



HAL
open science

HYDRINDIC - Suivi et évaluation de la restauration/création de zones humides avec un indicateur hydrologique, Guide méthodologique

Hugo Clément, Stéphanie Gaucherand, Guillaume Gayet, Florence Baptist,
Jérôme Porteret, Pierre Caessteker, Claire Magand, Anne Vivier

► To cite this version:

Hugo Clément, Stéphanie Gaucherand, Guillaume Gayet, Florence Baptist, Jérôme Porteret, et al..
HYDRINDIC - Suivi et évaluation de la restauration/création de zones humides avec un indicateur
hydrologique, Guide méthodologique. pp.1-93, 2023. hal-04144755

HAL Id: hal-04144755

<https://hal.science/hal-04144755v1>

Submitted on 28 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright




RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE



HYDRINDIC – Suivi et évaluation de la restauration/création de zones humides avec un indicateur hydrologique

Guide méthodologique


biotope


soltis
environnement


PATRIMOINE
NATUREL
CENTRE DÉPARTEMENTAL DE DONNÉES
OFB - CURS - MONTAN


Conservatoire
d'espaces naturels
Savoie

Organisme financeur


OFB
OFFICE FRANÇAIS
DE LA BIODIVERSITÉ

Auteurs

- **Hugo CLÉMENT**, Institut national de recherche pour l’agriculture, l’alimentation et l’environnement (INRAE), hugo.clement@inrae.fr (Centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes, UPR LESSEM)
- **Stéphanie GAUCHERAND**, INRAE, stephanie.gaucherand@inrae.fr (Centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes, UPR LESSEM)
- **Guillaume GAYET**, Office français de la biodiversité (OFB), guillaume.gayet@mnhn.fr (UMS PatriNat OFB – CNRS – MNHN, équipe Évaluation et Suivi)
- **Florence BAPTIST**, Soltis-environnement/Biotope, fbaptist@soltis-environnement.com
- **Jérôme PORTERET**, Conservatoire d’espaces naturels de Savoie, j.porteret@cen-savoie.org
- **Pierre CAESSTEKER**, OFB, pierre.caessteker@ofb.gouv.fr (Direction Acteurs et citoyens, service Usages et gestion de la biodiversité)
- **Claire MAGAND**, OFB, claire.magand@ofb.gouv.fr (Direction de la recherche et de l’appui scientifique)
- **Anne VIVIER**, OFB, anne.vivier@ofb.gouv.fr (Direction de la recherche et de l’appui scientifique)

Tout retour critique sur le guide méthodologique est encouragé afin de compléter celui-ci dans le futur.
Faites-nous parvenir vos retours aux adresses mails suivantes : hugo.clement@inrae.fr et
stephanie.gaucherand@inrae.fr

Citation : Clément, H., Gaucherand, S., Gayet, G., Baptist, F., Porteret, J., Caessteker, P., Magand, C. et Vivier, A. 2023. HYDRINDIC – Suivi et évaluation de la restauration/création de zones humides avec un indicateur hydrologique – version 1. INRAE – OFB, 91 p.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des personnes ayant pris part au projet Hydrindic, notamment par la mise à disposition de documentation et de données (relevés piézométriques, cartographies d'habitats, etc.) sur leurs projets de restauration/création de zones humides, la proposition et la mise à disposition de sites pour le test de l'indicateur HYDRINDIC, l'aide apportée sur le terrain, etc. qui ont permis d'aboutir à ce guide méthodologique.

Nous remercions ainsi Mathias ADAM (Biotope), Steve AUBRY (INRAE), Loïc BAILLY (Fédération Départementale des Chasseurs du Jura), Agnès BARILLER (EDF), François BATAILLE (Établissement publics d'Aménagement et de Gestion de l'Eau de la Bourbre), Nicolas BERNADICOU (Département du Gers), Camille BERNARD (MNHN), Joris BIAUNIER (CEREMA Isère), Vincent BRETON (INRAE), Ronan CAIGNEC (Syndicat Mixte Blavet Scorff Ellé-Isole-Laïta), François CAVALIER (Biotope), Marion CESARI (Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer), Laëtitia CITEAU (Établissement public territorial de bassin Vilaine), Ralph CLARKE (Syndicat Mixte du Bassin de l'Authion et de ses Affluents), Claire CRASSOUS (Parc National du Mercantour), Armel DAUSSE (Forum des Marais Atlantiques), Romy DAVID (Observatoire des sciences de l'univers de Rennes), Leila DEBIESSE (Réserve Naturelle du Marais du Vigueirat), Monique DELLA SCHIAVA (Mairie de Sermérieu), Cédric DERAY (Communauté de Communes des Hauts de Flandre), Tiphelle DEVEAUX (DDT Isère), Thomas ETIEN (Syndicat Mixte de la Dordogne Moyenne et de la Cère Aval), Aurélien FRITOT (Syndicat Mixte du Bassin versant du Linon), Élodie GIUGLARI (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), Jean-Luc GROSSI (CEN Isère), Valérie GUEGUEN (Département des Landes), Gilles JANISECK (DDT Isère), Laurence JULLIAN (CEN Rhône-Alpes), Mikaël LE BIHAN (OFB), Hugues LEFRANC (Fédération des chasseurs d'Ille et Vilaine), Stéphanie LEY (Société d'exploitation des téléphériques de Tarentaise-Maurienne), Alexandre LHOSMOT (Syndicat Mixte Haut-Doubs Haute-Loue), Éric LUCOT (Université de Franche-Comté), Geneviève MAGNON (Syndicat Mixte Haut-Doubs Haute-Loue), Maxime MALOSSANE (Communauté de communes Les Vals du Dauphiné), Gaëtane MANLHIOT (INRAE), Bastien MARTIN (Parc Naturel Régional Loire-Anjou-Touraine), Léa MERCKLING (Réserve Naturel Nationale de la Petite Camargue alsacienne), Stéphane MOREL (DDT Savoie), Jean OBSTANCIAS (ONF), Sterenn RAMOND (Fédération Départementale des Chasseurs du Jura), Denis ROBERT (OFB), Jean-Marie ROHMER (Mairie de Nordhouse), Brigitte RUAUX (CEN Centre-Val-de-Loire), Laurent SCHMITT (Université de Strasbourg), Eugénie SCHWOERTZIG (Eurométropole de Strasbourg), Baptiste THEVENET (Fédération Départementale des Chasseurs du Jura), Anne VILLAUME (Eurométropole de Strasbourg), Lucie VU HONG (EDF), Jean-Yves ROUX (Mairie de Vasselín) et Emma ZACHARKO (MNHN).

Plus largement, merci à l'ensemble des acteurs de la restauration/création de zones humides pour qui ce guide est destiné et qui, nous l'espérons, saura nourrir vos réflexions, vos projets futurs et répondre à vos attentes.

SOMMAIRE

Introduction	4
I. L'indicateur.....	6
I.1 Prérequis à l'utilisation de l'indicateur	7
I.2 Description	8
I.3 Spécificité et complémentarité de l'indicateur avec les outils existants	10
I.4 Public cible	16
I.5 Domaine d'application.....	16
II. Protocole.....	18
II.1 Définition des sites suivis.....	18
II.1.1 Site en voie de restauration/création	21
II.1.2 Sites correspondant à l'objectif de restauration/création (SCORs)	24
II.2 Stratégie de déploiement des piézomètres	30
II.3 Matériel nécessaire	35
II.4 Coûts.....	44
II.5 Méthode de mise en place.....	47
II.6 Méthode de récupération des données.....	56
III. Analyse et interprétation.....	59
III.1 Méthode d'analyse	59
III.1.1 Tableur type	61
III.1.2 Outil en ligne	64
III.2 Méthode d'interprétation	65
III.2.1 Hydropériode	65
III.2.2 Calcul de l'indicateur.....	68
Conclusion.....	74
Glossaire	75
Annexes.....	79
Annexe 1. Exemple d'une partie du formulaire de déclaration délivré par la DDT Isère.....	79
Annexe 2. Calcul d'une profondeur de nappe à partir de données de pression barométrique d'une station météorologique	81
Annexe 3. Exemple fictif d'un fichier contenant les informations demandées par le BRGM pour l'obtention d'un code BSS et la bancarisation de données piézométriques.....	82
Annexe 4. Étapes pour renseigner le tableur type mis à disposition.....	82
Bibliographie	88

Introduction

Entre 1960 et 1990, l'agriculture, l'urbanisation, les activités industrielles... auraient **réduit de moitié la surface des zones humides¹ 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 (LEMA) ont impulsé une dynamique de préservation et de restauration de ces écosystèmes.

Durant la mise en œuvre de la séquence Éviter – Réduire – Compenser (ERC), le porteur d'un projet d'aménagement doit ainsi évaluer ses impacts directs, indirects et cumulés en zones humides (pertes), tout comme il doit évaluer les effets de la mesure de compensation écologique (gains). Néanmoins, dans les dossiers d'autorisation environnementale au regard de la Loi sur l'eau (loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006) et de la Loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (loi n° 2016-1087 du 8 août 2016), **les pertes et les gains induits par la compensation écologique sur le fonctionnement hydrologique (par ex. remontée du niveau de nappe, reconnexion des flux hydrologiques entre zones humides) sont rarement suivis et évalués de manière satisfaisante**. La présence prolongée d'une nappe proche de la surface du sol d'une zone humide est pourtant l'élément indispensable à l'établissement d'une zone humide (Barnaud & Fustec 2007). L'absence de données hydrologiques est donc un frein important pour l'évaluation de l'efficacité des opérations de restauration/création de zones humides.

À cette fin, il existe désormais une méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides (Gayet *et al.* 2016) pour évaluer les fonctions de ces écosystèmes avec des indicateurs² et suivre le devenir de zones humides impactées et en voie de restauration/création³. Cette méthode est adaptée pour des évaluations rapides. Elle ne permet pas de suivre et d'évaluer avec finesse le fonctionnement hydrologique d'une zone humide sur le court et moyen terme. **Des boîtes à outils pour s'approprier le sujet existent désormais, comme le protocole piézométrique RhoMéO (bassin Rhône-Méditerranée) reconnu par le Service d'administration nationale des données et référentiel sur l'eau (SANDRE), et ses déclinaisons MhéO (national) et LigéO (bassin Loire-Bretagne). Ce protocole piézométrique n'a cependant pas pour objectif l'évaluation de l'efficacité des opérations de restauration/création de zones humides d'un point de vue hydrologique**. Ce dernier permet uniquement de traduire une tendance d'évolution de la nappe après plusieurs années.

Même lorsque les zones humides font l'objet de suivis piézométriques, **les données qui en résultent sont rarement bancarisées** dans la base de données nationale d'Accès aux données sur les eaux souterraines (ADES) du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). La pertinence des suivis, tout comme leur utilisation finale demeurent méconnues. Les acteurs qui interviennent dans la gestion des zones humides accordent un intérêt significatif aux suivis piézométriques. Ainsi, lors du Forum des gestionnaires de la Biodiversité 2021 sur les milieux humides, 55 % des gestionnaires ont déclaré réaliser des suivis piézométriques (OFB 2021). Bien que ces données puissent paraître actuellement difficile à obtenir, interpréter et partager, ces informations sont indispensables pour évaluer l'efficacité des opérations de restauration/création de zones humides (Gayet *et al.* 2016, Direction de l'Eau et de la Biodiversité 2021).

¹ Zone humide : au sens de l'art. L.211-1 du code de l'environnement, précisé par l'arrêté interministériel du 24 juin 2008 modifié.

² Indicateur : « Caractéristiques d'un écosystème pouvant être utilisées pour mesurer la progression des buts ou objectifs de restauration d'un site particulier (telles que des mesures de présence/absence et la qualité des composantes biotiques ou abiotiques de l'écosystème). » (Gann *et al.* 2019).

³ Restauration : « Processus qui aide au rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit. » (Gann *et al.* 2019). Création : la mise en place d'un nouvel écosystème dans un secteur où il n'a jamais été présent (Collectif RhoMéO 2017).

Disposer d'un indicateur hydrologique robuste et simple qui ne requiert pas nécessairement d'état initial contribuerait à une préservation efficace des fonctions, habitats et espèces des zones humides, que ce soit pour une utilisation dans le cadre des dossiers Loi sur l'eau ou plus généralement pour toute opération de restauration/création de zones humides. L'observation d'un fonctionnement hydrologique compatible avec les objectifs de restauration/création permettrait de présumer le devenir de la zone humide sur le court et moyen terme, ainsi que de la réussite vraisemblable de l'opération de restauration/création.

Le besoin d'un indicateur hydrologique présumant le devenir des zones humides en voie de restauration/création a été émis par des porteurs de projet, associations de conservation de la nature, services de l'État, établissements publics de l'État et bureaux d'études. Pensé pour améliorer le suivi et l'évaluation des opérations de restauration/création de zones humides, le projet Hydrindic promeut le **développement de suivis hydrologiques et l'évaluation des opérations de restauration/création avec un indicateur spécifique.**

Un tel indicateur a déjà été développé pour suivre et évaluer le succès des opérations de restauration/création en zones humides de montagne au cours d'un projet 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 & Cooper 2019). Il est proposé comme un indicateur standard de la performance des opérations de restauration à l'Army Corps of Engineers (l'agence américaine en charge du suivi des mesures compensatoires en zones humides).

Cet indicateur développé aux États-Unis, appelé « **HYDRINDIC** » ici, a été testé en métropole dans une variété de zones humides durant le projet du même nom (2020-2021, appelé « Hydrindic »). **Les résultats obtenus avec cet indicateur permettent d'alerter sur la trajectoire d'évolution des zones humides en voie de restauration/création vis-à-vis de l'objectif de restauration/création.** Nous proposons donc l'utilisation de l'indicateur HYDRINDIC en France métropolitaine pour suivre et évaluer le succès des opérations de restauration/création de zones humides.

I. L'indicateur

HYDRINDIC se veut basse technologie (« *low-tech* ») et rapide en terme de temps de réponse¹ afin de prendre en compte les contraintes budgétaires (moyens humains et techniques limités pour la réalisation de suivis) et temporelles rencontrées par les pétitionnaires lors des projets de restauration/création de zones humides. Cet indicateur possède une réponse fiable, qui complètent ceux basés uniquement sur la végétation.

HYDRINDIC permet d'informer et d'alerter, après un temps limité (1 à 7 ans après le démarrage du projet), sur l'efficacité des opérations de restauration/création (ne concerne pas l'évaluation des gains fonctionnels) en zones humides, d'un point de vue hydrologique, vis-à-vis de l'objectif visé. Les résultats qui en découlent permettent éventuellement de justifier l'ajustement des opérations de restauration/création mises en œuvre (déplacement d'un seuil en amont, bouchage d'un plus grand nombre de drains, etc.).

Idéalement, toute opération de restauration/création devrait disposer de suivis avant (état initial) et après travaux ainsi que d'une évaluation de l'efficacité de celle-ci (Tableau 1), afin de (1) vérifier que l'on s'éloigne d'un fonctionnement altéré et (2) que l'on se rapproche d'un fonctionnement correspondant à l'objectif de restauration/création (cf. analyse BACI recommandée par Green (1979)). Cependant, cette situation n'étant pas toujours possible, l'indicateur proposé permet malgré tout la mise en place d'un suivi et d'une évaluation uniquement après opérations de restauration/création.

Tableau 1. Définition du suivi et de l'évaluation (FAO 2013, Sandre 2020).

Suivi	Évaluation
<p>Collecte de données continue concernant un ou plusieurs indicateurs, pour connaître la progression vers l'objectif à atteindre.</p> <p>Le suivi fournit les éléments de base pour l'évaluation.</p>	<p>Démarche ponctuelle, éventuellement répétée au cours du temps, consistant à déterminer objectivement le succès d'une opération, d'un projet, etc. mis en œuvre compte tenu de l'objectif à atteindre, d'après des indicateurs.</p> <p>L'évaluation permet d'analyser la pertinence des actions mises en œuvre et l'atteinte des objectifs par l'analyse des données de suivi. Elle peut permettre d'améliorer les projets futurs.</p>

¹ Temps de réponse : délai qui sépare l'opération de restauration/création de la mesure de l'atteinte de l'objectif de restauration/création par un indicateur (par ex. restauration du fonctionnement hydrologique). Chaque indicateur à un temps de réponse propre, qui est fonction de sa sensibilité à l'opération de restauration/création (Collectif RhoMéo 2017).

I.1 Prérequis à l'utilisation de l'indicateur

La mobilisation de l'indicateur nécessite quelques prérequis :

- **Une bonne connaissance du territoire et du bassin versant** sur lequel se trouve la zone humide en voie de restauration/création pour limiter l'effort de prospection des SCORs (sites correspondant à l'objectif de restauration/création) ;
- Des **connaissances sur la zone humide en voie de restauration/création et des SCORs étudiés** dans leur ensemble est nécessaire (contour et historique du site, cartographie des habitats et des opérations de restauration/création, etc.¹) afin d'identifier l'emplacement futur des piézomètres, leur nombre et de faciliter les interprétations qui découleront des données obtenues ;
- **Une définition claire des objectifs de restauration/création. Un suivi adapté et une bonne interprétation des résultats en dépendront largement.**

¹ Exemples de ressources mobilisables : DOCOB (Documents d'objectifs), plan de gestion, projet de cartographie nationale des milieux humides du Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, cartographie nationale des habitats (CarHab), portail national de la connaissance du territoire (Géoportail), cartes géologiques du BRGM (infoTerre), etc.

I.2 Description

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)¹ (Figure 1).

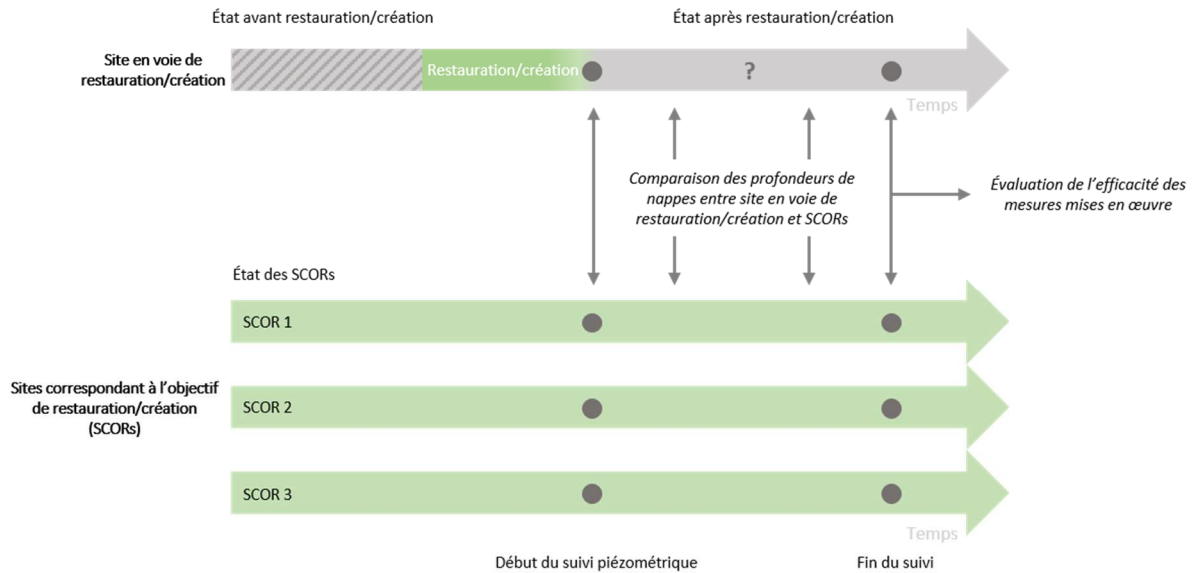


Figure 1. Séquence pour suivre et évaluer l'efficacité des mesures mises en œuvre d'un point de vue hydrologique, après opérations de restauration/création via HYDRINDIC (adapté d'après Gayet et al. 2016).

Les données piézométriques annuelles récoltées sur les SCORs (étape de suivi) (Figure 1) 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. Par cette comparaison d'états observés dans les mêmes conditions météorologiques, HYDRINDIC s'affranchit des difficultés d'analyse liées à la variabilité interannuelle du bilan de l'eau.

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).

¹ SCORs : ils correspondent à une référence d'objectif. Celle-ci ne doit pas être confondue avec une référence d'écart, à savoir un site dégradé avant travaux (témoin), tel que mentionné dans la boîte à outils RhoMÉO pour le suivi piézométrique (Collectif RhoMÉO 2017).

L'opération de restauration/création peut être considérée comme un succès lorsque les variations de profondeur de nappe libre¹ (mentionnée « nappe » dans l'ensemble du document) au cours de l'année dans le site en voie de restauration/création sont similaires à celles mesurées dans les SCORs (Figure 2).

Cet indicateur permet donc de vérifier que le fonctionnement hydrologique obtenu après opération de restauration/création correspond aux objectifs visés.

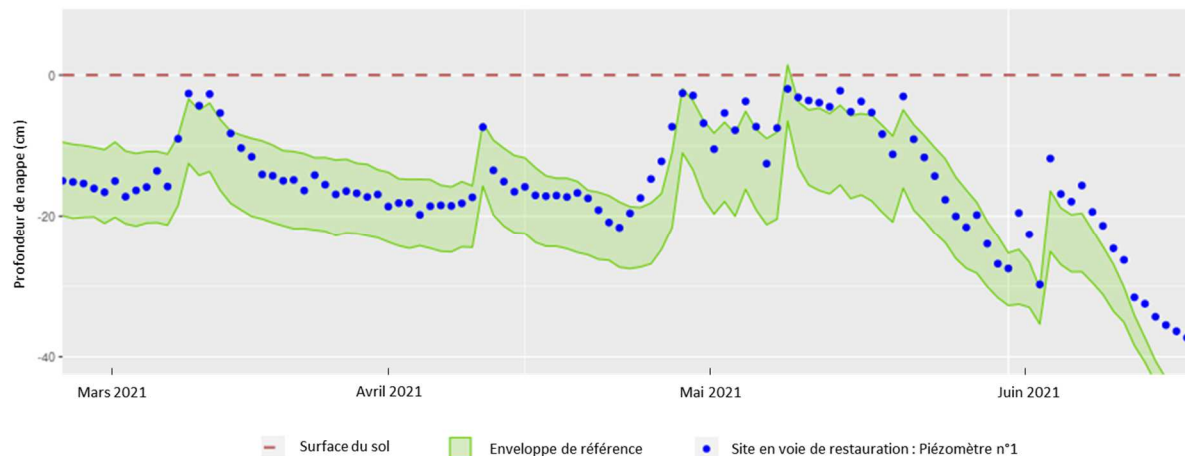


Figure 2. Profondeur journalière de la nappe enregistrée via un piézomètre (points bleus) sur un site de compensation (roselière en voie de restauration) et son enveloppe de référence (enveloppe verte) d'après les profondeurs journalières enregistrées sur trois piézomètres au sein de SCORs en Isère (sur le territoire de la Communauté de Communes des Balcons du Dauphiné) sur la période de mars à juin 2021.

Comparativement à des indicateurs existants comme ceux basés sur la flore, **HYDRINDIC est très sensible aux effets des opérations de restauration/création (temps de réponse relativement court de l'indicateur) et présente un caractère intégrateur car l'ensemble des processus et caractéristiques de l'écosystème découle en général du fonctionnement hydrologique** (Maltby & Barker 2009, Craft 2015). L'indicateur permet d'observer une réponse hydrologique à court (en quelques jours) et moyen terme (1 à 7 ans) en fonction du type d'opération de restauration/création et de zones humides concernées (Collectif RhoMéO 2017, Sueltenfuss & Cooper 2019). À l'inverse, selon le type de milieux concernés, le temps de réponse de la végétation à une opération de restauration/création peut être beaucoup plus long (de plusieurs années ou décennies selon l'altitude et le type de végétation) avec un remplacement progressif des espèces végétales initialement en place par des espèces plus adaptées (Connell & Slatyer 1977, Clewell & Lea 1990, Meyer *et al.* 2010). C'est particulièrement le cas en altitude où les milieux évoluent lentement ou pour les écosystèmes arborés qui nécessitent plus de temps pour se développer. De plus, ces indicateurs basés uniquement sur la végétation ne sont pas intégrateurs du fonctionnement global des zones humides (Dee & Ahn 2012). S'intéresser à l'hydrologie augmente les chances de réussite des opérations de restauration/création en zones humides et participe à la réalisation d'une évaluation fonctionnelle essentielle, plus complète qu'uniquement en prenant en compte la flore et l'habitat (Peters *et al.* 2012, Craft 2015).

¹ Nappe libre : nappe de faible profondeur communiquant avec la surface et reposant sur une couche géologique imperméable. Son niveau varie principalement en fonction des précipitations (Agence de l'eau Seine-Normandie 2009).

1.3 Spécificité et complémentarité de l'indicateur avec les outils existants

L'instrumentation et le suivi de la piézométrie se sont largement développés durant la dernière décennie, notamment dans le cercle des gestionnaires d'espaces naturels. Toutefois, les méthodes et outils d'analyse des données au travers d'indicateurs restent rares. Les travaux de recherche conduits en France sur l'hydrologie des zones humides, axés sur la compréhension de leur mode de fonctionnement et de leur rôle dans les cycles de l'eau et de la matière, n'ont produit que peu d'outils opérationnels (Gayet *et al.* 2016).

Si Grégoire *et al.* (2003) proposaient d'utiliser la moyenne des relevés piézométriques comme indicateur global de l'état hydrologique du milieu, ce n'est qu'avec la **Boîte à outils de suivi des zones humides (projet RhoMéO, intégré dans les indicateurs MHÉO)** qu'est proposée, en 2014, une méthode à destination des acteurs qui s'engagent dans la démarche de suivis et d'évaluation de l'état des zones humides. La Boîte à outils de suivi des zones humides propose entre autres le calcul **d'un indicateur de la dynamique hydrologique de la nappe basé sur la mesure de données piézométriques**. Ce dernier est construit sur l'analyse de la tendance d'évolution de la distribution annuelle des niveaux de la nappe, en un point représentatif de l'ensemble de la zone humide. Cet indicateur, construit pour suivre l'état hydrologique des milieux à moyen et long terme, **n'est pas conçu pour répondre à la question de l'évaluation des opérations de restauration/création**. Toutefois, le guide méthodologique d'utilisation des indicateurs pour le suivi des opérations de restauration (2017) indique que l'utilisation de la piézométrie dans ce cadre est pertinente mais nécessite d'envisager non seulement une adaptation du protocole de collecte de données, mais également de la méthode de traitement et d'analyse de l'information. L'indicateur HYDRINDIC, construit sur le même type de collecte de données, répond à ce besoin en permettant d'évaluer l'efficacité des opérations restauration/création, d'un point de vue hydrologique, à court et moyen terme (**Tableau 2**).

Tableau 2. Différences et complémentarités d'HYDRINDIC avec l'indicateur « Dynamique hydrologique de la nappe » de la Boîte à outils de suivi des zones humides.

	Dynamique hydrologique de la nappe (MHÉO)	HYDRINDIC
Principe	Suivi de l'évolution de l'état hydrologique	Suivi et évaluation de l'atteinte de l'objectif de restauration/création
Matériel	Piézomètre(s) avec sonde(s) autonome(s)	
Déploiement du matériel	Piézomètre sur un secteur représentatif de l'ensemble de la zone humide (1 piézomètre)	Au moins un piézomètre par sous-ensemble homogène sur la zone humide suivie et sur les SCORs (3 piézomètres minimum par site)

Mesure	Une mesure par heure. Les valeurs moyennes journalières sont agrégées pour chaque année (médiane, quartiles, extrema)	Une mesure par semaine minimum
Suivi	Suivi à long terme (≥ 5 ans) de l'ensemble de la zone humide	Suivi à court, moyen et long terme (≥ 1 an) d'une zone humide en voie de restauration/création et des SCORs
Analyse	Analyse de l'évolution (dégradation, stabilisation ou amélioration) de la distribution des valeurs des profondeurs de la nappe. Analyse des tendances d'évolution de la nappe à partir de 5 ans de suivi	Vérification de l'atteinte de l'objectif de restauration/création d'un point de vue hydrologique par comparaison des profondeurs de nappe avec des SCORs. Analyse dès 1 an de suivi

En s'intéressant spécifiquement à l'évaluation de l'efficacité des opérations de restauration/création de zone humide, HYDRINDIC complète les réflexions passées et actuelles portant sur la mise en place de suivis piézométriques. D'autres guides publiés récemment s'intéressent à la mise en place de suivis piézométriques. C'est le cas du « Guide pour l'élaboration de suivi d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau » (Rolan-Meynard *et al.* 2019) dont une partie est consacrée à la caractérisation des liens nappe-cours d'eau et zones humides. Il propose alors la mise en place de transects de piézomètres.

Que mesure-t-on ?

HYDRINDIC est basé sur la mesure du niveau piézométrique, soit la différence entre la surface du sol et la profondeur de nappe mesurée dans le sol (Encadré 1). Il concerne uniquement des mesures dans des nappes libres et non dans des nappes profondes (par ex. une nappe captive entre deux horizons imperméables). Les variations de profondeur entre sol et nappe sont mesurées toute l'année à l'aide de relevés piézométriques. Ces mesures sont effectuées sur le site en voie de restauration/création ainsi que sur les SCORs de façon synchrone (en même temps et à la même fréquence) sur la base d'au moins une mesure hebdomadaire.

Sur quelle base scientifique ?

Encadré 1. Fondements scientifiques de la piézométrie, d'après Porteret 2014.

« Le niveau piézométrique caractérise la pression de la nappe en un point donné ; autrement dit, c'est le niveau libre de l'eau dans un puits d'observation rapporté à un niveau de référence. Ce niveau est lié aux dynamiques de transport d'eau, d'emménagement 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). » Suivant une approche systémique, avec laquelle on établit la comptabilité des entrées et des sorties d'eau d'une unité hydrologique pour une période de temps donnée (Cosandey & Robinson 2012), le niveau piézométrique nous renseigne sur le stockage d'eau dans la zone humide.

« Il correspond à une part du terme S et DS de l'équation du bilan hydrique :

$$P + S = R + E + (S + DS)$$

Avec :

P : précipitations [mm], S : stocks de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm], R : ruissellements de surface et écoulements souterrains [mm], E : évaporation (y compris évapotranspiration) [mm], $S + DS$: stocks accumulés à la fin de la période [mm].

[...] 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. [...] c'est dans les horizons superficiels du sol que se joue la disponibilité de l'eau pour la végétation. Dans la littérature, des tests de corrélation montrent les liens des niveaux de nappe avec la biomasse ou la composition floristique (Pautou et al. 1996). 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. »

Le projet Hydrindic

HYDRINDIC est le fruit d'une collaboration entre organismes scientifiques publics (INRAE, OFB, UMS PatriNat OFB - CNRS - MNHN, etc.) et privés (bureaux d'étude Biotope, Conservatoire d'espaces naturels, etc.). Il résulte d'échanges lors de réunions et de phases de terrain sur la période 2020-2021 afin de tester l'indicateur sur une variété de zones humides françaises (bas-marais d'altitude, forêt alluviale, prairie humide, etc.).

Au cours du projet Hydrindic, l'indicateur a été testé sur 13 sites en voie de restauration/création et 10 SCORs associés (Figure 3). Les sites ont été sélectionnés avec les partenaires du projet en essayant d'obtenir une diversité de contextes hydrologiques, géomorphologiques, floristiques, d'habitats... mais aussi des surfaces et des types d'opérations de restauration/création variés. Les sites présentent différents types de zones humides (prairies et landes humides, prairies tourbeuses, forêts alluviales, etc.) allant de 51 à 2 470 m d'altitude (1 site présent à l'étage alpin, le reste se trouvant à l'étage collinéen) (Figure 4). Un suivi piézométrique d'une année a été mis en place sur chaque site. Sur certains sites, le suivi était toujours en cours en 2022. Au sein de la région biogéographique continentale, 8 sites (et SCORs associés) sont suivis : 5 sites en Isère (prairies humides et forêts alluviales), 1 site en Savoie (prairie tourbeuse), 1 site dans le Rhône (prairie humide) et 1 site dans le Jura (prairie humide). Dans la région biogéographique atlantique, 4 sites sont suivis (et SCORs associés) : 3 sites dans les Landes (mares forestières nommées « lagunes¹ »), 1 site dans le Morbihan (lande humide). Finalement, dans la région biogéographique alpine, 1 site (et SCORs associés) est suivi en Savoie (bas-marais).

¹ Lagunes : « [...] petites étendues d'eau douce généralement circulaires et de taille inférieure à 1 hectare [...]. Ces petits plans d'eau naturels dépendent du battement de la nappe d'eau superficielle au cours de l'année et sont souvent temporaires. [...] Les lagunes constituent au cœur de la forêt, des zones témoins du niveau de la nappe et donc de l'état de la ressource en eau [...]. » (Conseil général des Landes 2012).

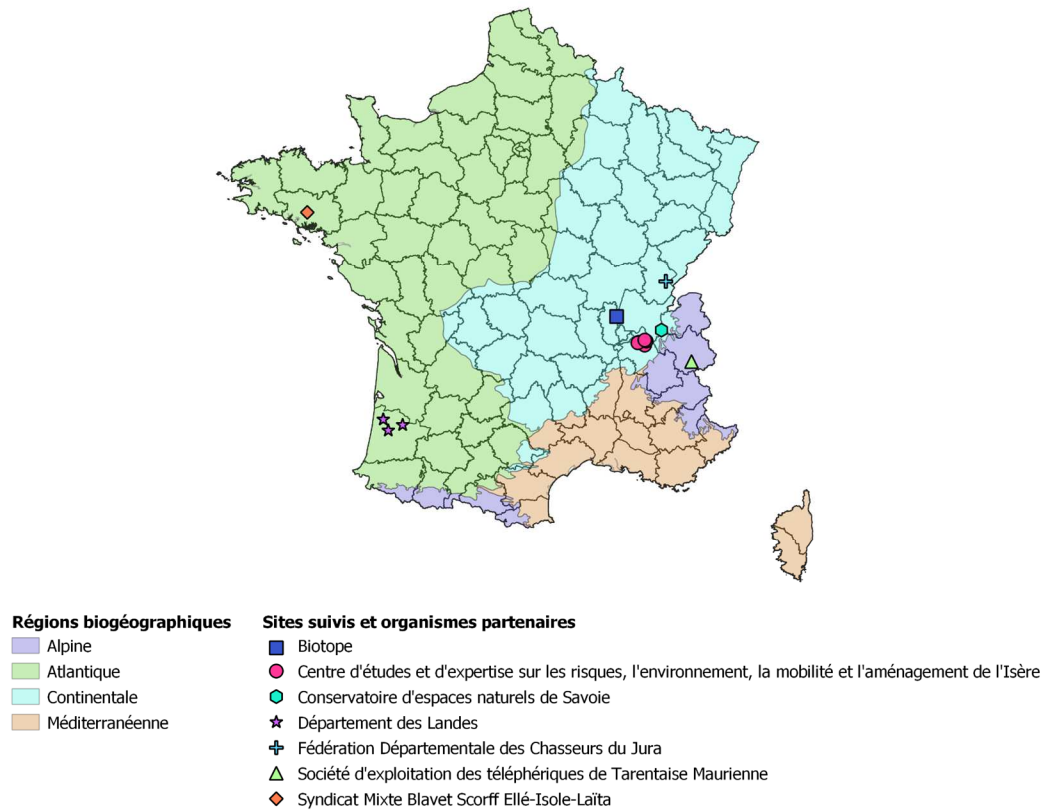


Figure 3. Répartition des sites tests en 2021 et partenaires associés (fond de carte : European Environment Agency 2016, © les contributeurs d'OpenStreetMap sous licence ODbL 2016).

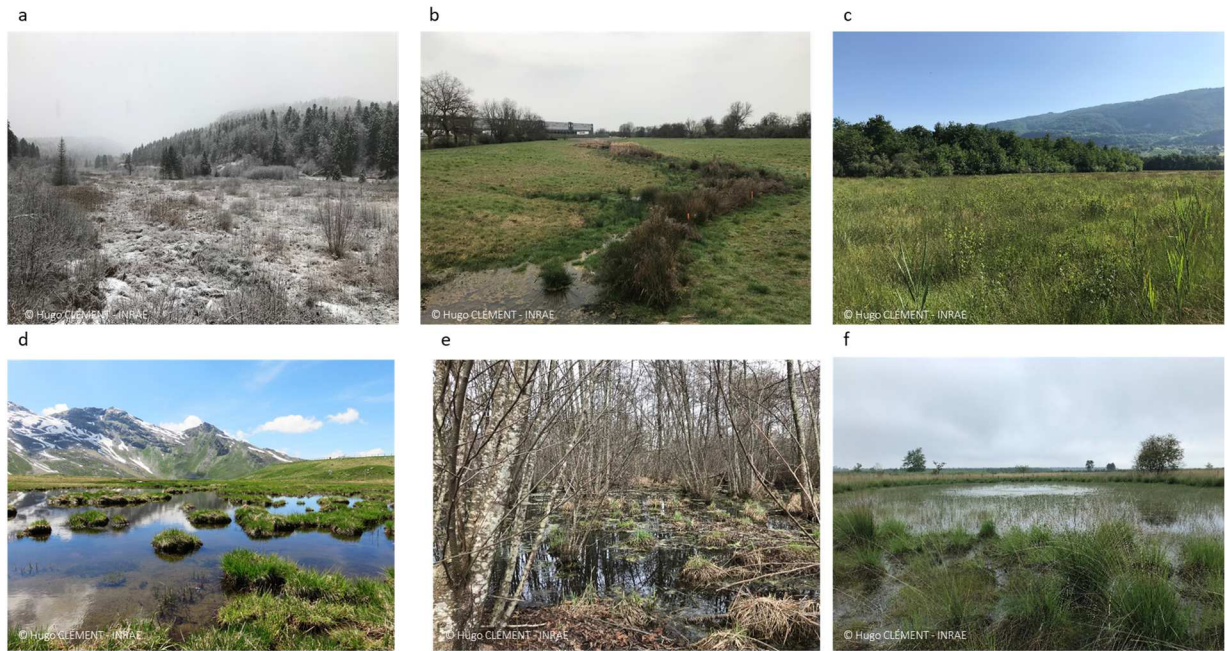


Figure 4. Exemple de zones humides suivies dans le cadre du projet Hydrindic : roselières et formations de bordure à grands hélrophytes dans les départements du Jura (a) et du Rhône (b) ; une prairie tourbeuse (c) et un bas-marais acide (d) dans le département de la Savoie ; une forêt alluviale dans le département de l'Isère (e) et une mare forestière dans le département des Landes (f).

I.4 Public cible

Ce guide s'adresse aux publics suivants : les bureaux d'études, les gestionnaires d'espaces naturels (collectivités, syndicats mixtes et associations par ex.), etc. qui œuvrent dans le domaine de la restauration/création de zones humides, avec des connaissances générales dans le domaine de l'écologie mais sans nécessairement posséder une expertise pointue en hydrologie, pédologie, botanique, etc. Il doit les aider à évaluer les opérations de restauration/création puis suivre leurs effets dans le temps. Ce guide vise à leur apporter les connaissances nécessaires pour la mise en place d'un suivi piézométrique, l'analyse et l'interprétation des résultats.

Cet indicateur est aussi à destination des services de l'État (DREAL et DDT par ex.) et établissements publics de l'État (OFB et CEREMA par ex.) comme aide à la décision concernant notamment l'évaluation de suivis mis en place dans le cadre de la séquence ERC et de l'atteinte des objectifs visés par la compensation. Ce guide peut leur permettre d'interpréter les résultats du suivi piézométrique obtenus par le pétitionnaire.

I.5 Domaine d'application

HYDRINDIC permet le suivi et l'évaluation de projets de restauration/création mobilisant des opérations ayant des effets sur le fonctionnement hydrologique de zones humides dégradées (déblaiement, démantèlement de drainage, gestion des prélèvements et des ouvrages hydrauliques, etc. sur des bas-marais tourbeux, non tourbeux, cultures intensives, prairies mésiques, forêts alluviales, etc.). Les opérations de type « gestion¹ » pouvant modifier l'hydrologie des sites sont aussi concernées par cet indicateur (élimination de ligneux, défrichement, etc.). Tout projet de restauration/création sans opération susceptible de modifier le fonctionnement hydrologique d'une zone humide n'est pas concerné par cet indicateur. HYDRINDIC a aussi été développé pour répondre à l'évaluation des opérations consistant à créer des milieux humides en général.

Les zones humides concernées sont celles où des opérations de restauration/création peuvent avoir un effet sur les fonctions hydrologiques. Elles peuvent être réalisées dans ou hors cadre ERC (Tableau 3). Ces zones humides sont définies au sens de la réglementation française tels que : les « terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire, ou dont la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année » (Art. L212-1 du Code de l'environnement précisé par l'arrêté interministériel du 24 juin 2008 modifié).

Bien que non testé dans le cadre du projet Hydrindic, l'indicateur semble aussi applicable à l'ensemble des milieux humides au sens général (marais, lagunes, etc.) : « une portion du territoire, naturelle ou artificielle, caractérisée par la présence de l'eau. Un milieu humide peut être ou avoir été [...] en eau, inondé ou gorgé d'eau de façon permanente ou temporaire. L'eau peut y être stagnante ou courante, douce, salée ou saumâtre. » (Sandre 2018).

¹ Opérations de type « gestion » : opérations ayant pour « objectif général de protéger l'intégrité des écosystèmes indigènes à long terme [en contrast] les processus de dégradation écologique afin de maintenir les attributs d'un écosystème. » (Gann et al. 2019).

Tableau 3. Exemples d'opérations de restauration/création de zone humide concernées par HYDRINDIC (modifié d'après Collectif RhoMéO 2017).

RESTAURATION/CRÉATION	
Objectifs	Opérations
Amélioration du niveau et fréquence d'engorgement (nappe)	Comblement de fossés, démantèlement de drainage, gestion des prélèvements et des ouvrages hydrauliques, restauration hydromorphologique...
Reconstitution de la capacité de stockage de l'eau en surface	Déblayer et évacuer les remblais...
Ralentissement des écoulements et recréation de connectivité latérale	Régulation du régime hydrique, gestion des niveaux d'eau, reméandrage...
...	

II. Protocole

II.1 Définition des sites suivis

HYDRINDIC est alimenté par les données piézométriques d'un site en voie de restauration/création et par celles de plusieurs sites correspondant à l'objectif de restauration/création (SCORs). Les suivis à mettre en place sont équivalents en tout point sur les deux types de sites et doivent être effectués de manière synchrone. **C'est cette comparaison synchrone entre sites en voie de restauration/création et SCORs qui permet d'évaluer l'efficacité des opérations de restauration/création en observant des profondeurs de nappe plus ou moins similaires (Tableau 4).**

Tableau 4. Objectifs des deux types de sites à suivre en parallèle.

Dénomination	Finalité
Site en voie de restauration/création	Mesurer des variations de profondeur de nappe après opération de restauration/création dans l'emprise de la zone où s'exerce les effets de ces mesures → disposer de plusieurs chroniques piézométriques à comparer avec l'enveloppe de référence
Sites correspondant à l'objectif de restauration/création (SCORs)	Mesurer des variations de profondeur de nappe de façon synchrone au site en voie de restauration/création → calculer une enveloppe de référence

Pour chaque site, une demande d'autorisation d'installation de matériel de suivi scientifique doit être effectuée auprès des propriétaires ou locataires des parcelles (gestionnaires) ainsi que le dépôt d'un dossier d'autorisation environnementale auprès de la DDT ou de la DDTM concernée (Encadré 2). Dans un premier temps, la recherche des propriétaires peut être réalisée par l'obtention des numéros de parcelles via la consultation en ligne du plan cadastral français (<https://www.cadastre.gouv.fr>). Dans un deuxième temps, l'identité des propriétaires (via les numéros de parcelles) est à demander auprès des mairies, communautés de communes... concernées.

Encadré 2. Règlementation relative à la mise en place de piézomètres (en date du 01/08/2022).

La mise en place de piézomètre doit faire systématiquement l'objet d'un dossier « Loi sur l'eau » au titre de la rubrique 1.1.1.0 de la nomenclature reprise à l'article R.214-1 du Code de l'Environnement, et ce, quelque que soit la profondeur de forage et le type de piézomètre (temporaire ou permanent). La création de piézomètres doit ainsi faire l'objet d'une déclaration auprès de la DDT ou DDTM du département concerné (exemple d'un formulaire de déclaration de la DDT Isère en Annexe 1).

La rubrique 1.1.1.0 : « *Sondage, forage, y compris les essais de pompage, création de puits ou d'ouvrage souterrain, non destiné à un usage domestique, exécuté en vue de la recherche ou de la surveillance d'eaux souterraines ou en vue d'effectuer un prélèvement temporaire ou permanent dans les eaux souterraines, y compris dans les nappes d'accompagnement de cours d'eau.* »

À cette rubrique est rattaché l'arrêté du 11 septembre 2003 portant application du décret n° 96-102 du 2 février 1996 et fixant les prescriptions générales applicables aux sondage, forage, création de puits ou d'ouvrage souterrain soumis à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 1.1.1.0 de la nomenclature annexée au décret n° 93-743 du 29 mars 1993 modifié (modifié par l'arrêté du 7 Août 2006).

Les forages de plus de 10 m de profondeur doivent en plus de la déclaration « Loi sur l'eau » faire l'objet d'une déclaration au titre du code minier (article L411-1) transmise par le maître d'ouvrage à la DREAL au moins un mois avant le début des travaux. Le BRGM donnera un numéro unique à l'ouvrage et l'intégrera dans la base de données nationale du sous-sol (BSS)¹.

Exemple de données et documents à fournir dans le cadre d'une déclaration auprès de la DDT ou DDTM :

- Emplacement de l'ouvrage : code et nom de la masse d'eau² (si connu) ; coordonnées géographiques de l'ouvrage (en Lambert 93) ; références cadastrales ; ...
- Document d'incidence et précautions prises en vue de prévenir les risques pour l'environnement et notamment celui de pollution des eaux souterraines ou superficielles : désignation et distance des cours d'eaux, canaux, plans d'eau, zones humides les plus proches ; forage inclus dans une Zone de Répartition des Eaux ? ; forage inclus dans un périmètre de SAGE ? ; forage inclus dans un périmètre de protection de captage ou une zone de protection de captage ? ; ...
- Pièces à joindre au dossier : coupe technique de l'ouvrage ; cartographie IGN 1/25000 identifiant les ouvrages projetés ; plan cadastral 200 m autour des ouvrages ; ...

¹ Informations sur le code BSS : <https://infoterre.brgm.fr/page/nouveau-code-bss>

² Information sur les masses d'eau : <https://www.eaufrance.fr>

- ...

Attention : chaque département possède un type de déclaration (simplifiée au format papier, en ligne, etc.) et une liste de documents/informations à fournir qui lui sont propres.

II.1.1 Site en voie de restauration/création

Au sein d'un site en voie de restauration/création, il est nécessaire d'identifier l'emprise spatiale présumée où les effets des opérations de restauration/création s'exercent. Le Collectif RhoMéo (2017) la définit comme la zone d'impact de la restauration : « Cette zone peut correspondre en totalité à l'emprise de la zone humide [...] ou seulement à une partie de celle-ci. [...] La zone d'impact considère l'ensemble des effets cumulés attendus de la restauration. Par exemple, la zone pour laquelle l'objectif de rehausser le niveau de la nappe avec installation d'un seuil sur un fossé drainant correspond à la zone d'impact potentiel. ». La zone d'impact de la restauration définie par RhoMéo est utilisée dans le cadre d'HYDRINDIC, mais elle est appelée « zone d'effet de la restauration » dans le reste du document.

La mise en place d'un réseau de piézomètres avant, pendant et après opérations de restauration/création permet de valider l'emprise de la zone présumée d'effet de la restauration/création par l'observation de l'évolution du gradient de profondeur de nappe. Ce dernier peut être observé par la mise en place de transects longitudinaux (observation des effets de l'opération de restauration/création sur l'hydrologie de l'amont vers l'aval de la zone humide en voie de restauration/création) ou latéraux de piézomètres (Collectif RhoMéo 2017) (Figure 5).

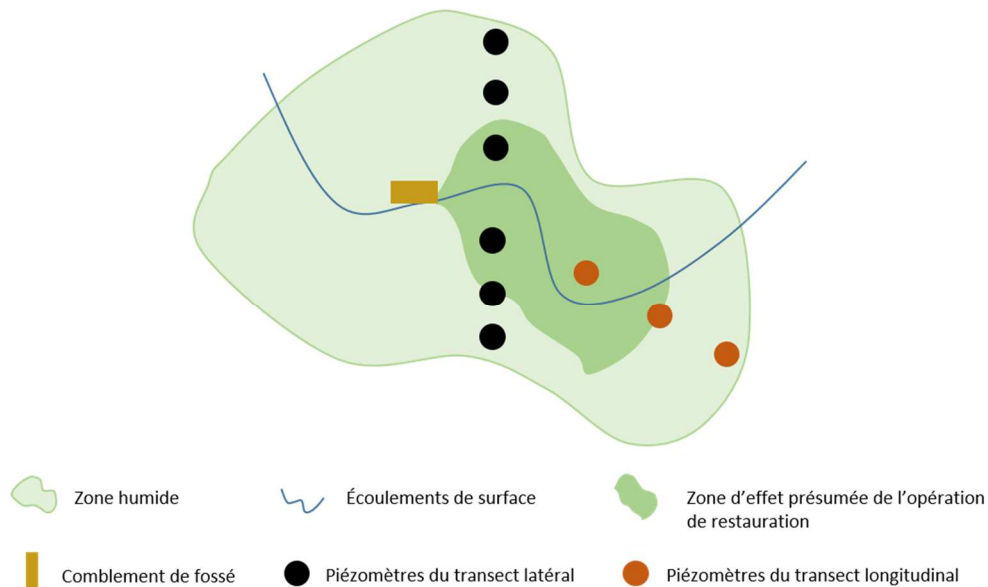


Figure 5. Exemple de dispositif permettant de confirmer l'emprise de la zone d'effet de la restauration (comblement d'un fossé de drainage ponctuel). Un transect longitudinal et un transect latéral de piézomètres sont mis en place.

Les sous-ensembles homogènes : une représentativité écologique du site

Pour définir une stratégie de déploiement des piézomètres et bien représenter les conditions écologiques du site, une fois la zone d'effet de la restauration définie, **il est nécessaire d'identifier des sous-ensembles homogènes¹ au sein desquels le suivi sera mis en place (Figure 6)**. Les sous-ensembles homogènes sont principalement identifiés selon (1) **les caractéristiques pédologiques**, (2) **les habitats EUNIS niveau 3**, (3) **les caractéristiques topographiques** et (4) **hydrologiques**. Un sous-ensemble résulte de l'intersection de ces critères, en tenant également compte de l'effet présumé des opérations de restauration/création dans l'espace (Figure 7).

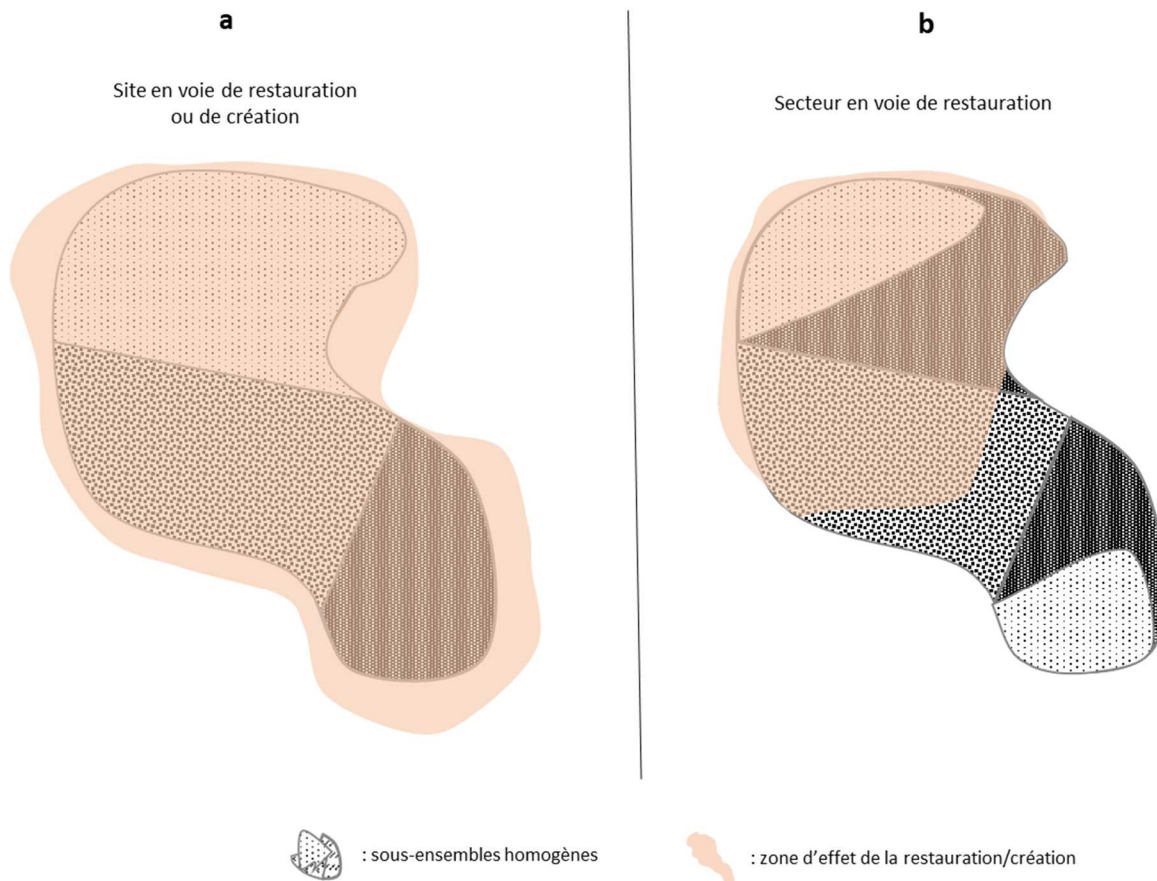


Figure 6. Représentation de zones humides dont la zone d'effet de la restauration porte (a) sur son intégralité ou (b) uniquement sur une partie de celle-ci. Dans les deux cas, 3 sous-ensembles homogènes sont identifiés dans le site/secteur en voie de restauration/création.

¹ Sous-ensemble homogène : « Unité spatiale où l'influence des facteurs abiotiques et biotiques sur le sol est relativement homogène. Les propriétés du sol y sont considérées comme similaires. » (Gayet et al. 2016).

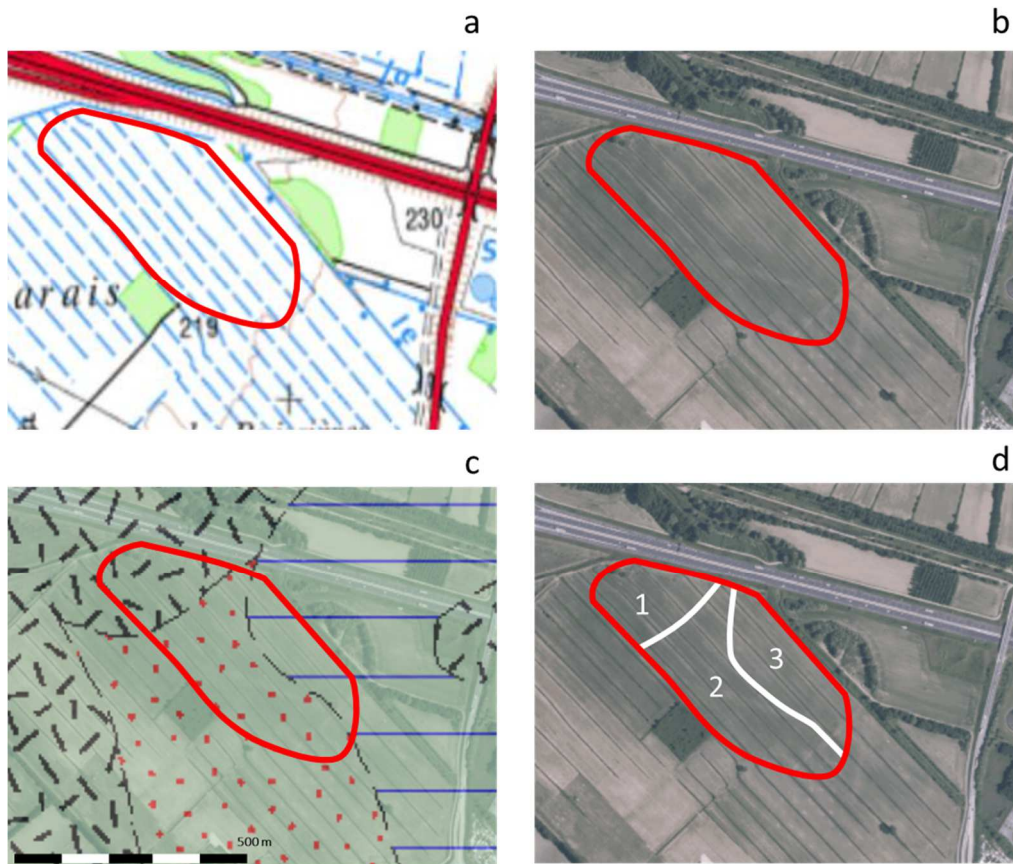


Figure 7. Utilisation de SCAN 25® (a), d'orthophotographies (BD ORTHO®) (b) et de cartes géologiques (BD Charm-50) (c) pour une pré-identification de 3 sous-ensembles homogènes (d) sur un site en voie de restauration en Isère (sur le territoire de la Communauté d'agglomération Porte de l'Isère). Les sous-ensembles sont délimités par des traits blancs et identifiés par un numéro au sein du site (polygone rouge de 9 ha, correspondant aussi à la zone d'effet de la restauration) (modifié d'après Gayet et al. 2016).

II.1.2 Sites correspondant à l'objectif de restauration/création (SCORs)

Afin d'évaluer l'efficacité des opérations de restauration/création sur le site en voie de restauration/création, plusieurs sites correspondant à l'objectif de restauration (SCORs) doivent être identifiés. **Les SCORs ne sont pas forcément des sites exempts de pressions mais ils doivent correspondre aux objectifs escomptés de restauration/création** (ex. bas-marais à *Eriophorum angustifolium*, landes humides septentrionales, etc.). La SER (*Society for Ecological Restoration*) définit les sites de référence tel que : « Ces sites sont similaires à celui [du site en voie de restauration/création] sur le plan environnemental et écologique, mais, idéalement, ont enduré une dégradation faible ou minimale » (Gann *et al.* 2019). Ils peuvent aussi correspondre à des parties de zones humides écologiquement fonctionnelles présentes hors de l'emprise des effets de la restauration d'un site partiellement en voie de restauration (Figure 8).

Comment identifier les sites ?

Le but est d'identifier des SCORs qui représentent un objectif souhaité et atteignable pour le site en voie de restauration/création. Il convient de privilégier les sites avec un fonctionnement hydrologique et des habitats qui correspondent à cet objectif. Dans certains secteurs géographiques des difficultés d'identification de SCORs peuvent être rencontrées. Cela peut être notamment lié à **la spécificité hydrogéomorphologique et écologique des sites rencontrés (par ex. fonctionnement atypique)** et à la forte anthropisation du territoire et des milieux naturels qui ne permet pas d'identifier de SCORs.

Le site en voie de restauration/création et les SCORs doivent au moins :

- appartenir à la même hydro-écorégion de niveau ²¹ que le site en voie de restauration/création ;
- appartenir au même système hydrogéomorphologique² (Tableau 5) que le site en voie de restauration/création.

De plus, le site en voie de restauration/création doit être en capacité (conditions physiques et chimiques du sol et de l'eau, et la topographie) de présenter des habitats similaires (par ex. EUNIS niveau ³³) correspondant à l'objectif attendu à l'issue de la restauration/création (Gann *et al.* 2019).

Comme pour le site en voie de restauration/création, des sous-ensembles homogènes doivent être identifiés sur les SCORs (cf. II.1.1). Ceux-ci doivent être le plus similaires possible au site en voie de restauration/création concernant leurs caractéristiques pédologiques, d'habitats, topographiques et hydrologiques.

Si ces conditions ne sont pas remplies, le site ne peut pas être sélectionné comme étant un SCOR. Un mauvais choix de SCOR fausse les interprétations et les futures décisions.

La proximité géographique des sites est à rechercher. Pour un gain de temps et de pertinence durant l'identification de potentiels SCORs, le recours aux connaissances des acteurs locaux est précieux.

¹ Hydro-écorégions de niveau 2 (HER-2) : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/hydroecoregions-de-niveau-2-her-2>

² Typologie hydrogéomorphologique : <https://www.sandre.eaufrance.fr/?urn=urn:sandre:donnees:920:::referentiel:3.1:html>

³ Guide de détermination des habitats terrestres et marins de la typologie EUNIS : <https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-guides-protocoles/guide-determination-habitats-terrestres-marins-typologie-eunis>

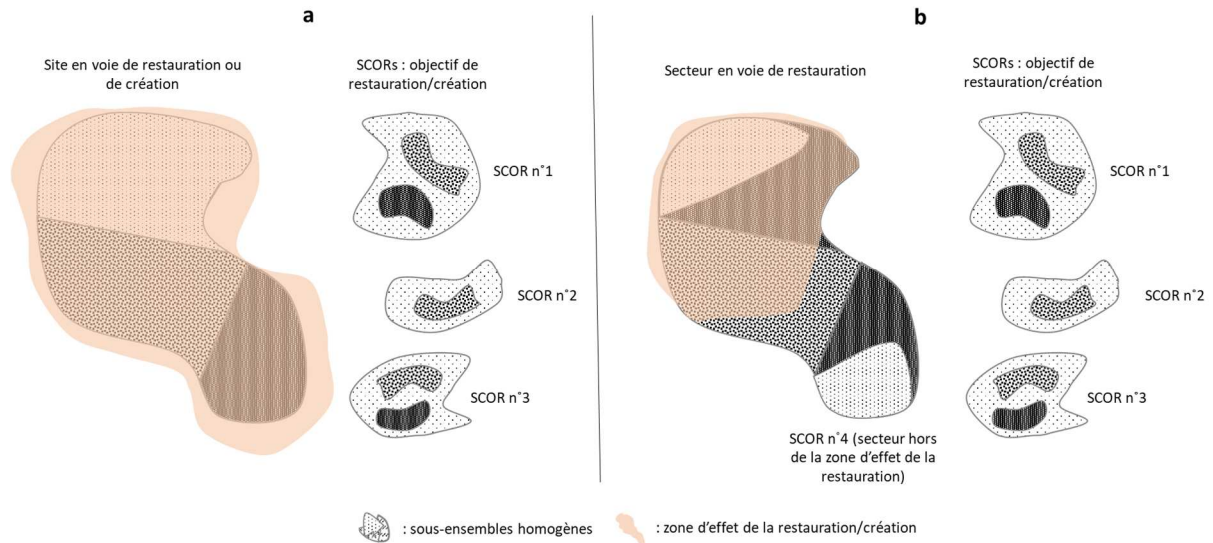


Figure 8. Représentation de zones humides et de SCORs associés. Dans les deux cas, 3 sous-ensembles homogènes sont identifiés dans le site/secteur en voie de restauration/création. Dans les cas a et b, 3 et 4 SCORs ont respectivement été identifiés à proximité des sites. Pour le cas b, le site n'étant pas affecté totalement par l'opération de restauration, le secteur sans effet présumé de la restauration (correspondant à l'objectif de restauration) est considéré comme un SCOR (SCOR n°4).

Tableau 5. Typologie hydrogéomorphologique (d'après Brinson et al. 1995, modifié par Gayet et al. 2023).

Système hydrogéomorphologique		Source d'alimentation en eau dominante
Continental	Alluvial	Débordement de cours d'eau et connexion à la nappe alluviale
	Riverain des étendues d'eau	Débordement des étendues d'eau et connexion avec la nappe de l'étendue d'eau
	Dépression	Décharge de nappe et apports de subsurface
	Plateau	Précipitation
	Source et suintement	Décharge en surface de nappe par source et suintement
Littoral marin	Estuarien	Flux marins, connexion à la nappe et débordement de cours d'eau
	Péri-lagunaire	Débordement des étendues d'eau marines sur la côte (par ex. lagunes) et connexion avec la nappe de l'étendue d'eau
	Panne dunaire	Décharge de nappe et apports de subsurface
	Côtier	Flux marins

L'identification de SCORs peut être effectuée en trois phases (Encadré 3) :

- L'identification d'un espace écologique pertinent où rechercher des SCORs équivalents au site en voie de restauration/création du point de vue écologique via une **recherche cartographique à large échelle**. Les supports suivants peuvent par exemple être utilisés :
 - les **hydro-écorégions de niveau 2** sont de vastes espaces avec des conditions topographiques, géologiques et climatiques relativement homogènes (Wasson 2004) ;
 - les **zones hydrographiques** de la BD TOPAGE® sont plus précisément des espaces avec des fonctionnements hydrologiques relativement homogènes (Sandre 2020).

- Il est ensuite possible de rechercher des SCORs potentiellement équivalents au site en voie de restauration/création dans l'espace écologique identifié, avec une préférence pour des sites connus, voire idéalement avec des suivis piézométriques en cours. Les supports suivants peuvent par exemple être utilisés :
 - les **inventaires de zones humides** (par ex. disponibles auprès des collectivités locales en charge de la thématique « zone humide » ou des DDT et DDTM) ou les **cartes de pré localisation des milieux humides** (par ex. Berthier *et al.* 2014, la cartographie nationale des milieux humides à paraître ou la cartographie mutualisée du réseau partenarial des données sur les zones humides) ;
 - les **cartes d'habitats** (par ex. issues de DOCOB), les **cartes géologiques ou la carte des sols** (par ex. carte géologique 1/50 000 vecteur harmonisée de la BD Charm-50 du BRGM, carte des sols du GIS Sol disponible sur Géoportail) et les **cartes numériques** (par ex. SCAN 25® de l'IGN) pour identifier respectivement des zones humides avec des habitats, un matériau parental et une topographie similaires au site en voie de restauration/création ;
 - ...

- Une **vérification sur le terrain de l'éligibilité des SCORs : topographie similaire, fonctionnement hydrologique et habitat correspondant à l'objectif de restauration/création**, absence de perturbations majeures dans le site ou dans son environnement immédiat pouvant altérer son fonctionnement hydrologique actuel ou à venir, etc.

L'identification de SCORs dépend du contexte écologique sur le site et à proximité de celui-ci, car l'environnement influence son fonctionnement. Pour éviter de comparer des sites trop différents et pour interpréter les résultats obtenus, l'observateur doit se poser les questions suivantes :

- Quelles pressions s'exercent (modification de l'alimentation en eau, pollution, etc.) ?
- Quelle occupation du sol à proximité¹ (infrastructures de transport, activités industrielles, zones forestières, etc.) ?
- D'où proviennent les principaux écoulements superficiels et souterrains alimentant les sites (zone contributive) ?
- Les nappes rencontrées sont-elles influencées par un cours d'eau à proximité ?
- ...

¹ Information disponible via la cartographie et base de donnée OCS GE de l'IGN : <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/occupation-du-sol-usages>

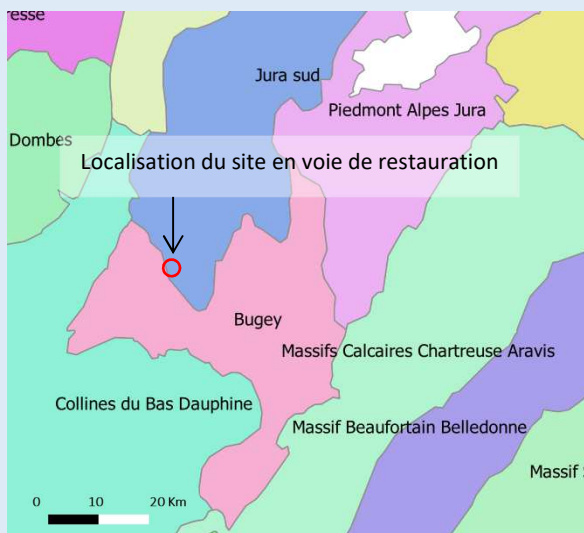
Encadré 3. Exemple d'identification d'un SCOR pour un site en voie de restauration dans le département de l'Isère. La démarche doit être répétée pour parvenir à plusieurs SCORs pour un même site en voie de restauration/création.

Tableau 1. Description des sites.

Type de site	Hydro-écorégion (HER-2)	Système hydrogéomorphologique (HGM)	Habitats (EUNIS 3)
Site en voie de restauration	Jura sud	Plateau	Actuel : G1.C Plantations forestières très artificielles [...] Objectif : C3.2 Roselière [...]
Site correspondant à l'objectif de restauration (SCOR)	Jura sud	Plateau	C3.2 Roselière [...]

Le SCOR a été identifié par recoupement d'informations cartographique et prospections sur le terrain, selon les étapes présentées ci-dessous.

Phase 1 : identification d'un espace écologique pertinent



Étape 1. Identification de l'hydro-écorégion (HER-2) à laquelle appartient la zone humide en voie de restauration (ici le Jura sud) pour ensuite rechercher un SCOR dans la même hydro-écorégion.



Étape 2. Observation du contexte paysager du site en voie de restauration (BD ORTHO®) et mise en évidence du réseau hydrographique (bleu clair) (BD TOPAGE®).

Phase 2 : recherche d'un SCOR



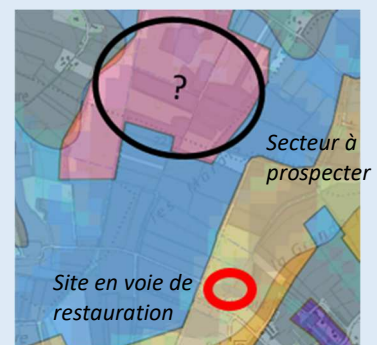
Étape 3. Mise en évidence de l'occupation du sol (orange : surface essentiellement agricole [...] ; bleu : systèmes culturaux [...] ; violet : tissu urbain discontinu ; rouge : marais intérieurs) par la cartographie CORINE Land Cover (2018)¹ et identification d'un secteur potentiellement intéressant (marais intérieurs) pour y identifier un SCOR.



Étape 4. Utilisation des enveloppes de milieux potentiellement humides comme aide à l'identification de secteur susceptible de contenir des zones humides (turquoise : probabilité assez forte ; bleu clair : probabilité forte ; bleu foncé : probabilité très forte) (Berthier et al. 2014).



Étape 5. Identification du matériau parental dominant du site en voie de restauration par l'utilisation de la carte géologique 1/50 000 vecteur harmonisée (BD Charm-50 du BRGM).



Étape 6. Croisement des cartographies précédentes et ajout du registre parcellaire graphique (RPG) afin de cibler les secteurs potentiellement intéressants et réduire l'effort de prospection sur le terrain.

¹ Ressource à mutualiser avec d'autres cartographies d'occupation du sol : par ex. <https://www.theia-land.fr/>

Phase 3 : vérification sur le terrain de l'éligibilité du SCOR potentiel



Étape 7. Vérification sur le terrain de l'éligibilité du SCOR (gauche) vis-à-vis du site en voie de restauration (droite) par la mise en place de sondages pédologiques, relevés floristiques, reconnaissance du sens des écoulements, etc. et identification des sous-ensembles homogènes.

II.2 Stratégie de déploiement des piézomètres

Suivre la profondeur de la nappe sur un site en voie de restauration/création et sur des SCORs est possible avec **des piézomètres¹ (puit d'observation)** (Figure 9). Les piézomètres sont installés idéalement entre 1 et 2 m de profondeur dans le sol, en fonction du substrat (par ex. la présence importante d'éléments grossiers dans les horizons du sol peut rendre difficile la mise en place d'un piézomètre à plus d'1 m), pour mesurer les **variations de la nappe**.

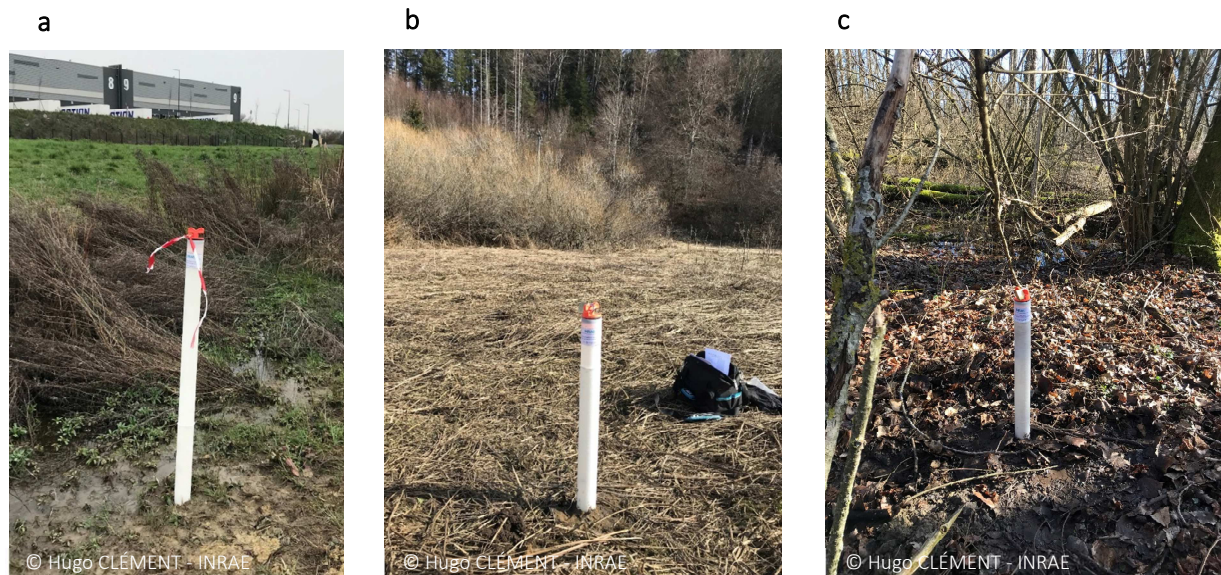


Figure 9. Piézomètres mis en place dans les départements du Rhône (a), du Jura (b) et de l'Isère (c).

Nombre de piézomètres et localisation

Les piézomètres doivent être positionnés au sein de sous-ensembles homogènes représentatifs des fonctionnements écologiques du site et de la dynamique de la nappe (ou des nappes) dans le site. Ils rendront ainsi compte avec fidélité de l'atteinte des objectifs ou tout du moins de la bonne/mauvaise direction de restauration/création d'un point de vue hydrologique.

Le nombre de piézomètres nécessaires et leur emplacement dépendra principalement de la superficie des sous-ensembles homogènes identifiés. Une bonne connaissance du site à équiper permet un choix optimal du nombre de piézomètres à installer et de leurs emplacements. **Afin de renseigner la dynamique générale de la nappe à l'échelle du site et ainsi pouvoir calculer des moyennes, écarts types et construire les enveloppes de référence, l'installation de plusieurs piézomètres est nécessaire avec un minimum de trois piézomètres par site** (Porteret 2014, Sueltenfuss & Cooper 2019).

¹ Dans la littérature anglo-saxonne, le vocabulaire employé pour nommer un piézomètre peut prêter à confusion avec le vocabulaire employé couramment en France. Un piézomètre (nommé « monitoring well » dans la littérature anglo-saxonne) correspond à un tube crépiné (perforé, il permet l'entrée de l'eau sur la totalité de sa longueur (sauf dans la partie hors sol). Il est enfoncé verticalement dans le sol pour mesurer la profondeur de nappe. À la différence d'un « monitoring well », dans la littérature anglo-saxonne, un « piezometer » est uniquement perforé sur la partie inférieure du tube (quelques centimètres) et permet de rendre compte de la direction des écoulements de l'eau dans le sol (Minnesota Board of Water & Soil Resources 2013). Ainsi, ce qu'on appelle piézomètre en France est plutôt appelé « monitoring well » dans la littérature anglo-saxonne.

Pour le site en voie de restauration/création et les SCORs, **au moins un piézomètre par sous-ensemble homogène est nécessaire** de manière à être représentatif du fonctionnement hydrologique et des habitats du site (Figure 10 a). À titre d'exemple, durant le projet Hydrindic, dans les sous-ensembles homogènes dont la superficie était inférieure à 5 500 m², un seul piézomètre a été mis en place par sous-ensemble (le site présente plusieurs sous-ensembles). Dans les sous-ensembles de taille plus importante ou dans le cas de sites présentant uniquement un ou deux sous-ensembles homogènes, 3 piézomètres ont systématiquement été installés (Figure 11).

Dans le cas de l'observation ou de la supposition d'un gradient de restauration sur le site en voie de restauration, l'installation de piézomètres le long du gradient rend compte de la transition entre sous-ensemble homogène en voie de restauration et SCORs. Au moins trois piézomètres sont installés dans le sous-ensemble homogène où s'exercent les effets de la restauration/création et au moins trois autres dans le secteur où ne s'exercent pas les effets de la restauration/création, qui peut alors servir de SCOR (Figure 10 b).

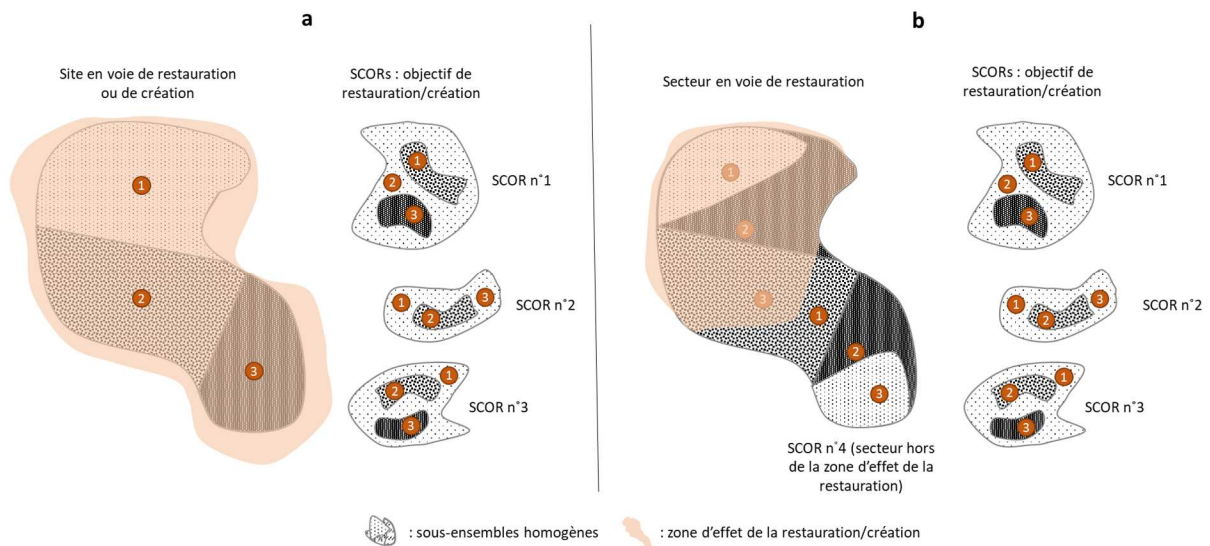


Figure 10. Représentation fictive du placement de piézomètres au sein des sous-ensembles homogènes d'un site en voie de restauration avec une restauration de l'ensemble du site (3 piézomètres) et de 3 SCORs associés (3 piézomètres sur chaque site) (a). L'illustration b représente des piézomètres au sein de sous-ensembles homogènes dans le cadre de la présence d'un gradient de restauration sur un site en voie de restauration. 3 piézomètres sont placés dans la zone d'effet de la restauration et 3 piézomètres sont installés sur chacun des SCOR associés. Ils sont placés de façon à rendre compte de la transition entre les deux secteurs tout en étant représentatif du sous-ensemble homogène dans lequel ils sont installés.



Figure 11. Exemple de choix du nombre et de l'emplacement des piézomètres dans une mare forestière (lagune landaise) en voie de restauration dans le département des Landes, à partir notamment de données de cartographie d'habitats (cartographie d'habitat : Valérie GUEGUN, Département des Landes ; Orthophotographie : BD ORTHO®). La cartographie indique 3 habitats correspondant aux 3 ceintures de végétations formant cette lagune. Un piézomètre placé dans chaque habitat permet de rendre compte de l'hydrologie du site dans sa globalité et est nécessaire pour une évaluation de l'efficacité de la restauration d'un point de vue hydrologique. Les SCORs identifiés pour cette lagune devront être équipés en piézomètres sur ce même modèle (3 piézomètres dans les 3 ceintures de végétations).

Durée de suivi

Une compréhension précise du fonctionnement hydrologique d'une zone humide nécessite des suivis d'une durée minimale de 10 ans (Tiner 2017). En revanche, si l'objectif est **uniquement de s'assurer que l'on a retrouvé, sur la zone humide en voie de restauration/création, un fonctionnement hydrologique similaire aux SCORs**, alors la durée minimale de suivis peut être beaucoup plus courte. On estime que le temps nécessaire (temps de réponse) pour retrouver dans une zone humide en voie de création/restauration un fonctionnement hydrologique similaire aux SCORs varie généralement entre 1 et 7 ans¹ (Cooper *et al.* 2017). Ce délai dépend du type de zones humides, de la nature des opérations de restauration/création concernées et de leur ancienneté. Les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- **Suivi uniquement applicable aux opérations de restauration/création passées** : le suivi piézométrique peut être mis en place *a posteriori* pour s'assurer que le fonctionnement hydrologique de la zone humide en voie de restauration/création est compatible avec les objectifs fixés. Cela nécessite de faire des hypothèses sur le temps de réponse de la zone humide (cf. propositions ci-après). Si ce temps de réponse est inférieur ou égal au temps passé depuis l'opération de restauration/création, alors un suivi sur 1 an peut suffire (Figure 12, cas 1). Par exemple, pour un bas-marais, si on fait l'hypothèse que le temps de réponse est de 4 ans (c'est-à-dire qu'il faut 4 ans pour obtenir la restauration/création du fonctionnement hydrologique voulu après opérations de restauration/création), et que ces opérations de

¹ Certaines opérations de restauration ont un effet rapide (quelques heures) sur la profondeur de nappe (comblement de fossés, démantèlement de drainage, etc.).

restauration/création ont eu lieu en juillet 2016, un suivi d'1 an débuté en juillet 2020 peut suffire ;

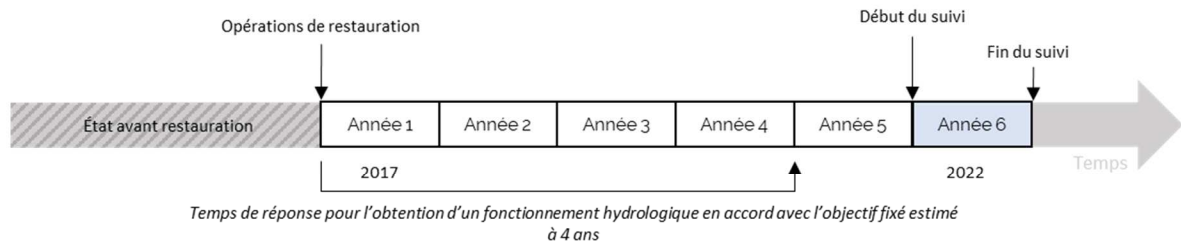
- **Suivi complet applicable aux opérations de restauration/création actuelles et à venir** : le suivi piézométrique est mis en place idéalement (1) avant (au minimum durant 1 an), (2) au moment de l'opération de restauration/création et (3) après celle-ci. **La durée du suivi piézométrique après opération de restauration/création doit être au moins égale au temps de réponse de la zone humide, plus une année** (Figure 12, cas 2). Par exemple, pour une mare, si on fait l'hypothèse qu'il faut 3 ans pour obtenir la création du fonctionnement hydrologique voulu, un suivi sur 4 ans permet d'obtenir, lors de la 4^{ème} année, une indication relativement fiable de l'atteinte de l'objectif de restauration/création sur le plan hydrologique. En cas de doute, pour des milieux moins connus ou nécessitant plus de temps pour se développer (par ex. les boisements humides), on estime que si la trajectoire de restauration/création est bonne, la restauration/création d'un fonctionnement hydrologique devrait être effective au plus tard au bout de 10 ans (Tiner 2017).

À titre indicatif, un suivi piézométrique d'une durée minimale de 3 ans pour les mares (hors mares temporaires) ; de 4 ans pour les bas-marais, prairies et landes humides ; de 5 à 7 ans pour les mares temporaires ; et d'au moins 7 ans pour les tourbières et boisement humides peut être pertinent (McCarter & Price 2013, Calhoun *et al.* 2014, Sueltenfuss & Cooper 2019).

Ces durées minimales de suivis ne se substituent en aucun cas aux durées de suivis préconisées dans le cadre de la séquence ERC déterminées par l'autorité compétente (préfets coordonnateurs de bassin ou collectivité territoriale de Corse) : « [...] *le suivi* [des opérations de compensation] *sur l'environnement* font l'objet d'un ou de plusieurs bilans réalisés sur une période donnée et **selon un calendrier que l'autorité compétente détermine** afin de vérifier le degré d'efficacité et la pérennité de ces prescriptions, mesures et caractéristiques. [...] *L'autorité compétente peut décider la poursuite du dispositif de suivi au vu du ou des bilans du suivi des incidences du projet sur l'environnement.* » (R.122-13 II du code de l'environnement).

Cas 1 : suivi uniquement applicable aux opérations de restauration/création passées

Exemple : opérations de restauration hydrologique d'un bas-marais d'altitude en 2017



Cas 2 : suivi complet applicable aux opérations de restauration/création actuelles et à venir

Exemple : opération en cours de restauration hydrologique d'un bas-marais d'altitude

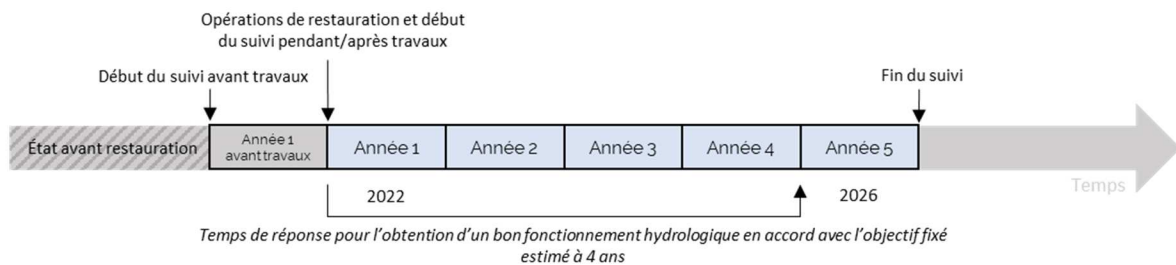


Figure 12. Exemple de deux cas de suivis piézométriques possibles, en fonction de l'ancienneté de la restauration, pour un bas-marais d'altitude ayant un temps de réponse estimé à 4 ans pour obtenir un fonctionnement hydrologique en accord avec l'objectif fixé. Les suivis sont effectués de manière synchrone entre site en voie de restauration et SCORs. Cas 1 : l'opération de restauration ayant plus de 4 ans (temps de réponse estimé) d'ancienneté, un suivi peut être effectué uniquement sur une année (par ex. en 2022) sur le bas marais en voie de restauration et les SCORs. Cas 2 : l'opération de restauration ayant actuellement lieu, un suivi doit être effectué sur au moins 4 ans (temps de réponse estimé) sur le bas marais en voie de restauration et les SCORs (par ex. un suivi avant opération de restauration puis jusqu'à N+5 après opération de restauration peut être pertinent).

II.3 Matériel nécessaire

Afin de rendre compte de la dynamique hydrologique du site en voie de restauration/création et des SCORs, le suivi des variations de nappe dans le sol à proximité de la surface s'effectue à l'aide de piézomètres et de sondes autonomes ou manuelles (Figure 13 et Tableau 6).

Une sonde autonome peut être :

- **avec compensation barométrique directe** (Figure 13 a) : elle rend compte directement de la profondeur à laquelle se trouve la nappe lors de l'enregistrement automatique des données. Elle enregistre à un pas de temps défini la pression barométrique ainsi que la pression absolue (pression barométrique + pression de la colonne d'eau) pour en traduire une profondeur de nappe automatiquement ;
- **sans compensation barométrique directe** (Figure 13 b) : pour réduire le coût du matériel et garder l'aspect automatique des relevés, **ces sondes peuvent être privilégiées**. La sonde autonome sans compensation barométrique directe correspond à une sonde immergée enregistrant uniquement la pression absolue. Pour relever la profondeur de nappe, elle doit être associée soit à :
 - une sonde de compensation barométrique associée mesure et enregistre à un pas de temps défini la pression barométrique (toujours hors de l'eau). Une telle sonde est nécessaire pour le site en voie de restauration/création et une sonde par SCOR¹ peut être nécessaire. Les données récoltées par cette sonde permettent d'appliquer une correction aux données enregistrées par la sonde autonome. Cette correction est effectuée automatiquement via le logiciel fourni par le fabricant et est obligatoire pour permettre d'obtenir une profondeur de nappe (Encadré 4) ;
 - En remplacement de la sonde de compensation barométrique, les données de pression barométrique d'une station météorologique à proximité et à une altitude très similaire au site suivi peuvent être utilisées². Un exemple d'utilisation de données de pression barométrique à partir d'une station météorologique est présenté en Annexe 2.

Pour utiliser les sondes autonomes, un logiciel fourni par le fabricant doit être utilisé. Ce logiciel permet généralement d'effectuer :

- la compensation barométrique automatique des données (en fonction du type de sonde autonome choisie) ;
- le changement des paramètres et des unités de mesures ;
- le lancement d'un enregistrement de mesures automatiques des variations de profondeur de nappe à un pas de temps défini ;
- le transfert des données piézométriques enregistrées par les sondes vers un ordinateur, une tablette, un téléphone portable, etc. ;
- le téléchargement des données piézométriques dans un format exploitable dans un tableur ;
- ...

¹ Une seule sonde barométrique peut être utilisée pour plusieurs sites équipés de sondes autonomes lorsque ces sites sont suffisamment proches et de même altitude (sites en plaine à moins de 30 km par ex.). Pour des sites localisés à des altitudes différentes (plus de 300 m d'altitude d'écart), une sonde barométrique par site doit être installée.

² Données Météo-France des stations météorologiques :

https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=contenu&id_contenu=37

À titre indicatif, l'encadré 4 présente le calcul théorique de la profondeur de nappe.

Une sonde manuelle (Figure 13 c) correspond à un mètre ruban gradué avec une électrode à son extrémité qui, au contact de l'eau, émet un son et/ou une lumière en surface. La lecture de la profondeur de nappe se fait alors visuellement via les graduations. Cette pratique demande un investissement sur la durée et un coût humain qui ne sont pas négligeables.

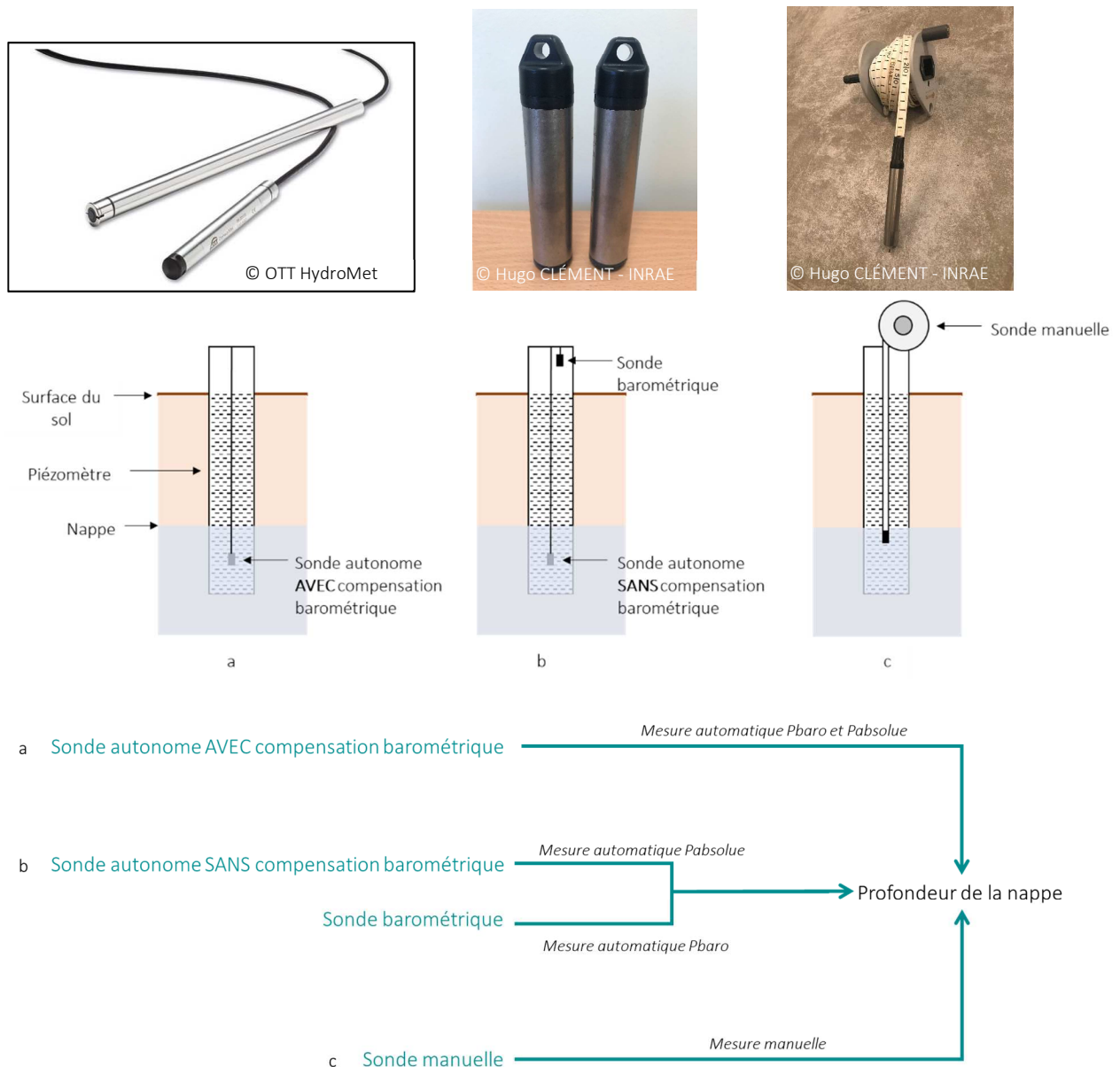


Figure 13. Types de sondes utilisables pour mesurer la profondeur de nappe au sein des sites. P_{baro} : pression barométrique. $P_{absolue}$: pression barométrique + pression de la colonne d'eau. La mise en commun des données P_{baro} et $P_{absolue}$ permet d'obtenir une profondeur de nappe.

Tableau 6. Comparaison des avantages et inconvénients entre les trois types de sondes de mesure de profondeur de nappe.

	Sonde autonome AVEC compensation barométrique	Sonde autonome SANS compensation barométrique + sonde de compensation barométrique	Sonde manuelle
Avantages	Relevé automatique Permet de ne pas passer à côté d'événements hydrologiques remarquables (par ex. crue)		Coût d'acquisition faible Facile à mettre en place
	Donne la profondeur de nappe directement Pertinent surtout pour équiper un site avec une seule sonde (ex. protocole piézométrique MhéO)	Pertinent surtout si plusieurs sondes sont à installer sur un site (ex. utilisation de l'indicateur HYDRINDIC)	
Inconvénients	Coût très élevé	Nécessite une ou plusieurs sondes de compensation barométrique ou l'utilisation des données de pression barométrique d'une station météorologique à proximité	Coût humain très élevé Nécessite des visites de site fréquentes Risque d'absence de données (manque d'implication, de constance et de disponibilité)

Encadré 4. Principe de mesure de la profondeur de nappe à partir de données de pression d'une sonde autonome sans compensation barométrique associée à une sonde barométrique (Smith 2012, In-Situ 2013).

La figure suivante présente les mesures effectuées par la sonde autonome et la sonde barométrique. La pression de la colonne d'eau est obtenue en soustrayant les mesures de pression barométrique (appelée aussi pression atmosphérique) de la sonde barométrique aux mesures de pression absolue de la sonde autonome (Figure 1). Pour rappel, « le niveau piézométrique caractérise la pression de la nappe en un point donné ; autrement dit, c'est le niveau libre de l'eau dans un puits d'observation rapporté à un niveau de référence [...] » (cf. Encadré 1) (Porteret 2014). Pour traduire la pression de la colonne d'eau en profondeur de nappe, il est nécessaire de prendre en compte la pression barométrique (pression exercée par l'atmosphère), la gravité spécifique (déterminée en fonction du type de liquide rencontré : par ex. eau douce, eau saumâtre ou eau de mer), etc. La pression de la colonne d'eau peut ainsi être traduite en profondeur de nappe à l'aide de la formule présentée ci-après (**formule appliquée automatiquement par les logiciels fournis par les fabricants**).

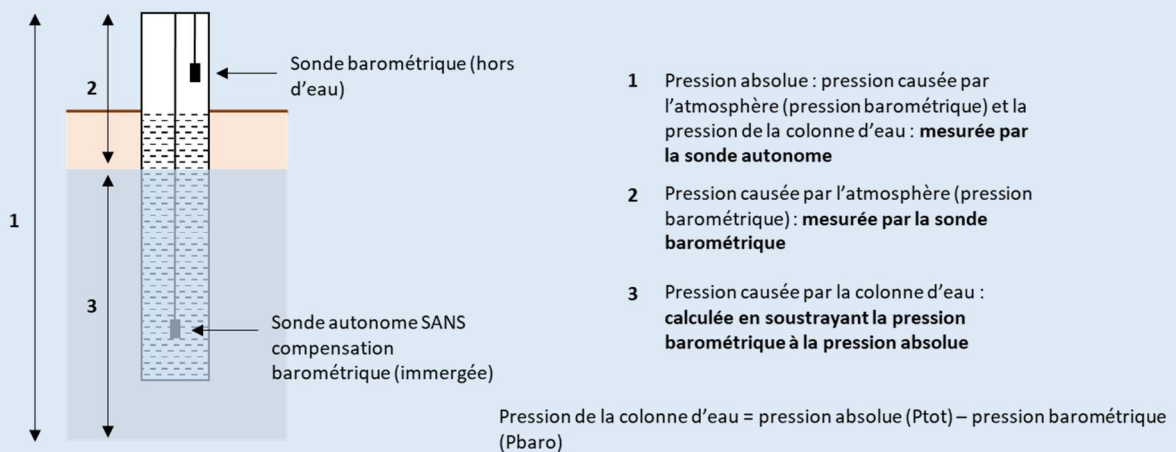


Figure 1. Présentation des mesures nécessaires au calcul d'une profondeur de nappe dans le cadre de l'utilisation d'une sonde autonome sans compensation barométrique associée à une sonde barométrique.

Afin de traduire une pression de colonne d'eau (en mbar) en profondeur de nappe par rapport à la surface du sol (en cm), l'équation suivante peut être appliquée :

$$H_{\text{nappe}} = \left(\frac{H_{\text{ref}}}{100} - 0,0101972 \times \frac{(P_{\text{tot}} - P_{\text{baro}}) - (P_{\text{tot}_{\text{ref}}} - P_{\text{baro}_{\text{ref}}})}{G_s} \right) \times 100$$

Avec :

H_{nappe} : la profondeur de nappe par rapport à la surface du sol, en cm ;

H_{ref} : la profondeur de nappe par rapport à la surface du sol, en cm, obtenue par une mesure manuelle de la profondeur de nappe lors de la pose du piézomètre et qui constitue la profondeur de référence (constante) ;

P_{tot} : la pression absolue mesurée par la sonde autonome, en mbar au temps t ;

P_{baro} : la pression barométrique mesurée par la sonde barométrique, en mbar au temps t ;

P_{tot,ref} : la pression absolue mesurée lors de la pose du piézomètre et de la mesure de H_{ref} (constante) ;
P_{baro,ref} : la pression barométrique mesurée lors de la pose du piézomètre et de la mesure de H_{ref} (constante) ;

G_s : la gravité spécifique en moyenne égale à 0,999 (constante) pour l'eau douce (entre 0,997 et 1 en fonction de la température et conductivité). Pour une eau saumâtre et de l'eau de mer, prendre respectivement 1,012 et 1,024 comme valeur ;

0,0101972 : constante permettant de convertir une pression barométrique, exprimée en mbar, en unité de colonne d'eau équivalente (1 mbar = 0,0101972 m). Pour des pressions exprimées en psi, prendre la constante 0,703070 (1 psi = 0,703070 m) et pour des pressions exprimées en kPa, prendre la constante 0,101972 (1 kPa = 0,101972 m).

Remarque : certaines sondes autonomes enregistrent des valeurs positives lorsque la nappe se trouve en dessous de la surface du sol et des valeurs négatives lorsque le niveau se trouve au-dessus de la référence (ex. 15 cm d'eau au-dessus du sol sera enregistré -15 cm par la sonde autonome).

L'ensemble des calculs présentés sont effectués automatiquement par le logiciel fourni par le fabricant. La formule de calcul d'une profondeur de nappe à partir de données de pression est présentée à titre indicatif. Il n'est pas nécessaire de savoir la manipuler mais celle-ci peut s'avérer utile dans le cas de l'utilisation de données de pression barométrique d'une station météorologique (Annexe 2).

Le Tableau 7 présente le type de matériel pouvant être utilisé pour effectuer un suivi piézométrique via l'installation de sondes autonomes sans compensation barométrique directe. C'est ce type de matériel qui a été privilégié dans le cadre du projet Hydrindic en raison d'un compromis coût-bénéfice. Les caractéristiques des sondes, le type de communication pour le transfert des données, le type de bouchon de suspension, etc. sont variables en fonction du fabricant choisi mais restent relativement similaires.

Tableau 7. Exemple du matériel nécessaire pour effectuer un suivi piézométrique autonome.

Dénomination	Caractéristiques	Illustration
<p>Tarière (à rallonges si besoin pour la mise en place de piézomètres à plus d'un mètre)</p>	<p>Permet d'effectuer le trou qui servira d'emplacement pour le piézomètre</p> <ul style="list-style-type: none"> - Longueur : 2,5 m - Diamètre : 70 mm 	 <p>© Hugo CLÉMENT - INRAE</p>
<p>Piézomètre crépiné PEHD d'un diamètre inférieur à la largeur de la tarière (fabrication artisanale¹ ou tube crépiné prêt à l'emploi, dit « préfabriqué »)</p>	<p>Permet la mise en place du dispositif d'enregistrement automatique des variations de profondeur de nappe</p> <ul style="list-style-type: none"> - Longueur : 1 m, emboitable - Diamètre : 51 x 63 mm <p>Le piézomètre doit être d'une largeur suffisante pour pouvoir accueillir une sonde</p>	 <p>© Hugo CLÉMENT - INRAE</p>

¹ Exemples de références disponibles pour la fabrication artisanale de piézomètres : partie « Fabrication des piézomètres » de l'Annexe 2 de l'indicateur dynamique hydrologique de la nappe de la Boite à outils de suivi des zones humides (Porteret 2014) : http://rhomeo-bao.fr/sites/all/themes/corporateclean/pdf/I03_ZH_Boite-outils.pdf et la partie « Réalisation du piézomètre » de la fiche technique « Réalisation et mise en place de piézomètres artisanaux » proposée par le Forum des Marais Atlantiques (FMA 2014) : http://www.zoneshumides29.fr/telechargement/Piezo_artisanal.pdf

<p>Bouchon de fond</p>	<p>Permet l'enfoncement du piézomètre dans le sol et d'éviter l'entrée de sédiments fins dans le tube</p> <p>- Diamètre : 63 mm</p>	 <p>© Hugo CLÉMENT - INRAE</p>
<p>Gaze filtrante pour piézomètres crépinés</p>	<p>Permet d'éviter le colmatage du tube</p> <p>- Longueur : 10 m - Diamètre : 30-65 mm</p>	 <p>© Hugo CLÉMENT - INRAE</p>
<p>Liens pour fixation de gaze filtrante</p>	<p>Permet le maintien de la gaze filtrante le long du piézomètre</p>	 <p>© Hugo CLÉMENT - INRAE</p>

<p>Cordelette synthétique âme Kevlar</p>	<p>Permet la suspension de la/des sonde(s) dans le piézomètre</p> <p>La présence d'une âme Kevlar permet d'éviter que la corde ne se détende avec le temps et donc d'éviter de fausser les mesures</p> <ul style="list-style-type: none"> - Longueur : 100 m - Diamètre : 2 mm 	 <p>© Hugo CLÉMENT - INRAE</p>
<p>Bouchon de suspension</p>	<p>Permet de suspendre la/les sonde(s) dans le piézomètre et de le fermer hermétiquement</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pour piézomètre de 63 mm 	 <p>© Hugo CLÉMENT - INRAE</p>
<p>Sonde de pression autonome à batterie (immergée)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Durée de vie : 5 à 10 ans (en fonction de la fréquence d'enregistrement) - Extraction des données : câble USB - Unités de mesures de pression : psi, kPa, bar, mbar et mmHg - Unités de mesures du niveau d'eau : in, ft, mm, cm et m - Précision niveau d'eau : $\pm 0,05$ % valeur pleine échelle - Résolution niveau d'eau : $\pm 0,01$ % valeur pleine échelle - Précision température : $\pm 0,3^\circ$ C - Résolution température : $0,01^\circ$ C ou plus - Unité de mesure de la température : Celsius ou Fahrenheit 	 <p>© Hugo CLÉMENT - INRAE</p>
<p>Sonde barométrique à batterie (toujours hors d'eau)</p>	<p>Les deux types de sondes possèdent un aspect similaire</p>	
<p>Cadenas</p>	<p>Permet la sécurisation du dispositif</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dimensions anse (l x H x \varnothing) : 20,5 x 26,5 x 6,35 mm 	 <p>© Hugo CLÉMENT - INRAE</p>

<p>Sonde manuelle à pile</p>	<p>Permet la vérification des mesures automatiques de profondeur de nappe enregistrées par la sonde autonome</p> <ul style="list-style-type: none">- Signal : sonore et lumineux- Précision : 1 cm	 <p>© Hugo CLÉMENT - INRAE</p>
<p>Socle de communication USB</p>	<p>Permet le transfert de données des sondes vers un ordinateur ou une tablette par ex.</p>	 <p>© Hugo CLÉMENT - INRAE</p>

II.4 Coûts

Les coûts d'achat du matériel et d'installation pour un site en voie de restauration/création et deux SCORs associés sont estimés ci-après :

- sondes autonomes sans compensation de pression barométrique directe et sondes barométriques : **5 182 € de matériel (10 sondes et matériel associé) et une journée de terrain à deux personnes pour l'installation** (Tableau 8). C'est ce type de matériel qui a été testé durant le projet Hydrindic en 2021 pour concevoir l'indicateur ;
- sondes autonomes avec compensation barométrique directe : **11 839 € de matériel et une journée de terrain à deux personnes pour l'installation** (Tableau 9) ;

Pour ce type de matériel, au moins deux à trois journées par an de terrain sont à prévoir (une demi-journée de terrain nécessaire pour relever 6 sondes, pour s'assurer que le matériel fonctionne bien, collecter des données intermédiaires pour prévenir la perte complète des données en cas de détérioration du matériel) et effectuer la maintenance du matériel. Aucun problème matériel (enregistrement et récupération des données, etc.) n'a été rencontré durant le projet Hydrindic.

- relevés avec sonde manuelle : **700 € de matériel et une demi-journée de terrain à deux personnes pour l'installation** (Tableau 10). **Il convient de prévoir un budget main d'œuvre conséquent pour des relevés effectués manuellement.** Par expérience, il s'avère que les suivis manuels sont souvent abandonnés par les observateurs par manque d'assiduité au cours du temps avant même d'avoir obtenu des résultats exploitables. De plus, la distance entre les sites rend souvent difficile la mise en place de relevés manuels durant un court délai. En effet, quelques heures suffisent pour que la profondeur de nappe varie significativement au sein d'un même piézomètre. Des relevés manuels trop espacés dans le temps entre piézomètres engendrent des biais pouvant affecter l'interprétation de l'indicateur. **Il est ainsi fortement déconseillé d'effectuer un suivi piézométrique uniquement avec ce type de matériel.**

Ce coût ne tient pas compte du temps « agent » passé pour réaliser des relevés et des frais de déplacement. **De plus, il varie selon le nombre de SCORs étudiés, la distance entre eux (besoin ou non de plusieurs sondes barométriques) et la complexité écologique des sites (besoin de piézomètres plus nombreux pour bien représenter le fonctionnement hydrologique du site par ex.).** À noter que le matériel est réutilisable. Par exemple, 3 sondes peuvent être installées sur un site durant 4 ans puis être reconfigurées par la suite (après récupération des données) pour être installées sur un nouveau site.

Certains fabricants proposent une installation par leurs soins, clé en main, de l'installation des piézomètres à la mise en place des sondes, pour un tarif estimé à 4 000 € (hors forfait de déplacement) pour 3 sites à équiper, 9 sondes à installer et une journée de terrain à deux personnes. Le matériel est aussi proposé à la location par certains fabricants.

Deux types d'alimentation des sondes sont proposés par les fabricants : par piles ou par batterie.

- L'alimentation par pile à l'avantage de prolonger la durée de vie d'une sonde et le défaut de potentiellement en réduire l'étanchéité ;
- À l'inverse, l'alimentation par batterie à l'avantage de certifier l'étanchéité de la sonde (scellée) et le défaut de posséder une durée de vie d'environ 5 à 10 ans en fonction du pas de temps d'enregistrement choisi (10 ans correspondant généralement à la durée de vie du capteur de pression). La batterie peut toutefois être changée par le fabricant.

Tableau 8. Exemple des coûts à prévoir pour l'achat du matériel nécessaire à la mesure de profondeur de nappe avec sondes autonomes SANS compensation barométrique directe (tarifs approximatifs et variables en fonction du fabricant) pour un site en voie de restauration/création et deux SCORs associés. Ce type de matériel a été utilisé pour effectuer les tests durant le projet Hydrindic.

Désignation	Prix à titre indicatif (en euros)	Quantité	Total (HT, en euros)
Sonde autonome de pression à batterie (pression absolue et température)	400	9	3 600
Sonde de compensation barométrique à batterie (pression barométrique et température)	400	1	400
Sonde manuelle à pile	200	1	200
Piézomètre crépiné	25	9	225
Socle de communication PC	270	1	270
Gaze filtrante	5	9	45
Cordelette Kevlar de 100 m	46	1	46
Bouchon de fond du piézomètre	7	9	63
Bouchon de suspension	20	9	180
Cadenas	17	9	153
			TOTAL HT : 5 182 €

Tableau 9. Exemple des coûts à prévoir pour l'achat du matériel nécessaire à la mesure de profondeur de nappe par sondes autonomes AVEC compensation barométrique directe (tarifs approximatifs et variables en fonction du fabricant) pour un site en voie de restauration/création et deux SCORs associés. Une description du matériel, du processus d'installation et de paramétrage de ce type de sondes est proposée dans le cadre du protocole de suivi de l'indicateur de dynamique hydrologique de la nappe de la boîte à outils RhoMÉO (Porteret 2014).

Désignation	Prix à titre indicatif (en euros)	Quantité	Total (HT, en euros)
Sonde autonome de pression à piles avec compensation barométrique directe et température	1180	9	10 620
Sonde manuelle à pile	200	1	200
Piézomètre crépiné	25	9	225
Câble de communication avec tête infrarouge	280	1	280
Gaze filtrante	5	9	45
Cordelette Kevlar de 100 m	46	1	46
Bouchon de fond de piézomètre	7	9	63
Bouchon de suspension	40	9	360
			TOTAL HT : 11 839 €

Tableau 10. Exemple des coûts à prévoir pour l'achat du matériel nécessaire à la mesure de profondeur de nappe avec une sonde manuelle (tarifs approximatifs et variables en fonction du fabricant) pour un site en voie de restauration/création et deux SCORs associés.

Désignation	Prix à titre indicatif (en euros)	Quantité	Total (HT, en euros)
Sonde manuelle à pile	200	1	200
Piézomètre crépiné	25	9	225
Gaze filtrante	5	9	45
Bouchon de fond de piézomètre	7	9	63
Bouchon de suspension	20	9	180
			TOTAL HT : 713 €

II.5 Méthode de mise en place

Cette partie présente les étapes pour mettre en place un piézomètre préfabriqué (prêt à l'emploi et en vente chez certains fabricants) de 2 m, une sonde autonome sans compensation barométrique et une sonde barométrique. Pour rappel, c'est ce type de matériel qui a été utilisé pour effectuer les tests durant le projet Hydrindic.

Étape 1. Choix du matériel et emplacement

La mise en place de piézomètres dans le sol peut se faire de plusieurs manières. Nous recommandons ici l'utilisation d'une tarière manuelle, utilisée lors d'analyses pédologiques. Celle-ci doit être d'une longueur adéquate pour atteindre la nappe et d'une largeur suffisante pour permettre d'enfoncer les tubes dans le sol. Une **tarière de deux mètres à rallonges (tarière d'un mètre avec plusieurs rallonges de 50 cm par exemple) et de 7 cm de diamètre** s'avère efficace pour l'installation de piézomètres pour le suivi de la nappe. Différents types de tarières sont utilisés en fonction des sols rencontrés (tarière pour sol mélangé, sol caillouteux, type « *riverside* », sol argileux, etc.) (Figure 14 a). Toutefois, l'utilisation d'une tarière Edelman pour sol mélangé semble convenir dans la plupart des cas (excepté en sols très argileux).

- Creusez un trou d'une profondeur adéquate permettant de mesurer l'ensemble des variations de profondeur de nappe dans la zone humide au cours de l'année. Le trou doit être assez profond pour permettre à la sonde autonome d'être immergée toute l'année et notamment en période de basses eaux (à l'exception de certaines zones humides temporaires tel que les mares temporaires méditerranéennes pour lesquelles la sonde autonome ne sera immergée qu'une partie de l'année) (Collectif LigéO 2021). (Figure 14 b).

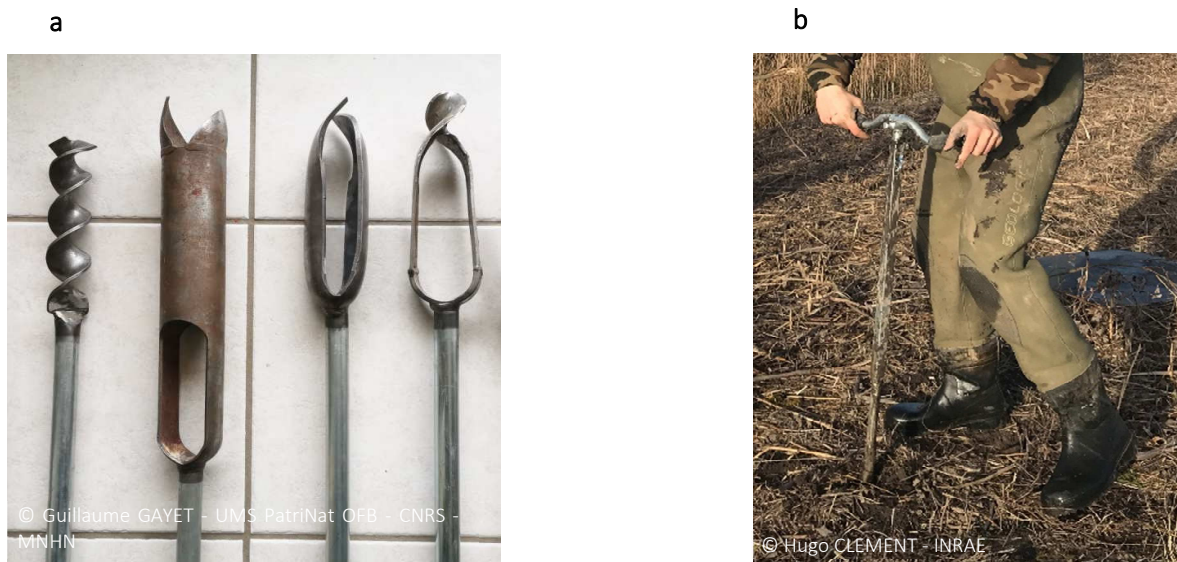


Figure 14. Types de têtes de tarière pouvant être utilisés (a), de gauche à droite : pour sols durs (calcaires par ex.), de rive, sols caillouteux et sols mélangés. Utilisation d'une tarière manuelle sur le terrain pour creuser un trou afin d'atteindre la nappe (b).

Étape 2. Préparation du tube

- Dans le cas de tubes préfabriqués emboîtables (plusieurs section d'1 m par ex.), emboîtez deux sections pour former un tube de 2 m ;
- Placez un bouchon de fond à une des extrémités (Figure 15 a). Ce bouchon permet de faciliter l'enfoncement du tube dans le sol (par ex. dans des sols sableux ou organiques) et d'éviter l'entrée de sédiments fins ;
- Placez un géotextile (gaze filtrante) le long de la partie du tube qui sera dans le sol. Le géotextile est indispensable et permet d'éviter l'accumulation progressive de matière au fond du tube qui pourrait progressivement le colmater (notamment en sols argileux) (Figure 15 b) (Collectif LigerO 2021). Le colmatage peut en effet fausser les mesures de profondeur de nappe ;
- Fixez le géotextile à l'aide de quatre liens de serrage et couper leurs extrémités (Figure 15 c) ;
- Coupez le géotextile et effectuez un nœud au niveau du bouchon de fond (ou un lien de serrage peut être utilisé) (Figure 15 d).

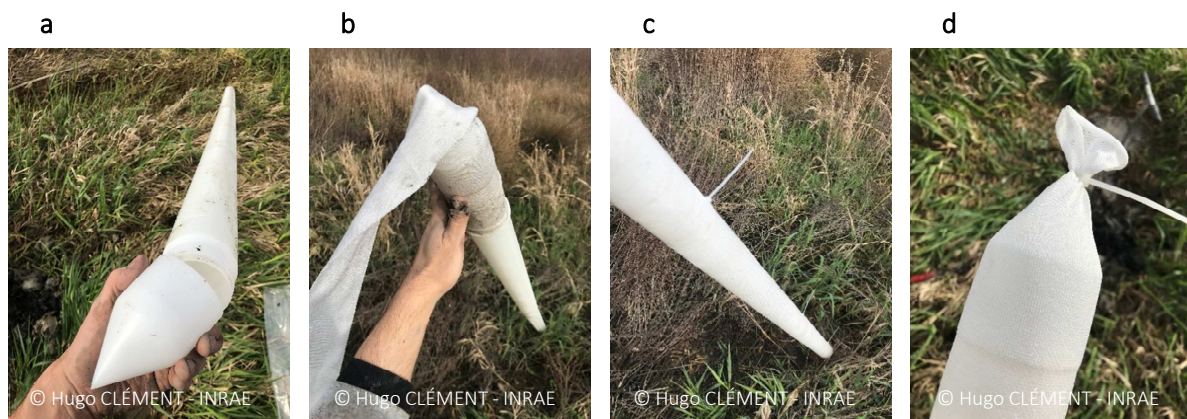


Figure 15. Mise en place d'un bouchon de fond (a), d'un géotextile (b), des liens de serrage (c) et d'un nœud à la base du tube (d) sur un tube crépiné pour constituer un piézomètre.

Étape 3. Mise en place du tube

- Placez le tube de façon à ce qu'au moins 20 cm ou plus de celui-ci dépasse du sol en surface (partie non crépiné hors sol). **S'il est prévu de placer une sonde barométrique dans le tube, il est alors nécessaire de laisser dépasser le tube de telle façon à ce que la sonde soit toujours hors d'eau¹ (même durant d'éventuelles inondations) ;**
- Bouchez l'espace interannulaire (espace vide autour du tube) avec les matériaux extraits (ou avec de la bentonite) lors du creusement du trou afin d'éviter la trop forte infiltration d'eau dans le tube en cas de pluie qui fausserait les mesures (Figure 16).

¹ Les Plans de Prévention du Risque Inondation (PPRI) et le site <https://www.vigicrues.gouv.fr/> peuvent par exemple être mobilisés afin de connaître les secteurs sur un territoire qui présentent un risque d'inondation, les hauteurs d'eau maximales atteintes lors des crues, etc.

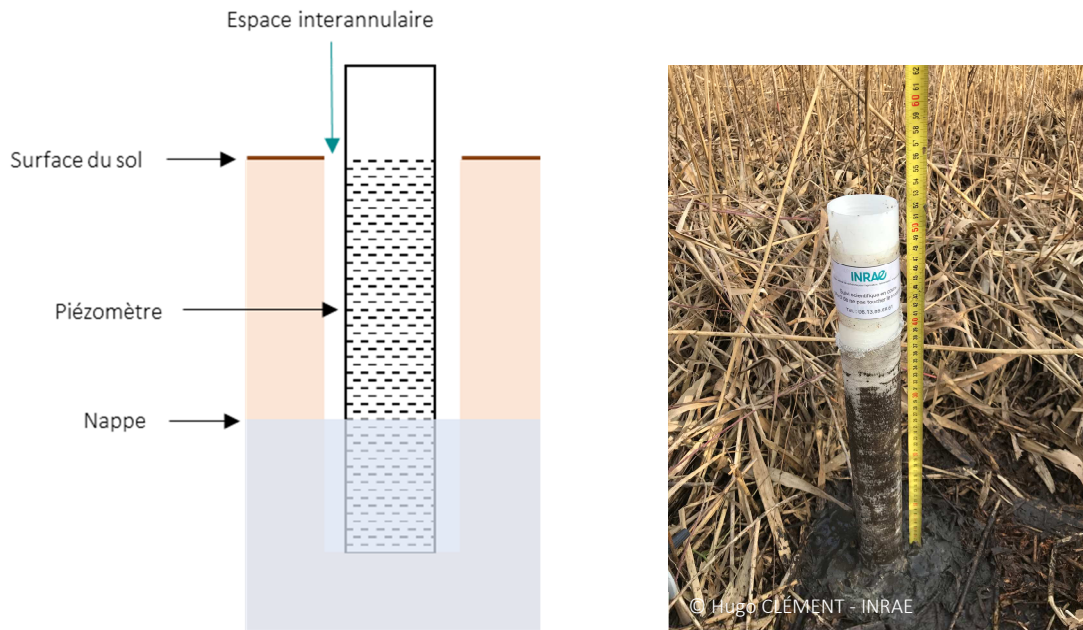


Figure 16. Un piézomètre en place avec l'espace interannulaire bouché.

Étape 4. Configuration de la sonde autonome et de la sonde barométrique

Quelques minutes à plusieurs jours sont nécessaires selon la porosité du sol pour que la hauteur d'eau se stabilise dans le piézomètre.

Paramétrez les sondes selon les indications du fabricant (modification des unités de mesure, du pas de temps d'enregistrement, etc.), sur le terrain avant leur mise en place dans le tube et une fois le niveau d'eau stable dans celui-ci (Figure 17 a). Ci-après est présentée la configuration réalisée durant le projet Hydrindic avec des sondes autonomes sans compensation barométrique associées à des sondes barométriques.

- Configurez la sonde autonome de façon à enregistrer la profondeur de nappe avec **comme référentiel, ou point 0, la surface du sol** (souvent indiqué « *Depth to Water* – DTW » dans les logiciels de configuration) ;
- Indiquez un même pas de temps (par ex. **journalier**) et une même unité de mesure (**profondeur de nappe en cm et pression en mbar**) pour la sonde autonome et la sonde barométrique lors du paramétrage de manière à ce qu'elles enregistrent **le même type de données et en même temps** (une donnée enregistrée chaque jour à 12 h par ex.). **Un pas de temps d'une donnée par jour est à privilégier** pour permettre de mesurer l'ensemble des événements hydrologiques pouvant survenir au cours d'une année (Peters *et al.* 2012). Pour plus de précision sur les événements hydrologiques journaliers et pour envisager d'autres analyses hydrologiques que celles mentionnées ci-après, un pas de temps horaire peut être envisagé. Dans tous les cas, un **pas de temps minimal d'une donnée par semaine est obligatoire pour l'utilisation de l'indicateur** ;
- Prenez une mesure manuelle de la profondeur de nappe par rapport au sol lors de la configuration (Figure 17 b).

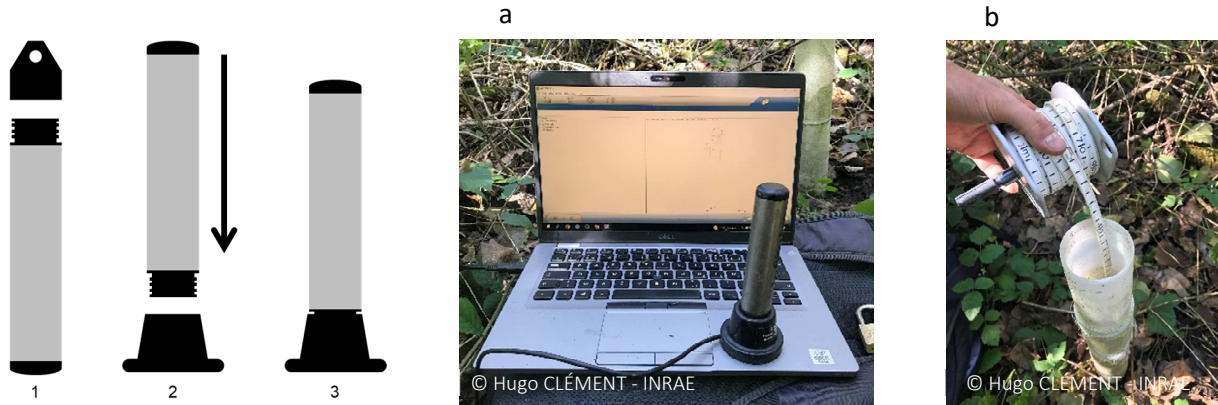


Figure 17. Exemple de connexion d'une sonde au support de transfert de données (étape 1 : enlevez le bouchon, 2 : retournez la sonde et la placer sur le support et 3 : vérifiez que la sonde ne bouge pas) (modifié d'après In-Situ 2013), configuration d'une sonde autonome sur le terrain avec le logiciel du fabricant (a) et mesure de la profondeur de nappe avec une sonde manuelle (b).

Étape 5. Mise en place des sondes

La sonde autonome est suspendue dans le piézomètre avec une cordelette âme Kevlar attachée au bouchon de suspension qui ferme le piézomètre crépiné.

- Préparez une longueur de cordelette âme Kevlar de manière à positionner la sonde dans le tube **sans que celle-ci ne touche le fond** (par ex. au moins 15 cm de marge peuvent être laissés entre le fond du tube crépiné et la sonde pour éviter que celle-ci ne soit prise dans des particules fines qui colmateraient le fond du tube (Figure 18 a) ;
- Attachez la sonde à l'extrémité de la cordelette et le bouchon de suspension à l'autre extrémité de la cordelette (Figure 18 b).

Si vous décidez de mettre une sonde barométrique dans le tube, **placez-la de façon à ce qu'elle soit le plus haut possible dans le tube (elle ne doit jamais être immergée)**, contre le bouchon de suspension (Figure 18 c). Sinon, vous pouvez la placer n'importe où ailleurs sur le site dans un emplacement qui ne sera pas immergé (dans un abri, dans un arbre sur ou à proximité du site par ex.) (Figure 18 d). **Une seule sonde barométrique peut être utilisée pour plusieurs sites équipés de sondes autonomes lorsque ces sites sont suffisamment proches et de même altitude** (sites en plaine à moins de 30 km par ex.). Pour des sites localisés à des altitudes différentes (plus de 300 m d'altitude d'écart), une sonde barométrique par site doit être installée.

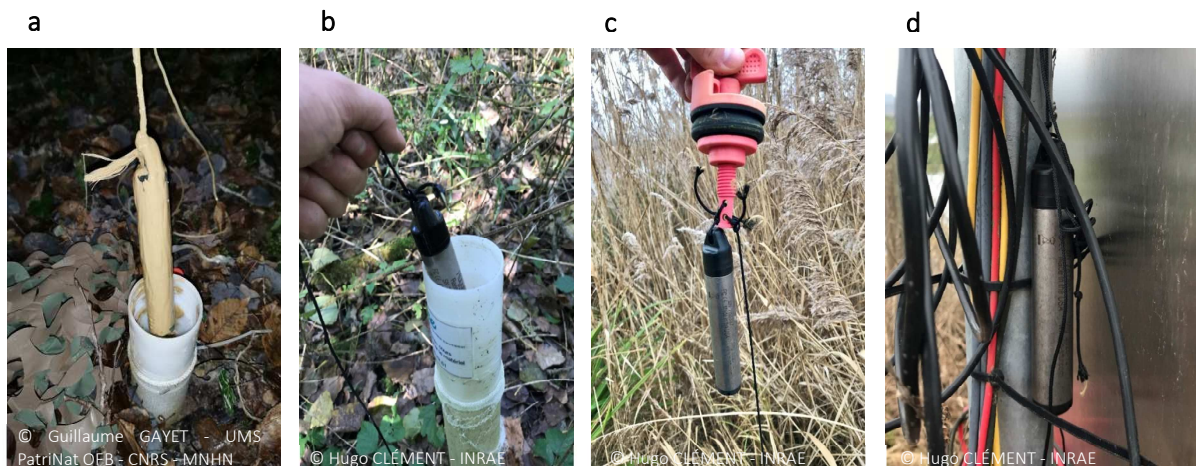


Figure 18. Exemple d'une sonde entourée d'argile suite au non-respect des 15 cm de marge préconisés (a). Mise en place d'une sonde autonome dans un piézomètre (b), d'une sonde barométrique proche du bouchon de suspension du piézomètre (c) et d'une sonde barométrique au niveau d'une station météorologique sur site (d).

Étape 6. Mesures manuelles et informations à noter

Documenter l'installation du piézomètre et des sondes est essentiel pour effectuer le suivi du matériel dans le temps, l'interprétation des résultats, le partage de données, etc.

Pour chaque piézomètre installé, les actions suivantes doivent être réalisées :

- **Géolocalisez** le piézomètre et prendre une photo de son emplacement pour le localiser avec facilité ultérieurement ;

- Mesurez l'**altitude au sol du piézomètre** le plus précisément possible (idéalement au cm près), en vue d'une bancarisation future des données en mNGF¹ (via GPS de précision centimétrique ou via le site Géoportail le cas échéant) (Encadré 5) ;
- Mesurez la **hauteur du tube dépassant du sol** (HPS) (Figure 19) ;
- Notez la **hauteur totale du piézomètre** installé (HTP) (Figure 19) ;
- Mesurez **manuellement la profondeur de nappe** (HSN) (Figure 19), indiquez la date et l'heure de la mesure et le point de référence de la mesure (prendre systématiquement le sol comme point de référence). **Attention** : soustraire la hauteur du tube dépassant du sol (HPS) si vous effectuez la mesure manuelle de la profondeur de nappe à partir du haut du tube dépassant du sol (Figure 20).

Encadré 5. Obtention d'un code BSS et bancarisation des données.

Dans le cadre de la mise en œuvre de la stratégie nationale d'organisation des données sur les milieux humides, il est vivement recommandé aux acteurs des territoires disposant ou souhaitant mettre en place des piézomètres dont la profondeur est inférieure à 10 m de demander au BRGM (bss@brgm.fr) un « numéro unique à l'ouvrage » dit aussi « code BSS » permettant la collecte et la bancarisation de vos données dans la base de données nationale ADES (valorisation des données à l'échelle nationale, amélioration des connaissances sur l'hydrologie des zones humides, standardisation des données, etc.). Plusieurs informations sont nécessaires pour obtenir ce « code BSS »², avec au minimum :

- Nom de l'ouvrage (ex : PZ1, PZ2, etc.) ;
- Code INSEE de la commune ;
- Coordonnées géographiques du piézomètre et système de projection utilisé (WGS 84, Lambert-93, etc.) ;
- Côte au sol en mètre NGF au droit du piézomètre ;
- Nature du point d'eau d'après les termes valides de la nomenclature SANDRE n°149³ (piézomètre, forage, etc.) ;
- Profondeur maximale du sondage ;
- Coupe technique du dispositif.

D'autres informations peuvent être utiles pour l'instruction de votre dossier, tel que :

- Date de fin de travaux de réalisation de l'ouvrage ;
- ...

L'annexe 3 présente un exemple de formulaire complété pouvant être envoyé au BRGM pour l'obtention d'un code BSS en vue d'une bancarisation des données piézométriques.

¹ Portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines : <https://ades.eaufrance.fr/>

² Se référer au scénario d'échanges de données « Acquisition des données eaux souterraines de suivi de milieu humide » du SANDRE.

³ Nomenclature SANDRE n°149 :

www.sandre.eaufrance.fr/urn.php?urn=urn:sandre:donnees:NSA:FRA:code:149::referentiel:3.1:html

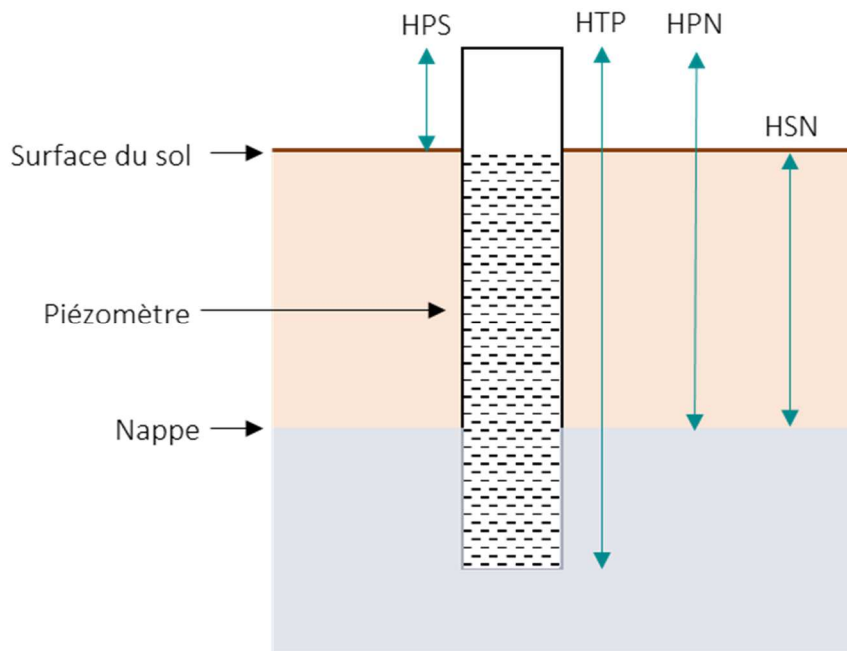


Figure 19. Illustration des distances à mesurer. HPS : hauteur entre le haut du piézomètre et la surface du sol. HTP : hauteur totale du piézomètre. HPN : profondeur de nappe par rapport au haut du piézomètre. HSN : profondeur de nappe par rapport à la surface du sol.

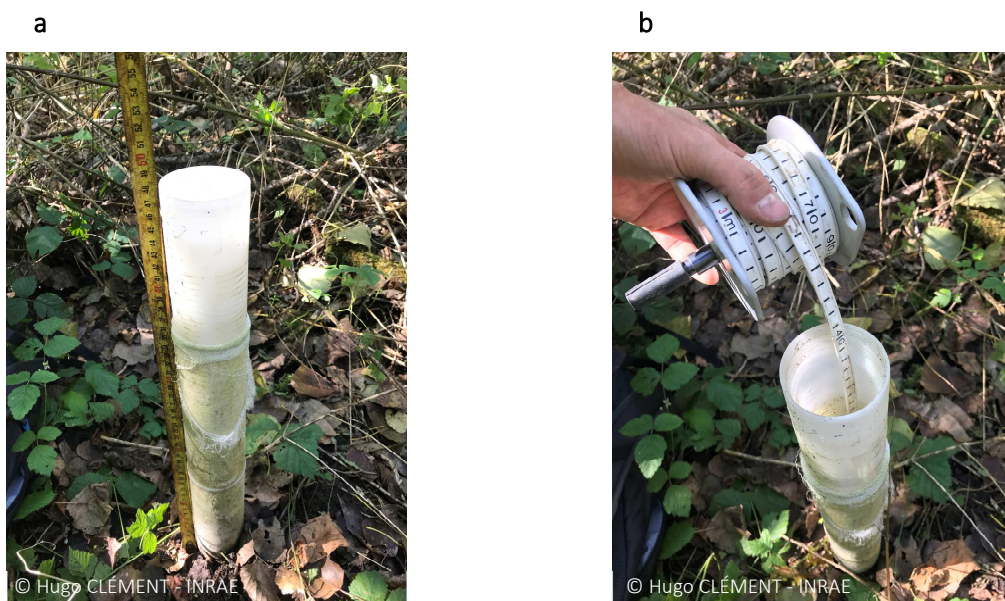


Figure 20. Mesures manuelles de la hauteur du tube dépassant du sol (a) et de la profondeur de nappe (b).

Étape 7. Fin de mise en place et prévention des dégâts sur le matériel

Les piézomètres sur des sites fréquentés, potentiellement soumis au vandalisme (sites périurbains par ex.), pâturés (équins, bovins, etc.), fauchés mécaniquement ou accessibles à la faune sauvage (sangliers, cerfs, etc.) doivent être sécurisés. Les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- Indiquer la présence des piézomètres sur des sites fauchés ou faisant l'objet de circulation de véhicules via des **fanions ou un piquet dont l'extrémité peut être peinte en rouge** peut être utile. Cela permet aussi le repérage du matériel dans la végétation haute (Figure 21 a et d) ;
- Fermer les tubes piézométriques par un **cadenas** est recommandée (Figure 21 b) ;
- Apposer une **étiquette ou pancarte** sur les piézomètres informant de l'étude en cours (Figure 21 b) ;
- Instaurer une **mise en défens** autour des piézomètres permet d'éviter les dommages causés par la faune (Figure 21 c) ;
- ...



Figure 21. Exemple de mise en place d'un ruban de balisage (a), d'un cadenas et d'une étiquette de signalisation (b), d'une mise en défens (c) ainsi qu'un piquet de signalisation (d) sur trois zones humides dans les départements du Rhône, de l'Isère et de la Savoie.

La Figure 22 présente schématiquement une installation complète d'un piézomètre de 2 m comprenant une sonde autonome et une sonde de compensation barométrique. C'est le type d'installation qui a été utilisée pour équiper des sites test dans le cadre du projet Hydrindic.

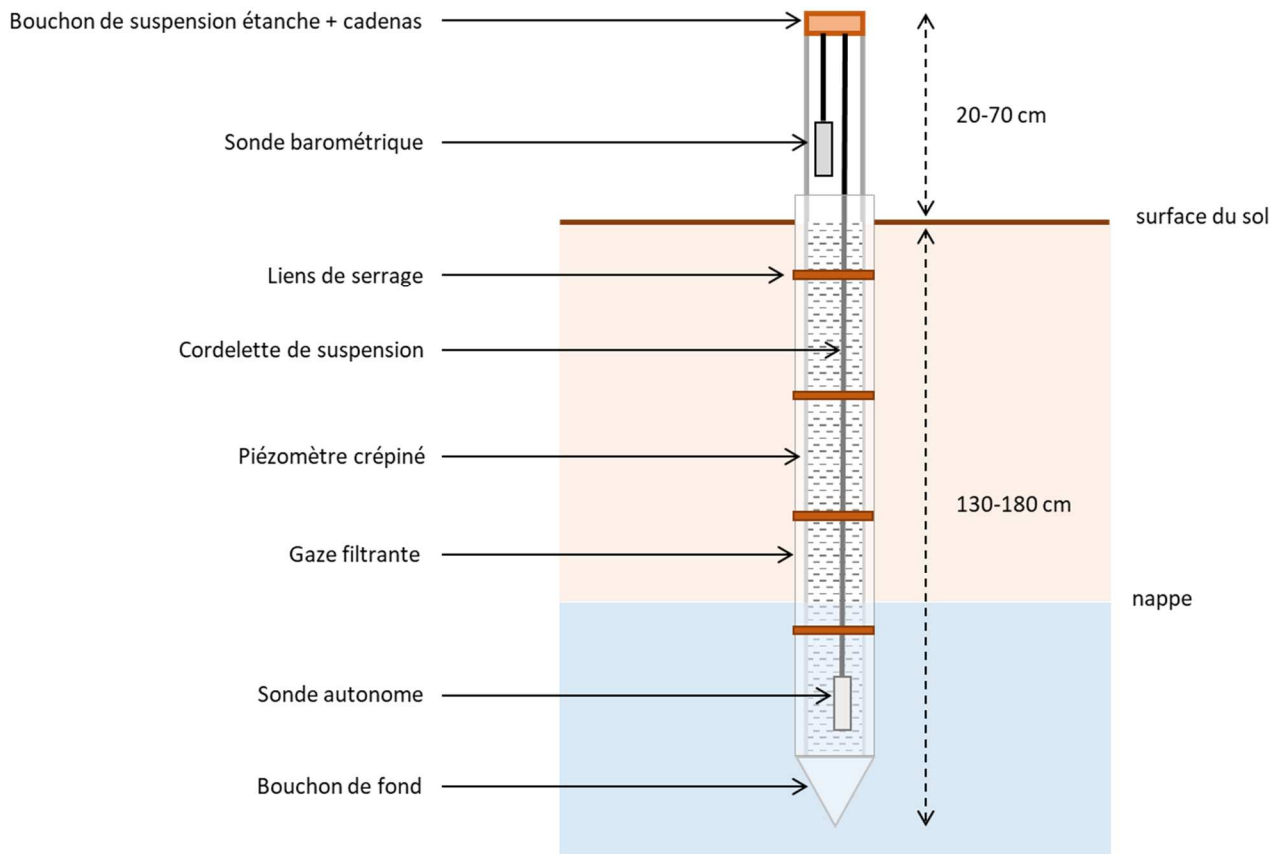


Figure 22. Sonde autonome et sonde barométrique dans un piézomètre de 2 m et matériel associé. Notez que la sonde barométrique peut être installée en dehors du piézomètre (pour éviter qu'elle soit immergée en cas d'inondation du site par ex.), voir les recommandations précédemment indiquées.

Maintenance

Un entretien du matériel à court terme (**vérification de l'installation et de la justesse des mesures quelques semaines après installation**) puis sur le long terme est nécessaire (maintenance du matériel, de la batterie/des piles, etc. après plusieurs mois et années). Une vérification du matériel après des événements hydrologiques importants (crue, etc.) ou période de pâturage (dégâts potentiels sur le matériel, etc.) est souhaitable. **La distance entre le haut du tube et la surface du sol doit être mesurée avant et après les périodes de gel-dégel et de sécheresses (risque de faire bouger le tube).** Avec le temps, le dépôt de sédiments et le développement bactérien dans le fond des piézomètres et dans les crépines ainsi que les mouvements du terrain peuvent affecter le dispositif et donc les mesures de profondeur de nappe. Pour tester l'installation des piézomètres, un pompage de l'eau (pompe manuelle par ex.) contenue dans les tubes ou un ajout d'eau peut être effectué. Un retour du niveau d'eau initiale doit être observé dans les heures qui suivent (dépendant du type de sol). Si tel n'est pas le cas, le tube doit être retiré du sol, nettoyé puis réinstallé et la sonde reconfigurée (Minnesota Board of Water & Soil Resources 2013).

II.6 Méthode de récupération des données

Pour des relevés automatiques, la récupération des données des sondes est à effectuer deux fois par an *a minima*. La hauteur du tube dépassant du sol et une mesure manuelle de la profondeur de nappe devront systématiquement être relevées lors de la récupération des données afin d'identifier toute déviation potentielle des mesures automatiques (enfoncement du piézomètre de quelques centimètres dans le sol par ex.) et de permettre une correction des données par la suite.

Cette partie présente les étapes pour récupérer les données sur le terrain pour des sondes autonomes sans compensation barométrique et pour la sonde barométrique. Les étapes suivantes sont à répéter pour chaque piézomètre. Ce sont les étapes qui ont été éprouvées par plusieurs observateurs lors des tests réalisés durant le projet Hydrindic.

Étape 1. Ouverture du piézomètre et extraction des sondes

- Déverrouillez le bouchon de suspension (Figure 23 a) ;
- Extraire les sondes (sonde autonome et sonde barométrique si présente) du tube par la cordelette (Figure 23 b). Veillez à manipuler le piézomètre et la cordelette le moins possible pour éviter de détériorer l'installation.

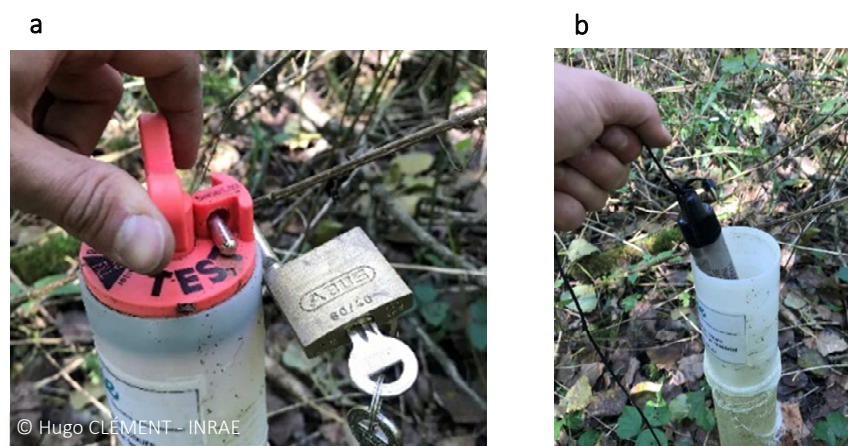


Figure 23. Ouverture du cadenas verrouillant le bouchon de suspension (a) et extraction des sondes (b).

Étape 2. Ouverture des sondes et connexion

- Séchez les sondes ;
- Dévissez leurs capuchons (pas forcément nécessaire en fonction du type de sonde) à l'aide de l'anse du cadenas si besoin (Figure 24 a) ;
- Placez les sondes sur le socle USB de récupération des données, positionné sur une surface plane (Figure 24 b).

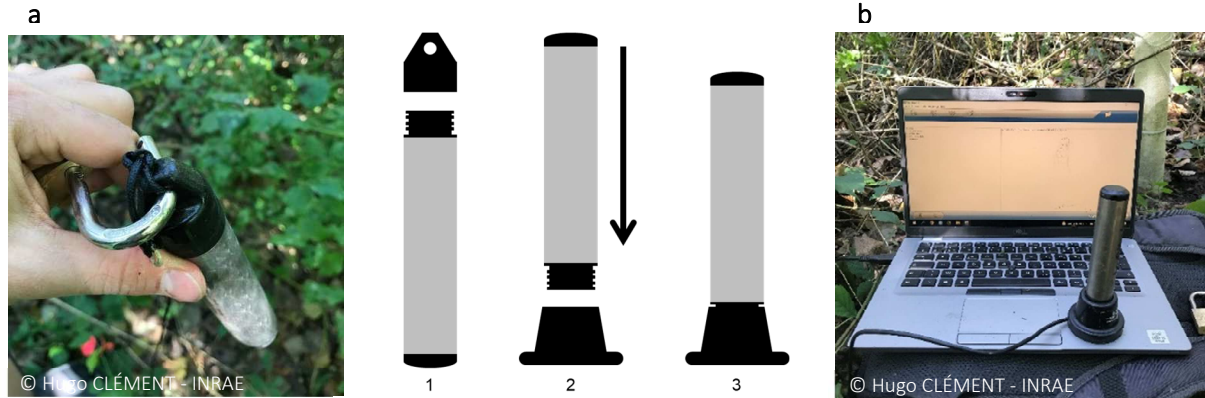


Figure 24. Ouverture d'une sonde à l'aide du cadenas (a), connexion au support de transfert de données (étapes 1, 2 et 3) (modifié d'après In-Situ 2013) et connexion au logiciel fournisseur (b).

Étape 3. Extraction des données

L'extraction des données étant variable en fonction du type de sonde, il est nécessaire de se référer à la documentation du fournisseur.

- Mesurez manuellement la profondeur de nappe et la hauteur du tube dépassant du sol (précision de 1 cm) et indiquez la date et l'heure de la mesure. La mesure du niveau de la nappe peut être effectuée via une sonde manuelle ou de façon plus rudimentaire par le biais de n'importe quelle tige solide droite marquante au contact de l'eau (ex. tige de phragmite) (Figure 25). Cette dernière doit être assez fine pour éviter de modifier le niveau d'eau présent dans le tube lors de son insertion. La profondeur de nappe peut aussi être relevée par l'utilisation d'un mètre rigide ;
- Remplacez les sondes dans le tube et verrouillez le bouchon de suspension une fois les données récupérées et les mesures effectuées.

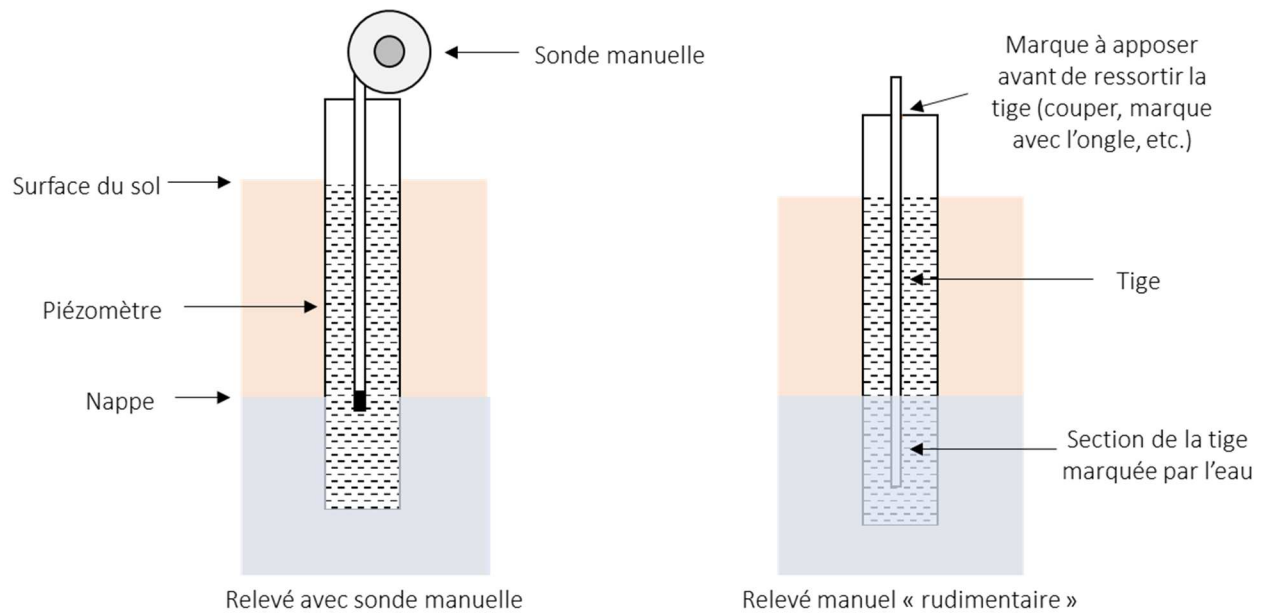


Figure 25. Représentation de deux types de relevés manuels.

III. Analyse et interprétation

III.1 Méthode d'analyse

Les données de profondeur de nappe récoltées sur les sites en voie de restauration/création et les SCORs permettent le calcul et la représentation graphique d'HYDRINDIC. **Le calcul de l'indicateur doit se faire sur une année de données uniquement à partir de données journalières (relevées à une heure précise et non pas le calcul d'une moyenne journalière des données horaires) ou hebdomadaires.** En revanche, il peut être réalisé à plusieurs reprises. Par exemple, si l'année N est l'année de réalisation des opérations de restauration/création, l'indicateur peut être calculé sur l'année N+1, N+3, N+5, N+7 et N+10. Selon les zones humides, le temps nécessaire à l'établissement d'un fonctionnement hydrologique adapté est variable (cf. II.2, paragraphe « Durée de suivi »). La répétition des mesures permettra dans un premier temps d'observer si la zone humide se rapproche progressivement du fonctionnement voulu, avant d'objectiver une conclusion sur la direction prise par l'opération de restauration/création d'un point de vue hydrologique.

Deux outils sont proposés à l'attention des utilisateurs de l'indicateur (tableur type et outil 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. L'annexe 4 détaille étape par étape l'utilisation des deux outils.

Qu'est-ce qu'une enveloppe de référence ?

Les données piézométriques relevées dans les SCORs sont utilisées pour calculer une enveloppe de référence. Elle représente la dynamique de nappe souhaitée, pour le site en voie de restauration/création. Elle correspond à la **gamme de variations de profondeur de nappe présumée acceptable sur le site en voie de restauration/création** (Figure 26). Elle est construite simplement, en calculant la moyenne et l'écart type¹ de la profondeur de nappe mesurée au moins une fois par semaine sur les SCORs durant une année.

Dans l'exemple suivant (Figure 26), la limite haute de l'enveloppe correspond à la moyenne journalière intersites des profondeurs de nappes relevées sur les SCORs additionnée à l'écart type journalier. La limite basse de l'enveloppe correspond à la moyenne journalière intersites des profondeurs de nappes relevées sur les SCORs dont on soustrait l'écart type journalier. L'enveloppe de référence correspond ainsi à la moyenne journalière intersites des hauteurs de nappes sur les SCORs plus ou moins l'écart type journalier intersites. Par ex. pour le 30 mars 2021 à 12 h, sur la figure ci-après, les profondeurs de nappe relevées par les piézomètres sont de -13 cm pour le piézomètre 1, de -23 cm pour le piézomètre 2 et de -16 cm pour le piézomètre 3. La moyenne des profondeurs de nappe est donc de -17,3 cm et l'écart type des profondeurs de nappe est de 5,13 cm. Ainsi, l'enveloppe de référence s'étend entre une profondeur de nappe de -22,5 cm (limite basse) et -12,2 cm (limite haute).

La précision de l'enveloppe de référence dépend du nombre de SCORs équipés et de la justesse d'emplacement des piézomètres. **Plus les SCORs sont nombreux et plus les piézomètres sur ceux-ci sont nombreux et placés de façon à représenter correctement l'hydrologie du site, plus l'enveloppe de référence est robuste.** Une enveloppe de référence très large (à titre indicatif, plus de 50 cm d'écart

¹ Écart type : il correspond à une mesure de la dispersion des données autour de la moyenne. Plus l'écart type est élevé, plus les données sont éloignées de la moyenne.

entre la limite haute et basse de l'enveloppe de référence sur une année) peut indiquer un mauvais choix d'emplacement d'un ou plusieurs piézomètres ou un mauvais choix de SCORs (non représentatifs de l'objectif de restauration/création). À l'inverse, une enveloppe de référence réduite (à titre indicatif, moins de 5 cm d'écart entre la limite haute et basse de l'enveloppe de référence sur une année) peut indiquer un trop faible nombre de piézomètres installés, de SCORs équipés ou un mauvais choix d'emplacement des piézomètres et un mauvais choix de SCORs.

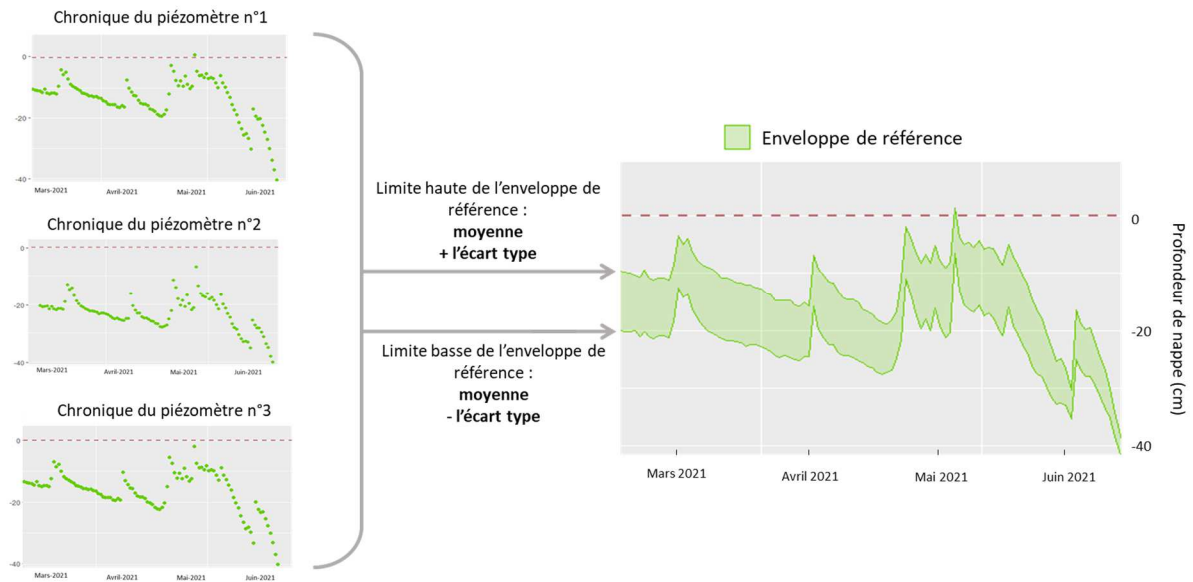


Figure 26. Exemple d'une enveloppe de référence obtenue avec trois chroniques piézométriques à partir de piézomètres installés dans un SCOR en Isère (sur le territoire de la Communauté de Communes des Balcons du Dauphiné).

III.1.1 Tableur type

Le tableur type (HYDRINDIC_tableur_type.xlsx) mis à disposition¹ (exploitable sous Excel®) permet de mettre en forme les données en vue des analyses et interprétations futures (notamment via le deuxième outil développé sous R). Il est développé au format .xlsx et contient des macros (ensemble d'actions permettant d'automatiser des tâches) dont le rôle est de formater les dates, appliquer des formules et de générer un graphique (Figure 27). Ce fichier peut par la suite être enregistré au format .csv et être exploité sous R (R Core Team 2017) pour des analyses plus poussées (Annexe 4).

Le fichier contient trois feuilles de calcul : « **REEMPLIR** », « **GRAPHIQUE** » et « **CONSIGNES** ».

- Feuille « **REEMPLIR** » : contient un ensemble de colonnes à remplir avec les données récoltées et trois macros ;
 - Colonne « **Date** » : contient l'ensemble des dates (un jour par ligne) pour la plage de données à analyser (une année), exprimées au format AAAA-MM-jj ;
 - Colonnes concernant le site en voie de restauration/création :
 - Colonnes « **Piezo_1, Piezo_2, [...] Piezo_20** » (actuellement limités à 20 piézomètres) : contient les profondeurs de nappes en cm du site en voie de restauration/création correspondantes à la date d'enregistrement (une donnée par jour ou par semaine par piézomètre²) ;
 - Colonne « **Moyenne** » : contient la formule de calcul de la moyenne journalière ou hebdomadaire de profondeur de nappe en cm des piézomètres du site en voie de restauration/création.
 - Colonnes concernant les SCORs :
 - Colonnes « **SCORs_Piezo_1, SCORs_Piezo_2, [...] SCORs_Piezo_20** » (actuellement limités à 20 piézomètres) : contient les profondeurs de nappes en cm des SCORs correspondantes à la date d'enregistrement (une donnée par jour ou par semaine par piézomètre) ;
 - Colonne « **Moyenne_SCORs** » : contient la formule de calcul de la moyenne journalière ou hebdomadaire de profondeur de nappe des SCORs en cm ;
 - Colonne « **Ecart_Type** » : contient la formule de calcul de l'écart type journalier ou hebdomadaire basée sur les profondeurs de nappe des SCORs en cm ;
 - Colonne « **Enveloppe_Max** » : contient la formule de calcul de la limite supérieure de l'enveloppe de référence (« Moyenne_SCORs » + « Ecart_type » journalier ou hebdomadaire) en cm ;
 - Colonne « **Enveloppe_Min** » : contient la formule de calcul de la limite inférieure de l'enveloppe de référence (« Moyenne_SCORs » - « Ecart_type » journalier ou hebdomadaire) en cm.

¹ Disponible sur le site <https://hydrindic-inrae.shinyapps.io/hydrindic-inrae>

² Choisissez une seule donnée horaire par jour (récoltée à 12 h chaque jour par ex.) pour l'ensemble des piézomètres pour passer d'une analyse de données horaires à une analyse de données journalières.

- Colonnes concernant l'analyse des données :
 - Colonne « **Piezo_[X]_dans_env** » : indique si la valeur journalière ou hebdomadaire du piézomètre X est incluse dans l'enveloppe de référence (VRAI si incluse, FAUX si exclue) ;
 - Colonne « **Piezo_[X]_pourc_donnees_dans_env** » : indique le pourcentage de valeurs incluses dans l'enveloppe de référence pour le piézomètre X ;
 - Colonne « **Piezo_[X]_sup_ou_dans_env** » : indique si la valeur journalière ou hebdomadaire du piézomètre X est incluse dans l'enveloppe de référence ou est supérieure à celle-ci (VRAI si incluse ou supérieure, FAUX si exclue ou inférieure) ;
 - Colonne « **Piezo_[X]_pourc_donnees_au_dessus_ou_dans_env** » : indique le pourcentage de valeurs incluses dans l'enveloppe de référence ou au-dessus de celle-ci pour le piézomètre X.

- Macros pour l'automatisation des calculs :
 - Macro « **(1. Obligatoire) Formatage des dates** » : au clic, formate l'ensemble des dates de la colonne « Date » au format AAAA-MM-jj. Cette macro doit être obligatoirement utilisée ;
 - Macro « **(2. Si nécessaire) Modification des valeurs négatives en valeurs positives et inversement** » : au clic, transforme toutes les valeurs positives ajoutées dans les colonnes « Piezo_[X] » et « SCORs_Piezo_[X] » en valeurs négatives et inversement. Pour faciliter l'interprétation du graphique, les données piézométriques doivent être positives lorsque la nappe est au-dessus du sol et négative lorsqu'elle se trouve en dessous du sol ;
 - Macro « **(3. Si nécessaire) Modification du séparateur décimal . en ,** » : au clic, modifie le séparateur décimal des données ajoutées (« . » en « , »). Utilisez cette macro si les données récoltées ont un séparateur décimal de type « . » ;
 - Macro « **(4. Obligatoire) Application des formules** » : au clic, applique les formules de moyenne, écart type, etc. aux colonnes et rangs concernés. Cette macro doit être obligatoirement utilisée ;
 - Macro « **(5. Optionnel) Générer le graphique** » : au clic, génère un graphique sur la feuille de calcul « GRAPHIQUE » contenant l'ensemble des piézomètres du site en voie de restauration/création ainsi que les limites supérieures et inférieures de l'enveloppe de référence.

- Feuille « **GRAPHIQUE** » : contient le graphique généré par la macro « (5. Optionnel) Générer le graphique » et des tableaux indiquant pour chaque piézomètre du site en voie de restauration/création le pourcentage de valeurs incluses dans l'enveloppe de référence ou au-dessus de celle-ci ainsi qu'une indication de la bonne ou mauvaise voie de restauration/création supposé d'un point de vue hydrologique ;

- Feuille « **CONSIGNES** » : contient l'ensemble des consignes pour l'utilisation du tableur type.

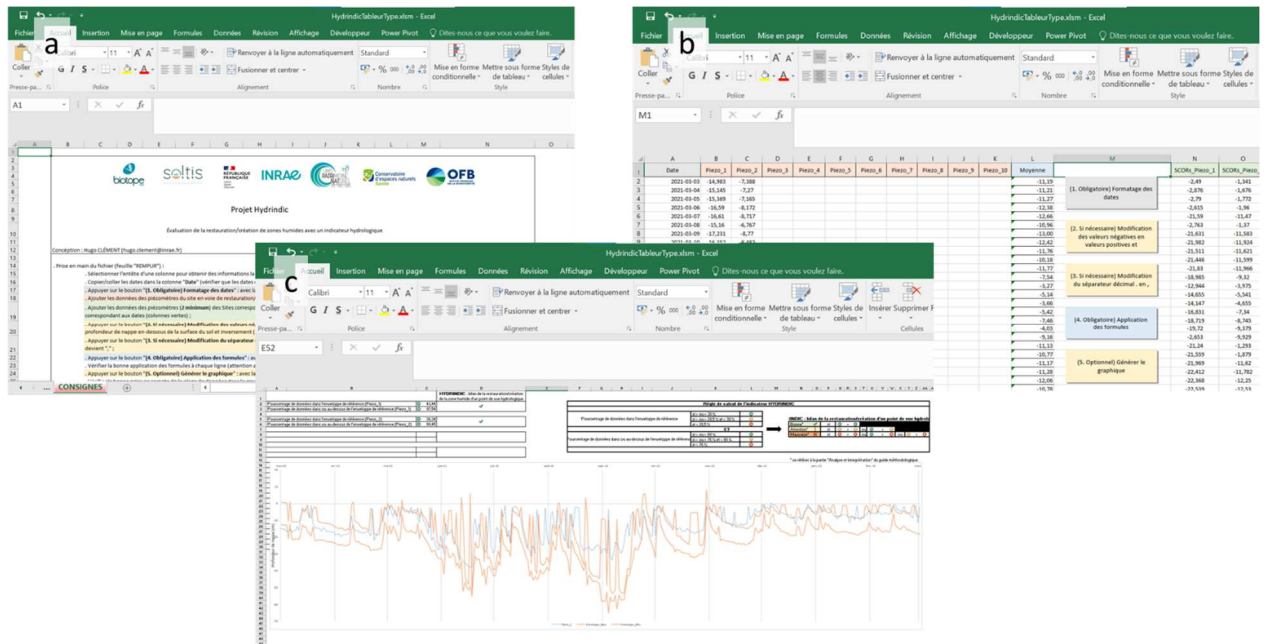


Figure 27. Tableau type dans lequel les données sont ajoutées. Il contient les instructions nécessaires à l'utilisation du fichier (a), des macros et une plage de saisie de données (b), ainsi que la génération d'un graphique à partir des données piézométriques saisies (c).

III.1.2 Outil en ligne

L'outil en ligne, appelé « APP HYDRINDIC », (<https://hydrindic-inrae.shinyapps.io/hydrindic-inrae>) permet une lecture et une analyse facilitées des données piézométriques par le calcul automatique de l'indicateur. Il présente les données du tableur type importé sous forme graphique directement dans le navigateur et ne nécessite pas de compétences techniques particulières. Ce type d'outil est généralement développé afin de rendre accessible des informations initialement complexes à décrire et permettre au plus grand nombre une compréhension de l'information transmise (on parle de « *data visualisation* »). L'outil est développé sous R via le package RShiny, utilisé pour la construction d'application web interactive. L'application propose un téléchargement du tableur type qui, une fois rempli, peut être importé dans l'outil. Un graphique interactif est généré automatiquement et un menu déroulant permet l'affichage des chroniques piézométriques et de l'enveloppe de référence (Figure 28).

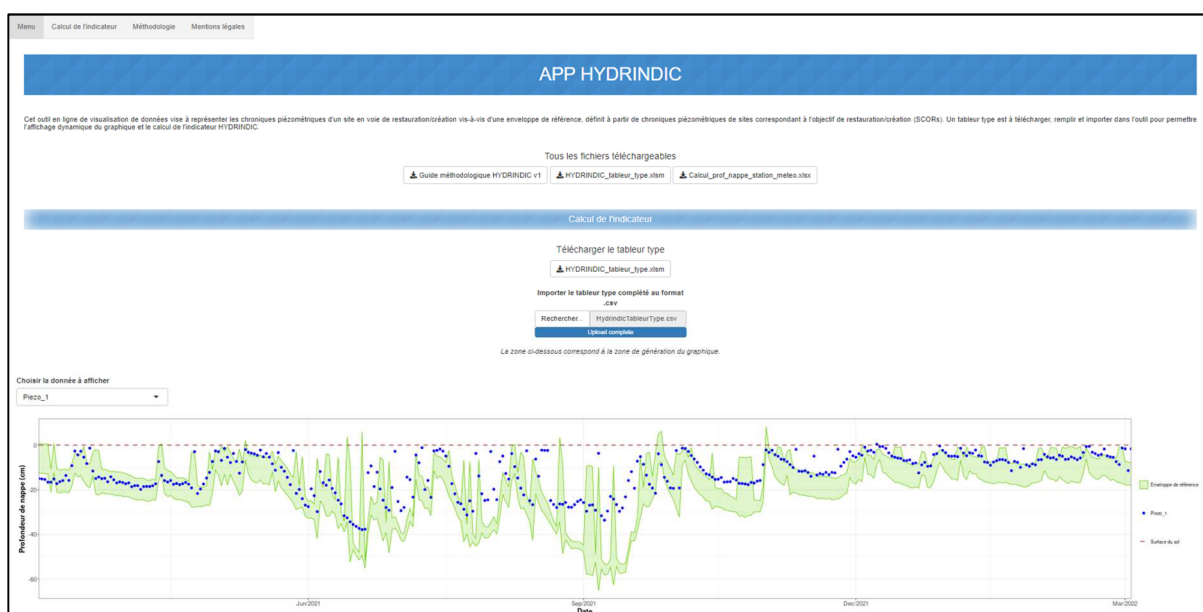


Figure 28. L'outil en ligne APP HYDRINDIC développé sous RShiny pour l'observation des données piézométriques vis-à-vis de l'enveloppe de référence. Le tableur type peut être téléchargé à l'adresse web <https://hydrindic-inrae.shinyapps.io/hydrindic-inrae>, rempli par l'utilisateur sur son ordinateur puis importé dans l'outil pour une génération automatique d'un graphique.

III.2 Méthode d'interprétation

Une fois la qualité de l'enveloppe de référence vérifiée (cf. III.1), 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).

III.2.1 Hydropériode

L'hydropériode correspond aux variations dans le temps du niveau de nappe au-dessus ou en dessous de la surface du sol. Elle est déterminée par le bilan de l'eau d'une zone humide, correspondant aux entrées (précipitations, etc.) et sorties (évapotranspiration, etc.) d'eau dans celle-ci. **Chaque type de zones humides possède une « signature » hydrologique saisonnière propre, déterminée par son mode d'alimentation en eau, son hydrogéomorphologie, etc.** Au fil des années, le maintien d'une même hydropériode au sein d'un site permet d'en assurer la pérennité (Mitsch & Gosselink 2015). En fonction de leur hydropériode, différents types de zones humides se distinguent : les zones humides inondées de façon permanente (toute l'année et tous les ans), intermittente (toute l'année sauf période exceptionnelle de grande sécheresse), semi-permanente (inondée sur la période de croissance de la végétation), etc. (Cowardin *et al.* 1979). Les zones humides alimentées principalement par des eaux souterraines ont généralement une hydropériode peu variable au fil des saisons (Mitsch & Gosselink 2015). En revanche, les zones humides des contextes climatiques méditerranéens (mares temporaires par ex.) possèdent des hydropériodes très variables avec une alternance de périodes d'inondations et de sécheresses très marquées. La Figure 29 présente quatre hydropériodes annuelles types.

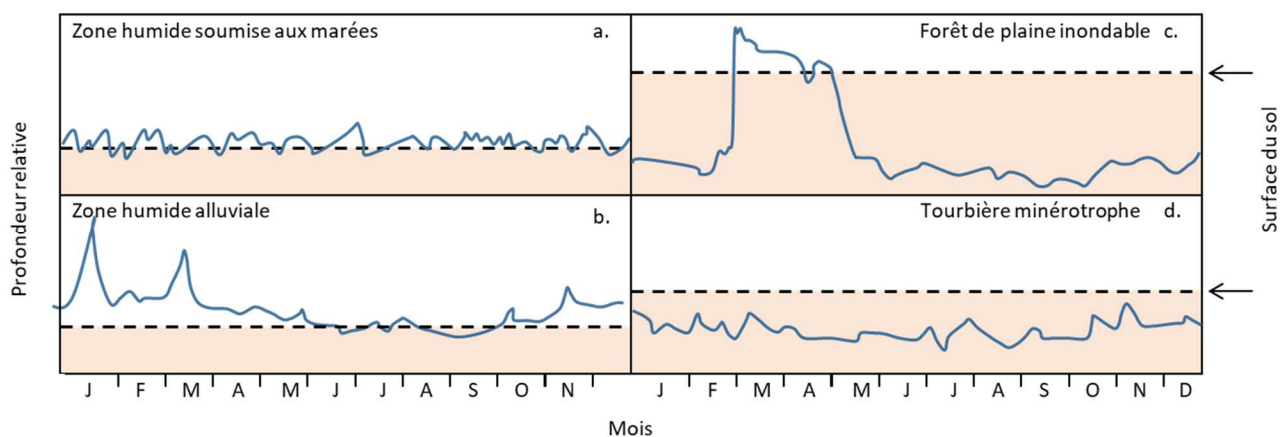


Figure 29. Hydropériodes types pour plusieurs types de zones humides (modifié d'après Mitsch & Gosselink 2015).

Comment obtenir et comparer les hydropériodes des sites étudiés ?

La représentation graphique de l'hydropériode d'un site en voie de restauration/création ou des SCORs correspond au graphique des données piézométriques récoltées sur une année (chronique piézométrique). Une analyse visuelle des hydropériodes des sites étudiés permet d'obtenir une idée des similitudes ou non de fonctionnement hydrologique entre sites (période et durée d'inondation, intensité des variations de profondeur de nappe, etc.). Cette analyse permet de distinguer les périodes de fluctuations de profondeur de nappe (période sèche et période humide) ainsi que le moment auquel des valeurs minimales et maximales de profondeur de nappe surviennent au cours de l'année. Afin de déterminer si l'hydropériode du site en voie de restauration/création correspond à l'hydropériode des SCORs, les critères suivants peuvent être comparés :

- période d'inondation et d'engorgement du sol ;
- durée d'inondation et d'engorgement du sol ;
- fréquence des variations de profondeur de nappe ;
- intensité des variations de profondeur de nappe ;
- profondeurs maximales et minimales atteintes par la nappe ;
- ...

Plus les variations de profondeurs de nappe surviennent en même temps, dans la même direction (augmentation ou baisse de la profondeur de nappe) et sont de même intensité entre site en voie de restauration/création et SCORs, plus les hydropériodes peuvent être considérées comme similaires.

Lors de l'interprétation des hydropériodes, il semble intéressant d'y associer les données pluviométriques des sites étudiés. Pour certaines zones humides essentiellement alimentées par de l'eau de pluie (alimentation ombrogène), la pluviométrie permet généralement d'expliquer l'hydropériode de la zone humide.

L'observation d'une hydropériode annuelle similaire (analyse subjective) entre site en voie de restauration/création et SCORs est un premier indice d'une bonne voie de restauration potentielle (Figure 30).

Une différence notable (analyse subjective) d'hydropériode annuelle (Figure 31) entre site en voie de restauration et SCORs associés peut indiquer :

- Un mauvais choix de SCORs (pas le même type de zone humide) ;
- Une mauvaise direction de restauration/création vis-à-vis de l'objectif (ennoisement du site, temps de résidence de l'eau trop faible, etc.) ;
- ...

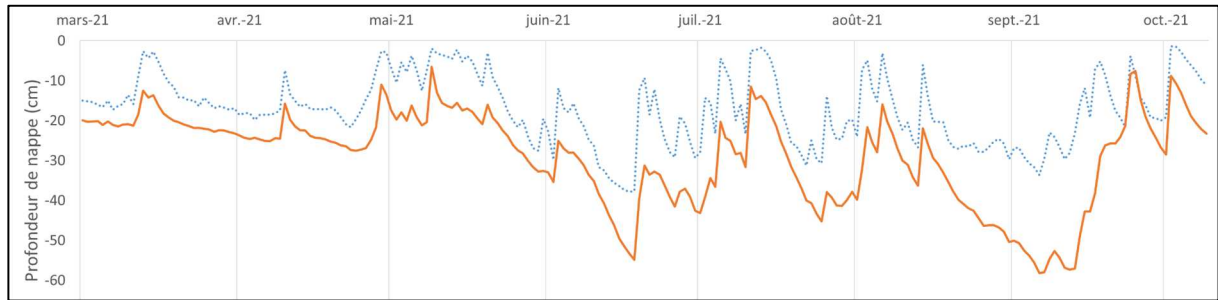


Figure 30. Exemple d'hydropériodes semblables entre les données provenant d'un piézomètre sur une prairie humide en voie de restauration (pointillé bleu) et d'un piézomètre sur le SCOR associé (orange) dans le département de l'Isère sur la période de mars à octobre 2021, première indication d'une restauration en bonne voie.

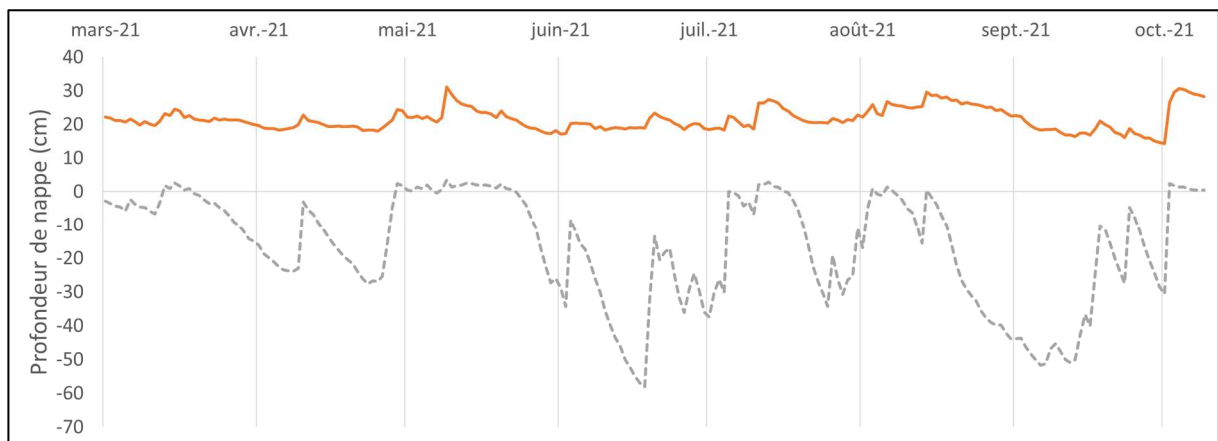


Figure 31. Exemple d'hydropériodes différentes entre les données provenant d'un piézomètre sur une prairie humide en voie de restauration (pointillé gris) et d'un piézomètre sur le SCOR associé (orange) dans le département de l'Isère sur la période de mars à octobre 2021, première indication d'une mauvaise direction de restauration ou d'un mauvais choix de SCOR. Dans ce cas, le SCOR sélectionné correspond à une boisement humide inondé en permanence et n'est donc pas représentatif de l'objectif de restauration visé (prairie humide).

III.2.2 Calcul de l'indicateur

Le deuxième critère correspond au calcul de l'indicateur HYDRINDIC, soit le pourcentage de données piézométriques annuelles récoltées sur le site en voie de restauration/création incluses dans l'enveloppe de référence. Ce calcul est à mettre au regard de l'arbre de décision (Figure 32). Ce dernier permet de guider l'utilisateur sur l'interprétation des résultats en fonction de la situation rencontrée et propose des exemples de questions (Q1 à Q6) à se poser avant d'objectiver une conclusion sur la direction de restauration/création d'une zone humide d'un point de vue hydrologique. Lorsqu'une alerte est émise ou lorsque la restauration/création semble mauvaise d'un point de vue hydrologique, les questions listées ci-après permettent d'interpréter les résultats d'HYDRINDIC et d'apporter des éléments supplémentaires nécessaires à l'argumentation autour de la direction de restauration/création vraisemblable. Par exemple, si le résultat d'HYDRINDIC indique une restauration/création d'un fonctionnement hydrologique vraisemblablement mauvaise, il est possible qu'en fonction du type de zone humide considéré et de la bibliographie lui étant rattaché, on prouve qu'obtenir une chronique piézométrique constamment à moins de 10 cm de l'enveloppe de référence ne portera pas de préjudice au développement des espèces, de l'habitat, des fonctions... visés. Il est ainsi primordial de prendre en compte un maximum d'éléments de contexte, d'observations sur le terrain, de recherches bibliographiques, etc. pour interpréter au mieux les résultats d'HYDRINDIC.

Exemple de questions pouvant être posées :

- Q1 : Le site est-il ennoyé une partie de l'année au risque d'empêcher le développement des espèces, de l'habitat et des fonctions ciblés ? ;
- Q2 : Existe-t-il des références bibliographiques montrant que l'écart observé à l'enveloppe de référence est compatible avec le type d'espèces, d'habitats, de fonctions... visés ?¹ ;
- Q3 : L'enveloppe de référence est-elle assez représentative du type de zone humide étudiée ? Un seul SCOR avec seulement deux piézomètres peut donner une enveloppe de référence fine potentiellement non représentative de la gamme de variation réellement possible pour ce type de zone humide ;
- Q4 : Existe-t-il sur la zone humide ou dans son environnement des causes empêchant la bonne alimentation de la zone humide (drains enterrés, etc.) ? ;
- Q5 : L'objectif assigné pour le site est-il réaliste ? Envisager de revoir l'objectif une fois le fonctionnement hydrologique du site connu ;
- Q6 : La profondeur de nappe est-elle inférieure à l'enveloppe de référence en période de basses eaux ou sur une période de 2 à 4 mois ? Si tel est le cas, est-ce que l'écart à l'enveloppe de référence est tel que cela risque d'empêcher le développement des espèces, de l'habitat, des fonctions... visés ?

¹ Exemple de documents pouvant être mobilisés : les cahiers d'habitats Natura 2000 (Bensettiti et al. 2002), les documentations de références phytosociologiques des groupements végétaux des conservatoires botaniques, etc.

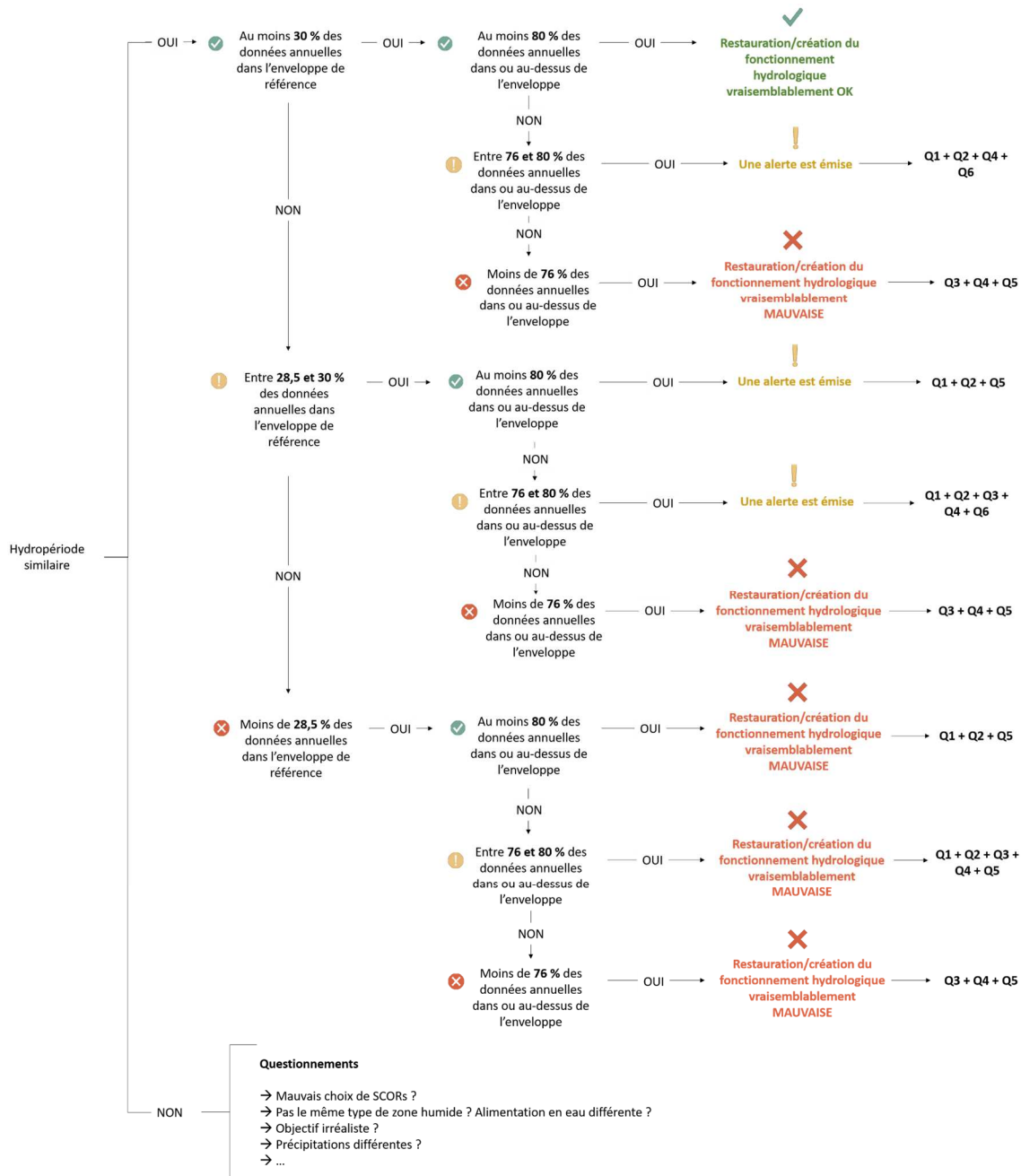


Figure 32. Arbre de décision permettant de statuer sur la direction de restauration/création d'une zone humide d'un point de vue hydrologique à l'aide d'HYDRINDIC et des pistes de réflexions proposées. Les questions Q1 à Q6 font références aux questions (non exhaustives) listées dans le paragraphe qui précède cette figure.

Pour un piézomètre X du site en voie de restauration/création, si au moins 30 % des données annuelles sont incluses dans l'enveloppe de référence et qu'au moins 80 % des données annuelles sont incluses ou supérieures¹ à celle-ci, le site peut être considéré comme vraisemblablement en bonne voie de restauration (Figure 33).

¹ Du fait de la difficulté inhérente affectant le choix des SCORs, nous considérons que les données peuvent être pour partie supérieures et à proximité de l'enveloppe de référence si une hydropériode similaire aux SCORs est respectée. Attention : l'ennoiement n'est pas pour autant à privilégier.

Si une partie des piézomètres du site en voie de restauration/création ne répondent pas à ce critère, cela indique que les secteurs dans lesquels ils sont installés semblent ne pas répondre aux objectifs fixés, au moins sur le plan hydrologique (Figure 34 et Figure 35). Les seuils de 30 et 80 % ont été fixés suite aux observations et résultats obtenus durant le projet Hydrindic. Les seuils de 28,5 et 76 % correspondent au 5 % de marge d'erreur des seuils de 30 et 80 % respectivement.

Le tableur type propose une automatisation du calcul du pourcentage de données incluses ou supérieures à l'enveloppe de référence et une synthèse de ces données dans la feuille « GRAPHIQUE » une fois le fichier rempli. Afin de compléter l'interprétation des données piézométriques obtenues, il est conseillé d'ajouter au graphique les informations concernant la pluviométrie, récoltée par une station météorologique.

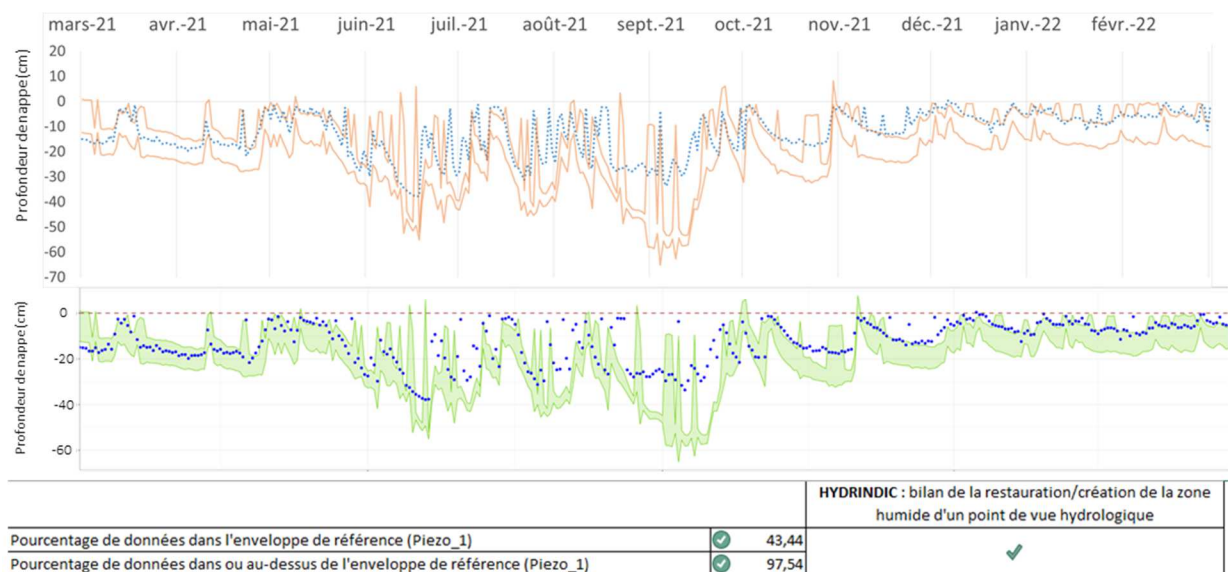


Figure 33. Hydropériode d'après les données d'un piézomètre (pointillés et points bleus) et enveloppe de référence (peu robuste) via le tableur type (haut ; limites orange) et l'outil en ligne (milieu ; enveloppe verte) sur la période de mars 2021 à mars 2022. Le calcul du pourcentage de données incluses dans l'enveloppe de référence est effectué dans le tableur type (bas). Cas d'un piézomètre installé dans une prairie humide en voie de restauration dans le département de l'Isère rendant compte d'une bonne voie de restauration d'un point de vue hydrologique. Plus de la moitié des données se trouvent au-dessus de l'enveloppe de référence et cela s'observe en particulier sur la période de juillet 2021 à octobre 2021. Ceci est notamment lié au fait que l'enveloppe de référence est fine sur cette période, dû à un manque de SCORs et de piézomètres en place. Les recherches bibliographiques (Foster et al. 2008, Craft 2015, Mitsch & Gosselink 2015) permettent de confirmer que le site en voie de restauration est dans une gamme de variation favorable au développement d'une prairie hygrophile.

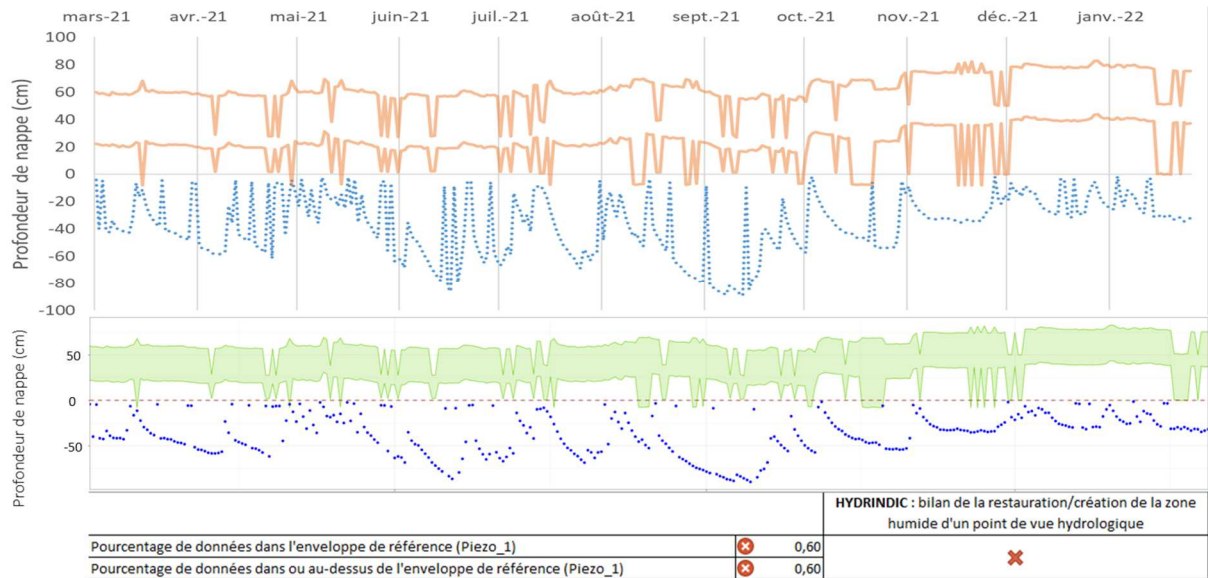


Figure 34. Observation de l'hydropériode et de l'inclusion ou non des données d'un piézomètre (pointillés ou points bleus) dans l'enveloppe de référence via le tableur type (haut ; limites orange) et l'outil en ligne (milieu ; enveloppe verte) sur la période de mars 2021 à mars 2022. Le calcul du pourcentage de données incluses dans l'enveloppe de référence est effectué dans le tableur (bas). Cas d'un piézomètre dans un boisement humide en voie de restauration dans le département de l'Isère rendant compte d'une mauvaise direction de restauration d'un point de vue hydrologique. Les hydropériodes entre site en voie de restauration et SCORs ne sont pas similaires. De plus, la chronique piézométrique du site en voie de restauration est en dessous de 50 cm de profondeur sur plusieurs longues périodes de l'année et ne permet pas le développement des espèces, de l'habitat et des fonctions ciblées. L'objectif assigné pour le site ne semble pas atteignable. Des mesures correctives de l'opération de restauration initiale sont à prévoir ou l'objectif de restauration est à redéfinir.

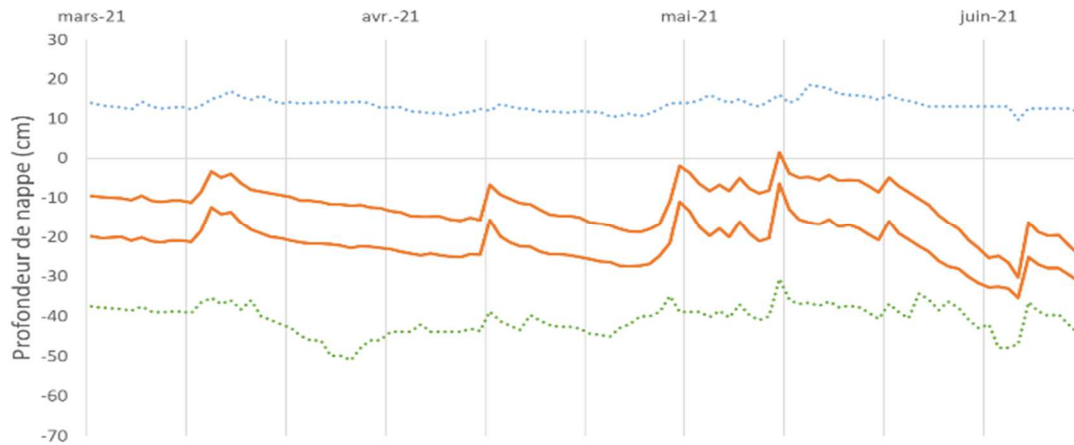


Figure 35. Exemple fictifs de deux chroniques piézométriques (piézomètre_1, en bleu, et piézomètre_2, en vert, sur deux sites en voie de restauration distincts) mises au regard d'une enveloppe de référence (limites orange définies à partir de SCORs) et dont les données ne sont pas incluses dans celle-ci sur la période de mars 2021 à juin 2021. Sur cette période, la chronique piézométrique du piézomètre_1 témoigne d'un fonctionnement hydrologique de zones humides mais ne correspondant pas à l'objectif fixé initialement (hydropériode différente, terrain constamment inondé, etc.). Le piézomètre_2 témoigne d'une restauration/création hydrologique qui n'a pas atteint ses objectifs (profondeur de nappe en deçà des objectifs fixés ne permettant pas la restauration des espèces, de l'habitat, des fonctions... visés).

Des cas particuliers peuvent parfois être rencontrés (par ex. chroniques piézométriques proches, juste en dessous ou au-dessus, de l'enveloppe de référence avec une hydropériode similaire à celle-ci (Figure 36). Il est possible dans ce cas que l'enveloppe de référence ne soit pas assez représentative de la gamme de variations de profondeur de nappes possibles des zones humides correspondant à l'objectif de restauration/création. Aussi, il peut être nécessaire d'effectuer des recherches bibliographiques afin d'obtenir d'éventuelles informations sur l'amplitude de profondeur de nappe autorisée pour les espèces, l'habitat, les fonctions... visés.

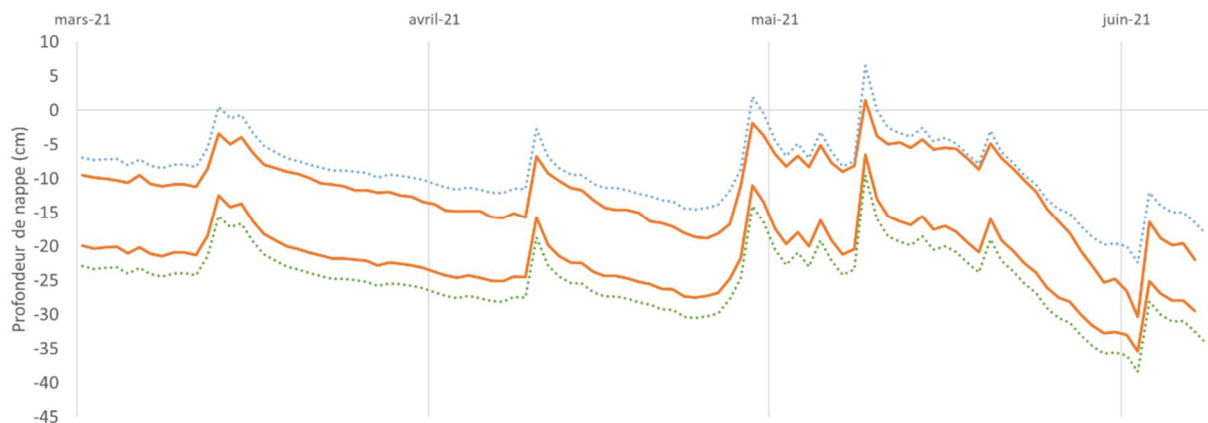


Figure 36 Exemple fictif de deux chroniques piézométriques (piézomètre_1 en bleu et piézomètre_2 en vert) présentant des hydropériodes similaires aux SCORs mais dont les données ne sont pas incluses dans l'enveloppe de référence (limites orange). En fonction de l'amplitude de profondeur de nappe autorisée pour ce type de zone humide (recherches bibliographiques à effectuer), la proximité de ces chroniques avec l'enveloppe de référence (moins de 10 cm d'écart de profondeur de nappe) peut potentiellement les considérer comme rendant compte d'une bonne voie de restauration/création d'un point de vue

hydrologique. Aussi, il est important de vérifier que l'enveloppe de référence soit assez représentative des variations de profondeur de nappe autorisées pour le développement des espèces, de l'habitat, des fonctions... visés (un seul SCOR ? seulement deux piézomètres ? etc.). Le fonctionnement hydrologique de la zone humide, la pluviométrie, les pressions anthropiques en amont des sites, etc. se doivent d'être pris en compte dans le cadre de l'analyse et de l'interprétation des résultats. Afin de statuer sur la bonne ou mauvaise voie de restauration du site. les résultats découlant de l'indicateur sont à mettre au regard d'indicateurs floristiques, pédologiques, etc.

L'ensemble des étapes informatiques, de la récupération des données de suivi sur le terrain à l'analyse des données, sont résumées ci-après en Figure 37.

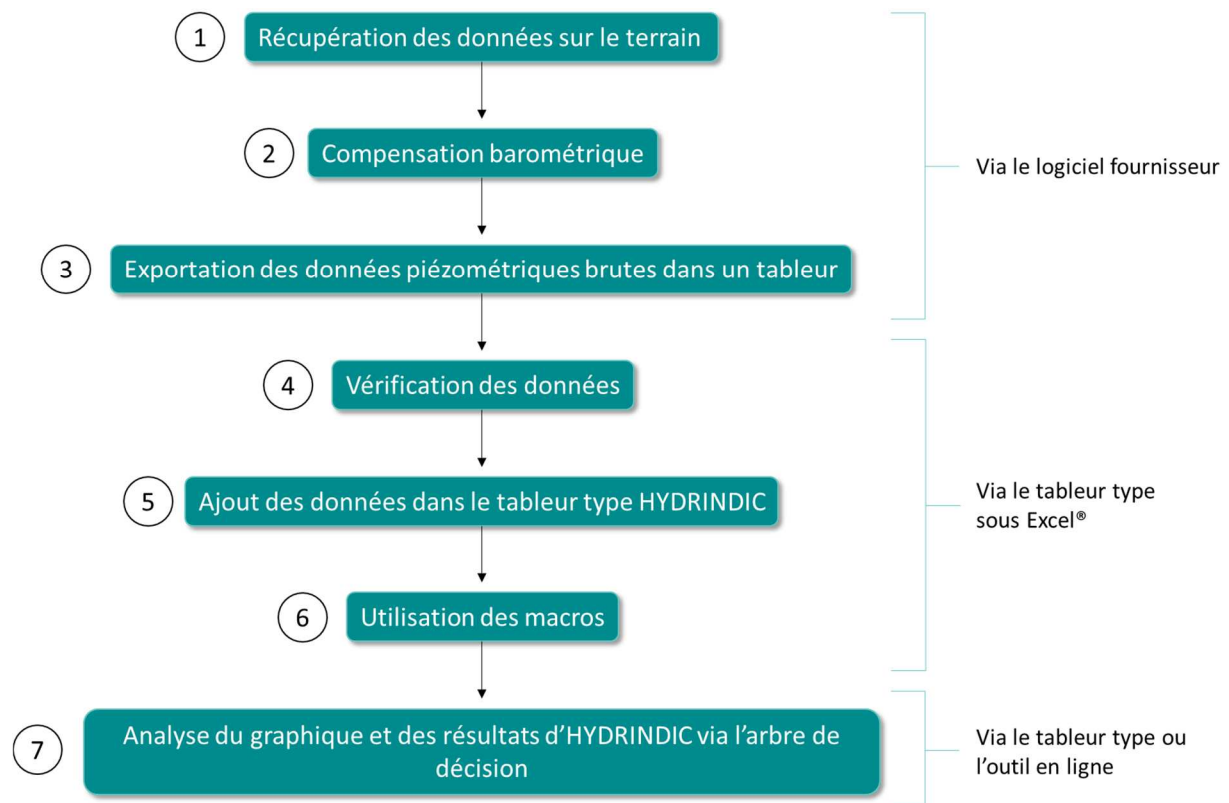


Figure 37. Étapes informatiques pour le calcul d'HYDRINDIC dans le cadre de l'utilisation de sondes autonomes sans compensation barométrique directe. (1) Récupération des données des sondes autonomes et de la/des sonde(s) barométrique(s) ; (2) Étape obligatoire de compensation barométrique afin d'obtenir des valeurs de profondeurs de nappe ; (3) Le logiciel du fournisseur permet d'exporter les données récoltées dans des tableurs, généralement au format .csv ; (4) Une vérification des données doit être effectuée afin d'être sûr qu'il n'y est pas de données aberrantes. Cela est parfois liée au fait que sur la période de temps entre la sortie de la sonde du tube et de la récolte des données, la sonde enregistre une donnée qui sera alors aberrante et généralement bien visible sur la chronique piézométrique. Vérifier qu'il n'y est pas eu de perte de données (défaut d'enregistrement par ex.), etc. ; (5) Ajout des données de profondeur de nappe du site en voie de restauration/création et des SCORs dans le tableur type HYDRINDIC ; (6) Les macros permettent de formater les données en vue du calcul d'HYDRINDIC ; (7) L'analyse de l'efficacité des opérations de restauration/création d'un point de vue hydrologique est permise grâce au graphique généré, à l'arbre de décision et au résultat d'HYDRINDIC.

Conclusion

L'indicateur HYDRINDIC développé et testé durant le projet du même nom sur la période 2020-2021, vise à lever le frein actuel sur l'absence d'informations hydrologiques pourtant indispensables dans le cadre de l'évaluation de l'efficacité des opérations de restauration/création de zones humides. Pour ces écosystèmes, aborder l'évaluation de l'efficacité des opérations de restauration/création par l'hydrologie permettrait, dans un premier temps, d'anticiper le devenir de la zone humide en voie de restauration/création sur le court et moyen terme ainsi que de démontrer la réussite vraisemblable de l'opération de restauration/création visant le maintien ou le rétablissement d'un fonctionnement hydrologique donné.

Un intérêt majeur de cet indicateur est qu'il ne nécessite pas d'étude préalable avant opération de restauration/création, ce qui concorde avec les contraintes des aménageurs. Il est mis en place au moment de l'opération de restauration/création et peut aussi être appliqué plusieurs années après l'opération de restauration/création si un doute subsiste sur le succès de l'opération ou sur les causes de son échec. Néanmoins, lorsque le projet le permet, des diagnostics en amont des travaux restent évidemment recommandés pour apporter des informations supplémentaires (avant/après) lors de l'interprétation des résultats ou plus largement pour effectuer des choix judicieux quant aux opérations de restauration/création à mettre en œuvre.

Les compétences requises pour l'installation des piézomètres, le paramétrage des sondes, le suivi et l'analyse de données sont moindres et peuvent être aisément acquises lors de brèves formations sur le terrain et/ou par une lecture attentive de la documentation fournie par le fabricant du matériel (Porteret 2014). L'indicateur a été développé en veillant à ce qu'il ne soit pas trop onéreux. Avec un équipement relativement simple, **le coût reste bien maîtrisé** bien que pouvant fortement varier en fonction du type de sonde choisie, du fabricant, etc. La rapidité de réponse de l'indicateur, sa fiabilité, son coût maîtrisé et sa praticité sont autant de critères permettant de promouvoir son utilisation dans l'évaluation de l'efficacité des opérations de restauration/création passées, actuelles et à venir.

HYDRINDIC est complémentaire aux indicateurs existants tels que ceux présents dans la boîte à outils de suivi des zones humides portant sur la végétation, la pédologie, etc. Plusieurs indicateurs sont nécessaires pour conclure qu'une opération de restauration/création est une réussite dans son ensemble et effectuer une évaluation fonctionnelle complète. Ainsi, il peut être par exemple proposé de compléter les relevés piézométriques par des relevés floristiques à deux, cinq et dix ans après opération de restauration/création.

L'indicateur a été testé pour des zones humides continentales métropolitaines. Une perspective de développement de l'indicateur sera de le tester pour des habitats marins et dans les départements d'Outre-mer.

Des mises à jour de ce guide sont envisagées dans le futur.

Glossaire

Une grande partie des définitions sont tirées du « Glossaire eau, milieux marins et biodiversité » proposé par l'Office International de l'Eau (OiEau) (<https://glossaire.eauetbiodiversite.fr>), du glossaire des termes du document « Principes et normes internationaux pour la pratique de la restauration écologique » (Gann *et al.* 2019) et du Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau (Sandre).

Anthropisation : « *Processus par lequel les populations humaines modifient et transforment l'environnement naturel (déforestation, élevage, urbanisation, activités industrielles, etc. figurent parmi les principaux facteurs d'anthropisation).* » (Larousse 2022).

Bancarisation : « *Processus permettant de conserver les données dans le cadre organisé d'une base de données d'où il est aisé de les extraire au moyen de requêtes. Les banques de données peuvent être constituées de façon centralisée au niveau national (banques de référence) ou au niveau du bassin, ou bien de façon répartie entre plusieurs sites, selon un même modèle de données.* » (d'après Ministère de la Transition écologique 2013).

Bassin versant : « *Surface réceptrice des eaux d'un cours d'eau délimitée par la ligne de crête encore appelée ligne de partage des eaux.* » (Département de Maine-et-Loire 2022).

Code BSS : « *Code national de la Banque du Sous-Sol (BSS) attribué par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) aux ouvrages souterrains notamment aux captages d'eau. Établi selon le principe du positionnement du point sur une carte géologique au 1/50.000, le code BSS est de la forme suivante : 08035X0398/F. Les caractéristiques qui lui sont associées (coordonnées géographiques, profondeur et coupe géologique) permettent ensuite de localiser précisément chaque captage et d'identifier la nappe captée.* » (d'après Ministère de la Transition écologique 2013).

Colmatage : « *Dépôt de fines particules dans les interstices [d'un piézomètre], ayant pour effet de diminuer sa perméabilité.* » (OFB 2022).

Compensation écologique : « *Ensemble d'actions en faveur de l'environnement permettant de contrebalancer les dommages, causés par la réalisation d'un projet, qui n'ont pu être évités ou limités. La compensation écologique peut consister en la protection d'espaces naturels, la restauration, la valorisation ou la gestion dans la durée d'habitats naturels.* » (OFB 2022).

Côte NGF : « *Le Nivellement Général de la France (NGF) constitue un réseau de repères altimétriques disséminés sur le territoire français. Les repères altimétriques permettent de déterminer l'altitude en chaque point du territoire.* » (Sandre 2020).

Coût-bénéfice : analyse des avantages vis-à-vis des coûts liés à un dispositif donné et des alternatives envisageables.

Création (d'un écosystème) : la mise en place d'un nouvel écosystème dans un secteur où il n'a jamais été présent (Collectif RhoMéO 2017).

Chronique piézométrique : « *La chronique piézométrique est le recueil de l'évolution dans le temps du niveau de la nappe surveillée ou niveau piézométrique [...]. Elle est constituée de mesures qui associent, à une date donnée, le niveau de la nappe à cet instant-là. En fonction de la variabilité du niveau de la*

nappe, les mesures sont plus ou moins rapprochées dans le temps. Les mesures obtenues sont positives ou négatives vis à vis du repère de mesure : elles sont positives lorsque le niveau de la nappe est inférieur à celui du repère de mesure [...] et négatives dans le cas inverse [...]. Une chronique est représentée par une courbe qui est discrétisée pour être mémorisée en une succession de points, chaque point représentant un niveau de la nappe à un instant donné. » (BRGM 2022).

Écosystème : « *Assemblage de composantes biotiques et abiotiques dans des milieux aquatiques ou terrestres dans lesquels ces composantes interagissent pour créer des réseaux trophiques complexes, des cycles des nutriments et des flux d'énergie. » (Gann et al. 2019).*

État initial : « *État du site de restauration [ou création] immédiatement avant le commencement des activités de restauration écologique [ou création]. » (Gann et al. 2019).*

Évaluation : démarche ponctuelle, éventuellement répétée au cours du temps, consistant à déterminer objectivement le succès d'une opération, d'un projet, etc. mis en œuvre compte tenu de l'objectif à atteindre, d'après des indicateurs. L'évaluation permet d'analyser la pertinence des actions mises en œuvre et l'atteinte des objectifs par l'analyse des données de suivi. Elle peut permettre d'améliorer les projets futurs (FAO 2013).

Fonctions (d'un écosystème) : « *Les mécanismes d'un écosystème résultant des interactions et des relations entre le biote et les éléments abiotiques. Ceci comprend des processus écosystémiques tels que la production primaire, la décomposition, le cycle des nutriments et la transpiration ainsi que des propriétés telles que la compétition et la résilience. » (Gann et al. 2019).*

Format CSV (.csv) : « *[...] format texte dont les données tabulaires sont séparées par des points-virgules (";"). Il s'agit d'une forme très simple de base de données, où chaque ligne est un enregistrement et où les champs sont séparés par un caractère prédéfini. Ce fichier est facilement importable dans une base de données ou un tableur. » (OFB 2022).*

Hydroécocorégion : région homogène d'un point de vue de la géologie, du relief et du climat (Département de Maine-et-Loire 2022).

Hydrologie : « *Étude des eaux et de leurs propriétés. » (Département de Maine-et-Loire 2022).*

Impact direct/indirect (sur un écosystème) : « *un impact délétère [...] et indéniable fait à un écosystème. » (Gann et al. 2019).*

Indicateur : « *une composante ou une mesure de phénomènes environnementaux pertinents utilisés pour décrire ou évaluer les conditions environnementales, les changements ou pour atteindre des objectifs environnementaux. Les phénomènes environnementaux pertinents sont des pressions, des états ou des réponses. » (Gayet et al. 2016).*

Inondation : « *L'inondation est une submersion temporaire, par l'eau, de terres qui ne sont pas submergées en temps normal, quelle qu'en soit l'origine. L'expression recouvre les inondations dues aux crues des rivières, des torrents de montagne et des cours d'eau intermittents méditerranéens, aux remontées de nappe, aux ruissellements urbains et agricoles ainsi que les submersions marines au-delà des limites du rivage de la mer. » (Service d'information du Gouvernement 2022).*

Lagunes : « *[...] petites étendues d'eau douce généralement circulaires et de taille inférieure à 1 hectare [...]. Ces petits plans d'eau naturels dépendent du battement de la nappe d'eau superficielle au cours de*

l'année et sont souvent temporaires. [...] Les lagunes constituent au cœur de la forêt, des zones témoins du niveau de la nappe et donc de l'état de la ressource en eau [...]. » (Conseil général des Landes 2012).

Mare : « *petite étendue d'eau stagnante, permanente ou temporaire, de faible profondeur située dans une dépression naturelle ou artificielle.* » (Larousse 2022).

Masse d'eau : « [...] *découpage territorial élémentaire des Milieux aquatiques destinée à être l'unité d'évaluation de la DCE.* » (Sandre 2018).

Milieu humide : « [...] *une portion du territoire, naturelle ou artificielle, caractérisée par la présence de l'eau. Un milieu humide peut être ou avoir été (par exemple d'après la carte de Cassini ou la carte d'état-major (1820-1966) en couleurs) en eau, inondé ou gorgé d'eau de façon permanente ou temporaire. L'eau peut y être stagnante ou courante, douce, salée ou saumâtre.* » (Sandre 2018).

Nappe (libre) : nappe de faible profondeur communiquant avec la surface et reposant sur une couche géologique imperméable. Son niveau varie principalement en fonction des précipitations (Agence de l'eau Seine-Normandie 2009).

Niveau piézométrique : « *Niveau atteint par l'eau dans un tube atteignant la nappe.* » (Département de Maine-et-Loire 2022). Il correspond à la profondeur entre la surface du sol et la nappe d'eau dans le sol.

Objectifs de restauration/création : « *Les aboutissements écologiques [...] spécifiques recherchés en fin de projet, y compris l'écosystème indigène à restaurer.* » (Gann et al. 2019).

Opération de type « gestion » : « [opérations ayant pour] *objectif général de protéger l'intégrité des écosystèmes indigènes à long terme [en contrant] les processus de dégradation écologique afin de maintenir les attributs d'un écosystème.* » (Gann et al. 2019).

Piézomètre : « *Dispositif servant à mesurer [le niveau] piézométrique en un point donné d'un système aquifère qui indique la pression en ce point, en permettant l'observation ou l'enregistrement d'un niveau d'eau libre ou d'une pression.* » (Département de Maine-et-Loire 2022). Un piézomètre (« *monitoring well* ») correspond à un tube crépiné (perforé, permet l'entrée de l'eau) sur la totalité de sa longueur et enfoncé verticalement dans le sol permettant de mesurer la profondeur de nappe. À la différence d'un « *monitoring well* », un « *piezometer* » est uniquement perforé sur la partie inférieure du tube (quelques centimètres) et permet de rendre compte de la direction des écoulements de l'eau dans le sol (Minnesota Board of Water & Soil Resources 2013).

Pression absolue : elle correspond à la somme de la pression barométrique (ou atmosphérique) additionnée à la pression de la colonne d'eau.

Pression barométrique (ou atmosphérique) : « *Force exercée sur tout corps entouré par l'atmosphère par le poids de la colonne d'air située au-dessus de lui. La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer est de 1013 mb. Cette pression diminue avec l'altitude.* » (OFB 2022).

Projet de restauration/création (d'un écosystème) : « *Toute organisation entreprise pour réaliser le rétablissement notable d'un écosystème indigène [ou sa création], allant de la phase de planification à la mise en œuvre et au suivi. Un projet peut exiger plusieurs accords ou plusieurs cycles de financement. Un projet peut aussi être l'un parmi de nombreux projets faisant parti d'un programme de restauration [ou création] à long terme.* » (Gann et al. 2019).

Restauration écologique : « Processus qui aide au rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit. » (Gann et al. 2019).

Séquence Éviter – Réduire – Compenser (ERC) : « Cette séquence se met en œuvre lors de la réalisation de projets ou de plans/programmes et s'applique à l'ensemble des composantes de l'environnement (article L.122-3 du code de l'environnement). [...] La séquence « éviter, réduire, compenser » a pour objectif d'établir des mesures visant à éviter les atteintes à l'environnement, à réduire celles qui n'ont pu être suffisamment évitées et, si possible, à compenser les effets notables qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits. » (Cerema & CGDD 2018).

Site correspondant à l'objectif de restauration (SCOR) : « Une représentation d'un écosystème indigène qui est la cible de la restauration écologique [...]. Un écosystème de référence représente généralement une version non-dégradée de l'écosystème avec sa flore, sa faune ainsi que d'autres éléments biotiques et abiotiques, des fonctions, des processus et des états de succession qui auraient pu exister sur le site de restauration s'il n'y avait pas eu de dégradation, et ajusté pour tenir compte des conditions environnementales modifiées ou prédites. » (Gann et al. 2019). Il correspond à une référence d'objectif. Celle-ci ne doit pas être confondue avec une référence d'écart, à savoir un site dégradé avant travaux (témoin), tel que mentionné dans la boîte à outils RhoMÉO pour le suivi piézométrique (Collectif RhoMÉO 2017).

Sous-ensemble homogène : « Unité spatiale où l'influence des facteurs abiotiques et biotiques sur le sol est relativement homogène. Les propriétés du sol y sont considérées comme similaires. » (Gayet et al. 2016).

Substrat : « Le sol, le sable, la roche [...] ou tout autre milieu sur lequel se développent les organismes et les écosystèmes. » (Gann et al. 2019).

Suivi : Collecte de données continue concernant un ou plusieurs indicateurs, pour connaître la progression vers l'objectif à atteindre. Le suivi fournit les éléments de base pour l'évaluation (FAO 2013).

Tourbière : « Zone humide, colonisée par la végétation, dont les conditions écologiques particulières ont permis la formation d'un sol constitué d'un dépôt de tourbe. » (OFB 2022).

Trajectoire (de restauration/création ou d'évolution) : « Le cours de l'état d'un écosystème au fil du temps (structure et fonction). Cette trajectoire peut comporter une dégradation, une stase, une adaptation à des conditions environnementales changeantes ou une réponse à la restauration écologique – conduisant idéalement au rétablissement de son intégrité et de sa résilience. » (Gann et al. 2019).

Zone humide : « Terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire, ou dont la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année. » (Art. L212-1 du Code de l'environnement précisé par l'arrêté interministériel du 24 juin 2008 modifié).

Annexes

Annexe 1. Exemple d'une partie du formulaire de déclaration délivré par la DDT Isère.

2/5

Bureau d'Études :

Nom :

Adresse :

Code Postal : Commune :

Téléphone : Portable : Fax :

Email :

2 – Implantation :

Fournir impérativement la situation des ouvrages sur carte IGN au 1/25 000^{ème}, ainsi qu'un plan cadastral au 1/2 500 centré sur l'(les) ouvrage(s).

Commune : Lieu-dit :

Référence cadastrale de la parcelle : section.....n°

Aquifère concerné :

Les travaux se situent-ils dans un périmètre de protection de captage en eau potable ?

Oui Non

Si oui, nom du captage :

Mentionner sur le **plan cadastral**, le cas échéant dans un rayon de 500 m :

- ⊗ les limites des périmètres de protection de captage (renseignements en Mairie),
- ⊗ les zones protégées au titre de Natura 2000 (disponibles sur <http://www.rhone-alpes.ecologie.gouv.fr/>),
- ⊗ décharge ou installation de stockage de déchets ménagers ou industriels,
- ⊗ ouvrage d'assainissement, canalisation transportant divers produits susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines,
- ⊗ stockage d'hydrocarbure ou produits chimiques,
- ⊗ bâtiment d'élevage,
- ⊗ parcelles d'épandage d'effluents d'élevage, ou boues d'origines diverses.

3 – Le projet :

3.1 Conditions de réalisation

Date envisagée de début des travaux :

Durée prévue :

Nom de l'entreprise :

Adresse :

Téléphone :

Personne responsable du chantier :

3.2 Nature de l'ouvrage :

Puits

Forage

Drain

Destination de l'ouvrage (*) :

(*) Mentionner précisément : Alimentation en eau potable, irrigation, arrosage de cultures maraîchères, abreuvement d'animaux, autres usages agricoles, agroalimentaire, artisanat-industrie, chauffage ou climatisation, recherches, études et surveillance des aquifères, fondations, autres usages (à préciser)

Profondeur totale :m

Diamètre de foration(**) :mm

Diamètre du tubage :mm

(**) L'espace intermédiaire est garni de gravier calibré et terminé en partie supérieure par une cimentation d'étanchéité jusqu'au terrain naturel.

3.3 Ouvrages destinés au prélèvement d'eau souterraine :

Si l'ouvrage est réalisé en vue d'effectuer un prélèvement d'eaux souterraines, indiquer :

↳ débit instantané envisagé :m³/h

↳ volume annuel envisagé :m³/an

↳ nature de la pompe (immergée ou de surface, électrique ou thermique) :

↳ autres ouvrages de prélèvement existant dans un rayon de 500 m (les localiser sur la carte IGN) :

↳ dispositif de comptage envisagé :

ATTENTION : ce document ne vaut pas déclaration ou autorisation de prélèvement.

4 – Document d'incidence

a) Précautions prises en vue de prévenir les risques pour l'environnement et notamment celui de pollution des eaux souterraines ou superficielles :

Evacuation des eaux de ruissellement	
Traitement et évacuation des boues, eaux extraites et déblais éventuels pendant le chantier et les essais de pompage	
Isolation des différentes ressources rencontrées modalités de cimentation et de cuvelage	

Annexe 2. Calcul d'une profondeur de nappe à partir de données de pression barométrique d'une station météorologique.

Dans l'exemple suivant, les données de pression barométrique enregistrées par une station météorologique sur la commune de Chambéry (à 20 km environ du site d'étude et approximativement à la même altitude) sont utilisées pour obtenir la profondeur de nappe.

Remarque : certains logiciels fournis par les fabricants permettent le calcul automatique de la profondeur de nappe à partir de données barométriques issues d'une station météorologique.

P_{baro_Chamb} : pression barométrique enregistrée par une station météorologique, en mbar, au temps t ;

H_{ref} : profondeur de référence à laquelle se trouve la nappe lors de la pose du piézomètre (constante).
Mesure manuelle en cm ;

P_{tot} : pression absolue mesurée par la sonde autonome, en mbar, au temps t ;

P_{tot_ref} : pression absolue mesurée lors de la pose du piézomètre et de la mesure de H_{ref}, en mbar (constante) ;

P_{baro_ref} : pression barométrique mesurée lors de la pose du piézomètre et de la mesure de H_{ref}, en mbar (constante) ;

G_s : gravité spécifique, en moyenne égale à 0,999 (constante) ;

0,0101972 : constante permettant de traduire une pression exprimée en mbar en hauteur d'eau ;

H_{nappe} : la profondeur de nappe par rapport à la surface, en cm.

En rouge dans le tableau, les valeurs constantes.

Date	P _{baro_Chamb}	H _{ref}	P _{tot}	P _{tot_ref}	P _{baro_ref}	G _s	Constante mBar	H _{nappe}
11/02/2021	1020,9	-5,216	1117,714	1117,714	1020,9	0,999	0,0101972	-5,216
12/02/2021	1022,8	-5,216	1116,175	1117,714	1020,9	0,999	0,0101972	-1,706
13/02/2021	1029,9	-5,216	1122,792	1117,714	1020,9	0,999	0,0101972	-1,213
...								

Calcul de la profondeur de nappe pour la journée du 13/02/2021 :

$$H_{nappe} = \left(\frac{H_{ref}}{100} - 0,0101972 \times \frac{(P_{tot} - P_{baro_Chamb}) - (P_{tot_ref} - P_{baro_ref})}{G_s} \right) \times 100$$

$$\Downarrow$$

$$-1,213 = \left(\frac{-5,216}{100} - 0,0101972 \times \frac{(1122,792 - 1029,9) - (1117,714 - 1020,9)}{0,999} \right) \times 100$$

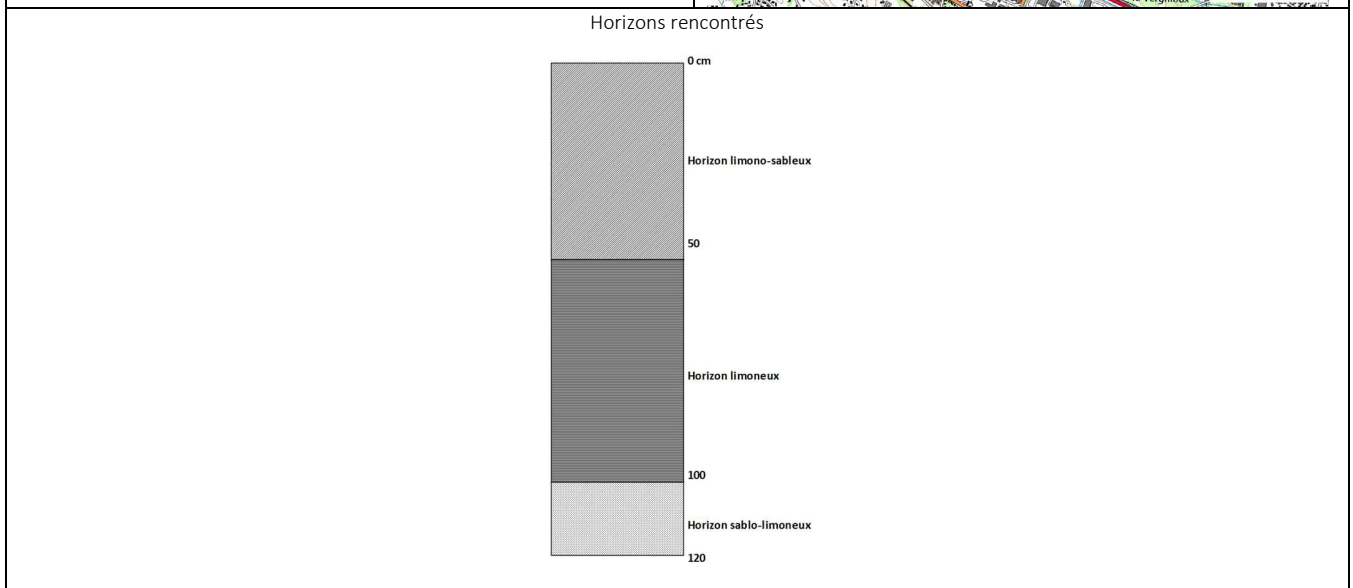
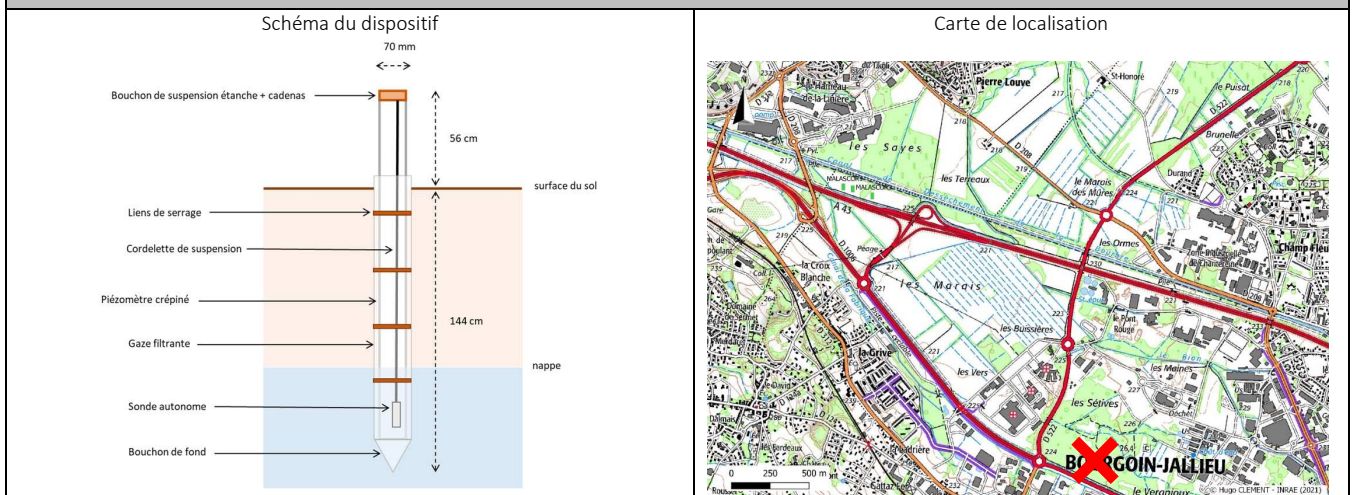
La nappe se trouve à -1,213 cm soit à 1,213 cm au-dessus du sol.

Rappel : certaines sondes enregistrent des valeurs positives lorsque la nappe se trouve sous le niveau de référence (niveau 0 du sol) et des valeurs négatives lorsque le niveau se trouve au-dessus de la référence (ex. 15 cm d'eau au-dessus du sol sera enregistré -15 cm par la sonde).

Se référer au tableur « **Calcul_prof_nappe_station_meteo.xlsx** » pour appliquer la formule de calcul de profondeur de nappe automatiquement.

Annexe 3. Exemple fictif d'un fichier contenant les informations demandées par le BRGM pour l'obtention d'un code BSS et la bancarisation de données piézométriques.

Nom et coordonnées du déclarant	Nom :	Prénom :	Adresse :	Numéro de tél. :
Commune	Bourgoin-Jallieu (38300)			
Date d'installation	16/02/2021			
Nature	Piézomètre			
Usage/fonction	Recherche scientifique : observation des variations de profondeur de nappe libre au cours de l'année, sans prélèvement d'eau. Le piézomètre contient une sonde autonome qui enregistre une donnée de la distance sol-nappe libre toutes les heures.			
Coordonnées géographiques (WGS 84)	X/Longitude		Y/Latitude	
	5.2593		45.5994	
Coordonnées géographiques (Lambert-93)	X		Y	
	876102.73		6502506.41	
Taille du dispositif	200 cm			
Hauteur de la tête du dispositif dépassant du sol	56 cm			
Hauteur du dispositif dans le sol	144 cm			
Profondeur eau/sol	20 cm en dessous de la surface du sol, le 06/07/2021			
Altitude au sol du dispositif	219,55 m d'altitude (donnée GPS centimétrique)			
Diamètre tubage	70 mm			



Annexe 4. Étapes pour renseigner le tableur type mis à disposition.

Étape 1. Téléchargement du tableur type.

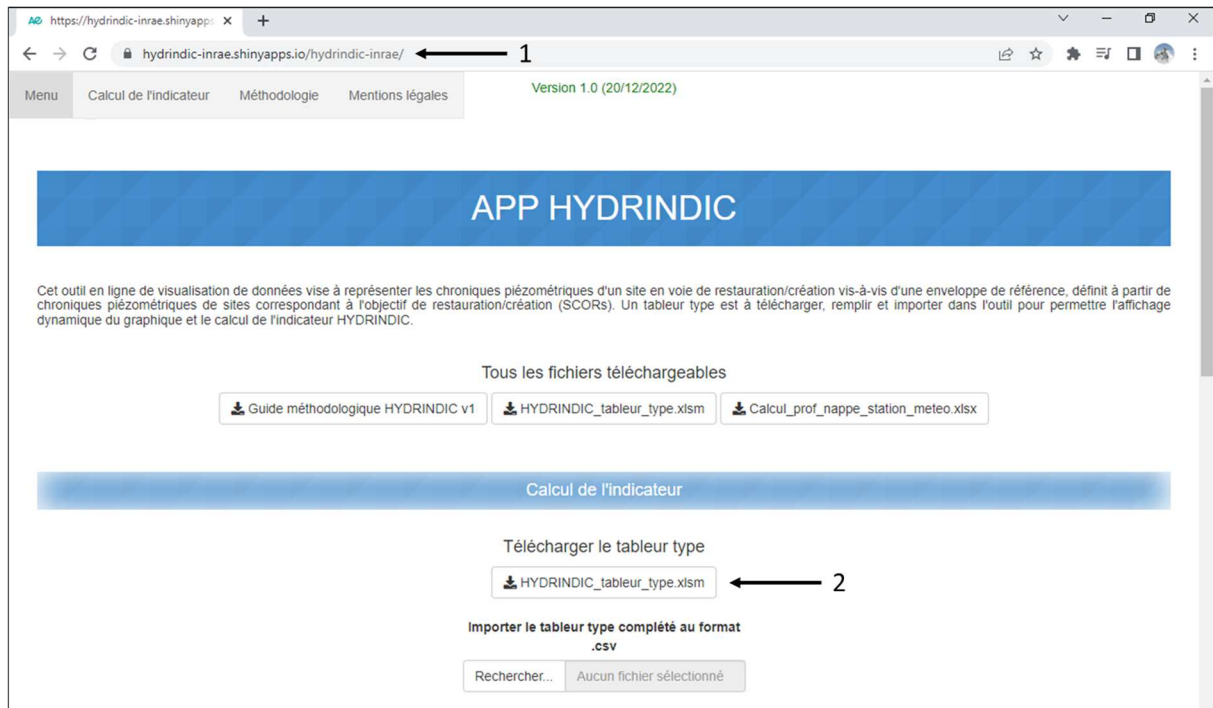


Figure 1. Le tableur type est à télécharger à l'adresse <https://hydrindic-inrae.shinyapps.io/hydrindic-inrae/> (1), en cliquant sur le bouton « HYDRINDIC_tableur_type.xlsm » (2). **Télécharger le tableur une nouvelle fois avant d'évaluer un nouveau site avec l'indicateur.** Cela permet notamment d'éviter les erreurs potentielles dans les formules, la modification des colonnes, etc.

Étape 2. Ouverture du tableur type.

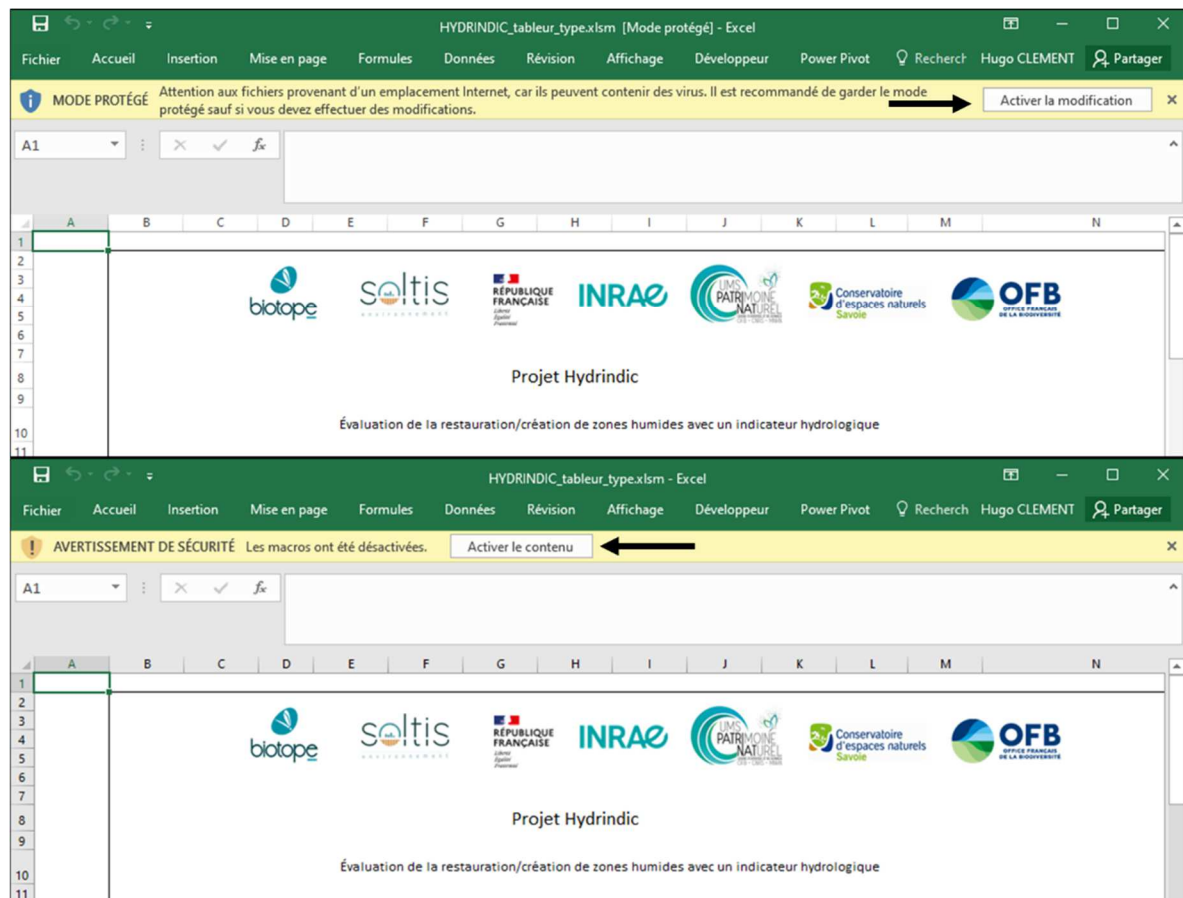


Figure 2. Ouvrir le tableur via Excel® et cliquer sur « Activer la modification » puis sur « Activer le contenu ».

Étape 3. Ajout des données.

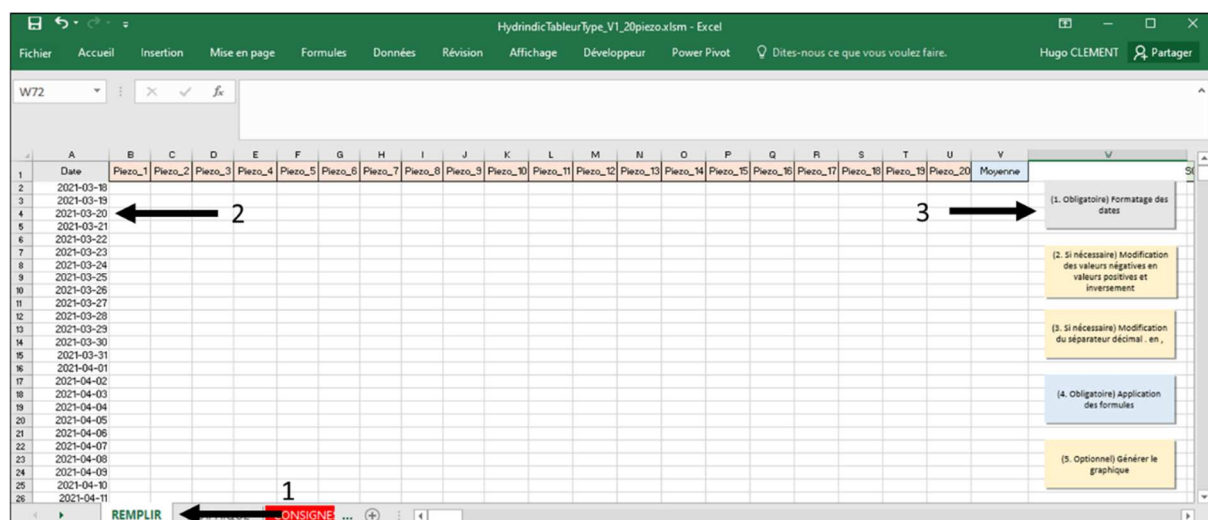


Figure 3. Se placer sur l'onglet « REEMPLIR » (1), ajouter les dates (1 ligne = 1 jour) des données récoltées dans la colonne « Date » (2) puis cliquer sur la macro « (1. Obligatoire) Formatage des dates » (3). Les dates doivent correspondre entre site en voie de restauration/création et SCORs.

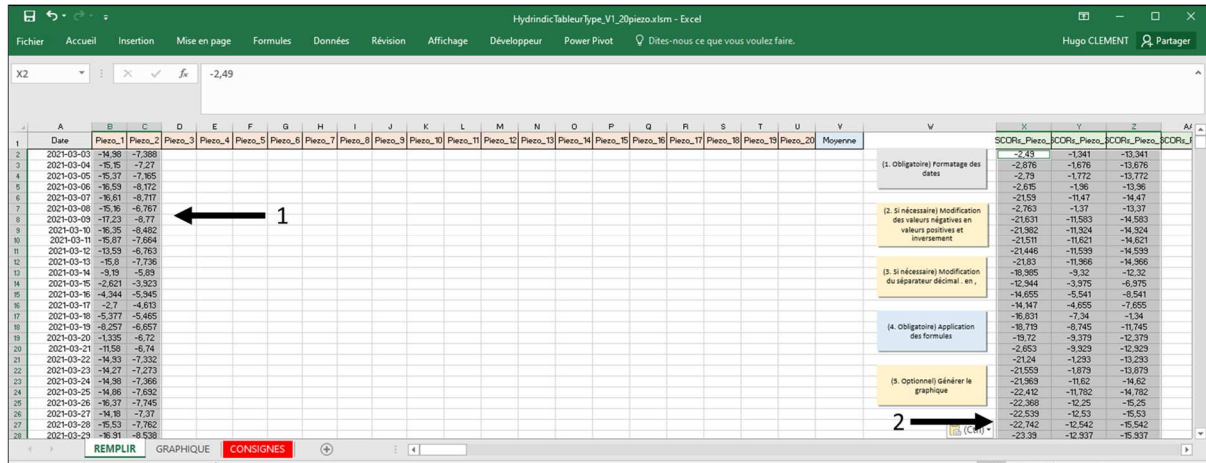


Figure 4. Ajouter les données des piézomètres installés sur le site en voie de restauration/création (colonnes B à U) (1) et les données des piézomètres installés sur les SCORs (colonnes X à AQ) (2) correspondantes aux dates (une donnée par jour). Actuellement, un maximum de 20 piézomètres peut être renseigné pour le site en voie de restauration/création et les SCORs.

Étape 4. Appliquer les formules.

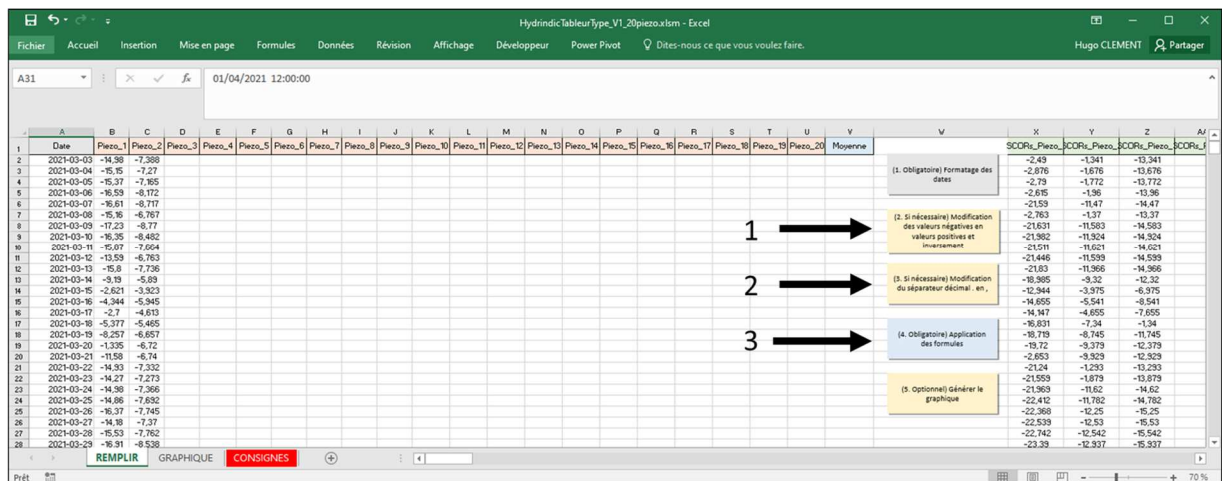


Figure 5. Si nécessaire, il est possible d'utiliser la deuxième macro (1) afin de modifier les valeurs négatives en valeurs positives. La troisième macro (2) peut aussi être utilisé pour modifier rapidement le séparateur décimal de toute les données de « . » à « , ». L'application des formules de moyenne, écart type, etc. (étape obligatoire) s'effectue en cliquant sur la quatrième macro (3).

Étape 5. Générer le graphique.

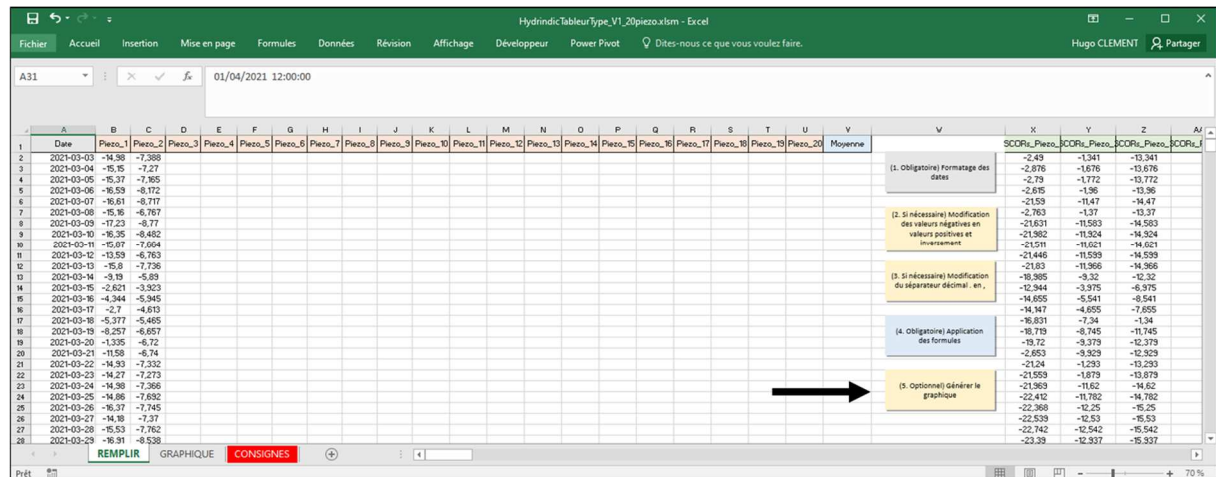


Figure 6. Un graphique contenant l'ensemble des chroniques piézométriques vis-à-vis de l'enveloppe de référence peut être généré en cliquant sur la dernière macro. Une fois la macro lancée, celle-ci peut prendre une dizaine de secondes pour se terminer.

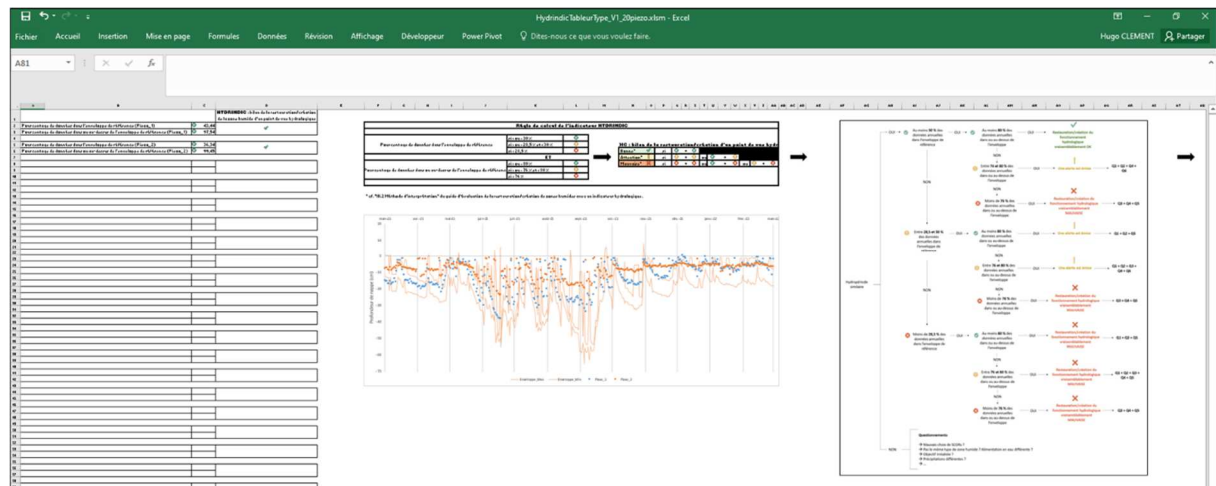


Figure 7. Sur la feuille « GRAPHIQUE », il est possible de mettre en forme le graphique généré (modification des axes, des titres, etc.) et d'y ajouter des données (pluviométrie par ex.). Cette feuille indique pour chaque piézomètre du site en voie de restauration/création s'il rend compte ou non d'une bonne voie de restauration d'un point de vue hydrologique et permet l'interprétation des résultats grâce à l'arbre de décision (cf. III. Analyse et interprétation).

Étape 6. Importation dans l'outil en ligne (optionnel).

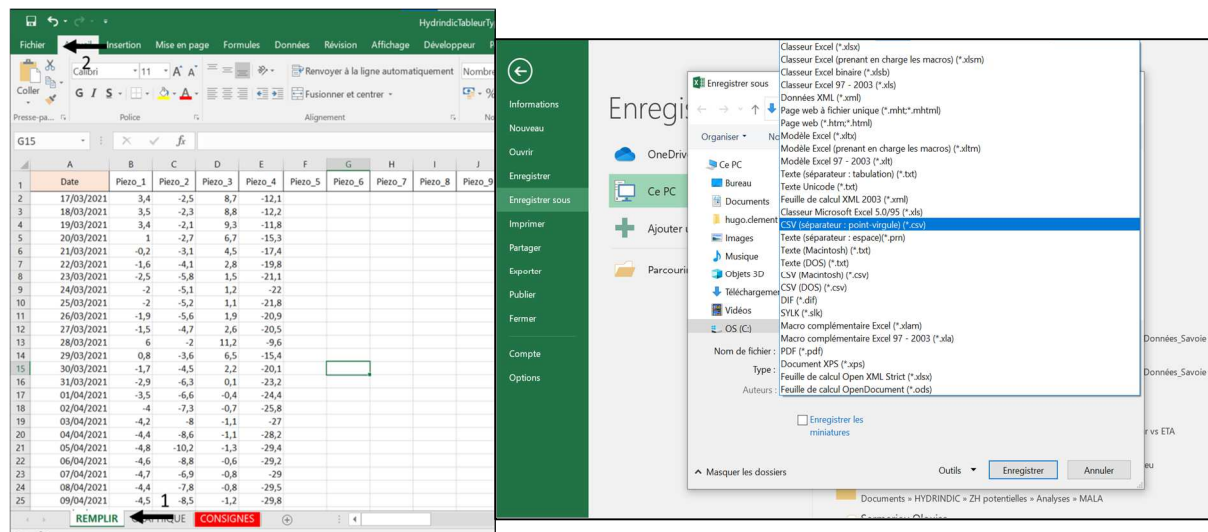


Figure 8. Se placer sur la feuille « REMPLIR » (1) puis sélectionner le menu « Fichier » (2), « Enregistrer sous ». Choisir un dossier de destination et choisir « CSV : séparateur point-virgule (.csv) » comme type d'extension de fichier. Attention : bien se positionner sur la feuille « REMPLIR » lors de l'enregistrement en .CSV.

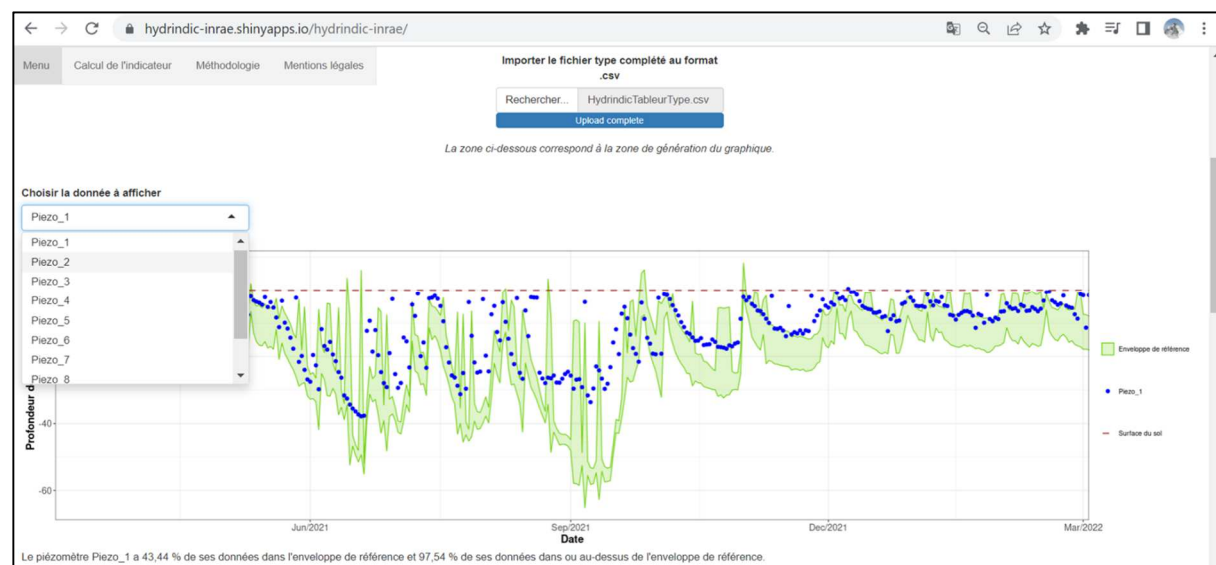


Figure 9. Se rendre à l'adresse <https://hydrindic-inrae.shinyapps.io/hydrindic-inrae/> et importer votre fichier .csv via le bouton « Rechercher... ». Une fois le graphique généré, vous pouvez sélectionner, à gauche, dans le menu déroulant « Choisir la donnée à afficher » les données piézométriques à afficher au regard de l'enveloppe de référence.

Bibliographie

Agence de l'eau Seine-Normandie. 2009. Les eaux souterraines en France. Collection « Les enjeux des Géosciences », BRGM Éditions, 56 p.

Barnaud, G. & Fustec, E. 2007. Conserver les milieux humides : pourquoi ? comment ? Éducagri éditions/Quae éditions, 295 p.

Bensettiti, F., Gaudillat, V. et Haury, J. (coord.). 2002. Cahiers d'habitats Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 3 - Habitats humides. MATE/MAP/MNHN, éditions « La Documentation française », 457 p.

Bernard, P. 1994. Les zones humides, rapport d'évaluation. Comité Interministériel de l'évaluation des politiques publiques, éditions « La documentation française », 169 p.

Berthier, L., Bardy, M., Chenu, J.P., Guzmova, L., Laroche, B., Lehmann, S., Lemercier, B., Martin, M., Merot, P., Squidant, H., Thiry, E. et Walter, C. 2014. Enveloppes des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine, notice d'accompagnement. Programme de modélisation des milieux potentiellement humides de France.

Brinson, M.M., Hauer, F.R., Lee, L.C., Nutter, W.L. and Rheinhardt, R.D. 1995. A Guidebook for Application of Hydrogeomorphic Assessments to Riverine Wetlands. Report. East Carolina Univ Greenville NC, 219 p.

Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). « Chronique piézométrique » dans « Glossaire ». Consulté le 14 février 2022 sur <https://economie.eaufrance.fr/glossaire/chronique-piezometrique>.

Calhoun, A.J.K., Arrigoni, J., Brooks, R.P., Hunter, M.L. and Richter, S.C. 2014. Creating Successful Vernal Pools: A Literature Review and Advice for Practitioners. *Wetlands* 34, 1027–1038.

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) & Commissariat général au développement durable (CGDD). 2018. Évaluation environnementale - Guide d'aide à la définition des mesures ERC. Collection « Thema » du Ministère de la Transition écologique, 134 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*, J.A. Kusler & M.E. Kentula edition, Island Press, Washington D.C., 616 p.

Collectif LigéRO. 2021. LigéRO, version adapté de la boîte à outils de suivi des zones humides du Bassin Rhône-Méditerranée. Conservatoire d'espaces naturels Centre-Val de Loire, 173 p.

Collectif RhoMéO. 2017. Guide méthodologique d'utilisation des indicateurs pour le suivi des travaux de restauration, version 1. Conservatoire d'espaces naturels de Savoie, CPO thématique « Trame bleue Espaces et Continuités », 25 p.

McCarter, P.R., Colin & Price, S., Jonathan. 2013. The hydrology of the Bois-des-Bel bog peatland restoration: 10 years post-restoration. *Ecohydrology* 8, 173-187.

Connell, J.H. & Slatyer, R.O. 1977. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *The American Naturalist* 111, 1119-1144.

Conseil général des Landes. 2012. Les lagunes de la forêt des Landes de Gascogne. *Les Actions Environnementales*, 11 p.

Cooper, D. J., Kaczynski, K. M., Sueltenfuss, J., Gaucherand, S. and Hazen, C. 2017. Mountain wetland restoration: The role of hydrologic regime and plant introductions after 15 years in the Colorado Rocky Mountains, U.S.A. *Ecological Engineering* 101, 46-59.

Cosandey, C., & Robinson, M. 2012. *Hydrologie continentale*. 2^e édition, éditions « Armand Colin », collection « U », 448 p.

Cowardin, L. M., Carter, V., Golet, F. C. and LaRoe, E.T. 1979. Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, 142 p.

Craft, C. 2015. *Creating and Restoring wetlands*. 1st edition, Elsevier, 358 p.

Dee, S. M. & Ahn, C., 2012. Soil properties predict plant community development of mitigation wetlands created in the Virginia Piedmont, USA. *Environmental Management* 49, 1022-1036.

Département de Maine-et-Loire. « Glossaire ». Consulté le 14 février 2022 sur <https://eau.maine-et-loire.fr/glossaire>.

Direction de l'Eau et de la Biodiversité. 2021. Synthèse des projets de recherche et besoins opérationnels consacrés aux milieux humides sur la période 2011-2021. *Milieux humides, recherche et développement*, 120 p.

Forum des Marais Atlantiques (FMA), 2014. Réalisation et mise en place de piézomètres artisanaux. Réseau d'expérimentation sur la réhabilitation de zones humides du Finistère. Fiche technique, 3 p.

Foster, D. L., Shah, N., Ross, M., Ladde, G. S. and Wang, P. 2008. Using frequency analysis to determine wetland hydroperiod. *Geology Faculty Publications*, 196.

Gann, G.D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C.R., Jonson, J., Hallett, J.G., Eisenberg, C., Guariguata, M.R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K. and Dixon, K.W. 2019. *International principles and standards for the practice of ecological restoration*. 2nd edition, Society for Ecological Restoration, 101 p.

Gaucherand, S., Cooper, D. J., and 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.

Gayet, G., Baptist, F., Baraille, L., Caessteker, P., Clément, J.-C., Gaillard J., Gaucherand, S., Isselin-Nondedeu, F., Poinot C., Quétiér, F., Touroult, J. et Barnaud, G. 2016. Guide de la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides, version 1. Onema, collection « Guides et protocoles », 186 p.

Gayet, G., Vivier, A., Caessteker, P., Touroult, J. et Barnaud, G. 2016. Synthèse des acquis et des besoins

opérationnels - Zones humides, recherches et développements (2001 - 2011) - Fascicule 2 : contributions scientifiques à l'action. Onema, MNHN, Rapport SPN 2016 – 116., 180 p.

Gayet, G., Baptist, F., Biaunier, P., Caessteker, P., Clément, J.-C., Gaucherand, S., Isselin-Nondedeu, F., Lemot, A., Mesléard, F., Padilla, B. et Pelegrin, O. 2023. Guide de la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides, version 2. Office français de la biodiversité, collection « Guides et protocoles ». À paraître.

Green, R. H. 1979. Sampling design and statistical methods for environmental biologists. John Wiley and sons, New York, 272 p.

Grégoire, F., Amat, J.-P., Das Graças, E. et Hauguel, J. C. 2003. Zones humides, contraintes climatiques et richesses patrimoniales : l'exemple des Landes de Versigny (Aisne, Bassin Parisien, France). Publication de l'Association Internationale de Climatologie 15.

In-Situ. 2013. Operator's manual, Rugged TROLL® 100 and 200 and Rugged BaroTROLL Instruments.

Larousse. « Dictionnaire en ligne ». Consulté le 14 février 2022 sur <https://www.larousse.fr/>.

Maltby, E. & Barker, T. 2009. The wetlands handbook. Blackwell Publishing Ltd, 1072 p.

Meyer, C.K., Whiles, M.R. and Baer, S.G. 2010. Plant Community Recovery following Restoration in Temporally Variable Riparian Wetlands. Restoration Ecology 18, 52-64.

Minnesota Board of Water & Soil Resources. 2013. Hydrologic monitoring of wetlands. MN board of water & soil resources supplemental guidance, 45 p.

Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. 2015. Wetlands. 5th edition, John Wiley & Sons, 744 p.

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.

Office français de la biodiversité (OFB). 2021. Visioconférence « Forum des gestionnaires de la biodiversité 2021 ». Consulté le 05/12/2022 sur <http://forumdesgestionnaires.espaces-naturels.fr/milieus-humides/programme>.

Office français de la biodiversité (OFB). « Glossaire ». Consulté le 14 février 2022 sur <https://economie.eaufrance.fr/glossaire>.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Unit Ten: Monitoring and Evaluation. 2013. Project planning and management, SOAS/CeDEP.

Pautou, G., Girel, J.M, Peiry, J.L., Hughes, F., Rirchards, K., Foussadier, R., Garguet-Duport, B., Harris, T., et 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, tome III, 41-66.

Peters, M., Clarkson, B., Watts, C., Sorrell, B., Bodmin, K., Suren, A., Campbell, D., Schallenberg, M. and Cadmus, R. 2012. Wetland restoration: a handbook for New Zealand freshwater systems. Manaaki Whenua Press, 273 p.

Porteret, J. 2014. Dynamique hydrologique de la nappe piézomètres, version 1. Extrait de la boîte à outils de suivi des zones humides, Conservatoire d'espaces naturels de Savoie, 28 p.

R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Rolan-Meynard, M., Vivier, A., Reyjol, Y., Boutet-Berry, L., Bouchard, J., Mangeot, P., Navarro, L., Melun, G., Moreira-Pellet, B., Bramard, M., Le Bihan, M., Magand, C., Leurent T., Vigneron T., Cagnant M., Bourrain X., Morel A. et Kreutzenberger K. 2019. Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau. Agence française pour la biodiversité, Collection « Guides et protocoles », 190 p.

Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau (Sandre). 2018. Dictionnaire des données, Description des milieu humides, version 3.

Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau (Sandre). 2020. Acquisition des données de pré-localisation, d'inventaire et de suivi sur le Milieu Humide, version 1.1.

Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau (Sandre). 2020. Document de présentation - Description du référentiel hydrographique (BD TOPAGE®).

Service d'information du Gouvernement. « Inondation » dans « Risques prévention des risques majeurs ». Consulté le 14 février 2022 sur <https://www.gouvernement.fr/risques/inondation>.

Smith, S. 2012. Manual Level Mode Correction for Non-Vented Sensors. Technical Note, In-Situ Inc., 4 p.

Sueltenfuss, J. P., & D. J. Cooper. 2019. A new approach for hydrologic performance standards in wetland mitigation. *Journal of Environmental Management* 231, 1154-1163.

Tiner, R.W. 2017. Wetland indicators: a guide to wetland identification, delineation, classification, and mapping. Taylor & Francis, 606 p.

Wasson, J.-G., Chandesris, A., Pella, H., et Blanc, L. 2004. Les hydro-écorégions: une approche fonctionnelle de la typologie des rivières pour la Directive cadre européenne sur l'eau. *Ingénieries eau-agriculture-territoires* 40, 3-10.

Wilson, R. F., and Mitsch, W. J. 1996. Functional assessment of five wetlands constructed to mitigate wetland loss in Ohio, USA. *Wetlands* 16, 436-451.



Centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes

2 rue de la Papeterie
38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex
Tél. : +33 1 (0)4 76 76 27 27

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>