

Les enjeux agricoles de l'irrigation avec des ➤ eaux usées traitées

Nassim AIT MOUHEB

(Directeur de Recherche, INRAE-UMR GEAU)

nassim.ait-mouheb@inrae.fr

Sommaire

- **Enjeux REUT et technologies d'irrigation**
- **Effets bénéfiques ou négatifs sur le sol et les cultures?**
- **Disponibilité de la ressource en eaux usées traitées et besoins des plantes**
- **Les perspectives de recherche pour l'avenir**

➤ Les enjeux REUT pas que des questions sanitaires !

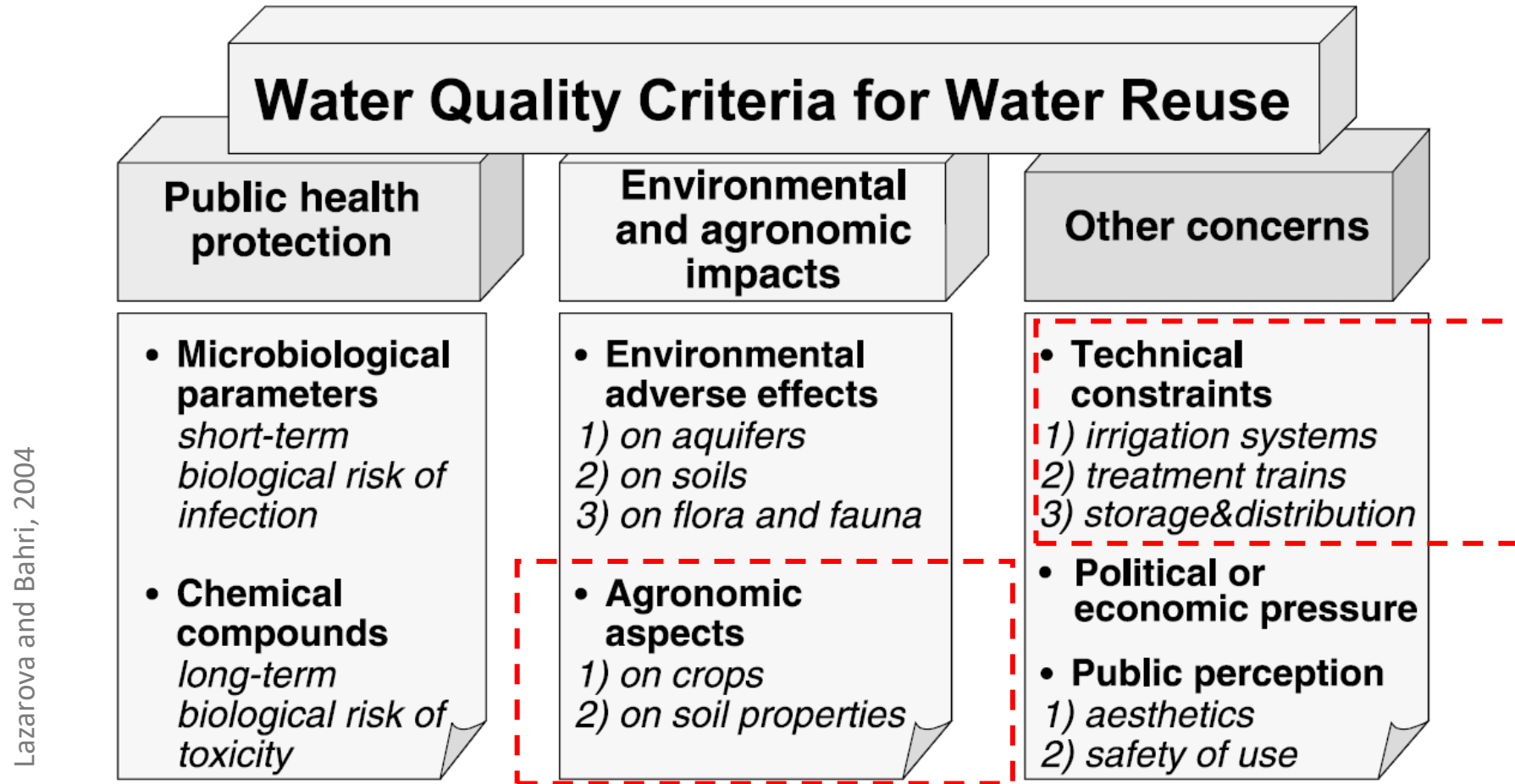


Figure 2.1 Main criteria influencing the choice of water quality in reuse systems for irrigation.

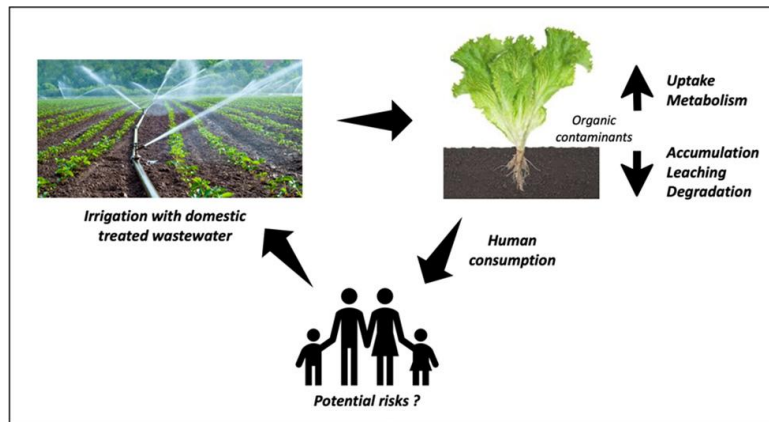
➤ Evolutions de la qualité des eaux le long du continuum eau-sol-plante



Procédés de traitement
(primaire, secondaire,
tertiaire)

Stockage des eaux usées
traitées

Technologies d'irrigation
(gravitaire, aspersion ou
goutte à goutte)



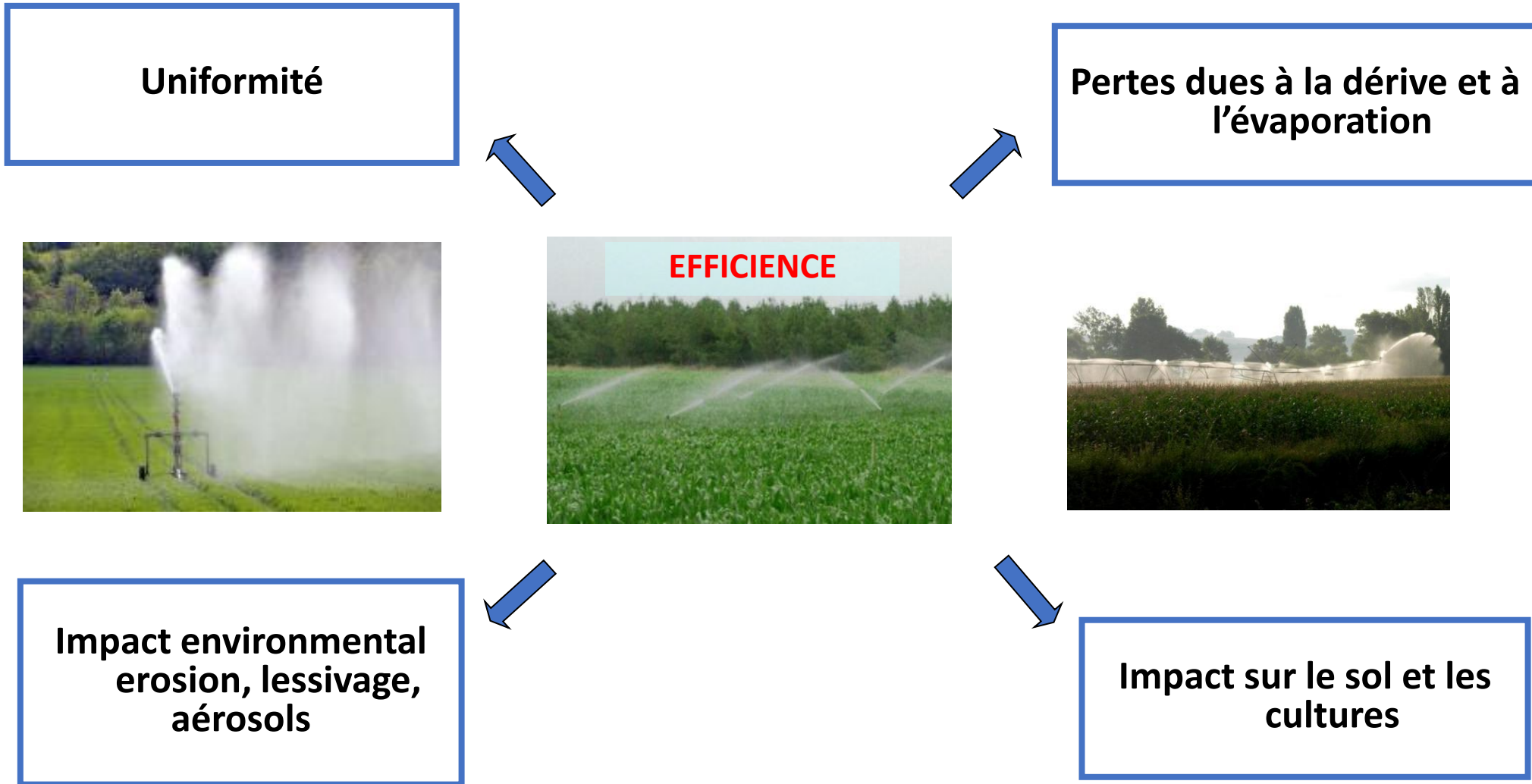
Plantes

Sol (salinité,
microbiome...)

INRAE

> Enjeux REUT et technologies d'irrigation

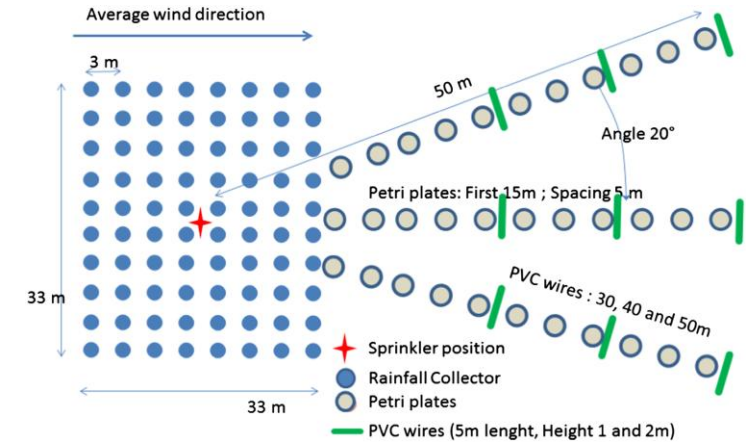
➤ REUT et irrigation par aspersion



➤ REUT et irrigation par aspersion

Risque de contamination des opérateurs et/ou riverains par dérive des gouttelettes en aspersion

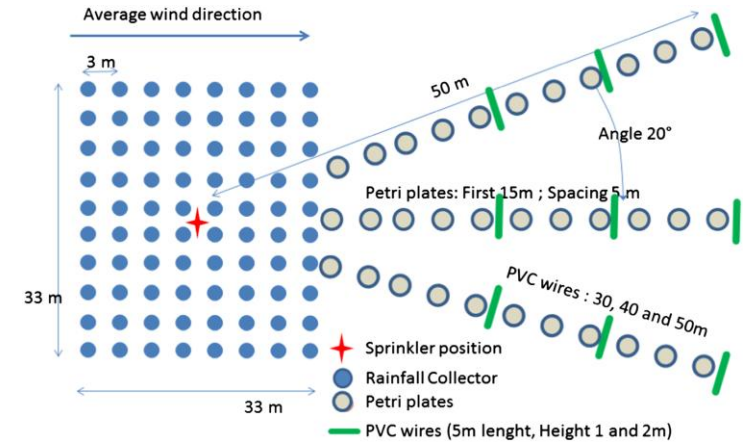
- Arrosage de gazon (une portée d'irrigation de 12,5 m)
- Distribution de l'eau + analyse de la dérive
- Concentration en traceur 0,5g/L
- Vitesse du vent en 3D, T°, Humidité, rayonnement



➤ REUT et irrigation par aspersion

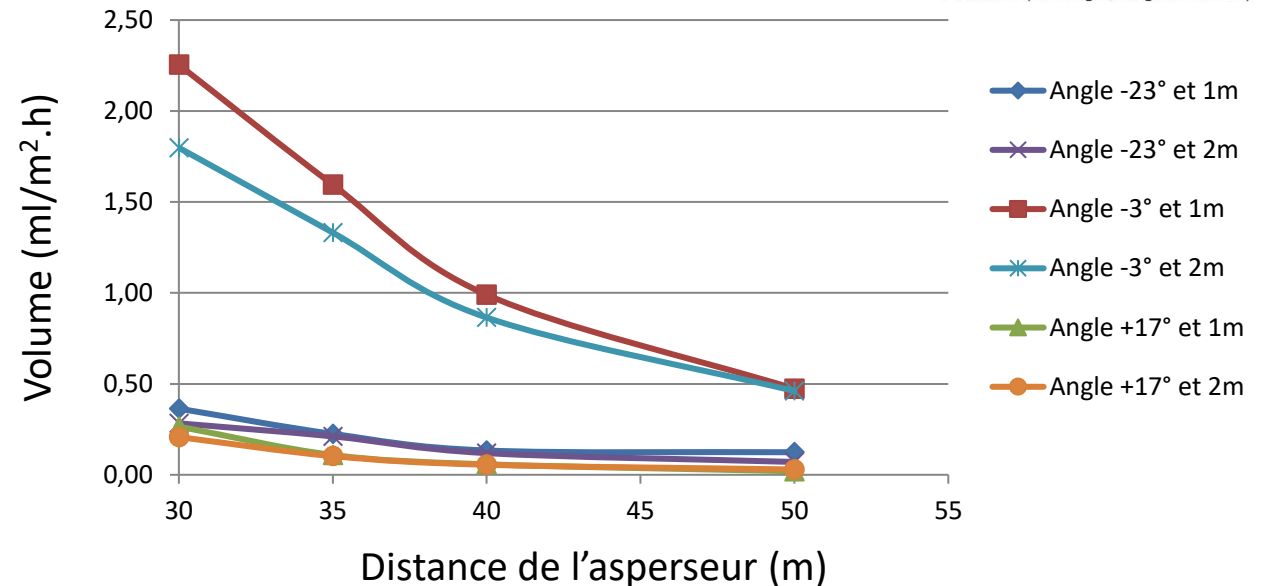
Risque de contamination des opérateurs et/ou riverains par dérive des gouttelettes en aspersion

- Arrosage de gazon (une portée d'irrigation de 12,5 m)
- Distribution de l'eau + analyse de la dérive
- Concentration en traceur 0,5g/L
- Vitesse du vent en 3D, T°, Humidité, rayonnement



Résultats:

- Plus d'eau dans la direction du vent
- Quantité d'eau collectée jusqu'à 50m:
 - À 30m ~ 0,2 à 2,3 ml/m².h
 - A 48m ~ 0,1 à 0,6 ml/m².h



Pour aller plus loin:



Experimental Approach to Assessing Aerosol Dispersion of Treated Wastewater Distributed via Sprinkler Irrigation

Bruno Molle¹; Severine Tomas²; Laurent Huet³; Mathieu Audouard⁴; Yannick Olivier²; and Jacques Granier⁵

Volume collecté par des cordes en PVC placées à 1 et 2 m au-dessus du sol et sous le vent de l'arroseur RB5000+, pour des vitesses de vent de 3 m/s

➤ REUT et irrigation par goutte à goutte

Avantages de l'irrigation goutte-à-goutte:

- 1) Distribution sous faible pression au voisinage de la plante (0.5 à 8 lh^{-1})
- 2) Efficience théorique de l'eau $>90\%^1$
- 3) Réduction des contacts eau-agriculteurs (Tarchitzky et al., 2013)



➤ REUT et irrigation par goutte à goutte

Avantages de l'irrigation goutte-à-goutte:

- 1) Distribution sous faible pression au voisinage de la plante (0.5 à 8 lh⁻¹)
- 2) Efficience théorique de l'eau >90%¹
- 3) Réduction des contacts eau-agriculteurs (Tarchitzky et al., 2013)



Problème majeur : LE COLMATAGE

Physique



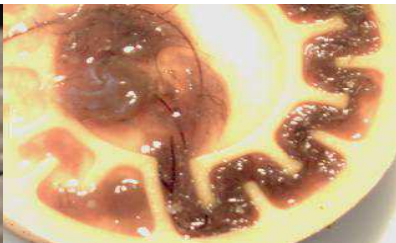
Agrégation de particules
(sable, argile)

Chimique



Précipitation chimique
(sels)

Biologique



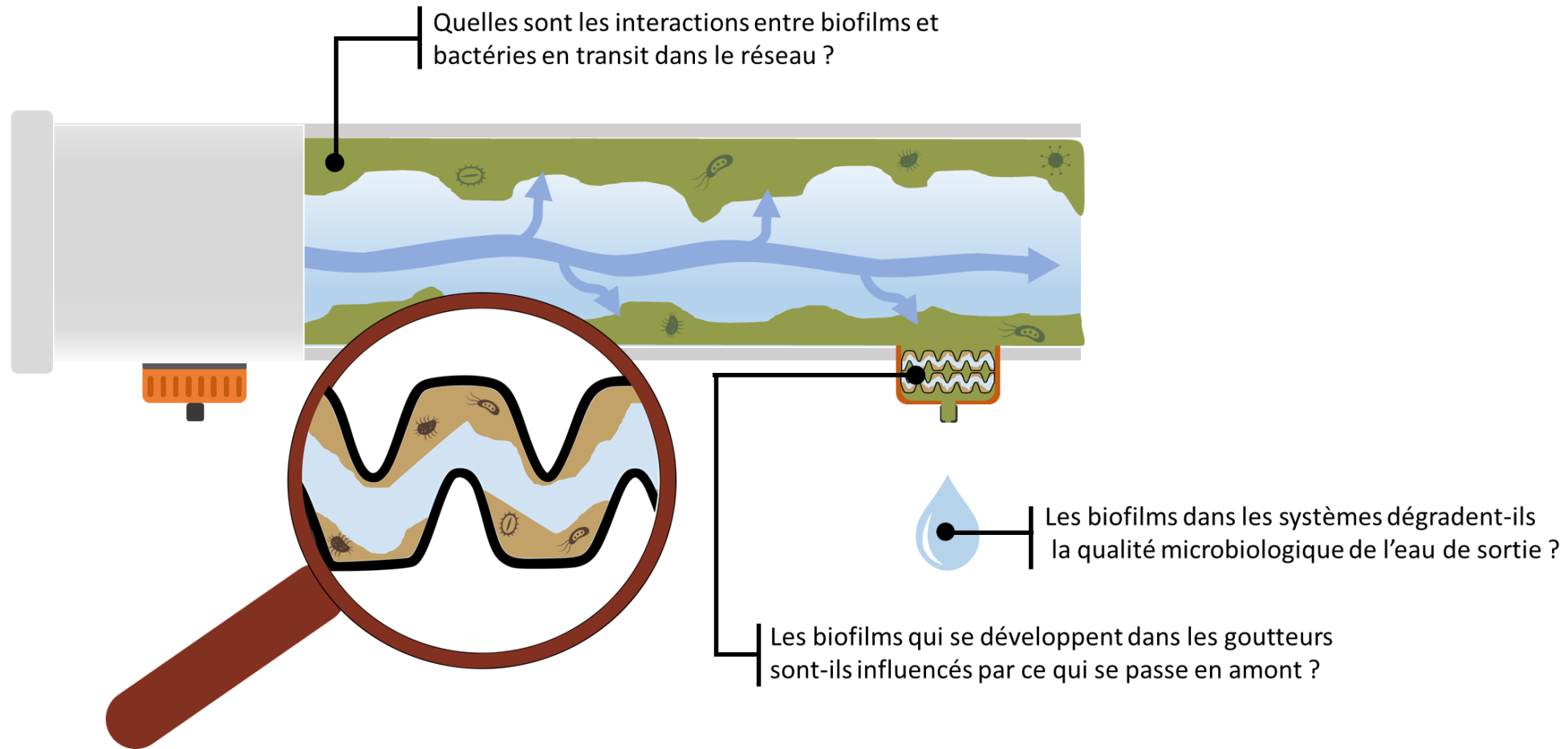
Biofilm

Effets négatives

- Uniformité de distribution
- Efficience de l'eau
- Rendements agricoles
- Opérations de maintenance
- Questions sanitaires (détachement des biofilms et pathogènes)

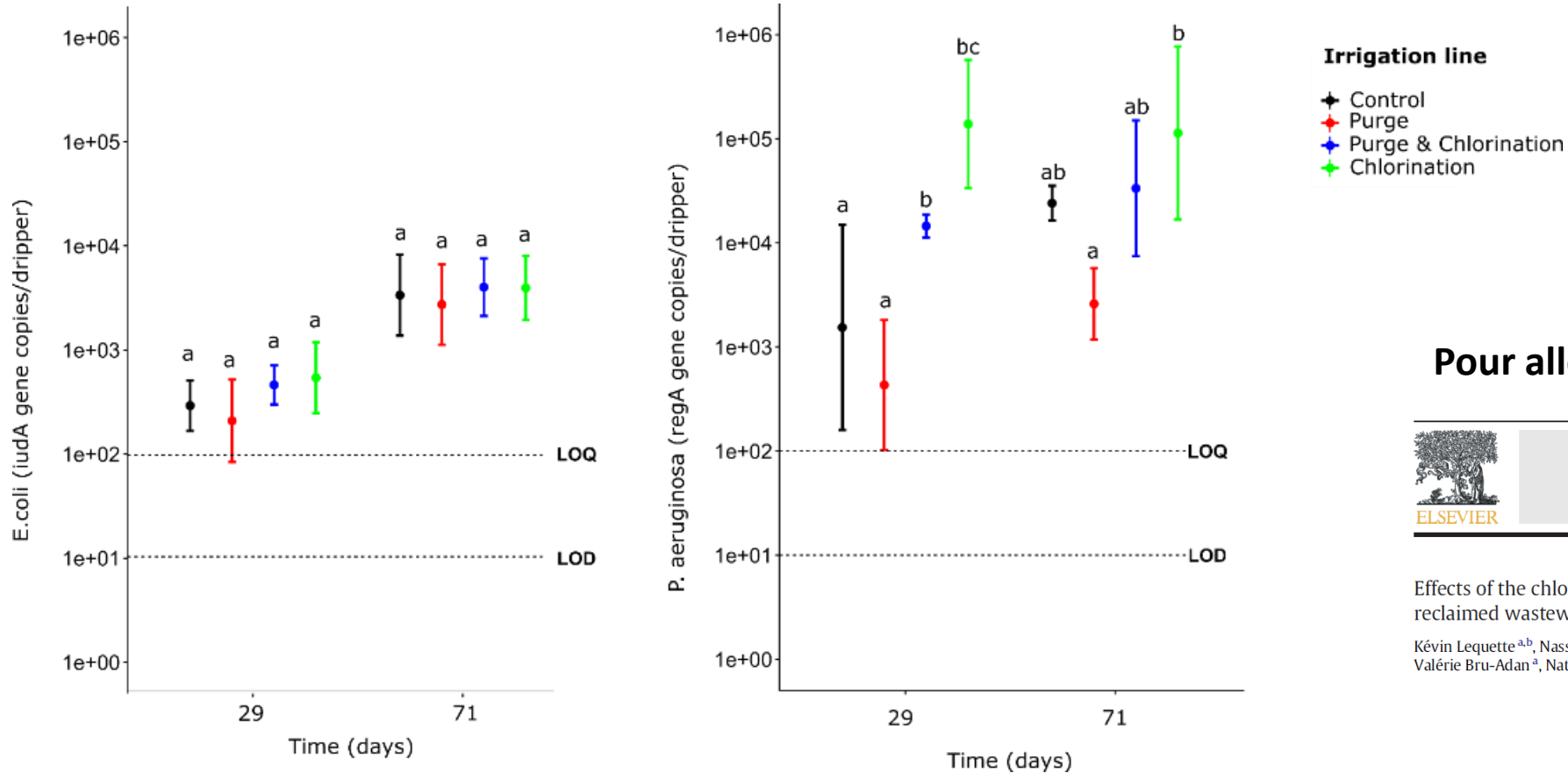
➤ REUT et irrigation par goutte à goutte

Des pathogènes dans les biofilms du colmatage?



➤ REUT et irrigation par goutte à goutte

E.coli et *P. aeruginosa* dans les biofilms du colmatage



Pour aller plus loin:



Effects of the chlorination and pressure flushing of drippers fed by reclaimed wastewater on biofouling

Kévin Lequette^{a,b}, Nassim Ait-Mouheb^b, Nicolas Adam^c, Marine Muffat-Jeandet^b, Valérie Bru-Adan^a, Nathalie Wéry^{a,*}

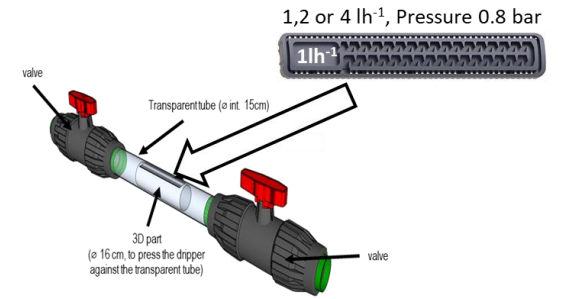
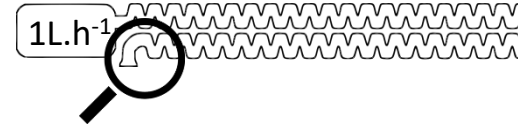
- Pas d'effet du traitement de nettoyage sur le maintien de *E. coli*
- Les concentrations en *P. aeruginosa* sont plus élevées dans les lignes chlorées

➤ REUT et irrigation par goutte à goutte

Gestion du colmatage: des solutions existent

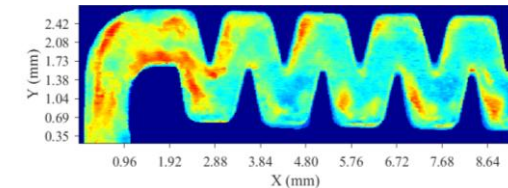
- Le choix des goutteurs: Débits et sections d'écoulement plus importants
- Filtration des particules: Filtres à sable, filtres à disque (80 μm)...
- Réduction de la teneur en nutriments (N,P et C)
- Dosage des biocides: Exemple, chloration à une concentration résiduelle de chlore libre de 0,5 à 1 mg HOCl/I à la fin de chaque cycle d'irrigation

Epaisseurs biofilm
après 2 mois d'évaluation

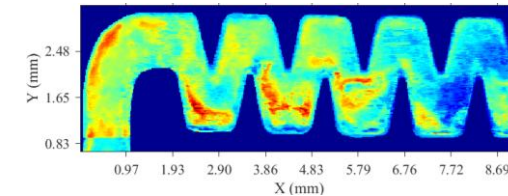


Tomographie en
Cohérence Optique
(OCT)

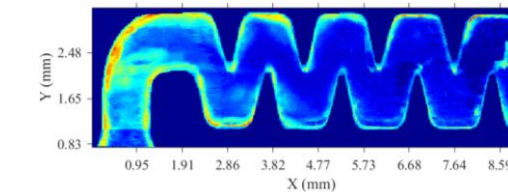
Témoin



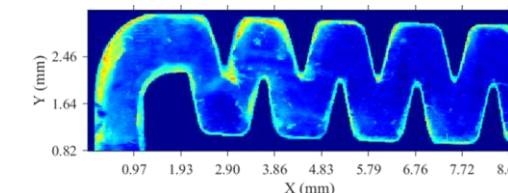
Purge



Chloration



Chloration
et purge

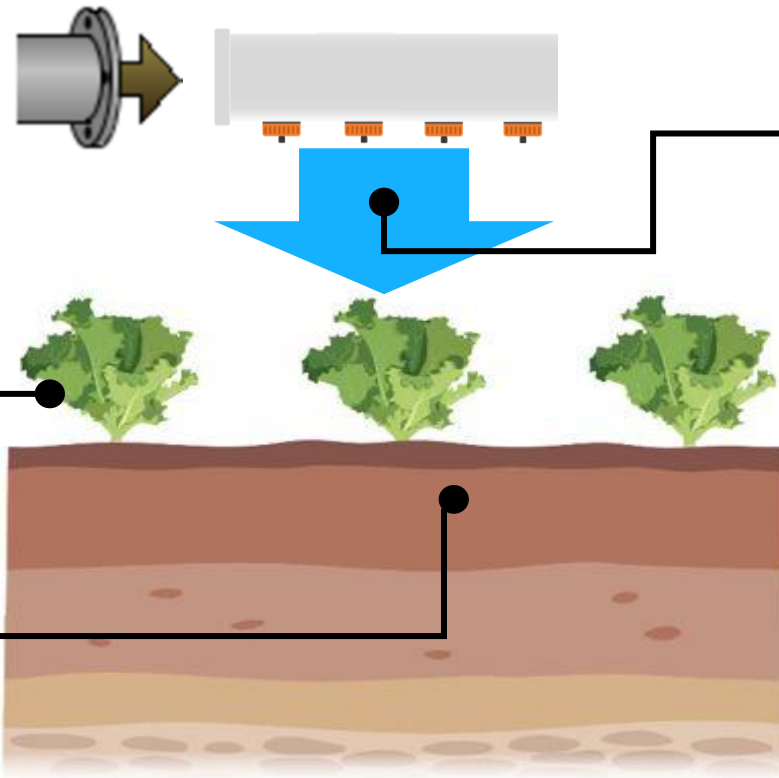


INRAE

- Effets bénéfiques ou négatifs sur le sol et les cultures?

➤ Effets bénéfiques ou négatifs sur le sol et les cultures?

Irrigation des cultures par les EUT



Quelle est la réponse des plantes?

Quel est l'impact de l'eau d'irrigation sur la structure du sol et le microbiome des sols ?

Table 8.2 Typical chemical characteristics of sewage effluent water that contribute to salinity

| Parameter | Units | Mean ^a | Min. ^a | Max. ^a | Increase ^{b,c} |
|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Total nitrogen (N) | mg/l | 15.2 | 2.8 | 39.0 | — |
| Total phosphorus (P) | mg/l | 5.9 | 0.0 | 12.0 | — |
| pH | pH | 7.9 | 6.2 | 9.8 | — |
| Total dissolved salts (TDS) | mg/l | 675 | 145 | 1224 | 150–380 |
| Electrical conductivity (EC) | dS/m | 1.3 | 0.2 | 2.9 | — |
| Sodium adsorption ratio (SAR) | (mmol _c /l) ^{0.5} | 6 | 3 | 12.2 | — |
| Sodium (Na) | mg/l | 181 | 62.0 | 312.0 | 40–70 |
| Calcium (Ca) | mg/l | 35 | 10 | 74.0 | 6–16 |
| Magnesium (Mg) | mg/l | 19 | 6 | 40.0 | 4–10 |
| Chloride (Cl) | mg/l | 135 | 9.3 | 340.0 | 20–50 |
| Potassium (K) | mg/l | — | — | — | 7–15 |
| Sulphate (SO ₄) | mg/l | 30 | 20 | 50 | 15–30 |
| Bicarbonate (HCO ₃) | mg/l | — | — | — | 50–100 |

^aNRMMC and EPHC (2006). Mean, minimum, and maximum are from median values from a range of reports.

^bAsano et al. (2007).

^cIncreases from domestic water values by effluent were stated, based on a medium strength wastewater with no commercial and industrial additions (Asano et al., 2007).

— = not available.

➤ Effets bénéfiques ou négatifs sur le sol?

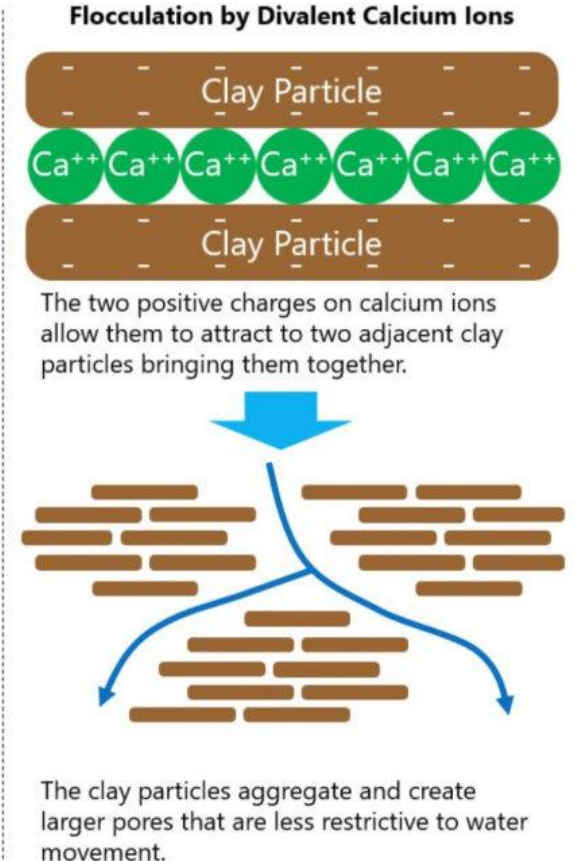
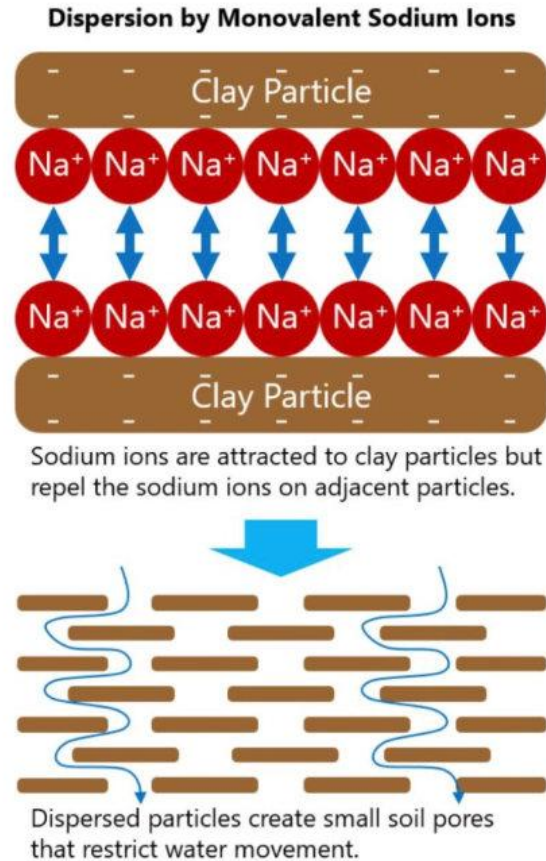
Salinité des eaux usées traitées et des sols

En irrigation REUT, le risque de salinité varie en fonction:

- Salinité initiale et des caractéristiques du sol
- Fréquence et type d'irrigation avec de l'eau salée
- Concentrations en éléments chimiques contribuant à la salinité en sortie de STEP

Les sources de la salinité des eaux usées traitées:

- Infiltrations dans les réseaux d'assainissement d'eaux de nappes phréatiques salées ou de l'eau de mer
- Produits de nettoyage....



(Barker et al., 2023)

➤ Effets bénéfiques ou négatifs sur les cultures?

Adapté de Maas et Hoffman (1977).

Salinité des eaux usées traitées et plantes

Observations des feuilles de laitue après 4 cycles de culture irriguée avec des eaux usées traitée ou brute (Ait-Mouheb et al. 2022).

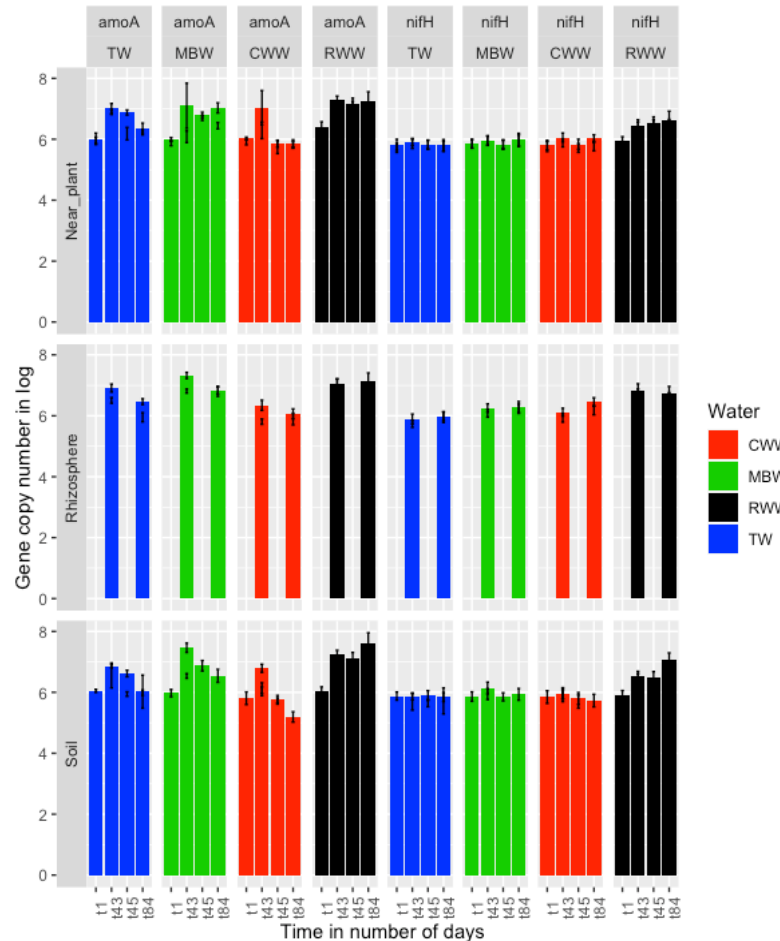
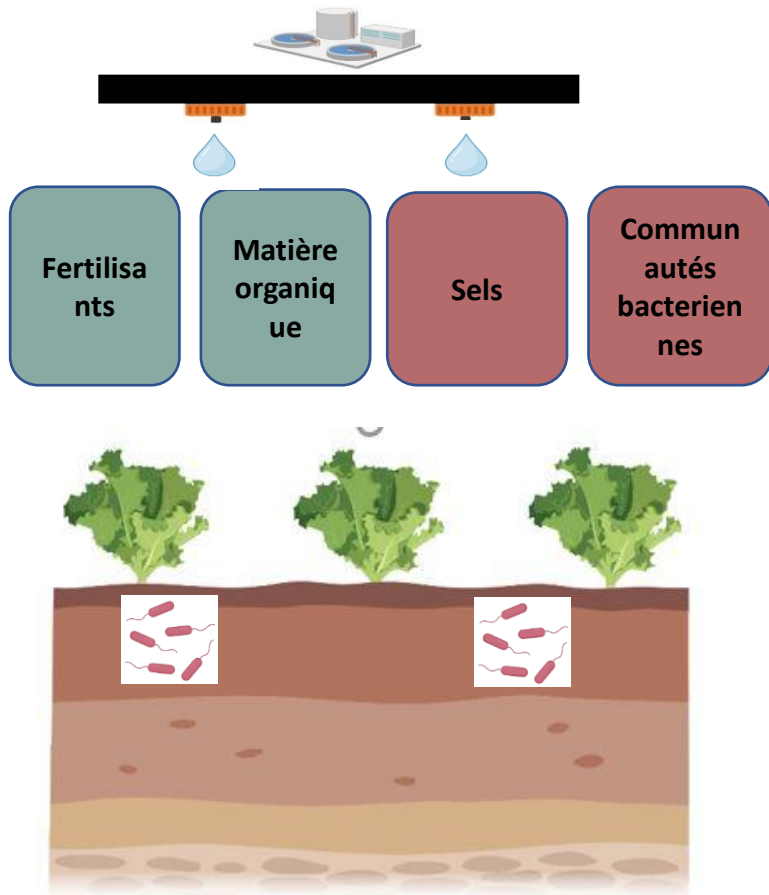


(A) Eau usée traitée (B) Eau usée brute

| Culture | Seuil de tolérance au sel, t (en unité dS/m) | Pourcentage de réduction des rendements à partir du seuil de tolérance(% / (dS/m)) |
|---------------------|--|--|
| Pelouse (Rye Grass) | 5 à 7 | |
| Amande | 1.5 | 19 |
| Abricot | 1.6 | 24 |
| Brocoli | 2.8 | 9.2 |
| Carotte | 1.0 | 14 |
| Maïs (grain) | 1.7 | 12 |
| Coton | 7.7 | 5.2 |
| Concombre | 2.5 | 13 |
| Palmier dattier | 4.0 | 3.6 |
| Vigne | 1.5 | 9.6 |
| Laitue | 1.9 | 13 |
| Oignon | 1.2 | 16 |
| Pomme de terre | 1.7 | 12 |
| Fraise | 1.0 | 33 |
| Tomate | 2.5 | 9.9 |

➤ Effets bénéfiques ou négatifs sur le sol?

Evolution de la concentration des gènes fonctionnels bactériens liés au cycle de l'azote



Nitrification augmente au cours du temps



Aucune différence dans la concentration de communauté de dénitrification



Augmentation de communauté de fixation de l'azote

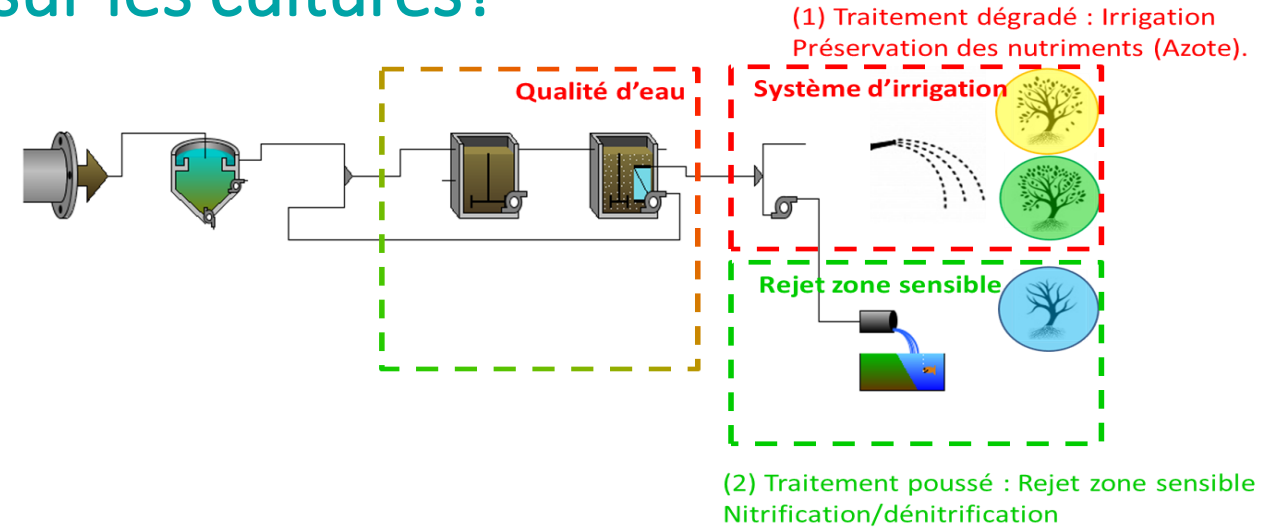
Pour aller plus loin:



Short-term effect of reclaimed wastewater quality gradient on soil microbiome during irrigation

V. Moulia^{a, b, c}, N. Ait-Mouheb^b, G. Lesage^a, J. Hamelin^c, N. Wéry^c, V. Bru-Adan^c, L. Kechichian^b, M. Heran^a

➤ Effets bénéfiques ou négatifs sur les cultures?



- Plusieurs études sur la REUT en agriculture sur différentes cultures comme la laitue (Cuba et al., 2015, Ait-Mouheb et al.2022), les aubergines et les tomates (Cirelli et al., 2012)....
- Selon les niveaux de traitement, pour chaque 1 000 m³ d'eaux usées traitées (Qadir et al. (2007)) :
 - 4 à 24 kg de phosphore,
 - 16 à 62 kg d'azote,
 - 2 à 69 kg de potassium
- La REUT peut être **une forme de ferti-irrigation qui peut réduire les besoins en engrais chimiques et permettre de réaliser des économies**

➤ Effets bénéfiques ou négatifs sur les cultures?

Irrigation du vignoble à Murviel Lès Montpellier:
Apports d'éléments nutritifs en 2022

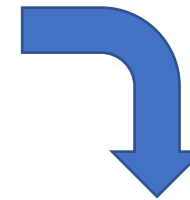
Une parcelle agricole pour les eaux entrant dans le cadre réglementaire (qualité C)

- Parcelle de 0,5 ha avec **vignes - oliviers et luzerne** classée en AOC.
- L'irrigation goutte à goutte. Une partie avec des eaux usées traitées, une autre partie témoin avec de l'eau claire .



Qualité physico-chimique de l'eau

| Qualité | Nitrate | Phosphate |
|---------------------|------------|-----------|
| | mg/l | mg/l |
| Eau usée traitée | 24.3 ± 4,9 | 0.6 ± 0,9 |
| Eau conventionnelle | 1.9 ± 0,04 | 0 |



Apports d'éléments nutritifs en 2022

| Qualité | Volume apporté | | Nitrate | Ammonium | Phosphate |
|---------------------|----------------|--------|------------|------------|------------|
| | m3/hectare | l/vine | kg/hectare | kg/hectare | kg/hectare |
| Eau usée traitée | 831.9 | 208.0 | 20.2 | 6.5 | 0.5 |
| Eau conventionnelle | 832.7 | 208.2 | 1.6 | 0.0 | 0.0 |

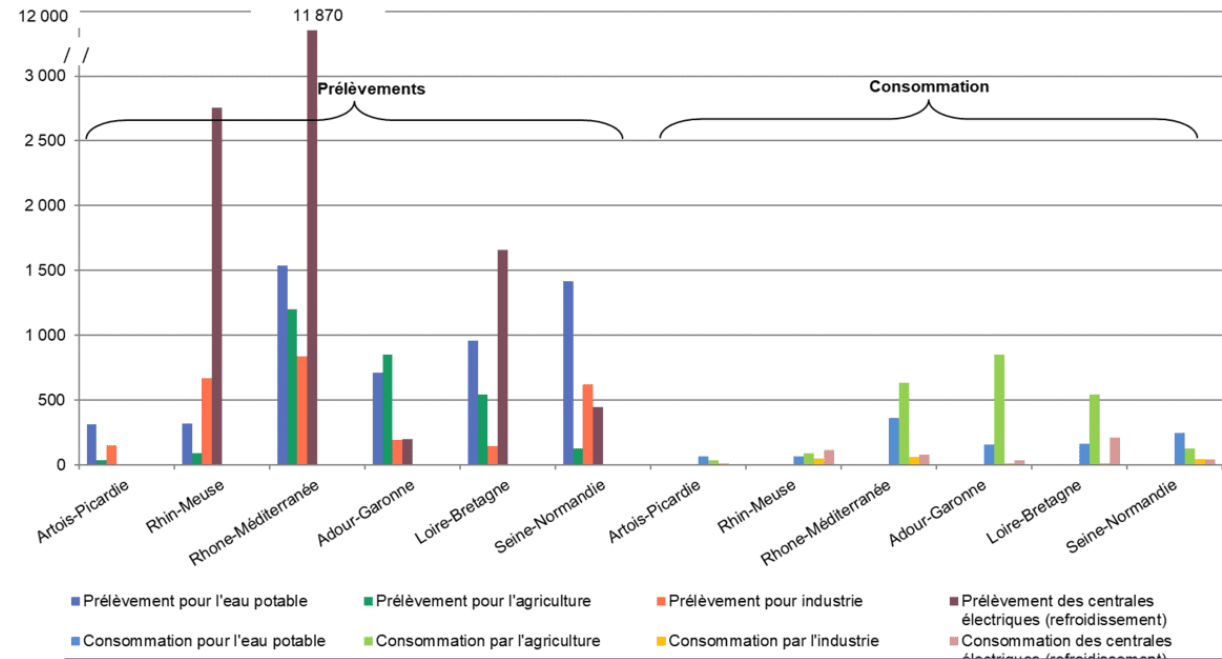
INRAE

- **Disponibilité de la ressource REUT et besoins des cultures**

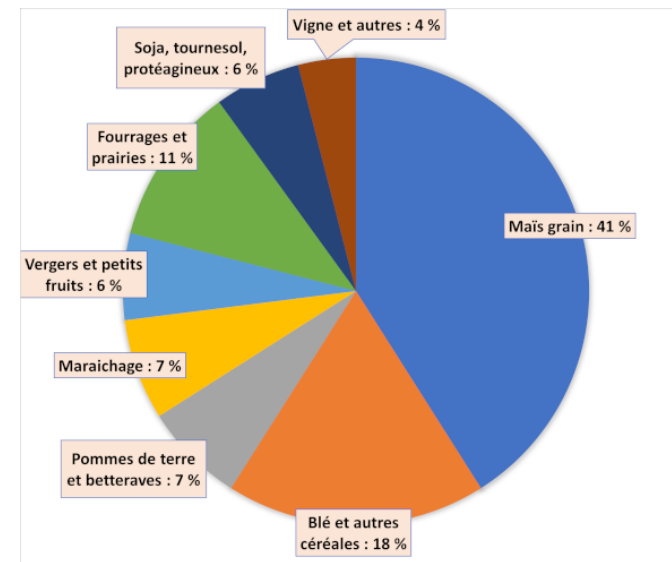
➤ Disponibilité de la ressource REUT et besoins des cultures

Quels sont les besoins en France?

- Agriculture 45% de l'eau consommée en France sur une année, cette part monte à 80% sur la période de juin à août (note le ministère).
- En 2020, **7,3% de la surface agricole était irriguée**, contre 5,8% en 2010, principalement dans la moitié sud de l'Hexagone.
- Les cultures irriguées sont d'abord le maïs à grain (41% de la surface irriguée), devant le blé ou le sorgho (17%) ([en 2010](#)).



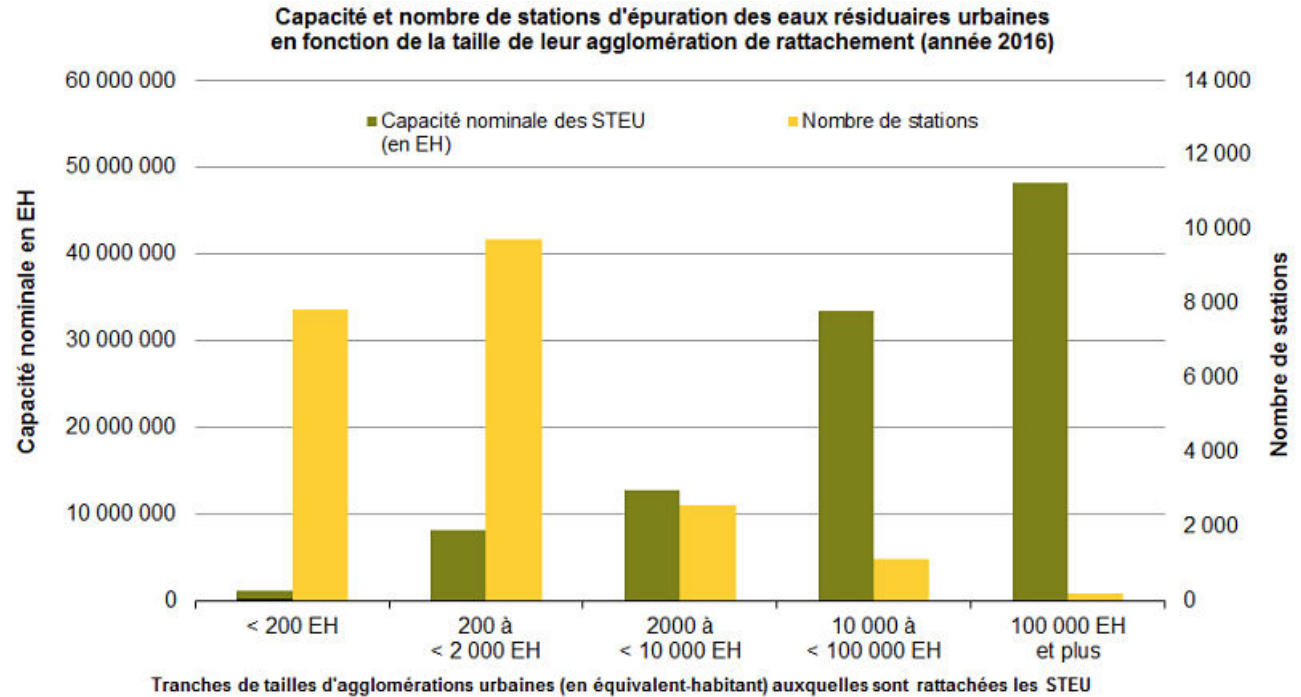
Prélèvements et consommation d'eau douce en France (moyenne 2010-2018) En millions de m³ (Source : SDES, 2023)



Répartition des cultures irriguées en France en 2010 [Source : Ministère de l'agriculture]

➤ Disponibilité de la ressource REUT et besoins des cultures

Quels sont les ressources REUT en France?

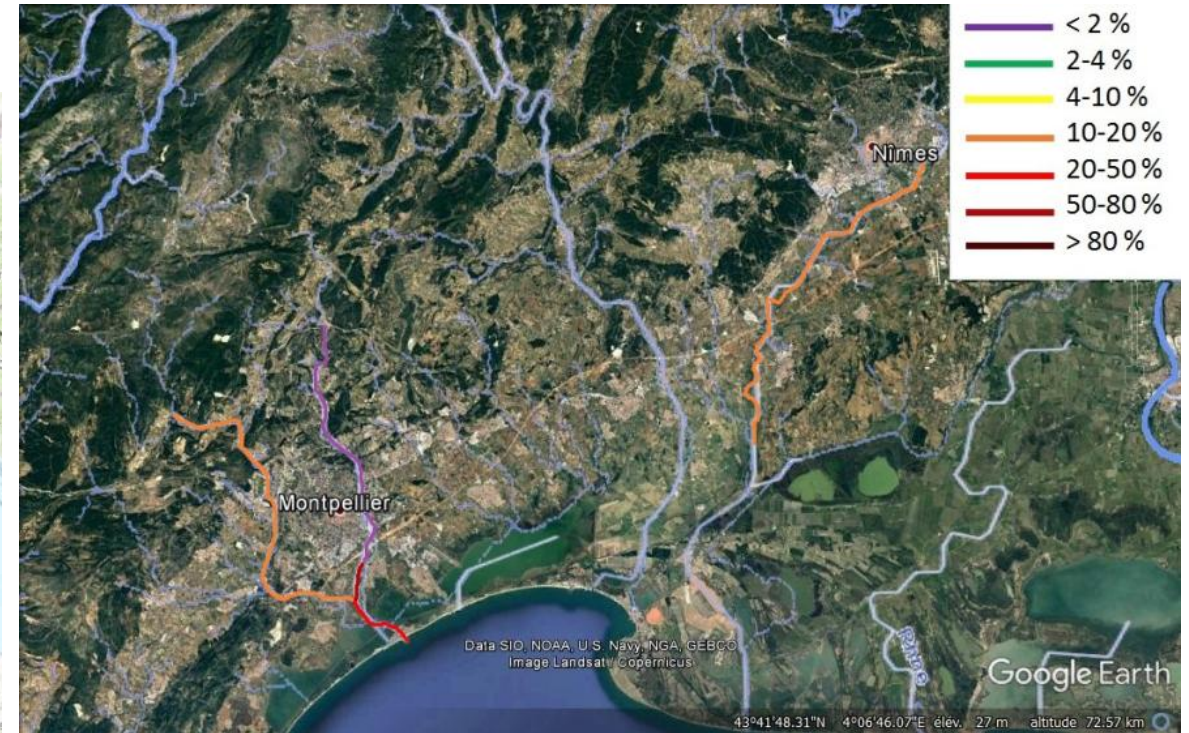
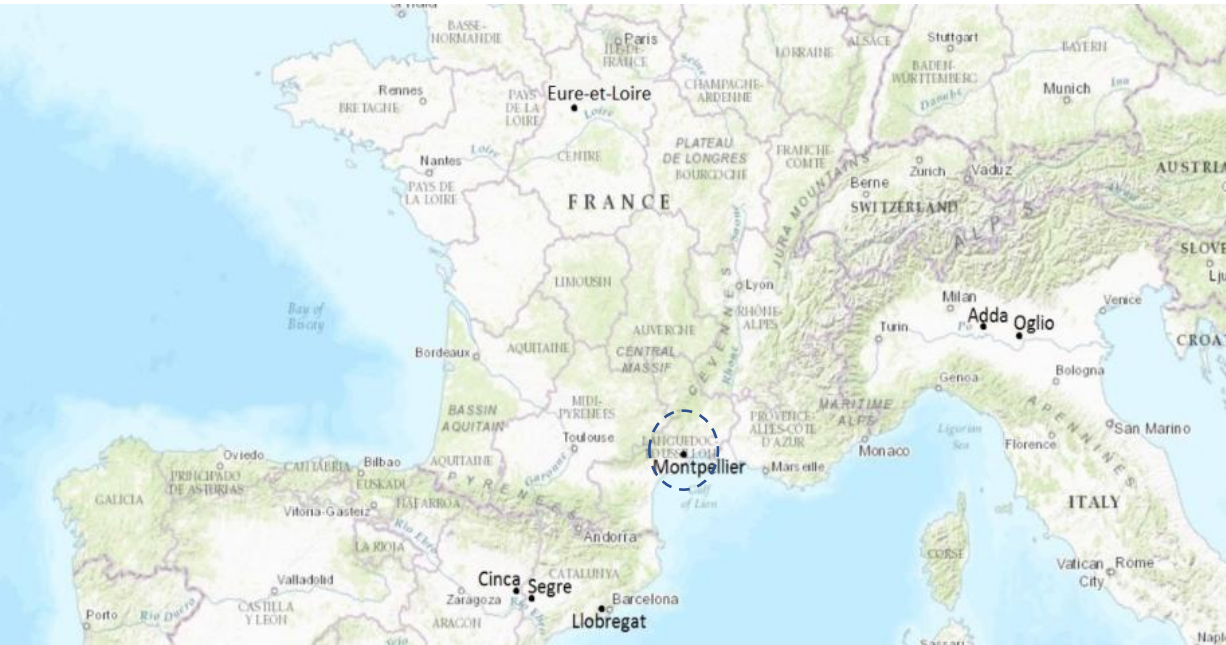


(notre-environnement.gouv.fr)

- Plus de **50 %** des stations une capacité théorique inférieure à **500 EH** (environ **75 m³/j**).
- À l'opposé, **6 %** des stations ont une capacité au moins égal à **10 000 EH** (environ **1500 m³/j**).
- Exemple à Roquefort Lés Corbières: Pour une station d'environ 1000 EH, **15 ha maximum de vigne sont irrigués avec des EUT contre 500ha de surface agricole.**

➤ Disponibilité de la ressource REUT et besoins des cultures

Compétition potentielle entre les projets REUT et les débits d'étiage, REUT indirect....



(source: Characterization of unplanned water reuse in the EU).

- Estimations de l'impact des eaux usées pour des tronçons de rivière sélectionnés dans les bassins du Vistre, de la Mosson et du Lez (avec indication des taux de dilution en 2017).

INRAE

➤ Quelques perspectives de recherche pour l'avenir



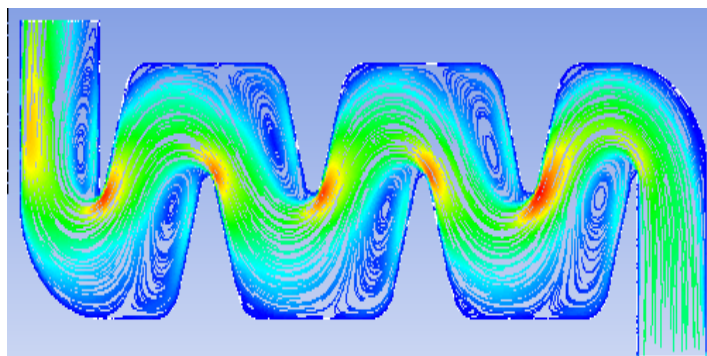
➤ Quelques perspectives pour l'avenir

1. Axe Efficience d'irrigation : Comment réduire le bio-colmatage des goutteurs?

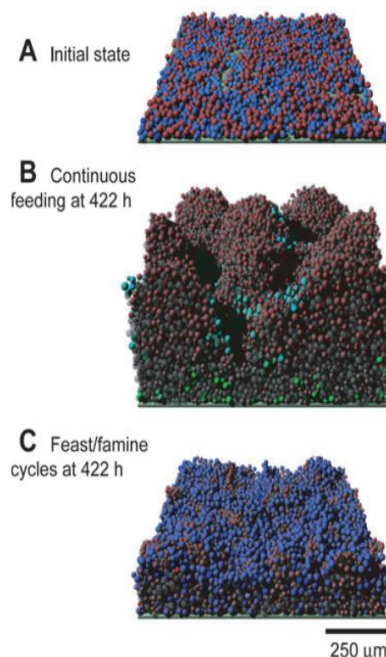
Compréhensions des mécanismes du bio-encrassement

Développement de modèles de croissance du biofilm et optimisation des goutteurs

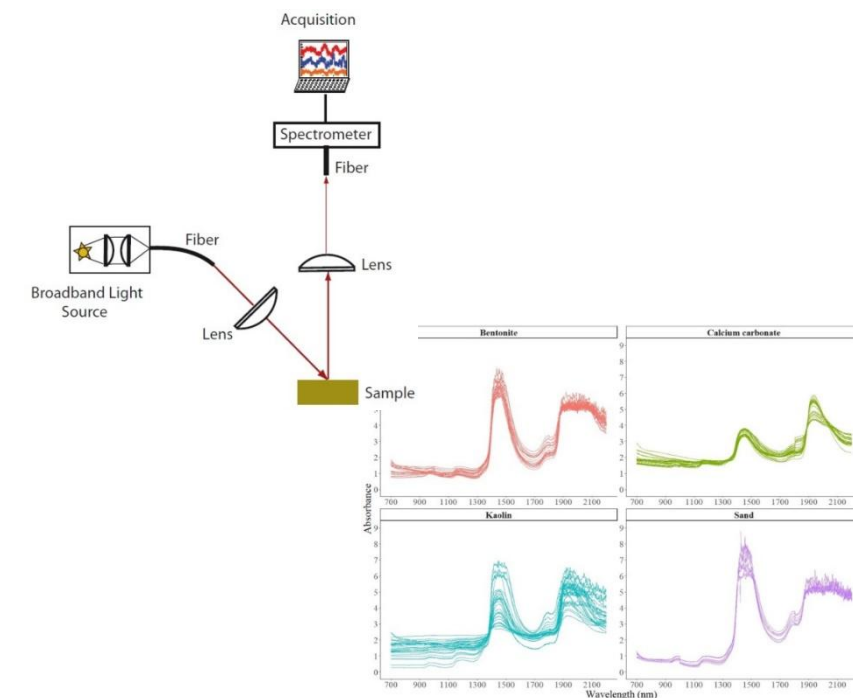
Quantification et qualification chimiométrique de l'encrassement



Simulation numérique de l'écoulement



Modèle individu centré et Structures de biofilm issues de simulations numériques



Concept des mesures par spectroscopie UV/Vis-NIR (700 nm – 2200 nm)

➤ Quelques perspectives pour l'avenir

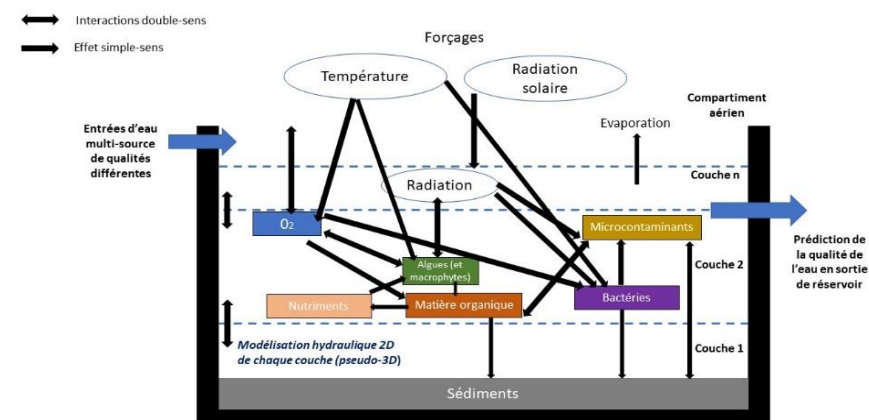
2. Comment prendre en compte les réservoirs multi-ressources dans les territoires?

Réservoirs de stockage des dispositifs clefs pour le pilotage des quantités et qualités en REUT :

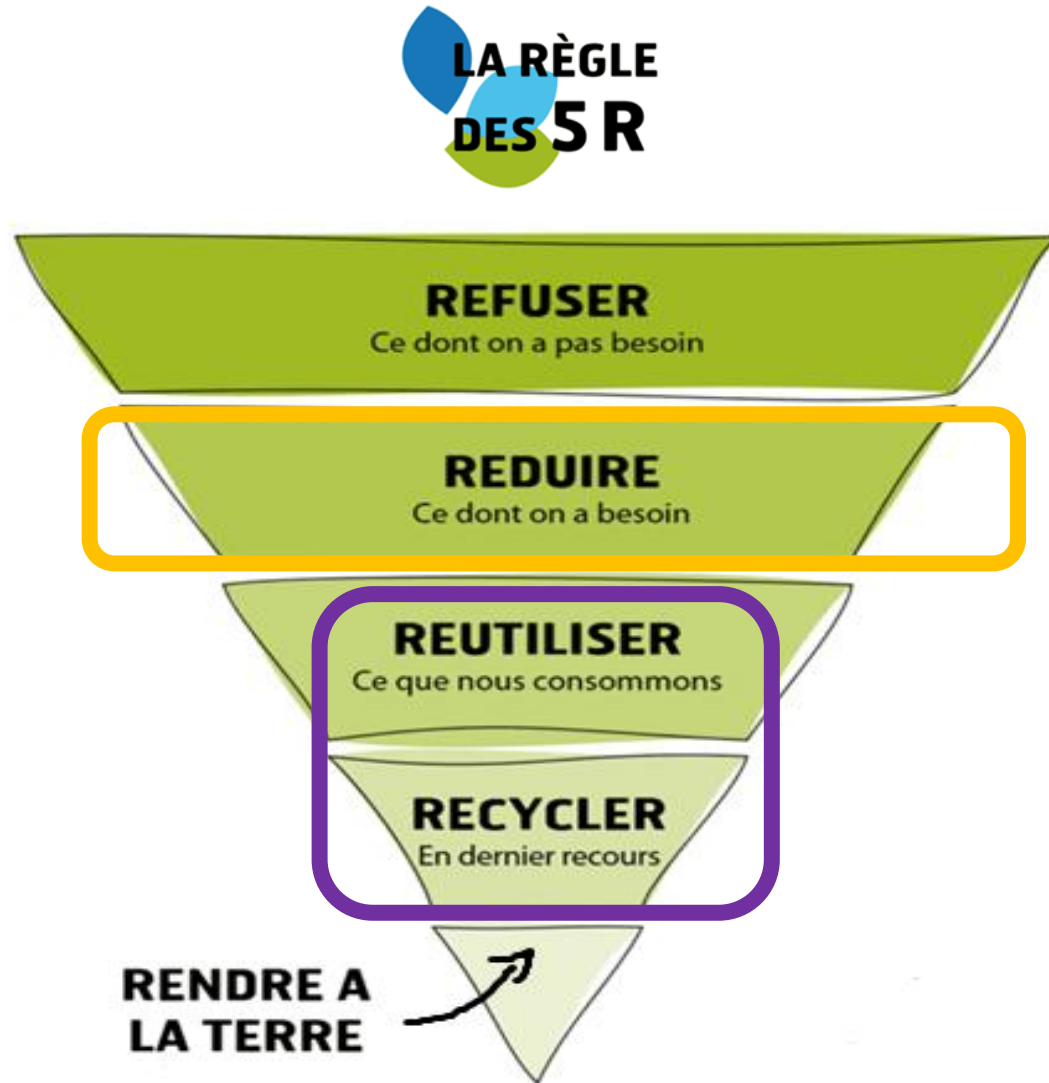
- Pour limiter la décharge des eaux usées dans les milieux sensibles.
- Pour sécuriser les cycles d'irrigation en période estivale.
- Mais risques de contaminations externes ou détérioration de la qualité dans le temps

Proposition d'une approche systémique sur les territoires via:

- **Stratégie de stockage longue durée hivernal** pour réduire l'impact sur les débits écologiques.
- **Multi-ressources (cas Jordanien) :** Mélange d'eaux usées traitées avec des eaux conventionnelles (Projet Ec'Eau SESQIA).



➤ Que retenir ?



**Optimisation et Sobriété
des systèmes irrigués**

**Réduire les risques de
la REUT**

INRAE

> Merci

nassim.ait-mouheb@inrae.fr

➤ Les eaux usées traitées, une eau complexe

Table 2.1 Parameters Used for Evaluation of Water Quality for Irrigation

| General parameters | Organics | Microorganisms | Anions | Cations | Trace elements | Specific parameters |
|---|--|---|---|---|--|---|
| Acidity/ Alkalinity: pH | BOD, mgO ₂ /L COD, mgO ₂ /L | Bacteria Total coliforms | Bicarbonate (HCO ₃ ⁻) Carbonate (CO ₃ ²⁻) | Ammonia (N-NH ₄ ⁺) | Aluminum (Al) Beryllium (Be) | Boron (B) Sodium |
| Color/Turbidity | Organic nitrogen | Fecal coliforms | Chloride (Cl ⁻) | Calcium (Ca ⁺) | Cobalt (Co) | adsorption ratio (SAR) |
| Electrical conductivity, (EC _w), dS/m | Organic phosphorus Target compounds: pesticides and other trace organics | <i>Salmonella</i> Viruses Helminths Ascaris Taenia eggs Protozoa <i>Giardia</i> , <i>Cryptosporidium</i> | Fluoride (F ⁻) Nitrate (N-NO ₃ ⁻) Phosphate (P-PO ₄ ⁻³) Sulfate (SO ₄ ²⁻) | Magnesium (Mg ²⁺) Potassium (K ⁺) Sodium (Na ⁺) | Iron (Fe) Lithium (Li) Manganese (Mn) Molybdenum (Mo) Selenium (Se) Tin (Sn) Tungsten (W) Vanadium (V) | Copper (Co) Lead (Pb) Mercury (Hg) Zinc (Zn) |
| Hardness, mEqCaCO ₃ /L | | | | | | |
| Total suspended solids (TSS), mg/L | | | | | | |
| Temperature | | Pathogens <i>Salmonella</i> , <i>Legionella</i> | | | | |
| Total dissolved solids (TDS), mg/L | | | | | | |

➤ Effets bénéfiques ou négatifs sur les cultures?

Irrigation du vignoble à Murviel Lès Montpellier: Indicateurs pathogènes dans le raisin en 2022



| | Analyses externes (Eurofins hydrology) | | | |
|--------------------------------------|--|------------------|----------------------|----------------|
| | Spores of sulfate-reducing bacteria | Escherichia coli | Bactériophages ARN-F | Enterococci |
| | log(CFU/ml) | log(CFU/100ml) | log(UFP/100ml) | log(CFU/100ml) |
| Analyses sur les eaux usées traitées | 3,0 ± 1,1 | 3,6 ± 1,0 | 1,5 ± 1,0 | 2,8 ± 1,3 |

Aucune détection dans les raisins de divers indicateurs pathogènes (résultats préliminaires, année 2022) : Escherichia coli, Bactéries anaérobies sulfato-réductrices, Bacillus Listeria monocytogène, Salmonella, Spores de bactéries sulfato-réductrices, Staphylocoques, Streptocoques..