Projet exploratoire ITTECOP 2014

Comment corriger les perturbations des écoulements d'eau alimentant les zones humides ?

Etat des connaissances et état de l'art

05 63 75 28 73
contact@kairos-compensation.fr

Amalvit
81470 PECHAUDIER

Kairos compensation
SCIC SA à capital variable
SIRET 799 542 766 00016
RCS CASTRES
N° TVA : FR 88 799 542 766

Maitre d'ouvrage	Rédacteur	Diffusion	Version
ITTECOP-CILB-FRB	Jacques THOMAS	publique	2.0

Fiche synoptique

Mission	Rapport de projet de recherche exploratoire
Historique des versions du document	Début de rédaction : 15 novembre 2015 édition de la version 1.0 : 21 décembre 2015 édition de la version 2.0 : 18 janvier 2016
Rédacteur(s)	Jacques THOMAS, assisté de Fanny GALINDO (étude de cas) - Fatima LAGOUNN DEFARGE (état des connaissances) et Franck LE MOING - Stéphane BINET- Philippe GROSVERNIER
Relecteur(s)	Céline RIVES - Philippe GROSVERNIER
Validation	18 janvier 2016

SOMMAIRE

L'étude 3
Synthèse 3
L'état des connaissances 3
Des diagnostics accessibles 3
Des projets peu adaptés pour la correction des perturbations 4
Des axes de progrès envisageables 4
Quelques techniques correctives 4
Mais des réserves quand à leur efficacité 5
Étude de cas - Enseignements 6
Méthodologie 6
La prise en compte des zones humides 9
Les enseignements 13
Conclusions 20
Etat des connaissances 22
Généralités 22
Equipements et ressources requis pour la réalisation d'un diagnostic 24
La modélisation pour mieux comprendre, diagnostiquer et prédire 27
Bibliographie : 32

Annexes
A - Questionnaires
B- Typologie
C- Mesures correctives détaillées
D- Mesures correctives non détaillées

Comment corriger les perturbations des écoulements d'eau alimentant les zones humides?

ETAT DES CONNAISSANCES ET ÉTAT DE L'ART

Jacques THOMAS (SCOP Sagne, KAIROS compensation), Fanny GALINDO (SCOP Sagne), Fatima LAGGOUN DEFARGE, Franck LE MOING, Stéphane BINET (ISTO), Philippe GROSVERNIER (LIN'eco)

RÉSUMÉ

Une recherche exploratoire dans le cadre de l'appel à projet ITTECOP 2014, a été réalisée par un collectif composé de bureaux d'études spécialisés dans la conservation des zones humides (SCOP SAGNE, LIN'eco, KAIROS compensation) et d'un laboratoire de recherche (l'ISTO, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, laboratoire CNRS/Université d'Orléans). Les techniques permettant de diagnostiquer le fonctionnement hydrologique des zones humides sont généralement facilement accessibles et permettent d'évaluer l'impact de perturbations éventuelles. L'examen de projets récents révèle des lacunes dans les stratégies de corrections des perturbations affectant les écoulements d'eau. L'état de l'art n'est pas à la hauteur des enjeux de conservation des zones humides. Les quelques exemples de techniques correctives disponibles sont des techniques simples héritées du génie civil.

Mots clés

Zones humides, assèchement, réseaux enterrés, réseaux de surface, fossés de drainage, écoulement hypodermique, évaluation d'incidences, études d'impact, mesures de réduction d'impact, mesures compensatoires.

Une grande majorité des zones humides continentales sont tributaires des mouvements d'eau de leur bassin versant pour garantir leur humectation. La modification de ces écoulements d'eau peut compromettre le bon fonctionnement de ces écosystèmes et altérer leur biodiversité. Aujourd'hui, la connaissance est empirique, parcellaire et peu disponible aux personnes chargées de proposer des mesures correctives permettant de réduire les impacts des infrastructures linéaires sur les zones humides.

Pourtant, plusieurs exemples récents ont montré qu'il était possible de rendre compatible des transformations de l'occupation de l'espace avec la conservation des zones humides voisines; ceci permettant d'éviter des mesures compensatoires souvent couteuses et hasardeuses.

Une recherche exploratoire a été réalisée par un collectif composé de bureaux d'études spécialisés dans la conservation des zones humides (SCOP SAGNE, LIN'eco, KAIROS compensation) et d'un laboratoire de recherche (ISTO, l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, laboratoire CNRS/Université d'Orléans).

L'objectif du projet est de dresser un état de l'art en la matière en rassemblant la bibliographie, en étudiant des exemples récents et en s'appuyant sur la réflexion d'un groupe d'experts confrontés à ces questions. Les infrastructures concernées sont les réseaux enterrés (électricité, gaz, eau ...) et les réseaux de surface (voirie, voies ferrées).

L'ÉTUDE

Le projet de recherche explore les sujets suivants:

- Perturbations des écoulements de surface et des écoulements hypodermiques sur l'alimentation en eau des zones humides par des infrastructures linéaires.
- Examen de mesures correctives récemment expérimentées et état des connaissances sur le fonctionnement hydrologique des zones humides.
- Amélioration de l'efficience des mesures d'évitement et de réduction des incidences des infrastructures linéaires de transport.

Le projet s'inscrit dans le cadre du programme ITTECOP 2014 dans le thème "Infrastructures linéaires de transport: dynamiques des paysages et des biodiversités".

L'étude a été conduite selon deux axes:

- l'état des connaissances sur les écoulements hypodermiques et leurs perturbations (publications et travaux de recherche).
- l'examen de 26 cas issus de projets d'infrastructures récents à partir de documents décrivant ces projets (dossiers loi sur l'eau), afin de dresser l'état des pratiques.

SYNTHÈSE

L'état des connaissances

Si l'hydrologie en tant que discipline scientifique s'est surtout appliquée à mieux connaître les stocks souterrains et le régime des écoulements de surface, il n'en demeure pas moins que les processus de transfert de l'eau au travers du sol ont également été étudiés et notamment dans le cas particulier des zones humides. Les grands types d'alimentation en eau des zones humides sont maintenant bien définis (ombrogène, soligène, topogène, limnogène, fluviogène ou telmatogène ...). Les techniques pour les étudier sont également accessibles : suivi de la hauteur de nappe (piézomètre et sonde enregistreuse), mesure de la conductivité hydraulique (slug test et capacité d'infiltration), mesure des écoulements de surface (seuils, débitmètres), acquisition des données météorologiques locales (précipitation, évapotranspiration), examen des cartes pédologiques et géologiques, interprétation d'images aériennes. L'établissement du bilan hydrologique à l'échelle du bassin d'alimentation des zones humides permet de modéliser le comportement dans le temps de la nappe hypodermique qui conditionne leur fonctionnement. Couplé à un Modèle Numérique de Terrain précis (technologie LIDAR) le modèle conceptuel du bilan hydrologique s'adjoint la dimension spatiale à la dimension temporelle. Ces outils permettent de simuler l'effet de changements de l'occupation du sol sur l'alimentation des zones humides et d'évaluer leur impact. Si la plupart de ces techniques nécessitent un minimum d'appareillage et du temps, certaines observations sont plus immédiates. L'examen de profils pédologiques (sondage à la tarière, terrassements récents, ...), l'étude des traits d'hydromorphie, l'examen des tourbes, l'examen du modelé géomorphologique, fournissent des informations sur le mode d'alimentation en eau des zones humides et leur relation dans le bassin versant. Toutes ces informations peuvent être complétées par l'interprétation de la végétation présente dans le bassin et sur la zone humide, à condition toutefois de connaître l'écologie des groupements végétaux.

Des diagnostics accessibles

Dans le cadre d'une étude d'incidence ces techniques d'observations peuvent être aisément déployées (en tout cas celles ne nécessitant pas d'observations temporelles trop longues). Elles apportent des éléments de compréhension du fonctionnement des zones humides au sein de leur bassin versant et permettent d'établir un diagnostic et d'évaluer l'impact d'ouvrages perturbant l'écoulement de l'eau en surface et sa percolation en subsurface.

Une utilisation raisonnée des modèles hydro-morphogénétiques de zones humides (types ombrogènes, fluviogènes, soligènes, topogènes et leurs différentes déclinaisons en sous-types) permet, sur la base d'une

expertise associant des données spatiales le plus souvent déjà disponibles (cartes de végétation, cartes géologiques, modèles numériques de terrain, mêmes peu précis, avec modélisation des flux de surface et des bassins versants à différentes échelles) de déterminer d'où vient l'eau, de quelle qualité elle est, comment le système est censé fonctionner et quelles sont les perturbations déjà existantes ou engendrées par un projet. Sur cette base, on peut si nécessaire effectuer un nombre réduit de mesures parce que l'on cible ces mesures en des endroits précis pour vérifier une hypothèse ou répondre à une question permettant de valider le modèle. Cela rend les choses abordables pour le maître d'œuvre et peut le plus souvent être réalisé en une année. Et cela évite soit de mener de vastes campagnes de mesures sur l'ensemble d'un site, soit de tirer des conclusions sur la base d'un dispositif de mesures plus simple mais mal ciblé.

Des projets peu adaptés pour la correction des perturbations

Cette étude met en évidence des lacunes majeures dans la conduite des projets impactant des zones humides. Même si les documents en notre possession sont parfois partiels, ils montrent suffisamment d'éléments objectifs sur lesquels est basée notre analyse.

Si 19% des projets proposent des mesures adaptées pour corriger les impacts sur les zones humides, la grande majorité présente des études incomplètes, voir entachées d'erreurs, ou même qui négligent les mesures de réduction des impacts.

Seuls les dossiers qui dressent un diagnostic précis sur le fonctionnement hydrologique des zones humides apportent une réponse adaptée en terme de correction d'impact.
Dans les autres dossiers, les questions simples que tout expert devrait se poser sont généralement absentes :

- d'où vient l'eau qui alimente ces zones humides ?
- cette eau est-elle détournée aux dépens de l'humectation des zones humides ?
- est-il envisageable de restituer le flux détourné ?
- la qualité de l'eau est elle modifiée ?

Le premier défaut que nous avons mis en évidence est un défaut d'expertise sur ce thème. A la place de réponses objectives et documentées à ces questions élémentaires, on trouve de nombreux rappels à la loi (préservation des zones humides, prise en compte dans les différents documents opposables aux tiers) ou autre généralités sur les zones humides qui « encombrent » les dossiers d'étude d'impact. Ici c'est l'intelligence qui est perdante. La lecture des dossiers donne l'impression que si le volet espèces et habitats naturels est relativement bien décrit, le fonctionnement de l'écosystème est, lui, totalement négligé. Certes les écoulements sont généralement cachés, mais les techniques qui permettent de les observer ou de déduire leur présence sont simples (sondages pédologiques manuels, mesures des capacités d'infiltrations, mesure de la conductivité hydraulique, étude de la carte géologique,…).

Le second défaut découle du premier. Le diagnostic étant médiocre, les auteurs ne sont pas en capacité d'imaginer et de proposer des techniques réduisant les impacts tout en conciliant la mise en œuvre de l'ouvrage prévu. Le banal ne peut pas servir le concret. Ici c'est le maître d'ouvrage qui est perdant car il est privé des moyens qui pourraient alléger le coût de son projet. Pire, il va se trouver dans l'obligation de mettre en œuvre des mesures compensatoires coûteuses en argent et en temps, la réglementation visant particulièrement la protection des zones humides.

Pourtant les quelques mesures correctives analysées montrent des solutions techniques simples et robustes (barrage de bentonite, fossé collecteur, noue de diffusion, fossé d'infiltration, couche poreuse, …). Les techniques employées sont inspirées de celles du génie civil et perturbent peu la mise en œuvre des infrastructures.
Le troisième défaut concerne le suivi et la valorisation des projets. S'il nous a été possible de nous procurer des documents présentant des projets, ceux présentant des rapports d'exécution des travaux et des suivis des mesures correctives sont très rares. Le peu d'initiatives innovantes n'est ni validé, ni valorisé comme expérience transposable ailleurs.
Ce constat général est à mettre en relation avec le peu d'échos qu'a obtenu notre appel à contributions sur ce thème auprès de différents réseaux professionnels. Les expériences valorisables sont finalement minoritaires. Notre projet qui à l'origine devait dresser l'état de l'art en la matière a dû être réorienté vers l'examen des causes de ces lacunes.

Des axes de progrès envisageables

Outre l'aspect recherche fondamentale, les axes de progrès sont donc liés à une meilleure qualification des agents réalisant les études initiales. Une formation sur le fonctionnement hydrologique des zones humides devrait améliorer le niveau d'expertise des chargés d'études des cabinets d'études d'impacts et des chargés de mission environnement des maîtres d'ouvrage. Ce sont en effet ces derniers qui par soucis d'efficacité pourront exiger des études privilégiant les corrections d'impacts. Là où elle est possible, la correction des impacts est toujours moins hasardeuse et moins coûteuse que la compensation des impacts. Enfin ce sont les chargés de mission environnement des maîtres d'ouvrages qui peuvent faire le lien entre génie civil et génie écologique.
Le suivi et le partage des expériences sont un autre axe de progrès.

Quelques techniques correctives

Les exemples observés utilisent des techniques héritées du génie civil.

Etanchéité à la bentonite: le fond d'une tranchée peut être recouvert d'un mélange de sables et de bentonite (argile à fort pouvoir gonflant) afin de l'imperméabiliser et d'éviter que la nappe hypodermique ne s'infiltre en profondeur. Avec les mêmes matériaux

il est possible de réaliser des "bouchons" le long d'une tranchée pour limiter l'effet drainant de la tranchée.

Fosse d'infiltration ou noue de diffusion: les eaux interceptées en amont par un ouvrage linéaire peuvent être restituées en aval de l'ouvrage dans une dépression qui va permettre l'infiltration des eaux et réalimenter la nappe hypodermique.

Matériaux drainant: disposés en sous œuvre pour permettre la circulation des eaux amont/aval.

Seuils bâtis dans des fossés pour retenir les eaux et favoriser leur infiltration.

Mais des réserves quand à leur efficacité

Les retours d'expériences sont très faibles, néanmoins une étude en cours qui compare les techniques employées en Suisse pour corriger l'impact des chemins agricoles (Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel) montre que ces techniques, pour la plus part, auraient tendance à concentrer les flux restitués, voir même, à provoquer des phénomènes d'érosions. Le flux intercepté par l'ouvrage qui est généralement un flux laminaire, est transformé en flux linéaire par la mesure corrective. Ces observations plaident à nouveau pour un diagnostic fonctionnel adapté lors de la conception de la mesure corrective et pour la mise en œuvre d'un suivi de l'efficacité des mesures.

ÉTUDE DE CAS - ENSEIGNEMENTS

La construction d'infrastructures linéaires de transport peut engendrer l'altération de zones humides, par la rupture des écoulements en eau qui les alimentent. Afin de proposer des mesures de réduction propres à ce type de projet, nous avons étudié différents dossiers pour en extraire les mesures correctives proposées. Notre étude concerne uniquement les zones humides et les écoulements en eau qui les alimentent. Notre interprétation des données est limitée. Nous ne sommes en possession que d'une partie des dossiers administratifs concernant les projets, et nous n'avions pas la possibilité d'enquêter plus en détail ou même de visiter les ouvrages réalisés.

Méthodologie

ORIGINES ET NATURES DES DOSSIERS

Nous avons traité 26 dossiers, dont 9 ont été transmis directement à SCOP Sagne, et 17 sont issus d'une recherche sur internet. Les documents que nous avons analysés sont de nature diverse. Il s'agit de rapports de suivi environnemental post-travaux, d'un cahier des charges, mais aussi des éléments de dossiers administratifs tels que des études ou notices d'impact, des résumés non techniques de l'étude d'impact, des éléments de demande d'autorisation ministérielle de construction et d'exploitation, des notices ou études d'incidence sur les zones humides et enfin des dossiers d'autorisation « loi sur l'eau ». Même disparates, ces documents permettent de bien cerner la façon dont les zones humides ont été traitées dans chaque dossier.

LES PROJETS CONCERNES

Tous les projets traités, pour cette présente étude, impactent des zones humides. Les dossiers ont été réalisés dans le cadre de projets de construction ou d'aménagement routier, autoroutier, ferroviaire, ou encore de pose de canalisation enterrée (de type électrique, gaz ou pour l'alimentation en eau potable). Il y a également des dossiers présentant des projets de construction de plate-forme, en lien avec des projets routiers.

LE QUESTIONNAIRE, METHODE D'ANALYSE

Notre étude est exclusivement centrée sur les impacts des infrastructures sur les écoulements en eau qui alimentent les zones humides. Afin d'analyser ces différents dossiers, d'origines et de contenus variés, nous avons créé un questionnaire qui s'appuie sur la norme française du génie écologique concernant les zones humides (NF X 10-900). Cette norme nous a permis d'ordonner nos questions pour avoir un aperçu global sur les méthodologies de conduite employées envers les zones humides dans les différents projets.

Le questionnaire porte sur 6 thèmes :

- La caractérisation de la zone humide avant travaux

L'alimentation en eau de la zone humide, ses fonctionnalités hydrologiques,... sont-elles observées et diagnostiquées?

- L'évaluation des impacts causés par la structure

Les impacts sont-ils directs ou indirects ? L'éventuelle interception des écoulements en eau a t-elle été prise en compte ?

- La stratégie de conservation (éviter, réduire ou compenser)

Des mesures de réduction ont-elles été proposées, ou a t-on eu recours uniquement à la compensation ?

- Les mesures correctives envisagées

L'objectif des mesures correctives est-il clairement exposé sous forme SMART (Spécifique, Mesurable, Accessible, Réaliste et Temporalisé) ? La nature des techniques envisagées pour les mesures correctives est-elle décrite ? Les mesures sont-elles rédigées sous forme d'avant projet, de programme opérationnel ou de cahier des charges ?

- Le suivi après travaux

A-t-il été appliqué et, si oui, était-il judicieux ?

- Le bilan

Les mesures appliquées répondent-elles aux objectifs ?

Dans chaque dossier nous avons centré notre attention sur les parties traitant des milieux physiques et naturels afin d'obtenir les informations recherchées. Les questions auxquelles nous avons cherché à répondre sont listées dans les questionnaires présentés en annexe A.

METHODE DE SYNTHESE DES DONNEES

Les données récoltées par les questionnaires ont été triées et organisées dans un seul et même tableau. Il en résulte 9 onglets qui répondent pour chaque dossier à 9 questions précises :

- Diagnostic

L'alimentation en eau de la zone humide a t-elle été correctement identifiée ?

- Impacts et Objectifs

Les impacts causés par le projet sur les zones humides sont-ils correctement mesurés ? Les objectifs à atteindre pour réduire ces impacts sont-ils mentionnés ?

- Programme opérationnel
- CCTP

Ces types de document ont-ils été rédigés ?

- Coordinateur environnement

Un spécialiste écologue est-il présent lors des travaux ?

- Techniques

Les mesures correctives proposées sont-elles clairement présentées ?

- Évaluation d'incidences

Des recommandations pour appliquer les mesures correctives ont-elles été mentionnées ?

- Suivi

Un suivi a t-il été réalisé après l'aménagement de l'infrastructure ?

- Bilan

Les objectifs ont-ils été atteints après la mise en place de la mesure ?

Ce tableau (cf. Tableau 1) permet, d'un point de vue qualitatif, une vue d'ensemble sur la prise en compte des zones humides impactées par les projets.
Nous avons réalisé un code couleur où le vert symbolise des réponses positives et le rouge des réponses négatives. Les cases vertes barrées de rouge symbolisent des réponses correctes mais qui manquent de détails. Le gris symbolise une absence d'information et le noir symbolise, pour les techniques, l'absence de propositions. Ainsi, la présence de vert illustre les dossiers qui ont correctement étudié les zones humides et pris en compte leur alimentation en eau.

La prise en compte des zones humides

TYPOLOGIE

Nous avons regroupé les dossiers en 4 niveaux de qualité du traitement de la question zone humide, dans les dossiers, selon 2 critères :

- ✓ qualité de l'état initial (rubriques diagnostic, impacts et objectifs),
- ✓ qualité de la mesure corrective (rubrique technique).

a. Méthodologie

Tout d'abord, nous avons centré notre attention sur les mesures correctives proposées afin de juger comment celles-ci étaient décrites (cf. Tableau 1, *(1) Les mesures de réduction*), et d'effectuer notre premier tri manuel. Notre base de données étant faible, nous n'avons pas utilisé le tri informatisé.

Il en est ressorti 4 types, selon lesquels les mesures correctives peuvent être considérées comme :

- ◆ **adaptées :** les mesures sont détaillées et semblent adaptées ;
- ◆ **incomplètes :** les mesures ne sont pas détaillées mais elles semblent adaptées. Seuls les grands principes de réduction sont présentés et semblent pertinents ;
- ◆ **incomplètes ou erronées :** les mesures ne sont pas détaillées et présentent seulement les grands principes, on peut noter certaines erreurs de jugement;
- ◆ **incorrectes ou absentes :** les mesures semblent incorrectes ou sont absentes.

Ensuite, nous avons classé les dossiers par rapport au contenu de l'état initial (cf. Tableau 1, *(2) Appréciation de l'état initial*) :

- ◆ la **qualité du diagnostic initial** établi,
- ◆ les **impacts** et les **objectifs** mis en avant pour conserver l'intégralité des fonctionnalités hydrologiques des zones humides.

Plus ces critères ont bien été pris en compte (couleur verte dans le tableau), mieux l'état initial a été bâti.

➔ Ainsi sont ressortis 4 niveaux de qualité de dossier, allant du dossier modèle, où des mesures correctives adaptées sont détaillées, au dossier pauvre en éléments, où les objectifs ne sont pas toujours fixés et les mesures correctives, si présentes, sont peu spécifiques.

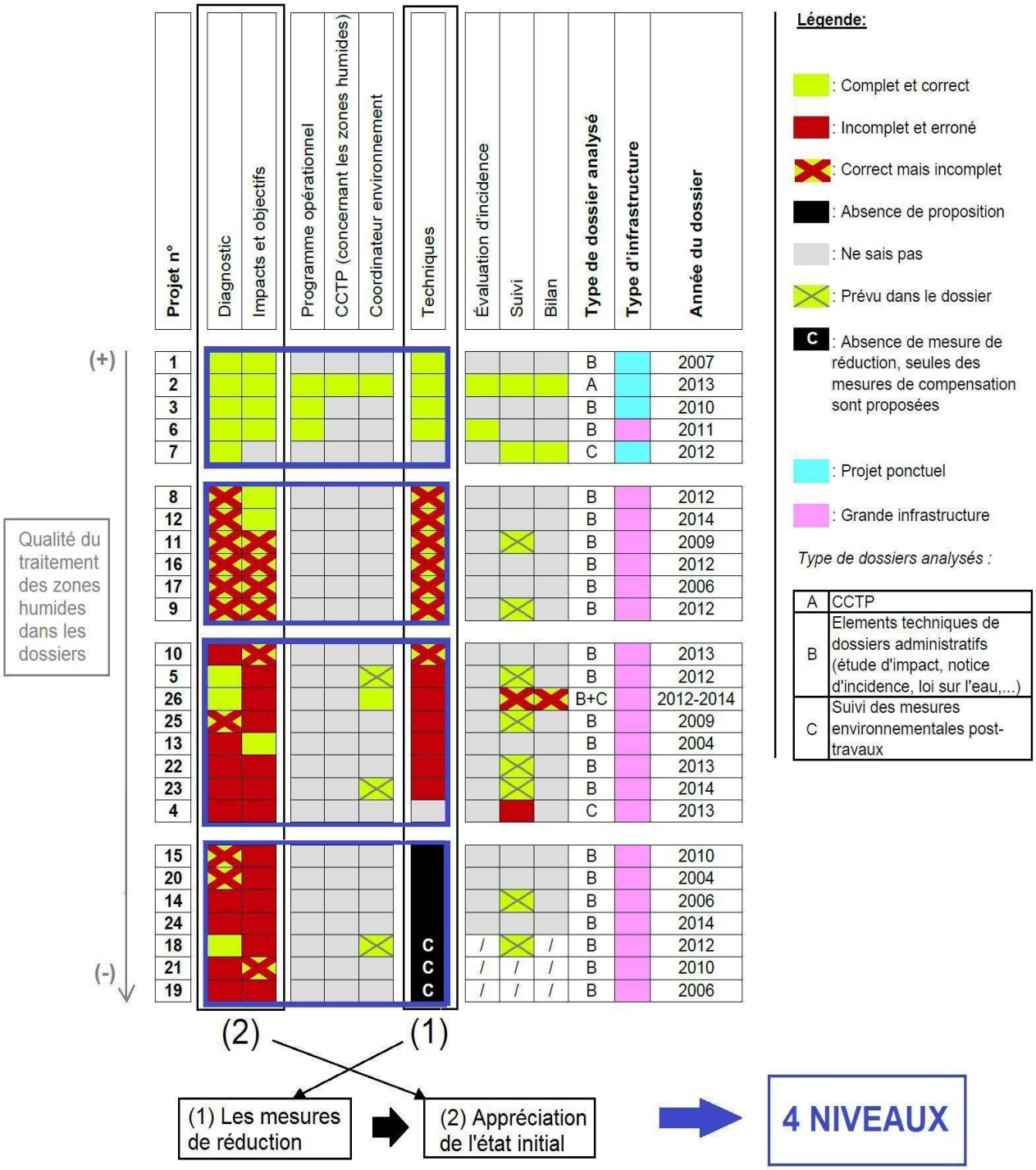

Tableau 1: Synthèse des traitements de données qui ont permis de juger la prise en compte de l'alimentation en eau par les projets perturbant des zones humides. La réorganisation des dossiers en fonction des différentes mesures de réduction proposées (1) puis de l'appréciation de l'état initial (2) nous ont permis de faire ressortir 4 niveaux de qualité.

b. Des mesures correctives adaptées

Cette première catégorie concerne les dossiers (19%) où l'on constate une bonne évaluation de l'état initial et où les impacts du projet sur les zones sensibles ainsi que les objectifs de réduction d'impacts sont bien définis. Des techniques de réduction des impacts sont proposées.

Nous pouvons prendre en exemple le projet n°1 (cf. Annexe B1). L'alimentation en eau de la zone humide a bien été définie. Il est mentionné dans le dossier qu'il s'agit d'une tourbière de pente de type soligène, alimentée essentiellement par un réseau hypodermique mais aussi par un petit ru.
Les terrassements prévus par le projet pourraient intercepter ces écoulements qui alimentent le site. Afin de ne pas rompre ces apports en eau, il a été proposé d'installer une couche de matériaux drainant sous un fossé collecteur afin de permettre aux eaux de s'infiltrer plutôt que d'être évacuées vers le ruisseau. La mesure est dimensionnée et localisée :
« *La couche de matériaux drainant doit être posée dans le fossé latéral à la chaussée sur une profondeur de 50 cm. [...] Les deux ouvrages collecteurs à prolonger (localisation profils 14/15 et profil 22) devront se situer environ 20 cm au dessus du plancher du fossé* ».
Cette mesure détaillée, semble adaptée et réalisable lors des travaux.

c. Des mesures correctives incomplètes

Dans cette catégorie sont regroupés les dossiers (23%) où l'état initial semble correct mais incomplet et les mesures correctives proposées ne sont pas détaillées, bien qu'elles semblent répondre aux objectifs. Nous les avons considérées comme incomplètes.

Prenons en exemple le projet n°8 (cf. Annexe B2). L'état initial a bien été décrit, bien que l'alimentation en eau n'ait pas été correctement définie. Il est noté dans le dossier qu'il s'agit d'une petite prairie humide pâturée alimentée par les eaux de pluies, et d'un boisement d'aulnes glutineux et de saules roux alimenté par la nappe perchée. Les termes employés ne sont pas corrects mais l'alimentation en eau est définie.
Le tracé prévoit de traverser une zone humide et pourrait ainsi nuire à la partie située en bas de pente. Il est proposé la mise en place, de part et d'autre de la voie routière, d'un drain collecteur en amont et la mise en place de noues de diffusion à l'aval afin de restituer les eaux.
La technique semble correcte, mais aucune indication pour sa mise en place n'est présentée. Il parait pourtant nécessaire d'indiquer les contraintes dues au terrain, notamment la profondeur à laquelle ces noues doivent être positionnées.

d. Des mesures correctives incomplètes et erronées

Comme dans le paragraphe précédant, cette catégorie regroupe les dossiers dont les mesures correctives sont incomplètes et erronées (30 %). L'état initial (diagnostic, impacts et objectifs) est insuffisant, il ne prend pas en compte les écoulements en eau alimentant les zones humides. Il en résulte des mesures qui paraissent peu spécifiques voire non adaptées.

Si nous prenons pour exemple le projet n°22 (cf. Annexe B3), l'état initial des zones humides est médiocre. Il est seulement indiqué la présence d'un « *cortège humide* » et d'une « *plaine alluviale* ».
La mesure proposée est le passage en sous-œuvre : « *Franchissement des cours d'eau, fossés, canaux et zones humides en sous-œuvre* ». Aucune indication supplémentaire n'est donnée.

De plus, ils disent éviter certaines zones humides en modifiant le tracé, de manière à les longer au lieu de les traverser: « *de manière à éviter la zone humide --, le tracé fait 2 angles droits consécutifs pour ensuite*

reprendre l'orientation […] ». Le choix du passage à proximité de la zone humide aurait dû induire une évaluation des conséquences potentielles du projet sur la zone. Ceci illustre le fait qu'ils n'ont pas pris en compte les écoulements d'eau alimentant les sites dans l'élaboration de la mesure corrective.

e. Mesures correctives absentes

La préservation des zones humides, du point de vue fonctionnel mais aussi biologique est un enjeu commun à tous les dossiers. Malheureusement des mesures correctives ne sont pas toujours présentées. C'est le cas de cette dernière catégorie (27%). L'état initial est incomplet voire erroné, les mesures correctives ne sont pas présentées, ou alors seules des mesures compensatoires sont envisagées.

Le projet n° 14 (cf. Annexe B4) a déterminé les zones humides sur la base de critères phyto-écologiques. Il en résulte différentes zones humides, nommées : *« pâtures humides », « zones humides associées aux anciennes gravières », « boisement forestier humide », « fond de vallée humide »,* mais dont l'alimentation en eau n'a pas été étudiée.
Suite à ce léger diagnostic, les impacts concernent uniquement les eaux superficielles et souterraines, sans présenter de lien avec les zones humides. Les objectifs ne sont pas fixés et aucune mesure n'est présentée. Il est simplement indiqué : « *La protection ou la restauration des zones humides concernées par le projet devra être assurée ».*

Ceci reflète, d'une part, la volonté de préserver ces zones sensibles, et d'autre part, l'incapacité du bureau, chargé de l'étude, à proposer des mesures adéquates.

Les enseignements

LA STRATEGIE DE CORRECTION ET LES MESURES PROPOSEES

« Comment corriger les perturbations des écoulements d'eau alimentant les zones humides? » Ceci était la question à laquelle ce travail de recherche exploratoire devait répondre. Malheureusement, sur les 26 dossiers étudiés, peu de mesures opérationnelles ont été proposées. Nous remarquons que seulement 17 % des dossiers présentent des mesures de réduction complètes ou détaillées[1]. La description détaillée de ces techniques est suffisante pour juger de leur faisabilité. 50 % des dossiers présentent, de façon non détaillée, les grands principes de la mesure. Le manque de détails ne permet pas de juger de leur faisabilité et de leur opportunité. Pour finir, un tiers des dossiers, ne présentent aucune stratégie de correction, les mesures ne sont pas proposées.

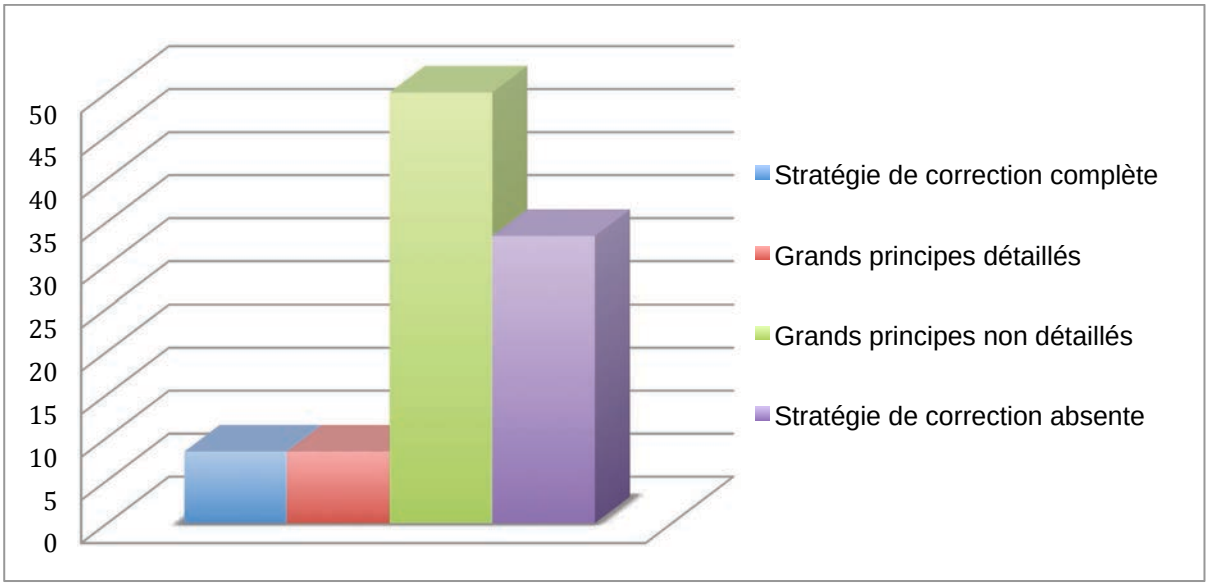

Figure 1 Stratégies de correction en terme de réduction d'impact

1. Stratégie de correction complète avec des mesures décrites

Nous avons regroupé en annexe C les éléments, issus des dossiers, qui présentent les stratégies de réduction d'impacts complètes ou détaillées.

<u>Étanchéité avec de la bentonite :</u>
Ces stratégies consistent souvent à poser un mélange de bentonite. La bentonite est une argile gonflante aussi appelée montmorillonite. Connue pour sa forte capacité de rétention d'eau, elle est utilisée dans le génie civil pour créer des surfaces imperméables et ainsi assurer l'étanchéité des ouvrages.
Plusieurs cas sont décrits :

- Ce mélange peut être disposé en couche horizontale pour recréer un horizon imperméable.

En effet si la tranchée venait percer la couche imperméable, ceci aurait pour conséquence la création d'un drain et donc l'assèchement de la zone humide. Ceci est clairement présenté dans un des dossiers :

[1] Dossiers posant un diagnostic précis et proposant des techniques de réduction des impacts opérationnelles

« Le risque ici est que la tranchée perce les horizons imperméables du sol, entraînant un assèchement des zones en aval.
Nous proposons, à chaque fois que la tranchée dépasse 50 cm de profondeur de la remplir avec un mélange de matériaux prélevés sur place et de bentonite, afin de réaliser un horizon imperméable et d'assurer les écoulements hypodermiques. »

De même, la réalisation d'une tranchée sur une roche mère altérée, peut provoquer la fuite de la nappe d'eau vers des diaclases. La pose d'une couche imperméable est alors nécessaire.

Afin de permettre la circulation des eaux, il est nécessaire de recouvrir cette couche imperméable par un horizon drainant, constitué de graviers, entouré d'un géotextile afin de limiter son colmatage par des éléments fins (cf. Annexe C1). L'illustration 2 ci-dessous, schématise ce concept :

Lorsque nécessaire, il est demandé d'enlever délicatement la terre végétale afin de la reposer en position haute sur la tranchée (cf. Illustration 2). Cet horizon possède le stock de graines nécessaire à la colonisation par une végétation adaptée. Si lors des suivis on constate que la végétation colonise à nouveau le milieu, ceci permettra d'effectuer un bilan positif sur la technique employée.

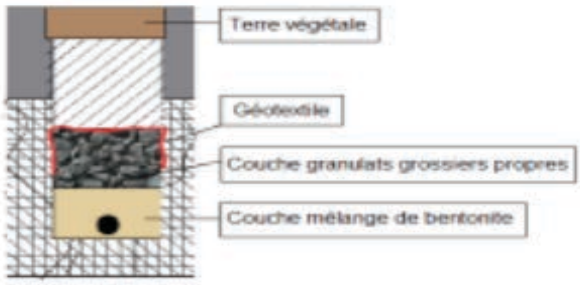

Figure 2 Pose de matériaux drainant sur une couche imperméable afin de diriger les écoulements d'eau

Cette mesure, de pose de matériaux drainant sur une couche imperméable, est aussi applicable le long de voirie. Située dans le fossé latéral à la chaussée, elle assure la diffusion des eaux issues du collecteur situé sous la chaussée (cf. Annexe C2).

- Ce mélange de bentonite peut également être disposé sous forme de « bouchons » pour créer des obstacles aux écoulements d'eau.

Les écoulements préférentiels sont ainsi limités et la répartition des eaux sur la zone humide est favorisée (cf. Annexe C1, C3 et C4). Le concept, schématisé dans deux dossiers, est présenté ci-dessous (cf. Illustration 3) :

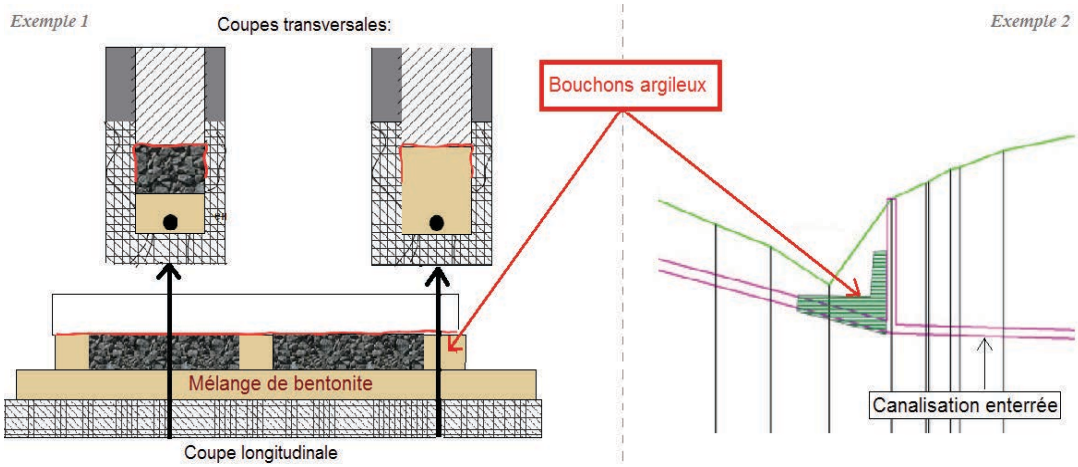

Figure 3 Pose de bouchons argileux

2. Les grands principes de la réduction non détaillés

Nous avons regroupé en annexe D les éléments, issus des dossiers, qui présentent les stratégies incomplètes de réduction d'impacts.

Comme indiqué par l'illustration 1, la majorité des études (55 % des cas) ne détaillent pas les mesures correctives proposées. Elles mentionnent uniquement les grands principes de la technique à appliquer sans aucun détail concret. De fait, la mesure, même si elle semble pertinente, risque d'être mal, voire non appliquée et donc nuire aux zones humides. On attend d'un dossier technique qu'il vérifie la faisabilité des mesures qu'il propose.

- 1er exemple

Le passage de la voie routière sur une zone humide va perturber l'alimentation en eau de la partie située en bas de pente. Afin de restituer les eaux, il est proposé de réaliser des fossés collecteurs avec la mise en place, à l'aval, de noues de diffusion (cf. Illustration 4). Cette mesure[2] paraît adaptée au problème mais manque de détails. Par ce manque de précision, il est possible que les travaux soient mal appliqués et risquent donc de nuire à la zone humide.

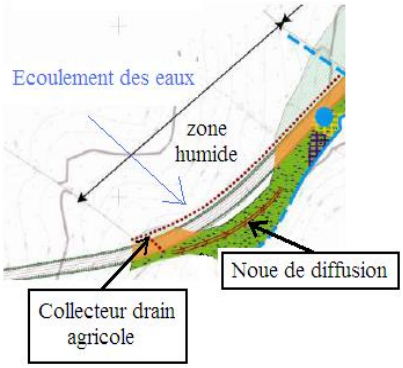

Figure 4 Collecteur de drains agricoles avec noue de diffusion à l'aval

2 Dans le dossier, cette mesure est considérée comme une mesures compensatoire. Nous la jugeons comme une mesure corrective, car la surface envisagée pour la compensation est à l'origine une zone humide impactée.

- 2ème exemple

Une étude propose la pose de matériaux drainants sous-remblais, sans indiquer les contraintes techniques à respecter pour sa mise en place :
« au niveau des larges secteurs de landes humides, au sein des landes --, les caractéristiques techniques des projets ont été adaptées:

- *relèvement de profil en remblais;*
- *décapage peu profond sous remblais et mise en place de matériaux drainants,*
- *transparence hydraulique aux cours d'eau et écoulements type fossés ou crastes*[3]»

Pour que cette mesure soit efficace, elle nécessite une bonne connaissance du sol, de manière à pouvoir l'adapter au terrain et en respecter ses contraintes. Si la couche imperméable est rompue, la pose de matériaux drainant peut agir comme un drain.

- 3ème exemple

Cette autre mesure propose la réinjection dans le milieu naturel des eaux souterraines, captées par les tranchées drainantes et superficielles, sortant des filtres à sables (issues de la chaussée imperméable). Il est noté dans le dossier (cf. Annexe D1) :
« Cette réinjection des eaux se fera le long des fossés de pied de remblai et par de petites dépressions dans le sol, positionnées en sortie de filtre à sable et de tranchée drainantes »
Par le manque de précision technique, nous ne savons pas, d'une part, si le terrain est propice à l'infiltration des eaux et, d'autre part, quelles sont les contraintes de cette technique. Par conséquent, il est fort probable que la mesure ne soit pas correctement appliquée lors des travaux, et que les objectifs de réduction d'impact ne soient pas atteints.

- 4ème exemple

Dans cet autre exemple, bien que les impacts potentiels du projet soient mentionnés *« Le comblement ou le drainage lié à la création de la piste peuvent modifier localement en milieux humides, l'écosystème en changeant l'équilibre hydrologique »*, la mesure proposée (cf. Annexe D2) ne prend pas en compte l'alimentation en eau de ces zones humides. Elle propose le rebouchage de la tranchée par l'horizon organique d'origine, non mélangé, afin de permettre à la végétation une colonisation du milieu. Cette technique ne doit pas être considérée comme une mesure corrective. Elle contribue seulement à un meilleur suivi.

- 5ème exemple

Dans un des résumés non techniques de l'étude d'impact, nous avons lu comme exemple de mesures d'évitement et de réduction : *« Franchissement des cours d'eau, fossés, canaux et zones humides en sous-œuvre ».*
Cette mesure peut avoir un effet néfaste sur les zones humides. Si la traversée en sous-œuvre est située dans le périmètre des eaux alimentant la zone humide, et qu'aucune mesure n'a été mise en place, les eaux peuvent alors être déviées et ainsi ne plus alimenter la zone humide. La traversée en sous-œuvre peut agir comme un drain.

Pour appliquer cette méthode, il est primordial d'avoir une bonne connaissance du terrain et d'en définir ses contraintes. Une étude du sol aurait du accompagner l'argumentaire. Ainsi, la proposition de passage en

3 Une craste est un fossé de drainage, généralement creusé dans le sable, aménagé pour assainir la lande humide

sous-œuvre pourrait être optimisée pour ne pas nuire aux écoulements d'eau et si nécessaire proposer des mesures correctives supplémentaires adéquates, comme par exemple la pose de bouchons argileux.

- 6ème exemple

Le franchissement des zones humides par des ouvrages hydrauliques, est une mesure souvent présentée. De manière générale cette technique n'est pas détaillée : *« La traversée de -- se fera par un viaduc, limitant ainsi les impacts en termes de rupture des liaisons écologiques et de perturbations du fonctionnement hydraulique des zones humides ».*

Une précision, sur la conservation des berges, est parfois ajoutée lorsque qu'il s'agit de zones humides situées en bordure de cours d'eau ou de lac (de type limnogène ou fluviogène) :
« la traversée de la vallée de la -- requiert les mesures suivantes : une organisation des travées du viaduc au-dessus de la -- permettant que les assises soient éloignées des bords de la rivière afin d'éviter toute artificialisation du lit mineur ».

Il est important de savoir si les contraintes techniques du sol au passage du tracé sont favorables à ce type d'ouvrage. Ceci n'est pas toujours garanti dans les rapports ou du moins pas suffisamment précisé.

LES FAIBLESSES DES STRATEGIES DE CONSERVATION DES ZONES HUMIDES DANS LES DOSSIERS

Nous observons, que certains dossiers se contentent de citer les SAGE et les SDAGE, sans proposer de mesures concrètes.

Des dossiers étudiés, plus de 10 % ne proposent pas de mesure de réduction et prévoient de compenser la perte des zones humides par la création de nouvelles. Il est difficile, avec les éléments en notre possession, de juger si la mise en place de mesures correctives aurait pu éviter la compensation. Néanmoins, pour certains projets, alors que la l'infrastructure induit des impacts indirects, aucune mesure de correction n'est prévue, et il est proposé la création de zones humides compensatoires.
« l'ensemble des zones humides et mares forestières impactées par le projet donneront lieu à la création de zones humides de compensation et de mare de substitution ».

➔ Nous observons que dans la majorité des cas l'absence de mesure de réduction, ou la demande de compensation, résulte d'un état initial médiocre, voire erroné.

L'ETAT INITIAL, LA CLE POUR UNE BONNE ANALYSE

Au travers de relevés floristiques (basés sur des critères phytosociologiques) la présence de zones humides est assez facilement observable. Cependant, la caractérisation de son fonctionnement hydraulique est trop souvent incomplète et parfois même absente. Il en découle des mesures correctives qui ne sont pas en adéquation avec le maintien des écoulements en eau.

Les mesures estimées par cette étude comme adaptées résultent d'un diagnostic initial complet où le type de zone humide (qui est fonction de son alimentation en eau) est parfaitement défini. Néanmoins, malgré un état initial méticuleusement réalisé, si les impacts et les objectifs ne sont pas correctement définis alors la mesure proposée ne peut pas être pertinente vis-à-vis de la conservation des fonctionnalités hydrauliques des zones humides. C'est le cas des projets n°5 et 26 (cf. Tableau 1).

Si l'état initial, les impacts et les objectifs semblent corrects mais manquent de précisions, nous constatons que la mesure proposée est incomplète. Elle n'est pas opérationnelle.

Enfin, les plus mauvais exemples de mesures de réduction illustrent un état initial et/ou des impacts et des objectifs erronés au regard de la question de l'alimentation en eau. Les mesures qui en découlent, quand il y en a, ne nous semblent pas correctes.

➔ De manière générale, nous constatons qu'un état initial superficiel, ne caractérisant pas l'alimentation en eau des zones humides, entraîne des mesures correctives médiocres, voire l'absence totale de mesures correctives.

INFLUENCE DE LA TAILLE DU PROJET

La taille du projet influence aussi la qualité du diagnostic (cf. Tableau 1).

Pour les petits projets, dont la surface est restreinte, la caractérisation des zones humides semble plus accessible et précise. L'état initial est mieux décrit et les mesures correctives qui en découlent sont spécifiques et pragmatiques.

A l'inverse, lorsque l'emprise du projet est vaste il semble difficile de bien inventorier et caractériser la totalité des zones humides. Il en résulte un état initial peu précis. Dans ces dossiers où les fonctionnalités des zones humides sont décrites d'une façon souvent vague, les mesures proposées ne peuvent être précises. Les intentions de conservation des zones humides ne peuvent donc pas se traduire en mesures opérationnelles efficientes.

Le projet n°6 démontre qu'il est cependant possible de proposer des mesures adaptées même pour un vaste projet. La différence par rapport aux autres cas de grande ampleur repose sur la qualité de l'état initial, c'est-à-dire la bonne caractérisation des zones humides (du point de vue hydrologique), la bonne compréhension des impacts induits par l'infrastructure, et enfin l'énoncé cohérent des objectifs à atteindre.

➔ Pour les projets à grande emprise, dans la majorité des cas (80%), nous constatons des lacunes sur la réalisation de l'état des lieux initial. La caractérisation des zones humides sur le plan des fonctionnalités hydrologiques est trop souvent incomplète. La zone humide ne se limite pas à sa surface dite de « zone humide », il est important de la situer dans son bassin versant. Les projets de grandes emprises semblent négliger ce dernier point, pourtant primordial.

L'ABSENCE DE SUIVI, FREIN A LA CREATIVITE

Les suivis permettent de juger de l'efficacité et/ou des faiblesses de la mesure appliquée. Il est ainsi possible de bénéficier de retours d'expériences et d'en tirer des leçons, dans le but de contribuer à l'amélioration et au développement de ces différentes techniques proposées de nos jours.
Il sera d'autant plus utile lors de l'application de mesures innovantes, afin d'en juger les limites.

La réalisation d'un bon suivi nécessite de la rigueur :

- Il est primordial d'utiliser comme état de référence l'état initial. Il est donc nécessaire de réaliser minutieusement cet état des lieux initial afin d'obtenir une base de données précise, sur le niveau des eaux et/ou sur la répartition des espèces végétales.

- Le suivi doit être fait de manière réfléchie, notamment la pose de piézomètres. Ils doivent être situés

dans des lieux stratégiques et justifiés, afin d'être représentatif des zones humides impactées.

- Le suivi doit être effectué sur plusieurs années avant de tirer toute conclusion sur la neutralité de l'infrastructure envers les zones humides.

- Le suivi permet la rédaction d'un bilan post-travaux. Il peut également servir de source d'inspiration et d'information dans le choix des mesures à appliquer pour de nouveaux projets.

Conclusions

Cette étude met en évidence des lacunes majeures dans la conduite des projets impactant des zones humides. Même si les documents en notre possession sont parfois partiels, ils montrent suffisamment d'éléments objectifs sur lesquels est basée notre analyse.

Si 19% des projets proposent des mesures adaptées pour corriger les impacts sur les zones humides, la grande majorité présente des études incomplètes, voir entachées d'erreurs, ou même qui négligent les mesures de réduction des impacts.
Seuls les dossiers qui dressent un diagnostic précis sur le fonctionnement hydrologique des zones humides apportent une réponse adaptée en terme de correction d'impact.
Dans les autres dossiers, les questions simples que tout expert devraient se poser sont généralement absentes :

- d'où vient l'eau qui alimente ces zones humides ? quelles sont ses propriétés physico-chimiques ?
- cette eau est-elle détournée aux dépens de l'humectation des zones humides ?
- est-il envisageable de restituer le flux détourné ? ... en qualité et en quantité ?

Le premier défaut que nous avons mis en évidence est un défaut d'expertise sur ce thème. A la place de réponses objectives et documentées à ces questions élémentaires, on trouve de nombreux rappels à la loi (préservation des zones humides, prise en compte dans les différents documents opposables aux tiers) ou autres généralités sur les zones humides qui « encombrent » les dossiers d'étude d'impact. Ici c'est l'intelligence qui est perdante. La lecture des dossiers donne l'impression que si le volet espèces et habitats naturels est relativement bien décrit, le fonctionnement de l'écosystème est lui totalement négligé. Certes les écoulements sont généralement cachés, mais les techniques qui permettent de les observer ou de déduire leur présence sont simples (sondages pédologiques manuels, mesures des capacités d'infiltrations, mesure de la conductivité hydraulique, étude de la carte géologique,…).

Le second défaut découle du premier. Le diagnostic étant médiocre, les auteurs ne sont pas en capacité d'imaginer et de proposer des techniques réduisant les impacts, tout en conciliant la mise en œuvre de l'ouvrage prévu. Le banal ne peut pas servir le concret. Ici c'est le maître d'ouvrage qui est perdant car il est privé des moyens qui pourraient alléger le coût de son projet. Pire, il va se trouver dans l'obligation de mettre en œuvre des mesures compensatoires coûteuses en argent et en temps, la réglementation visant particulièrement la protection des zones humides.
Pourtant les quelques mesures correctives analysées montrent des solutions techniques simples et robustes (barrage de bentonite, fossé collecteur, noue de diffusion, fossé d'infiltration, couche poreuse, …). Les techniques employées sont inspirées de celles du génie civil et perturbent peu la mise en œuvre des infrastructures.

Le troisième défaut concerne le suivi et la valorisation des projets. S'il nous a été possible de nous procurer des documents présentant des projets, ceux présentant des rapports d'exécution des travaux et des suivis des mesures correctives sont très rares. Le peu d'initiatives innovantes n'est ni validé, ni valorisé comme expérience transposable ailleurs.

Ce constat général est à mettre en relation avec le peu d'échos qu'a obtenu notre appel à contributions sur ce thème auprès de différents réseaux professionnels. Les expériences valorisables sont finalement minoritaires.

Outre l'aspect recherche fondamentale, les axes de progrès sont donc liés à une meilleure qualification des agents réalisant les études initiales. Une formation sur le fonctionnement hydrologique des zones humides devrait améliorer le niveau d'expertise des chargés d'études des cabinets d'études d'impacts et des chargés de mission environnement des maîtres d'ouvrage. Ce sont en effet ces derniers qui, par soucis d'efficacité,

pourront exiger des études privilégiant les corrections d'impacts. Enfin ce sont eux qui peuvent faire le lien entre génie civil et génie écologique.

Le suivi et le partage des expériences sont un autre axe de progrès.

ETAT DES CONNAISSANCES

Généralités

QU'EST-CE QU'UNE ZONE HUMIDE ET QUELS SONT SES ENJEUX ?

Les zones humides sont des écosystèmes à l'interface entre les milieux terrestres et aquatiques (eau douce ou marine) caractérisés par la présence d'eau plus ou moins continue.

L'article L. 211-1 du Code de l'Environnement définit les zones humides comme *"des terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire. La végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année"*

Il existe une grande diversité de zones humides liée aux différences de climat, de la nature géologique, de l'origine des entrées d'eau et d'écoulements dans le milieu. On en trouve à l'intérieur des terres (les bordures de lacs et de cours d'eau, les bras morts, les mares, les marais intérieurs, les landes humides, les tourbières, les forêts et les prairies humides) mais aussi sur le littoral, soumises à l'influence marine (les marais littoraux, les prés salés, les vasières, les estuaires et lagunes).

En France, la majorité des zones humides a été modifiée, modelée, voire créée par l'Homme.

Les quatre principaux textes réglementaires protégeant les zones humides dans le droit français sont les suivants :

=> La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 dans son article 2 (abrogé mais repris à l'article L. 211-1 du Code de l'environnement) précise que la gestion équilibrée et durable de la ressource en eau vise à assurer la prévention des inondations et la préservation des écosystèmes aquatiques, des sites et des zones humides.

=> La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) 2000/60/CE du 23 octobre 2000 définit à l'échelle européenne un objectif de bon état des masses d'eau à l'horizon 2015. Elle précise que "les zones humides peuvent contribuer à l'atteinte du bon état des cours d'eau et des plans d'eau". Il est donc primordial de les prendre en compte dans les plans de gestion et les programmes de mesures.

=> La loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 (LEMA), rénove et modifie la loi sur l'eau de 1992, dans le but d'assurer l'atteinte des objectifs fixés par la Directive Cadre sur l'Eau. Elle renforce le contenu et la portée juridique des Schémas d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE) et exige l'instauration de deux nouveaux moyens d'actions : le Plan d'Aménagement et de Gestion Durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques (PAGD) et le règlement du SAGE

=> La loi relative au Développement des Territoires Ruraux n°2005-157 du 23 février 2005 (loi DTR), précise que "la préservation et la gestion durable des zones humides sont d'intérêt général". L'Etat et les collectivités territoriales doivent veiller à la cohérence entre les différentes politiques publiques. De plus, la loi DTR introduit les notions de Zones Humides d'Intérêt Environnemental Particulier (ZHIEP) et de Zones Stratégiques pour la Gestion de l'Eau (ZSGE).

Afin de permettre une gestion harmonieuse des zones humides, les Installations, Ouvrages, Travaux et Activités (IOTA) présentant des dangers pour la ressource en eau et les milieux aquatiques sont soumis à autorisation ou à déclaration (article R. 214-1 du Code de l'environnement).

En zone humide, les travaux d'assèchement, de mise en eau, d'imperméabilisation et de remblaiement sont soumis à :

- autorisation si la superficie de la zone est supérieure ou égale à 1 ha ;
- déclaration si la superficie est supérieure à 1 000 m2, mais inférieure à 1 ha.

MODES D'ALIMENTATION DES ZONES HUMIDES

Il s'agit ici principalement des écoulements hypodermiques, i.e. les premiers mètres du sol
La connaissance de l'hydrologie est primordiale et incontournable dans le processus de gestion d'une zone humide. Dans la littérature scientifique, des tests de corrélation montrent les liens des niveaux de nappe avec la biomasse ou la composition floristique (PAUTOU et al., 1996). Il est par conséquent indispensable de connaître dans le détail le ou les mécanismes d'alimentation en eau de la zone humide concernée.
Les grands modes d'alimentation en eau d'une zone humide sont :

- Alimentation par les précipitations (ombrogène) ;
- Alimentation par une nappe d'accompagnement (topogène, soligène, thalassogène);
- Alimentation par un réseau hydrographique (fluviogène).

L'utilisation d'un ou de plusieurs de ces modes d'alimentation est régie par la topographie du site et de l'ensemble de son bassin versant hydrologique. Il est essentiel de se rappeler que l'alimentation de la zone humide peut résulter de la combinaison de plusieurs modes différents en alternance et/ou simultanément de manière ponctuelle et/ou chronique.

Les modes d'alimentation contraignent la définition du/des bassins versants « hydrologiques » à ne pas confondre avec les bassins purement « topographiques ». Il est par conséquent primordial de bien identifier ces différentes modalités au préalable à toute étude.

IMPORTANCE DES ECOULEMENTS SUPERFICIELS

Le réseau hydrographique de surface peut se composer de plusieurs éléments. La zone humide peut être ponctuée de plans d'eau naturels (lacs, ancien méandre fluvial...) mais peut également être connectée à une rivière.
Les écoulements superficiels, le plus souvent temporaires, peuvent être importants et se manifestent sous forme de ruissellement vers les points bas topographiques. L'eau sur son chemin peut créer des « drains » ou « chenaux » dans la zone humide. De même, les fossés, souvent construits par l'homme, peuvent modifier les écoulements superficiels, même s'il n'est pas toujours aisé de déterminer leur rôle de manière précise. En effet, en fonction de la pente de la nappe, un même fossé peut être situé plus bas (drain véritable) ou plus haut que la nappe.
Des écoulements hypodermiques peuvent également se produire lors d'évènements pluvieux dans la zone humide, mettant en exergue le rôle de la microtopographie de surface. Des « drains » ou "chenaux" plus perméables au sein du profil du sol constituent ainsi des axes privilégiés de circulation souterraine des eaux. La création et le développement de ces zones d'écoulement superficiels préférentiels peuvent influencer significativement l'équilibre hydrique de la zone humide car susceptibles d'accélérer les dynamiques d'assec du système considéré. La localisation (cartographie) de ces chenaux est un préalable indispensable à la compréhension du fonctionnement hydrique d'une zone humide, même s'il n'est pas souvent facile de l'identifier précisément.

OBJECTIFS D'UN DIAGNOSTIC HYDROLOGIQUE

En général, l'objectif est de dresser l'état de l'art du fonctionnement hydrologique d'une zone humide. Au préalable, il s'agit de définir l'équilibre entre les entrées et les sorties d'eau du système et de calculer ainsi un bilan hydrique. Pour cela, différents modèles (modèle conceptuel, modèle spatialisé) peuvent être utilisés. Dans le cas où le bilan hydrique est négatif, i.e. la zone humide présente un déficit en eau, il s'agit de connaître les facteurs environnementaux à l'origine de ce déficit ou contribuant à celui-ci. Dans ce cas, le modèle spatialisé peut s'avérer intéressant car prenant en compte d'autres facteurs (des écoulements, une structure de réseaux de drainage, conductivité hydraulique liée aux propriétés du sol…).

Equipements et ressources requis pour la réalisation d'un diagnostic

Les moyens matériels (et humains) mis en œuvre dans le cadre d'un diagnostic hydrologique diffèrent selon les objectifs visés, l'historique du site et les éventuels impacts subis et, plus généralement, les différents types d'alimentation en eau du site d'étude :

Surverse d'un cours d'eau :

Données hydrologiques ;
Modèles hydrauliques

Précipitations :

Données météorologiques (pluviosité, neige…) ; Evapotranspiration ;

Nappe d'accompagnement :

Etude géologique ;
Suivi piézométrique ;
Pompages d'essai
/ slug tests ;
Microtopographie ;
Conductivité hydraulique

Réseau hydrographique (cours d'eau, fossés…)

Différents relevés de terrain spécifiques à la problématique (ex : seuils, débitmètre,…)

CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE

La conductivité hydraulique (K) est un coefficient permettant de décrire la capacité de l'eau à se déplacer dans un milieu poreux et est donc une propriété intrinsèque à un type de matériau. La technique la plus employée est celle dite de « choc hydraulique » ou « slug test », plus facile à mettre en œuvre et moins coûteuse que les essais de pompage. Cette approche consiste à injecter ou à retirer brutalement une quantité d'eau connue et à observer la variation du niveau de la nappe d'eau.

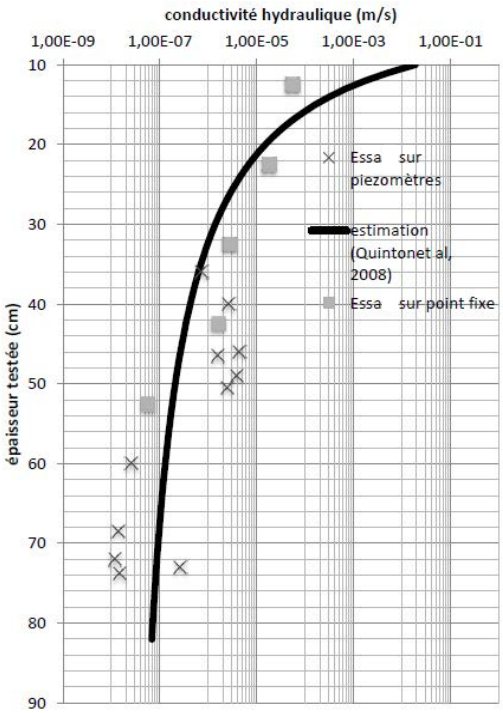

Figure 5 : Exemple de variation verticale de la conductivité hydraulique (Source : E. VIEL, modifié)

SUIVI DE LA PIEZOMETRIE

Figure 6 : Installation d'un piézomètre équipé d'une sonde automatique

Le niveau piézométrique caractérise le niveau libre de l'eau dans un puits d'observation (ou « piézomètre ») rapporté à un niveau de référence.

La localisation du point d'installation du piézomètre doit respecter les préconisations suivantes :

1) S'assurer de la compatibilité du dispositif avec la gestion du milieu. S'il y a pâturage, prévoir un enclos de protection. En cas de fauche, rendre le tube visible pour un conducteur de tracteur ;
2) Préférer l'installation du piézomètre dans une partie centrale, correspondant à un habitat ou du moins à un milieu très représenté à l'échelle du site. En s'appuyant sur l'observation de la microtopographie de surface, on évitera de positionner le piézomètre dans un creux ou sur une butte qui constituerait une situation singulière à l'échelle du site.

Les piézomètres « ouverts » sont de simples tubes, qui permettent depuis la surface d'accéder à l'eau d'une nappe. Ce sont généralement des tubes métalliques ou en PVC perforés (perforations inférieures à 10 mm) sur toute la longueur (tous les 10 centimètres). Dans le cas de sols minéraux, friables ou argileux, il est parfois préconisé de recouvrir le tube d'un géotextile pour éviter l'accès au tube des particules solides du sol. Les tubes dépassent du sol pour faciliter leur repérage dans le site. Une protection au contact entre le tube et le sol est recommandée pour limiter l'infiltration artificiel d'eau le long du tube. Le niveau 0 (niveau de surface) est noté sur le tube pour vérifier que le piézomètre ne bouge pas au fil du temps. Il est recommandé d'ancrer les piézomètres dans la roche mère car les déformations observées dans les sols très organiques, p. ex. tourbeux, peuvent bruiter le signal. Les tubes équipés de capteurs à pression permettent l'enregistrement automatique des valeurs à un pas de temps défini. Si les nombreuses propositions techniques des fabricants diffèrent quelque peu, le

principe général consiste en la mesure de la pression absolue en profondeur, correspondant à la somme de la pression atmosphérique et de la pression due à la colonne d'eau, et en sa conversion en hauteur d'eau. Pour cela, il est donc nécessaire de compenser la pression absolue par la pression atmosphérique enregistrée en surface et ainsi isoler la pression liée au seul poids de la colonne d'eau. La sonde est munie d'un module d'enregistrement et de stockage des données mesurées. La fréquence d'acquisition des mesures est généralement au pas horaire ; les capacités de stockage étant de plus en plus grandes.
Pour faciliter les traitements des données, toutes les sondes du site doivent être programmées sur le même pas de temps (½ heure par exemple).

Pas de mesure	½ heure (pour une interprétation journalière)
Coût matériel	Environ 1500 € / point équipé
Moyens humains	1.5 jour / an (suivi et maintenance)

SUIVI DES COURS D'EAU / DEBITS

Le fonctionnement hydrologique d'une zone humide peut être intimement lié à la dynamique de cours d'eau (ex : rivières, mares, fossés) avoisinants et avec lesquels la zone humide peut être en connexion : cours d'eau pouvant être situés en amont (mode d'alimentation de quel type ?), dans l'emprise même de la zone humide, ou en aval de celle-ci (participant à la décharge).
Il est ainsi important de connaître a minima le débit de ces cours d'eau en connexion avec la zone humide. Pour cela, il est souvent procédé à la réalisation de jaugeages chimiques (au sel par exemple) qui permettent l'établissement de courbes de tarage (figure 3) permettant elles-mêmes de relier des hauteurs d'eau mesurées (avec une sonde automatique) à des débits.

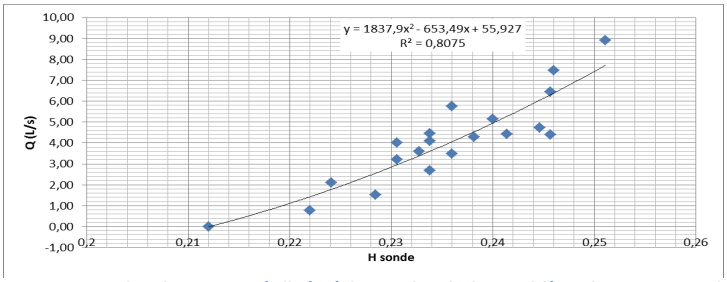

Figure 3 : Courbe de tarage réalisée à l'exutoire de la tourbière de La Guette (Source : ISTO)

Pas de mesure	¼ d'heure
Coût matériel	Environ 2500 € / point équipé
Moyens humains	1.5 jour / an (suivi et maintenance)

SUIVI DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES

La pluviosité constitue une donnée d'entrée primordiale dans le fonctionnement et le bilan hydrique d'une zone humide.

D'autres facteurs peuvent être modélisés, comme par exemple l'évapotranspiration (cf § suivant) par l'utilisation de formules à base physique (p. ex. Penman Monteith) ou empirique (Thornwaite, Turc…) à partir de données météorologiques disponibles (issues de MétoFrance et/ou d'une station météorologique installée sur le site).

Photographie 1 : Installation d'une station d'acquisition de données météorologiques sur site

Pas de mesure	horaire
Coût matériel	Environ 6000 € HT / point équipé
Moyens humains	5 jours / an (suivi et maintenance)

La modélisation pour mieux comprendre, diagnostiquer et prédire

MODELISATION CONCEPTUELLE : ETUDE DE LA DYNAMIQUE HYDROLOGIQUE ET REALISATION D'UN BILAN HYDRIQUE

Le fonctionnement hydrologique des zones humides peut être approché par la connaissance de la dynamique de la nappe d'eau (GILVEAR et BRADLEY 2000). Cette dernière est la résultante du bilan hydrique (i.e. la différence entre les entrées et les sorties d'eau) à l'échelle du site. Cette dynamique détermine la présence des espèces hygrophiles et des sols hydromorphes. Ce facteur doit caractériser au minimum la distribution des valeurs annuelles de la nappe pour un suivi à moyen et long terme de la dynamique hydrologique.
Le niveau piézométrique est lié aux dynamiques de transport d'eau, d'emmagasinement temporaire et parfois de changement d'état dans la phase de ruissellement de surface et d'écoulement souterrain du cycle de l'eau (MUSY 2004).
Il correspond à une part du terme S et DS de l'équation du bilan hydrique :

$$Re + P + S = Rs + E + (S + \Delta S) + I$$

Avec :
Re : débits entrants [mm ou m3/s]
P : précipitations [mm],
S : stocks de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm],
Rs : décharge du système comprenant le ruissellement de surface et les écoulements souterrains [mm],
E: évapotranspiration [mm],
S + ΔS : stocks accumulés à la fin de la période [mm],
I : Echange avec le milieu souterrain, infiltration vers la nappe ou apport vers la zone humide

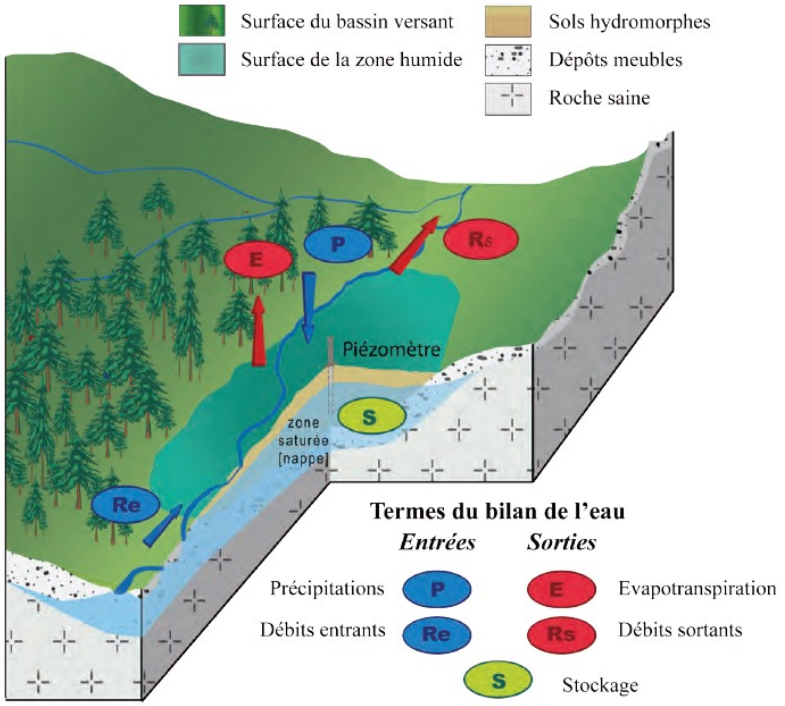

Figure 4 : Exemple de schéma conceptuel d'une zone humide (source : Agence de l'eau Rhône, Méditerranée, Corse)

Tous les niveaux d'eau sont mesurés relativement à la surface du sol et indiquent la profondeur de la nappe d'eau dans le sol. La mesure des niveaux dans la partie superficielle du sol, inférieure à 1,5 m de profondeur, vise à réaliser des mesures dans des dépôts au comportement hydraulique le plus homogène possible où se situe la nappe libre. La nappe d'eau du sol étant continue dans l'espace, les piézomètres sont dépendants les uns des autres (GENTIL et al., 1983). Si la zone humide présente une hétérogénéité spatiale des propriétés du sol, les mesures doivent être répétées dans chaque secteur caractérisé par des propriétés pédologiques qui lui sont propres.Enregistrer la dynamique de la nappe en un point d'une zone humide peut nous renseigner sur son fonctionnement général.
Ce principe s'applique dans le cas de nappes libres et non captives.

Généralement, il est recommandé de relever les données hydrologiques annuellement et l'interprétation des évolutions des valeurs est effectuée elle tous les 5 ans.

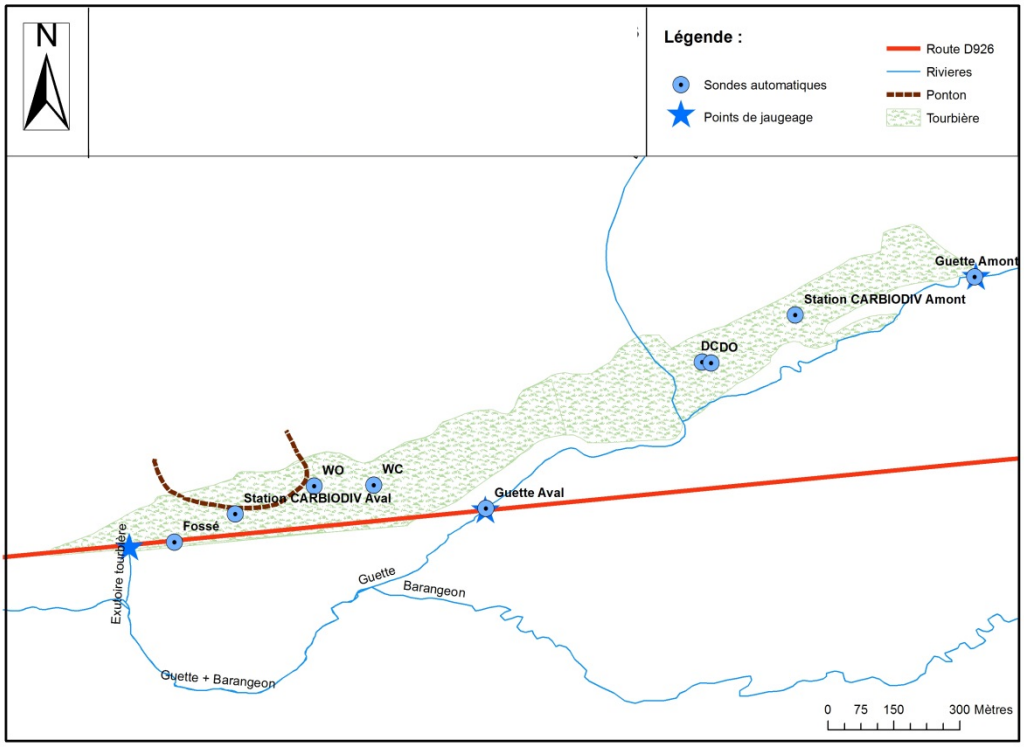

Figure 5 : Implantation des piézomètres et points de jaugeage (exemple de la tourbière de la Guette, 18)

Le bilan hydrologique peut être calculé pour différentes échelles de temps. Il est conseillé de commencer par une estimation à l'échelle annuelle par cycle hydrologique (de septembre à septembre) afin de limiter l'impact du stock (ΔS) dans le calcul du bilan. En fonction des données disponibles, il est possible de modéliser le bilan hydrologique au pas de temps journalier ou horaire en utilisant des modèles « pluie / débit » adaptés aux zones humides (ex. tourbière de La Guette, Binet et al. 2013).
Une fois le bilan hydrique « bouclé », il devient alors possible de calculer l'évolution temporelle des stocks en eau de la tourbière. De fait, le bilan hydrique peut s'avérer être un outil intéressant pour observer l'impact d'un ouvrage sur l'évolution des stocks en eau d'une zone humide.

MODELES SPATIAUX : ETUDE DE L'EVOLUTION DES ECOULEMENTS SUPERFICIELS DANS LES ZONES HUMIDES

Si le suivi de la dynamique piézométrique et la réalisation du bilan hydrique sont des outils intéressants afin d'estimer a posteriori l'effet éventuel d'une infrastructure linéaire sur l'évolution des stocks d'eau d'une zone humide, l'utilisation d'autres outils, comme par exemple la modélisation spatiale, peuvent permettre de prédire l'impact de ces travaux bien en amont de la phase de travaux.
La modélisation spatiale à base physique peut en effet permettre d'élaborer plusieurs scénarios hypothétiques en fonction de la connaissance du fonctionnement hydrologique de la zone humide et de prédire un impact en amont dans le projet bien avant les travaux. Il faut cependant veiller à ce que le modèle couple de façon adéquate les interactions entre les eaux de surface présentes dans les chenaux et les eaux retenues dans la zone humide (par ex. dans le sol tourbeux) et que ce modèle respecte bien la variabilité de propriétés hydrauliques avec la profondeur (Figure 1).

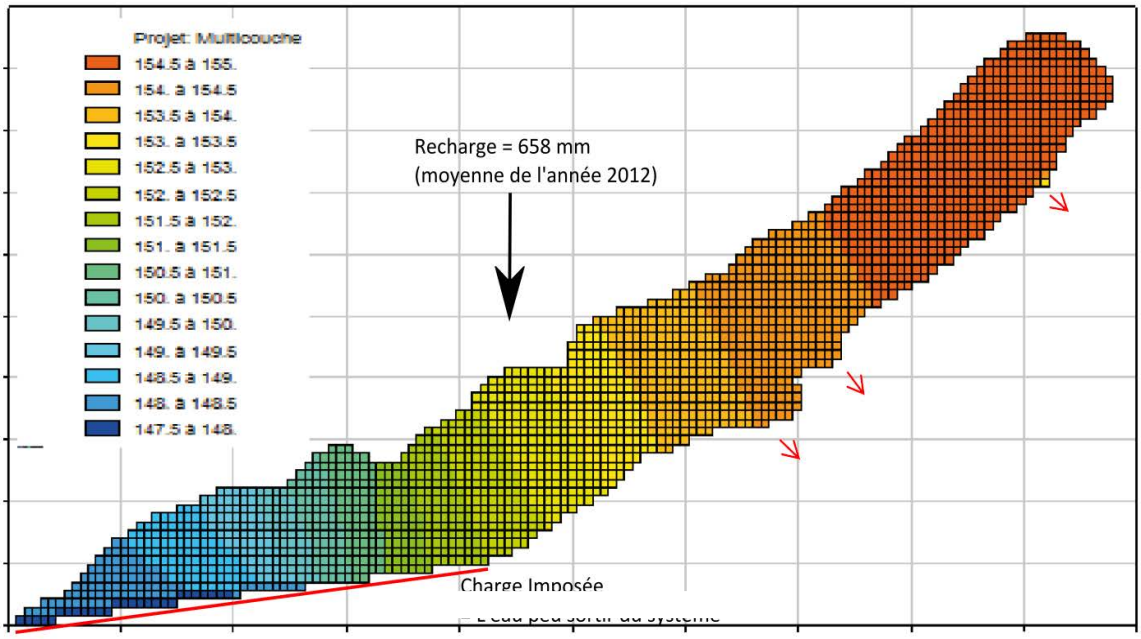

Figure 6 : Exemple de modélisation spatiale des charges hydriques en fonction de différents scénarios (Viel, 2013)

Les données de microtopographie, issues par exemple du LIDAR, couplées aux données piézométriques peuvent permettre de cartographier finement la géométrie des chenaux d'écoulements superficiels (figures 6, 7). Ces chenaux sont un facteur de contrôle important du comportement hydrologique qui influence grandement la qualité des résultats des modèles à base physique. Ce dernier permettra de déduire l'impact d'un aménagement sur l'hydromorphologie de la zone humide.

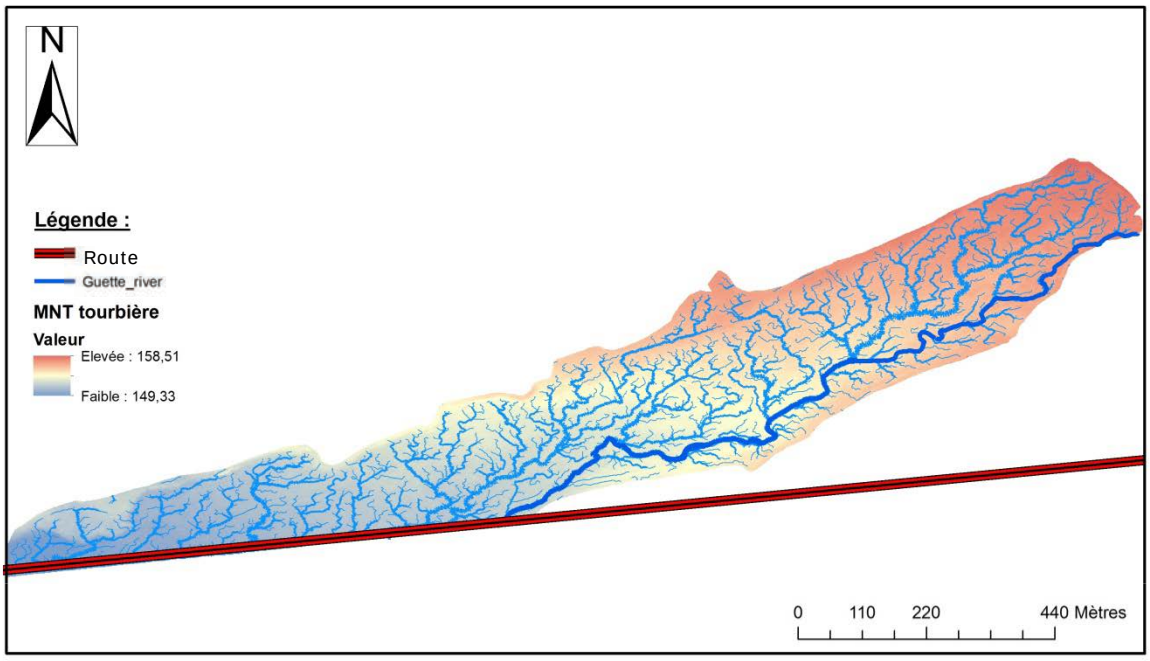

Figure 7 : Exemple d'utilisation du LIDAR (tourbière de La Guette).

Ainsi, différentes simulations pourront alors être réalisées afin de modéliser l'impact éventuel d'un ouvrage, modifiant les écoulements de surface, implanté sur la zone humide.

QU'APPORTE LA COMPARAISON ENTRE LES DEUX TYPES DE MODELISATION ?

Les modèles conceptuels du bilan hydrique apportent une vision temporelle de l'évolution du stock d'eau dans les zones humides. Ceci permet de prévoir par exemple la réaction d'une zone humide sur la durée à des étiages prolongés. Les questionnements sont du type : En combien de temps sans recharge la piézométrie de la zone humide va atteindre une cote seuil considérée comme critique ?

Les modèles spatiaux sont utilisés pour estimer l'impact spatial d'un ouvrage hydraulique. Les questionnements sont du type : quelle est la surface impactée par l'ouvrage.
La comparaison de ces deux approches amène une analyse spatio-temporelle, permettant de traiter l'ensemble des problématiques. Ces approches sont encore rares car très lourdes à mettre en place. Ce sont les seules capables de réaliser un diagnostic « fiable » sur l'évolution du comportement des zones humides en contexte de changements environnementaux (climatique et forçage anthropique).

Bibliographie :

BINET S., GOGO S., LAGGOUN-DEFARGE F. - 2013. A water-table dependent reservoir model to investigate the effect of drougth and vascular plants invasion on peatland hydrology. Journal of Hydrology, 499: 132-139.

GENTIL S., KOSMELJ K., LACHET B., LAPORTE P.& PAUTOU G, 1983. Classification statistique et modélisation des niveaux de la nappe phréatique près de Brégnier-Cordon, en relation avec les apports en eau et la température. In : Revue de géographie alpine. Tome 71 N°4 : 353-362. GILVEAR

GILVEAR D.J. & BRADLEY C., 2000. Hydrological monitoring and surveillance for wetland conservation and management; a UK perspective, Physics and Chemistry of the Earth, Part B : Hydrology, Oceans and Atmosphere, Volume 25, Issues 7–8 : 571-588.

MUSY A. & HIGY A., 2004. Hydrologie : une science de la nature, Science & ingénierie de l'environnement, Collection Gérer l'environnement, volume 21 - PPUR presses polytechniques, 314 p.

PAUTOU G., GIREL J., PEIRY J.-L., HUGHES F., RICHARDS K., FOUSSADIER R., GARGUET-DUPORT B., HARRIS T. & BARSOUM N., 1996. Les changements de végétation dans les hydrosystèmes fluviaux. L'exemple du Haut-Rhône et de l'Isère dans le Grésivaudan - Revue d'écologie alpine 3 41- 66.

VIEL E., 2013. Impact du réseau de drainage sur le bilan hydrique de la tourbière de La Guette (12, Sologne). Rapport Master 2 Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université d'Orléans, 45p.