



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0). La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI.

## HYDRINDIC : suivre et évaluer l'efficacité des opérations de restauration/création de zones humides avec un indicateur hydrologique

Hugo CLÉMENT<sup>1</sup>, Stéphanie GAUCHERAND<sup>1</sup>, Guillaume GAYET<sup>2</sup>, Florence BAPTIST<sup>3</sup>, Jérôme PORTERET<sup>4</sup>, Pierre CAESSTEKER<sup>5</sup>, Claire MAGAND<sup>6</sup>, Anne VIVIER<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Université Grenoble Alpes, INRAE, UR LESSEM, Grenoble, France.

<sup>2</sup> Office français de la biodiversité (OFB), UMS PatriNat OFB-CNRS-MNHN, équipe Évaluation et Suivi, France.

<sup>3</sup> Soltis-environnement/Biotope, Moirans France.

<sup>4</sup> Conservatoire d'espaces naturels de Savoie, Le-Bourget-du-Lac, France.

<sup>5</sup> Office français de la biodiversité (OFB), Direction Acteurs et citoyens, service Usages et gestion de la biodiversité, France.

<sup>6</sup> Office français de la biodiversité (OFB), Direction de la recherche et de l'appui scientifique, Vincennes, France.

Correspondance : Hugo CLÉMENT, [hugo.clement@inrae.fr](mailto:hugo.clement@inrae.fr)

***Un grand nombre d'opérations de restauration/création de zones humides voient le jour en France. Leur efficacité doit être évaluée à court, moyen et long terme. C'est le cas des opérations de compensation qui sont désormais soumises à obligation de résultat et doivent, pour démontrer l'efficacité de leurs opérations de restauration/création, disposer d'indicateurs robustes et facilement mobilisables. L'indicateur HYDRINDIC a ainsi été construit pour permettre le suivi et l'évaluation de l'efficacité des opérations de restauration/création de zones humides d'un point de vue hydrologique.***

Au cours du siècle dernier, l'agriculture, l'urbanisation, les activités industrielles... ont réduit de moitié la surface des zones humides en France (Bernard, 1994), qui sont pourtant d'intérêt général (Art. L211-1-1 du Code de l'environnement). Face à ce constat alarmant, les lois sur le développement des territoires ruraux de 2005 et l'eau et les milieux aquatiques de 2006 ont impulsé une dynamique de préservation et de restauration de ces milieux. Le porteur d'un projet d'aménagement doit désormais démontrer l'efficacité de son opération de restauration/création de zone humide effectuée dans le cadre de la compensation écologique découlant de la séquence « Éviter-Réduire-Compenser » (ERC). Néanmoins, les gains induits par la compensation écologique sont rarement évalués de manière satisfaisante (peu de suivi dans le temps des mesures mises en œuvre).

Il existe désormais une méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides (MNEFZH) qui permet de suivre un certain nombre d'indicateurs de fonctions réalisées par ces milieux et de suivre le devenir de zones

humides en voie de restauration/création d'un point de vue fonctionnel. Pour autant, la profondeur et les fluctuations de la nappe d'eau ne font toujours pas l'objet de suivis piézométriques, que ce soit dans les zones pressenties pour recevoir des opérations de restauration (en amont des travaux) ou dans les zones humides en voie de restauration/création (après travaux). En outre, les indicateurs basés sur le sol ou la végétation peuvent avoir un temps de réponse long (plusieurs années ou décennies selon l'altitude et le type de végétation) alors que la réponse hydrologique est rapide (de quelques jours à sept ans) (Connell et Slatyer, 1977 ; Clewell et Lea, 1990 ; Meyer *et al.*, 2010). L'absence de données hydrologiques représente un frein important à l'efficacité des opérations de restauration/création de zones humides, qu'elles soient entreprises dans le cadre de la compensation écologique ou dans tout autre contexte. Évaluer le résultat d'une opération de restauration sur une zone humide sans disposer d'information sur le fonctionnement hydrologique de celle-ci est également problématique.

## Contexte de l'évaluation des opérations de restauration/création de zones humides d'un point de vue hydrologique

Il existe des projets R&D qui sont actuellement menés dans un objectif d'évaluation du succès des opérations de restauration en zone humide. C'est le cas de NAPROM notamment (« NAPpes Rivières : Observation Modélisation »), mais celui-ci vise un type précis de zones humides (zones humides alluviales uniquement) et exige un paramétrage important du modèle. D'autres outils comme ceux de la boîte à outils de suivi des zones humides RhoMeO par exemple, exigent un recul temporel important avec une répétition des mesures sur de nombreuses années et visent à mesurer une amélioration de la condition d'une zone humide donnée plutôt que l'atteinte d'un objectif prédéfini.

## Un indicateur hydrologique à vocation opérationnelle

Disposer d'un indicateur hydrologique robuste et surtout simple dans sa mise en œuvre et dans son interprétation, ne nécessitant pas nécessairement d'état initial, contribuerait à améliorer le suivi et l'évaluation du succès des opérations de restauration, que ce soit dans les dossiers « Loi sur l'eau » ou plus généralement pour toute action de restauration de zones humides.

## Des sites correspondant à l'objectif de restauration/création (SCORs) comme base de comparaison

Le principe de l'indicateur repose sur la comparaison annuelle de chroniques piézométriques (relevé de la profondeur de nappe dans le temps à l'aide de plusieurs piézomètres) entre une zone humide en voie de restauration/création et des zones humides qui correspondent à l'objectif de restauration/création (SCORs). Les données piézométriques annuelles récoltées sur les SCORs (étape de suivi) permettent de construire une enveloppe de référence, c'est-à-dire une gamme de variations de profondeur de nappe « autorisée » pour objectiver une conclusion sur le succès vraisemblable de la restauration/création d'un point de vue hydrologique (fonctionnement hydrologique considéré comme optimal pour préserver des fonctions hydrologiques, biogéochimiques, des communautés spécifiques, etc.). Cette enveloppe de référence est construite pour une année de suivi en calculant la moyenne et l'écart type de la profondeur de nappe sur les SCORs, sur la base d'au moins une mesure hebdomadaire.

Pour un site en voie de restauration/création, l'indicateur HYDRINDIC correspond ainsi au pourcentage de données piézométriques récoltées sur une année contenues dans une enveloppe de référence (étape d'évaluation). L'opération de restauration/création peut être considérée comme un succès lorsque les variations de profondeur de nappe libre au cours de l'année dans le site en voie de restauration/création sont similaires à celles mesurées dans les SCORs. Cet indicateur permet donc de vérifier que le fonctionnement hydrologique obtenu après opération de restauration/création correspond aux objectifs visés.

## Une première utilisation aux États-Unis

Un tel indicateur a été développé et validé pour prédire le succès des opérations de restauration de zones humides de montagne au cours d'un projet commun Irstea – Colorado State University en 2013-2014 (Gaucherand *et al.*, 2013, Cooper *et al.*, 2017). Cet indicateur a été étendu à une variété de milieux aux États-Unis entre 2015 et 2018 (Sueltenfuss et Cooper, 2019) et proposé comme indicateur standard de la performance des opérations de restaurations à l'Army Corps of Engineers (l'agence américaine en charge du suivi des mesures compensatoires en zones humides).

## Un projet de deux ans pour une application en France métropolitaine

Afin de valider cet indicateur (nommé HYDRINDIC) en France métropolitaine pour le suivi et l'évaluation des opérations de restauration en zones humides (y compris hors cadre ERC), nous avons lancé un projet de deux ans, réunissant les acteurs impliqués dans la restauration/création de zones humides : l'Office français de la biodiversité, l'Eurométropole de Strasbourg, le Conservatoire d'espaces naturels de Savoie et Biotope, un bureau d'étude en environnement.

Les principaux objectifs ont été de populariser l'utilisation de piézomètres dans les projets de restauration/création de zones humides, y compris dans le cadre de la compensation écologique, et de proposer un indicateur facile à calculer à partir des données collectées grâce à l'utilisation d'un tableur automatisé et d'un outil en ligne.

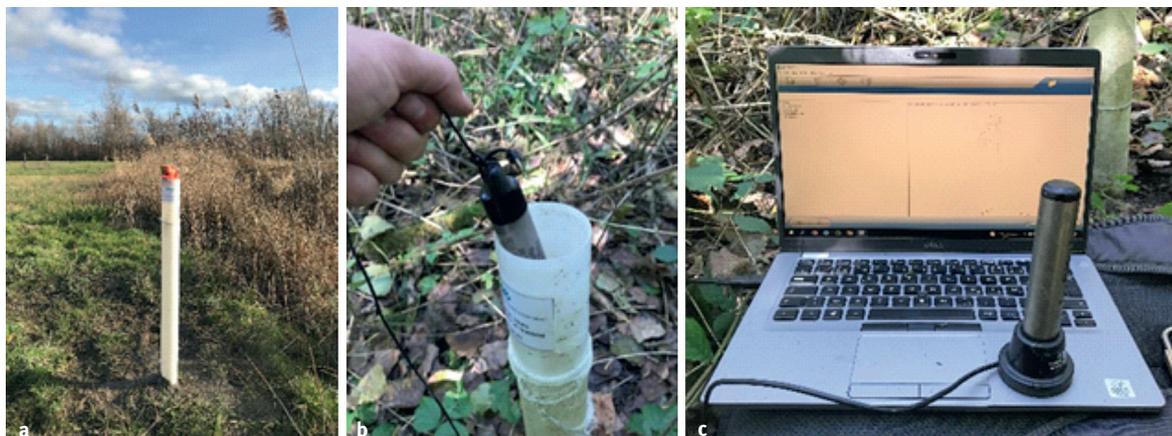
## Test de l'indicateur sur des zones humides variées et à l'échelle nationale

Nous avons contacté quatre-vingt-dix acteurs travaillant sur la restauration des zones humides en France, y compris des acteurs impliqués dans la compensation écologique, afin de trouver des sites d'étude. Nous avons sélectionné treize zones humides en voie de restauration, comprenant des prairies humides, des tourbières, des boisements humides, etc. comme sites d'étude. Pour chaque site en voie de restauration/création sélectionné, nous avons identifié un ou plusieurs sites correspondant à l'objectif de restauration/création. Ces SCORs sont des zones humides ordinaires, localisées à proximité du site en voie de restauration/création et correspondant à un objectif réaliste (en termes d'habitat et de fonctionnement) pour la zone humide en voie de restauration/création. Des études floristiques et pédologiques ont été réalisées sur tous les sites.

## Matériel mobilisé pour le calcul d'HYDRINDIC

Les sites ont été équipés d'au moins trois piézomètres avec des sondes autonomes (mesures automatiques à intervalle régulier) enregistrant quotidiennement la profondeur de la nappe pendant au moins un an. On entend ici par « piézomètres », des tubes en PVC de 2 mètres (puit d'observation), crépinés sur toute leur longueur, enfoncés verticalement dans le sol permettant de mesurer la profondeur de nappe. Les trous d'installation des piézomètres ont été creusés à l'aide d'une tarière

**Figure 1** – Exemple d'une installation type d'un piézomètre (a) comprenant un tube PVC crépiné entouré par un géotextile afin d'éviter le colmatage du tube par des sédiments fins, un bouchon supérieur et un cadenas de verrouillage de l'installation, (b) une sonde autonome d'enregistrement des profondeurs de nappe suspendu par une cordelette âme Kevlar dans le tube. Pour ce type de sonde, les données sont extraites *via* un socle de communication USB sur lequel est placé la sonde et un ordinateur portable comprenant le logiciel du fournisseur. Crédit photographique : Hugo Clément (INRAE).



manuelle. Un exemple du matériel utilisé est présenté en figure 1. Après une année de suivi piézométrique des sites, HYDRINDIC a été calculé pour toutes les zones humides en voie de restauration/création retenues (exemple : figure 2).

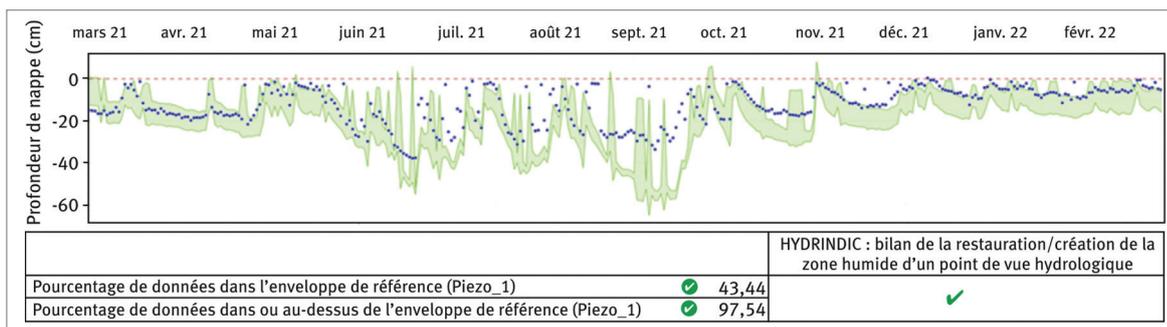
### Création d'outils opérationnels pour l'utilisation d'HYDRINDIC

Le calcul de l'indicateur doit se faire sur une année de données uniquement à partir de données journalières ou hebdomadaires. Deux critères sont à prendre en compte pour déterminer si un site semble en bonne voie de restauration/création sur le plan hydrologique : l'hydropériode et l'inclusion des données récoltées dans l'enveloppe de référence (indicateur). Pour ce faire, deux outils sont proposés à l'attention des utilisateurs de l'indicateur (tableur type et outils en ligne). Ils sont construits dans le but de faciliter l'analyse des données de terrain et l'interprétation des résultats (visualisation

graphique). Ils sont accessibles à tous et destinés principalement à un public technique non spécialisé en statistique. Nous avons créé un tableur pré-rempli contenant des macros dans lesquelles les utilisateurs peuvent entrer leurs données piézométriques brutes. Un outil en ligne développé sous R à l'aide du package « Shiny » permet aux utilisateurs de calculer automatiquement l'indicateur sans nécessiter de grandes connaissances en statistiques. Enfin, nous avons élaboré un guide méthodologique qui détaille chaque étape depuis le choix des zones humides de référence (SCORs) et l'installation des piézomètres jusqu'à l'interprétation des résultats. Nous avons demandé à un ingénieur du bureau d'études Biotopie de tester HYDRINDIC en utilisant le guide afin de vérifier son opérationnalité.

L'ensemble des informations et documents nécessaires à l'utilisation de l'indicateur HYDRINDIC sont disponibles *via* ce lien : <https://hydrindic-inrae.shinyapps.io/hydrindic-inrae/> ou sur demande par mail adressé à [hugo.clement@inrae.fr](mailto:hugo.clement@inrae.fr) et [stephanie.gaucherand@inrae.fr](mailto:stephanie.gaucherand@inrae.fr)

**Figure 2** – Profondeur journalière de la nappe enregistrée via un piézomètre (points bleus) sur un site de compensation (prairie humide) et son enveloppe de référence (enveloppe verte) d'après les profondeurs journalières enregistrées sur trois piézomètres au sein de SCORs en Isère sur la période de mars 2021 à mars 2022. Le calcul d'HYDRINDIC permet d'objectiver et de confirmer la bonne direction de restauration du site (hydropériode similaire et pourcentage de données dans et au-dessus de l'enveloppe de référence ayant atteint les seuils fixés) vers le développement favorable d'une prairie hygrophile (fonctionnement hydrologique considéré comme optimal).



## HYDRINDIC : un indicateur attendu pour répondre aux besoins des services de l'État et des acteurs de la restauration écologique

### Un indicateur opérationnel

Sur les quatre-vingt-dix acteurs de la restauration écologique et services de l'État contactés, soixante-deux ont répondu, montrant un grand intérêt pour le projet. L'installation de piézomètres sur les sites et l'analyse des données se sont avérées aisées à mettre en place et nous ont permis de promouvoir l'utilisation de ces équipements auprès des parties prenantes.

### Limites

La partie la plus difficile a été le choix des sites de référence (SCORs). Certaines parties prenantes ont été confuses, s'attendant à devoir rechercher des zones humides de grande qualité écologique alors que les SCORs correspondent pour la plupart à des zones humides ordinaires mais fonctionnelles. Trouver ces SCORs nécessite un effort de prospection en dehors du seul site en voie de restauration/création et nécessite également l'obtention des autorisations pour instal-

ler des piézomètres. L'installation des piézomètres doit également tenir compte de l'exploitation du site, le cas échéant (fauche, pâturage...).

### Intérêts et perspectives

Nous avons montré qu'HYDRINDIC peut être utilisé comme une norme de performance hydrologique (au sens de Sueltenfuss et Cooper, 2019) dans le contexte français d'atténuation des effets des changements climatiques, où la surveillance ne commence généralement qu'après les travaux de restauration/création. Cependant, il est recommandé de l'utiliser dans le cadre d'une approche BACI (*Before After Control Impact*) (Green, 1979) pour contribuer à améliorer la conception des projets de restauration/création des zones humides. De plus, HYDRINDIC semble être d'une grande utilité lorsqu'il s'agit d'identifier les causes de l'échec de la restauration/création des zones humides.

En 2022, dans la continuité du projet Hydrindic, nous avons débuté le projet Hydrindic 2 qui consiste en l'utilisation de l'indicateur HYDRINDIC pour quantifier les impacts indirects des projets d'aménagement sur les zones humides.

## RÉFÉRENCES

- Bernard P., 1994. Les zones humides, rapport d'évaluation. Comité Interministériel de l'évaluation des politiques publiques, La documentation Française, 169 p.
- Clewell A. F., Lea R., 1990. Creation and restoration of forested wetland vegetation in the southeastern United States. *Wetland Creation and Restoration: the Status of the Science* (eds J. A. Kusler & M. E. Kentula), Island Press, Washington, DC., 616 p.
- Connell J. H., Slatyer R.O., 1977. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization, *The American Naturalist*, vol. 111.
- Gaucherand S., Cooper D. J., Hazen C., 2013. Wetland restoration in the context of mitigation due to mountain recreational development: relevance of short-term success criteria, 5th World Conference on Ecological Restoration, Madison.
- Green R. H., 1979. *Sampling design and statistical methods for environmental biologists*. John Wiley and sons, New-York, NY.
- Meyer C. K., Whiles M. R., Baer S. G., 2010. Plant Community Recovery following Restoration in Temporally Variable Riparian Wetlands. *Restoration Ecology*, 18(1), 52-64, <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2008.00451.x>.
- Sueltenfuss J. P., Cooper D. J., 2019. A new approach for hydrologic performance standards in wetland mitigation. *Journal of Environmental Management*, 231, 1154-1163, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.001>.