

Journée Académique de l'UdPPC 2026

Lycée de Mauriac - Mercredi 10 juin 2026

La chimie de l'eau - Enjeux scientifiques et sociétaux

Claude Forano
Prof. émérite UCA

*Université Clermont Auvergne, CNRS, Clermont, Institut de Chimie de Clermont- Ferrand,
FranceClaude.forano@uca.fr*



Introduction

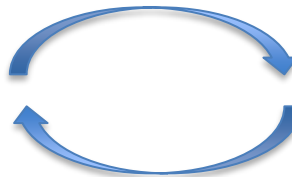
L'EAU



Enjeux sociétaux

- Inégalités d'accès à l'eau potable
- Stress hydrique et conflit d'usage
- Urbanisation et démographie
- Changement climatique
- Gouvernance et bien commun

Questions



Solutions



Enjeux scientifiques

- Composition et qualité des eaux
- Détection des contaminants émergents
- Modélisation du cycle de l'eau
- Procédés et traitements innovants
- Surveillance et outils analytiques

Living labs

La société
commande

La science
révèle

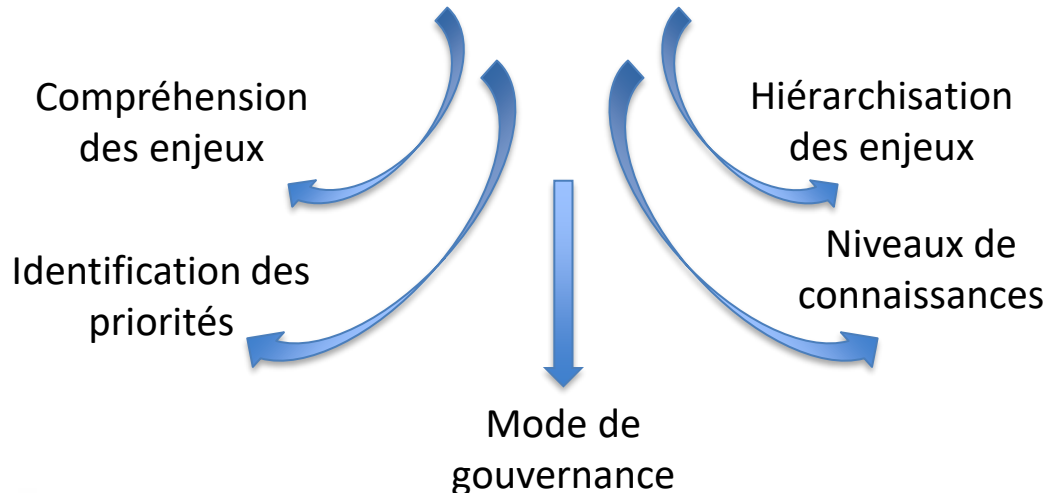
La gouvernance
articule

L'eau un enjeu sociétal au coeur des préoccupations de chacun

Perceptions ...
multiples,
contradictaires ...



Réflexion collective



L'eau :

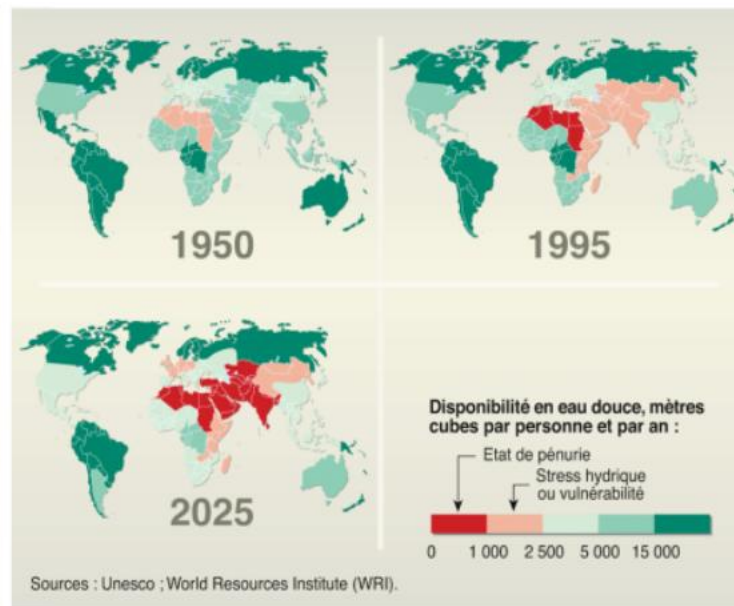
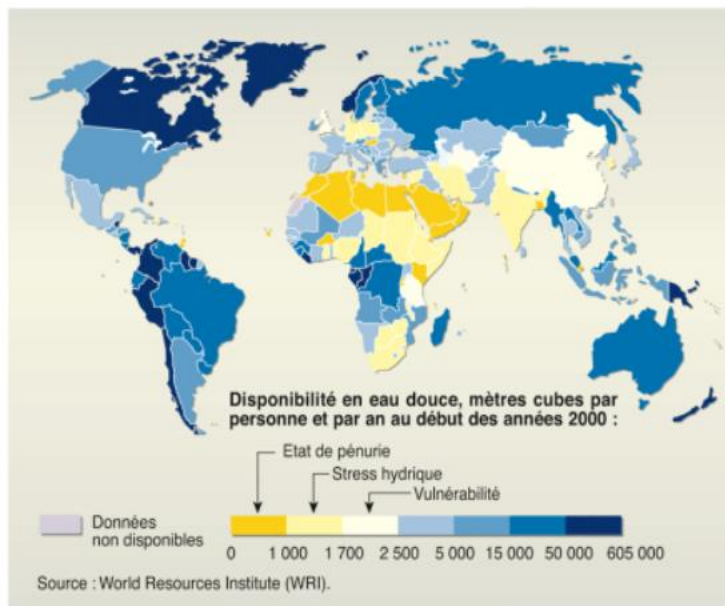
- Une ressource vitale
- Une valeur culturelle et symbolique
- Une ressource économique
- Une question environnementale
- Une expérience personnelle

société, bien-être, pureté, public, santé, vie, loisir, énergie, irrigation, valeur, eau, agriculture, pêche, soif, commun, sécheresse, service, environnement, météo, tourisme, biodiversité, cycle, conflits, territoire, sacré, pollution, alimentation, usages, sérénité, gaspillage, préservation, inondation, ressource, inégalités, patrimoine, assainissement

La crise mondiale de l'eau

❑ Une crise mondiale qui s'aggrave et menace la survie des espèces

- Une ressource abondante mais une disponibilité mal répartie sur et sous terre



❑ Une crise d'inégalité : une enjeu majeur

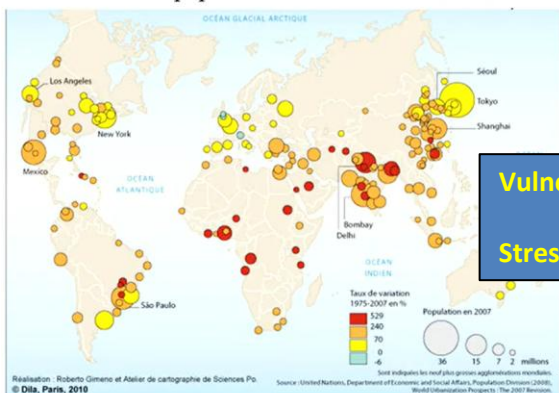
- Inégalité d'accès à la ressource en fonction des besoins
- Plus de 1,1 milliards d'êtres humains n'ont pas accès à l'eau potable
- 2 milliards n'ont pas accès à l'eau au robinet chez lui (26% de la population mondiale) en 2023
- 3,6 milliards de personnes (46%) ne disposent pas d'installations sanitaires gérées en toute sécurité
- 60% des réserves d'eau douce possédées par quelques pays
- 30% de la ressource pour 60% de la population en Asie
- Pénurie chronique : Moins de 1000 m³ d'eau par an pour les populations dans le triangle Tunisie-Soudan-Pakistan
- **5 millions de morts annuels de maladies liées à l'eau** (10x victimes de conflits)

La crise mondiale de l'eau

❑ Démographie (2025, 8 milliards) et urbanisation co-accentuent la crise de l'eau

Croissance urbaine et disponibilité de la ressource

2025 : 2/3 de la population mondiale vivra en milieu urbain



Vulnérabilité Hydrique : < 2 500 m³/an/hab

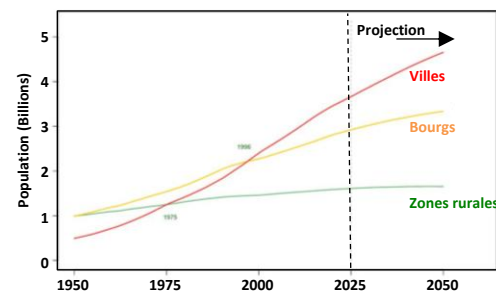
Stress Hydrique : < 1 700 m³/an/hab

Source : PNUE/Vital Water Graphics/GRID

Pluie renouvelable annuel par personne par bassin fluvial (m³)

500	pénurie
1 000	stress hydrique
1 700	
4 000	quantités suffisantes
10 000	

Répartition de la population mondiale entre 1950-2025 et projection à 2050



2025 : + 50% de la population mondiale vivra dans des régions soumises au stress hydrique (OMS 2018)

- Le nombre de mégapoles (10 millions d'habitants ou plus) continue de croître.
- Après 2050, concentration dans 7 pays (Inde, Nigéria, Pakistan, RDC, Égypte, Bangladesh, Éthiopie).
- ~ 57 % de l'Humanité dans les villes, > 2/3 en milieu urbain.
- Expansion des zones bâties dépasse la croissance démographique mondiale.

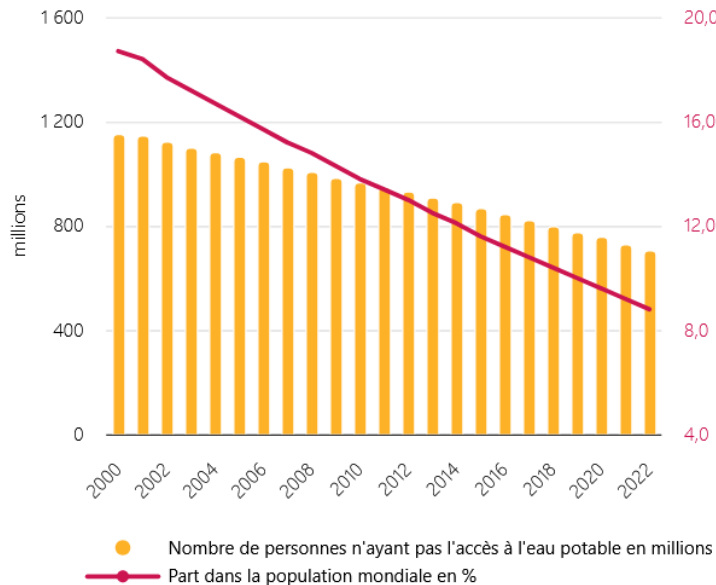
Quel développement durable encore possible ?

Quels interconnexions entre les différentes zones habitées ?

Innégalité d'accès à l'eau et à l'assainissement

☐ Observatoires des inégalités – Accès à l'eau potable & impact sur la santé

Évolution de la population privée d'accès à l'eau potable dans le monde



2 milliards de personnes n'ont pas accès à des services d'eau gérés en toute sécurité en 2023

Des chiffres indicatifs...

- 1,3 milliard de personnes disposaient de services de base, (point d'eau amélioré situé à moins de 30 minutes aller-retour)
- 260 millions de personnes avaient accès à des services limités, (point d'eau amélioré nécessitant un aller-retour de plus de 30 minutes pour aller récupérer de l'eau)
- 400 millions de personnes utilisaient l'eau de puits et de sources non protégées
- 150 millions de personnes collectaient des eaux de surface non traitées provenant de lacs, d'étangs, de rivières et de ruisseaux

En France, pays privilégié par la ressource hydrique :

- 330 000 personnes sans domicile, 100 000 vivants en habitats précaires, 208 000 gens du voyage aux conditions d'accès à l'eau et à l'assainissement difficile,
- A Mayotte, 31,5% des familles sans eau courante, 13,1% en Guyane
- 173 000 personnes sans WC dans le logement,
- 117 000 sans douche
- Charge d'eau = 1% du budget, 3% pour les plus pauvres, plus d'1 million de personnes a des difficultés à payer les factures d'eau

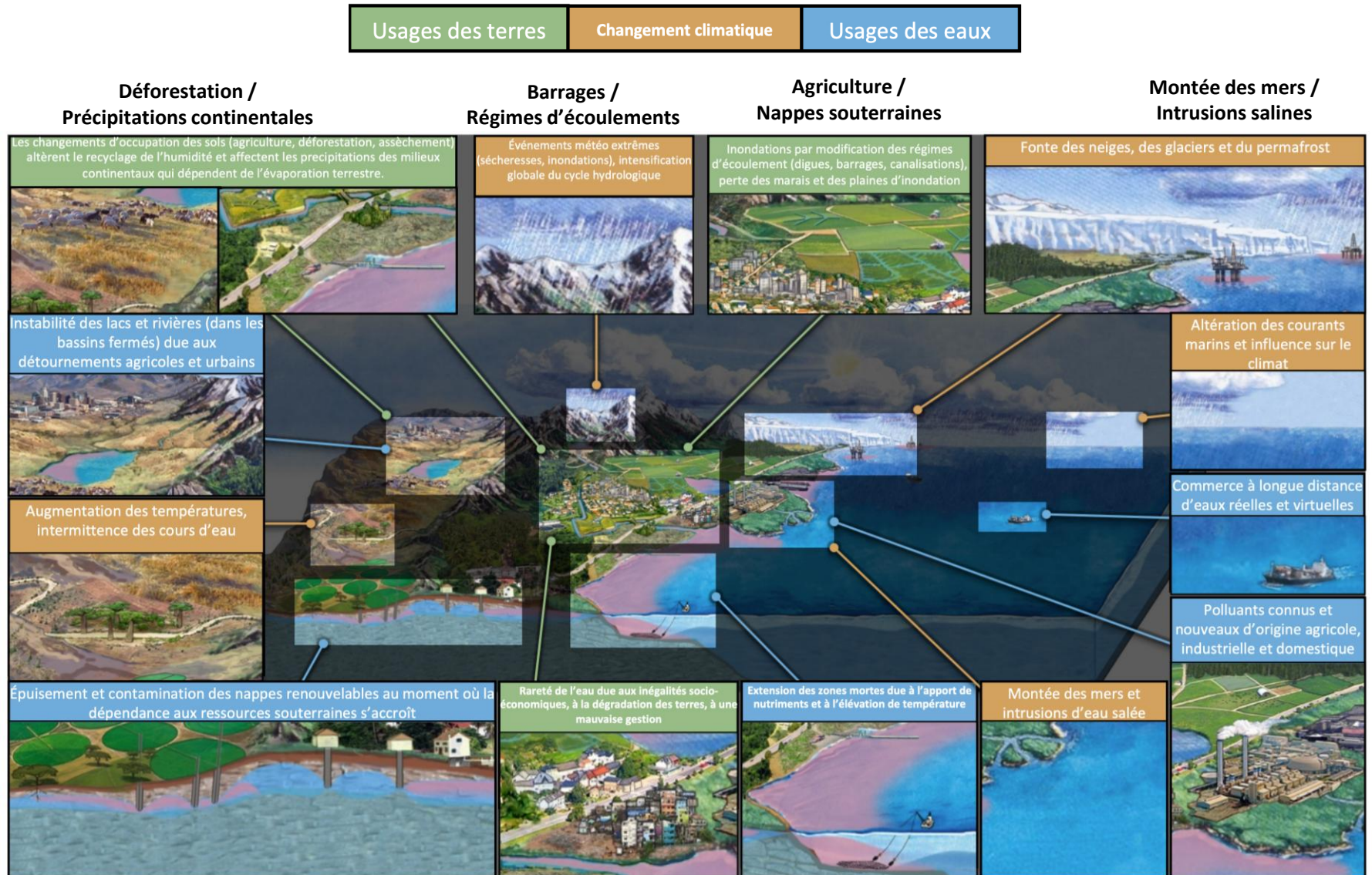
La prise de conscience de la communauté internationale

❑ L'accès à l'eau : une question essentielle et prioritaire, un droit fondamental

- 1981 - 1991 : Décennie mondiale de l'eau avec pour objectif accès universel pour l'an 2000 (non atteint)
- 28 juillet 2010 : Déclaration de l'assemblée générale de l'ONU
« Le droit à l'eau potable propre et de qualité et à des installations sanitaires est un droit de l'homme, indispensable à la pleine jouissance à la vie »
- 2015 : Objectif de Développement Durable dédié à l'Eau (ODD6) :
« Garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau d'ici 2030 »

Principaux flux du cycle de l'eau et appropriation humaines

Zoom sur quelques interférences humaines sur les écosystèmes, l'environnement et le cycle de l'eau



Principaux flux du cycle de l'eau et appropriation humaines

❑ La représentation exclusivement naturelle du cycle de l'eau (XVIIème siècle) inadaptée

- Impacts des activités humaines et leurs dépendances vis-à-vis de la ressource
- 3 impacts majeurs : élevage, cultures & forêts (3/4 de la surface terrestre), destruction des zones humides
- Plus de 10-20 % de l'eau des rivières (2400 km³) est utilisée pour l'élevage du bétail.
- Minimisation de l'évapotranspiration par les plantes et les sols (2/3 des précipitations) → importance de l'action des arbres sur la redistribution de l'eau terrestre

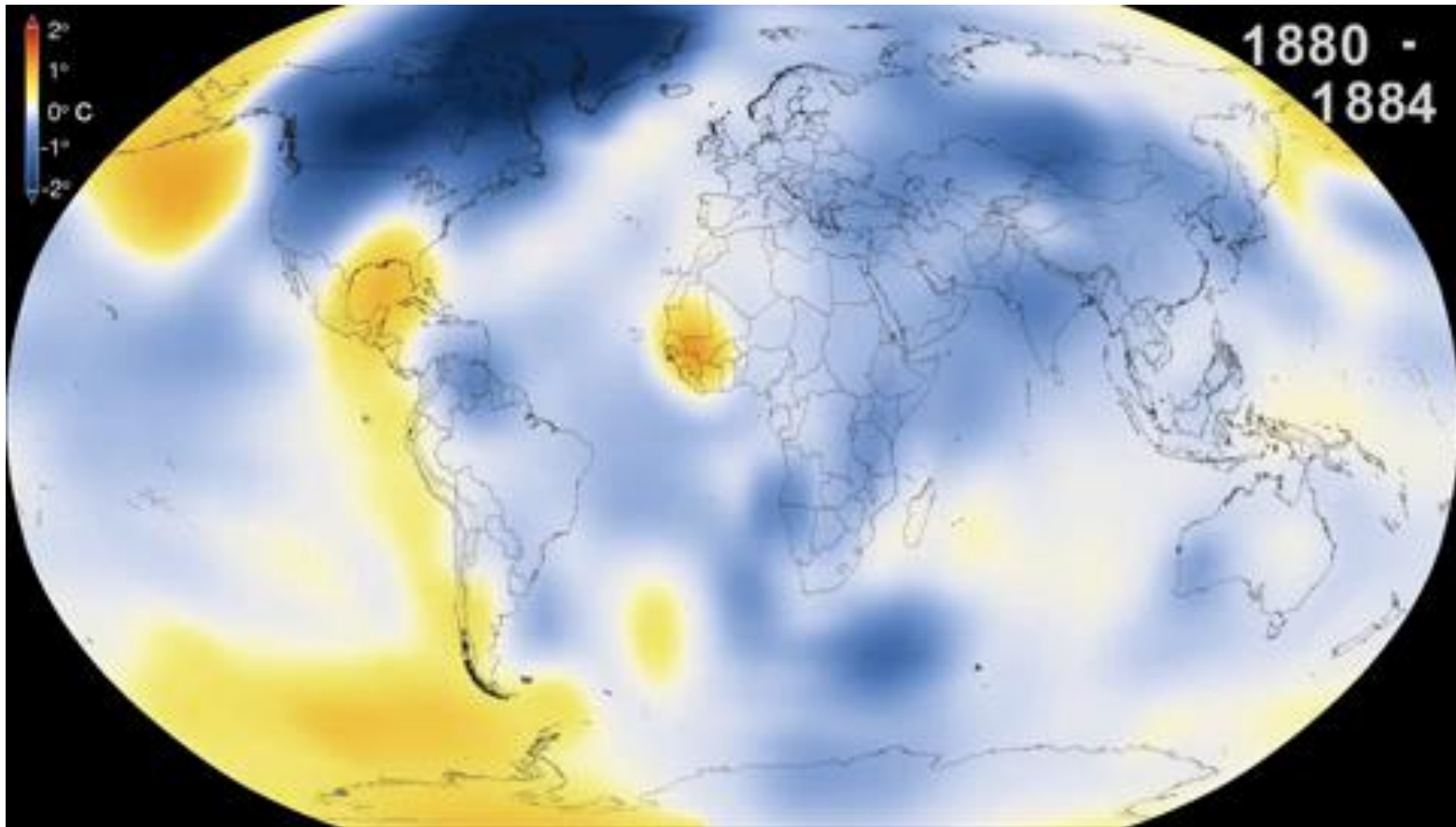
❑ Nouvelle représentation du cycle de l'eau (Abbott et al., 2019)



- Meilleure représentation de la crise mondiale de l'eau à l'ère de l'anthropocène
- Conscience et appropriation des enjeux et des problèmes
- Propositions de solutions plus adaptée

Réchauffement climatique et Crise hydrique

- Augmentation des températures mondiales depuis 1880 (ère des relevés modernes)
- Corrélation avec émissions des gaz à effets de serres (énergie, industrie, transports)
- Intensification des épisodes extrêmes (sécheresse, fonte des glaciers)



[NASA Finds 2014 Warmest Year in Modern Record](#)

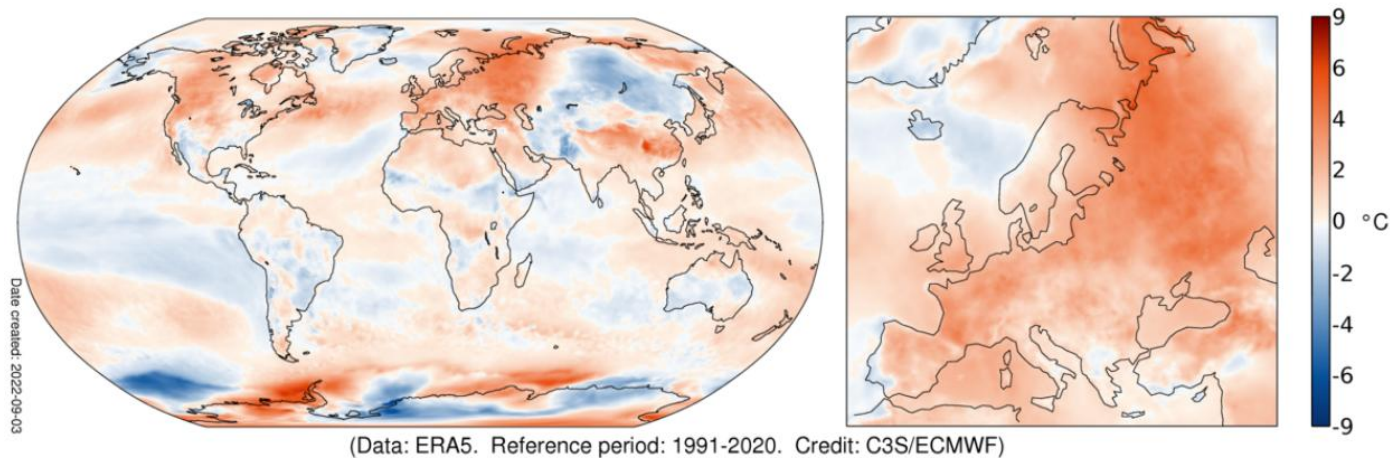
- Codes couleurs:
 - blanc : T moyenne de référence 1951-1980
 - Rouge : Températures > à la moyenne
 - Bleus : T < moyenne

Réchauffement climatique et Crise hydrique

☐ Tendence à la hausse des anomalies de température

- Mois d'août 2022 : l'un des mois d'août les plus chaud (+0,3°C / Tmoy 1991-2020; (+0,8°C en Europe)

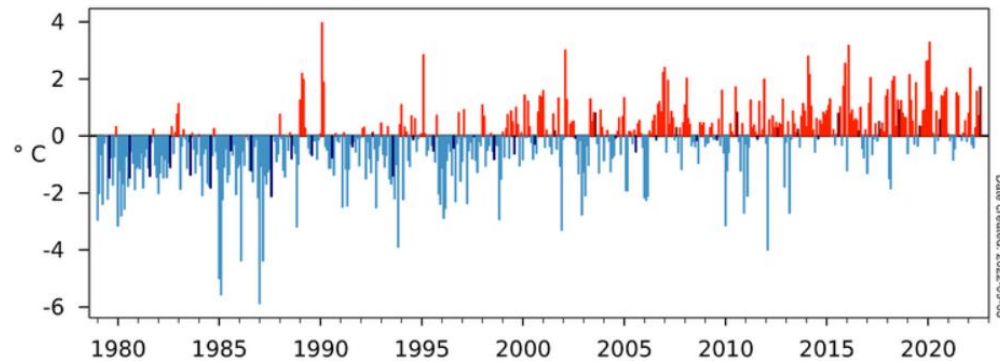
Surface air temperature anomaly for August 2022



PROGRAMME OF
THE EUROPEAN UNION



Monthly European surface air temperature anomalies



La grande accélération

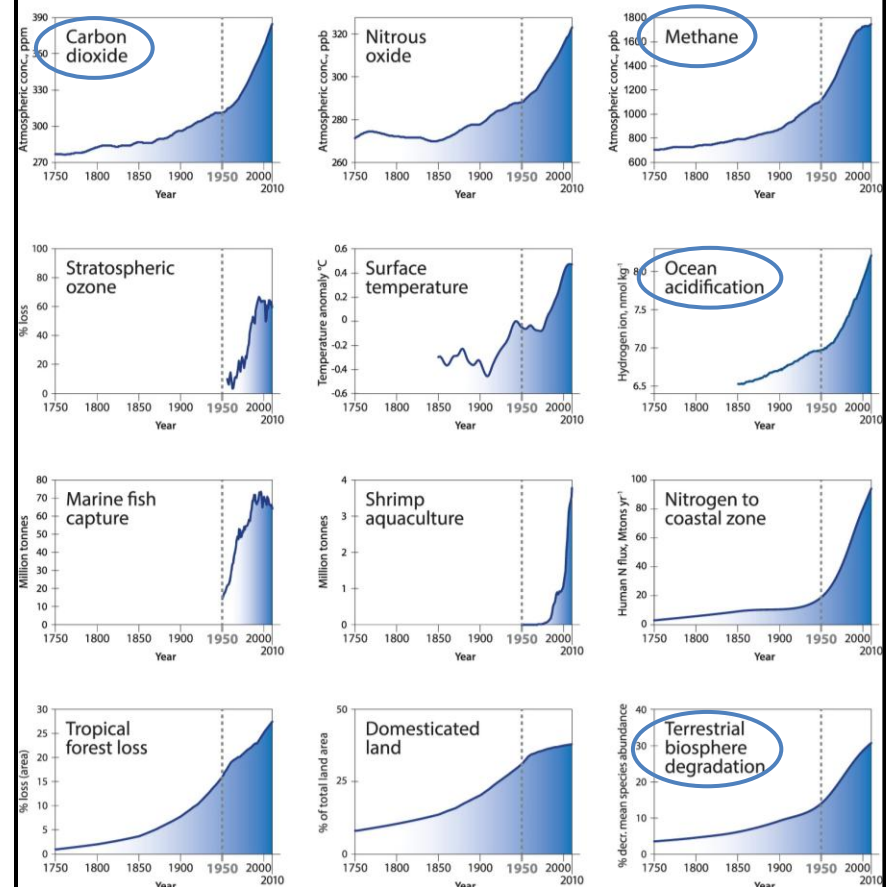
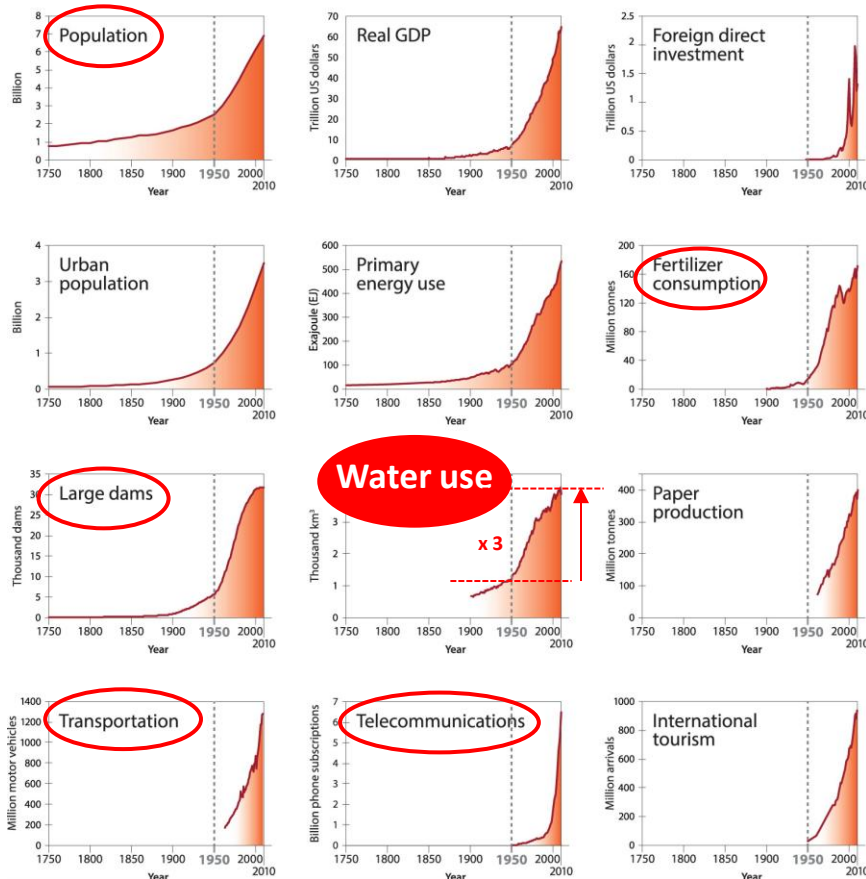
❑ Développement des sociétés à l'ère de l'Anthropocène : jusqu'où ?

- Croissance exponentielle des activités humaines
- Réponse exponentielle de l'Environnement

Tendance socio-économique



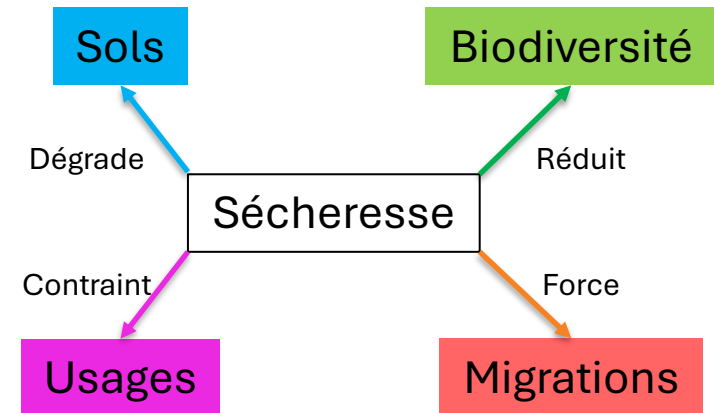
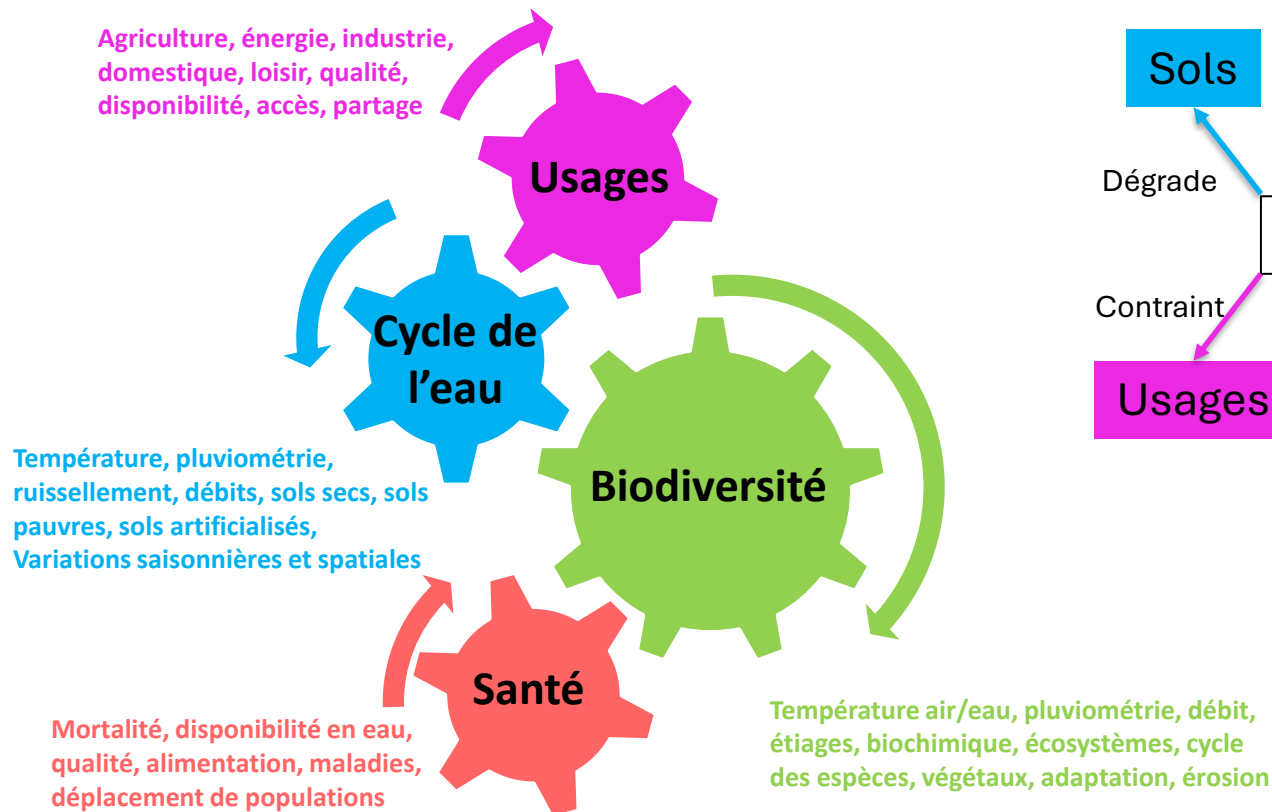
Impact environnemental



La grande accélération

❑ Multiplication des phénomènes climatiques extrêmes

- 4 systèmes interdépendants affectés



- Modifications des dynamiques et des trajectoires
 - ✓ Adaptation écologique
 - ✓ Adaptation socio-économique
 - ✓ Interactions des socio-écosystèmes
 - ✓ Disponibilité de la ressource en eau et de sa répartition

Problématiques pluridisciplinaires

Les frontières planétaires

❑ Concept scientifique de frontières planétaires

J. Rockström (Stockholm résilience center, 2009) :

« Seuils écologiques à ne pas dépasser afin de maintenir la stabilité de la Terre et garantir des conditions favorables à la vie humaine »

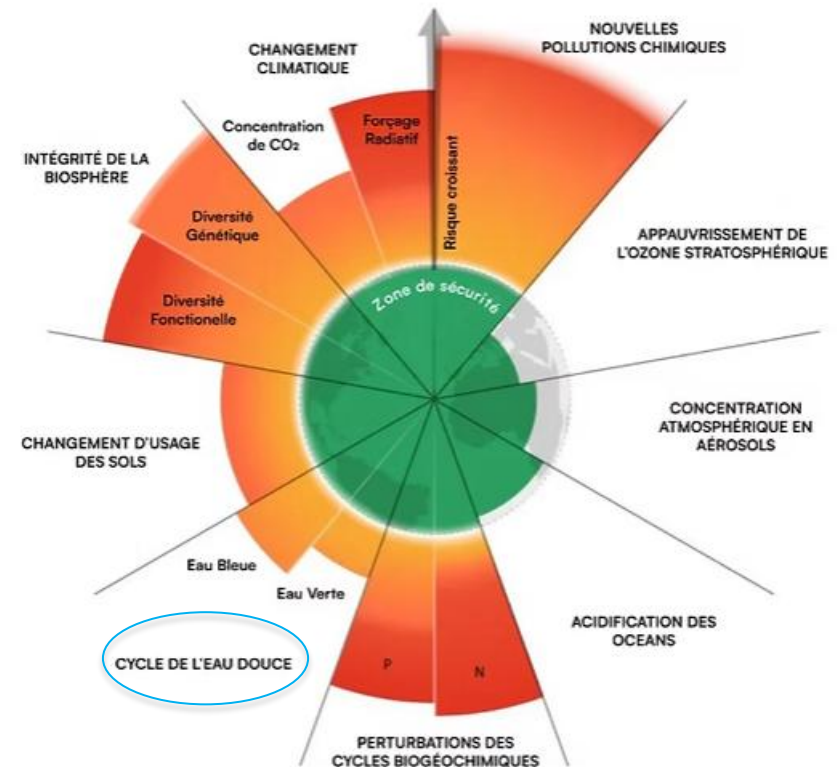


Les 9 limites planétaires

1. Changement climatique
2. Érosion de la biodiversité
3. Changement d'usage des sols
4. **Utilisation de l'eau douce**
5. Perturbation des cycles de l'azote et du phosphore
6. **Acidification des océans**
7. Charge en aérosols atmosphériques
8. Appauvrissement de l'ozone stratosphérique
9. Pollutions chimiques / nouvelles entités

❑ A l'ère de l'anthropocène

- 7/9 limites déjà dépassées
- Résilience de la planète diminuée
- Risques de changements environnementaux brusques, irréversibles et dangereux

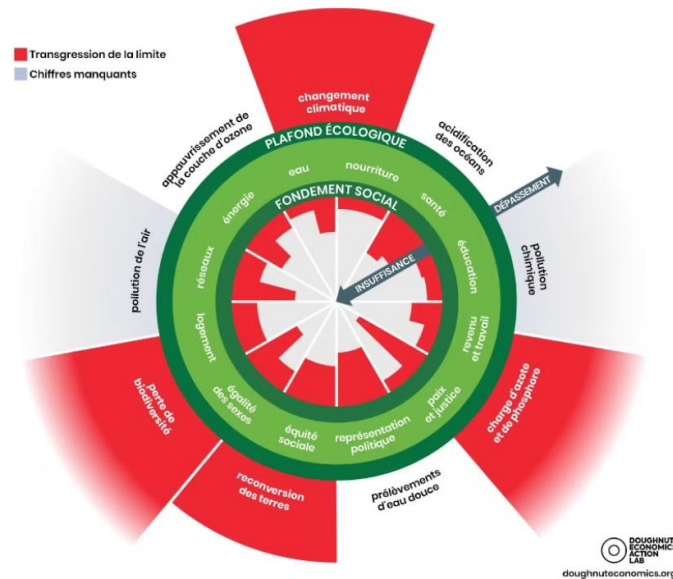
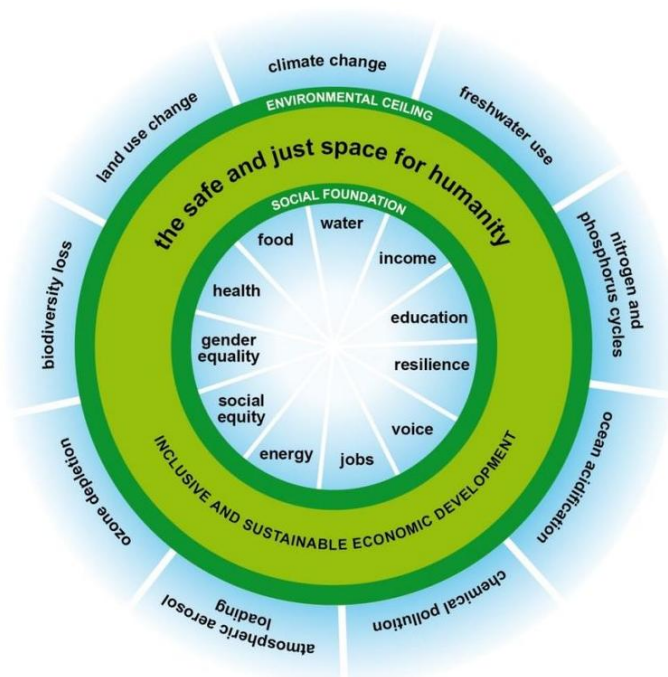


Survie des espèces ?

Les frontières planétaires

❑ Vers de nouveaux modèles de développement ?

- **Kate Raworth**, économiste britannique : questionnement sur le fonctionnement et la raison d'être de notre modèle économique.
- **Théorie du donut** : 7 principes pour faire évoluer l'économie vers une économie adaptée aux enjeux sociaux et environnementaux (Capacité à respecter le milieu, la ressource en eau)
- **Indicateurs de mesures** : 9 limites planétaires



- **Penser des solutions** qui ne sacrifient ni l'équité humaine ni les équilibres naturels
- **L'eau** : droit social fondamentale & limite planétaire à respecter

❑ Quelle valeur attribuée à l'eau ?

- **1977 : 1ère conférence des Nations Unies sur l'eau (Mar del Plata) :**
« Tous les peuples, quels que soient leur stade de développement et leur situation économique et sociale ont le droit d'avoir accès à une eau potable dont la qualité et la quantité soient égales à leurs besoins essentiels »
- **1992 : Conférence internationale sur l'eau et l'environnement, Dublin**
Principe : « L'eau, utilisée à de multiples fins, a une valeur économique et devrait donc être reconnue comme bien économique ». Il introduit les notions d'accès de tous à une eau salubre, de gestion et d'utilisation efficace, de répartition équitable, de préservation et de protection.
- **1997 : 1er Forum mondial de l'eau (tous les 3 ans)**
- **2000 : Directive Cadre Européenne sur l'eau (2000/60/CE (DCE))**
Cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau dont l'objectif est le bon état écologique des eaux pour 2015.
Préambule « l'eau n'est pas un bien marchand comme les autres, mais un patrimoine qu'il faut protéger, défendre et traiter comme tel »
- **28/07/2010 – Résolution de l'assemblée générale des Nations Unies**
« Le droit de l'homme à l'eau et à l'assainissement »

❑ Quelle valeur attribuée à l'eau ? Et en France

1964 : Loi sur l'eau

- Gestion de l'eau par bassin versant.
- Création des agences de l'eau et ses comités de bassins.
- Prélèvement de redevances pour la protection de la ressource.

1992 : Loi sur l'eau

- Décentralisation de la gestion de l'eau via des outils de planification (SDAGE, SAGE) par commission locales de l'eau.
- Article 1^{er} : « **L'eau fait partie du patrimoine commun de la nation.** Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général. **L'usage de l'eau appartient à tous** dans le cadre des lois et règlements ainsi que des droits antérieurement établis. »

2006 : Article L. 210-1 du code de l'Environnement

L'eau fait partie du patrimoine commun de la nation. Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général.

Dans le cadre des lois et règlements ainsi que des droits antérieurement établis, l'usage de l'eau appartient à tous et chaque personne physique a le droit d'accéder à l'eau potable, selon les modalités et pour les usages essentiels mentionnés à l'article L. 1321-1 A du code de la santé publique, dans des conditions économiquement acceptables par tous. **Les coûts liés à l'utilisation de l'eau, y compris les coûts pour l'environnement et les ressources elles-mêmes, sont supportés par les utilisateurs en tenant compte des conséquences sociales, environnementales et économiques ainsi que des conditions géographiques et climatiques.**

2015 : Le conseil constitutionnel reconnaît « l'accès à l'eau comme un besoin essentiel de la personne »
socle juridique de référence

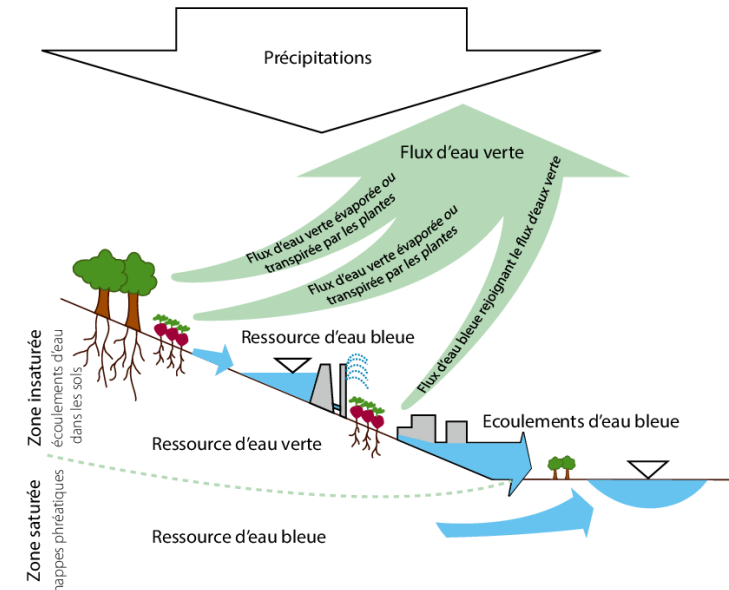
Eau bien commun – Changement de paradigme

❑ Intégrer la gestion de l'Eau dans la démarche du développement durable

- Deux grands principes complémentaires, socle d'une gestion durable

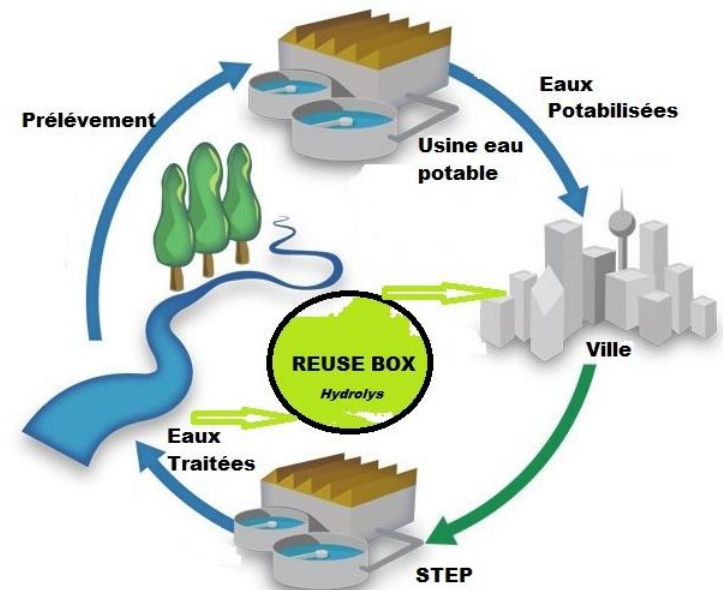
Ralentir l'eau

Les bénéfices de l'eau verte



- Restaurer le cycle naturel de l'eau:
 - ✓ Favoriser son infiltration dans les sols
 - ✓ Valoriser les zones humides
 - ✓ Replanter des haies et des forêts

Réutiliser l'eau



- Réduire les prélèvements sur la ressource brute
- Traiter les eaux usées pour leur donner une seconde vie : agricole, industrielle, ou consommation domestique,

Conflits d'usage & Gestion partagée



Science ↔ Société

Les programmes de recherche

❑ Programme national OneWater - Eau bien commun

- Comprendre et innover pour une gestion viable, équitable et durable de l'eau
- Programme interdisciplinaire : Universités, CNRS, INRAE, BRGM
- 6 défis scientifiques interconnectés
- La science au service du bien commun, en dialogue permanent avec les acteurs du territoire.



www.onewater.fr

Comprendre et innover
pour une gestion viable,
équitable et durable de
l'eau

53 millions d'euros

10 ans

2022-2032

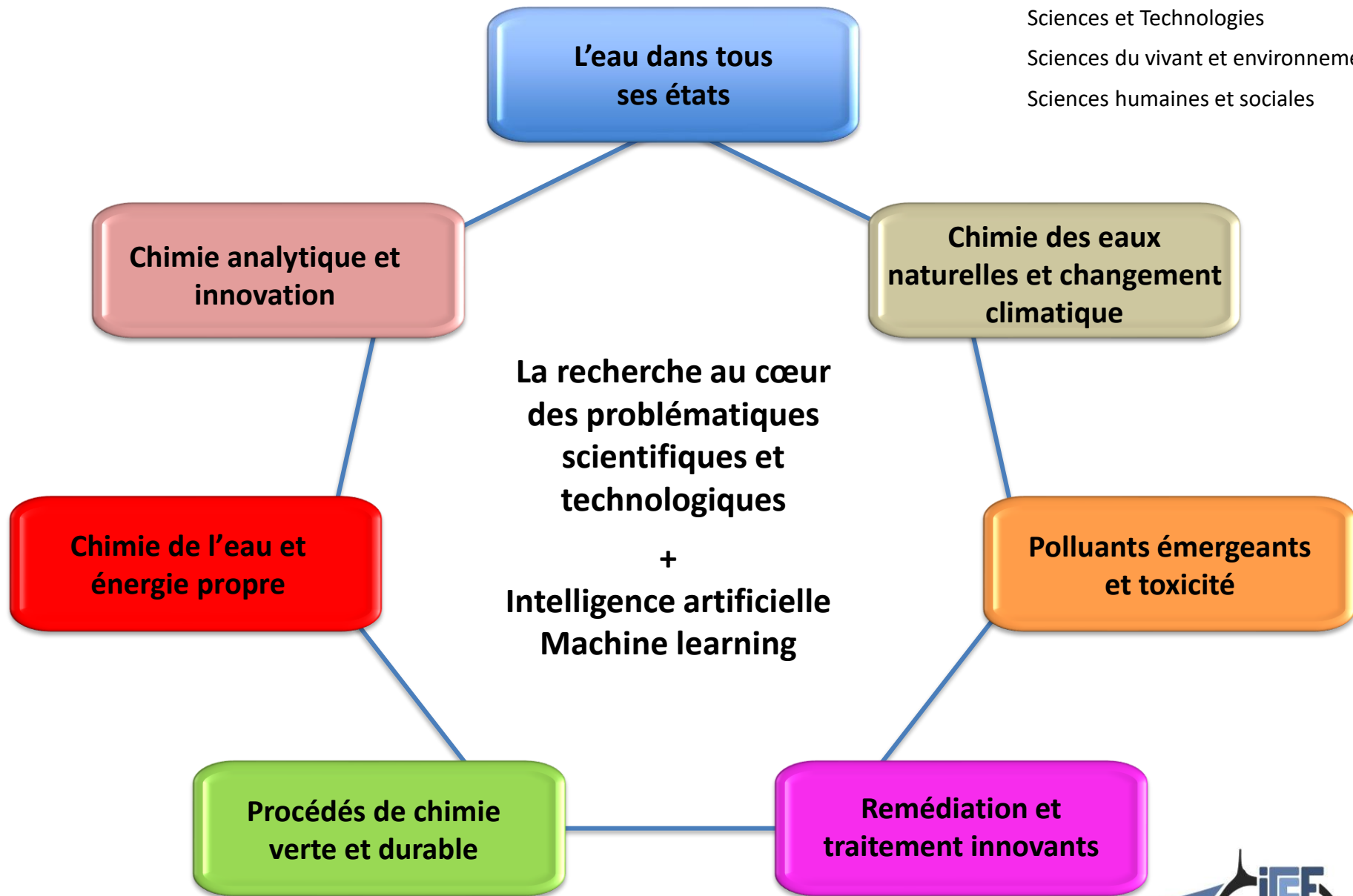
OneWater
Eau Bien Commun

<https://www.onewater.fr/fr>

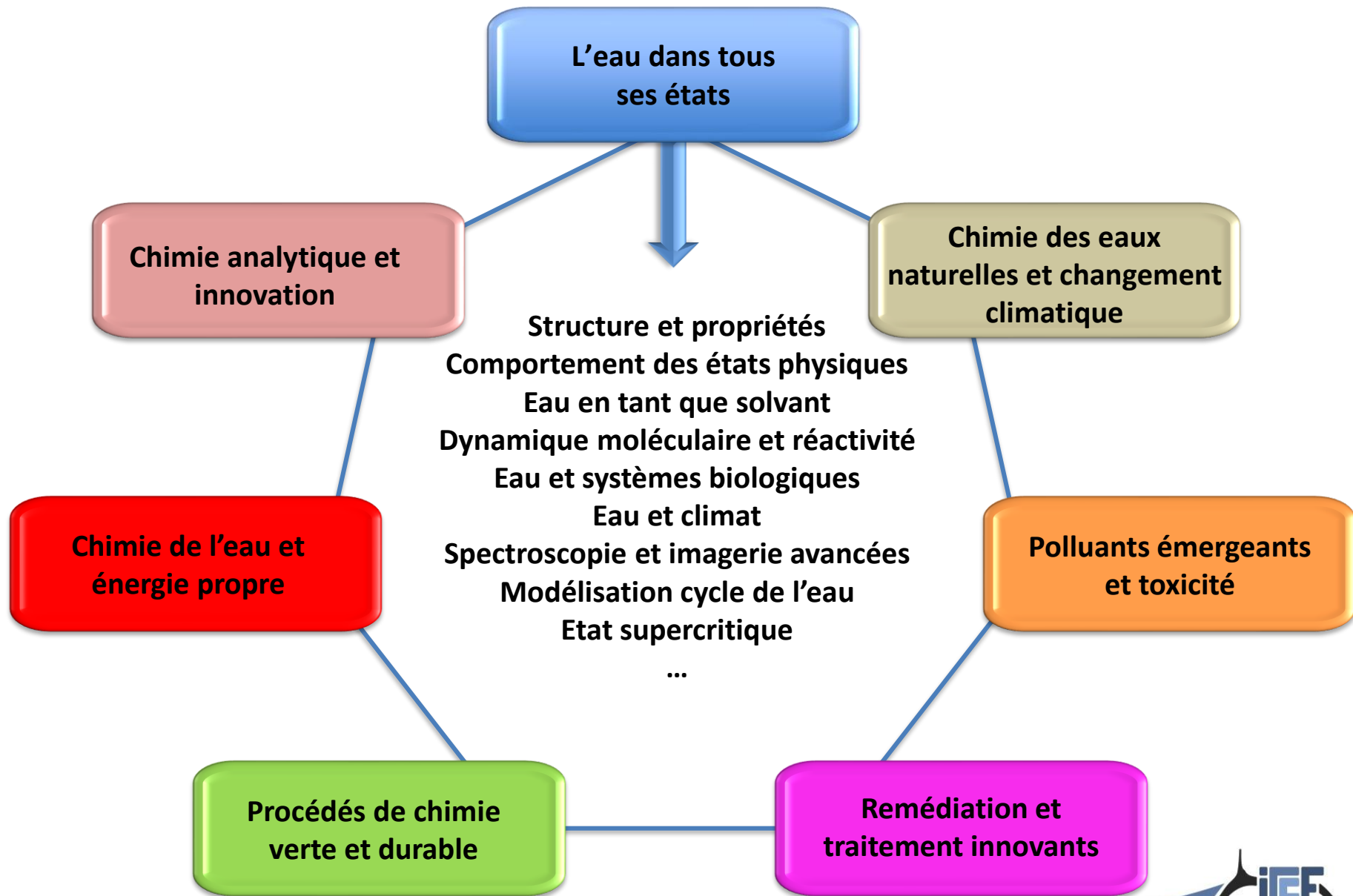
Chimie et Enjeux de l'Eau

Chimie et Enjeux de l'Eau

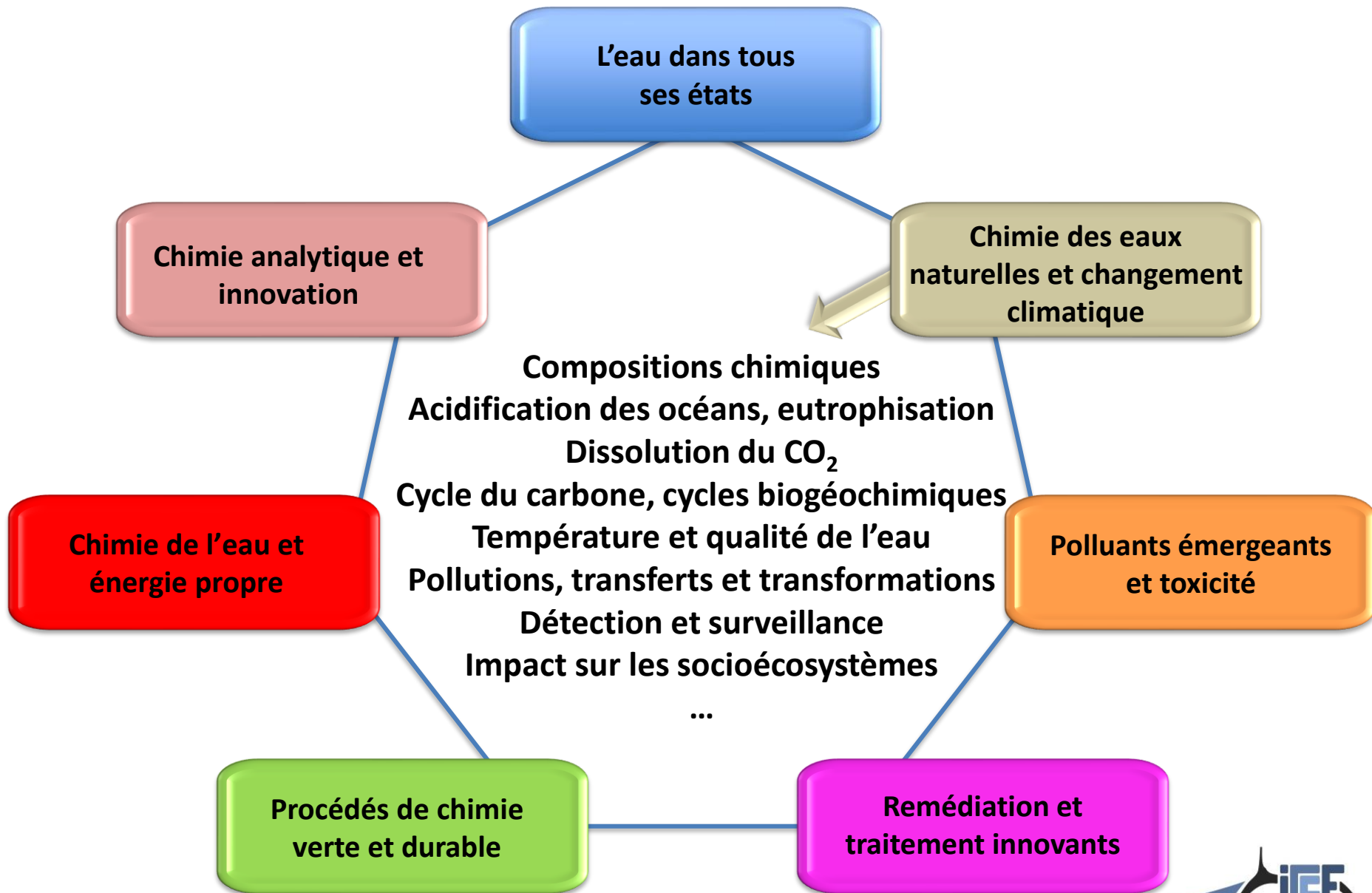
Sciences et Technologies
Sciences du vivant et environnement
Sciences humaines et sociales



Chimie et Enjeux de l'Eau

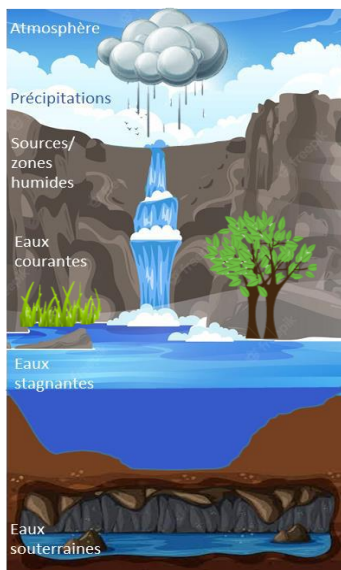


Chimie et Enjeux de l'Eau



❑ La FREAU : une approche multidisciplinaire pour une meilleure compréhension

Défi 1 : construction d'un observatoire de l'eau sur le continuum atmosphère/eaux de surface/eaux souterraines/territoires



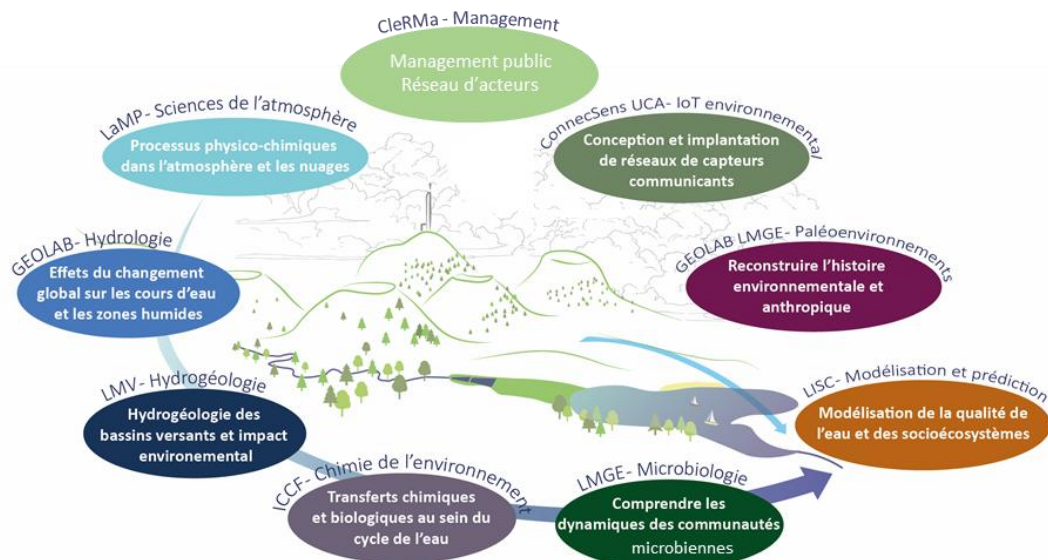
- **Suivi long terme** de la ressource en eau **des nuages aux exutoires en se focalisant sur les têtes de bassin**
- **Caractérisation des processus spécifiques** (biologiques, physico-chimiques, géochimiques...) qui sous-tendent le fonctionnement des systèmes aquatiques et leur évolution
- Détection des **tendances à moyen et long terme**
- **Caractérisation des usages de l'eau** et de leur empreinte sur la disponibilité et la qualité de la ressource

➡ **Meilleure protection de la ressource en eau**

❑ La FREAU : une approche multidisciplinaire pour une meilleure compréhension

Observatoire de l'eau en territoire volcanique

Le bassin versant de la Veyre comme site expérimental



L'UCA et le bassin versant de la Veyre en chiffres

- Plus de 20 ans d'activité scientifique autour du lac d'Aydat
- Des collaborations avec des gestionnaires et des collectivités



- 9 unités de recherche mobilisées
- Plus de 20 projets de recherche sur des thématiques diverses
- Bassin versant appartenant à la Zone Atelier Loire (ZAL)

Les enjeux autour du socio-écosystème Veyre-Aydat

- Préservation des activités touristiques (cyanobactéries)
- Conséquences du changement climatique sur les têtes de bassin versant
- Interaction entre les activités agricoles et les milieux aquatiques
- Gestion qualitative et quantitative de la ressource en eau



❑ La FREAU : une approche multidisciplinaire pour une meilleure compréhension

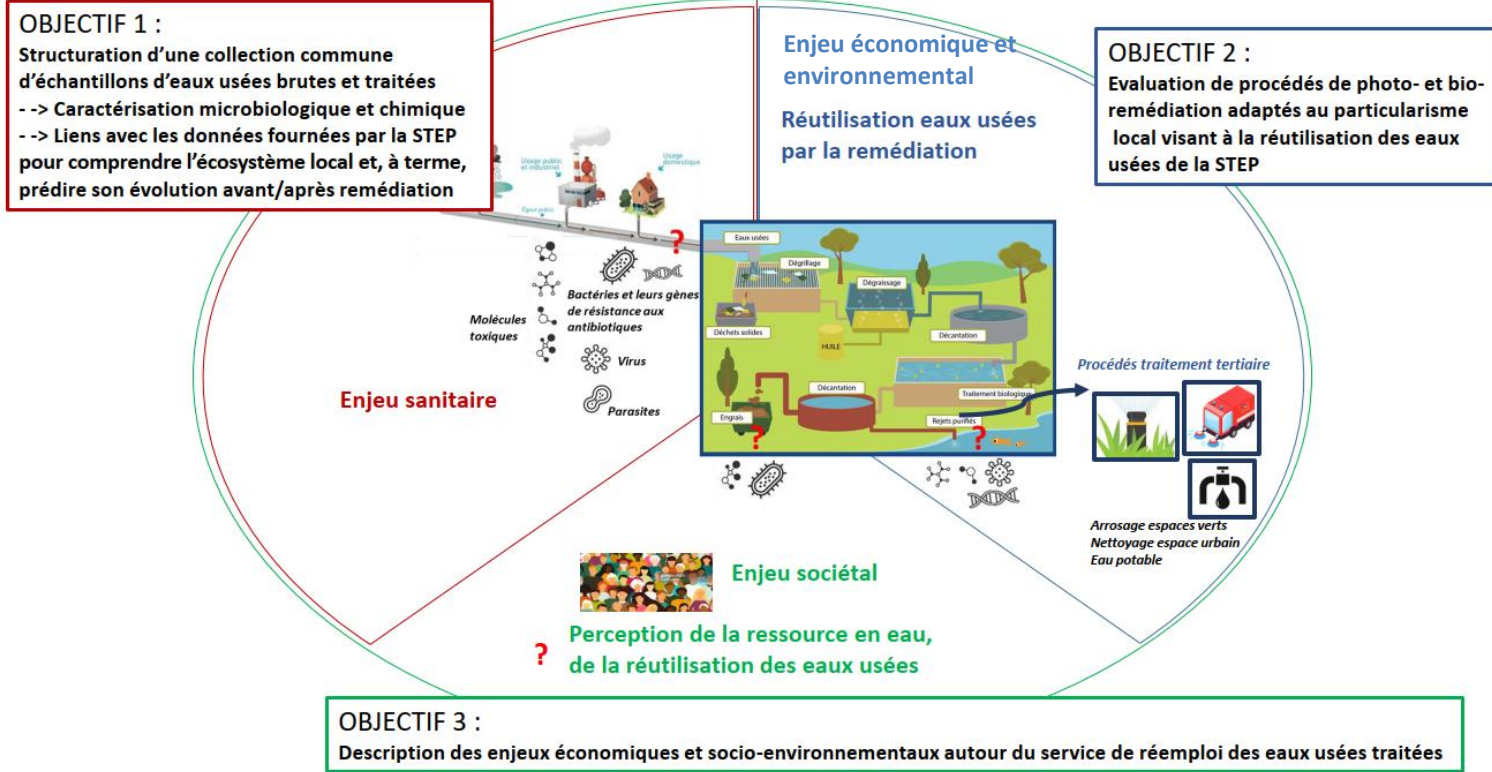
Défi 2 : changements globaux et évènements extrêmes

- Effets des **changements globaux** sur le **cycle de l'eau** et le fonctionnement des **socio-écosystèmes** ?
- **Risques liés aux évènements extrêmes** (précipitations intenses, vague de chaleur, sécheresse, crues,...) ?
- Quels impacts sur la **disponibilité en l'eau, sa qualité, ses usages** ?
- Etudes aux **bénéfices de la prédiction/anticipation** de ces évènements

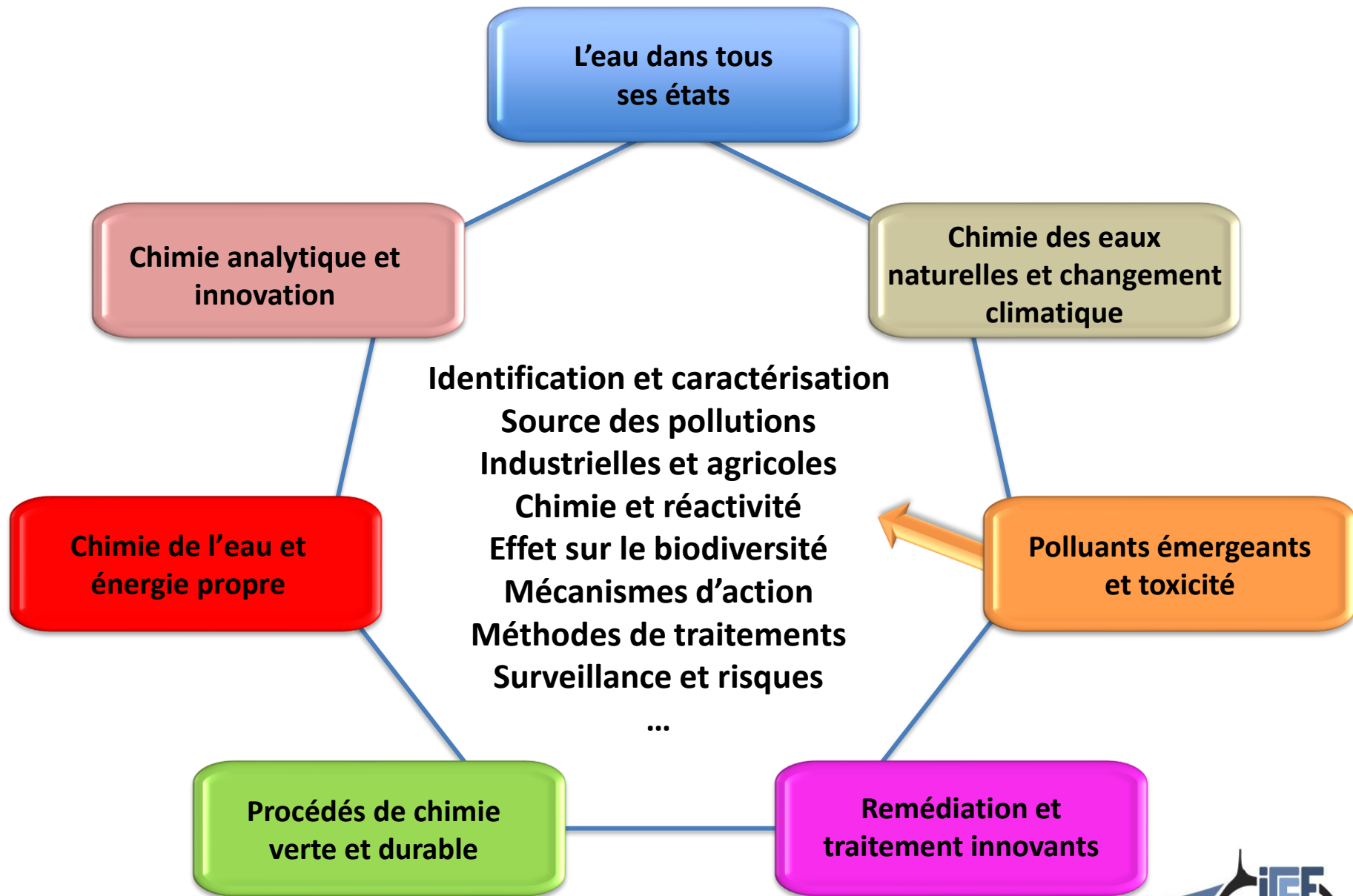


❑ La FREAU : une approche multidisciplinaire pour une meilleure compréhension

Réutilisation des eaux usées : à la recherche de nouvelles ressources en eaux



Chimie et Enjeux de l'Eau



Chimie et Polluants Émergents

- ❑ La pollution chimique : une des 9 limites planétaires, déjà dépassée.

ENVIRONMENTAL
Science & Technology

copying and redistribution of the article or any adaptations for non-commercial purposes.



pubs.acs.org/est

Policy Analysis

Toward a Global Understanding of Chemical Pollution: A First Comprehensive Analysis of National and Regional Chemical Inventories

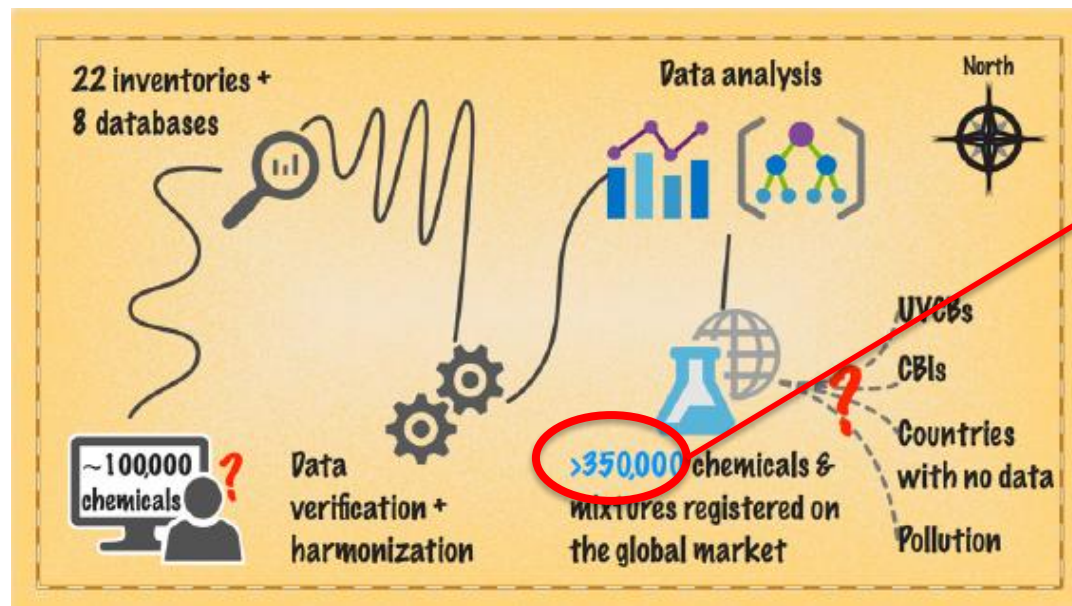
Zhanyun Wang,* Glen W. Walker, Derek C. G. Muir, and Kakuko Nagatani-Yoshida



Cite This: *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54, 2575–2584



Read Online



- ✓ 3 x quantité recensée précédemment
- ✓ 50 000 inconnus
- ✓ 70 000 ambigus

Chimie et Polluants Émergents

❑ La pollution chimique : une des 9 limites planétaires, déjà dépassée.

❖ Agence européenne de la chimie (ECHA) – enRegistration, Evaluation et Autorisation des substances Chimiques (REACH)

- 200 – 300 nouveaux composés chimiques enregistrés chaque année
- 2024 : 22 600 composés chimiques recensés

❖ TSCA (Toxic Substances Control Act) - USA

- ~ 700 nouveaux composés chimiques enregistrés chaque année

❖ Directive Cadre sur l'Eau (DCE) - FRANCE

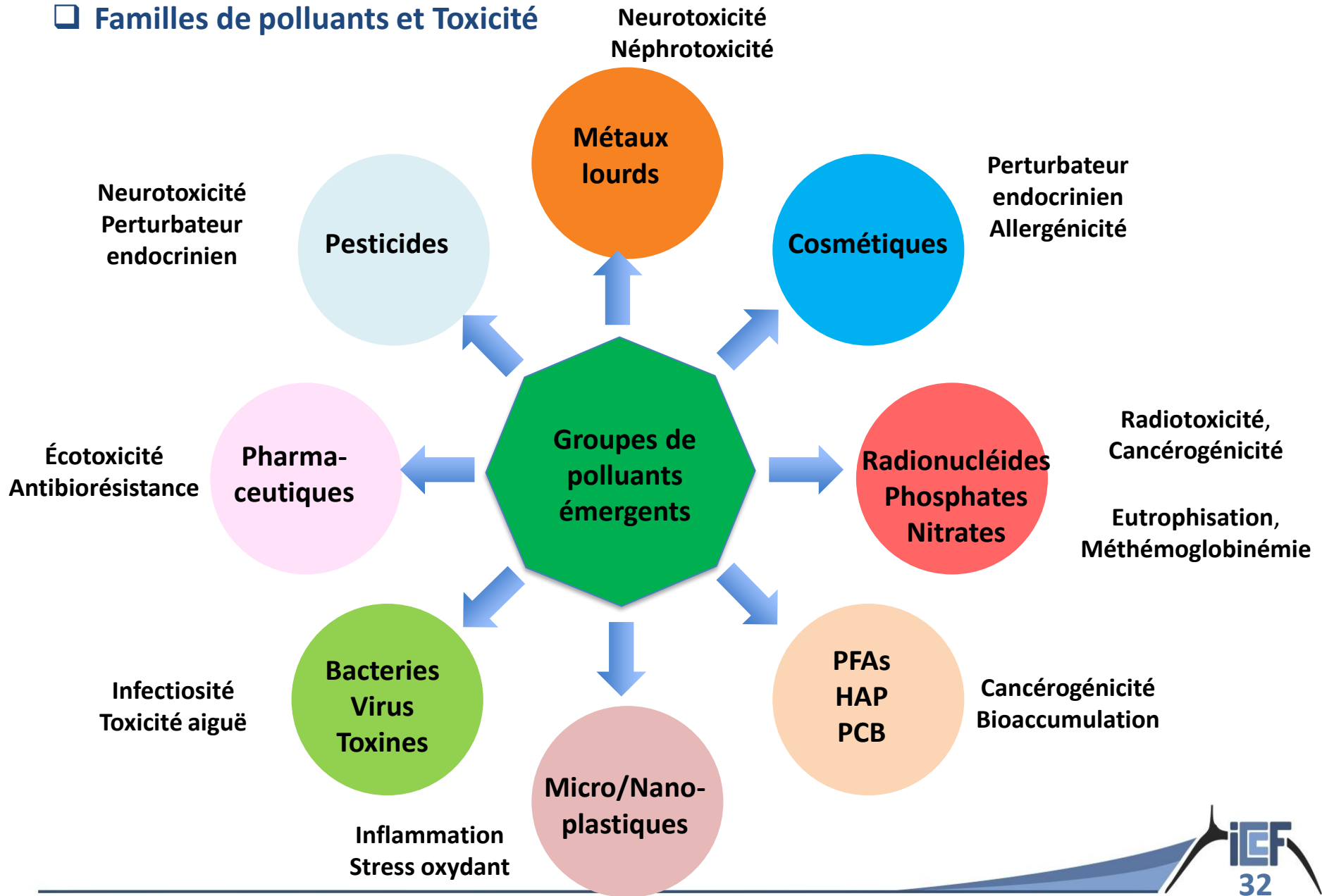
- > 600 composés chimiques détectés dans les rivières françaises et européennes
- ~ 130 micropolluants cibles à éliminer en sortie de STEU
- ~ 20 PFAS recherchés dans les eaux naturelles et de rejets

❖ Directive Européenne 2025 sur les eaux usées

- Règlement plus contraignant en STEU: 2033 mise en place de traitements tertiaires (N,P) et 2045 traitements quaternaires (micropolluants)

Chimie et Polluants Émergents

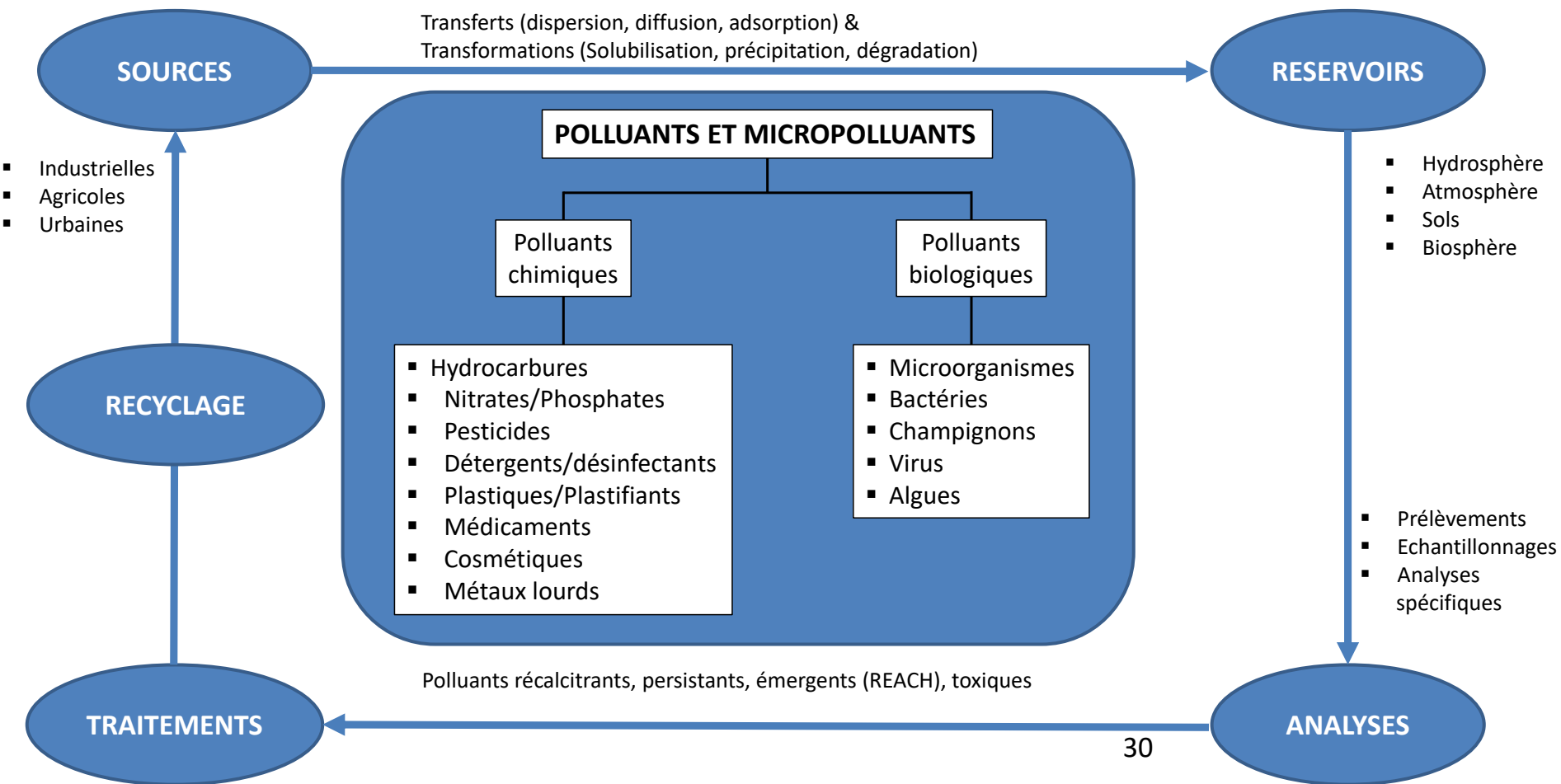
☐ Familles de polluants et Toxicité



Chimie et Polluants Émergents

❑ Flux de polluants entre les socioécosystèmes

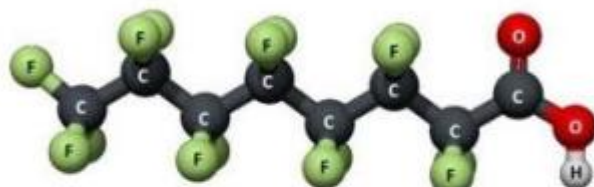
✓ Approfondissement des connaissances sur la chimie de l'eau



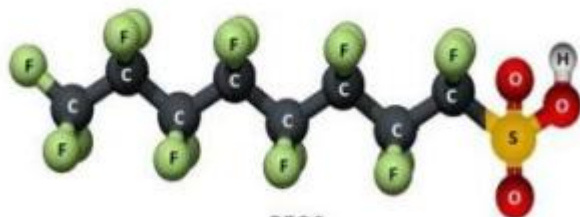
Les PFAs ou polluants éternels

❑ PFAS : composés perfluoroalkylés à squelette $-(CF_2)_n-CF_3$

Quelques exemples :



PFOA



PFOS

Queue hydrophobe Tête polaire
→ $-C_nF_{2n+1}$ (Anionique)

Molécules amphiphiles

$n < 7$: chaîne courte
 $n > 7$: chaîne longue

$-CO_2^-$; $-SO_3^-$; $-PO(OH)_2$; $-SO_2NH_2$; $-OH$

Propriétés physico-chimiques remarquables

- Recouvrement des OA 2 s and 2p efficace
- Energy de liaison C-F exceptionnellement élevée 485 kJ.mol^{-1}
- Liaisons C-F très stable
- Très résistants aux acides et non-inflammables
- Solubilité dans l'eau élevée (PFOS, $\sim 0,4 \text{ g.L}^{-1}$; PFOA, $\sim 0,4 \text{ g.L}^{-1}$)

Succès industriel
textiles imperméables, revêtements
antiadhésifs, mousses anti-incendie

Persistance dans l'Environnement

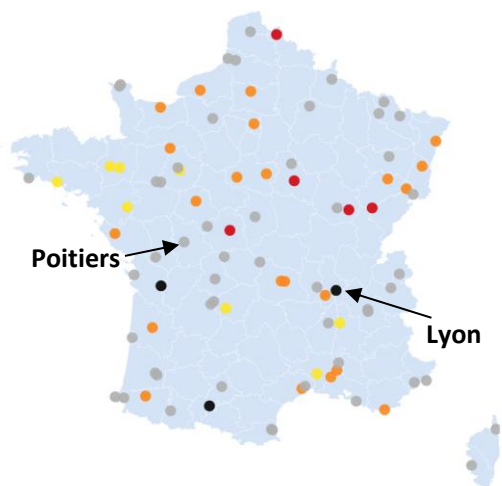
Les PFAs ou polluants éternels

❑ PFAS : composés perfluoroalkylés à squelette $-(CF_2)_n-CF_3$

➤ Règlementation environnementale européenne et française

- Seuil limite total acceptable (avant 2026) : 0,10 µg/L
- Recommandation de la commission (EU) 2022/1431 du 24/08/2022 pour le contrôle analytique des PFAS dans les produits alimentaires
- Arrêté du 20/06/2023 relatif à l'analyse des substances per- et polyfluoroalkylées dans les rejets aqueux (JORF n° 0147 du 27 juin 2023) : 20 PFAS dont PFOA et PFOS

Analyse des PFAS dans 89 échantillons d'eau du robinet (04/09/2024)



- Sous les seuils de détection
- PFAS en faible quantité
- PFAS cancérogènes ou interdits en faible quantité
- PFAS cancérogènes ou interdits en quantité importante
- PFAS en quantité trop élevée

20 PFAS sous la réglementation EU (16/12/2020)

- perfluorobutanoic acid (PFBA)
- perfluoropentanoic acid (PFPeA)
- perfluorohexanoic acid (PFHxA)
- perfluoroheptanoic acid (PFHpA)
- perfluorooctanoic acid (PFOA)
- perfluorononanoic acid (PFNA)
- perfluorodécanoic acid (PFDA)
- perfluoroundécanoic acid (PFUnDA)
- perfluorododécanoic acid (PFDoDA)
- perfluorotridecanoic acid (PFTrDA)
- perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)
- perfluoropentanesulfonic acid (PFPeS)
- perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS)
- perfluoroheptanesulfonic acid (PFHpS)
- perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)
- perfluorononanesulfonic acid (PFNS)
- perfluorodécanesulfonic acid (PFDS)
- Perfluoroundécanesulfonic acid
- Perfluorododécanesulfonic acid
- Perfluorotridecanesulfonic acid

Chimie et Polluants Émergents

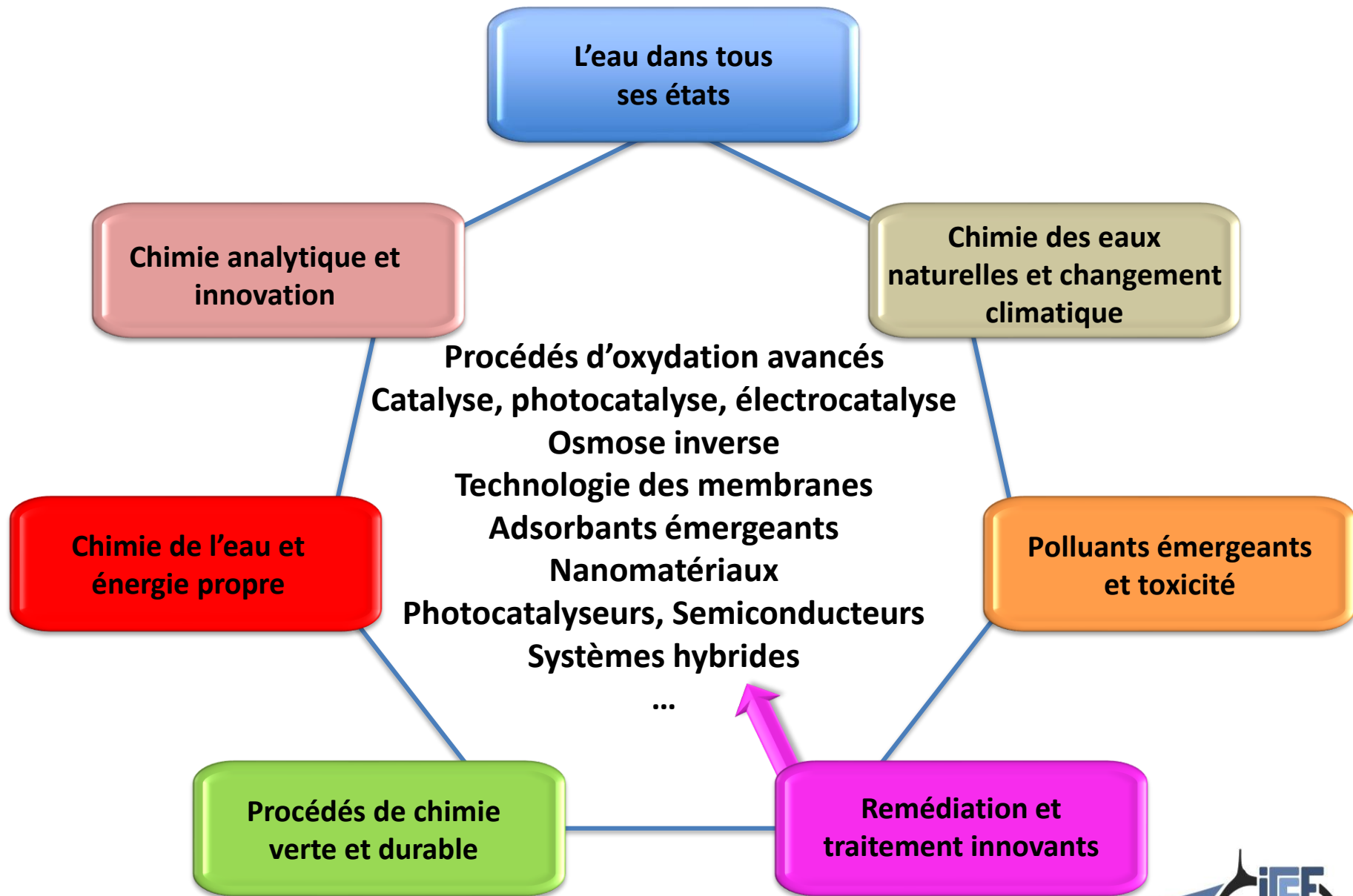
❑ Les microplastiques (1µm – 5 mm) et les nanoplastiques (< 1 µm)

- Production mondiale de plastiques : 500 Mt (x 2 entre 2000 et 2019, x 3 en 2060)
- En France :
 - 5 Mt de plastiques produits / an
 - 25 millions de bouteilles utilisées / jour
 - 67 kg de déchets plastiques par famille & par an
 - 26 % recyclés, 39 % incinérés, 35 % en décharges
 - > 40 % à usage unique
- 25 Mt rejetées chaque année dans les eaux naturelles
- 75 et 200 Mt de déchets plastiques accumulés dans les mers et les océans
- Rhône achemine 22 t de déchets plastiques en Méditerranée
- Impact sur la biodiversité et sur la santé humaine (CMR, perturbateurs endocriniens, ...)



polyéthylène
vinyle
polystyrène
nylon
PE
PP
PET
PS
téréphtalat
PVC
polychlorure
polypropylène

Chimie et Enjeux de l'Eau



❑ Recherche de solutions résilientes et adaptatives

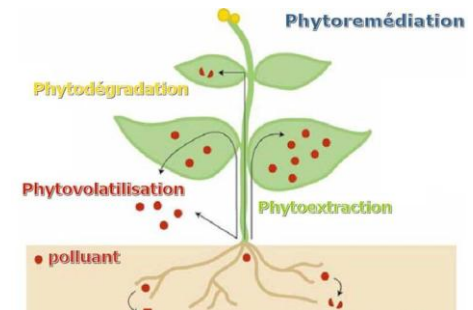
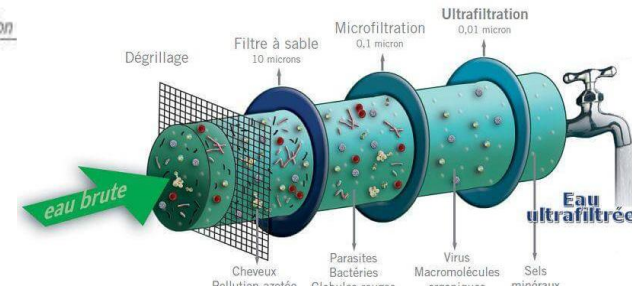
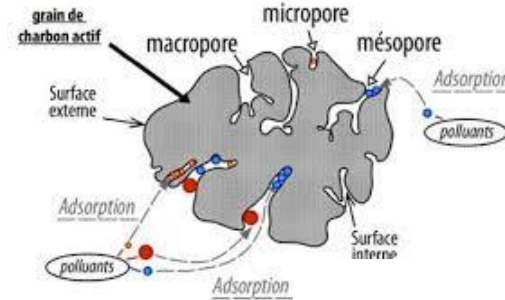
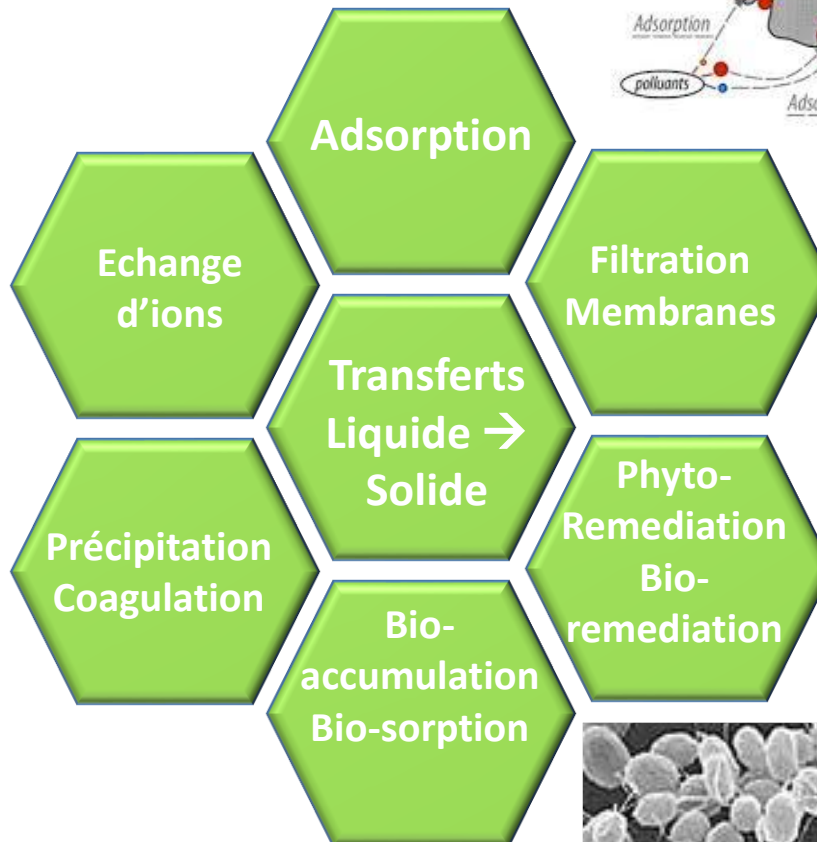
- Regard critique sur les différentes solutions
- Identifier un cahier des charges adapté

Avantages	Limites
▪ Réduction de l'utilisation de produits chimiques ▪ Réduction de la génération de déchets ▪ Réduction de la consommation d'énergie (source d'énergie renouvelable, récupération d'énergie) ▪ Adaptation aux systèmes de traitement décentralisés ▪ Accessibilité à l'eau potable en tout lieu ▪ Solutions résilientes face aux perturbations liées au climat	▪ Certaines méthodes avancées coûteuses en énergie (+50 %) ▪ La minéralisation par AOP souvent incomplète ▪ Génération de polluants secondaires de structure chimique et toxicité souvent inconnues. ▪ Analyse approfondie des impacts environnementaux nécessaires, intégrant approche systémique globale et analyse de cycle de vie

Procédés de traitements avancés

❑ Procédés de transfert de phase

- Mécanismes chimiques spécifiques
- Sélectifs à certains polluants



Procédés de traitements avancés

❑ Procédés de transfert de phase – Enjeux scientifiques

Procédé	Challenges actuels	Limites principales	Perspectives
Adsorption	Élimination des micropolluants (PFAS, médicaments, pesticides) à très faibles concentrations	Saturation des adsorbants, régénération coûteuse, perte d'efficacité en milieu complexe	Nouveaux adsorbants : biochars, MOFs, graphène, matériaux sélectifs et régénérables
Filtration membranaire	Production d'eau de haute qualité avec faible consommation énergétique	Colmatage (fouling), coût élevé, forte pression nécessaire, concentrats à traiter	Membranes antifouling, membranes biomimétiques, procédés hybrides, réduction énergétique
Osmose inverse	Dessalement et réutilisation des eaux usées	Très énergivore, gestion des saumures, vieillissement des membranes	Couplage avec énergies renouvelables, récupération d'énergie, membranes plus performantes
Échange d'ions	Retrait sélectif des nitrates, métaux et ions toxiques	Régénération chimique générant des effluents secondaires	Résines plus sélectives et recyclables, procédés intégrés
Coagulation-floculation	Traitement rapide des eaux turbides et industrielles	Production importante de boues chimiques	Coagulants biosourcés et réduction des boues
Décantation / flottation	Séparation efficace des solides	Peu efficace pour les nanoparticules et micropolluants dissous	Optimisation hydraulique et couplage avec membranes

❑ Procédés d'adsorption – Enjeux scientifiques

➤ Optimisation du cahier des charges Polluant/Adsorbant

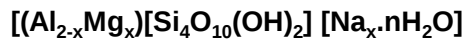
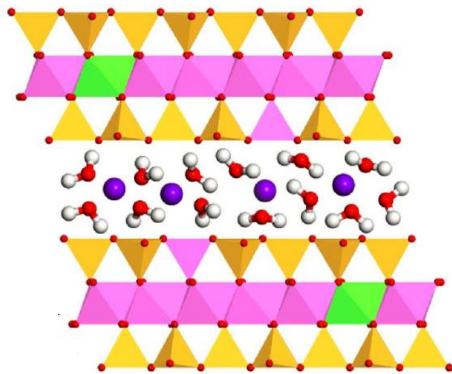
Polluants	Adsorbants		
Cations métalliques / Anions métallate / oxoanions	stabilité chimique élevée (pH, température, force ionique, etc.)		
Charge – Taille – Polarisabilité – Solubilité – Spéciation en pH	Sélectivité de charge, de taille, de forme et des propriétés hydrophobes/ hydrophiles		
Organiques	Un nombre élevé de sites d'adsorption (S_{BET})		
Charge – Taille – hydrophobicité (K_{ow}) – Solubilité – Spéciation en pH	- surface spécifique élevée (S_{BET}) - A high porosity and accessibility		
Adsorbants pour cations	Adsorbants pour anions	Adsorbants pour espèces neutres	
- Smectite - Reduced graphene oxide (rGO) - Titanate $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ - Alk-Mxene ($\text{Ti}_3\text{C}_2(\text{OH}/\text{ONa})_x\text{F}_{2-x}$)	Layered Double hydroxides (LDHs)	- Graphene - Layered MOFs - Organo-modified LDHs - Organo-modified clay minerals	

□ Procédés d'adsorption – Enjeux scientifiques

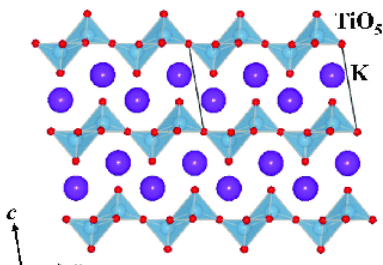
➤ Matériaux 2D pour l'adsorption et échange d'ions

Echangeurs de cations

Montmorillonite

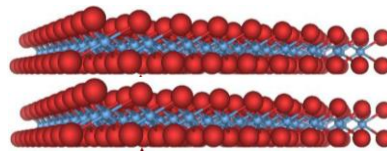


[K₂] [Ti₂O₅]

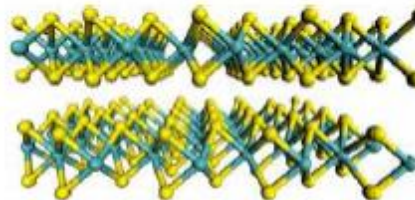


Structure neutre

CoO₂

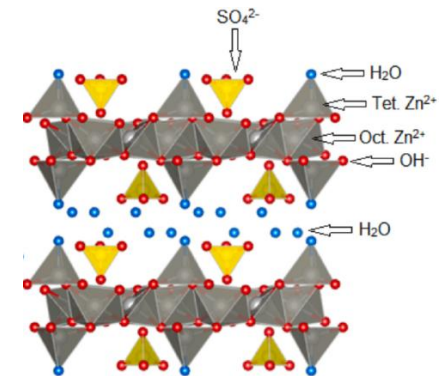


MoS₂

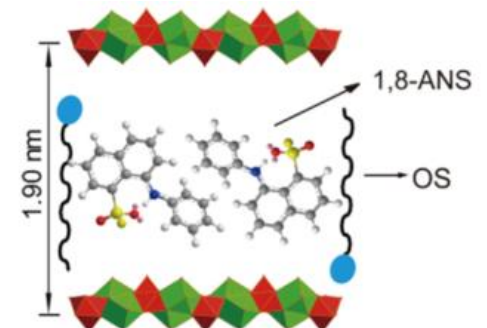


Echangeurs d'anions

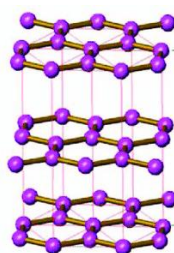
[Zn₄(OH)₆][SO₄·4H₂O]



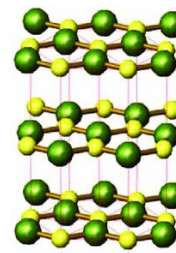
Hydroxyde d'Europium



Graphite



h-BN

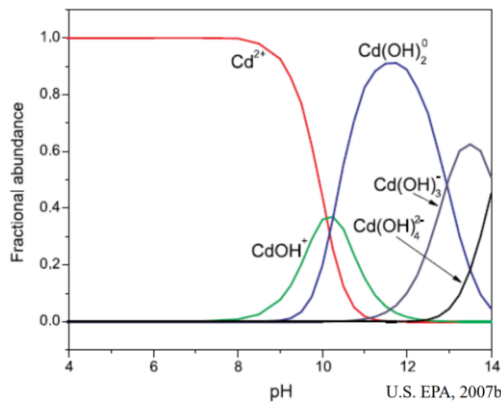


□ Adsorption of Cd^{2+} , Hg^{2+} , et Pb^{2+} des eaux contaminées

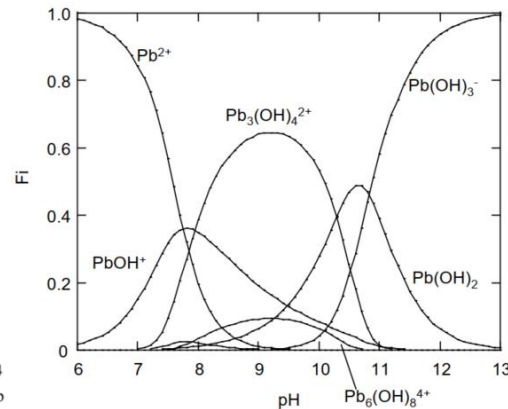
- Concentrations acceptables dans les eaux potables (France)
- Spéciation des ions en milieu « eaux naturelles »

Cd^{2+}	Pb^{2+}	Hg^{2+}
5 µg/L	5 µg/L	1 µg/L

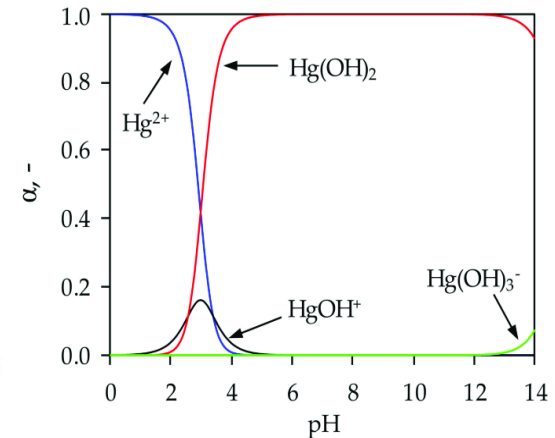
Cd^{2+}



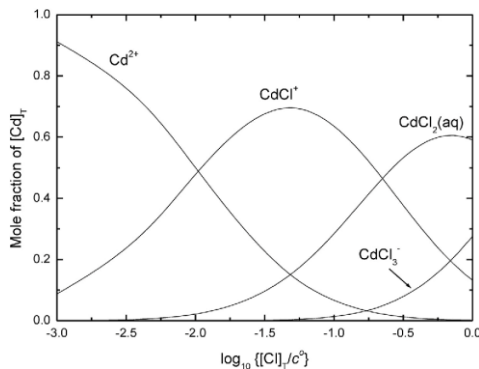
Pb^{2+}



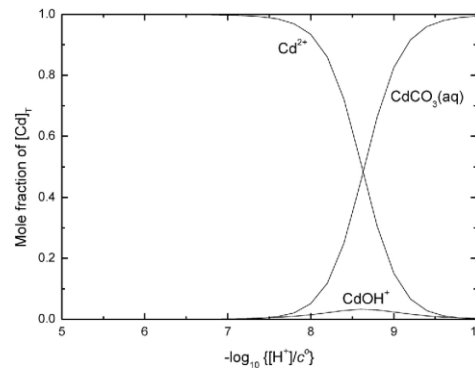
Hg^{2+}



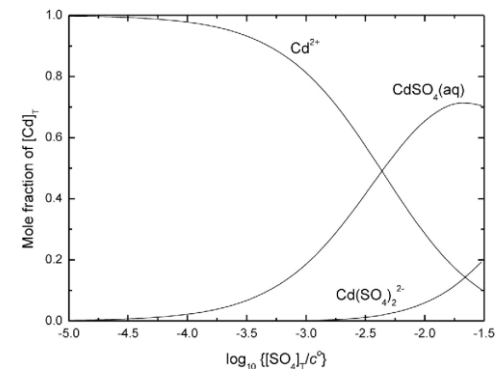
$\text{Cd}^{2+}/\text{Cl}^-$



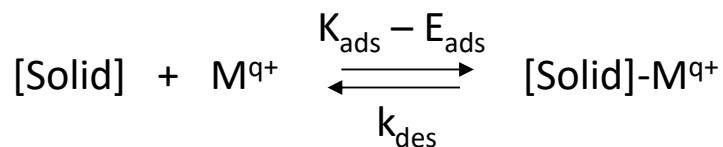
$\text{Cd}^{2+}/\text{CO}_3^{2-}$



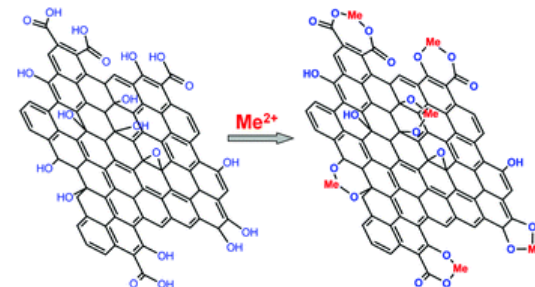
$\text{Cd}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$



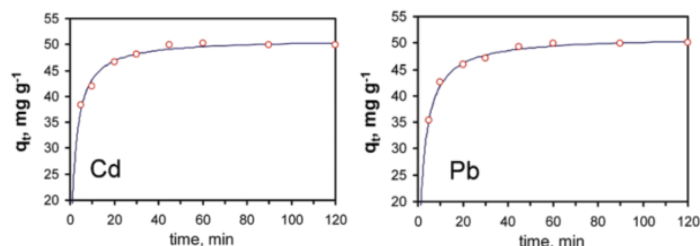
□ Adsorption du Cd^{2+} et Pb^{2+} des eaux contaminées par GrOx



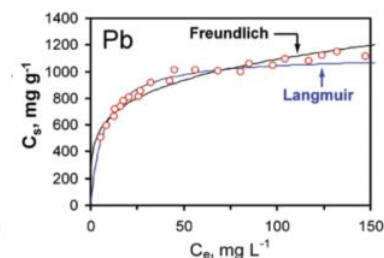
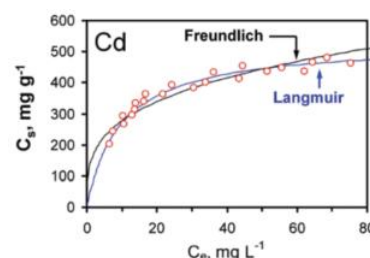
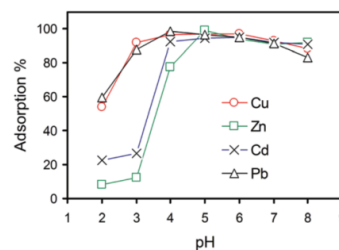
Sites d'adsorption



■ Cinétiques d'adsorption du Cd^{2+} & Pb^{2+} par GrO_x (298 K)



■ Isothermes d'adsorption du Cd^{2+} & Pb^{2+} par GrO_x (298 K)



($C_0 = 1 \text{ mg L}^{-1}$, $C_{\text{GO}} = 0.1 \text{ g L}^{-1}$, $t = 120 \text{ min}$)

■ Modèles cinétiques & d'adsorption

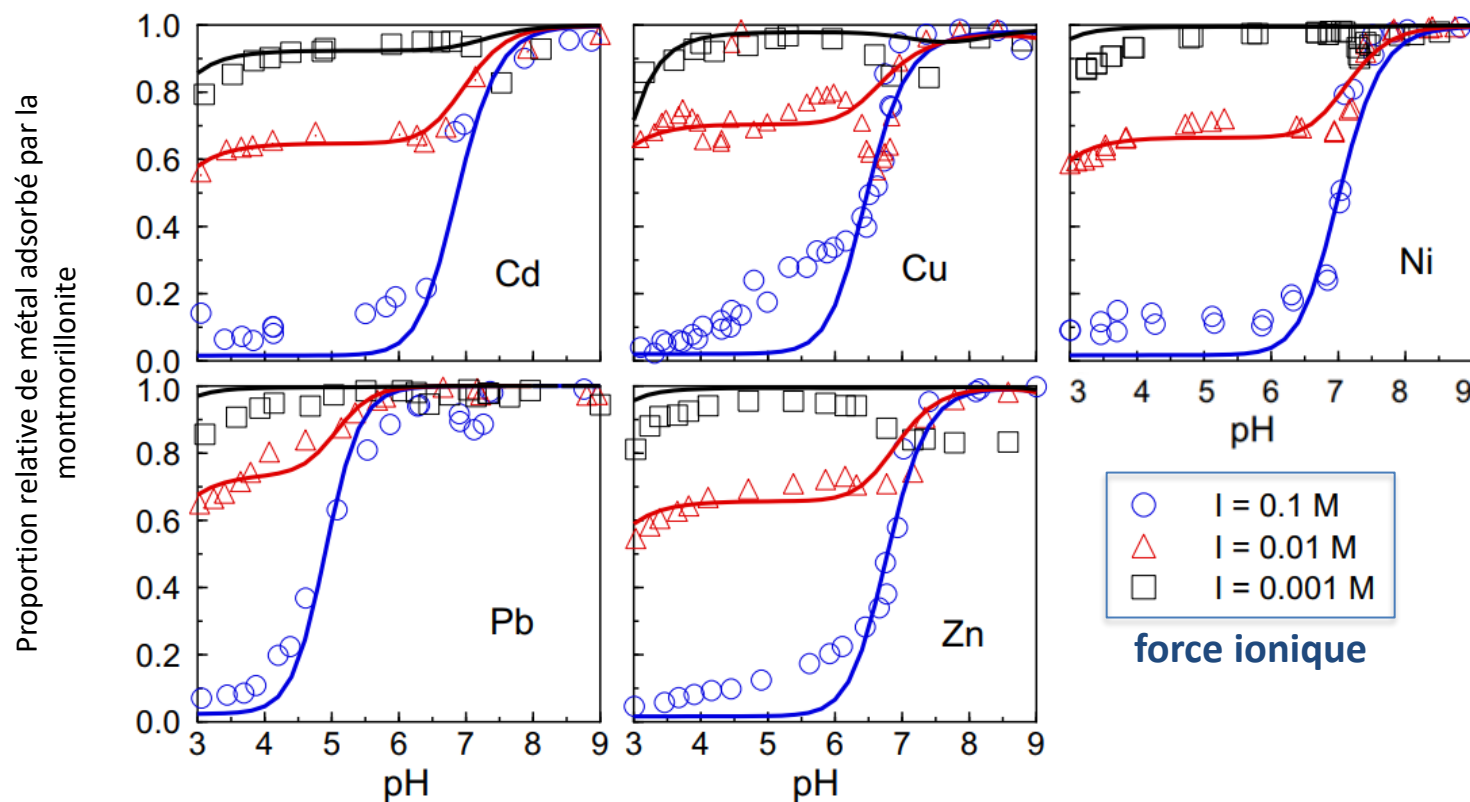
Langmuir	Freundlich
$q_e = q_{\text{max}} K_L C_e / (1 + K_L C_e)$	$q_e = K_F C_e^{1/n}$
q_{max} (mg g ⁻¹) $K_L : \Delta H_{\text{ads}}^\circ$ (L mg ⁻¹)	K_F (mg ¹⁻ⁿ L ⁿ g ⁻¹): capacity adsorption n = intensity d'adsorption

q_{max} (Langmuir)	
Cd^{2+}	Pb^{2+}
530 mg/g	1119 mg/g

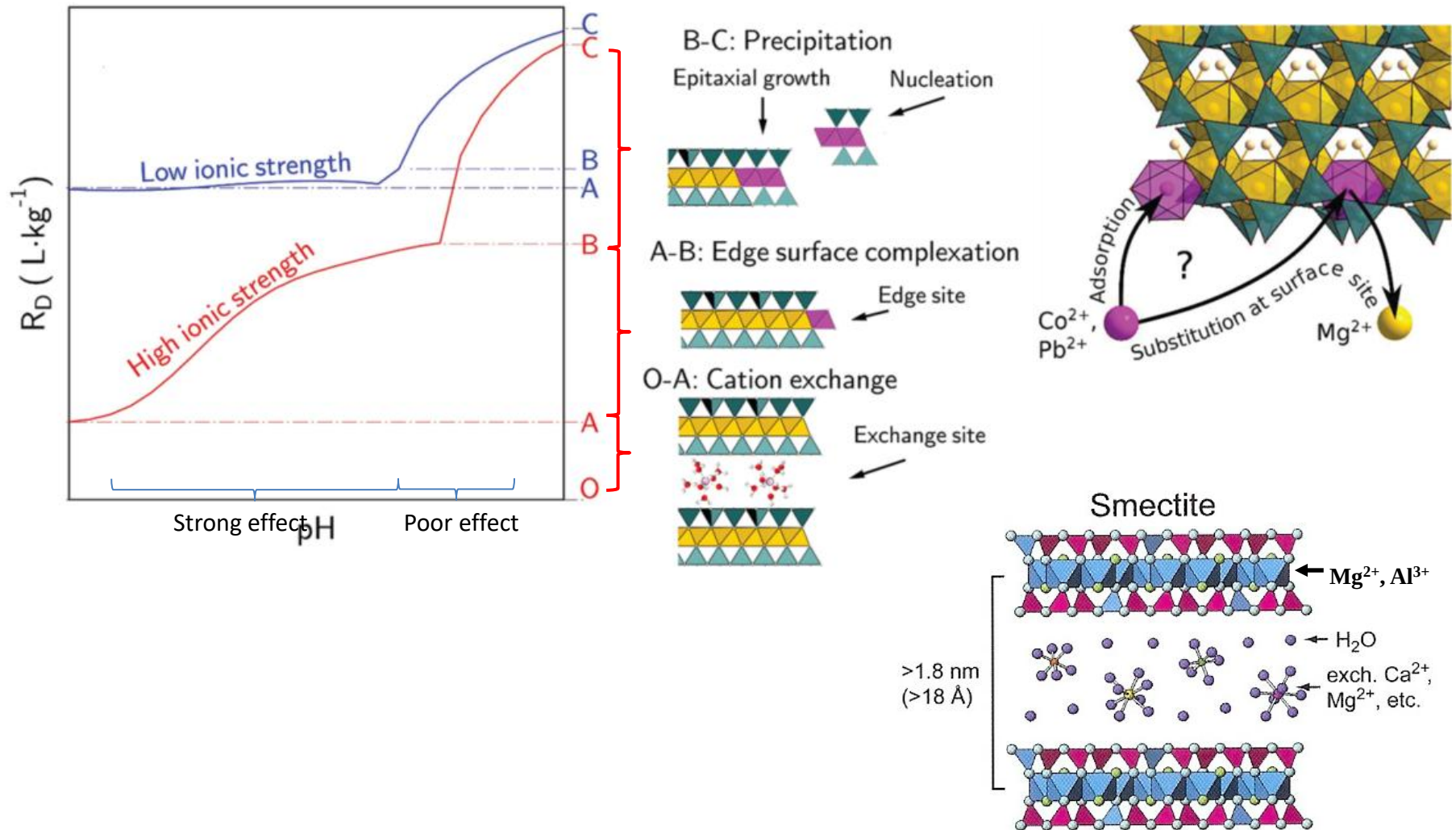
$\text{Pb(II)} \gg \text{Cd(II)}$



- Adsorption de métaux lourds M^{2+} par la Montmorillonite en fonction du pH et de la force ionique



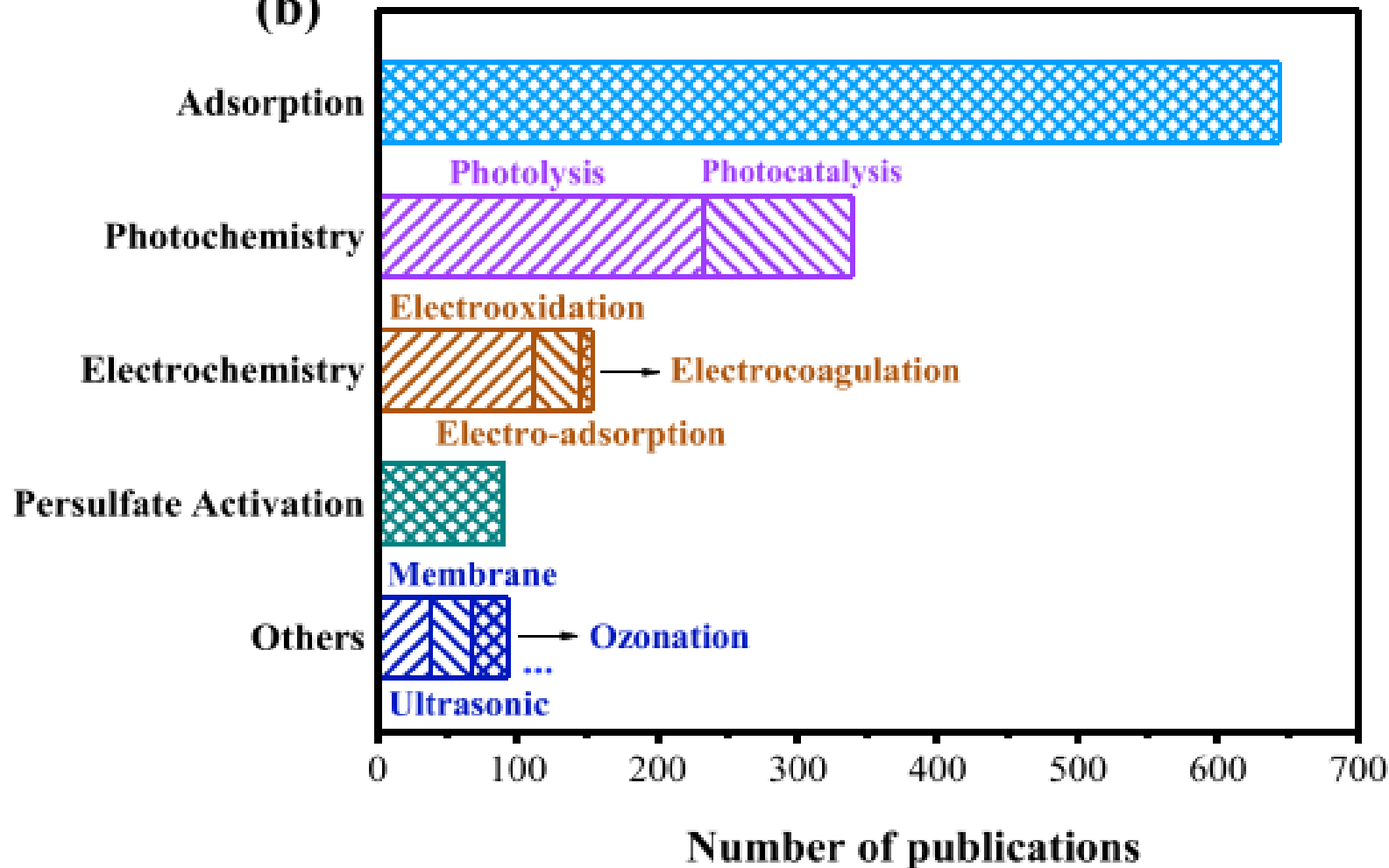
- ❑ Adsorption de métaux lourds M^{2+} par la Montmorillonite en fonction du pH et de la force ionique



Les PFAs ou polluants éternels

❑ Comparaison des procédés d'élimination des PFAs

(b)

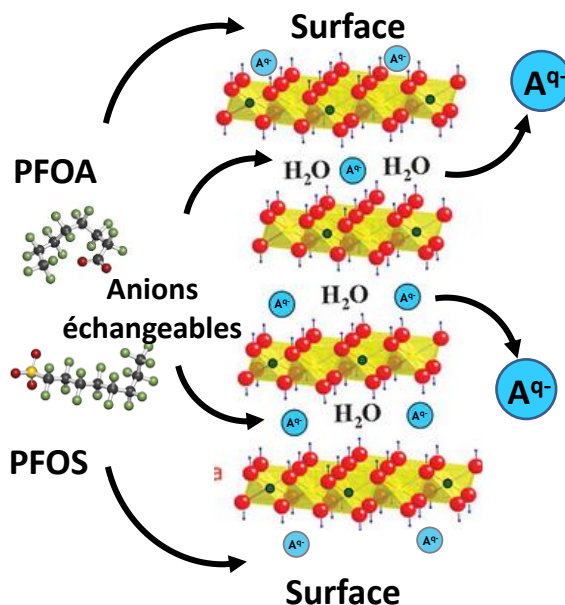
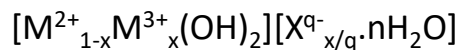


Les PFAs ou polluants éternels

❑ Procédés d'adsorption appliqués à la décontamination des eaux de rejets de station d'épuration

➤ Synthèse et caractérisation des matériaux adsorbants

MEB



➤ Taux d'abattement

Adsorbant	Abattement PFOA	Abattement PFOS
Mg ₂ Fe-Cl	30 %	91 %
Mg ₂ Al-Cl	93 %	91 %
Zn ₂ Al-Cl	96 %	97 %
Zn ₃ Al-Cl	94 %	94 %
Zn ₄ Al-Cl	92 %	97 %
Mg ₂ Fe-Cl-500°C	25 %	93 %
Mg ₂ Al-Cl-500°C	87 %	97 %
Zn ₂ Al-Cl-500°C	98 %	98 %
Zn ₃ Al-Cl-500°C	97 %	97 %
Zn ₄ Al-Cl-500°C	95 %	97 %

[PFAS] 1g/L. & HDL 1 g/L

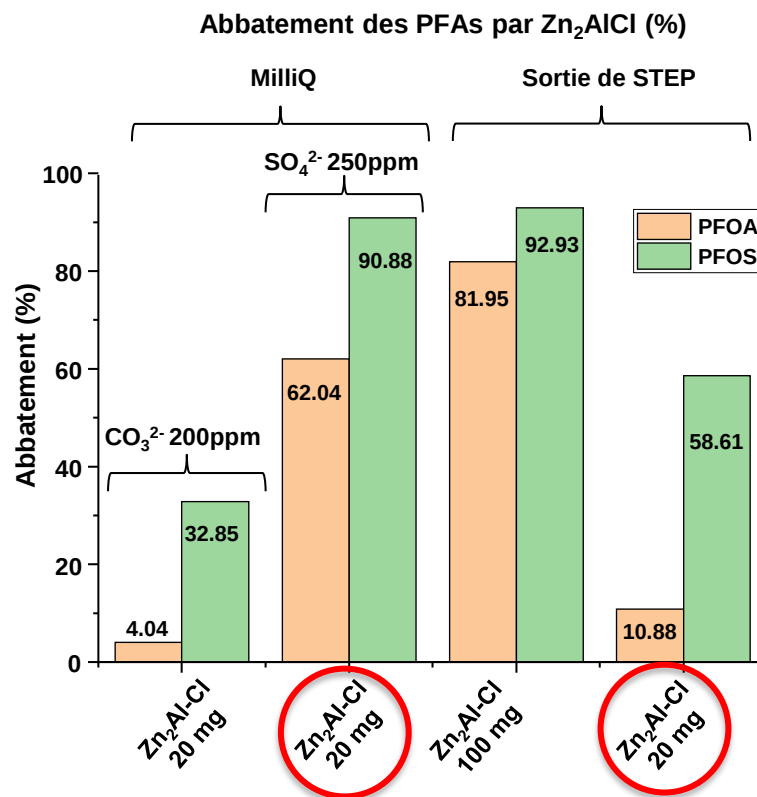
Les PFAs ou polluants éternels

❑ Procédés d'adsorption appliqués à la décontamination des eaux de rejets de station d'épuration

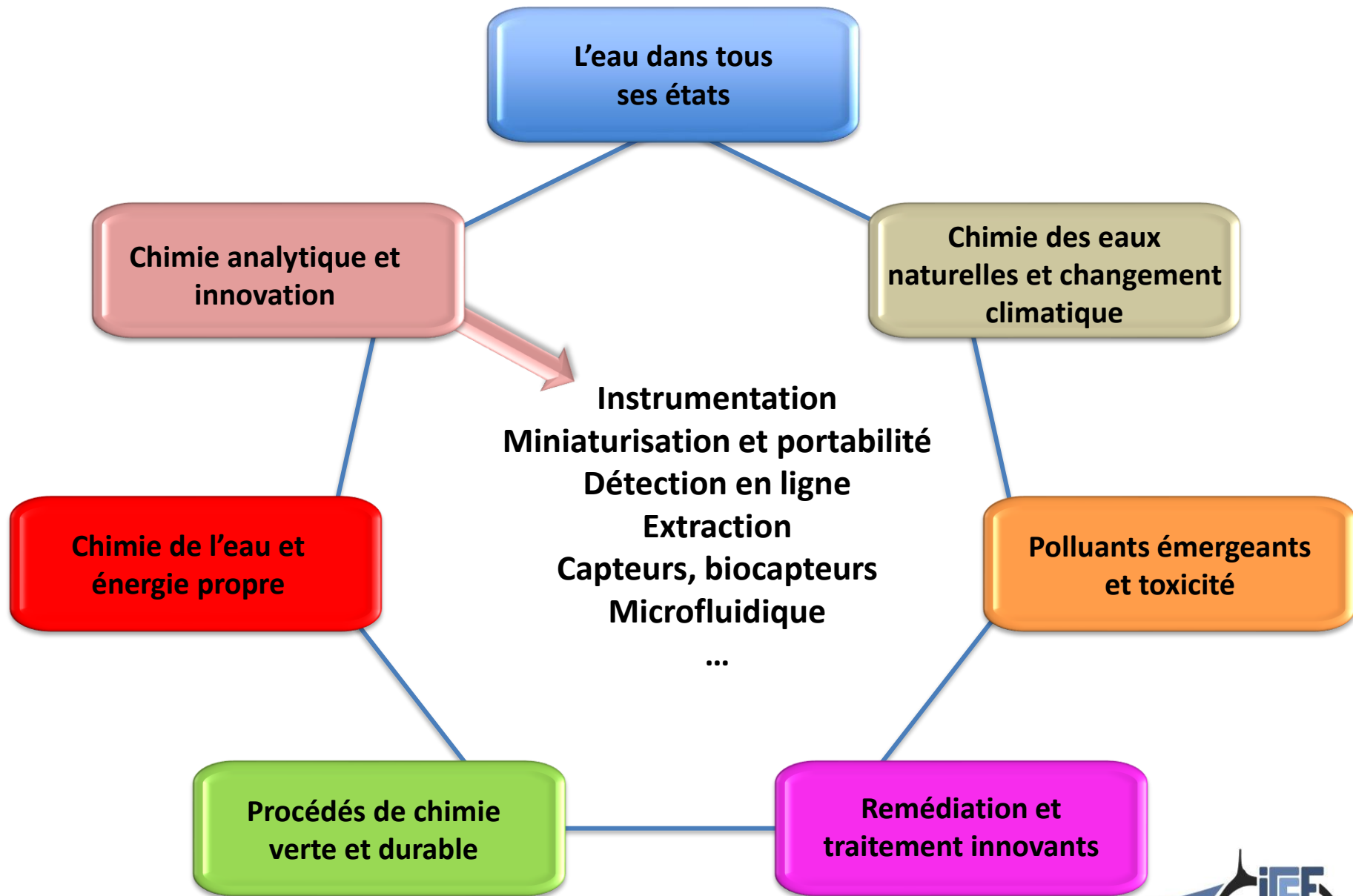
➤ Impact des conditions environnementales

Caracterisation des eaux de sortie de la STEP 3 Rivières (CAM)

Paramètres physico-chimiques			
T	18 °C	EC	670 $\mu\text{S.cm}^{-1}$
pH	8.1		
Composition	Conc. mg.L ⁻¹	Composition	Conc. mg.L ⁻¹
TOC	7.26	Na ⁺	13.57
IC	28.27	Cl ⁻	76.00
TC	35.53	NO ₃ ⁻	8.20
TN	5.64	SO ₄ ²⁻	45.80
Ca ⁺⁺	31.96	PO ₄ ³⁻	0.40
Mg ⁺⁺	13.68		



Chimie et Enjeux de l'Eau

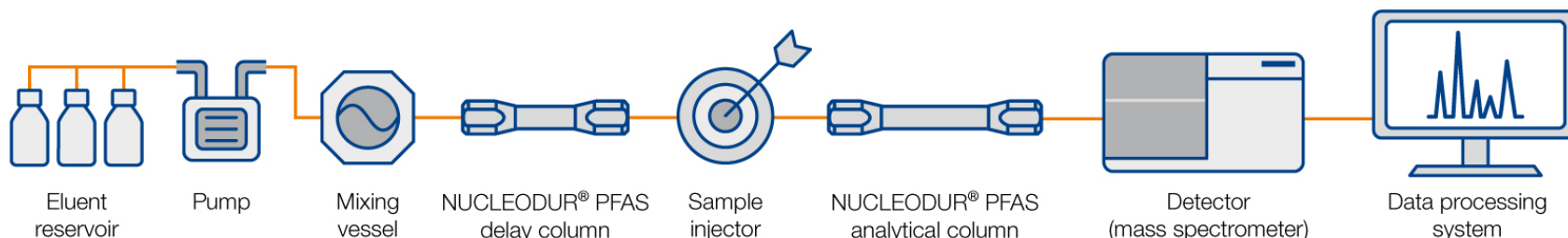


❑ Développement analytique pour le dosage de PFAS à l'état de trace par LC-MS/MS.

- Instrument : UltiMate 3000 HPLC (Thermo Fisher Scientific) couplé à un spectromètre de masse Q-Exactive (Thermo Scientific) équipé d'une source d'ionisation par électrospray (ESI).



Classe	Molécule	Formule	[M-H] ⁻
Chaîne courte et longue	PFOS	C ₈ HF ₁₇ O ₃ S	498,9302
	PFOA	C ₈ HF ₁₅ O ₂	412,9664
	PFPeA	C ₅ HF ₉ O ₂	262,9760
	HFPO-DA	C ₆ HF ₁₁ O ₃	328,9677
Chaîne ultra courte	TFA	C ₂ HF ₃ O ₂	112,9856
	HFBA	C ₄ HF ₇ O ₂	212,9792
	PFPrA	C ₃ HF ₅ O ₂	162,9824



Tps (min)	%Eau + Acétate NH ₄	%MeOH
0	85	15
4	0	100
10,1	0	100
10,2	85	15
12	85	15

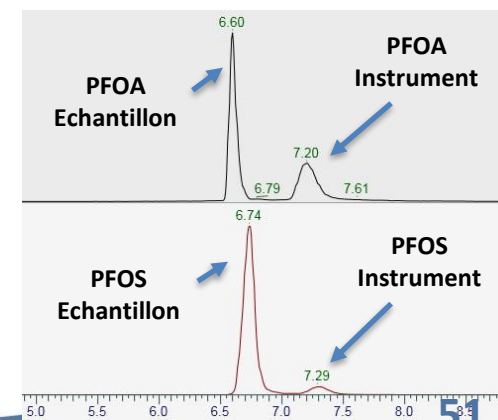
Gradient: Chaîne courte et longue

Chaîne courte et longue:
Luna Omega PS C18
50x2,1mm; 3µm

Chaîne courte et ultra courte:
Polar pesticide
50x2,1mm ; 3µm

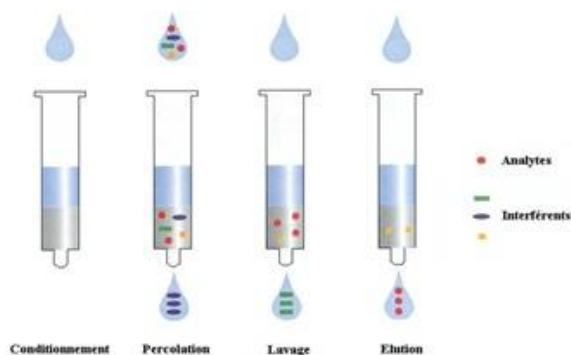
Chaîne courte et longue:
Luna Omega PS C18
100x2,1mm; 1,6µm

Chaîne courte et ultra courte:
Polar pesticide
100x2,1mm ; 3µm



❑ Développement analytique pour le dosage de PFAS à l'état de trace par LC-MS/MS.

> Purification par Extraction sur Phase Solide (SPE)



Automate SPE



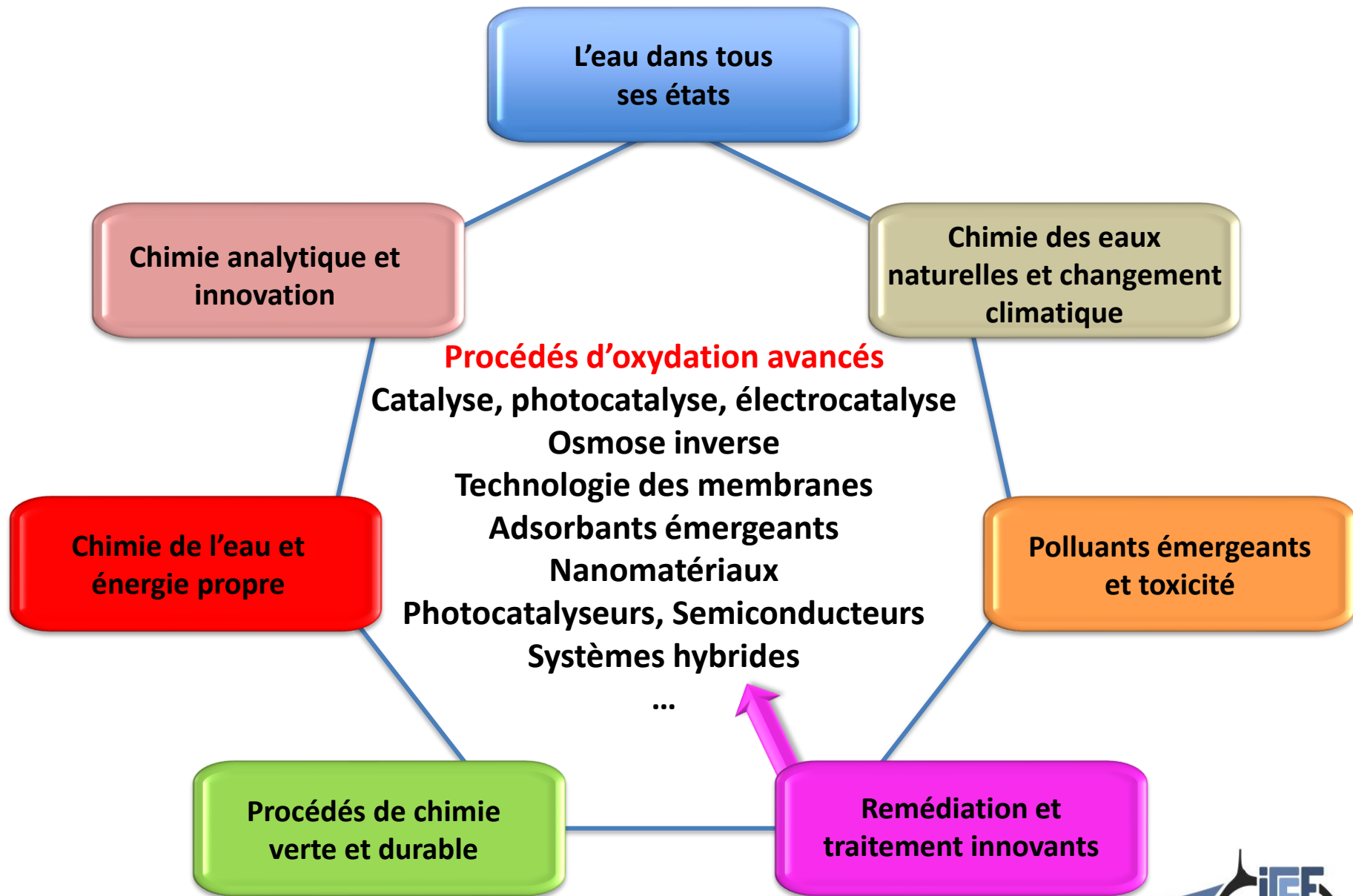
> Concentration par évaporation



Evaporation au SpeedVac

V ech	Etape	LQ
1mL à 1L	Analyse directe	1µg/L
	SPE	1µg/L à 5ng/L
	SPE + concentration	20ng/L à 0,1ng/L

Chimie et Enjeux de l'Eau



Dégradation photocatalytique de la Chloridazone

❑ Evaluation du rôle des défauts électroniques dans des phases HDL calcinées

➤ Préparation des photocatalyseurs

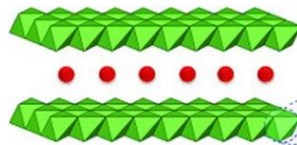
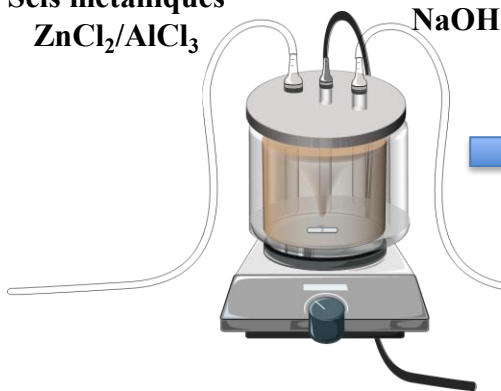
Coprécipitation

Electrode pH

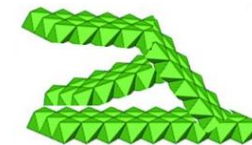
Sels métalliques

$\text{ZnCl}_2/\text{AlCl}_3$

NaOH

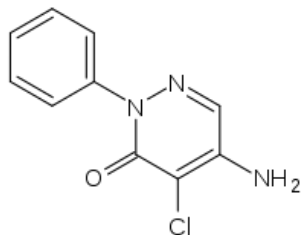


Calcination $T = 300, 500, 700^\circ\text{C}$ - Air, N_2 , Vide - 4h

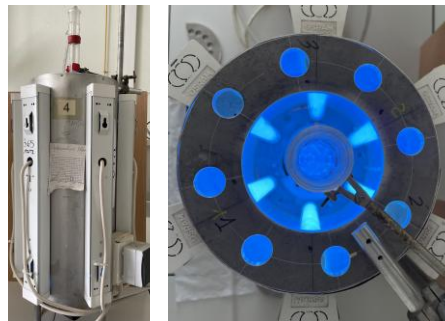


➤ Test de Photodégradation: Photocatalyseur/UVA 365 nm/ $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$

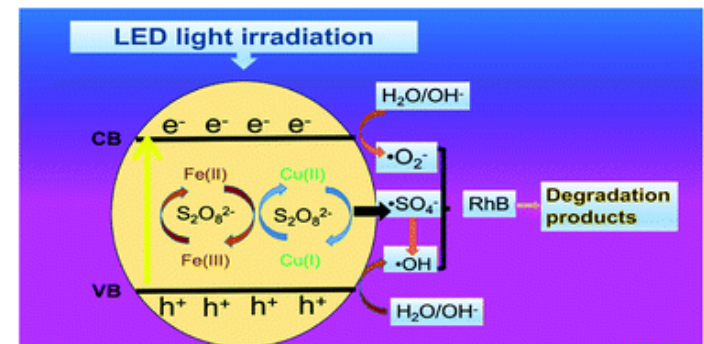
Chloridazone (CLZ)
(100 mM)



Photoréacteur 365 nm
Temps irradiation 0 – 240 min



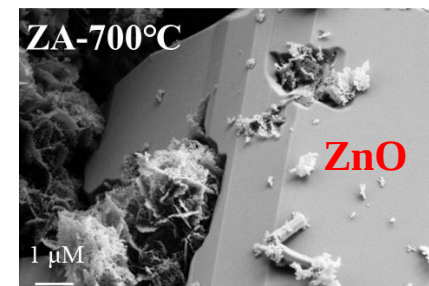
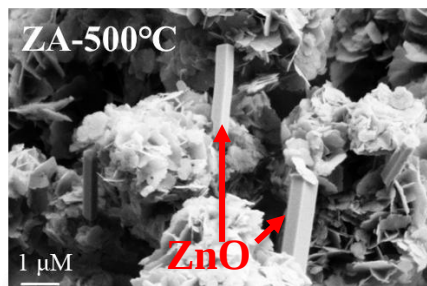
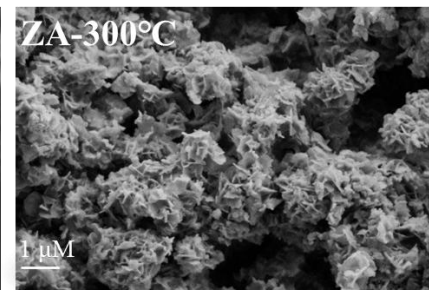
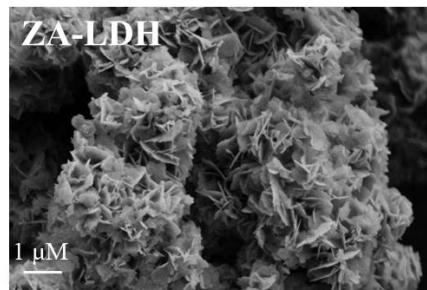
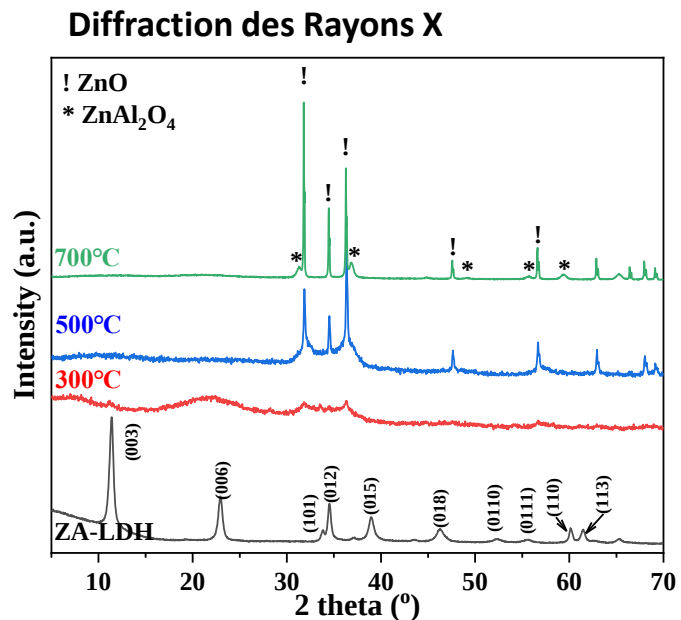
Génération de ROS & mécanisme



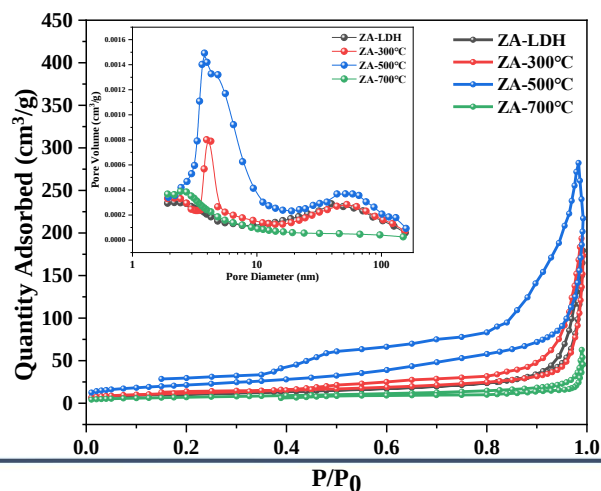
Dégradation photocatalytique de la Chloridazone

□ Evaluation du rôle des défauts électroniques dans des phases HDL calcinées

Microscopie électronique à balayage



Physiosorption N₂

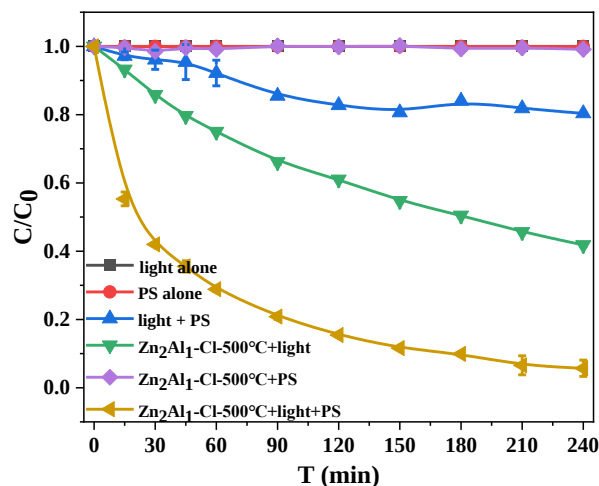


Sample	Surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size (nm)
ZnAl-LDH	38	0.26	30.54
ZnAl-300	41	0.28	28.13
ZnAl-500	75	0.42	20.53
ZnAl-700	25	0.08	14.99

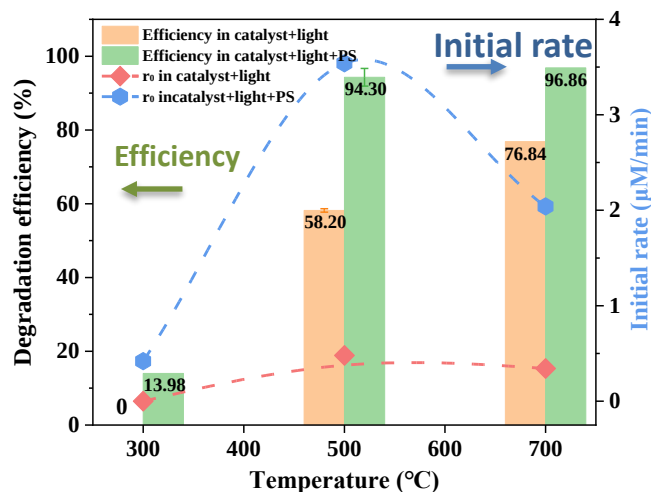
Dégradation photocatalytique de la Chloridazone

Evaluation du rôle des défauts électroniques dans des phases HDL calcinées

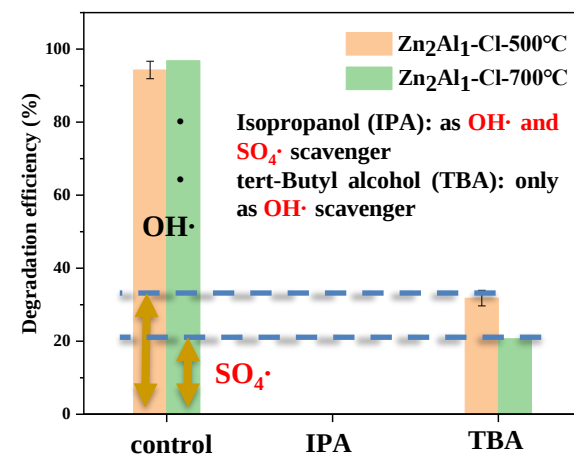
Cinétiques



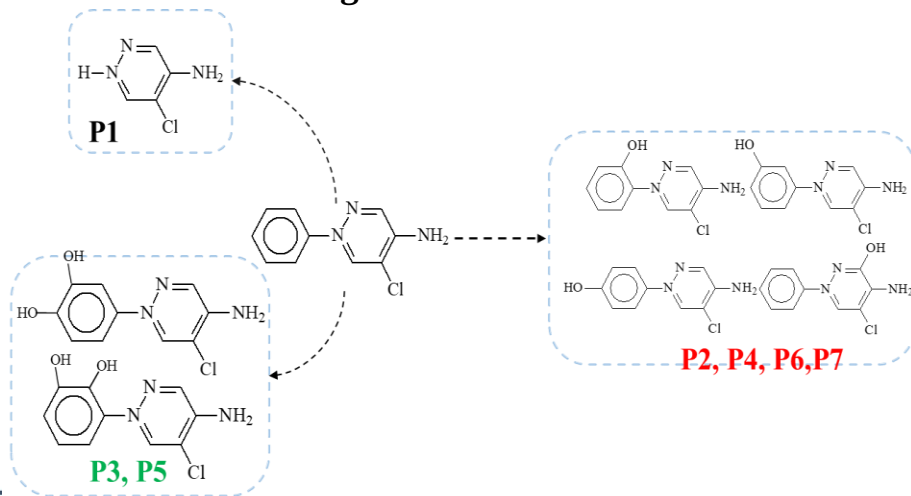
Efficacité vs Vitesse initiale



Identification des ROS



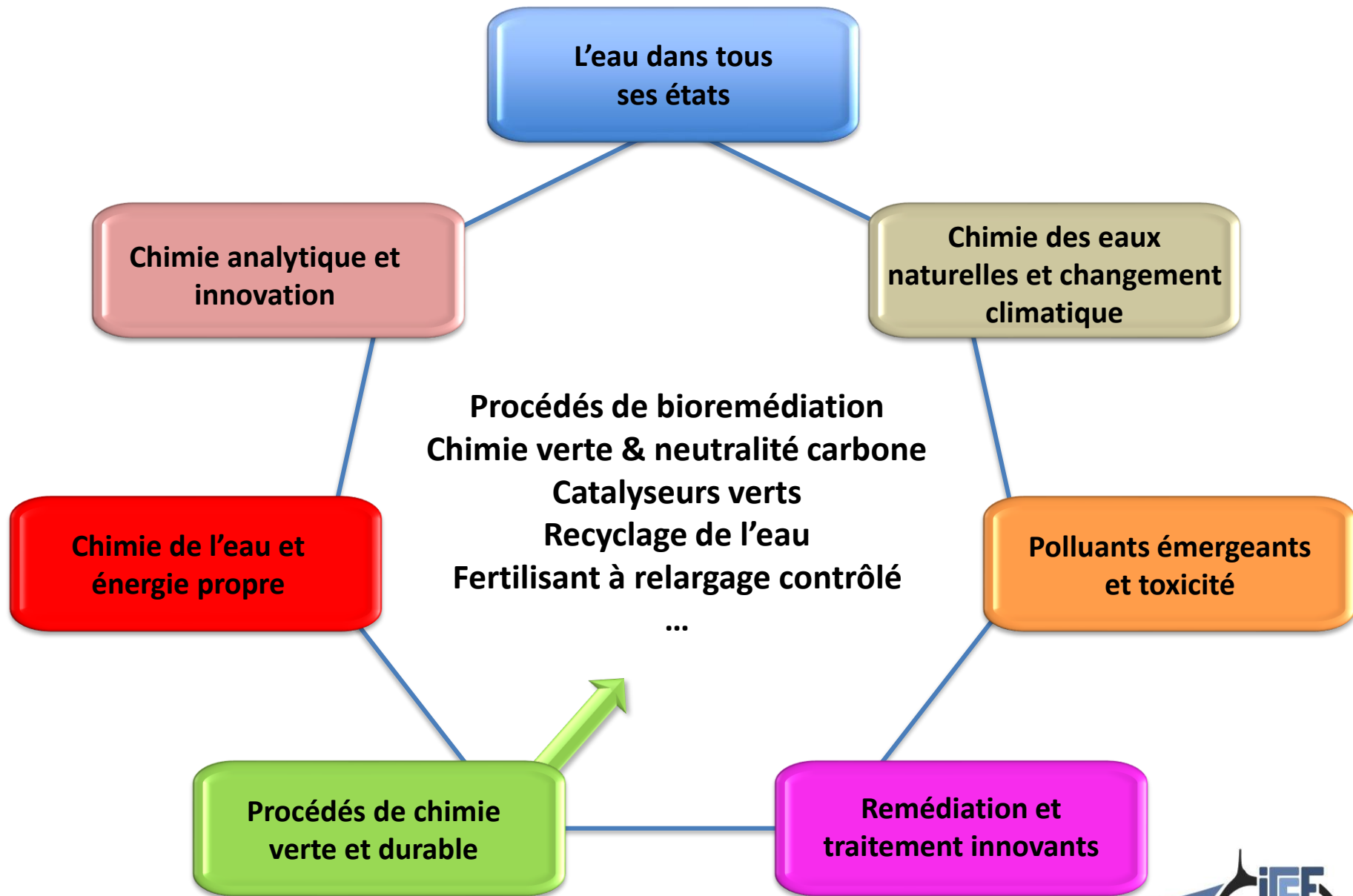
Mécanismes de dégradation



Radical contribution

	Zn ₂ Al-500°C	Zn ₂ Al-700°C
OH·	67.9%	78.6%
SO ₄ ·	32.1%	21.4%

Chimie et Enjeux de l'Eau

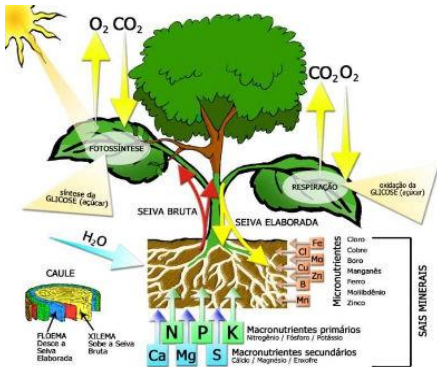


Fertilisants à libération contrôlée pour une agriculture durable

Utilisation des phosphates : Impacts environnemental, économique et géopolitique

Impact économique et agriculture

Perte de 80% au cours de l'épandage

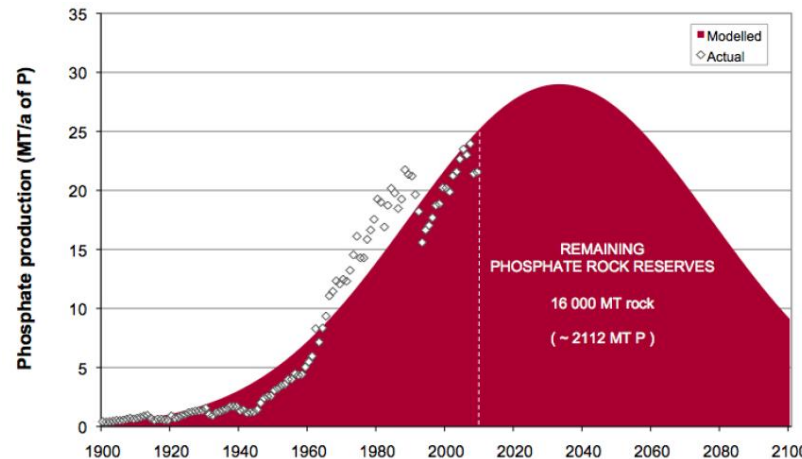


Impact environnemental

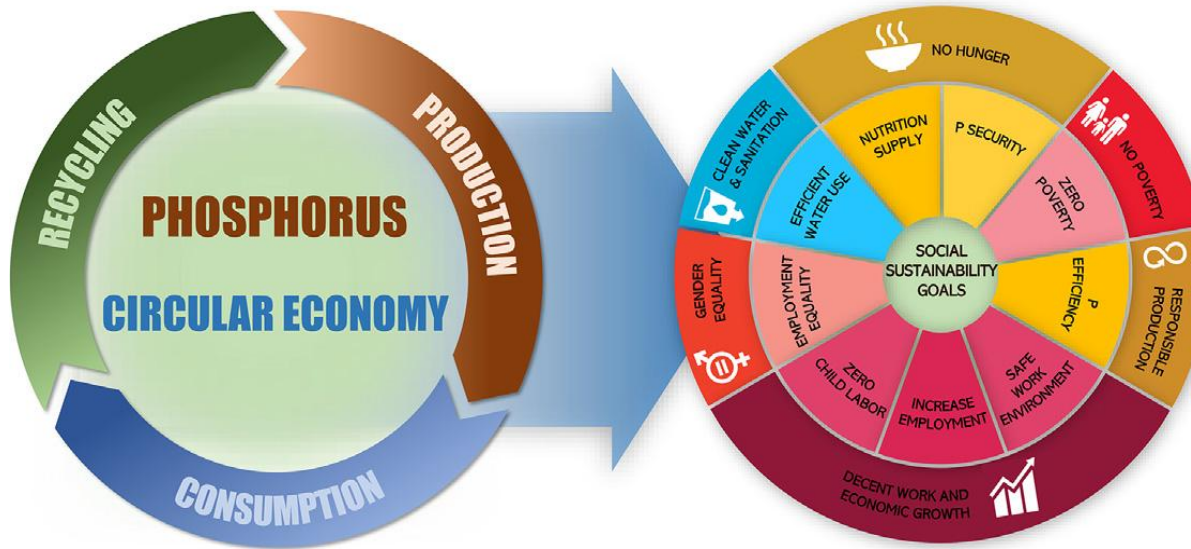
Algues vertes en baie de Lanion (France)



Production vs Réserves

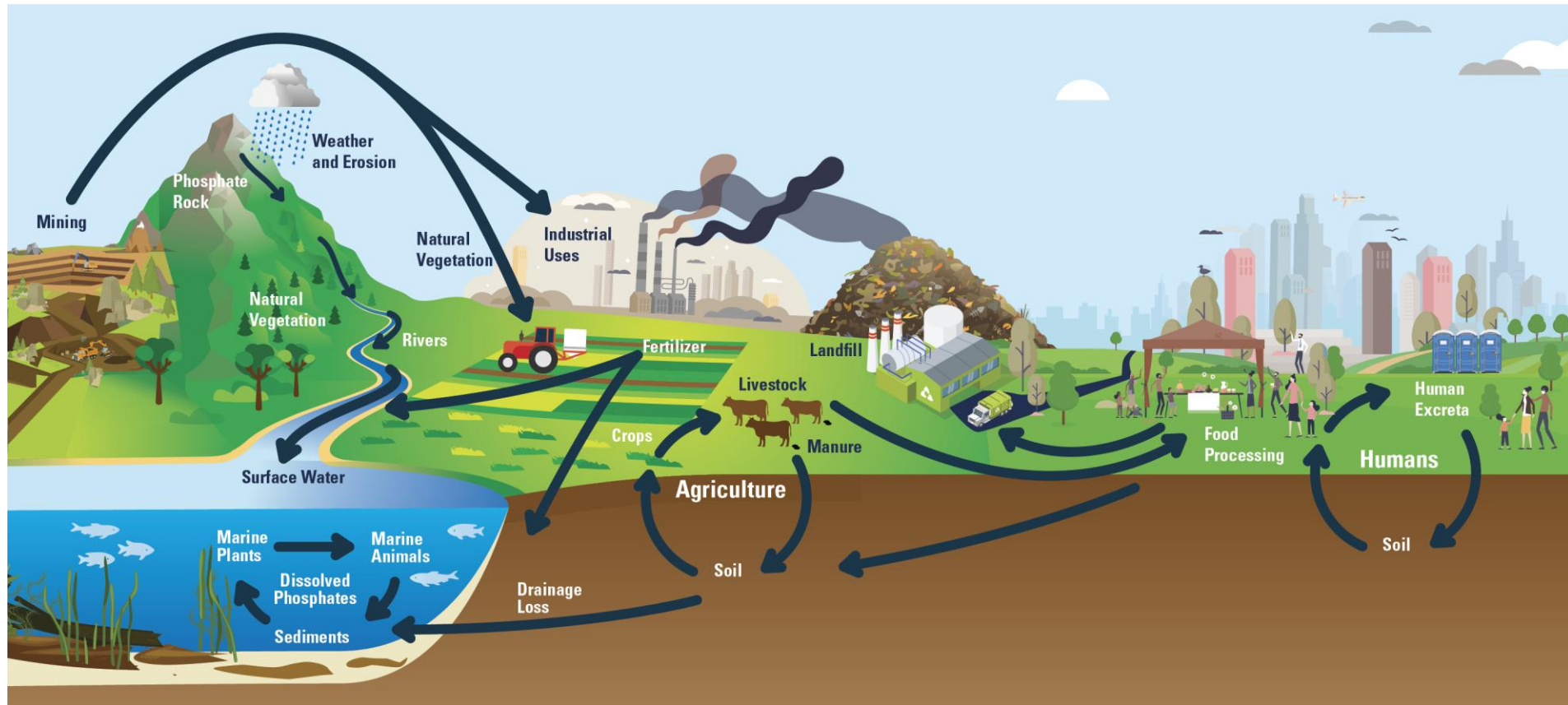


Fertilisants à libération contrôlée pour une agriculture durable



Fertilisants à libération contrôlée pour une agriculture durable

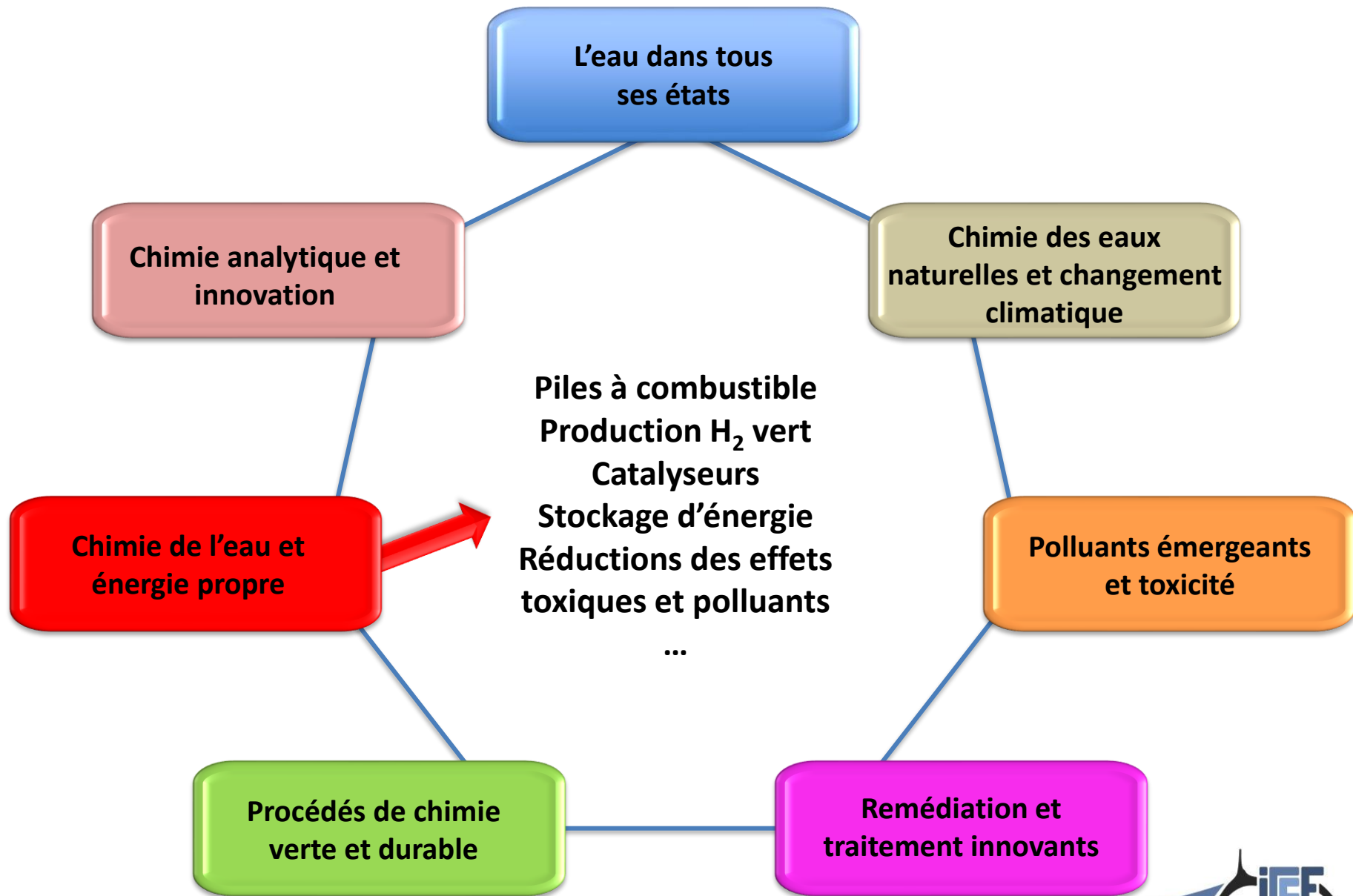
☐ Mieux connaître le cycle du phosphore



Le principe

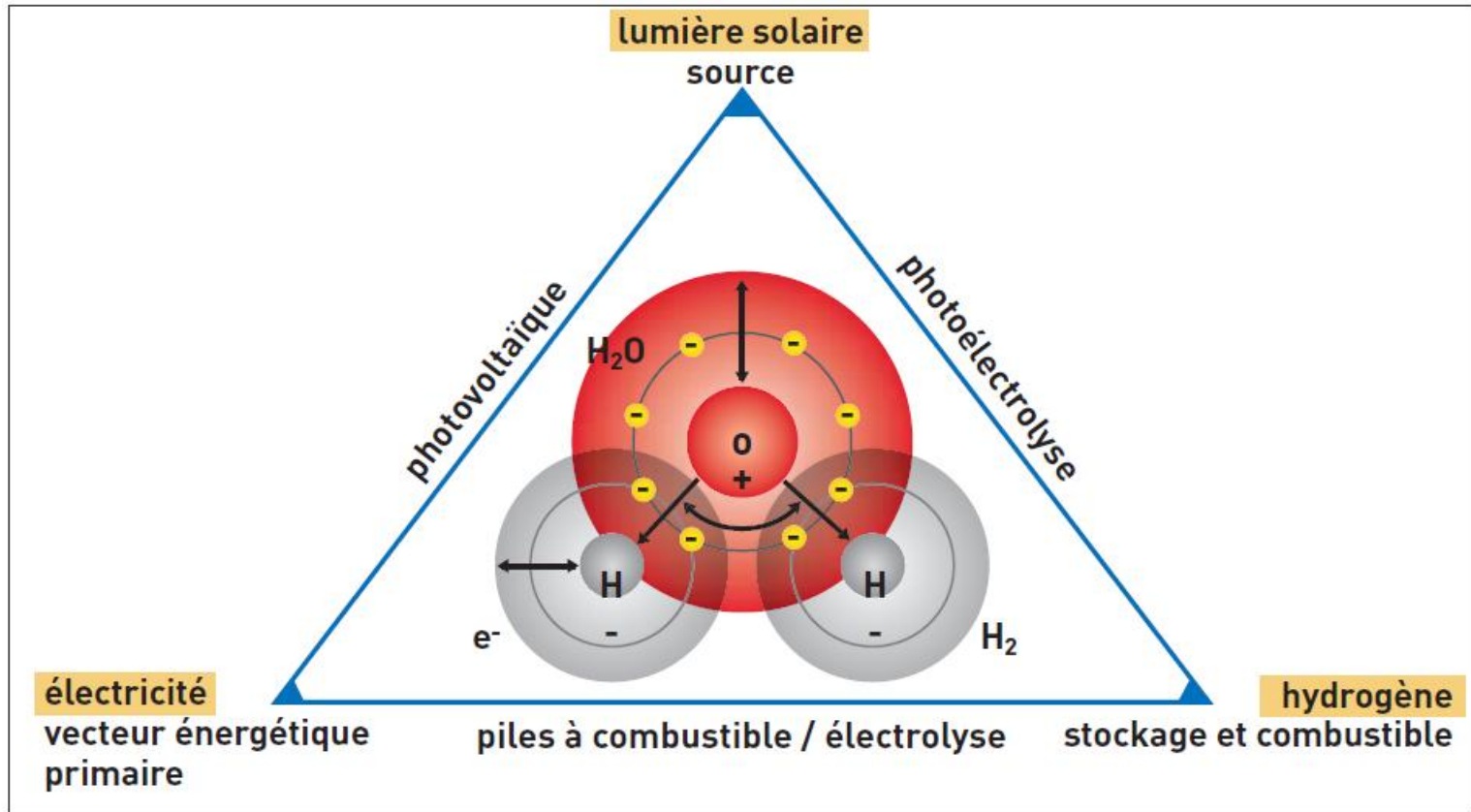


Chimie et Enjeux de l'Eau



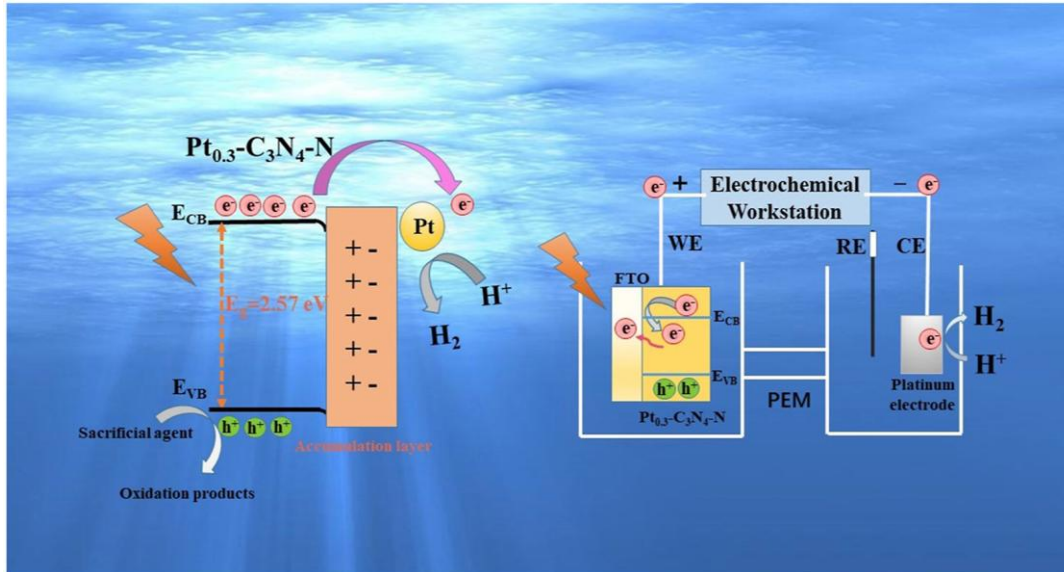
Production d'Hydrogène vert

□ Triangle énergétique post-combustible fossile

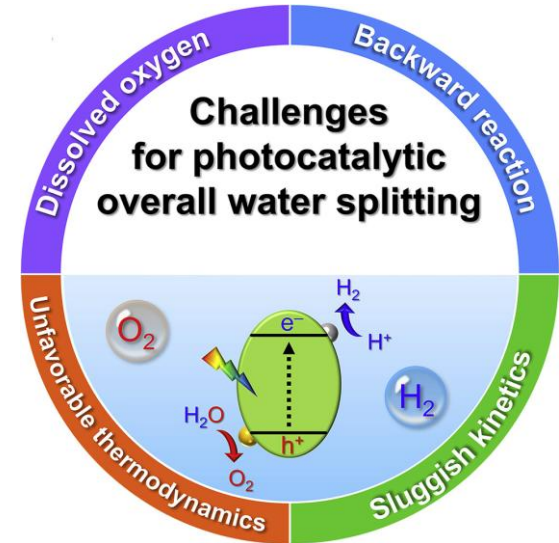


Production d'Hydrogène vert

Le principe



Les verrous



Photoanode (HER) :



Photocathode (OER) :

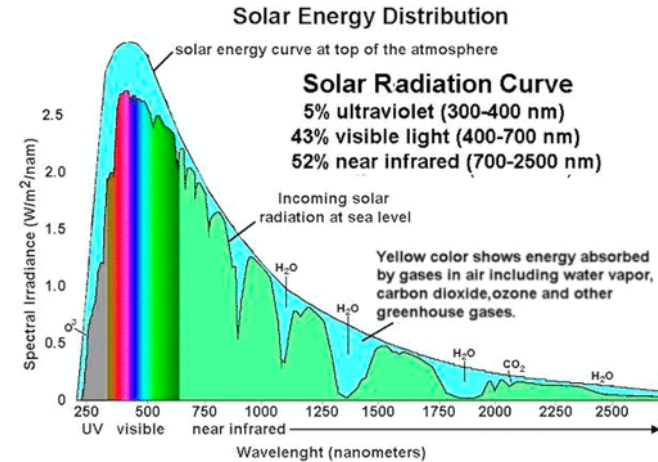
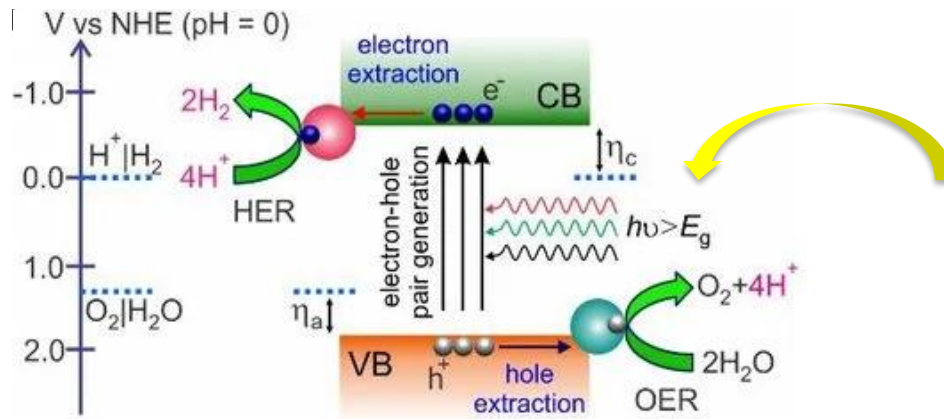


$$\Delta G^\circ = 237 \text{ kJ/mol} \quad E_0 = 1,23 \text{ V} \quad \ll E_w = 1,6 - 2,4 \text{ V}$$

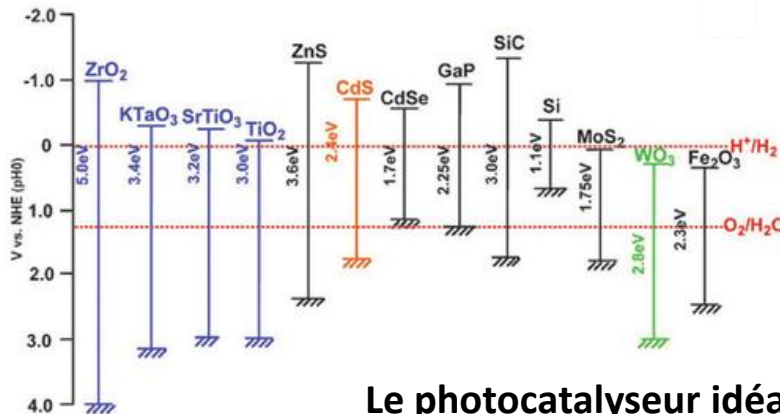
- Rendement de conversion encore insuffisant
- Stabilité à long terme des photoélectrodes
- Développement de catalyseurs efficaces et peu coûteux
- Choix des matériaux photoactifs
- Gestion des interfaces
- Séparation sûre de l'hydrogène et de l'oxygène
- Scale-up

Production d'Hydrogène vert

Les photocatalyseurs



Band gap vs Potentiel redox



Le photocatalyseur idéal :

- Conversion solaire efficace sur un large de domaine d'énergie
- Semiconducteurs à petit E_g

- Large $E_g \rightarrow$ faible absorption $h\nu$
- Rendement limité par E_g
- Pertes entropiques
- Recombinaisons $e^- - h^+$ sous $h\nu$
- Cinétique OER lente
- Rendement théorique max 30 % - 40%
- Rendement expérimentaux : < 10 %

❏ Les photocatalyseurs

nature

[Explore content](#) ▾

[About the journal](#) ▾

[Publish with us](#) ▾

[Subscribe](#)

[nature](#) > [articles](#) > article

Article | Published: 27 May 2020

Photocatalytic water splitting with a quantum efficiency of almost unity

[Tsuyoshi Takata](#), [Junzhe Jiang](#), [Yoshihisa Sakata](#), [Mamiko Nakabayashi](#), [Naoya Shibata](#), [Vikas Nandal](#), [Kazuhiko Seki](#), [Takashi Hisatomi](#) & [Kazunari Domen](#) 

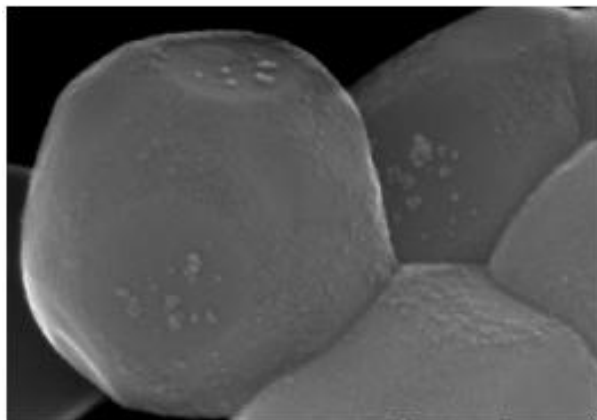
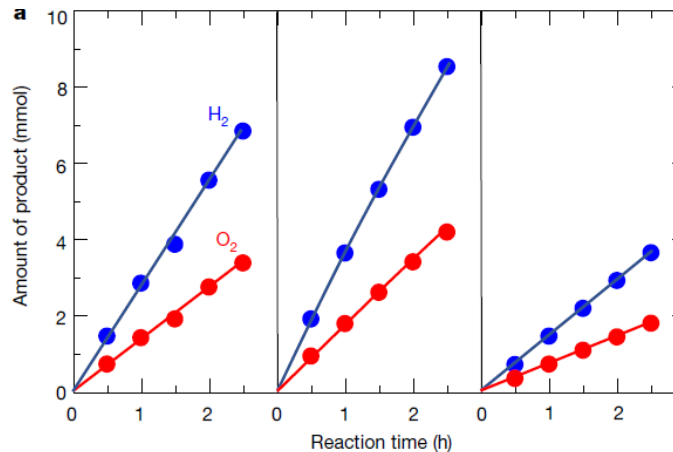
[Nature](#) **581**, 411–414 (2020) | [Cite this article](#)

113k Accesses | **2155** Citations | **279** Altmetric | [Metrics](#)

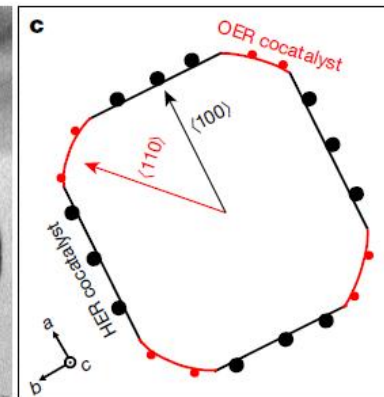
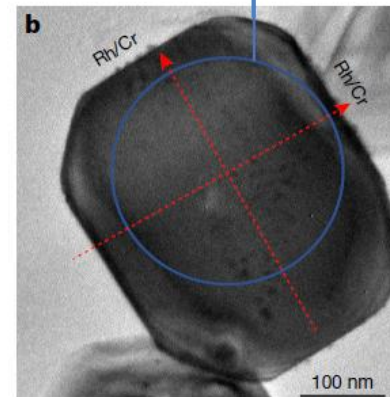
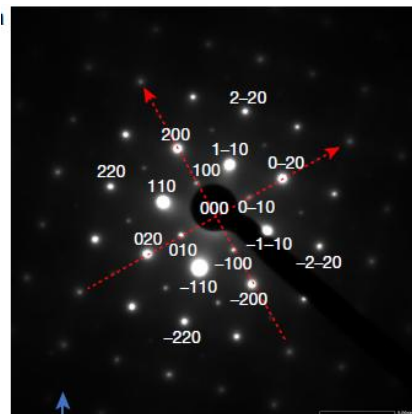
Production d'Hydrogène vert

☐ Les photocatalyseurs performants

- Catalyseur : Aluminium dopé par du titanate de strontium ($\text{SrTiO}_3:\text{Al}$)
- Co-catalyseur : $\text{Rh}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ & CoOOH



200 nm

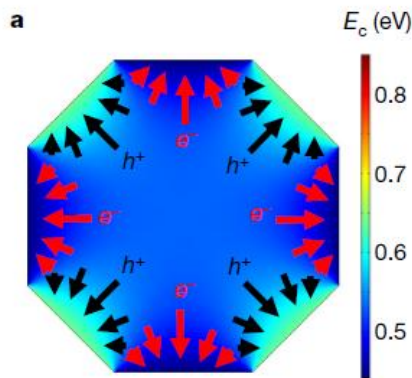


Production d'Hydrogène vert

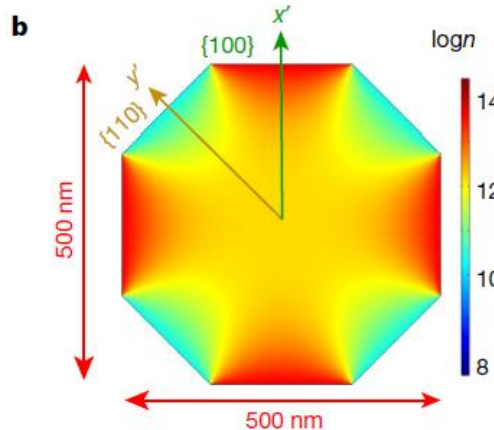
☐ Les photocatalyseurs performants

- Catalyseur : Aluminium dopé par du titanate de strontium ($\text{SrTiO}_3:\text{Al}$)
- Co-catalyseur : $\text{Rh}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ & CoOOH
- Simulations de la distribution des porteurs de charges dans les particules de $\text{SrTiO}_3:\text{Al}$ dopées

Cartographie de E_c (BC)



Densité des e^- (n)



Densité des trous h^+ (p)

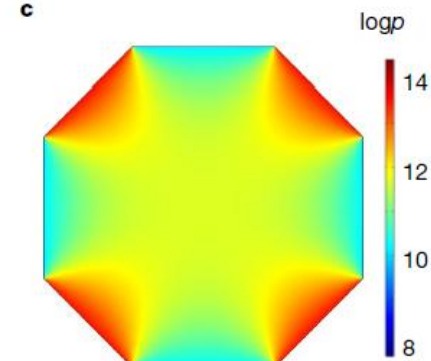
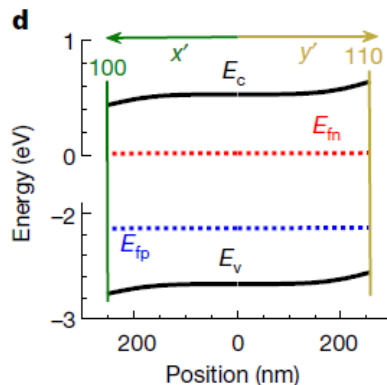
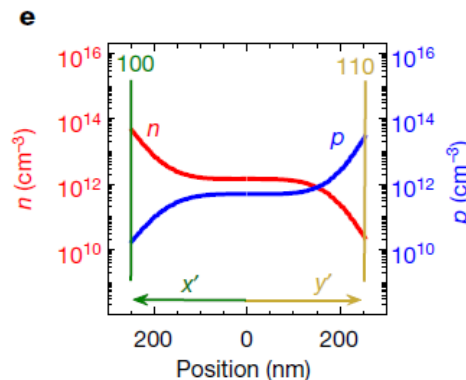


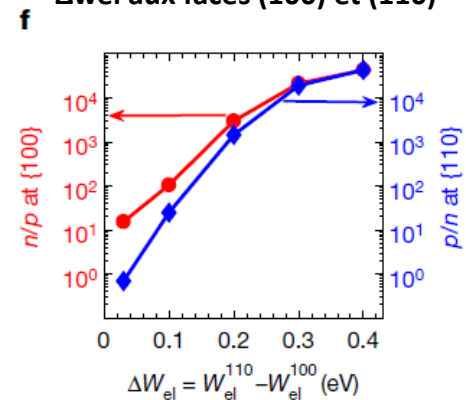
Diagramme des bandes d'énergie



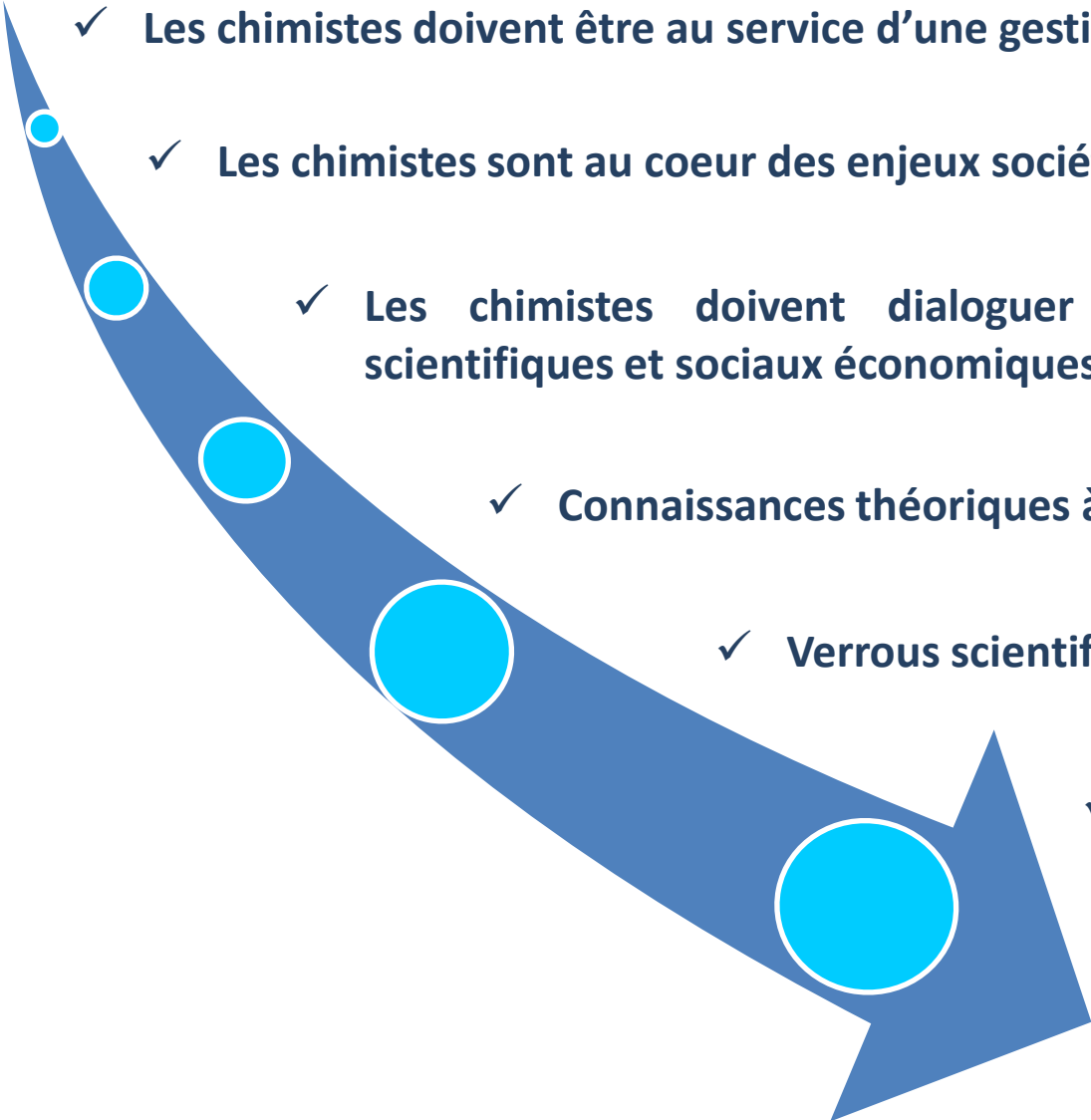
Densités des e^- (n) et h^+ (p)



Rapport n/p en fonction de la différence ΔW_{el} aux faces (100) et (110)



Conclusions & Perspectives

- 
- ✓ Les chimistes doivent être au service d'une gestion plus durable de la ressource
 - ✓ Les chimistes sont au coeur des enjeux sociétaux sur l'eau
 - ✓ Les chimistes doivent dialoguer avec les différents acteurs scientifiques et sociaux économiques
 - ✓ Connaissances théoriques à approfondir
 - ✓ Verrous scientifiques et technologiques à lever
 - ✓ Apport des nouveaux outils numériques et de l'IA en question

La chimie de l'eau – Enjeux scientifiques et sociétaux



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Barrage des 3 Gorges – Rivière Yangtse - Chine



Barrage Itaipu – Rivière Parana – Brésil / Paraguay

