

Climat et Adaptation :

le secteur de l'eau entre en Résilience

Impact du changement climatique sur les eaux souterraines en Wallonie
et Recharge maîtrisée des aquifères



Contenu de la présentation

Partie 1: Impact du changement climatique sur les eaux souterraines en Wallonie

L'importance des eaux souterraines

Situation climatique en Belgique

Impact du changement climatique en Hesbaye

Partie 2: La recharge maîtrisée des aquifères (MAR)

Qu'est-ce que la recharge maîtrisée des aquifères

Exemples

Partie 3: Recherche doctorale

Etude quantitative

Etude qualitative

Travaux futurs



AI generated picture, DALL-E

Partie 1: Impact du changement climatique sur les eaux souterraines en Wallonie

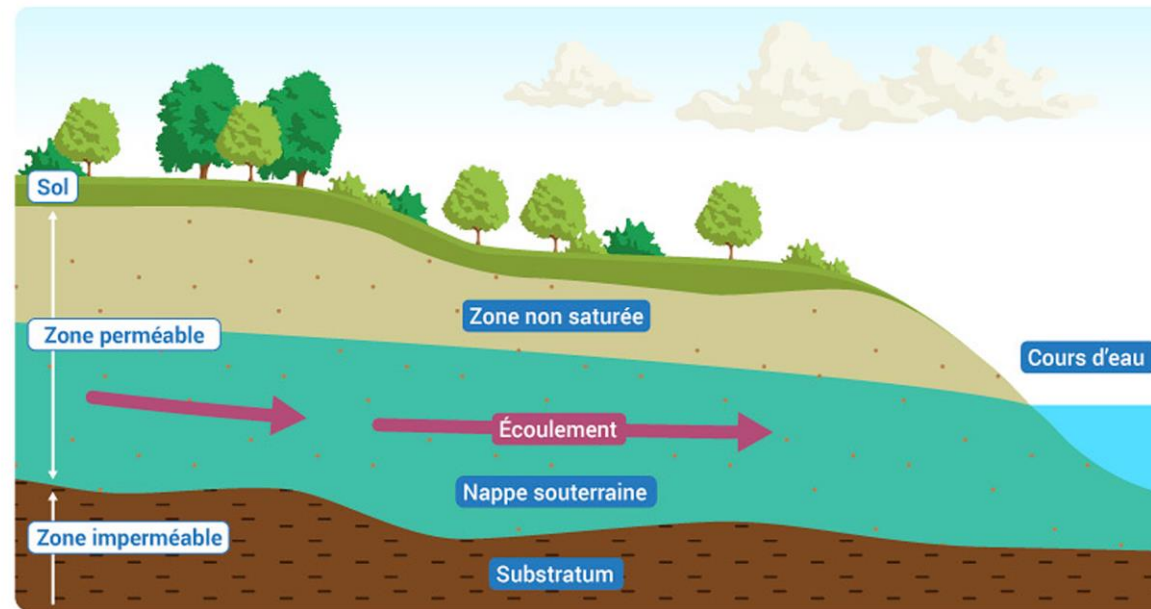


AI generated picture, DALL-E

Partie 1: les eaux souterraines

Quelques définitions générales

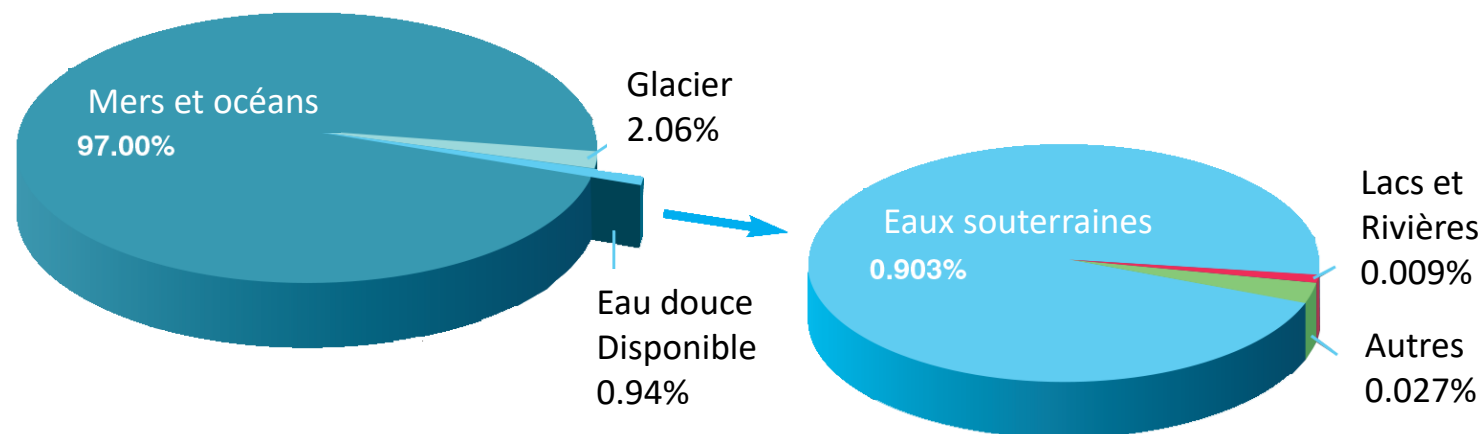
- **Eaux souterraines:** Les eaux souterraines correspondent à l'eau présente sous la surface de la terre dans les pores et/ou fissures de formations géologiques appelées aquifères. Les eaux souterraines sont rechargées par infiltration des eaux de pluie ou par alimentation directe des rivières.
- **Aquifère:** Un aquifère est une formation géologique rocheuse dont la porosité (présence d'espaces vides dans la roche, les pores) et la perméabilité sont suffisamment importantes pour pouvoir respectivement stocker et faire circuler l'eau souterraine.



Partie 1: les eaux souterraines

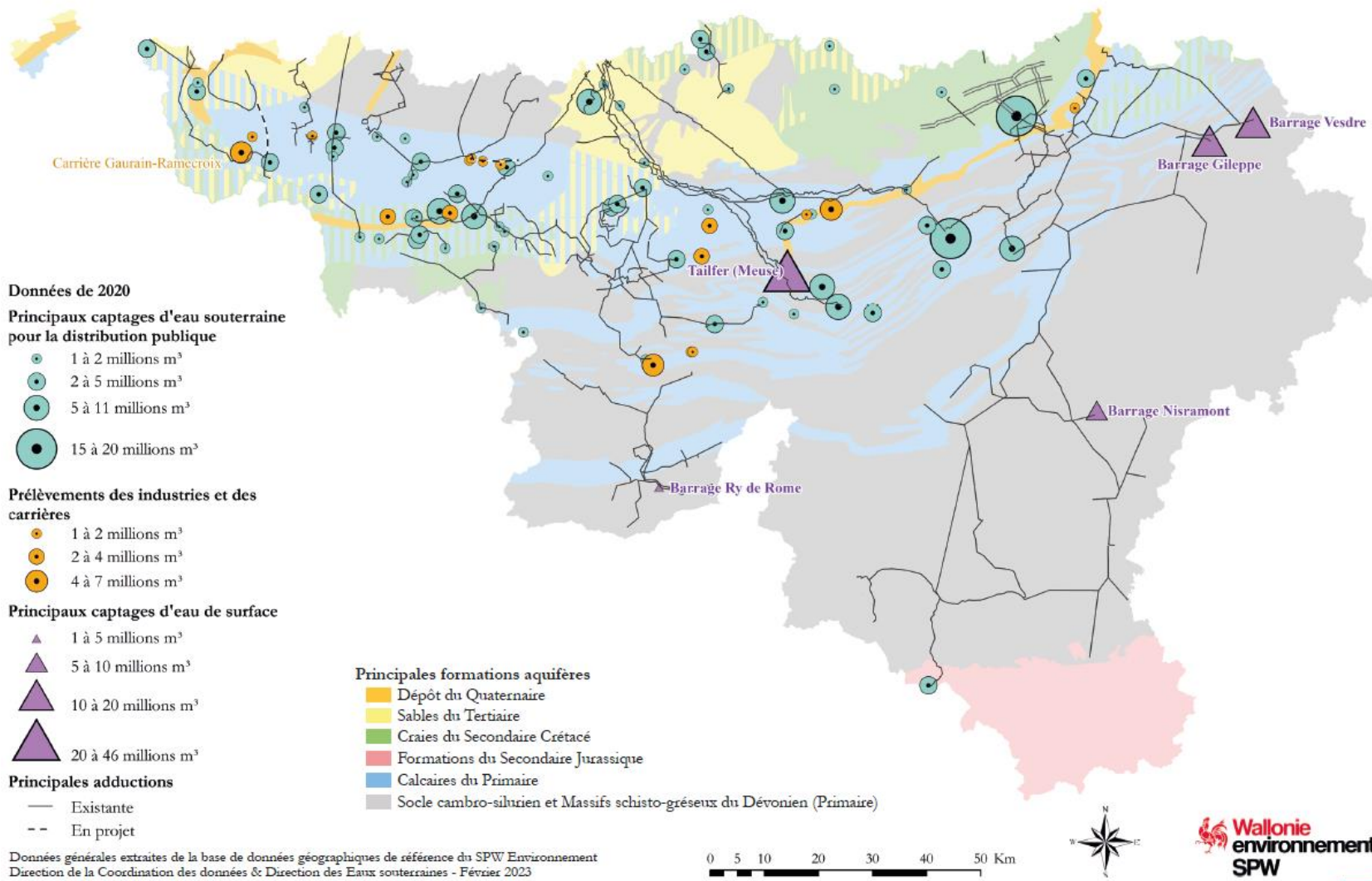
Avantages et importance des eaux souterraines

- Source majoritaire d'eau douce disponible propre à la consommation
- Meilleure protection contre les contaminations
- Courte distance entre lieu de production et lieu de consommation
- Auto-épuration et retards de propagation des éventuelles contaminations dans le sous-sol par des processus bio-physico-chimiques



Partie 1: les eaux souterraines

Quid de la Wallonie?



En 2020: volume total destiné à la distribution publique = 368,3 millions de m³

- **Eaux souterraines:** 289,9 millions m³ (77%)
- **Eaux de surface:** 86,8 millions m³ (23%)

Une partie significative (37%) de cette eau est exportée vers la région de Bruxelles-capitale et la Flandre

Données générales extraites de la base de données géographiques de référence du SPW Environnement
Direction de la Coordination des données & Direction des Eaux souterraines - Février 2023

Partie 1: les eaux souterraines

Notion fondamentale: Bilan hydrogéologique

Comme tout système à l'équilibre, ce qui sort doit être compensé par ce qui rentre.

A l'échelle d'un bassin hydrogéologique:

- **Eau entrante:** l'eau qui s'infiltrate dans le sous-sol (Pluie moins l'évapotranspiration moins le ruissellement : $P-ETR-R$)
- **Eau sortante:** les prélèvements d'eau souterraines ($Q_{\text{capté}}$), le drainage naturel par les eaux de surface (débit de base des cours d'eau: Q_{base}), la variation des réserves en eau souterraine ($\Delta\text{rés}$)

Le bilan hydrogéologique est donc:

PU = Pluie utile

$$P-ETR-R = Q_{\text{capté}} + Q_{\text{base}} + \Delta\text{rés} + \epsilon$$

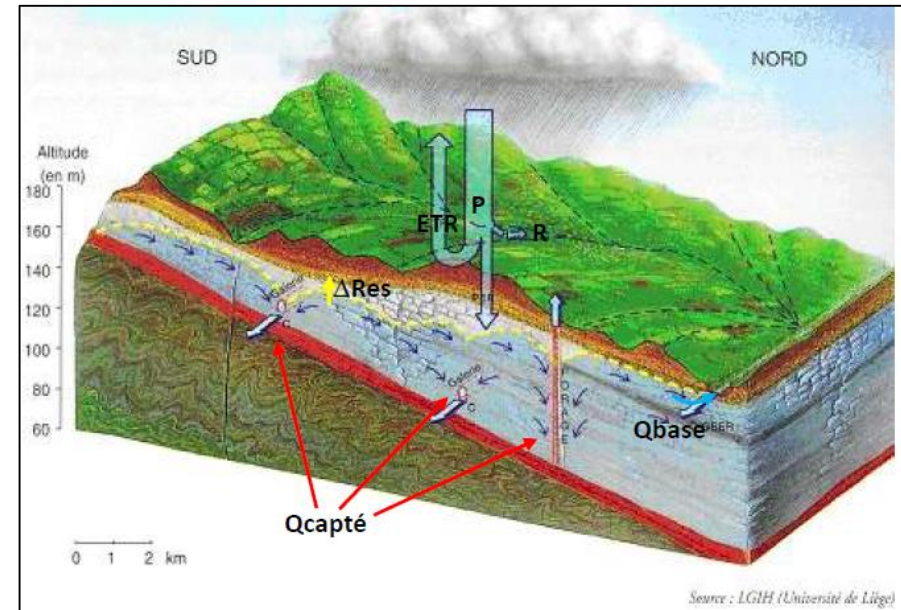
Infiltration

Sorties d'eau

Terme de fermeture

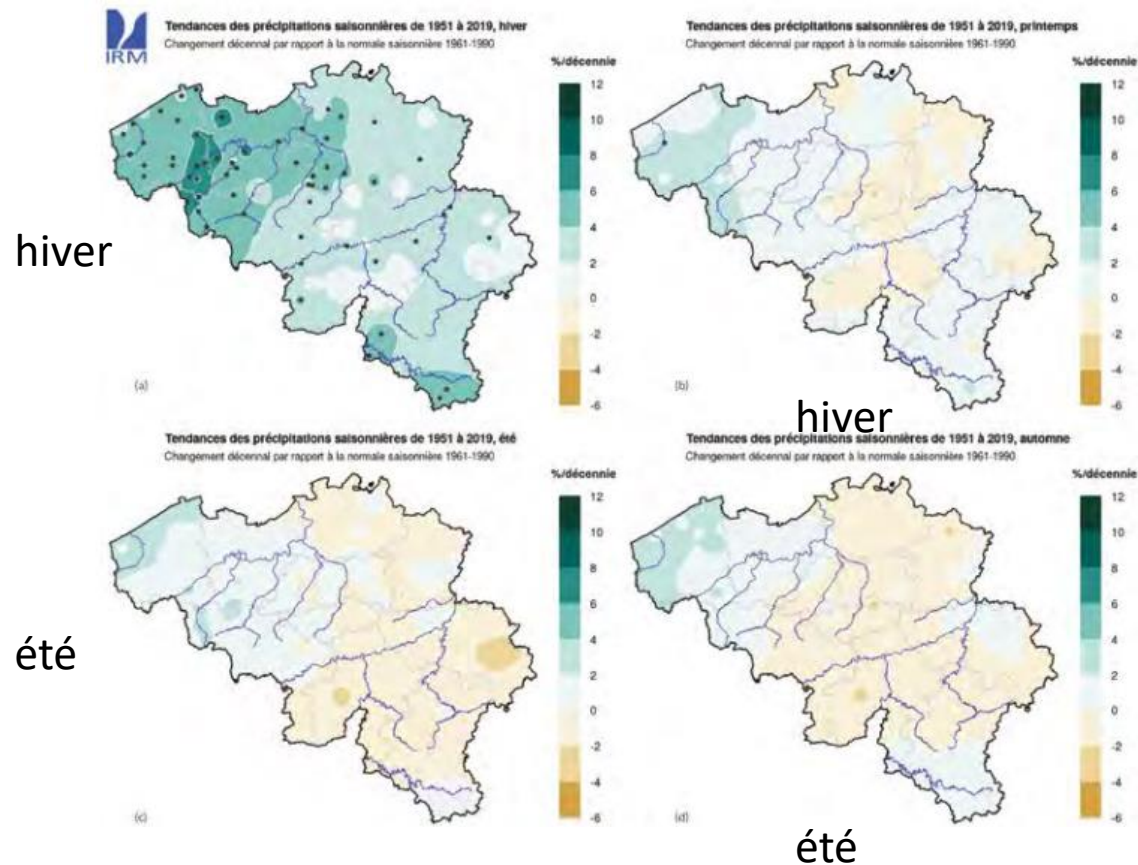


AI generated picture, DALL-E

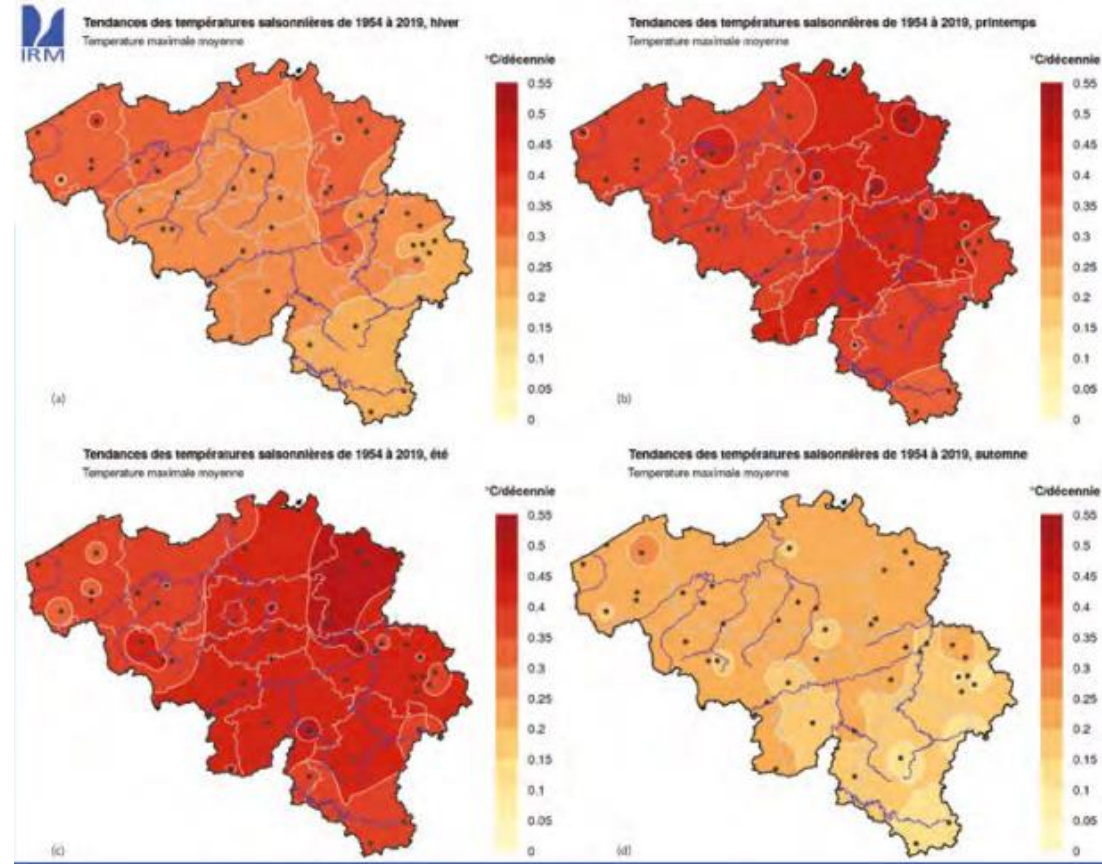


Partie 1: Situation climatique en Belgique

Observations: précipitations



Observations: températures

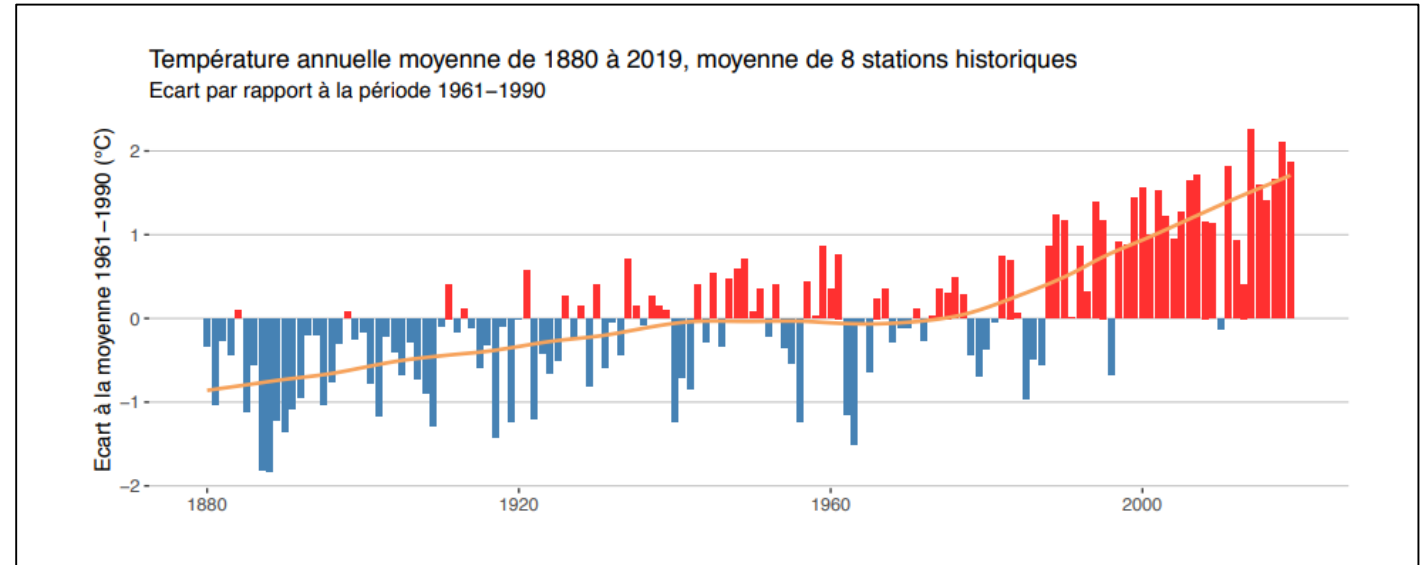


Source : Rapport climatique 2020 de l'IRM-KMI, 92p.,
Éditeur responsable : Dr. D. Gellens | ISSN 2033-8562 |
Coordination : Rozemien De Troch

Partie 1: Situation climatique en Belgique

Quelles conclusions tirer des observations et des prédictions des modèles climatiques?

1. **Précipitations:** Hivers plus humides et été plus secs + variations dans le régime des précipitations avec des événements plus intenses
2. **Températures:** Augmentation générale, tant en hiver qu'en été



Source : Rapport climatique 2020 de l'IRM-KMI, 92p.,
Éditeur responsable : Dr. D. Gellens | ISSN 2033-8562 |
Coordination : Rozemien De Troch

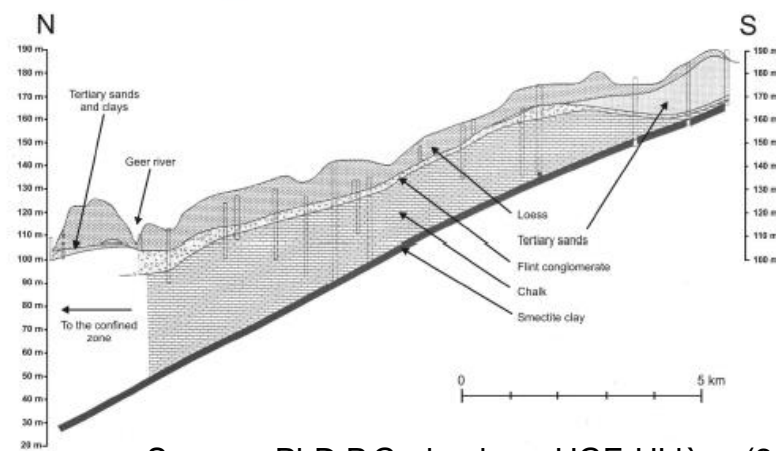
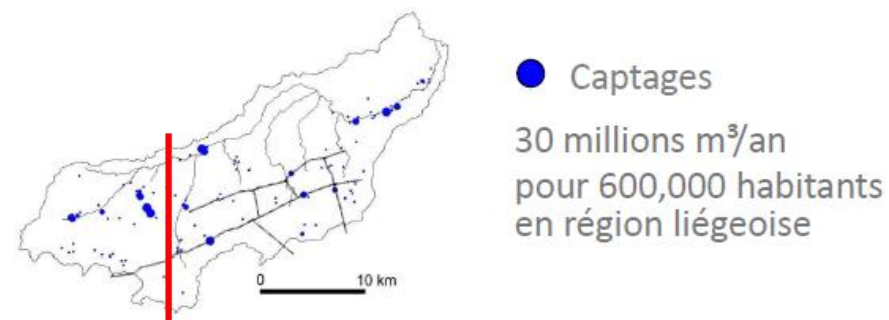
Partie 1: Situation climatique en Hesbaye

Une grande partie de l'eau de distribution de Liège et de ses alentours provient de l'aquifère crayeux de Hesbaye

Il s'agit donc de ressources stratégiques importantes

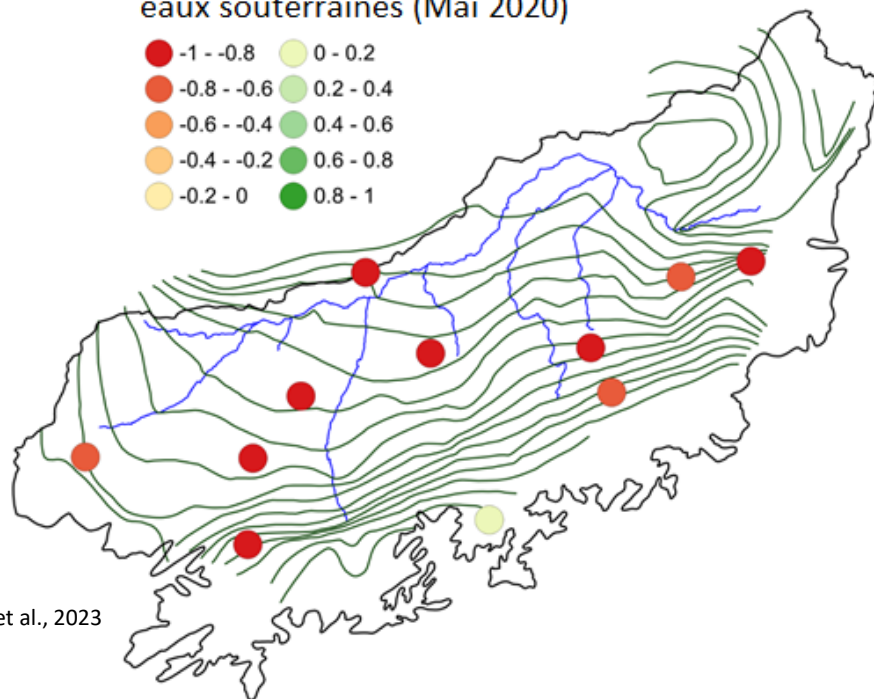
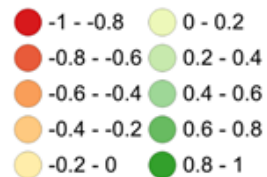
Cependant, tendance à la baisse observée dans les niveaux des eaux souterraines ces 20 dernières années

↪ Surexploitation ou impact du changement climatique?



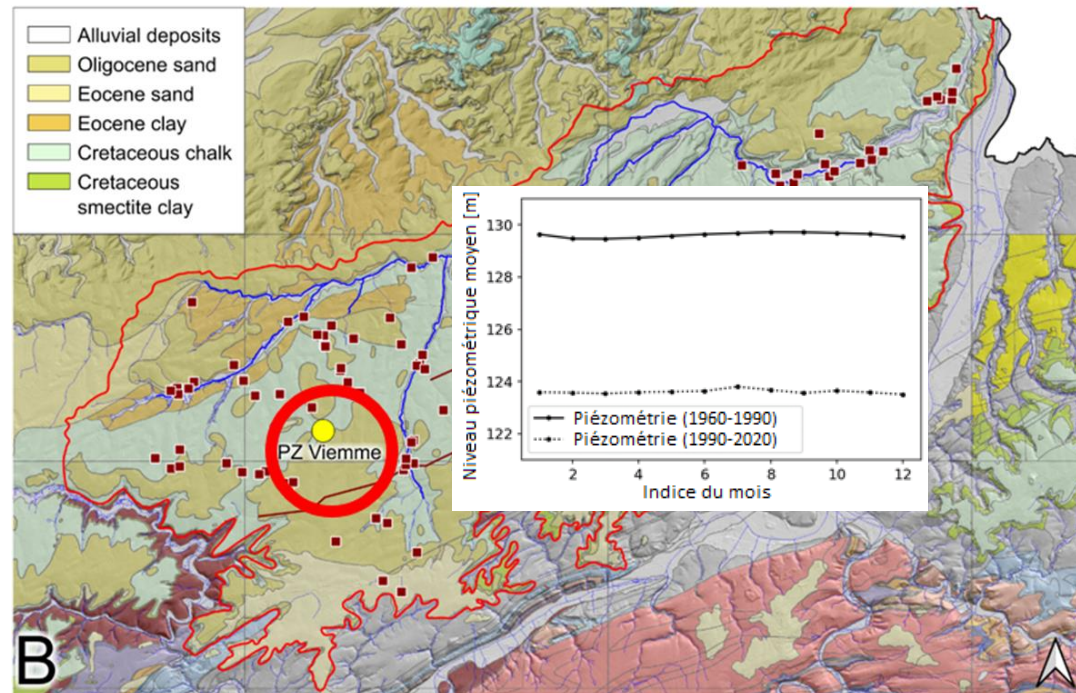
Observations

Indicateur du niveau des eaux souterraines (Mai 2020)



Goderniaux et al., 2023

$$\text{Indicateur} = \frac{H_{\text{Mai 2020}} - \bar{H}_{\text{Mai}}|_{1990-2020}}{[\text{Max}(H_{\text{Mai}}) - \text{Min}(H_{\text{Mai}})]|_{1990-2020}}$$

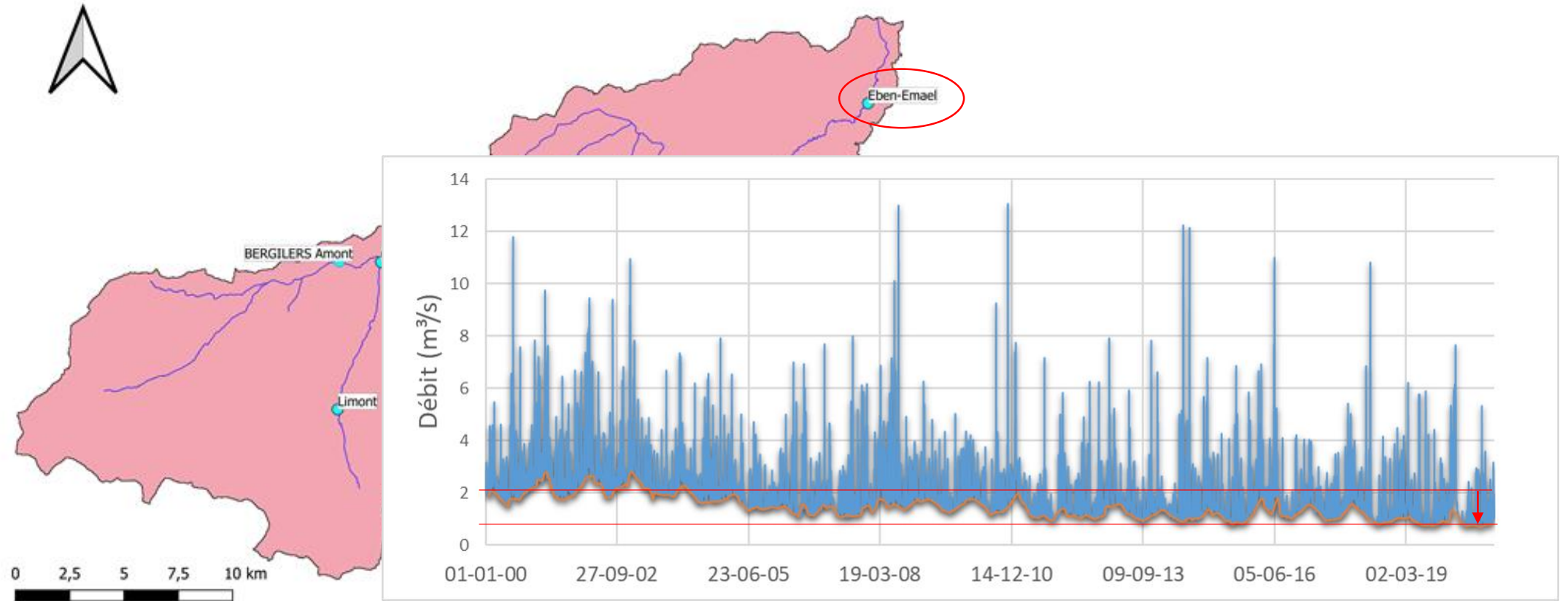


B

Goderniaux et al., 2023

Au niveau du piézomètre de Viemme, on observe une diminution de 6 m des niveaux d'eau souterraine mensuels moyen entre 1960-1990 et 1990-2020

Observations



En 20 ans, débit de base à l'exutoire du bassin deux fois moindre

Hypothèse 1: Surexploitation?

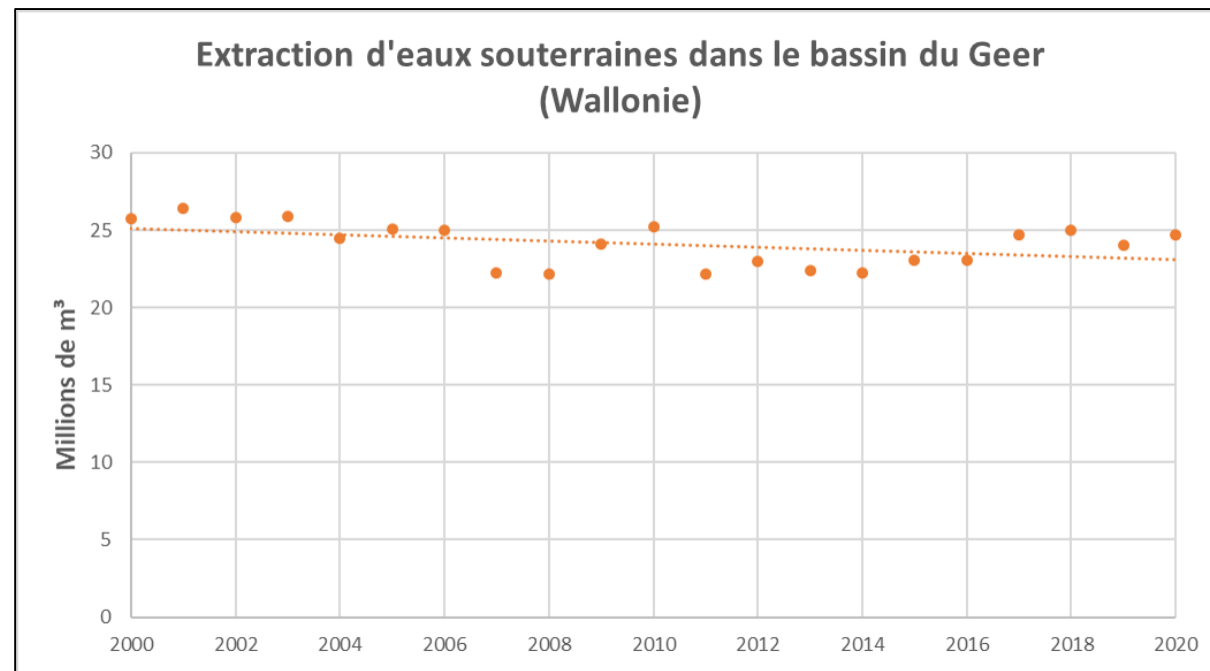
Surexploitation des nappes?



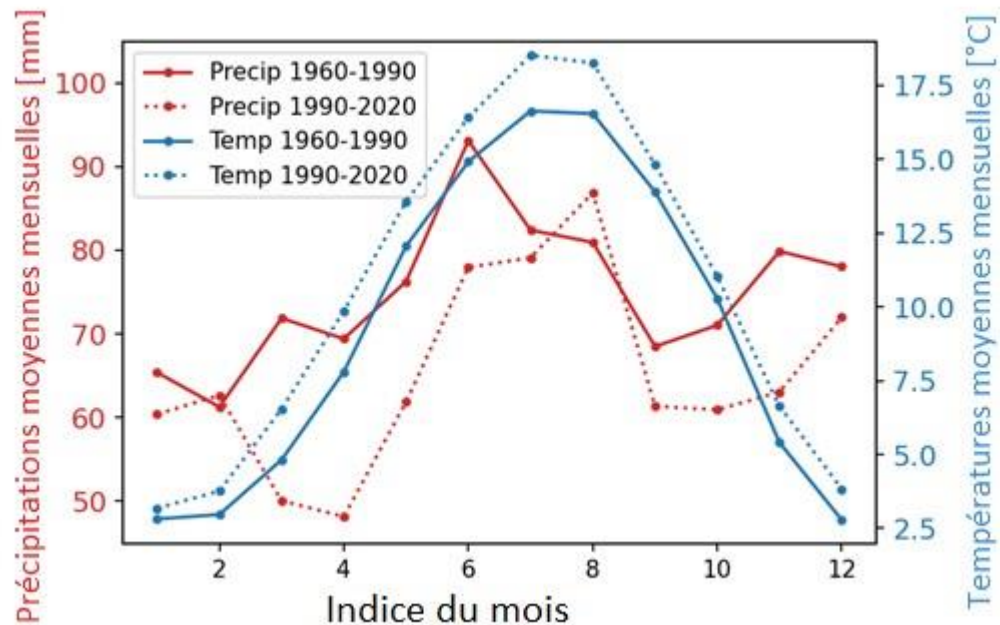
En réalité, volumes de production plutôt constant ces 20 dernières années, voire en légère baisse



Peu probable que la tendance à la baisse des niveaux piézométriques soit relié à une exploitation trop importante de la nappe des craies de Hesbaye

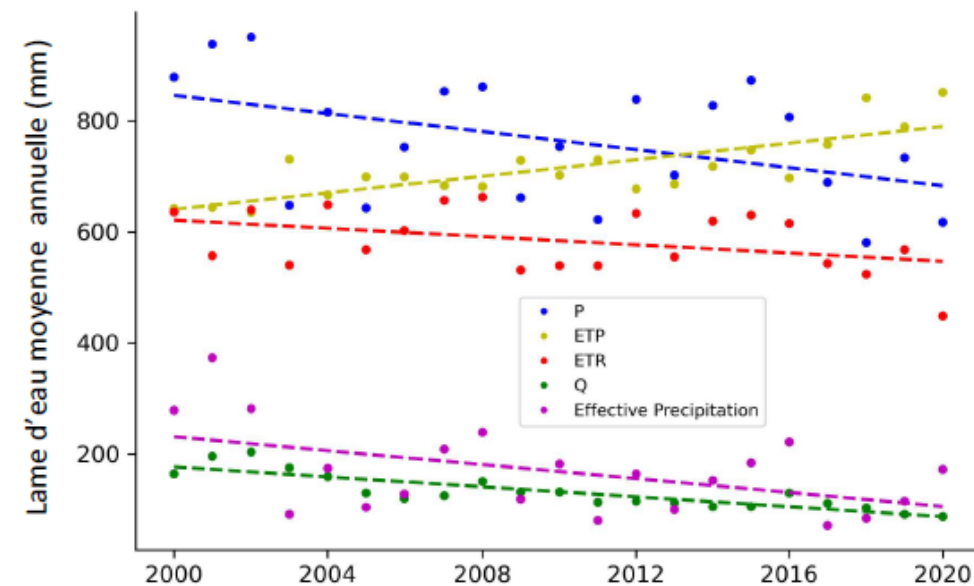
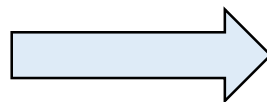


Hypothèse 2: Changement climatique?



Goderniaux et al., 2023

Impact sur le Bilan hydrogéologique



Données : Convention SWDE
modélisation sécheresse

- Augmentation des températures moyennes mensuelles entre 1960-1990 et 1990-2020
- Diminution des précipitations moyennes mensuelles entre 1960-1990 et 1990-2020



Augmentation de l'évapotranspiration potentielle et diminution des précipitations
→ **diminution globale de la recharge**

Conclusion

Bilan hydrogéologique: $P - ETR = PU = R + Q_{\text{capté}} + Q_{\text{base}} + \Delta\text{rés} + \varepsilon$

1. Sécheresses hivernales (ex: hiver 2016-2017): PU plus faible

⇒ Recharge des nappes plus faibles et moins bonne reconstitution des réserves

2. Sécheresses estivales: P = 0 et ETR élevée

⇒ Recharge des nappes de toute façon nulle et pas de conséquences directes
Demande en eau plus élevée (ex: agriculture)

- ⇒
- Baisse des niveaux de nappe et des réserves ($\Delta\text{rés}$) en eau souterraine
 - Diminution des débits de base des cours d'eau



3. L'évolution progressive des conditions climatiques en lien avec une augmentation des températures et, dans une moindre mesure, une baisse des précipitations contribuent à une augmentation du ratio ETR/P qui conduit à une baisse de la recharge des nappes...

Partie 2: La recharge maîtrisée des aquifères



AI generated picture, DALL-E

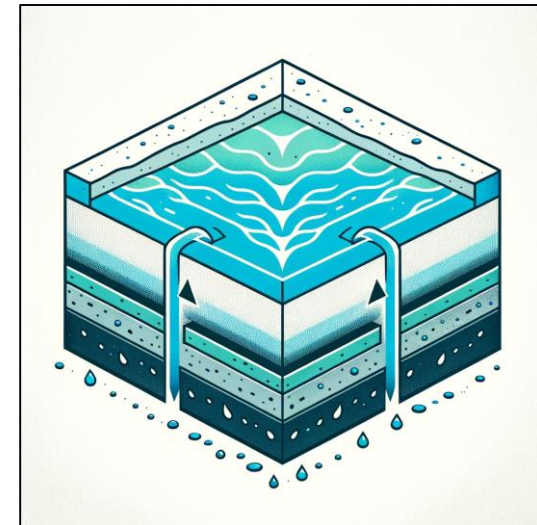
Partie 2: MAR

Définition:

La recharge maîtrisée des aquifères est “une **stratégie de gestion de l’eau**, en parallèle de la gestion de la demande , pour **maintenir, améliorer et sécuriser les systèmes hydrologiques sous stress hydrique** et pour protéger et améliorer la qualité de l’eau” [Dillon et al. \(2019\)](#)

Objectifs opérationnels:

- Stocker temporairement dans les aquifères des ressources en eau pour prévenir des effets du changement climatique
- Combattre les pollutions des eaux au travers de l’effet épurateur du sol et du sous-sol (Soil Aquifer Treatment)



AI generated picture, DALL-E

Dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères:

Recharge directe:

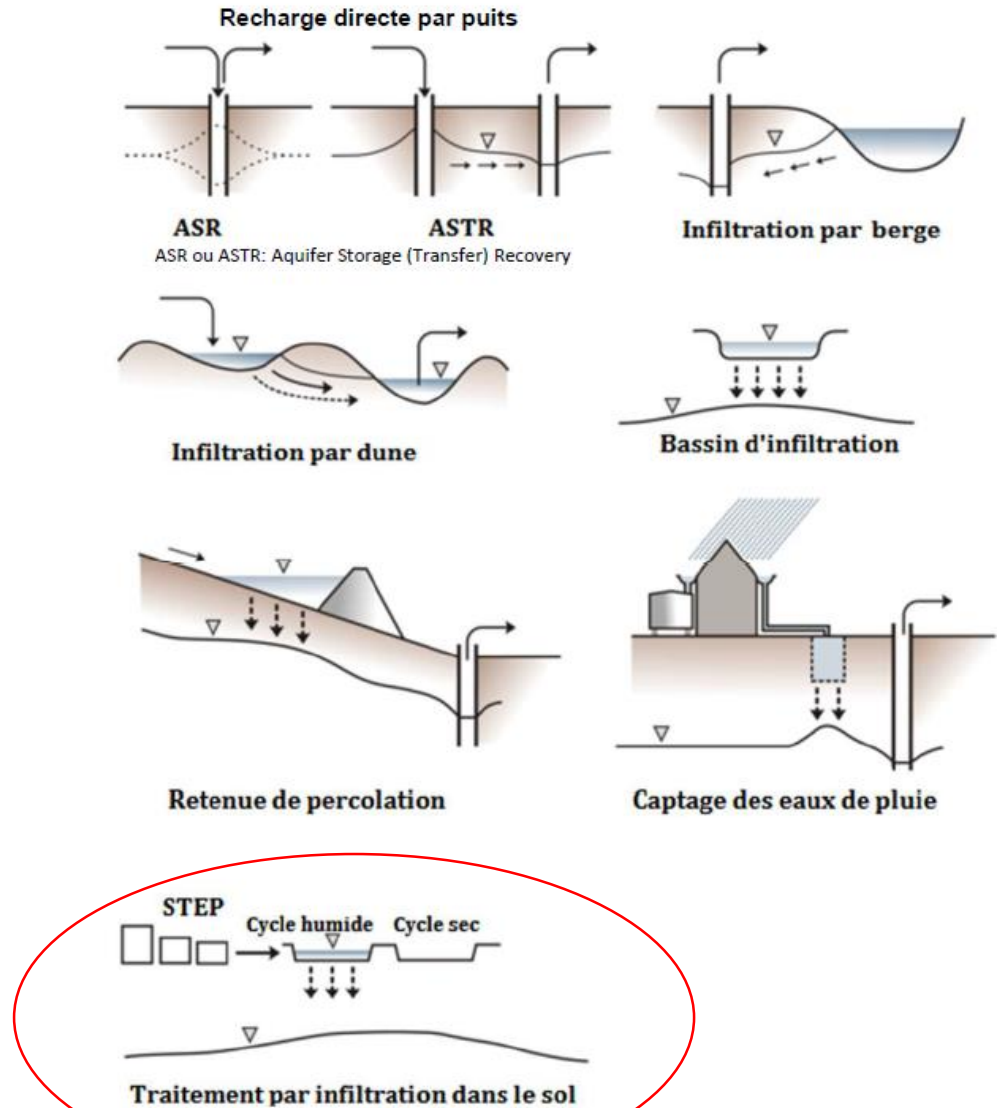
La recharge directe consiste à injecter l'eau directement au sein de l'aquifère au travers de puits d'injection.

Employé pour des aquifères plus profonds.
Perd l'avantage de l'effet épurateur des sols.

Recharge indirecte:

La recharge indirecte consiste à laisser l'eau percoler au travers des sédiments, que ce soit verticalement (bassin d'infiltration) ou horizontalement (filtration par berge).

Plutôt employé pour des aquifères plus superficiels.
Profite de l'effet épurateur des sols.
Plus d'espace au sol nécessaire.



Partie 2: MAR

Types d'eaux de recharge:

Les eaux de surface

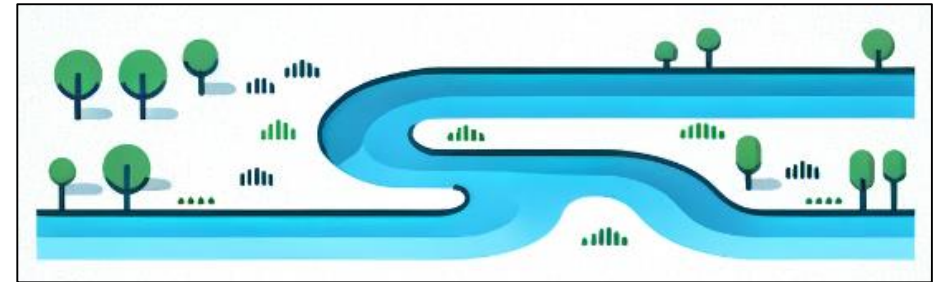
Grandes quantités d'eau mais variabilité saisonnière.
Respect des débits environnementaux minimum nécessaire.
Matière en suspension.
Post-traitement nécessaire selon le lieu.

Les eaux usées traitées

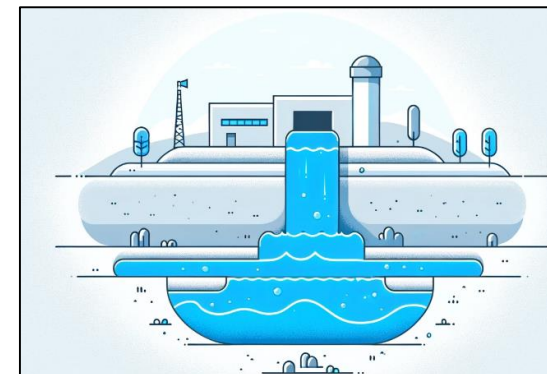
Débit constant au cours du temps.
Post-traitement plus intense si destiné à la consommation.
Acceptation publique plus difficile selon l'utilisation finale.

Les eaux de ruissellement

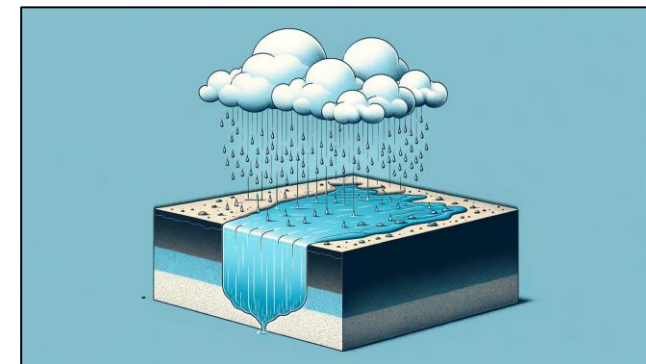
Plus grandes quantités en zones urbaines (imperméabilisation des sols)
Variabilité saisonnière (quantité)
Post-traitement nécessaire selon les lieux.



AI generated picture, DALL-E



AI generated picture, DALL-E



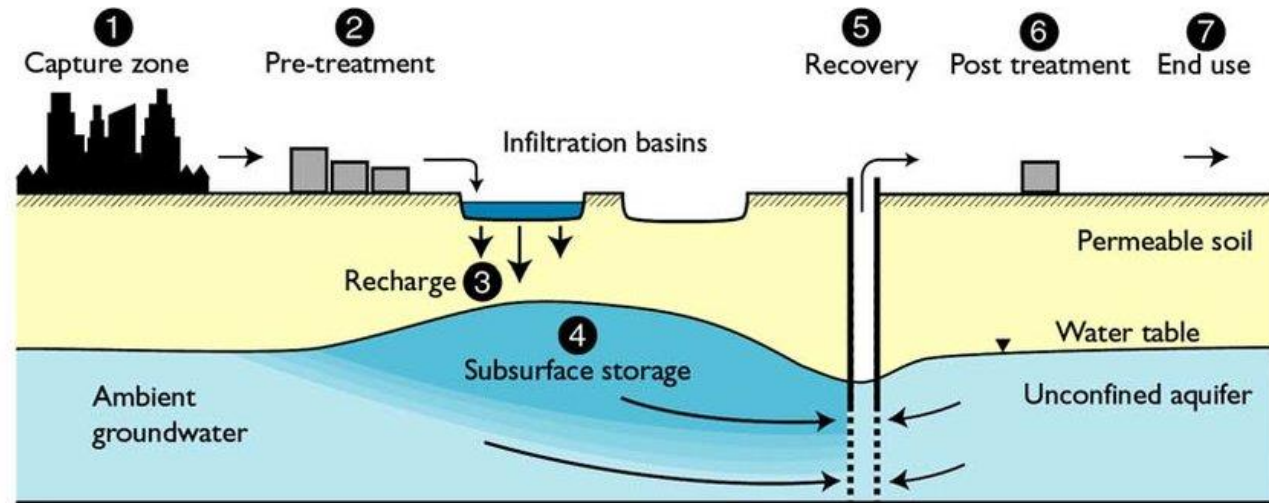
AI generated picture, DALL-E

Partie 2: MAR

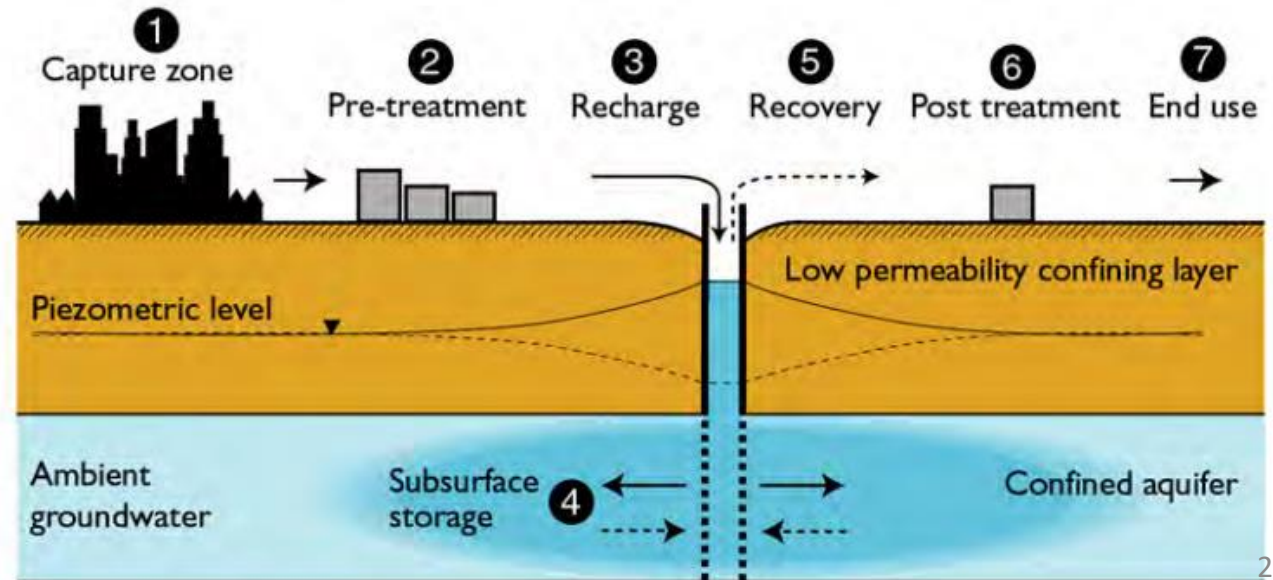
Schéma de fonctionnement:

1. Zone de capture de l'eau de recharge
2. Pré-traitement
3. Recharge
4. Stockage dans les aquifères
5. Production
6. Post-traitement
7. Utilisation finale

Recharge indirecte



Recharge directe



Partie 2: MAR

Exemple 1: Orange County Water District (OCWD)

Recharge maîtrisée des aquifères dans la région de Orange County en Californie

Sources d'eaux d'approvisionnement:

- Rivière Santa-Ana
- Eaux de ruissellement
- Eaux recyclées du système de recharge
- Recharge naturelle
- Eaux importées de Californie du Nord et de la rivière Colorado

pré-traitement des eaux par osmose inverse



Canaux de collection des eaux et traitement par percolation



Partie 2: MAR

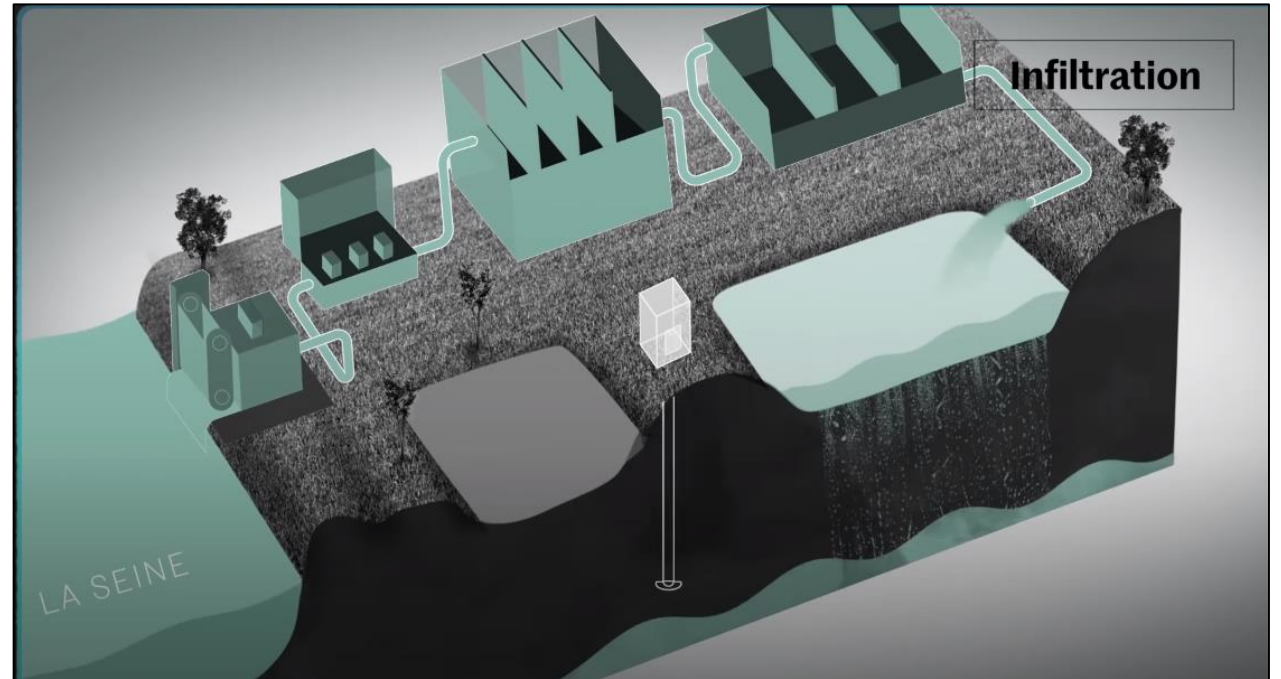
Exemple 1: Orange County Water District (OCWD)



Partie 2: MAR

Exemple 2: le Pecq-Croissy (Paris, France)

Traitement et infiltration de l'eau de la Seine



<https://www.youtube.com/watch?v=woBkC8T0JII&t=376s>

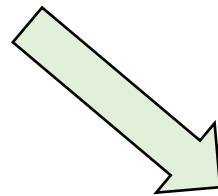
Partie 3: Résumé recherche doctorale



Etude de préféabilité de recharge maîtrisée des aquifères en Hesbaye

Aspect quantitatif

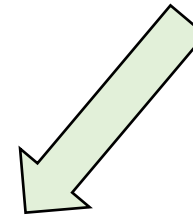
- Estimations de la recharge au travers du loess de Hesbaye par essais d'infiltration



Modélisation numérique

Aspect qualitatif

- Echantillonnage d'eaux de ruissellement
- Analyse du comportement des contaminants rencontrés en laboratoire



Aspect quantitatif: essais d'infiltration

Objectif: vérifier l'application d'une méthode innovante pour estimer précisément les vitesses d'infiltration de l'eau au travers des loess de Hesbaye

Comment: Mesures distribuées de température le long d'un câble de fibre optique enterré au fond d'un bassin d'infiltration



Aspect quantitatif: mesures DTS

Comment mesurer la température le long d'un cable de FO?

1. Un **signal lumineux est introduit** au début de la fibre optique et se déplace le long de celle-ci.
2. Lors de son déplacement, la **lumière excite les atomes du matériau** interne de la fibre optique.
3. Les électrons gravitant autour de ces **atomes** passant d'un état stable à excité puis excité à stable émettent alors des photons, et donc un **signal lumineux rétrodiffusé**.
4. Ce signal rétrodiffusé étant **dépendant de la température**, l'analyse de ce dernier permet d'obtenir des informations de température le long de l'ensemble de la fibre optique avec une grande précision

Mesures actives et passives

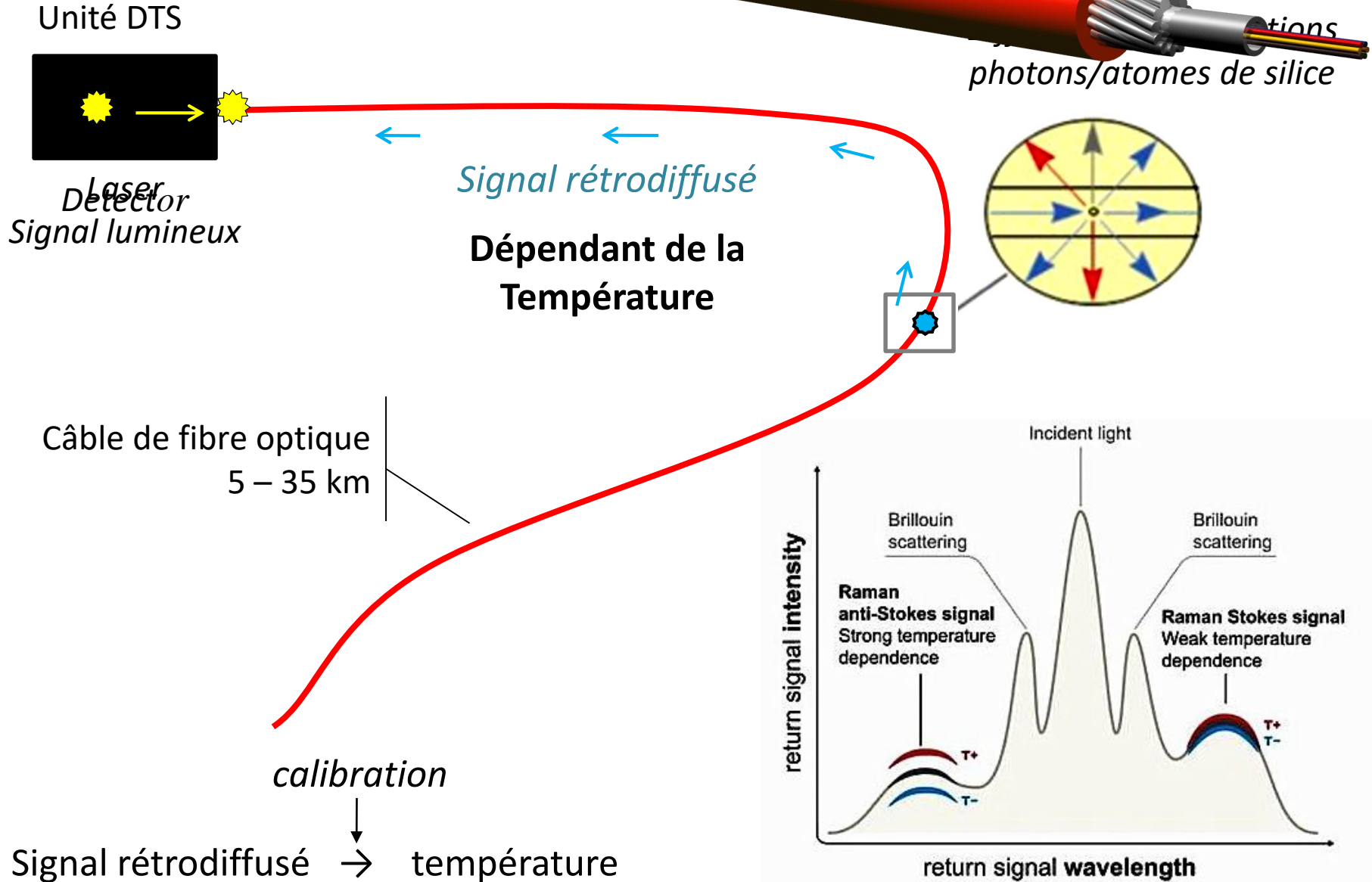
- Mesures **passives**: monitoring des variations naturelles de températures.
- Mesures **actives**: monitoring des variations « artificielles » de températures.



Possibilité de combiner les deux

Partie 3: Résumé recherche doctorale

Aspect quantitatif: mesures DTS



Diapositive par Nataline Simon

[SEAFOM, 2010; Smolen & van der Spek, 2003; Ukil et al. 2012; Hausner et al., 2011]

Aspect quantitatif: essais d'infiltration

Installation et set-up

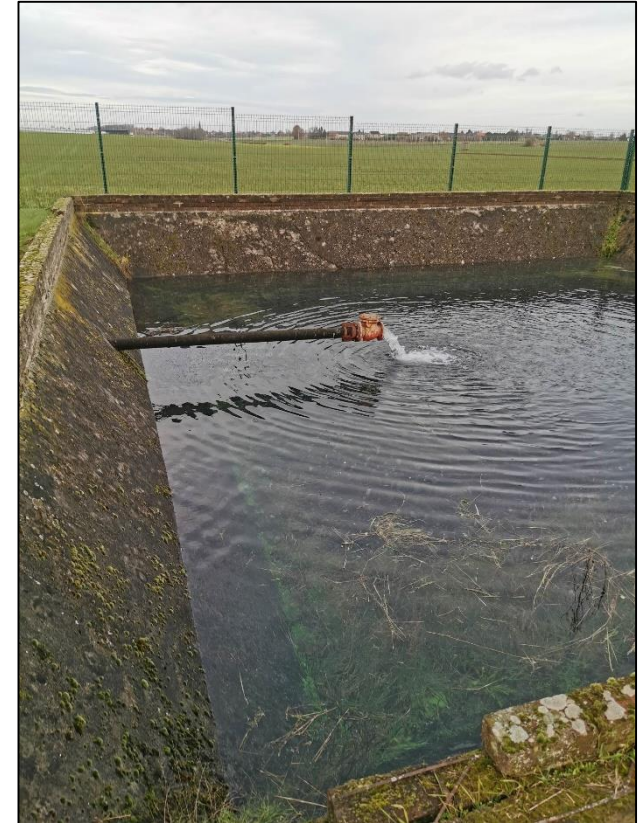
Préparation des tranchées



Installation de la fibre optique



Test d'infiltration



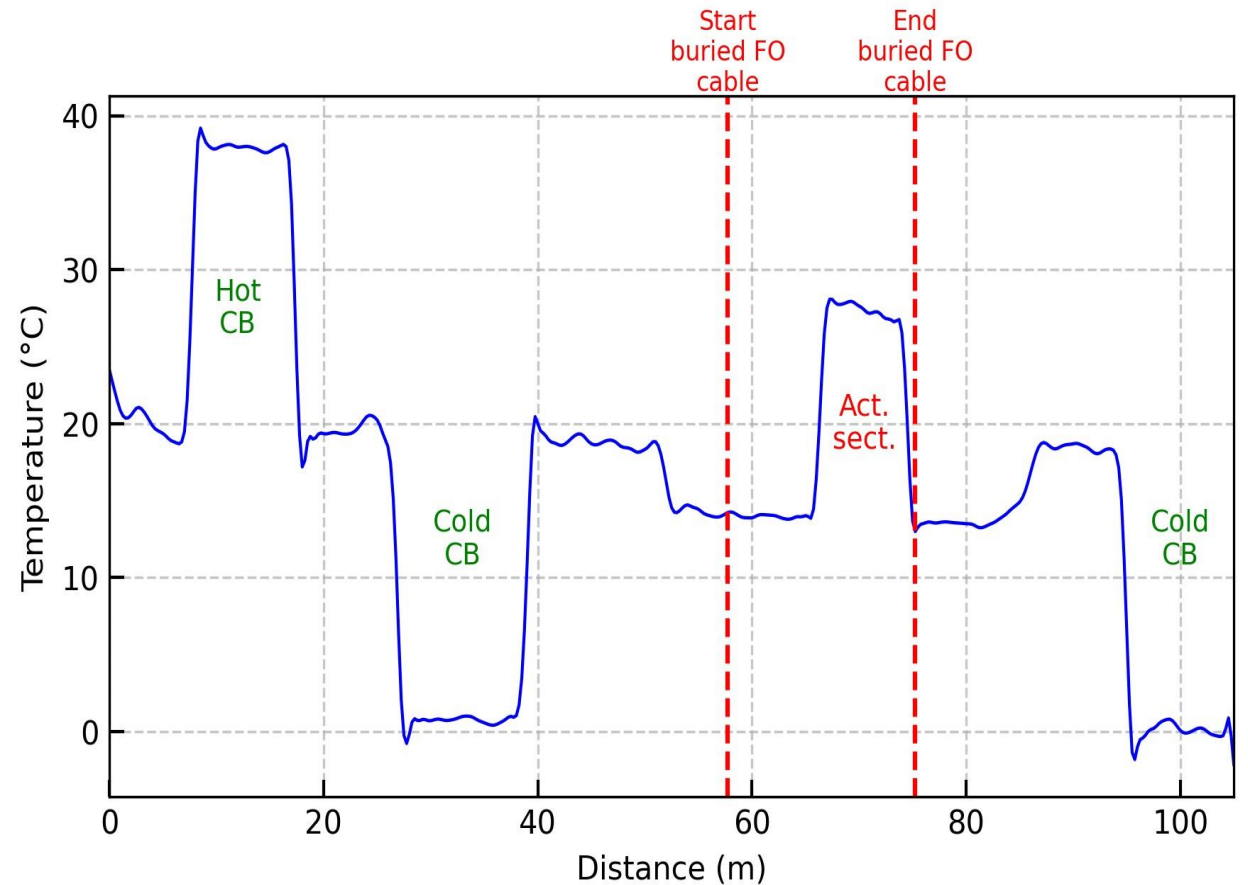
Aspect quantitatif: essais d'infiltration

Evolution de la température le long de la fibre optique à un instant t

Passage de la fibre optique par:

- Bain de calibration chaud
- Bain de calibration froid
- A l'air libre
- Enterré dans les sédiments

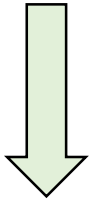
Mesures actives le long d'une partie de la section enterrée de fibre optique



Aspect quantitatif: essais d'infiltration

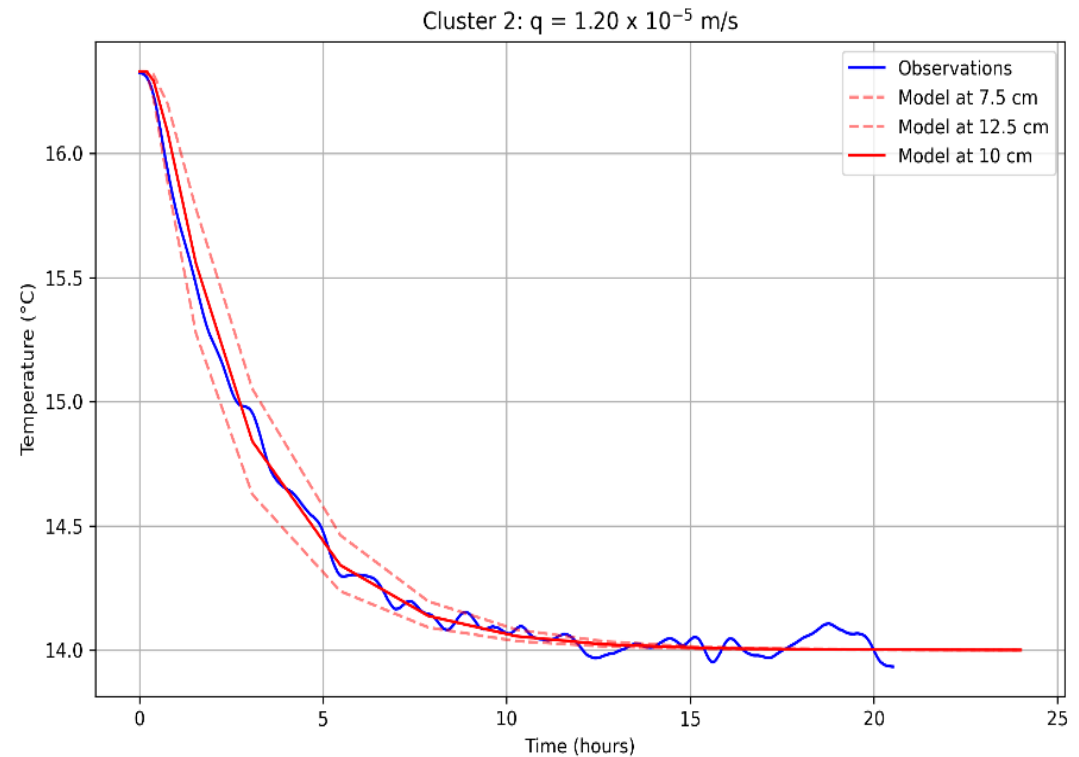
Interprétation des mesures passives

Différence de température entre les sédiments à température ambiante et l'eau froide utilisée pour le test d'infiltration



Interprétation du signal de température par modélisation numérique.

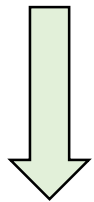
Estimation de l'infiltration au début du test de l'ordre de 10^{-5} m/s (85 cm/jour)



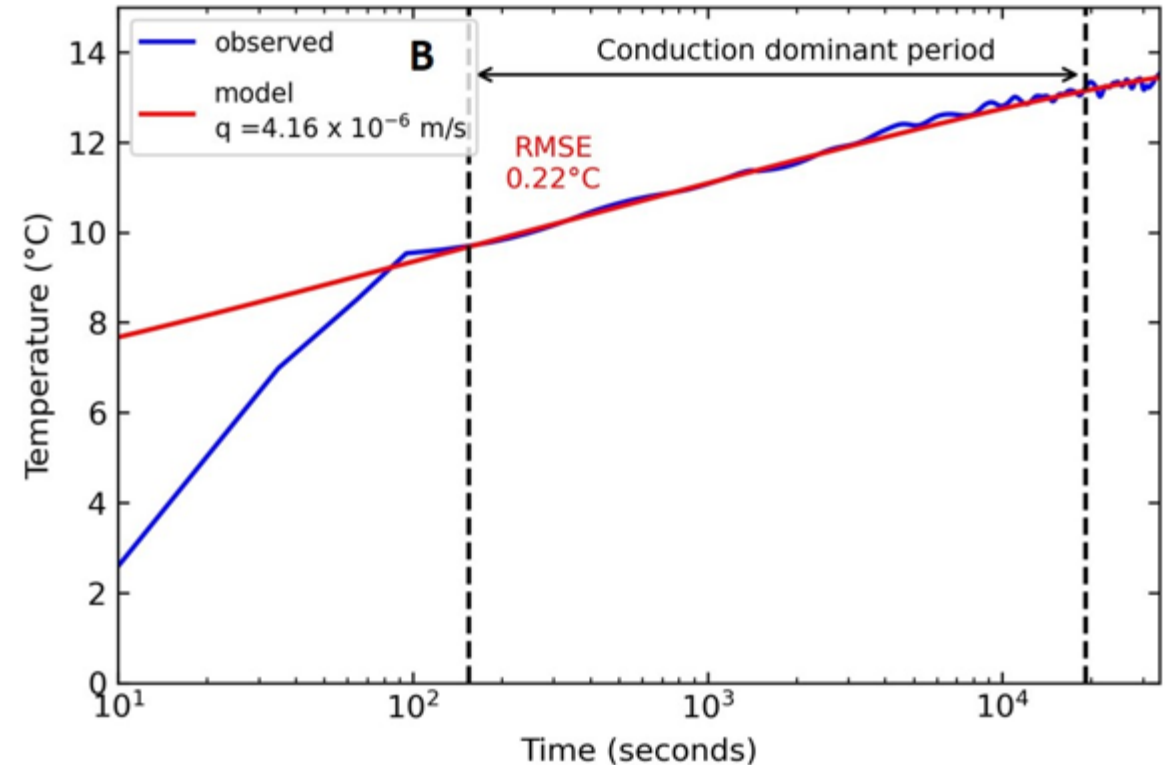
Aspect quantitatif: essais d'infiltration

Interprétation des mesures actives

Une fois le test d'infiltration commencé, variations naturelles de température trop faibles. Chauffe artificielle d'une section du câble de FO.

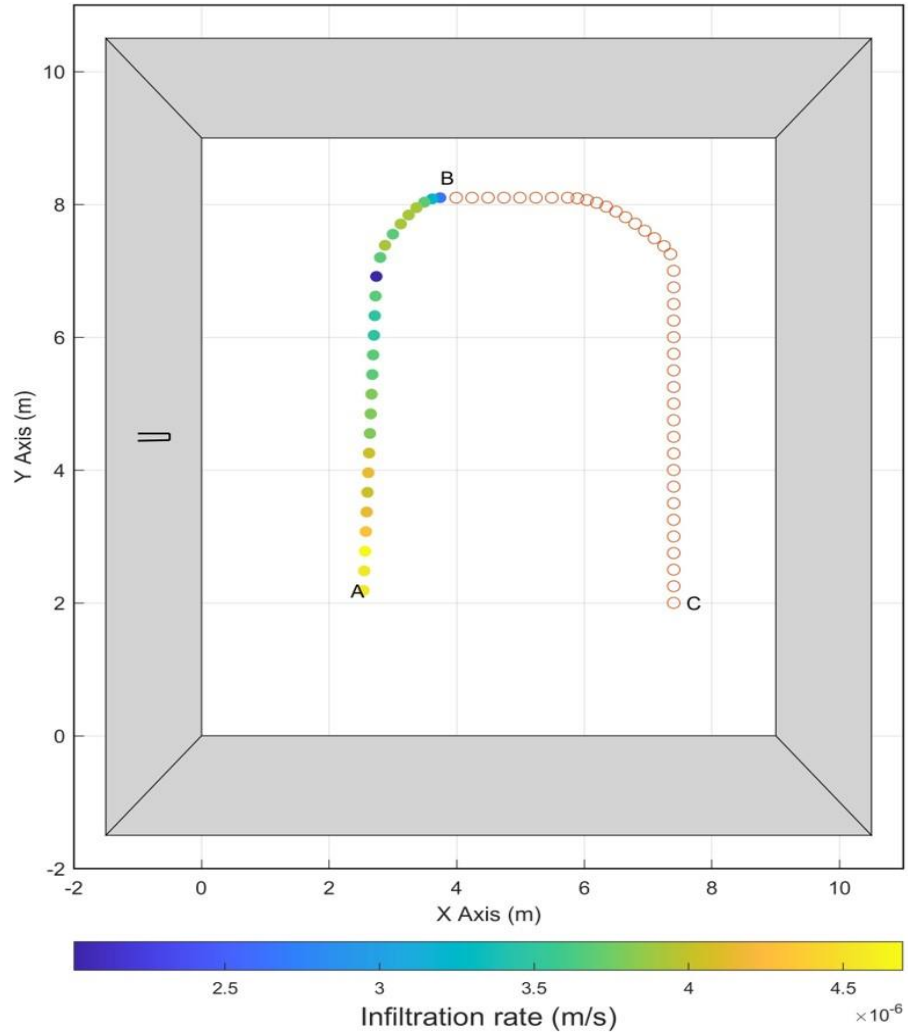


La reproduction du signal de température obtenu nous permet d'estimer une recharge moyenne de 4×10^{-6} m/S (35 cm/jour)

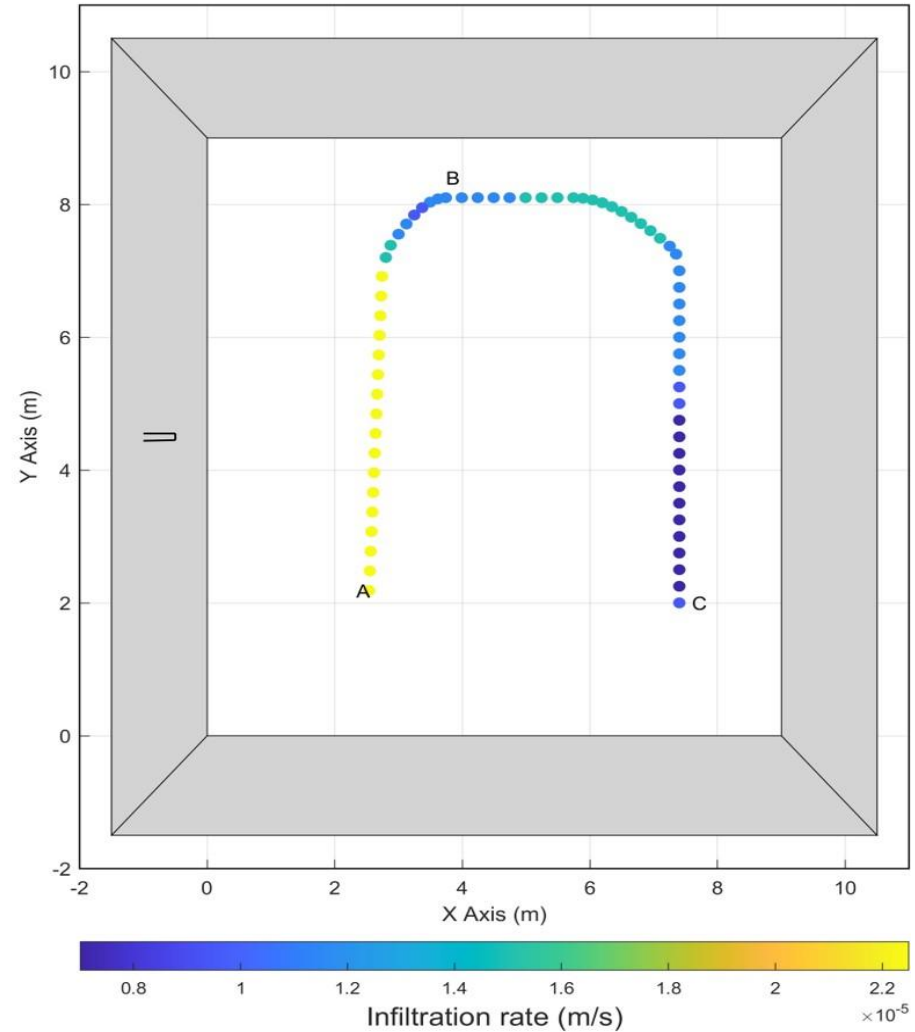


Aspect quantitatif: spatialisation des flux

Interpretation des données DTS actives



Interpretation des données DTS passive



Aspect quantitatif: essais d'infiltration

Conclusion

1. Utilisation de la méthode pour estimer des flux d'infiltration dans le cadre d'études de préféabilité de recharge maîtrisée des aquifères
2. Vitesses d'infiltration suffisamment importantes que pour pouvoir effectuer de la recharge maîtrisée des aquifères.

Aspect qualitatif: campagne échantillonnage

Potentielle source d'eau de recharge dans le bassin du Geer

Eaux de ruissellement
aéroportuaires → Contaminants d'intérêts
émergents?

Etat de l'art

- CECs étudiés depuis peu d'années → d'autant plus en zone aéroportuaire.
- Peu d'étude de recharge maîtrisée des aquifères avec de telles eaux.

Objectifs:

- I. Identifier les potentiels contaminants dans les eaux de ruissellement.
- II. Evaluer l'effet saisonnier sur la concentration des contaminants rencontrés.



Aspect qualitatif: campagne échantillonnage

Quoi? Eaux de ruissellement récoltées dans des bassins d'orage en Hesbaye

Quand? Printemps 2022, hiver 2023, automne 2023

Pourquoi? Caractérisation chimique afin d'évaluer leur pertinence pour de la MAR

Où? Aéroport de Liège
Le long de voiries

Comment? 4 lieux d'échantillonnage

Quels paramètres?

Classiques: Métaux, HAP/PCB, cyanures, etc...
CECs: alkylphénols, benzotriazoles, OPFRs, etc...

Quelle approche?

Criblage de contaminants suspectés d'être présents → Contaminants PMT (persistant, mobile et toxique)

Bassins de voiries

- Burettes 
- Gilon 

Bassin de l'aéroport

- Sud 
- Carlens 



Partie 3: Résumé recherche doctorale

Aspect qualitatif: campagne échantillonnage

Origine:

Commune de Crisnée: eaux domestiques

→ Produits de soin personnel, produits nettoyeurs, etc...

Aéroport: agents tensio-actifs

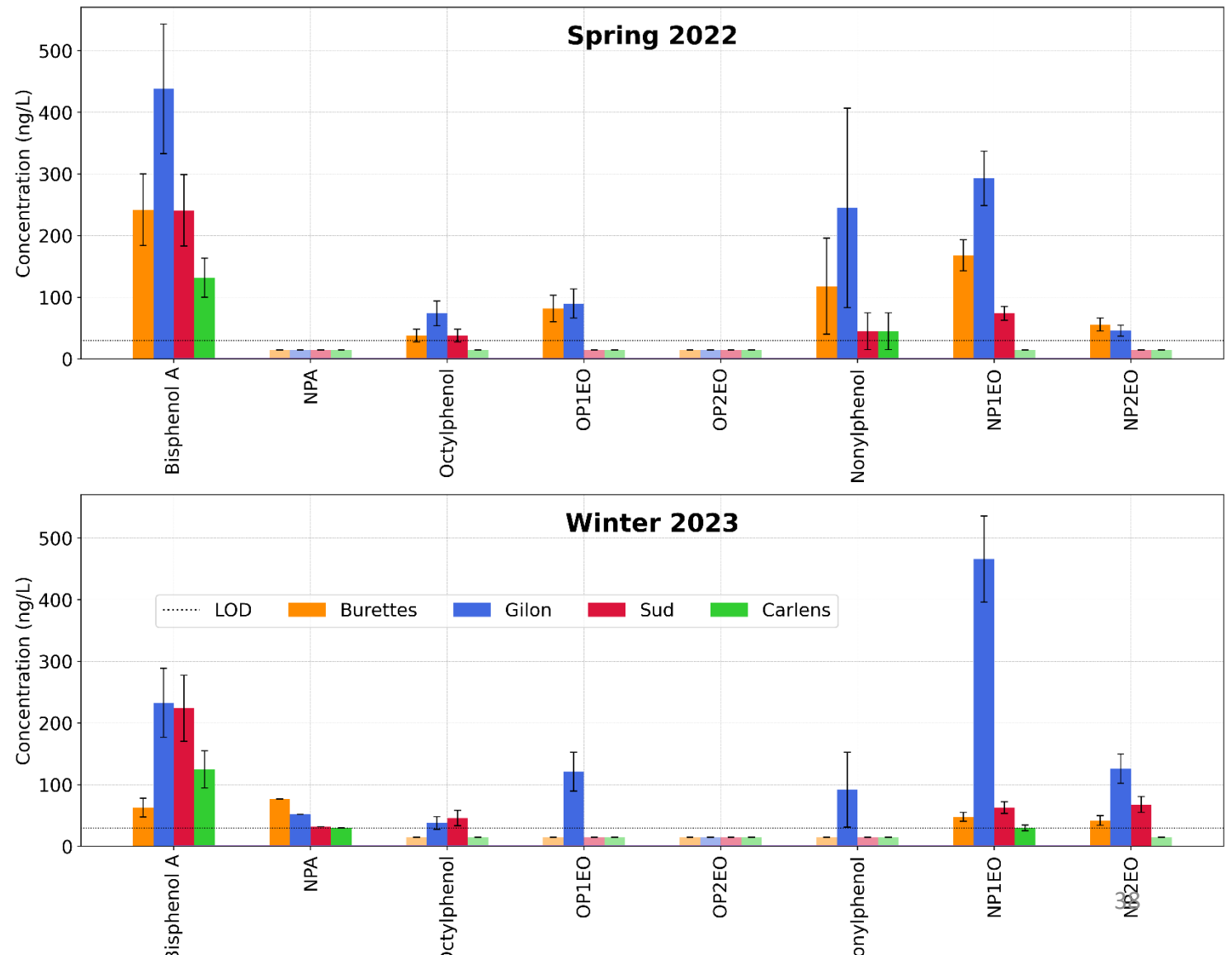
→ Produits nettoyeurs des avions, activités de maintenance et de réparation, opération de dégivrage, etc...

saisonnalité:

Pour les alkylphénols, pas d'effet saisonnier clairement marqué.

Pour produits de dégivrage, aspect saisonnier plus marqué en hiver (e.g. additifs benzotriazoles).

Exemple: alkylphénols



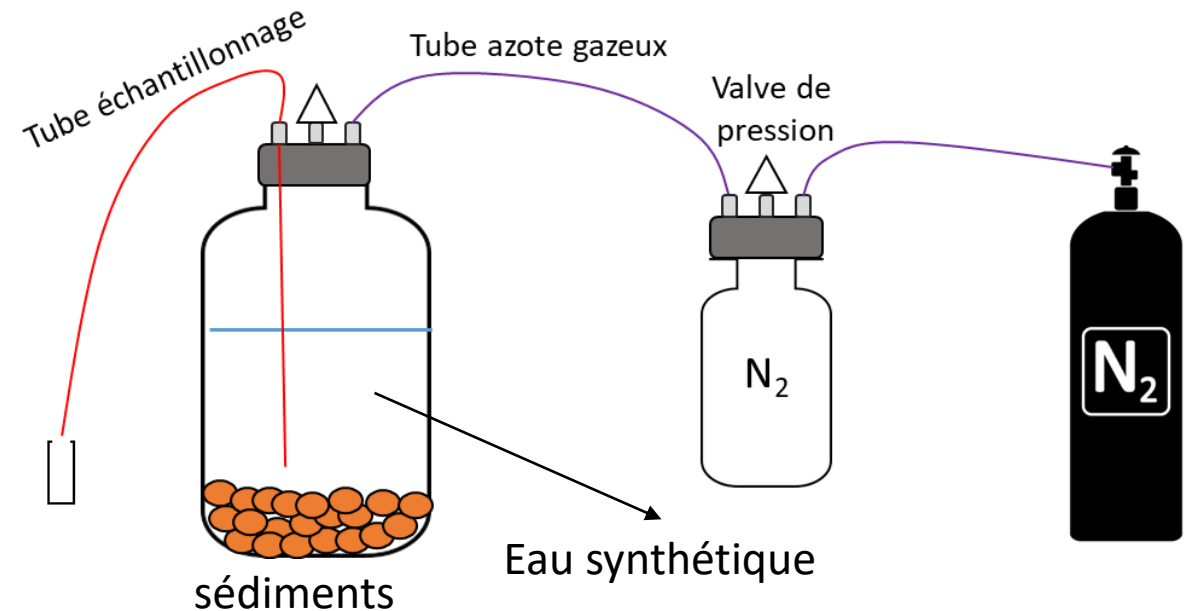
Aspect qualitatif: travaux de laboratoire

Objectif:

Evaluer le comportement (sorption, biodégradation, etc...) des contaminants identifiés dans les eaux de ruissellement lorsque mis en contact avec le loess de Hesbaye

Comment?

Préparation d'expériences « batch » où l'évolution de la concentration des contaminants est évaluée au sein d'un réacteur contenant de l'eau synthétique et les sédiments (loess de Hesbaye)



Aspect qualitatif: travaux de laboratoire

Set-up des expériences

Trois réacteurs batch:

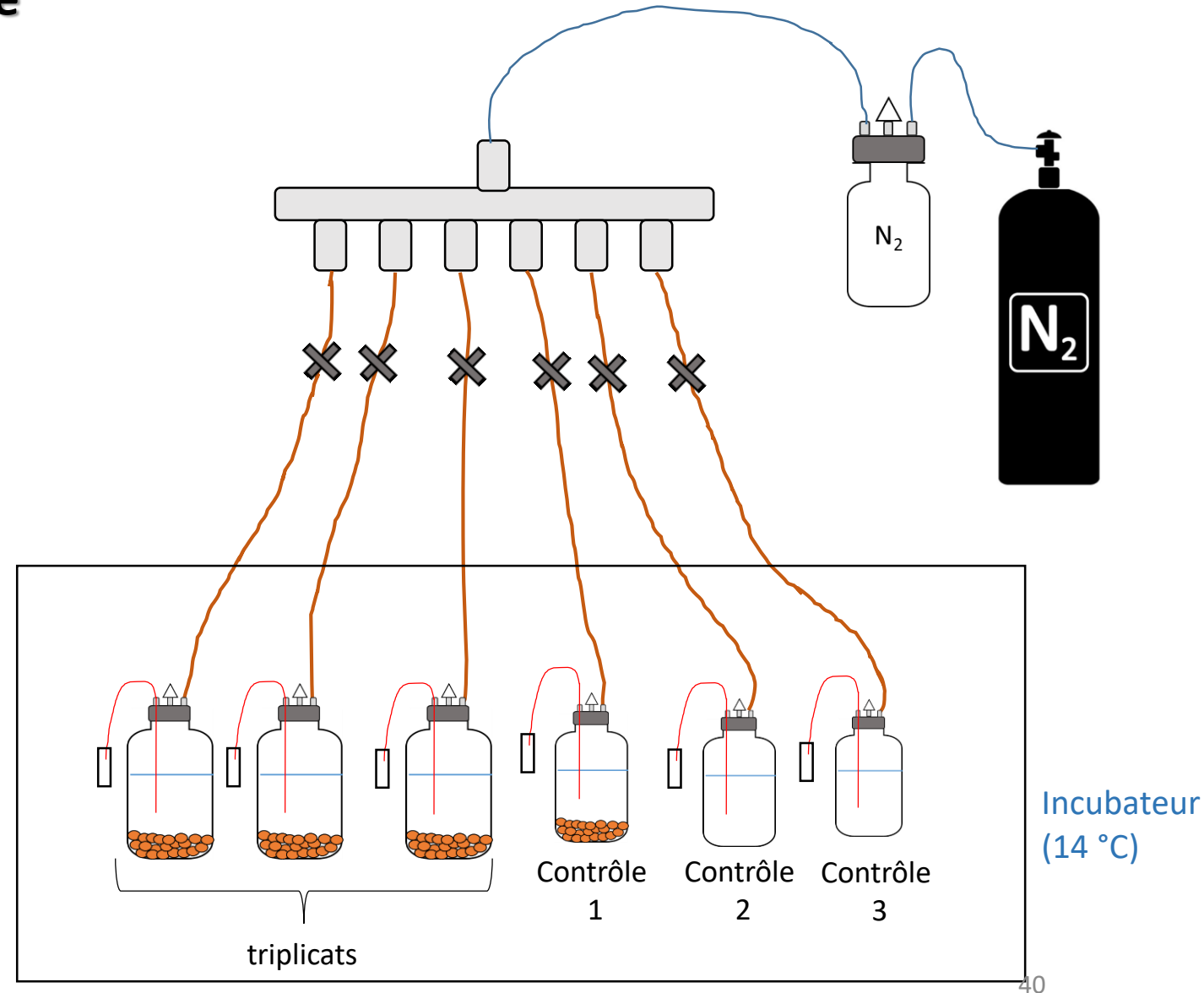
Triplicats pour s'assurer de la reproductibilité des résultats

Trois réacteurs contrôles:

Contrôle 1: sorption

Contrôle 2: biodégradation

Contrôle 3: adsorption sur paroi des réacteurs



Aspect qualitatif: travaux de laboratoire

Préparation des eaux synthétiques



Préparation des triplicats et des contrôles



Réacteurs dans l'incubateur



Aspect qualitatif: travaux de laboratoire

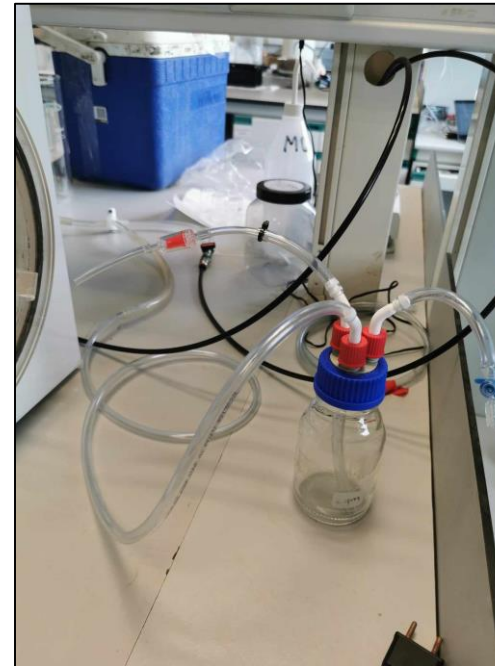
Tubes d'échantillonnage et pour
 l'azote gazeux



Connexion multiple pour
 l'apport en azote gazeux



Petite bouteille remplie
 d'azote gazeux



Jonction pour la collecte
 des échantillons

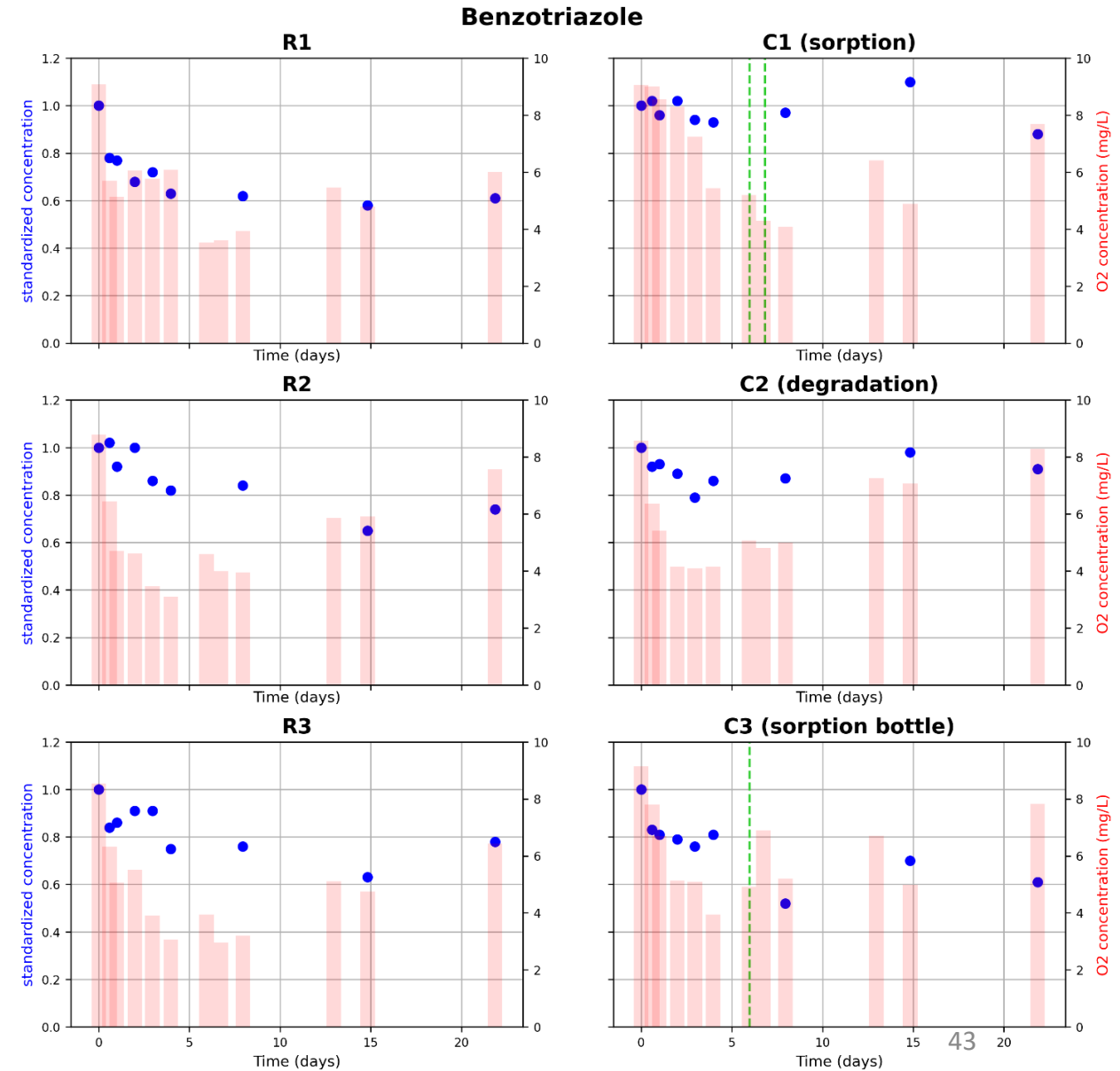


Aspect qualitatif: travaux de laboratoire

Exemple de résultats pour le benzotriazoles

Durée de l'expérience: 4 semaines

Echantillons collectés après 0h, 12h, 24h, 2 jours, 3 jours, 4 jours, 2 semaines, 3 semaines, 4 semaines



Aspect qualitatif: travaux de laboratoire

Conclusion

1. La campagne d'échantillonnage offre une meilleure vue d'ensemble quant à la présence ou non de contaminants dans les eaux de ruissellement de voirie et aéroportuaires, avec des plus fortes concentrations rencontrées en hiver.
2. Les travaux de laboratoire permettent une meilleure compréhension des propriétés physico-chimiques des contaminants étudiés

Travaux finaux

1. Aspect quantitatif:

Estimation de la recharge



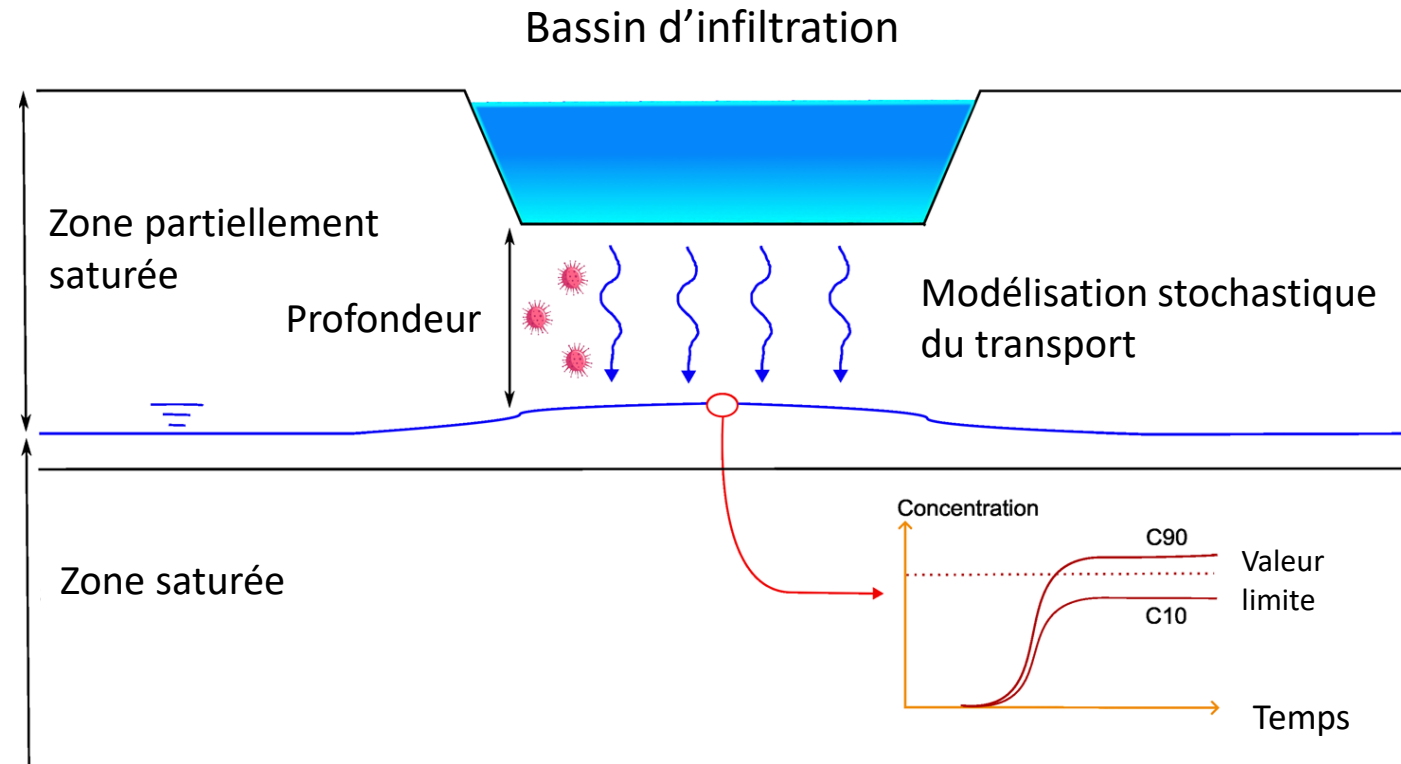
2. Aspect qualitatif:

Paramètres physico-chimiques



3. Modélisation numérique:

évaluation des risques de contamination des eaux souterraines



Conclusion: Projet MARWAL

Quoi? Convention entre la SPGE, la SWDE et l'Université de Liège relative à une étude de faisabilité de la recharge maîtrisée des nappes d'eau souterraine, avec une première application à l'aquifère des craies de Hesbaye dans le cadre du Plan de relance wallon et de la mission déléguée à la SWDE (SRRE 2.0)

Pourquoi? Stocker des eaux de manière temporaire dans l'aquifère crayeux de Hesbaye pour être restituées ultérieurement

- Comment?**
1. Analyse macroscopique menée à l'échelle de la Wallonie pour évaluer la pertinence et la faisabilité de la MAR sur base de données existantes.
 2. étude de faisabilité technique pour la mise en œuvre d'un système de MAR pour la nappe des craies de Hesbaye.

Partenaires: CEBEDEAU, AIDE, Geolys, RAISô, CILE



<https://www.lavenir.net/regions/huy-waremme/crisnee/2023/07/13/on-teste-a-crisnee-la-recharge-maitrisee-des-nappes-phreatiques-GP2OQLM4FRAHFLGBC423H6ZSLI/>



Plan de relance de la Wallonie et mission déléguée à la SWDE



Contacts: Robin.Glaude@Uliege.be