

Eric Bausson

I. GÉRER ET RÉDUIRE LES MICROPOLLUANTS DANS LES MILIEUX AQUATIQUES

Parties des programmes de physique-chimie associées

Programme de physique-chimie de	Parties
Première STI2D	Matière et matériaux
Première STL	Constitution de la matière / Transformation chimique de la matière
Terminale STL	Chimie et développement durable
Seconde, première générale et terminale générale	Constitution et transformations de la matière

MOTS-CLÉS :

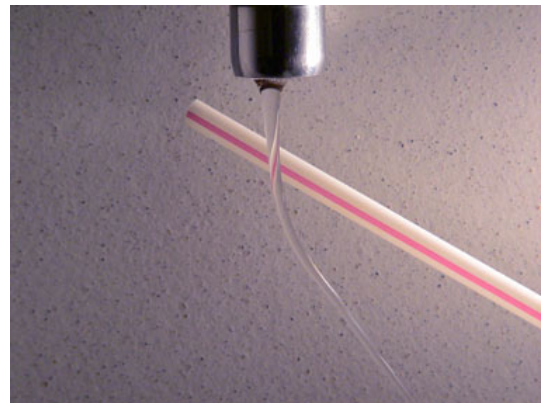
eau, micropolluants, cinétique, temps de demi-réaction

ANGLE CHOISI :

À travers l'utilisation de documents de nature diverse, issus du site Media-chimie, le lecteur prendra conscience, si ce n'est pas déjà le cas, de la richesse de ce site et pourra poursuivre sa quête d'informations sur les micropolluants.

A. Introduction

La formule brute « H_2O » de la molécule d'eau est connue de tous. Au fur et à mesure de sa scolarité, tout élève peut prendre conscience des propriétés physico-chimiques de l'eau, parfois étonnantes. Parmi celles-ci, la déviation électrostatique d'un filet d'eau avec un objet électrisé montre la polarité des molécules d'eau, permettant d'expliquer la dissolution d'ions en solution aqueuse. C'est vertigineux quand on prend conscience du nombre de molécules d'eau déviées simultanément! Mais depuis quelques décennies, cette eau contient des micropolluants, d'origine anthropique. Parmi eux, certains sont dangereux et d'autres, après analyses des eaux usées, nous apportent des informations pertinentes sur la santé de la population.



Déviation d'un filet d'eau avec une paille électrisée © Sciences - Univ. Nantes

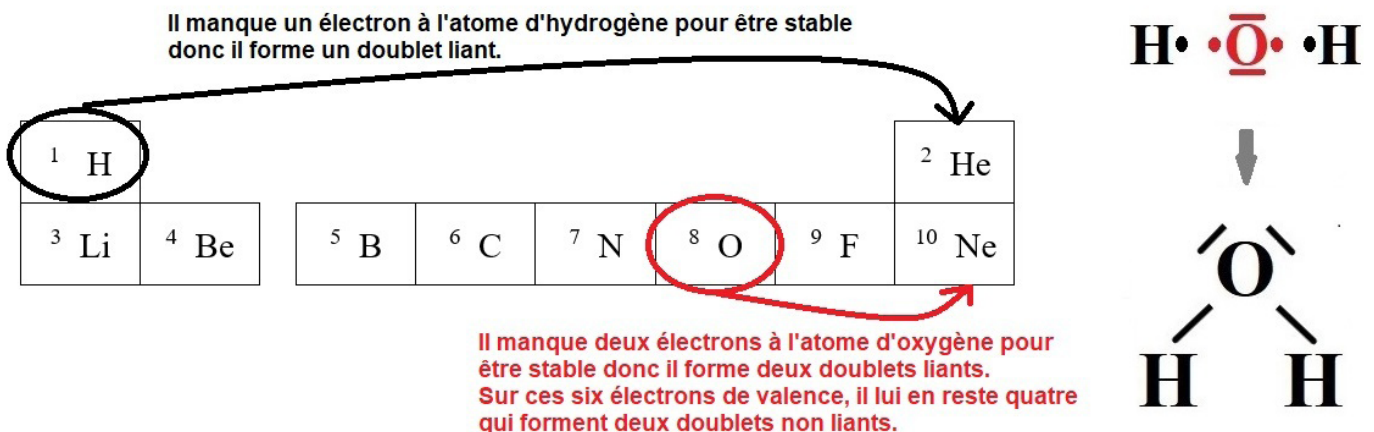
Nous allons aborder tous ces sujets dans ce dossier pédagogique.

B. La molécule d'eau

Pour devenir stable, un atome adopte la configuration électronique du gaz noble le plus proche (He, Ne, etc.). Dans une molécule formée d'atomes, le nombre de doublets liants formés par chaque atome est déterminé par le nombre d'électrons manquants sur sa couche de valence, un doublet liant étant la mise en commun de deux électrons. Les électrons restants de la couche de valence se regroupent par paire pour former un doublet non-liant sur l'atome.

Une molécule d'eau est formée d'un atome central d'oxygène (O) ayant six électrons sur sa couche de valence et de deux atomes d'hydrogène (H) ayant chacun un électron sur sa couche de valence.

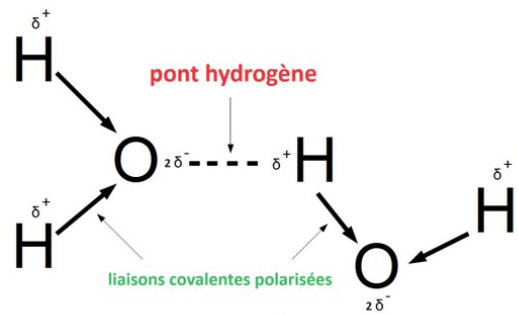
Il est possible, à partir du tableau périodique de Mendeleïev, d'établir la répartition des électrons concernés par les doublets dans une molécule d'eau :



La molécule d'eau est coudée car il y a au total 4 doublets, 2 liants et 2 non liants sur l'atome O. Donc O est au centre d'un tétraèdre (comme C dans CH_4), les deux doublets non liants sont dans un plan perpendiculaire au plan des deux doublets liants. Si tous les doublets étaient équivalents l'angle serait de 109° . Le fait que les doublets non liants se repoussent entre eux plus que les liants entre eux, engendre que l'angle réel entre les liaisons OH est de 105° tandis que les doublets non liants font entre eux un angle de 115° .

Au sein d'une molécule d'eau, les deux électrons participant à chaque doublet liant (liaison covalente polarisée) sont plus attirés par l'atome d'oxygène car il est plus électronégatif que l'atome d'hydrogène.

C'est pour cette raison que la liaison O - H est polarisée. Du fait de la géométrie de la molécule d'eau, les barycentres des charges partielles positives et négatives ne sont pas confondus donc les molécules d'eau ont toutes une polarité électrique qui engendre des ponts hydrogène entre elles.



La polarité des molécules d'eau est en accord avec la déviation du filet d'eau abordé en introduction. Si l'objet est électrisé positivement, toutes les molécules d'eau présentent donc leurs atomes d'oxygène chargés partiellement négativement ce qui a pour effet de déplacer le filet d'eau vers la paille. À l'inverse, s'il s'agit d'un objet électrisé négativement, ce sont les atomes d'hydrogène de la molécule d'eau qui sont attirés. On observe donc la même déviation du filet d'eau.

La polarité de la molécule d'eau explique aussi la dissolution de solides ioniques ou moléculaires, avec des interactions de nature différente.

Activité 1

Lorsque l'eau est le solvant, comment peut-on expliquer la dissolution dans l'eau d'un soluté suivant sa nature ? (Au moins une bonne proposition par question.)

1 Si le soluté est initialement du bromure de sodium, un solide ionique composé d'ions sodium (Na^+) et d'ions bromure (Br^-), il s'agit :

- d'interactions électrostatiques.
- de liaisons de Van der Waals (entre des charges partielles intramoléculaires).
- de ponts hydrogène.

2 Si le soluté est initialement du phénol, solide moléculaire polaire contenant un groupement -OH, il s'agit :

- d'interactions électrostatiques.
- de liaisons de Van der Waals (entre des charges partielles intramoléculaires).
- de ponts hydrogène.

C. Les micropolluants dans l'eau

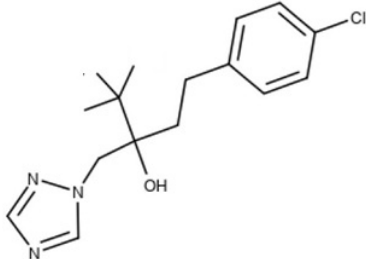



Les micropolluants ont une origine industrielle. On retrouve ces molécules dans notre environnement (air, sol, eau) et toutes celles issues ensuite de leur dégradation dans la nature. Ils sont présents et sont (très) dangereux à de très faibles concentrations (pouvant être inférieures à un microgramme par litre) pour notre santé et notre écosystème.

Certains de ces composés sont abordés dans la conférence [Les micropolluants : méthodologies pour mieux les explorer dans les rejets et les milieux aquatiques](#) de Mme Miège, lors du colloque [Chimie et eau](#) du 6 novembre 2024.

Parmi ces micropolluants revenons sur le tébuconazole, fongicide présent dans certains sols et sur le 1,2,4-triazole, un des produits de la dégradation naturelle du tébuconazole. Ils sont tous deux des perturbateurs endocriniens, donc suspectés de contribuer à de nombreuses pathologies chroniques ou développementales : troubles hormonaux et leurs conséquences (infertilité, puberté précoce, obésité, maladie thyroïdienne...), mais aussi malformations congénitales, cancers hormono-dépendants, et même troubles de l'immunité.

Activité 2

Voici quelques données concernant le tébuconazole et le 1,2,4-triazole, dont la norme de qualité environnementale pour l'eau potable (QS_{dw_hh}) :

	Formule topologique	Pictogrammes de sécurité	Solubilité dans l'eau (pH = 7)	QS_{dw_hh}
Tébuconazole $C_{16}H_{22}ON_3Cl$			29 mg / L	0,1 µg / L
1,2,4-triazole			700 g / L	0,1 µg / L

1 Déterminer la formule brute du 1,2,4-triazole.

.....

2 Du tébuconazole et du 1,2,4-triazole, lequel est le plus soluble dans l'eau ? Justifier.

.....

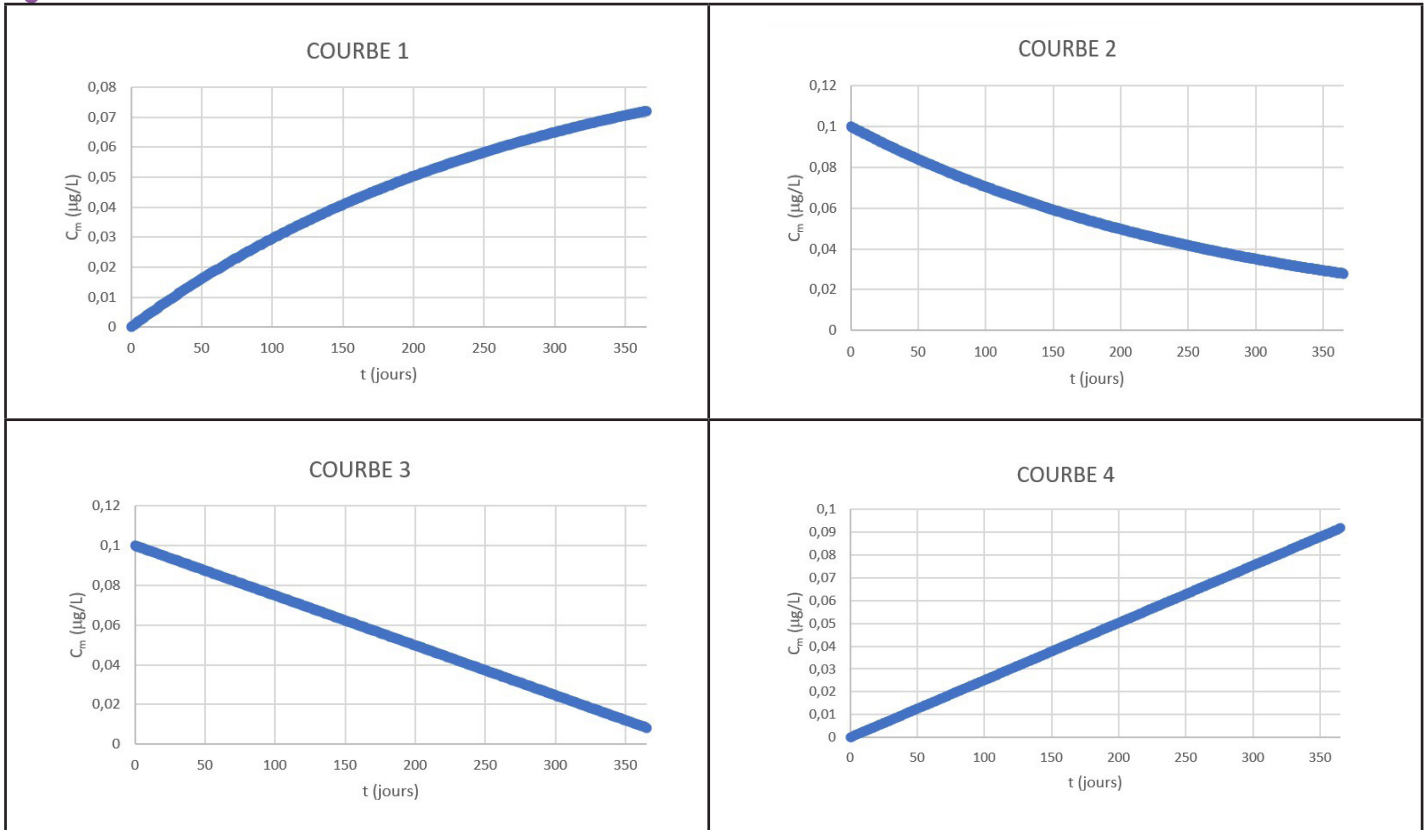
.....

.....

Activité 3 (niveau terminale)

Le temps de demi-réaction du tébuconazole est estimé à 198 jours dans les eaux douces de surface, selon une loi de vitesse d'ordre 1.

1 Laquelle des quatre courbes ci-dessous est en accord avec la loi de vitesse d'ordre 1 du tébuconazole, où C_m est sa concentration en masse évoluant au cours du temps ? Justifier.



2 Au bout de combien de jours la quantité de tébuconazole dans les eaux douces de surface est-elle divisée par quatre si celle-ci en contenait initialement 0,50 mg / L ?

.....

D. Les micropolluants dans les eaux usées

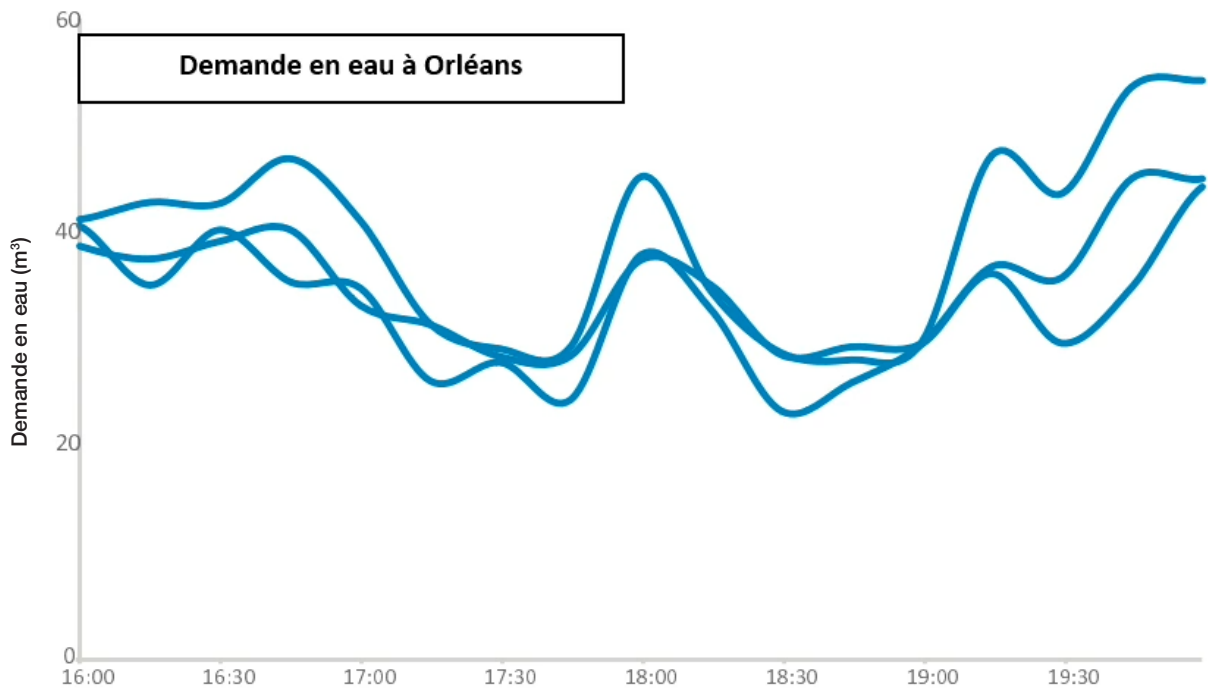
Nous allons nous intéresser ici aux micropolluants organiques, issus des excréments humaines, analysés dans les eaux usées. Ceci a été abordé dans la conférence [Les techniques analytiques pour évaluer la santé des populations par les eaux usées](#) de M. Thiebault, lors du colloque [Chimie et eau](#) du 6 novembre 2024 organisé par la Fondation de la Maison de la chimie..

N.B. : Les illustrations de cette partie sont issues de cette conférence.

Tout d’abord, la demande en eau et donc le traitement des eaux usées par la suite peuvent varier au cours du temps (y compris sur un temps court de quelques heures) comme lors d’un grand évènement télévisé suivi par des millions de personnes.

Activité 4

Un exemple sportif récent, suivi par des centaines de millions de personnes dans le monde, est celui de la finale de la coupe du monde de football remporté par l’équipe de France le 15/07/2018.



1 Analyser ces trois courbes de distribution de l’eau dans différents quartiers de la ville d’Orléans ce jour-là.

.....

.....







.....

.....

Les eaux usées ont diverses origines, domestiques, industrielles et urbaines.

Les composés chimiques présents sont de nature différente et à des concentrations variables et souvent très faibles (du nano au microgramme).

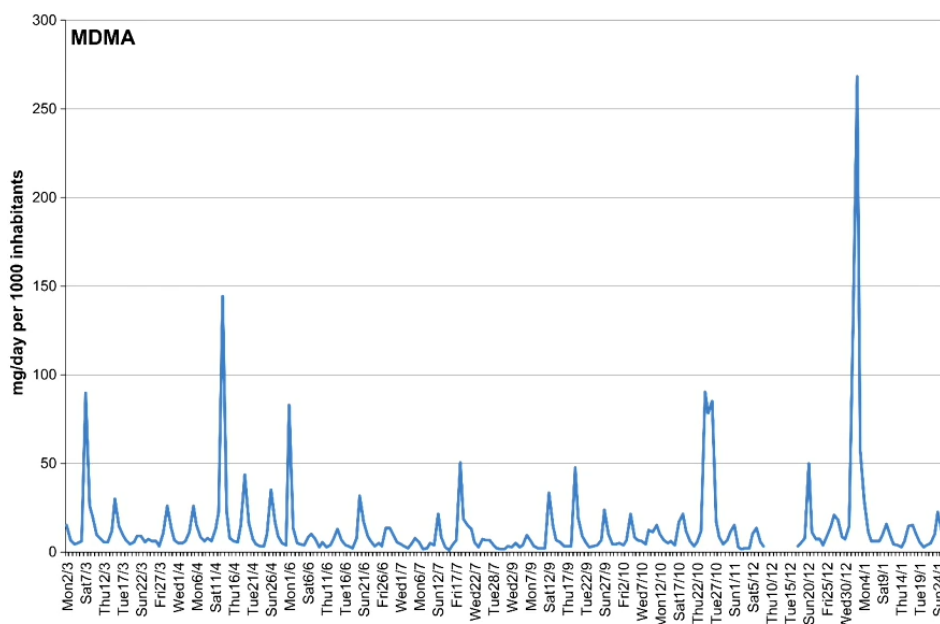
Voici des exemples de micropolluants présents dans nos eaux usées :

ORIGINES DOMESTIQUES	ORIGINES INDUSTRIELLES	ORIGINES URBAINES
 <p>TOILETTES</p>		
		

Développée à partir du début du XXI^e siècle pour estimer la consommation de substances psychoactives, licites (médicaments) ou illicites (héroïne, cocaïne, ecstasy (MDMA), cannabis, etc.), l'analyse des eaux usées a connu depuis des applications diverses.

L'analyse ciblée des eaux usées permet de connaître la concentration en masse du produit recherché, consommé par une partie de la population, souvent en très faible concentration en masse, quelques nanogrammes par litre (un nanogramme étant un milliardième de gramme). Après une série de calculs, augmentant de plus en plus l'incertitude sur le résultat publié, il est finalement possible d'estimer la masse du produit consommé par jour à l'échelle d'une population de 1 000 habitants, consommateurs ou non de ce produit.

La courbe ci-après donne l'évolution de la consommation d'ecstasy à partir de l'analyse d'eaux usées :

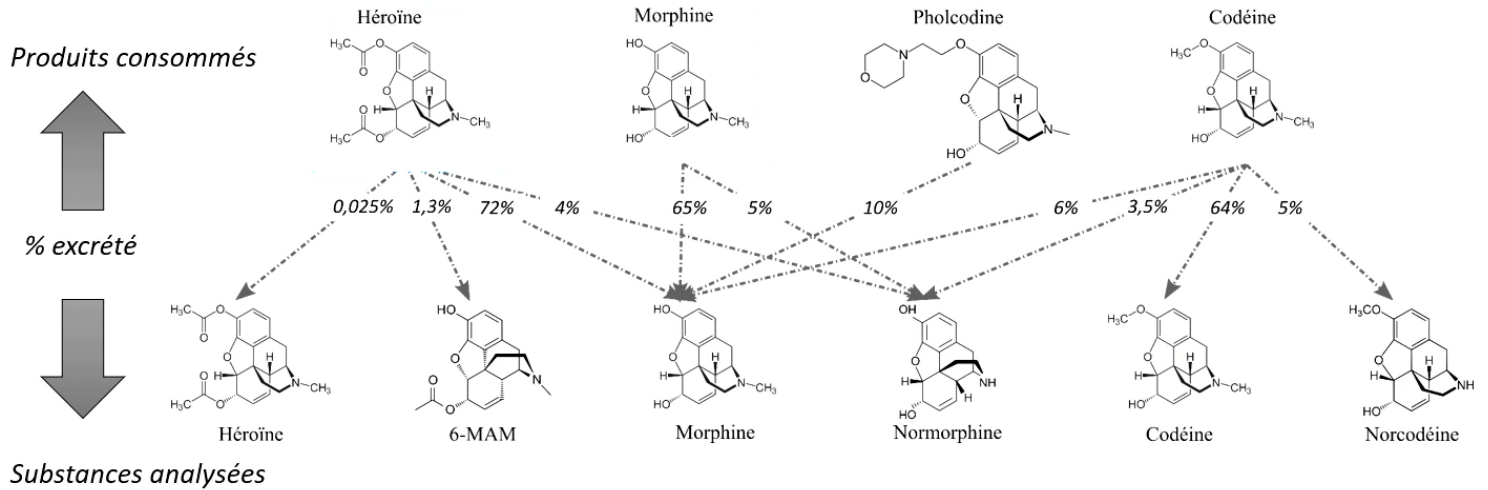


Elle confirme la consommation d'ecstasy les week-ends ou jours fériés, avec un pic lors du Nouvel an.

Activité 5

La détermination de la concentration en masse du produit recherché est difficile car rares sont les produits qui ne subissent pas de dégradations naturelles dans le corps humain ou dans les eaux usées au contact de l'eau, du dioxygène de l'air, etc.

Étudions l'illustration ci-dessous donnant les pourcentages de différentes molécules présentes dans les excréations humaines selon le produit consommé.



1 Pour déterminer uniquement la concentration en masse d'héroïne consommée, avec la meilleure précision possible, quelle molécule est-il préférable de rechercher immédiatement dans les eaux usées? Justifier.

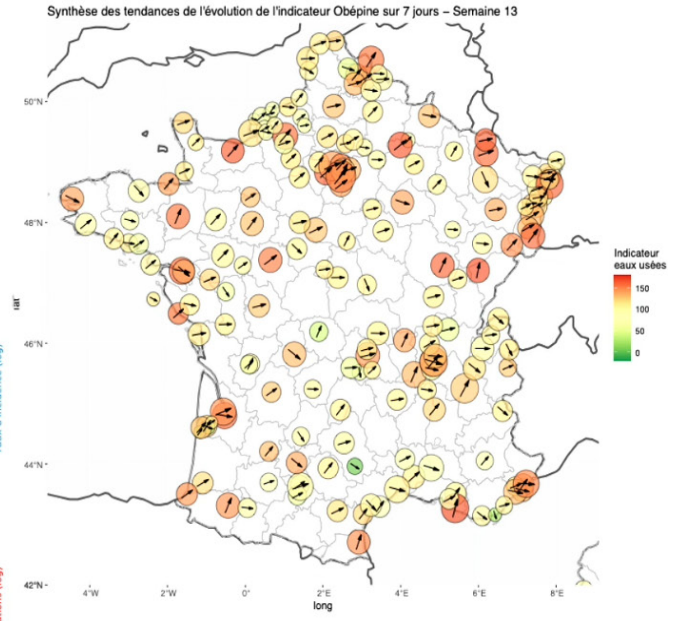
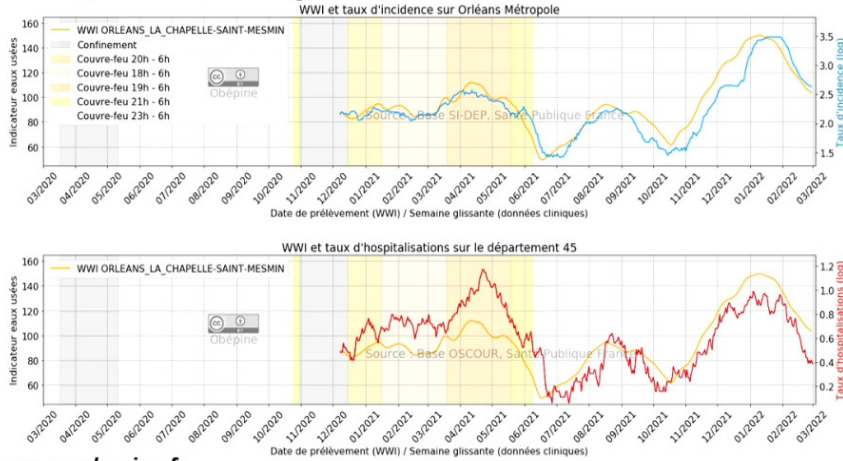
- Héroïne
- 6-MAM
- Morphine
- Normorphine

2 Quel(s) produit(s) consommé(s) serai(en)t difficilement quantifiable(s) d'après l'illustration ci-dessus? Justifier.

- Héroïne
- Morphine
- Pholcodine
- Codéine

L'essor des analyses des eaux usées a connu un tournant, celui de la COVID-19, car pour les autorités publiques, le suivi des analyses quantitatives du génome du virus « Sars-Cov-2 » a permis de connaître l'évolution de l'épidémie et de sa localisation. Pour y parvenir, des stations de traitement des eaux usées (STEU) ont été mobilisées sur l'ensemble du territoire métropolitain (réseau Obépine).

- Pour la France, réseau Obépine
- 150 STEUs suivies sur 20000, 40% de la population
- Prélèvement bi-hebdomadaire
- Quantification du génome de Sars-Cov-2



reseau-obepine.fr

E. Conclusion

L'analyse des eaux usées est un domaine en pleine expansion depuis l'an 2000 avec des applications pratiques pour la santé publique et la gestion de l'environnement. Elle offre un moyen de mieux comprendre et de surveiller les comportements sociaux et environnementaux, tout en optimisant la gestion des ressources et des infrastructures urbaines. Avec l'émergence de nouvelles technologies et méthodologies, l'avenir de l'analyse des eaux usées semble prometteur, avec un potentiel d'innovations pour répondre à des défis mondiaux croissants.

Pour en savoir plus

- Conférence Chimie et eau... du 06/11/2024 – La Maison de la Chimie.
- Dossier Chimie et eau, origines et détections de micropolluants – DGESCO / NATHAN / MAISON DE LA CHIMIE – Éric Bausson – Mediachimie.

Activité 1

1. Si le soluté est initialement du bromure de sodium, un solide ionique composé d'ions sodium (Na^+) et d'ions bromure (Br^-), il s'agit **d'interactions électrostatiques**.
2. Si le soluté est initialement du phénol, solide moléculaire polaire contenant un groupement $-\text{OH}$, il s'agit **de liaisons de Van der Waals (entre des charges partielles intramoléculaires) et de ponts hydrogène**.

Activité 2

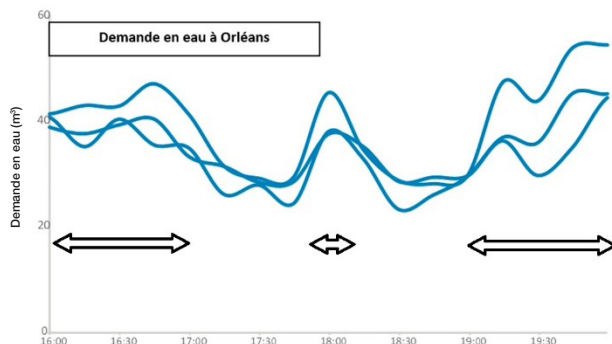
1. Le 1,2,4-triazole a pour formule brute $\text{C}_2\text{H}_3\text{N}_3$.
2. Le 1,2,4-triazole est plus soluble dans de l'eau que le tébuconazole car on peut en dissoudre 700 g par litre d'eau au lieu de 29 mg pour le tébuconazole.

Activité 3

1. Comme il s'agit d'une loi de vitesse d'ordre 1 pour un réactif, il ne peut s'agir que d'une courbe exponentielle décroissante. Il s'agit donc de la **courbe 2**.
2. Si la concentration est celle initiale divisée par quatre, alors deux temps de demi-réaction se sont écoulés, soit 396 jours.

Activité 4

1. Lors de ce match de football, la population de la ville d'Orléans, comme celle de toute la France et sans doute ailleurs en Europe ou sur d'autres continents, est allée le plus souvent aux toilettes avant et après ce match et au cours de la mi-temps. Le match a donc débuté à 17 h 00!

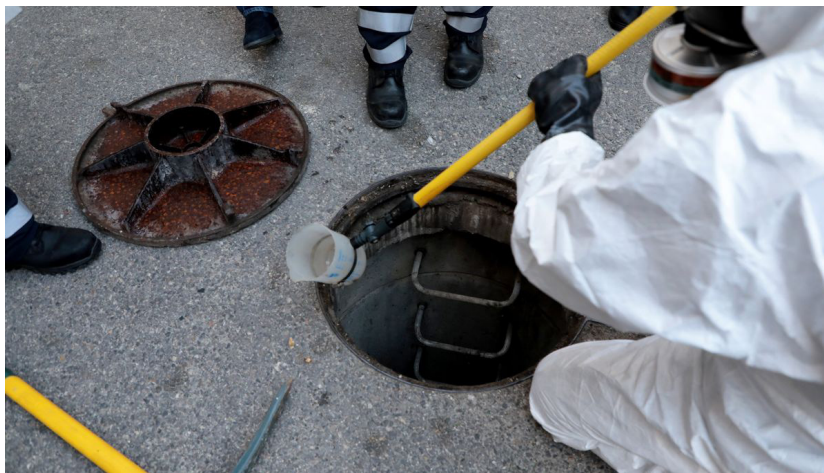


Activité 5

1. Il s'agit du 6-MAM, molécule uniquement issue de dégradations naturelles de l'héroïne dans le corps humain, présente en quantité bien supérieure à celle des traces d'héroïne. Les deux autres pouvant provenir d'autres produits consommés, on ne peut pas les choisir.
2. Il s'agit de la morphine et de la pholcodine car ils ont des produits issus de dégradations naturelles en commun avec l'héroïne et la codéine.

II. EN ROUTE VERS LE GRAND ORAL...

Parmi la multitude de questions que soulèvent ces documents du site Mediachimie, voici deux propositions avec un mini plan. L'utilisation du moteur de recherche du site Mediachimie devrait vous permettre de recenser des ressources intéressantes en lien avec la question abordée dans le cadre du Grand oral.



Analyse des eaux usées parisiennes lors de la crise COVID-19 © France bleu IdF

Question 1 : Pourquoi analyse-t-on les eaux usées ?

- A. Évaluer la pollution et la santé publique.
- B. Comprendre les comportements sociaux et les dynamiques épidémiologiques.
- C. Améliorer la gestion des ressources et le développement durable.

Question 2 : La nature peut-elle dégrader tous les micropolluants ?

- A. Quelles sont les problématiques liées aux micropolluants ?
- B. Quels sont les processus de dégradation naturelle des micropolluants ?
- C. Quels sont les facteurs influençant la dégradation naturelle des micropolluants ?
- D. Quels sont les limites et les défis de la dégradation naturelle des micropolluants ?

III. ET APRÈS LE BACCALAURÉAT ?

Partie orientation proposée et rédigée par Françoise Brénon
et Gérard Roussel (Maison de la Chimie)

Pour avoir une idée des métiers du secteur de l'eau, il faut au préalable connaître les différents traitements que l'on est amené à pratiquer.

• L'eau potable

En France, les eaux potables au sens de l'alimentation humaine proviennent à 62 % des nappes souterraines et à 38 % des eaux de surfaces (rivières, fleuves, lacs).

Le traitement de ces eaux suit globalement les étapes suivantes : pompage de l'eau, stockage provisoire d'eau brute à traiter, dégrillage puis tamisage, pré-ozonation (action de l'ozone), filtrations sur argile, post-ozonation, filtration sur charbon actif puis chloration avant acheminement via les canalisations jusqu'à l'usager final.

Dans les zones arides on obtient aussi de l'eau potable après la désalinisation de l'eau de mer.



Usine de désalinisation d'eau de mer en Espagne © La Croix

Cette technique est très peu développée en France en raison des sources naturelles de prélèvement suffisantes en qualité et en quantité. À noter toutefois que les entreprises françaises spécialisées en désalinisation font partie des leaders mondiaux.

• Les eaux usées

Les eaux usées domestiques sont les eaux ménagères (salles de bains et cuisines) chargées de détergents, de graisses, de solvants, de débris organiques... et des eaux vannes (rejets des toilettes) chargées de diverses matières organiques azotées dont des médicaments et leurs produits de transformation, et de germes fécaux. Elles sont traitées dans des stations d'épuration.

Il existe aussi des eaux usées industrielles aux contenus spécifiques qui sont traités indépendamment des eaux usées domestiques.

Les traitements des eaux usées ont pour but de les dépolluer avant de les rejeter dans la mer ou dans une rivière. Mais attention, cette eau dépolluée n'est pas potable.



Rejet d'eau d'une station d'épuration en rivière © D. Touchard

Le traitement des eaux usées suit globalement les étapes suivantes : la décantation qui permet de séparer l'eau à traiter des huiles et graisses qui surnagent et des sables et solides plus denses. Puis l'eau sale subit un traitement biologique aérobie.

Dans certaines unités, l'eau peut, avant rejet, subir une ultrafiltration membranaire. Pour en savoir plus, l'ensemble des traitements de l'eau est détaillé dans la question du mois sur le site Mediachimie :

- [Pourquoi économiser l'eau potable est-il aussi source d'économie d'énergie ?](#) par F. Brénon et O. Garreau.

• Les eaux non conventionnelles

L'eau potable est très souvent utilisée pour des usages ménagers ou industriels ne nécessitant pas un tel niveau de pureté. La pression exercée sur les ressources en eau douce conduit à envisager, dès que c'est possible, une démarche de gestion durable, la réutilisation des eaux dites non conventionnelles que sont les eaux usées traitées (REUT) mais aussi les eaux de pluie issues des toitures, les eaux pluviales issues d'un ruissellement, les eaux de piscine, les eaux d'exhaures... Ces eaux peuvent être utilisées par exemple pour l'irrigation agricole, le nettoyage des voiries, l'arrosage d'espaces verts ou dans de nombreux usages industriels.

Aujourd'hui, seules 0,6 % des eaux usées traitées sont réutilisées en France alors qu'en Italie le pourcentage est de 8 %, 14 % en Espagne et 84 % en Israël. Le plan eau 2023 en France prévoit de porter ce pourcentage à 10 % en 2030.

Un futur possible d'utilisation des eaux dépolluées avant rejet

On peut aussi envisager de les rendre à nouveau potables. Aux Sables-d'Olonne, en Vendée, vient de démarrer la construction d'une usine de recyclage des eaux usées afin d'obtenir *in fine* de l'eau potable, dans le cadre du programme « Jourdain ». Cette usine est une usine pilote pour la France et pour l'Europe.

Pour en savoir plus sur la réutilisation des eaux usées on pourra consulter les deux ressources suivantes :

- [Traitement et réutilisation des eaux usées en France : où en sommes-nous?](#) sur le site « Au cœur du débat public ».

Et pour en savoir plus sur le programme Jourdain, aller voir la vidéo et « le démonstrateur Jourdain » sur le site Vendée – eau :

- [Comprendre le programme Jourdain.](#)

A. LES MÉTIERS

Avec environ 124 000 emplois la filière française de l'eau représente un secteur économique de première importance. Les entreprises françaises de l'eau sont leaders mondiaux dans leur domaine.

Consulter la Fiche [Les chimistes dans les métiers de l'eau](#), pour avoir une vue d'ensemble des métiers de chimistes dans ce secteur économique.

L'eau du robinet est l'aliment le plus contrôlé en France ce qui engendre un très grand nombre d'analyses (28 millions par an!). Consulter la fiche [Les chimistes dans la traque à l'infiniment petit](#), pour se faire une idée des métiers de l'analyse.

Les sciences chimiques, biologiques et toxicologiques s'unissent pour rechercher, quantifier et éliminer les polluants dans les eaux destinées à la consommation.



Prélèvement avant analyse bactériologique © Phytocontrol

Il est à noter que les méthodes d'analyse, qu'elles soient physico-chimiques ou biologiques évoluent vers des détections de plus en plus fines permettant de mettre en évidence des quantités infinitésimales de l'ordre des ultra-traces. Les dernières innovations reposent sur l'évolution de la spectrométrie de masse, la chromatographie multidimensionnelle, la micro-extraction en phase solide...

Pour illustrer la recherche dans le domaine du traitement de l'eau, visionner la vidéo [L'eau au labo](#) réalisée par F. Demerliac.

Les métiers de l'eau ne concernent pas que des chimistes.

Le site web de la [fédération française des entreprises de l'eau](#) (FP2E) donne un aperçu général des différents emplois du secteur. Les tableaux ci-dessous sont extraits de ce site :

L'essentiel des métiers de l'eau



Source : FP2E

B. LES FORMATIONS

La fiche orientation [Je souhaite travailler dans le secteur du traitement de l'eau](#) avec une formation en chimie permet de se faire une idée des cursus possibles.

À l'issue d'un bac général ou technologique, on peut envisager de poursuivre des études pour sortir avec un diplôme à Bac +2 ou +3. Pour voir les cursus disponibles consulter l'entrée des parcours de formation sur Mediachimie [Bac +2/3 : vers les métiers de techniciens](#).



Technicien régulation et contrôle industriel © L'étudiant

On pourra ainsi choisir une formation aux métiers de l'eau tels qu'un BTS ou BUT parmi :

- BTS métiers de l'eau
- BTS métiers de la chimie (4 pôles principaux : analyse, synthèse, formulation et principes de QHSSE - Qualité, Hygiène + santé, Sécurité, Sûreté, Environnement)
- BTS CIRA : Contrôle Industriel et Régulation Automatique
- BTS bioanalyses et contrôles
- BUT chimie
- BUT mesures physiques (option analyse)

On peut aussi citer comme licence professionnelle la L Pro – Métiers de la protection et de la gestion de l'environnement – ou Traitement et Analyse de l'Eau et des Déchets Aqueux.

Ces formations conduisent à des métiers dont on peut découvrir les fiches descriptives ici :

- [Technicien d'analyse chimie / physico-chimie \(H/F\)](#)
- [Technicien chimiste \(H/F\)](#)
- [Technicien Contrôle industriel et régulation automatique \(H/F\)](#)

Si l'on souhaite une sortie sur le marché du travail 5 ans après le bac, consulter l'entrée des parcours de formation sur Mediachimie [Bac +5/8 : vers les métiers d'ingénieurs et de chercheurs](#). On pourra choisir une formation telles qu'une école d'ingénieur en chimie ou un master chimie avec une spécialisation en analyse ou contrôle et qualité.

Ces formations permettront de conduire à des métiers comme ceux décrits par les fiches suivantes :

- [Responsable de laboratoire d'analyses / contrôle qualité \(H/F\)](#)
- [Ingénieur chimiste](#)
- [Responsable Assurance Qualité \(H/F\)](#)

Les procédés de purification font appel de plus en plus à des membranes de filtration. La création de ces matériaux fait aussi appel au savoir-faire des chimistes spécialistes des matériaux qu'ils soient [ingénieurs matériaux](#) ou [techniciens matériaux](#).

Pour en savoir plus sur des exemples d'applications ou de recherche liés à l'eau, on pourra consulter les ressources suivantes sur le site Mediachimie :

- [Préserver la ressource eau – Exemple de la Chimie](#)
- [Des stations d'épuration toujours plus performantes pour réutiliser les eaux](#)
- [Micropolluants chimiques dans l'environnement](#)
- [Les micropolluants dans les écosystèmes aquatiques : enjeux de la directive eau](#)