



# > HYDRINDIC

Évaluation des opérations de restauration/création de zones humides avec un indicateur hydrologique

# > Introduction

## Contexte

- Restauration/création de zones humides : certains échecs pourraient être évités

**L'hydrologie en premier !**



**Le maintien d'un bon fonctionnement hydrologique détermine l'avenir d'une zone humide sur le long terme**

- Pour les gestionnaires des zones humides : le suivi hydrologique semble difficile
- Pour les services de l'État (cadre ERC) : besoin de critères pour évaluer si un projet de restauration/création atteint ses objectifs

# > Introduction

## Hydrindic : un projet mené entre 2019 et 2022

- Rassembler les acteurs impliqués dans la restauration des zones humides



**1/ Promouvoir l'utilisation des piézomètres**

**2/ Fournir un indicateur d'évaluation du succès des opérations de restauration/création de zones humides facile à mettre en œuvre (incluant l'analyse des données)**

## Quel indicateur utiliser ?

- D'après les travaux de Sueltenfuss & Cooper (2019) aux Etats-Unis

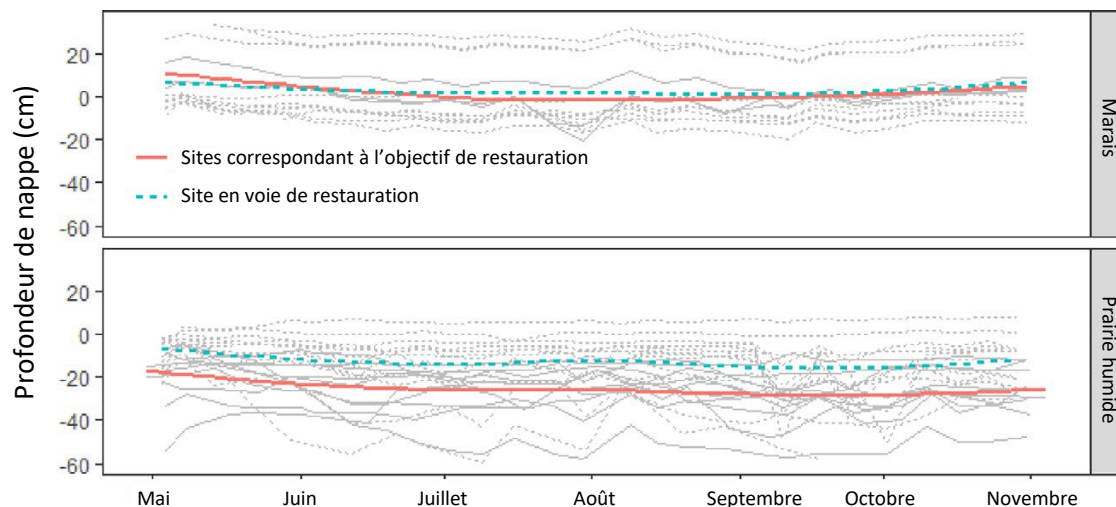


Fig. 1. Chroniques piézométriques pour des zones humides en voie de restauration (tiré) et des sites correspondant à l'objectif de restauration (uni) : marais et prairies humides en 2001. En gris, la profondeur de nappe mesurée sur chaque site. En bleu et rouge, la moyenne de profondeur de nappe pour, respectivement, les zones humides en voie de restauration et les sites correspondant à l'objectif de restauration.\*

Comparer  
l'hydrologie d'un site à restaurer/en voie de restauration (ou création)  
avec  
l'hydrologie de Sites COrrispondant à l'Objectif de Restauration (SCORs)

# > Méthode

## Sélection des SCORs

- Pour chaque zone humide en voie de restauration : des sites correspondant à l'objectif de restauration (SCORs)

Site en voie de restauration/création



SCORs



## > Méthode

### Pour chaque site (en voie de restauration/création et SCORs)

- Piézomètres avec enregistrement automatique des variations de nappe
- Suivi synchrone entre les sites (en même temps)

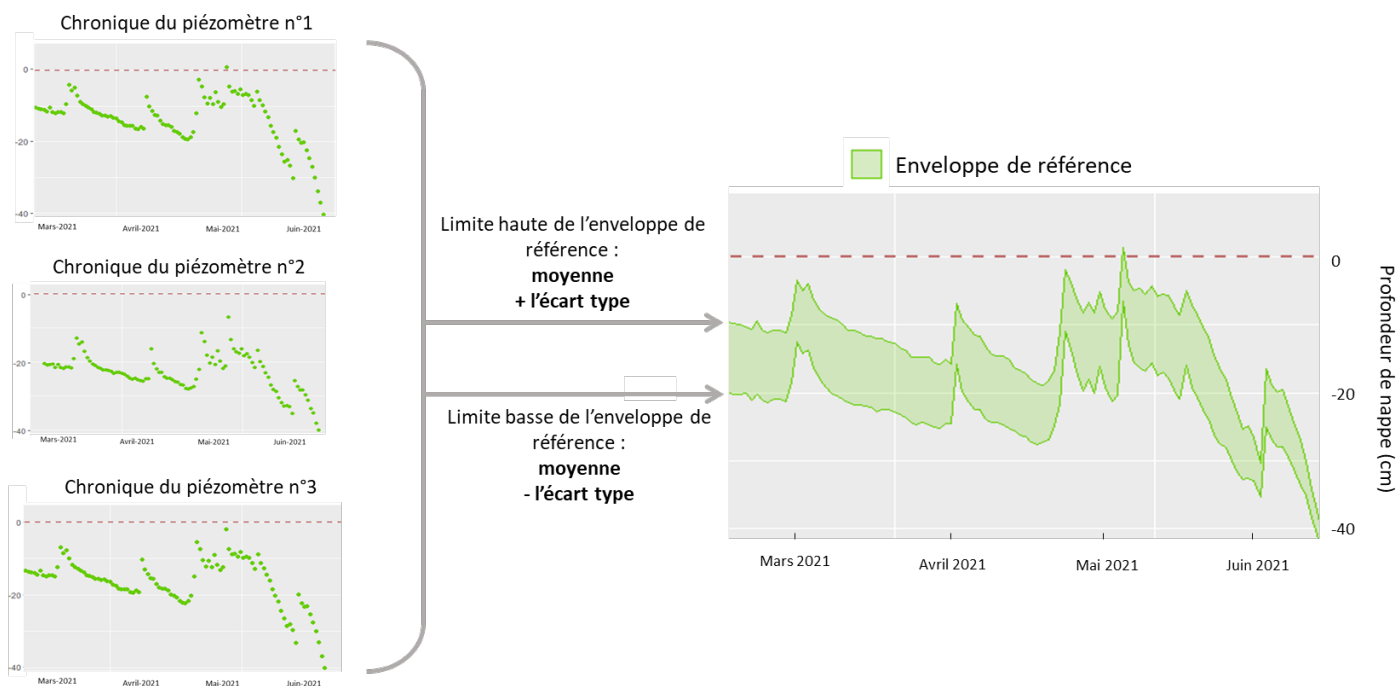


## ➤ Méthode

### Construction d'une enveloppe de référence = gamme de variation de profondeur de nappe acceptable pour un type de zone humide

➤ Vous avez besoin des données des piézomètres des SCORs

➤ Vous calculez la moyenne de la profondeur de nappe +/- écart-type



## Construction d'une enveloppe de référence

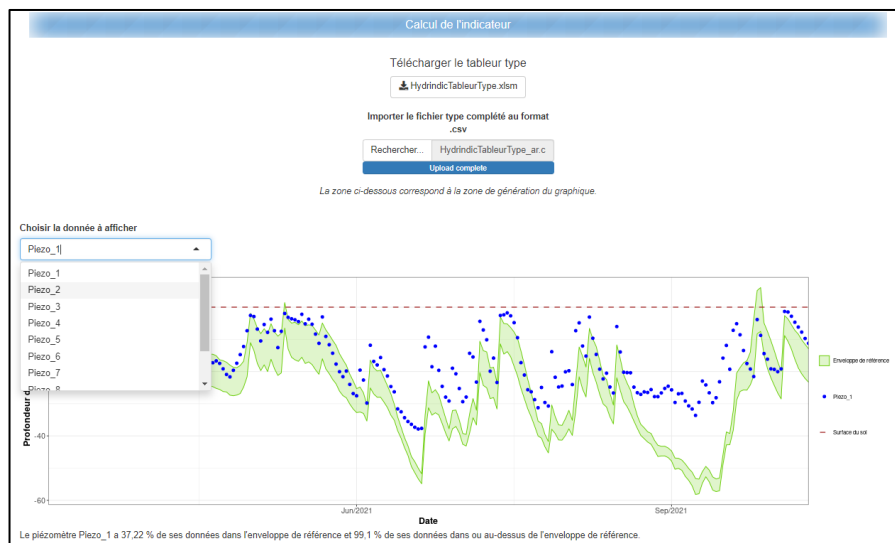
Tableur pré-rempli et outil en ligne

- Macros sous Microsoft Excel
- R et le package Shiny



Calculer l'indicateur et construire automatiquement le graphique

| HydrindicTableurType_NEW - Copie.xlsx - Excel |         |         |         |         |         |         |         |         |          |         |                                                                            |               |               |               |               |
|-----------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| B                                             | C       | D       | E       | F       | G       | H       | I       | J       | K        | L       | M                                                                          | N             | O             | P             | Q             |
| Piezo_1                                       | Piezo_2 | Piezo_3 | Piezo_4 | Piezo_5 | Piezo_6 | Piezo_7 | Piezo_8 | Piezo_9 | Piezo_10 | Moyenne |                                                                            | SCORs_Piezo_1 | SCORs_Piezo_2 | SCORs_Piezo_3 | SCORs_Piezo_4 |
| -14,983                                       | -7,388  |         |         |         |         |         |         |         |          | -11,19  | (1) Formatage des dates                                                    | -10,341       | -20,49        | -13,341       |               |
| -15,145                                       | -7,027  |         |         |         |         |         |         |         |          | -11,09  | (2) Modification des valeurs négatives en valeurs positives et inversement | -10,676       | -20,876       | -13,676       |               |
| -15,869                                       | -7,165  |         |         |         |         |         |         |         |          | -11,27  |                                                                            | -10,772       | -20,709       | -13,772       |               |
| -16,059                                       | -8,172  |         |         |         |         |         |         |         |          | -12,12  |                                                                            | -10,96        | -20,615       | -13,96        |               |
| -16,601                                       | -8,717  |         |         |         |         |         |         |         |          | -12,66  |                                                                            | -11,407       | -21,59        | -14,407       |               |
| -15,016                                       | -6,767  |         |         |         |         |         |         |         |          | -10,89  |                                                                            | -10,37        | -20,763       | -13,37        |               |
| -17,231                                       | -8,707  |         |         |         |         |         |         |         |          | -12,97  |                                                                            | -11,583       | -21,631       | -14,583       |               |
| -16,352                                       | -8,482  |         |         |         |         |         |         |         |          | -12,42  |                                                                            | -11,924       | -21,982       | -14,924       |               |
| -15,865                                       | -7,664  |         |         |         |         |         |         |         |          | -11,76  |                                                                            | -11,621       | -21,511       | -14,621       |               |
| -13,591                                       | -6,763  |         |         |         |         |         |         |         |          | -10,18  |                                                                            | -11,599       | -21,446       | -14,599       |               |
| -15,796                                       | -7,736  |         |         |         |         |         |         |         |          | -11,77  |                                                                            | -11,966       | -21,803       | -14,966       |               |
| -9,019                                        | -5,89   |         |         |         |         |         |         |         |          | -7,45   | (3) Modification du séparateur décimal en ,                                | -9,32         | -18,985       | -12,32        |               |
| -2,621                                        | -3,923  |         |         |         |         |         |         |         |          | -3,27   |                                                                            | -9,375        | -12,944       | -6,975        |               |
| -4,344                                        | -5,945  |         |         |         |         |         |         |         |          | -5,14   |                                                                            | -5,541        | -14,655       | -8,541        |               |
| -2,7                                          | -4,613  |         |         |         |         |         |         |         |          | -3,66   |                                                                            | -4,655        | -14,147       | -7,655        |               |
| -5,377                                        | -5,465  |         |         |         |         |         |         |         |          | -5,42   |                                                                            | -7,034        | -16,831       | -10,034       |               |
| -8,257                                        | -6,657  |         |         |         |         |         |         |         |          | -7,46   |                                                                            | -8,745        | -18,719       | -11,745       |               |
| -10,335                                       | -6,702  |         |         |         |         |         |         |         |          | -8,52   | (4) Application des formules                                               | -9,379        | -19,702       | -12,379       |               |
| -11,576                                       | -6,704  |         |         |         |         |         |         |         |          | -9,14   |                                                                            | -9,929        | -20,653       | -12,929       |               |
| -14,093                                       | -7,332  |         |         |         |         |         |         |         |          | -10,71  |                                                                            | -10,293       | -21,024       | -13,293       |               |
| -14,269                                       | -7,273  |         |         |         |         |         |         |         |          | -10,77  |                                                                            | -10,879       | -21,559       | -13,879       |               |
| -14,981                                       | -7,366  |         |         |         |         |         |         |         |          | -11,17  |                                                                            | -11,602       | -21,969       | -14,602       |               |
| -14,864                                       | -7,692  |         |         |         |         |         |         |         |          | -11,28  | (5) Générer le graphique                                                   | -11,782       | -22,412       | -14,782       |               |
| -16,369                                       | -7,745  |         |         |         |         |         |         |         |          | -12,06  |                                                                            | -12,025       | -22,368       | -15,025       |               |
| -14,18                                        | -7,307  |         |         |         |         |         |         |         |          | -10,74  |                                                                            | -12,53        | -22,539       | -15,53        |               |

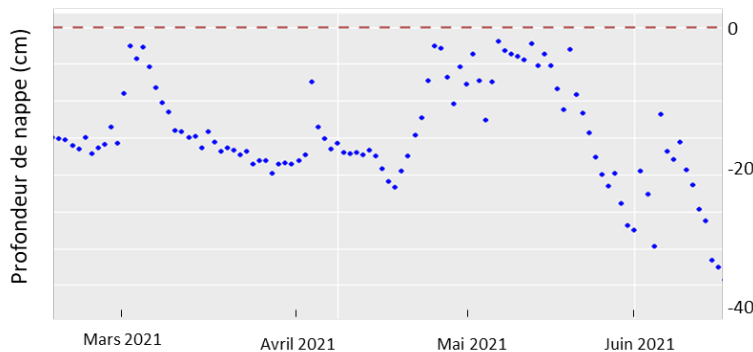


## Calcul de l'indicateur

### > Chroniques piézométriques

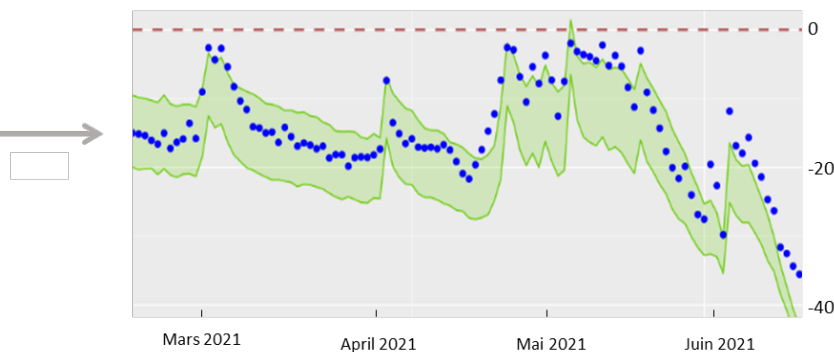
Site en voie de restauration

Données du piézomètre n°1 du site en  
voie de restauration



Piézomètre n°1 du site en voie de restauration vs  
Enveloppe de référence

Enveloppe de référence



## Ce qu'il faut regarder

- > Les hydropériodes sont-elles similaires ?
- > % des données dans l'enveloppe de référence

## > Exemple 1

### Site 1 : restauration/création d'une roselière (*Phragmites australis*)

Site en voie de restauration



Sur le site : *Phragmites australis*



Site correspondant à l'objectif de restauration



Objectif : *Phragmites australis*

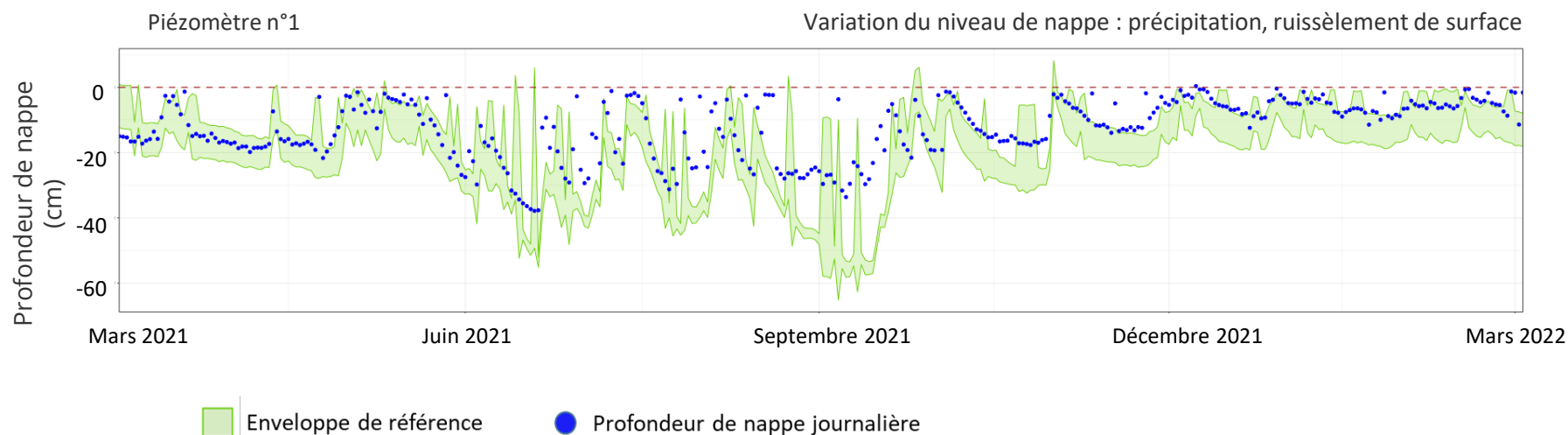
**Localisation :** Auvergne-Rhône-Alpes

**Opérations :** déblayement, bouchage de drains (2020)

**Type de zone humide (HGM):** plateau

# ➤ Exemple 1

## Site 1



### Piézomètre n°1

- 43,44 % des données **dans** l'enveloppe de référence
- 97,54 % des données **dans ou au-dessus** de enveloppe de référence

## > Exemple 2

### Site 2 : Création d'une Aulnaie marécageuse

En voie de restauration



Sur site : Mégaphorbiaies + joncs



Site correspondant à l'objectif de restauration

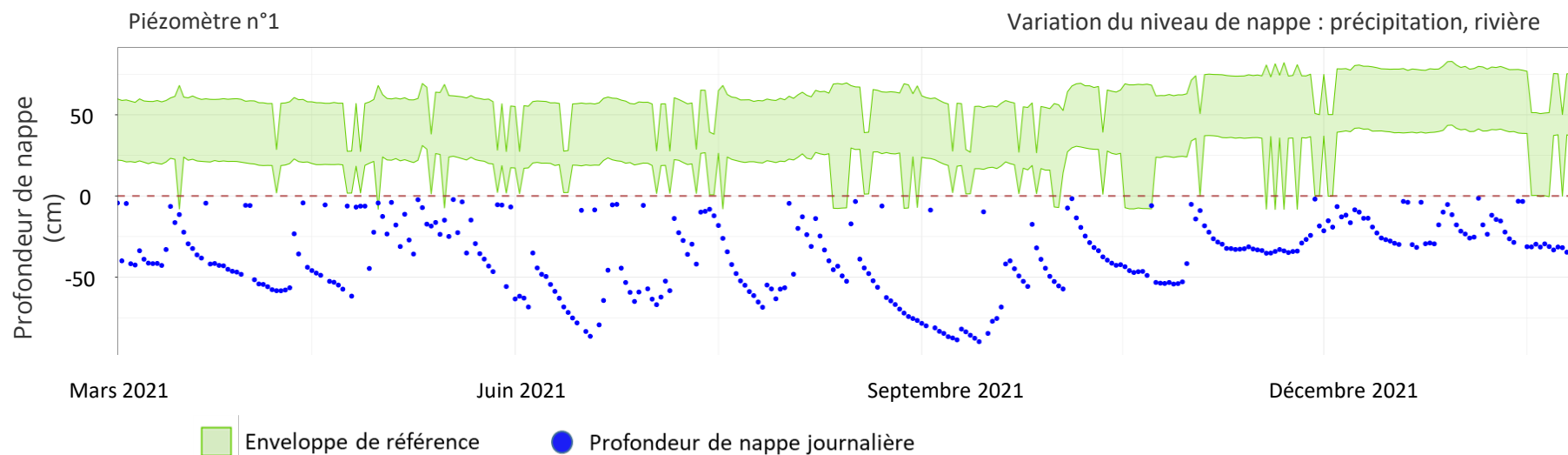


Objectif : Aulnaie marécageuse sur tourbe

**Localisation :** Auvergne-Rhône-Alpes  
**Opérations :** déblayement (2015)  
**Type de zone humide (HGM):** rivulaire

## ➤ Exemple 2

### Site 2



### Piézomètre n°1

- 0,6 % des données **dans** l'enveloppe de référence
- 0,6 % des données **dans ou au-dessus** de l'enveloppe de référence

## > Arbre de décision

**Le résultat est parfois plus ambiguë:**

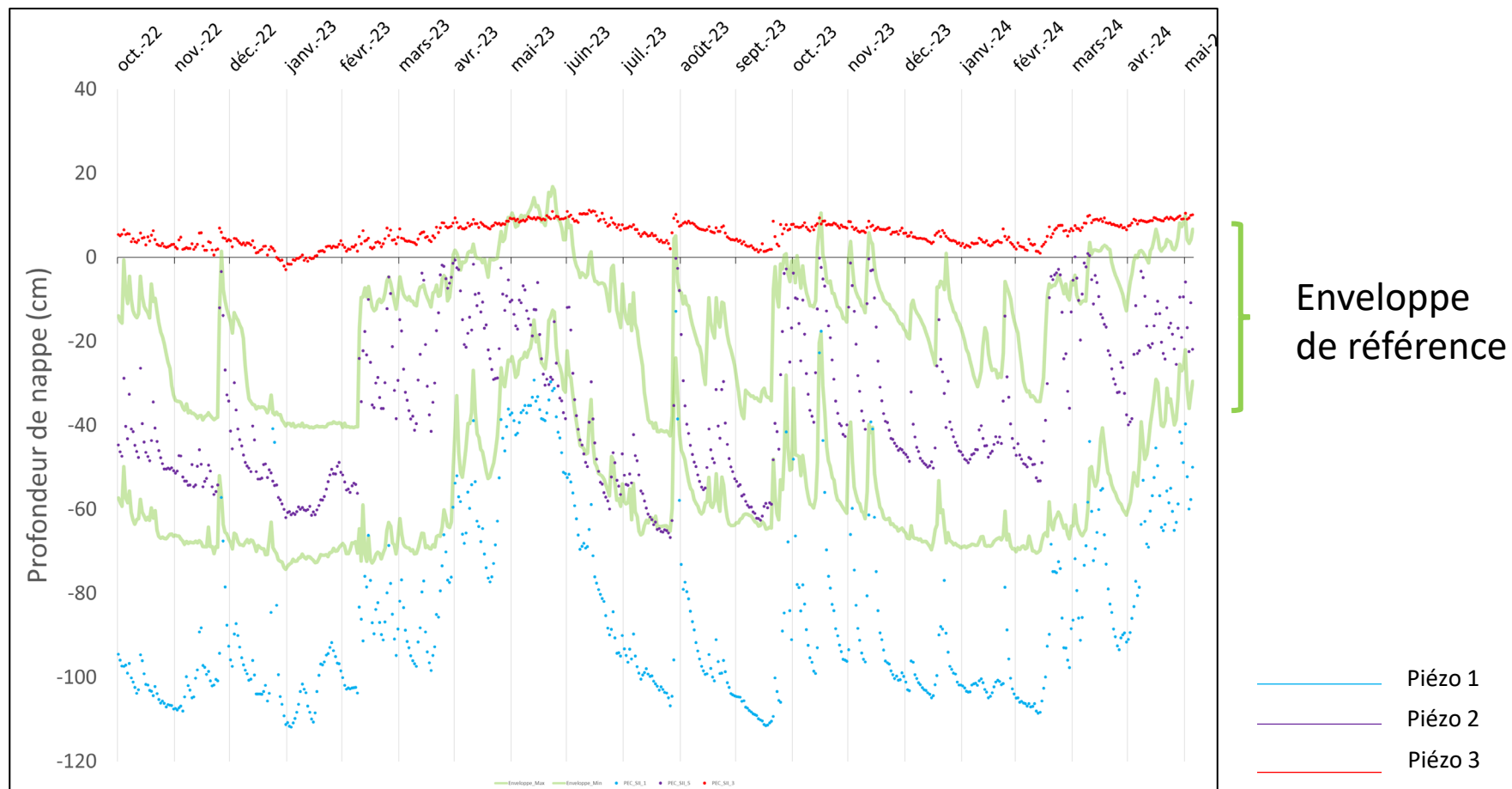
|                                                                                |          | Bilan<br>Restauration ZH<br>point de vue<br>hydrologique |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------|
| Pourcentage de données dans l'enveloppe de référence (Piezo_2)                 | ✓ 89,06  | ✓                                                        |
| Pourcentage de données dans ou au-dessus de l'enveloppe de référence (Piezo_2) | ✓ 93,50  |                                                          |
| Pourcentage de données dans l'enveloppe de référence (Piezo_3)                 | ✗ 3,76   | ✗                                                        |
| Pourcentage de données dans ou au-dessus de l'enveloppe de référence (Piezo_3) | ✓ 100,00 |                                                          |
| Pourcentage de données dans l'enveloppe de référence (Piezo_4)                 | ✓ 75,21  | !                                                        |
| Pourcentage de données dans ou au-dessus de l'enveloppe de référence (Piezo_4) | ! 76,24  |                                                          |

Si on se retrouve avec ! ou ✗

→ un arbre de décision qui amène à se poser les bonnes questions

## ➤ Arbre de décision

### Exemple 3 : 18 mois de suivis - Graphique produit



## > Arbre de décision

### Résultat du calcul automatique de l'indicateur :

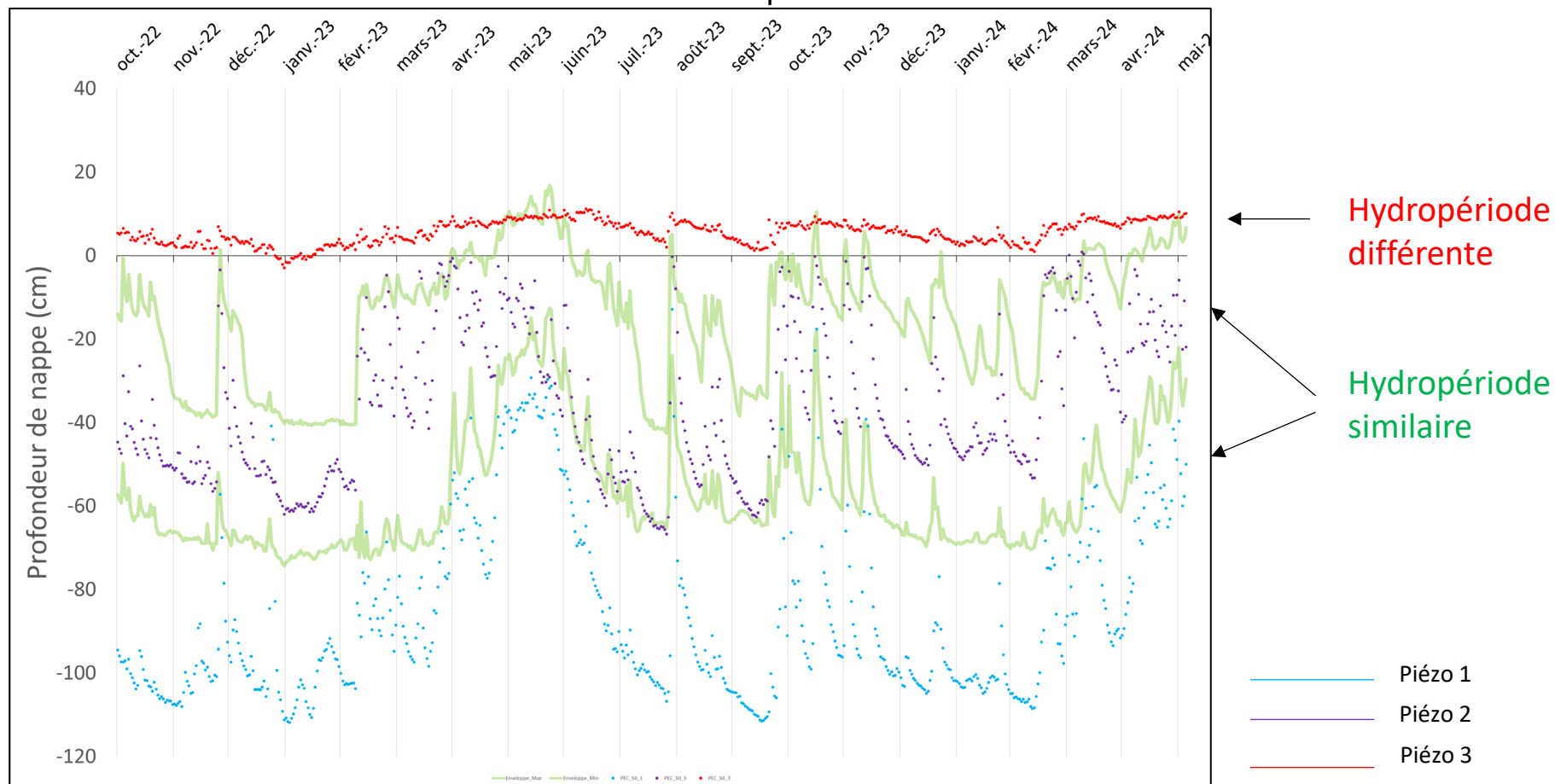
|                                                                                |   |        | HYDRINDIC : bilan de la<br>restauration/création de la zone<br>humide d'un point de vue<br>hydrologique |
|--------------------------------------------------------------------------------|---|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pourcentage de données dans l'enveloppe de référence (Piezo_1)                 | ✗ | 1.37   | ✗                                                                                                       |
| Pourcentage de données dans ou au-dessus de l'enveloppe de référence (Piezo_1) | ✗ | 1.37   |                                                                                                         |
| Pourcentage de données dans l'enveloppe de référence (Piezo_2)                 | ✓ | 89.06  | ✓                                                                                                       |
| Pourcentage de données dans ou au-dessus de l'enveloppe de référence (Piezo_2) | ✓ | 93.50  |                                                                                                         |
| Pourcentage de données dans l'enveloppe de référence (Piezo_3)                 | ✗ | 3.76   | ✗                                                                                                       |
| Pourcentage de données dans ou au-dessus de l'enveloppe de référence (Piezo_3) | ✓ | 100.00 |                                                                                                         |

- Un seul secteur est adapté à l'objectif sur le plan hydrologique (restauration hydro réussie)
- Quid des 2 autres secteurs ? → **arbre de décision**

# > Arbre de décision

## Question 1 : L'hydropériode est-elle similaire ?

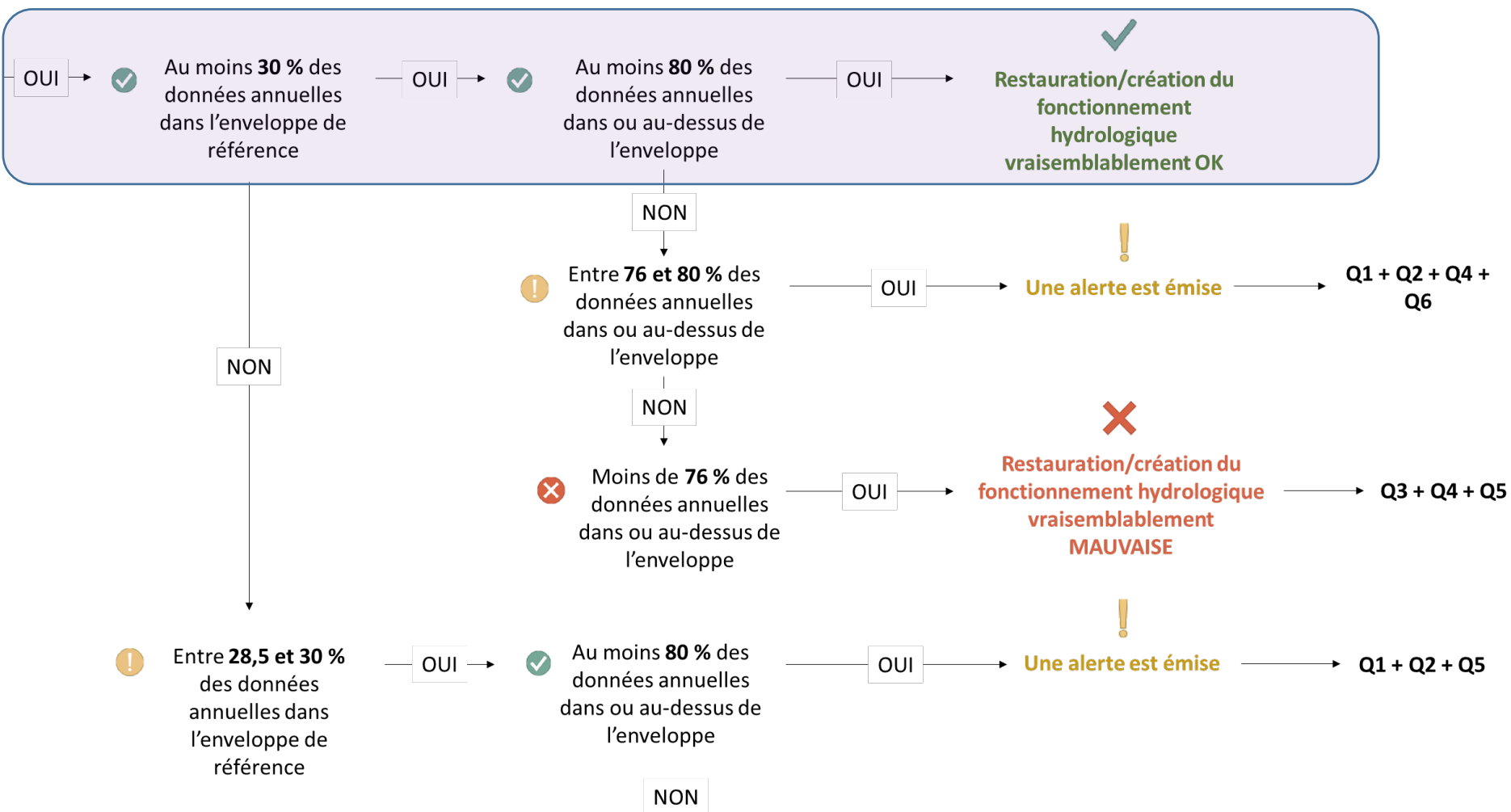
= variations en intensité et en fréquence du niveau d'eau



# > Arbre de décision

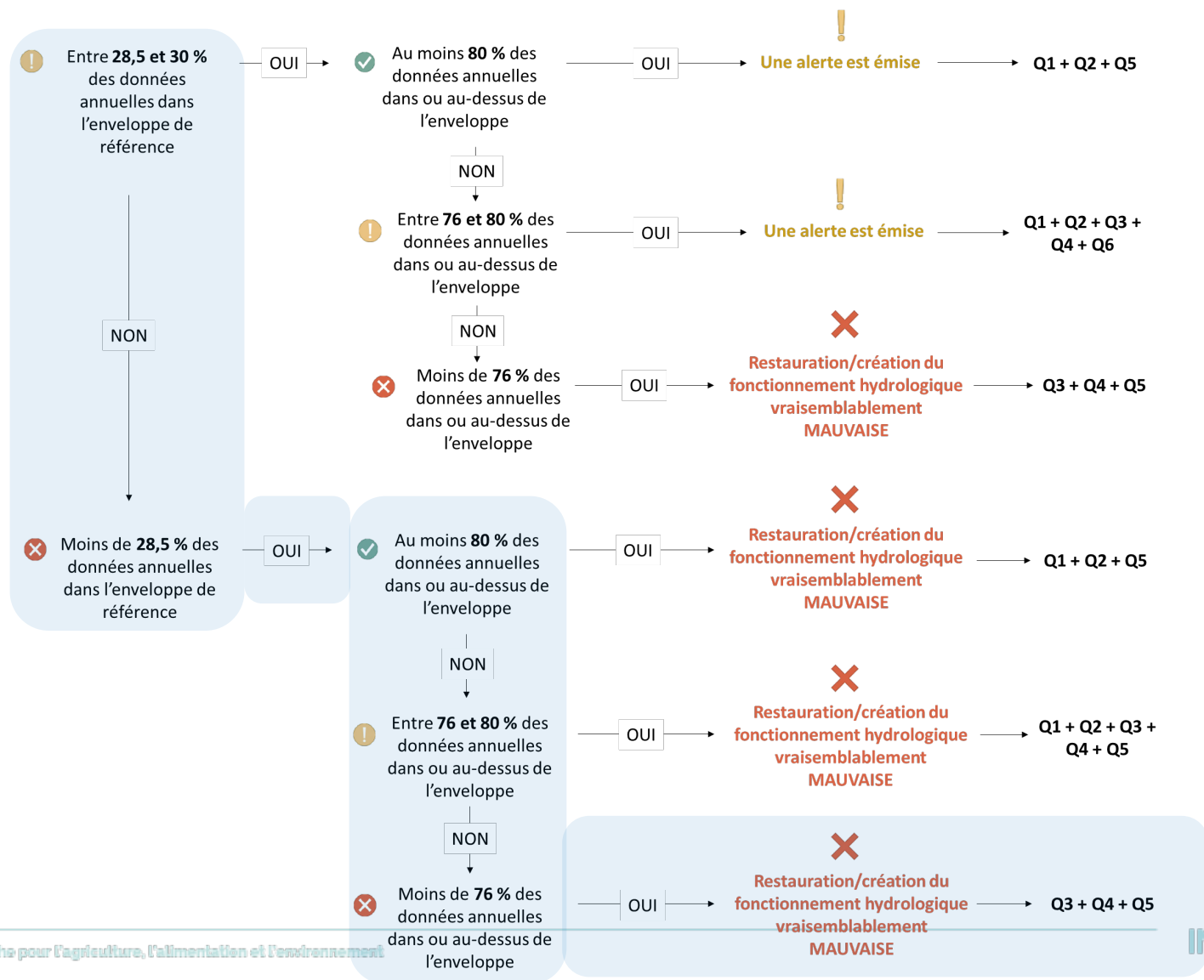
Hydropériode similaire ?

Piézomètre 2 : oui



# > Arbre de décision

Hydropériode similaire ? **Piézomètre 1 : oui mais...**



## > Arbre de décision

### Piézomètre 1 : la restauration hydrologique semble avoir échoué.

—————> Les questions à se poser :

**Q3 : L'enveloppe de référence est-elle assez représentative du type de zone humide visé ?**

Un seul SCOR avec seulement deux piézomètres peut donner une enveloppe de référence fine donc 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.) ?**

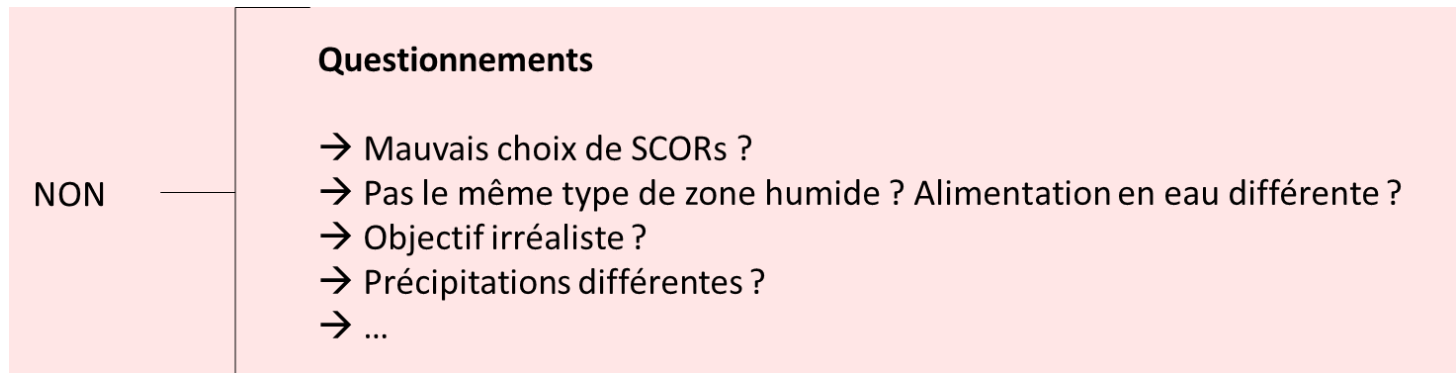
**Q5 : L'objectif assigné pour le site est-il réaliste ?**

Envisager de revoir l'objectif une fois le fonctionnement hydrologique du site connu

## > Arbre de décision

Hydropériode similaire ? **Piézomètre : non**

→ l'hydrologie du site n'est pas compatible avec les objectifs visés initialement



**Existe-t-il des habitats de zone humide compatibles avec ce fonctionnement hydrologique ?** → si oui, revoir l'objectif

## > Quand utiliser HYDRINDIC ?

Idéalement : « BACI »

- > AVANT la mise en œuvre du projet de restauration / création de zone humide
  - En phase de conception du projet, pour connaître la profondeur de la nappe d'eau au cours du temps sur le site choisi et **adapter les travaux de restauration hydrologique nécessaires** (profondeur du décaissement, suppression de drains...)
- > APRES restauration hydrologique et AVANT plantation (si plantation prévue)
  - Pour vérifier l'atteinte de **conditions hydrologiques compatibles** avec les habitats envisagés

+

- > Site **DÉJÀ RESTAURÉ** mais **besoin de s'assurer qu'il est sur une bonne trajectoire** (ou de le démontrer dans un contexte ERC)
  - Vérifier la bonne restauration hydrologique du site et **si besoin savoir sur quel plan la corriger** (hydropériode ? profondeur de la nappe ? Sur quelle période de l'année ?)

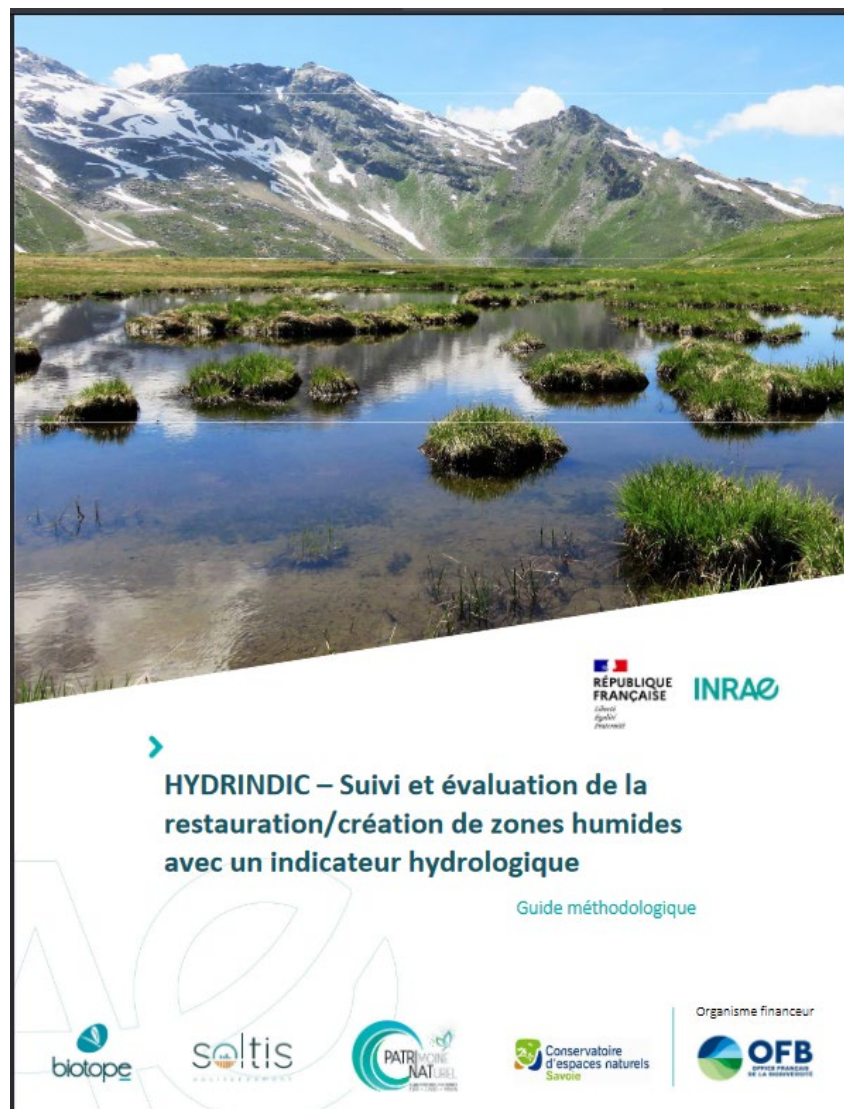
➤ Et si on veut vérifier l'absence d'impact sur une zone humide ?

- **Aménagements** susceptibles de modifier le fonctionnement hydrologique des **zones humides localisées à proximité immédiate**
- Besoin de **vérifier l'absence d'impact** sur une zone humide OU de caractériser cet impact sur le plan hydrologique

→ **Hydrindic 2** : projet visant à tester Hydrindic dans le contexte de l'évaluation des impacts.

## Guide téléchargeable en ligne :

Les auteurs sont disponibles pour répondre aux questions relatives à la mise en œuvre de l'indicateur



[https://www.zones-humides.org/sites/default/files/guide\\_hydrindic\\_v1.pdf](https://www.zones-humides.org/sites/default/files/guide_hydrindic_v1.pdf)

## > Conclusion

### HYDRINDIC

- Permet d'identifier les causes d'échec de la restauration/création de zones humides
- Complète (mais ne remplace pas) les autres indicateurs d'évaluation du succès des opérations de restauration/création (ex. composition floristique)
- **Utilisé en amont des autres actions écologiques** : permet de s'assurer que l'hydrologie du site est adaptée aux objectifs

## ➤ Complémentarité avec d'autres outils existants

- Différences et complémentarité avec l'indicateur RhoMeO

### Dynamique hydrologique de la nappe (RhoMeO)

- Adapté au **suivi à très long terme** d'une zone humide en voie de restauration
- Permet de **vérifier la stabilité/l'amélioration** de la profondeur moyenne de la nappe
- Nécessite d'intégrer des données météo pour interpréter les données
- Ne donne pas d'information sur le fonctionnement hydrologique

### HYDRINDIC

- Adapté au suivi d'une zone humide à court ou long terme
- Donne des **informations sur le fonctionnement hydrologique** de la zone humide en voie de restauration (hydropériode, variations saisonnières...)
- Permet de comparer avec le fonctionnement hydrologique de zones humides correspondant à l'objectif à atteindre : **facilite l'interprétation des données**

## ➤ Complémentarité avec d'autres outils existants

- LA GEPE : une check-list pour les projets de restauration au stade « conception »

- **Développée pour les Sites Naturels de Compensation**, utilisable pour tout projet de restauration écologique au stade « conception » (avant la mise en œuvre)

- Une « checklist » permettant de s'assurer qu'on a écarté les principales causes d'échec prévisibles + les principales erreurs lors de la réalisation de suivis

|                                           |                                                                             |                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| II.B<br>Trajectoire<br>écologique du site | II.B.1<br>Caractéristiques<br>pédologiques et<br>hydrologiques du<br>site   | Les caractéristiques<br>pédologiques et<br>hydrologiques du site<br>projet sont-elles propices<br>à la création des habitats<br>ciblés ?                             | Les caractéristiques pédologiques et hydrologiques du site sont propices à la création ou à la restauration de TOUS les habitats ciblés                    | Type d'habitat historiquement présent sur le site, dont seule la couverture végétale a été modifiée sous l'effet des usages<br><br>Indicateurs possibles : photos aériennes anciennes, sondages pédologiques, diagnostic zone humide, enveloppes climatiques, cartographie des sols... | Favorable                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                           |                                                                             |                                                                                                                                                                      | Les caractéristiques pédologiques et hydrologiques ne sont actuellement pas propices à l'atteinte de l'objectif à long terme mais peuvent le devenir       | Type d'habitat historiquement présent sur le site<br>Modification du sol ou de l'hydrologie réversible (drain, fossés...)                                                                                                                                                              | Vigilance<br>Nécessité de vigilance par rapport aux actions écologiques proposées                                                                                                                                                               |
|                                           |                                                                             |                                                                                                                                                                      | Les caractéristiques pédologiques et hydrologiques du site projet NE SONT PAS initialement propices à la création ou à la restauration des habitats ciblés | Type d'habitat qui n'est pas présent historiquement sur le site ou modifications irréversibles (changement climatique, alimentation en eau non-accessible...)                                                                                                                          | Danger<br>Remettre en question la pertinence des habitats ciblés ou du choix du site                                                                                                                                                            |
|                                           | II.B.2<br>Dynamique des<br>espèces et les<br>habitats ciblés sur<br>le site | La dynamique spontanée des espèces et des habitats sur le site à l'état initial est-elle suffisamment dégradée pour justifier la réalisation d'actions écologiques ? | A l'état initial, l'écosystème est dans une dynamique négative pour les espèces, habitats et fonctions ciblés                                              | Le déclin des espèces ciblées sur le site est démontré, l'état de conservation des habitats sur le site se dégrade<br><br>A utiliser : Matrice de transition écologique entre habitats EUNIS                                                                                           | Favorable<br>Le projet permettrait un gain écologique significatif pour les habitats et espèces ciblées. Attention, une trajectoire négative pour une espèce ciblée ne signifie pas que la trajectoire est négative pour l'écosystème considéré |
|                                           |                                                                             |                                                                                                                                                                      | A l'état initial, l'écosystème est dans une dynamique positive pour les espèces, habitats et fonctions ciblés                                              | Les espèces ciblées sont déjà présentes sur le site et leur population est stable. Il n'existe pas de preuve que l'état de conservation de l'habitat se dégrade                                                                                                                        | Rédhibitoire<br>La dynamique du site est positive vis-à-vis des CB ciblées, le site va naturellement évoluer vers un gain écologique et ne devrait pas faire l'objet d'actions écologiques                                                      |
|                                           |                                                                             |                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                 |

## > Complémentarité avec d'autres outils existants

- LA GEPE : une check-list pour les projets de restauration au stade « conception »

| Thème                          | Question                                                                                                        | Modalités de réponse | Indicateurs possibles | Avis                                             |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|
| Trajectoire écologique du site | Les caractéristiques pédologiques et hydrologique du site sont-elles adaptées à la création de l'habitat ciblé? |                      |                       | Favorable<br>Vigilance<br>Danger<br>Redhibitoire |

**Modalité des réponse :**

**1/ Les caractéristiques pédologiques et hydrologiques propices à la création de tous les habitats ciblés**

**Indicateurs possibles :**

Exemple : Habitats historiquement présent sur le site, dont seule la couverture végétale a été modifiée sous l'effet des usages

Indicateurs possibles : photos aériennes anciennes, sondages pédologiques, diagnostic zone humide, enveloppes climatiques, cartographie des sols...

→Favorable



| Thème                          | Question                                                                                                        | Modalités de réponse | Indicateurs possibles | Avis                                                                         |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Trajectoire écologique du site | Les caractéristiques pédologiques et hydrologique du site sont-elles adaptées à la création de l'habitat ciblé? |                      |                       | <b>Favorable</b><br><b>Vigilance</b><br><b>Danger</b><br><b>Redhibitoire</b> |

#### Modalité des réponse :

**2/ Les caractéristiques pédologiques et hydrologiques ne sont initialement pas (ou plus) propices à la création ou à la restauration des habitats ciblés mais peuvent le devenir**

#### Indicateurs possibles :

Exemple : Type d'habitat historiquement présent sur le site. Modification du sol ou de l'hydrologie réversible (drains, fossés...)

Indicateurs possibles : suivis piézométriques, sondages pédologiques, historique des usages, etc.

**→ Vigilance : vérifier si les actions prévues sont suffisantes**



| Thème                          | Question                                                                                                        | Modalités de réponse | Indicateurs possibles | Avis                                                                         |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Trajectoire écologique du site | Les caractéristiques pédologiques et hydrologique du site sont-elles adaptées à la création de l'habitat ciblé? |                      |                       | <b>Favorable</b><br><b>Vigilance</b><br><b>Danger</b><br><b>Redhibitoire</b> |

**Modalité des réponse :**

**3/ Les caractéristiques pédologiques et hydrologiques du site projet ne sont pas propices à la création ou à la restauration des habitats ciblés**

**Indicateurs possibles :**

Habitats jamais présents historiquement sur le site ou modifications irréversibles (changement climatique, alimentation en eau non-accessible...)

**→ Danger : remettre en question la pertinence des habitats ciblés ou du choix du site**

## ➤ Complémentarité avec d'autres outils existants

- LA GEPE : une check-list pour les projets de restauration au stade « conception »

Téléchargeable en ligne :



<https://www.inrae.fr/actualites/amenagement-nouvel-outil-evaluer-pertinence-compensation-ecologique-loffre>

>

## Merci pour votre attention

[hugo.clement@inrae.fr](mailto:hugo.clement@inrae.fr)



## ➤ Différence et complémentarité avec l'indicateur RhoMeO

### **Dynamique hydrologique de la nappe (RhoMeO)**

- Suivi uniquement de la zone humide en voie de restauration

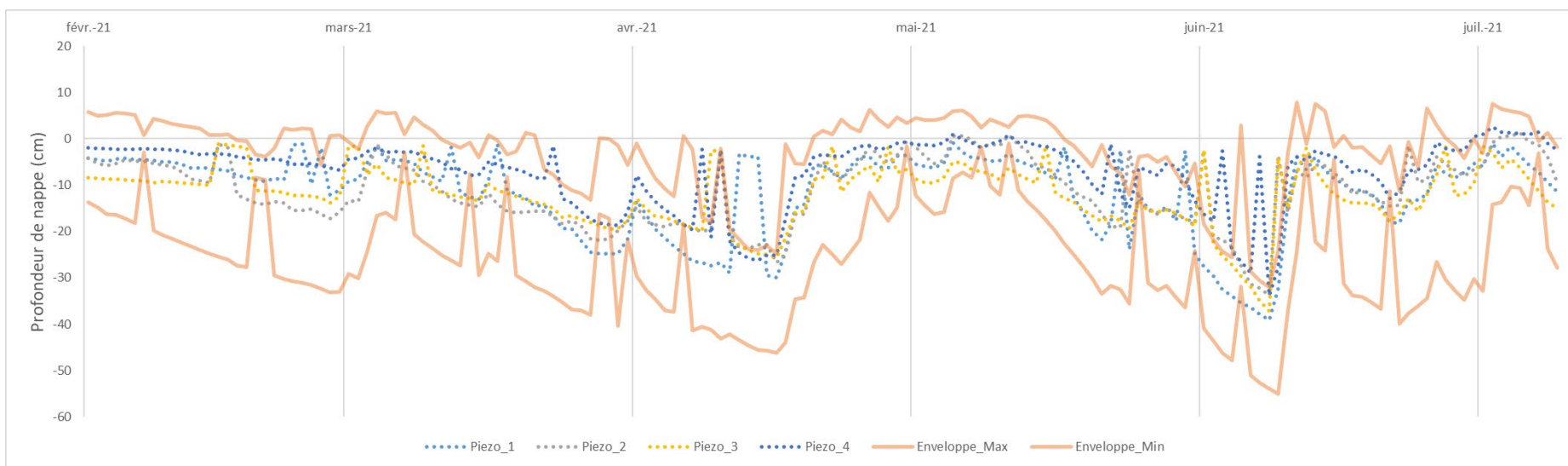
### **HYDRINDIC**

- Nécessite de trouver et d'équiper des zones humides correspondant à l'objectif de restauration

## ➤ Exemple du Marais du Chautagne

### Dynamique hydrologique de la nappe (RhoMeO) et HYDRINDIC

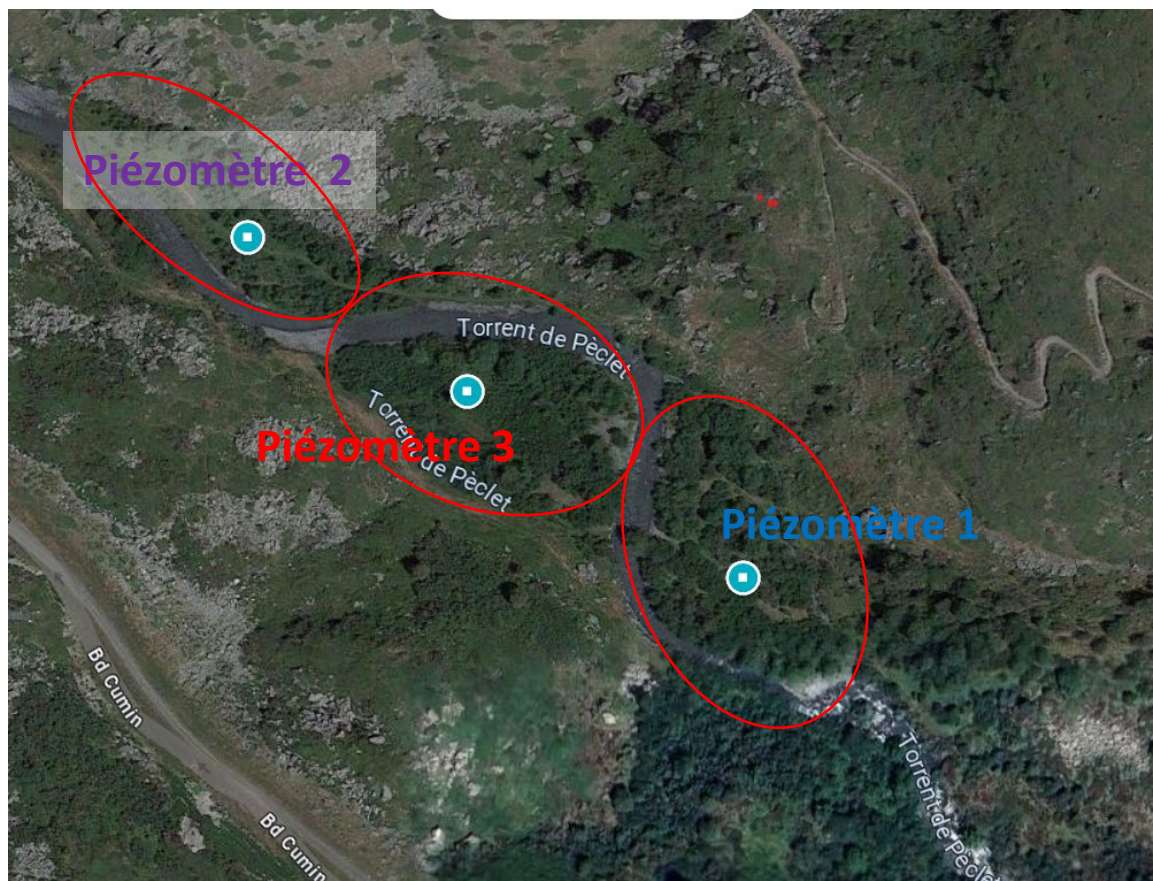
- Hydrindic
  - Evaluation de l'efficacité des mesures de restauration



## > Arbre de décision

### Exemple 3 :

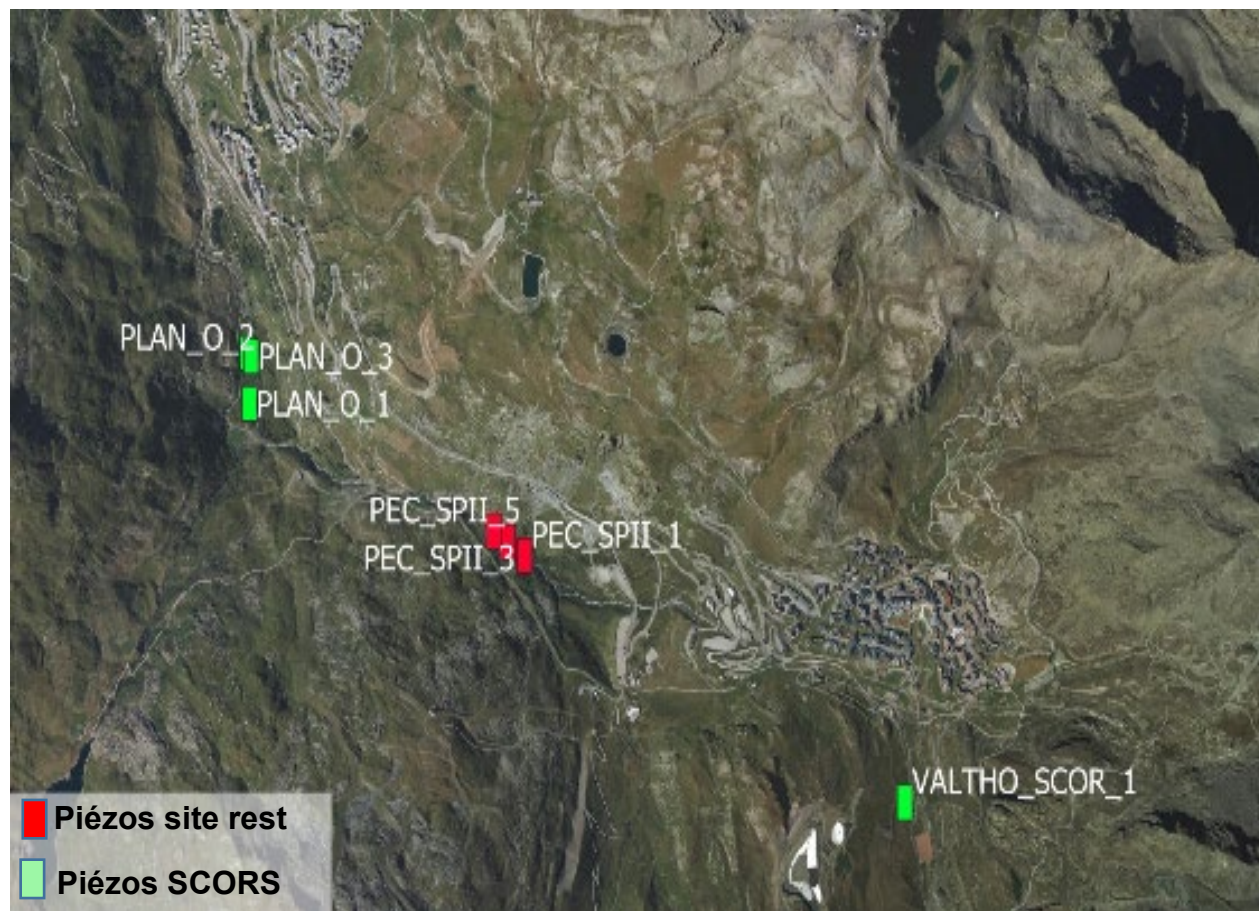
Une zone humide sur un torrent de montagne



## > Arbre de décision

### Exemple 3 :

3 piézomètres répartis dans 2 zones humides proches, avec des habitats similaires → **construction de l'enveloppe de référence**



# > Arbre de décision

## Question 1 : L'hydropériode est-elle similaire ?

= variations en intensité et en fréquence du niveau d'eau

