuvre que de l'efficacité pour la rétention de l'eau. Simple à mettre en œuvre, sans recours à des engins lourds, amovible, très souple, le système peut être calé très finement pour une gestion du niveau d'eau optimale. Ce calage a été possible grâce à l'ensemble des études topographiques et stratigraphiques menées sur le site. Elles ont mis en évidence la géométrie de la « poche » de tourbe et déterminé la position de cinq seuils.

Contact : info@cen-savoie.org

© N. Gorius - Cen RA

3 LA TOURBIÈRE DE ROUGEMONT

Commune : Brénod (Ain)
Altitude : 930 mètres

Le site fait l'objet de plusieurs interventions. Des drains de près d'un mètre de profondeur captent les sources alcalines puis passent à proximité d'un secteur à sphaignes acidophiles. Les sphaignes n'appréciant pas l'eau alcaline, il fallait neutraliser la partie amont des drains pour obliger l'eau de source à s'infiltrer avant de restaurer la partie proche des sphaignes.
La mise en place d'une première série de seuils mal adaptée (planches seules et pas assez hautes) a nécessité de revoir le dispositif. Suite à la mise en place d'un premier seuil efficace (planche avec bouchon de tourbe en amont, cf. photo), la technique a été généralisée sur les fossés venant des pentes calcaires, par étapes (sur 2 ans, réalisés en régie à l'aide d'une minipelle).
Ce n'est que dans un deuxième temps que cette technique a été mise en place sur le drain longeant le secteur à sphaignes. Les seuils sont plus larges (assemblages de planches emboîtées) car les rives étaient affaissées. La reprise de la végétation sur les bouchons de tourbe a été rapide et le drain est, depuis, totalement inondé, même en été.

- **Evaluation**

La restauration hydrologique de la tourbière de Rougemont n'est pas encore terminée car il reste un linéaire de drain en partie aval qui sera traité dans les prochaines années. De plus le cadastre napoléonien montre que le lit du cours d'eau principal a été rectifié, probablement au XVIIIè siècle. La restauration de ce ruisseau nécessitera au préalable une phase de concertation importante.

Contact : nicolas.gorius@espaces-naturels.fr

© J. Porteret - Cen Savoie

Dolomedes fimbriatus, la Dolomède des marais.

4 TOURBIÈRE DE GIMEL

Commune : Saint-Régis-du-Coin (Loire)
Altitude : 1100 mètres

L'aspect et le fonctionnement de la tourbière acide de Gimel, dans le massif du Pilat, ont été profondément modifiés par différents travaux dans les années quatre-vingt. Un fossé de 215 m de long, large de 2,15 m environ et profond de 0,8 m a été creusé pour assécher la tourbière en 1986. L'impact de ce fossé sur la nappe a été étudié avec la mise en place d'un réseau de 29 piézomètres à partir de 2005. Parallèlement, une étude complète de la stratigraphie couplée à des relevés topographiques a permis d'obtenir une image en trois dimensions de la tourbière. Sur une zone de 4 mètres de part et d'autre du fossé central, un impact significatif sur le niveau de la nappe a été observé. Pour remédier à cette dégradation, quatre barrages seuils en bois (chevrons et planches de douglas) ont été aménagés sur le fossé central, espacés les uns des autres d'environ 7 mètres.

© F. Didier - Cen RA

- **Evaluation**

La hauteur de ces seuils dont l'objectif est de rehausser le niveau de la nappe a été calée pour ne pas inonder les droséra à feuille ronde situées en amont. Un suivi piézométrique de l'impact de ces travaux est en cours.

Contact : info@parc-naturel-pilat.fr

Barrages seuils implantés sur un fossé (succession pour limiter les effets de l'érosion en contexte sableux) sur la tourbière de Mées.

© R. Dupere - Cen Aquitaine

5 LE MARAIS DE CHARVAS

Commune : Villette d'Anthon (Isère)
Altitude : 200 mètres

A la limite du département du Rhône, le marais de Charvas est l'une des dernières zones humides de l'Est Lyonnais. Très impactée par les travaux de la ligne TGV et de l'autoroute, qui ont coupé le site en deux par un remblai nord-sud (1991), le marais présente des signes d'assèchement. Afin de conserver des milieux ouverts très hygrophiles, au-delà des interventions de broyage et de pâturage, le ruisseau de Charvas a été ramené à son tracé initial. Des seuils fixes ont été ensuite aménagés pour rehausser le niveau de la nappe.

Toutefois, ces aménagements n'ayant pas eu l'effet recherché, de nouvelles opérations ont été entreprises entre 1999 et 2006. Une prise d'eau a été aménagée sur le ruisseau et un système de rigole et de léger merlon a été crée pour distribuer l'eau dans la zone humide, avec des effets significatifs sur l'évolution des habitats.

Contact : rmarciau.avenir@wanadoo.fr

© K. Bolf - Fotolia

TOURBIÈRE DE MÉES

Commune : Mées, Saint-Paul-lès-Dax (Lande)
Altitude : 20 mètres

Les tourbières acides à sphaignes de plaine des landes de Gascogne constituent un patrimoine unique à l'échelle européenne dont les spécificités sont encore insuffisamment (re)connues. Ces écosystèmes sont très concernés par la dynamique actuelle de dégradation de l'état de conservation, voire de disparition de la diversité, des habitats et des espèces associés aux tourbières de plaine. Le CEN Aquitaine a initié en interne une étude qui doit permettre :

- **de définir la valeur et le niveau de responsabilité patrimoniale** (biodiversité, flux hydriques, trophiques, minéraux),
- **d'identifier les déterminants du fonctionnement** différencié et les contraintes actuelles,
- **de caractériser les unités de fonctionnement élémentaires** et les unités de gestion cohérentes et de mettre en place un suivi.

© R. Dupere - Cen Aquitaine

Le site de Mées devient ainsi un observatoire du fonctionnement des tourbières de plaine des landes de Gascogne.

A ce jour, les caractéristiques fonctionnelles (micro-climatiques, géomorphologiques, hydrologiques, pédologiques et biologiques) de deux unités de fonctionnement élémentaires ou de gestion ont été identifiées. A l'échelle du complexe tourbeux, les modalités d'alimentation hydrologique, les contraintes particulières sur la pédogenèse des histosols, le faciès physico-chimique des eaux, la localisation des pollutions trophiques ont également pu être identifiés. Prochainement, la typologie des unités élémentaires va être complétée. Des compléments vont être apportés sur la géométrie globale du complexe tourbeux, la localisation et la caractérisation des processus de drainage, l'historique des usages sur le site. Un travail de datation et d'analyse des macro-restes de différents horizons pédologiques permettra d'affiner la caractérisation du déterminisme et de la résilience des unités élémentaires.

- **Travaux effectués**

Les tourbières de Mées ont fait l'objet d'aménagements hydrauliques, type barrage seuil, sur les linéaires de fossés considérés comme drainant et limitant la fonctionnalité hydrologique de la tourbière. Malgré l'existence d'un suivi instrumenté localement, sans état des lieux préalables les effets concrets des aménagements sur l'évolution de la nappe superficielle ne peuvent être interprétés qu'au regard du suivi de l'état de conservation des habitats. Ces aménagements, peu coûteux, ont permis de conserver la diversité des habitats et d'améliorer leur état de conservation (en lien avec des opérations de gestion et de restauration de la végétation).

- **Evaluation**

Les premiers éléments du diagnostic fonctionnel montrent qu'au-delà d'une remontée globale du niveau de la nappe superficielle, d'autres facteurs sont déterminants pour conserver ou favoriser la diversité des habitats et des espèces : les conditions microclimatiques, les processus d'érosion en lien avec le ruissellement et les activités existantes (pâturage en particulier), les forçages sur la dynamique de paludification et les sols, l'évolution localisée de la nappe superficielle, etc. Chacun de ces paramètres doit être appréhendé pour optimiser et assurer l'efficacité des mesures de gestion des habitats associées aux tourbières.
Les opérations de remontée du niveau de la nappe superficielle impliquent un diagnostic précis du champ d'incidence d'un aménagement (relevés topographiques, état des lieux sur l'évolution de la nappe superficielle) afin d'éviter une homogénéisation trop étendue des conditions à court terme. Ces opérations doivent être accompagnées d'un travail de sécurisation et d'amélioration de l'alimentation en eau à l'échelle du bassin versant topographique mais aussi hydrogéologique

Contact : r.dupere@cen-aquitaine.fr

6 TOURBIÈRE DE LA VERRERIE

Commune : Burzet
Altitude : 1250 à 1260 mètres

La verrerie peut surprendre avec une "fabrique de verre" à près de 1300 mètres d'altitude dans un secteur bloqué par la neige plusieurs mois durant ! Son origine est à chercher vers le XV^{è} siècle ou avant et à mettre en parallèle de la présence d'une matière extractible carbonée susceptible de suffire au chauffage du verre, malgré sa mauvaise qualité industrielle.
Le CEN Rhône-Alpes a acquis ce site en 2007, à la suite de travaux de drainage clandestins. Il a alors lancé une série d'études sur son alimentation en eau et la possibilité de revenir à ce qui était supposé être un équilibre initial.

© C Lagarrigue - CenRA

Une première étude menée par Marion Saget (Université de Grenoble) montrait que la tourbe reposait sur un substrat drainant, apparemment incompatible avec la présence d'une végétation très hygrophile.
Une deuxième étude, entreprise par Fabrice Grégoire (ENS de Lyon) a mis en évidence, grâce à l'installation d'un pluviomètre, des précipitations très fortes, évidemment lors des épisodes dits "cévenols" mais aussi au printemps. Les totaux semblent supérieurs à ceux enregistrés au Mont-Aigoual et proches des records de la station de la Souche, sans mois réellement sec. De ce fait, les terrains ont rarement le temps de ressuyer complètement et jamais longtemps. Pour montrer, cela, trois piézomètres ont été installés dans trois secteurs différentes. L'un d'eux a pu être automatisé, il est prévu de compléter cette automatisation. Ajoutons que la position de la tourbière lui permet de concentrer des écoulements superficiels et souterrains.
Enfin, il semble, mais nous n'avons pas encore de conclusion définitive, que des aménagements hydrauliques, tel un barrage à la sortie du système, récemment détruit, aient pu contribuer à l'accumulation de la tourbe.

De premiers travaux de ralentissements des écoulements, sous forme de mini-seuils ou de rebouchage des drains avec la tourbe arrachée ont connu des fortunes diverses : le rebouchage avec la tourbe utilisée *in situ* a été efficace, les mini-seuils beaucoup moins.

Contacts : emilie.dupuy@espaces-naturels.fr
fabrice.gregoire@orange.fr

© Cen RA

DES OUVRAGES UTILES

[1] Pôle-relais Tourbières 2010
Guide de gestion "tourbières des montagnes françaises http://www.pole-tourbieres.org/IMG/pdf/MM-chap3.pdf

Guide de gestion : Tourbières & marais alcalins des vallées alluviales de France septentrionale http://www.pole-tourbieres.org/IMG/pdf/guide_marais_alcalins.pdf

[2] Jean-Noël Degorce (1995)
Les milieux humides dans la Loire , Université de Saint-Etienne - 377 pages

[3] Claude Cosandey et Mark Robinson, 2012
Hydrologie continentale, Armand Colin, 448 pages

[4] Jonathan S. Price (2001)
L'hydrologie (Chapitre 5), dans Écologie des tourbières du Québec-Labrador - Presses Université Laval, 621 pages

[5] Jérôme Porteret (2008)
Fonctionnement hydrologique des têtes de bassin versant tourbeuses du Nord-Est du Massif central - thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, 413 pages

[6] Claude Cosandey et Mark Robinson (2012)
Hydrologie continentale, Armand Colin, 448 pages

[7] Céline Sacca (2009)
Analyse de la perception et des fonctions des tourbières : l'exemple rhônalpin", thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, 356 pages

[8] Cen Rhône-Alpes (2012)
Synthèse des secondes rencontres tourbières de Rhône-Alpes

[9] Héloïse Spicuzza-Mocellin (2010)
L'apport de l'étude des diatomées aux diagnostics écologique et hydrologique de la tourbière de Gimel (Pilat, Loire), Mémoire de Master 1 écologie et éthologie, Université Jean Monnet, 87 pages

[10] Marine Schmitt (2010)
L'apport de l'étude des diatomées aux diagnostics écologique des étangs de Prelager (Pilat), Mémoire de Master 1 écologie et éthologie, Université Jean Monnet, 83 pages

[11] Pierre-Olivier Mazagol (2006)
Recherche de variables contribuant à l'organisation d'un paysage de moyenne montagne : le cas des Hautes-Chaumes du Forez - , thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, 303 pages

[12] Hervé Cubizolle (2007)
Origine, fonctionnement et conservation des tourbières : actes du colloque du château de Goutelas, 5-7 octobre, Université de Saint-Etienne, 381 pages

[13] Hervé Cubizolle (2009)
Paléoenvironnement, Editions Armand Colin, collection U, 271 pages

"LES CAHIERS TECHNIQUES"

est une collection du réseau des acteurs d'espaces naturels de Rhône-Alpes.
Chaque numéro rassemble divers regards de spécialistes et expériences de terrain.

Animation : Pascal Faverot - CEN Rhône-Alpes

"LA CONNAISSANCE DE L'HYDROLOGIE pour la gestion des zones humides"

est rédigé par : Jérôme Porteret - CEN Savoie

à partir d'un premier travail d'Arlette Laplace-Dolonde

Comité de relecture :
Francis Muller et Grégory Bernard (Pôle relais tourbières), Céline Sacca et Bernard Etlicher (Université de Saint-Etienne), Delphine Danancher et Nicolas Gorius-Ferrand (CEN Rhône-Alpes).

Avec des contributions d'Hervé Cubizolle et Céline Sacca (Université de Saint-Etienne), Romain Dupère (CEN Aquitaine), Fabrice Grégoire (ENS Lyon), Jean-Luc Grossi (CEN Isère), Carole Schmitt, Nicolas Gorius-Ferrand (CEN Rhône-Alpes).

Conservatoire d'espaces naturels Rhône-Alpes

Conservatoire d'espaces naturels Savoie

Maison forte 2, rue des Vallières - 69390 Vourles
Tél. : 04 72 31 84 50. - Fax : 04 72 31 84 59
www.cren-rhonealpes.fr

ISSN 1276-681X - ISBN 978-2-908010-97-8

Dépôt légal : mars 2014

l'Europe s'engage en Rhône-Alpes
Fonds Européen de Développement Régional

agence de l'eau RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
établissement public de l'État

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
RHÔNE-ALPES

Région RhôneAlpes

Mise en page : Fred Didier - Photos couverture : J. Porteret, F. Didier - Illustrations : J. Porteret
Impression sur papier FSC 100 % recyclé - encres d'origine végétale - IDMM (69 - Dardilly).