



Co-funded by
the European Union



Renforcer les communautés grâce à la *Citizen Science*

**Outils pour surveiller l'impact de l'industrie
fossile et promouvoir le changement**



Illustrations by Storyset



Co-funded by
the European Union

ERICA – Surveillance environnementale par l'engagement citoyen

Le projet ERICA est une collaboration entre l'Université Erasmus de Rotterdam, l'Université de Barcelone, l'Université Adam Mickiewicz, Source International, l'Association Européenne pour la Démocratie Locale (ALDA), Cova Contro et Social IT. Ce projet a bénéficié d'un financement dans le cadre du programme Erasmus+ de l'Union européenne en 2023, sous la convention de subvention n° 2023-1-NL01-KA220-ADU-000154929.

Publié en ligne en mai 2025.

Coordination et édition : Rachele Ossola (Source International).

Rédaction : Eleonora Tassan, Michele Maistrelli et Rosalia Giuga (Social IT).

Auteurs : Rachele Ossola, Diana Alonso, Flaviano Bianchini, Karolina Dziubata-Smykowska, Laura Grassi, Marek Jaskólski, Aleksandra Lis-Plesińska, Clara Masetti, Gorka Muñoa, Martí Orta-Martínez, Lina Pita, Lorenzo Pellegrini, Neus Roig, Giorgio Santoriello et Francesca Savoldi.

Révision : Alice Lazzarin, Alessia Marzotto et tous les auteurs.

Revisionato da Alice Lazzarin, Alessia Marzotto e tutti gli autori.

Traduction : Nicola Matteo Di Landa (ALDA).

Ce document doit être cité comme suit: R. Ossola, D. Alonso, F. Bianchini, K. Dziubata-Smykowska, L. Grassi, M. Jaskólski, A. Lis-Plesińska, C. Masetti, G. Muñoa, M. Orta-Martínez, L. Pita, L. Pellegrini, N. Roig, G. Santoriello et F. Savoldi (2024), *Donner du pouvoir aux communautés grâce à la Citizen Science – Outils pour surveiller l'impact de l'industrie fossile et promouvoir le changement*. Projet ERICA, <https://www.ericaproject.eu/>

Ce document est disponible en ligne à l'adresse suivante
: <https://www.ericaproject.eu/project/#ebooklet>

Toutes les illustrations ont été créées par Rachele Ossola, Eleonora Tassan, Michele Maistrelli et Rosalia Giuga et peuvent être réutilisées avec la mention appropriée.

Ce projet a reçu un financement du programme Erasmus+ 2023 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention n° 2023-1-NL01-KA220-ADU-000154929. Financé par l'Union européenne. Les points de vue et avis exprimés n'engagent toutefois que leur(s) auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'Union européenne ou de l'Agence exécutive européenne pour l'éducation et la culture (EACEA). Ni l'Union européenne ni l'EACEA ne sauraient en être tenues pour responsables.



Index

Index	1
1. Introduction	3
2. Que sont les combustibles fossiles et comment sont-ils extraits? 7	
2.1. Que sont les combustibles fossiles?	8
2.2 Pétrole et gaz – Extraction et transformation	11
2.2.1 Extraction	11
2.2.2 Transformation du pétrole – Raffinage	12
2.2.3 Transformation du pétrole – Usines pétrochimiques	14
2.3 Charbon – Extraction et transformation	14
3. Quel est l’impact environnemental de l’industrie des combustibles fossiles?	15
3.1 Quels sont les polluants émis par les industries des combustibles fossiles?	17
3.1.1. Vue d’ensemble par matrice environnementale	17
3.1.2. Vue d’ensemble par type de combustible fossile et phase du processus	21
3.2 Quelle est la dangerosité de ces substances?	26
3.2.1 Effets sur la santé humaine – À quels polluants devons-nous faire attention?	27
3.2.2 Normes et lignes directrices de qualité environnementale : de quelles concentrations devons-nous nous inquiéter ?	31
4. Quels sont les outils que les citoyens peuvent utiliser pour surveiller la santé de leur environnement ?	37
4.1 Outils pour la surveillance de l’air	41
4.1.1 Échantillonneurs commerciaux à bas et moyen coût	41
4.1.2 Échantillonneurs fait maison	42
4.1.3 Échantillonneurs commerciaux et fait maison	43
4.1.4 Autres approches	45
4.2 Outils pour la surveillance de l’eau	47



4.2.1 Kits commerciaux à bas coût	47
4.2.2 Échantillonneurs commerciaux à bas coût	48
4.2.3 Autres approches	48
5. Comment utiliser les données pour stimuler un changement	50
5.1 Qu'est-ce que l' " <i>actionable knowledge</i> " ?	51
5.2 Comment activer les données environnementales pour créer un changement?	53
6. Quelques exemples inspirants en Europe et dans le monde	56
6.1 Le complexe pétrochimique de Tarragone	59
6.1.1 Le problème	59
6.1.2 Les initiatives	59
6.1.3 Les résultats	60
6.2 La raffinerie Sarlux	61
6.2.1 Le problème	62
6.2.2 L'initiative	62
6.2.3 Les résultats	63
6.3 Extraction de charbon en Pologne	64
6.3.1 Le problème	64
6.3.2 L'initiative et les résultats attendus	65
6.4 Exemples vertueux hors d'Europe	66
6.4.1 Interdiction du torchage du gaz en Équateur	66
6.4.2 Amélioration des pratiques d'extraction du charbon au Myanmar	68
7. Références sélectionnées et lectures recommandées	71
Section 2	1
Section 3	1
Section 4	2
Section 5	3
Section 6	4



Illustrations by Storyset

1. Introduction



L'industrie des combustibles fossiles est devenue de plus en plus centrale pour l'équilibre géopolitique et le mode de vie moderne : nous avons besoin de gaz naturel pour chauffer nos maisons, d'essence pour conduire nos voitures et de plastique pour presque tout. Malgré les progrès significatifs réalisés au cours des dernières décennies en matière de législation environnementale et de techniques industrielles, l'extraction et la transformation du pétrole, du gaz et du charbon restent des activités hautement polluantes, même dans les pays développés. Les communautés vivant à proximité des installations de combustibles fossiles – qu'il s'agisse des régions les plus reculées de l'Amazonie équatorienne ou des ports les plus fréquentés d'Europe – doivent supporter des nuisances olfactives, la dégradation de l'environnement, des problèmes de santé et des impacts sociaux majeurs.

Au cours des deux dernières décennies, la science participative (ou citizen science) s'est imposée comme un outil puissant pour collecter des données scientifiques tout en éduquant et responsabilisant les participants. La science participative implique des citoyens ordinaires dans la définition des objectifs du projet, la collecte et l'analyse des données ainsi que dans la diffusion des résultats – différents niveaux d'implication existent, adaptés au temps, aux intérêts et aux besoins des participants. Cette approche participative a déjà été utilisée par des milliers de communautés pour recueillir des preuves indépendantes sur la dégradation environnementale, soutenir des campagnes citoyennes, dialoguer avec les décideurs politiques et institutionnels, lancer des recherches académiques et sensibiliser la société locale.

Dans ce contexte, [ERICA](#) – Environmental monitoring through Civic engagement – vise à former les citoyens vivant à proximité des industries de combustibles fossiles, afin de leur permettre de réaliser une surveillance environnementale indépendante et d'utiliser ces



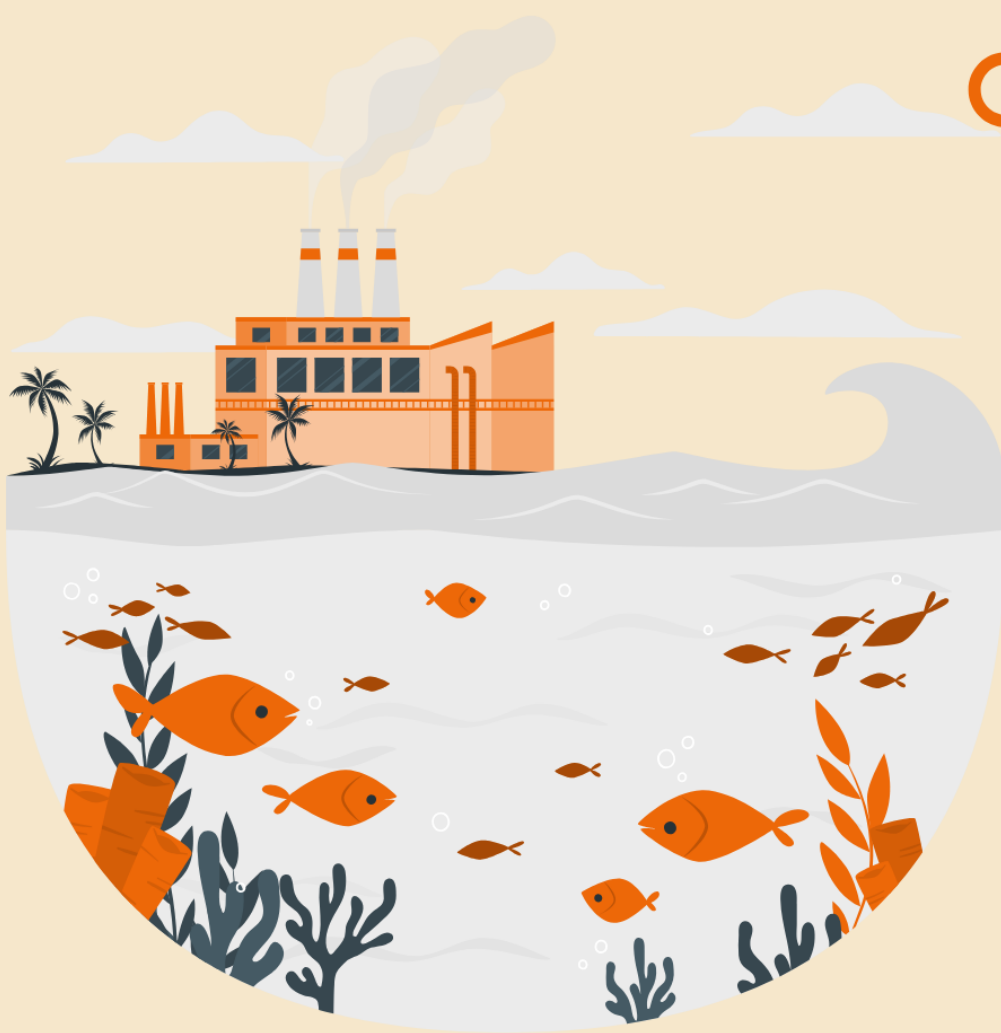
informations pour générer un changement positif. Ce projet ERASMUS+ implique des institutions académiques ([Erasmus University Rotterdam](#), [Université de Barcellona](#), [Université Adam Mickiewicz](#)), des ONG et organisations de la société civile ([Cova Contro](#), [Source International](#), [L'Association Européenne pour la Démocratie Locale \(ALDA\)](#)), des partenaires techniques ([Social IT](#)) et des groupes d'intérêt dans les sites pilotes de Tarragone (Espagne), Val d'Agri (Italie) et la région minière de Konin (Pologne). Actif de novembre 2023 à novembre 2026, le projet produira des ressources éducatives gratuites sur la surveillance participative, en appliquant divers outils dans des initiatives de science participative dans ces trois sites pilotes.

Ce livret électronique – premier résultat du projet – rassemble des outils et bonnes pratiques pour mener des initiatives de science participative maximisant le changement social, en se concentrant sur l'extraction et la transformation du gaz naturel, du pétrole et du charbon en Europe. Cette publication est le fruit d'une revue approfondie de la littérature menée par les partenaires au cours de la première année du projet et constitue le point de départ pour le développement de la méthodologie de formation et de la plateforme d'apprentissage en ligne ERICA.

Le livret est structuré en sept parties. Après l'introduction, la [Section 2](#) fournit des informations de base sur les combustibles fossiles – ce qu'ils sont et comment ils sont transformés. La [Section 3](#) analyse les principaux polluants émis lors de leur extraction et transformation, les impacts sur la santé humaine et l'environnement, ainsi que la législation européenne et les lignes directrices existantes pour nous protéger. La [Section 4](#) présente un aperçu des outils et technologies à faible coût adaptés aux initiatives de science participative visant à mesurer les impacts environnementaux des industries des combustibles fossiles. La [Section 5](#) décrit les bonnes pratiques pour maximiser la quantité de connaissances exploitables (« actionable



knowledge ») produites dans les projets de science participative. Enfin, la [Section 6](#) présente des exemples vertueux de projets menés ou en cours dans des communautés affectées par l'exploitation des combustibles fossiles. Les publications, les livres et les sites web les plus pertinents ayant servi de sources sont intégrés sous forme de liens hypertextes ou listés dans la [Section 7](#).



Illustrations by Storyset



2. Que sont les combustibles fossiles et comment sont-ils extraits ?



Cette section offre une vue d'ensemble des concepts fondamentaux relatifs au pétrole, au gaz et au charbon : ce qu'ils sont, comment ils se forment et comment ils sont transformés à l'échelle industrielle. Au-delà de fournir des connaissances de base, ces informations aident à comprendre les impacts environnementaux associés à chaque étape du traitement – et expliquent pourquoi, par exemple, les habitants vivant autour du complexe pétrochimique de Tarragone s'inquiètent des émissions de 1,3-butadiène ([Section 6.1](#)), tandis que la conductivité de l'eau fluviale constitue la principale préoccupation des citoyens de la région minière de Haute-Silésie ([Section 6.3](#)). Les références bibliographiques de ce chapitre se trouvent dans la [Section 7](#).

2.1. Que sont les combustibles fossiles ?

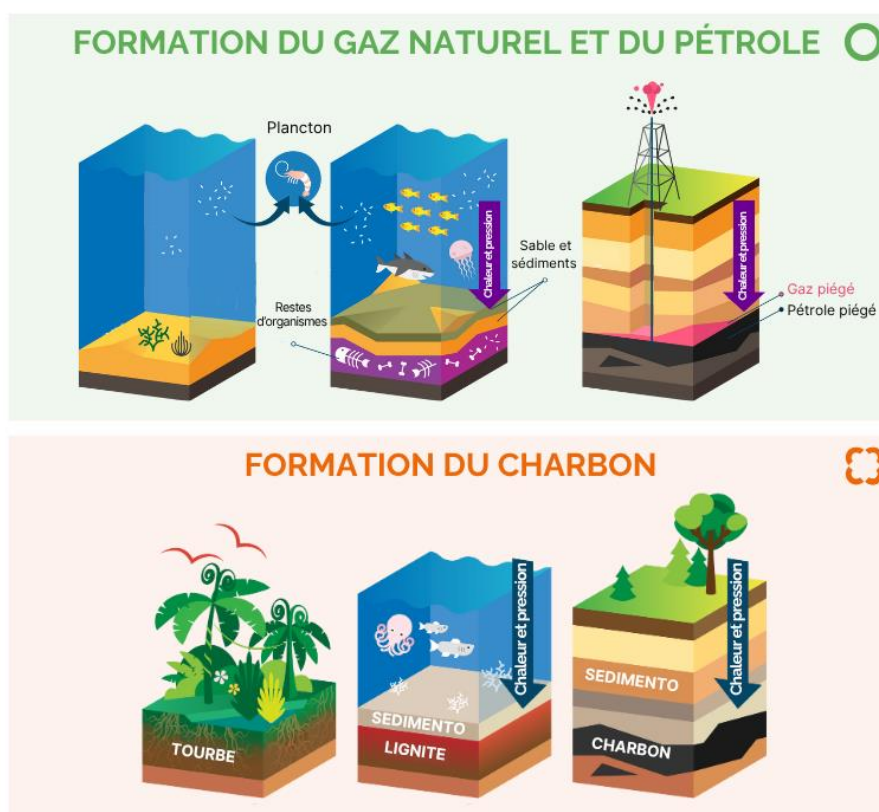
Les combustibles fossiles sont des matériaux riches en carbone qui s'accumulent dans le sous-sol à travers le processus géologique de décomposition des organismes morts. Selon le type d'organismes et les conditions de transformation, les combustibles fossiles se présentent sous forme gazeuse, liquide ou solide, et sont respectivement connus sous les noms de gaz naturel, pétrole et charbon. Bien que leur composition chimique puisse varier de manière significative, ces substances contiennent toutes du carbone (ainsi que de l'hydrogène, du soufre, de l'oxygène et de l'azote) et libèrent de la chaleur lorsqu'elles sont brûlées.

Le gaz naturel et le pétrole se forment généralement ensemble, même si dans un gisement donné, l'un des deux prédomine souvent. Tous deux ont pour origine le plancton qui peuplait les mers chaudes et peu profondes il y a des millions d'années. Après leur mort, le plancton s'est déposé sur le fond océanique et a été progressivement recouvert de sédiments. Au fil du temps, la chaleur et la pression ont transformé ces dépôts d'abord en kérogène, puis en pétrole. Le



pétrole migre lentement à l'intérieur des roches poreuses jusqu'à être piégé par des couches imperméables, formant ainsi un gisement (Figure 1, en haut). Les gisements ont toujours une composition hétérogène et comprennent à la fois du gaz (par exemple, du méthane) et des liquides (hydrocarbures et eau). Comme nous le verrons plus loin ([Section 2.2.1](#)), l'eau présente dans les gisements constitue l'un des principaux déchets du processus d'extraction du pétrole.

Le **charbon** s'est formé dans les forêts marécageuses durant la période du Carbonifère, il y a entre 300 et 350 millions d'années. Des arbres morts sont tombés dans les marais, où le manque d'oxygène a empêché leur décomposition. Avec le temps, ces arbres se sont transformés d'abord en tourbe, puis en différentes catégories de charbon : lignite, charbon sub-bitumineux, charbon bitumineux et anthracite (Figure 1, en bas). Outre le carbone, le charbon contient également du soufre, dont la teneur est un facteur crucial tant pour le processus de transformation que pour son impact environnemental. Le charbon contient aussi de petites quantités de méthane et d'autres composés organiques volatils, qui sont libérés dans l'atmosphère lors du processus d'extraction.



Source: <https://www.yaclass.in/p/science-cbse/class-8/coal-and-petroleum-18085/different-types-of-natural-resources-4963/re-5b0f4cd9-5f99-4128-98d4-5dcace8dfc25>

Figure 1 – Schéma de la formation du gaz naturel, du pétrole et du charbon



2.2 Pétrole et gaz – Extraction et transformation

2.2.1 Extraction

Après la découverte d'un gisement pétrolier, les ingénieurs forent un premier puits afin d'évaluer la qualité et la quantité des hydrocarbures présents. Si les résultats sont favorables, une installation d'extraction est construite, c'est-à-dire une série de puits conçus pour extraire efficacement le pétrole (ou le gaz). Le fonctionnement de l'installation dépend de la composition du mélange d'hydrocarbures et de la phase d'extraction.

Lors de la phase initiale d'extraction, la haute pression souterraine pousse naturellement le gaz et le pétrole vers la surface. Cette méthode permet d'extraire jusqu'à 90 % du gaz naturel et 30 % du pétrole initialement présents dans le gisement. Lors de la deuxième phase, du gaz et de l'eau sont injectés dans les puits pour récupérer 10 à 15 % supplémentaires du pétrole total. La dernière phase utilise des émulsions et solvants chimiques, pompés dans le sous-sol pour extraire encore 10 à 15 % du pétrole initial.

Une fois extrait, le matériau brut est stabilisé puis envoyé à une raffinerie par oléoducs ou par voie maritime. Le processus de stabilisation comprend la séparation des liquides du gaz, suivie de l'élimination de l'eau (déshydratation), du sulfure d'hydrogène (désulfuration) et des sels (désalinisation). Le gaz extrait contient du méthane et des hydrocarbures légers, pouvant être traités pour la vente ou éliminés par **combustion en torchère** (voir Encadré 1). La déshydratation produit des **eaux usées** riches en sels, hydrocarbures, métaux lourds, radionucléides et, si issues de la troisième phase d'extraction, en solvants organiques et émulsifiants. Ces eaux usées sont traitées puis généralement réinjectées dans le sous-sol.



Encadré 1. La combustion en torchère (gas flaring) et ses impacts environnementaux

La combustion en torchère, ou *gas flaring* en anglais, est une pratique controversée consistant à brûler le gaz libéré lors de l'extraction du pétrole au lieu de le traiter ou de le transporter. Cela s'explique par le fait que toutes les entreprises ne disposent pas des infrastructures nécessaires pour traiter les gaz toujours présents dans les gisements avec les hydrocarbures liquides (Figure 1, en haut). De manière contrôlée, toutes les installations d'extraction utilisent la combustion en torchère (ou le dégazage) comme mesure de sécurité pour éviter des accumulations dangereuses de pression. La combustion en torchère transforme le gaz résiduaire en CO₂, contribuant à environ 1 % du réchauffement climatique. Cependant, rejeter le gaz sans le brûler est encore pire : le méthane, principal gaz présent dans les gisements, est un gaz à effet de serre bien plus puissant que le CO₂. La combustion en torchère émet également des polluants tels que le carbone noir (black carbon, composant des particules atmosphérique) et le dioxyde de soufre, dégradant la qualité de l'air et contribuant à l'acidification des sols et des eaux. Enfin, cette pratique constitue un gaspillage de ressources naturelles : les 150 milliards de m³ de gaz brûlés chaque année pourraient couvrir les besoins énergétiques de tout le continent africain. En 2015, la Banque mondiale a lancé un engagement pour éliminer totalement cette pratique d'ici 2030, mais les efforts restent insuffisants à ce jour.

2.2.2 Transformation du pétrole – Raffinage

Après extraction et prétraitement, le pétrole brut est envoyé aux raffineries où il est transformé en une grande variété de produits. Le processus de raffinage commence par le chauffage du brut jusqu'à 400



°C à la base d'une tour de distillation (Figure 2). Au fur et à mesure que le pétrole chauffe, ses composants s'évaporent et montent dans la tour. Lorsqu'ils atteignent une hauteur correspondant à leur température de condensation, ils se refroidissent et sont collectés. Ce processus, appelé fractionnement des hydrocarbures, sépare les groupes d'hydrocarbures selon leur point d'ébullition, une propriété dépendant du nombre d'atomes de carbone. Les hydrocarbures légers, comme le propène et le butène, sont récupérés sous forme gazeuse en haut de la tour, tandis que les plus lourds restent en bas et sont ensuite séparés en carburants, lubrifiants et autres produits. Après fractionnement, toutes les fractions subissent des traitements chimiques supplémentaires tels que le craquage, l'alkylation et le reformage, qui modifient leur composition chimique pour les rendre utilisables.

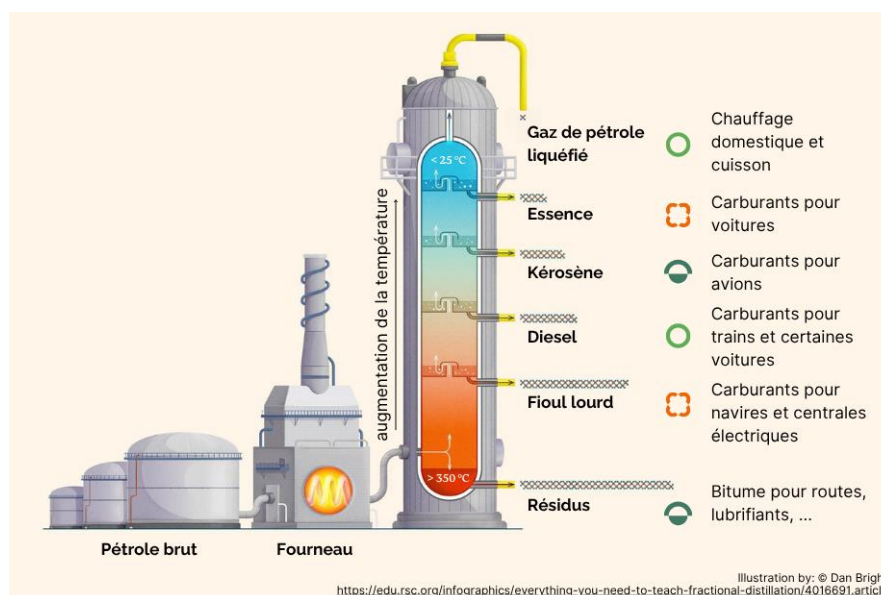


Figure 2 – Fractionnement du pétrole brut dans une tour de raffinage. Les différentes fractions sont collectées puis transformées en carburants, matières premières et autres produits d'usage courant.

Le raffinage du pétrole brut étant très énergivore, les raffineries disposent généralement de **centrales électriques** internes fonctionnant aux combustibles liquides et gazeux ainsi qu'aux sous-produits du raffinage. Comme dans les installations d'extraction, des



unités de **combustion en torchère** peuvent être présentes pour des raisons de sécurité.

2.2.3 Transformation du pétrole – Usines pétrochimiques

Après raffinage, les produits pétroliers peuvent être envoyés dans des usines pétrochimiques pour des transformations supplémentaires. Ces usines utilisent toutes les matières premières issues des combustibles fossiles pour produire une large gamme de produits : plastiques, caoutchoucs, textiles, médicaments et pesticides. Étant donné la diversité des produits, il est difficile de fournir une description générale des processus et des impacts environnementaux attendus.

Les grandes usines pétrochimiques sont souvent situées à proximité des raffineries, comme c'est le cas à Tarragone ([Section 6.1](#)) et à Marseille.

2.3 Charbon – Extraction et transformation

Le charbon peut se trouver près de la surface terrestre ou en profondeur. Les gisements superficiels sont exploités à l'aide de méthodes telles que les mines à ciel ouvert, les mines en contour ou l'extraction par abattage du sommet de la montagne. En revanche, le charbon situé en sous-sol est extrait par des méthodes d'exploitation à longue taille ou par exploitation en chambres et piliers. En général, l'extraction souterraine nécessite plus de personnel et présente un risque professionnel plus élevé que l'extraction en surface : aux États-Unis, c'est l'un des métiers les plus dangereux qui soient.

Après extraction, le charbon est concassé et réduit en tailles adaptées à la combustion. La majorité du charbon, surtout s'il est riche en soufre, doit être lavée à l'eau ou à l'aide de solvants chimiques avant transformation. Ce lavage peut éliminer jusqu'à 40 % du soufre inorganique, réduisant ainsi la quantité de dioxyde de soufre émise



lors de la combustion, mais génère des **eaux usées**. Si elles ne sont pas correctement traitées, ces eaux peuvent endommager l'écosystème en raison de leur acidité, de leur forte teneur en métaux lourds et souvent de leur conductivité élevée. Des eaux usées sont également produites lorsque les eaux souterraines infiltrent la mine pendant les travaux (par exemple: [Section 6.3](#)). Outre l'eau, la transformation du charbon produit de grandes quantités de **déchets solides** qui doivent être correctement éliminés – les déchets de charbon peuvent s'auto-enflammer et produire des écoulements acides (par exemple: [Section 6.4.2](#)). Certains de ces impacts persistent au-delà de la durée d'exploitation de la mine, nécessitant une fermeture complète et une réhabilitation à la fin du contrat d'exploitation.

Dans la phase finale du processus, le charbon est brûlé pour produire de l'électricité. Cette étape est souvent réalisée dans une centrale thermique située à proximité de la mine afin de réduire les coûts de transport. Comparée au gaz et au pétrole, la combustion du charbon tend à produire des quantités plus importantes de particules fines et à libérer davantage de métaux lourds, en particulier du mercure. Le résidu de combustion, appelé **cendre volante** (*fly ash*), est également riche en métaux lourds et doit être éliminé de manière appropriée pour éviter des dommages environnementaux.





3. Quel est l'impact environnemental de l'industrie des combustibles fossiles ?



3.1 Quels sont les polluants émis par les industries des combustibles fossiles ?

Bien que les impacts globaux des combustibles fossiles en termes d'émissions de CO₂ soient largement connus, les communautés vivant à proximité des installations d'extraction et de transformation doivent faire face à un ensemble supplémentaire de préoccupations environnementales et sanitaires. Cette section résume les principaux polluants que l'on peut attendre près de ces infrastructures. Cette vue d'ensemble s'appuie sur l'Inventaire des Émissions de Polluants Atmosphériques EMEP/EEA (édition 2023 : [EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook](#)) ainsi que sur les discussions issues des groupes de travail ; elle concerne principalement les polluants émis lors des opérations régulières, et non lors des incidents. Ces derniers libèrent tous les polluants mentionnés, mais en concentrations beaucoup plus élevées, avec des effets dramatiques et durables sur les communautés locales.

Au-delà de substances chimiques spécifiques, toutes les activités d'extraction et de transformation entraînent aussi des impacts environnementaux plus larges, tels que des modifications du microclimat, la baisse des niveaux des eaux souterraines et superficielles, la déformation des sols et des glissements de terrain.

3.1.1 Vue d'ensemble par matrice environnementale

L'extraction et la transformation des combustibles fossiles **affectent principalement l'air**, bien qu'elles puissent également endommager les masses d'eau et les écosystèmes terrestres.

Les composés organiques volatils (COV) sont les principaux polluants atmosphériques spécifiques aux industries des combustibles fossiles. Les COV sont des substances chimiques contenant du carbone, présentes principalement sous forme gazeuse à température et



pression ambiantes – bien que certains composés puissent également se retrouver dans l'eau et le sol. Le méthane, le benzène, le toluène et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) appartiennent à cette catégorie. Certaines phases spécifiques du raffinage du pétrole et de la combustion du charbon émettent également des gaz contenant du soufre, tels que le **dioxyde de soufre** (SO₂) et le **sulfure d'hydrogène** (H₂S). Certains COV spécifiques et composés soufrés sont les principaux responsables des **mauvaises odeurs** fréquemment signalées dans les zones industrielles.

Les industries des combustibles fossiles émettent aussi des polluants généralement associés à la combustion, tels que les **particules fines** ou les **matières particulaire** (PM, de l'anglais *particulate matter*), les oxydes d'azote (NO et NO₂, regroupés sous le terme **NO_x**), le **SO₂**, le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂). Ces industries libèrent également des **métaux lourds**, sous forme gazeuse (comme le mercure) ou intégrés aux matières particulaires. La composition exacte des polluants dépend de facteurs tels que le type de combustible, sa composition chimique spécifique et les caractéristiques techniques du procédé industriel (voir [Section 3.1.2](#)).



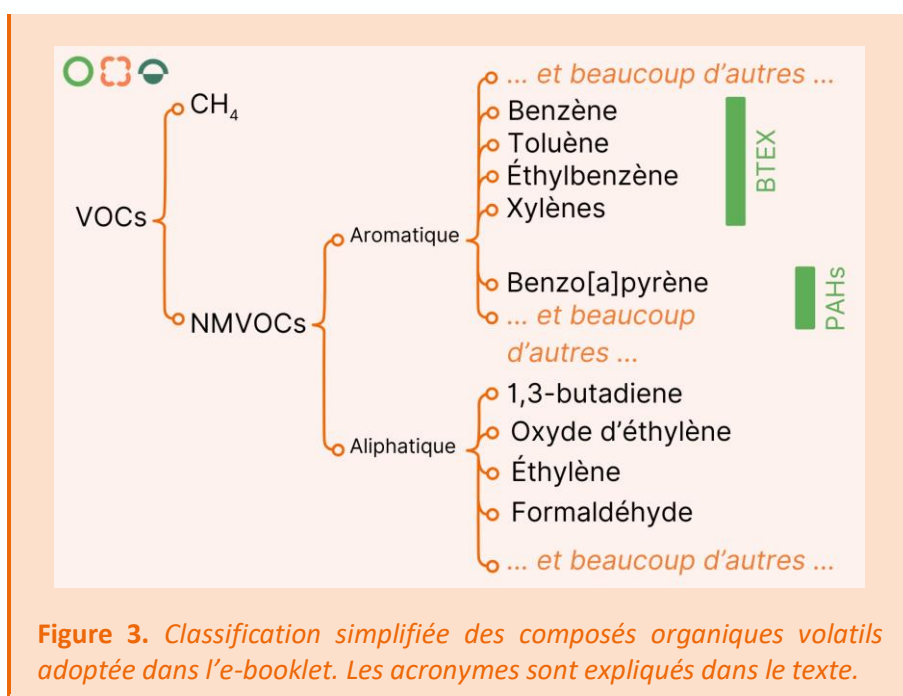
Encadré 2. Que sont les composés organiques volatils (COV) ?

Les composés organiques sont des substances chimiques contenant uniquement du carbone (C), de l'hydrogène (H) et parfois de l'oxygène, de l'azote et du soufre. Ils comprennent des milliers d'espèces aux propriétés très variées, ce qui rend leur classification complexe. Dans cette publication, nous définissons les composés organiques volatils (COV) comme des molécules présentes principalement sous forme gazeuse à température et pression ambiantes – bien que certains de ces composés puissent également se retrouver dans l'eau et le sol (voir Encadré 3).

Les COV incluent le méthane (CH_4) et d'autres composés connus collectivement sous le nom de composés organiques volatils non méthaniques (COVNM). Les COVNM comprennent des composés aliphatiques tels que le 1,3-butadiène, l'oxyde d'éthylène, l'éthylène et le formaldéhyde, ainsi que des substances chimiques aromatiques comme le benzène (B), le toluène (T), l'éthylbenzène (E), les xylènes (X) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) comme le benzo[a]pyrène.

Les hydrocarbures non méthaniques sont un terme couramment rencontré dans la littérature sur la pollution pétrolière et désignent des molécules composées uniquement de carbone et d'hydrogène. Par exemple, le 1,3-butadiène (C_4H_6) et l'éthylène (C_2H_4) sont des hydrocarbures non méthaniques, tandis que l'oxyde d'éthylène ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$) et le formaldéhyde (CH_2O), qui contiennent également de l'oxygène (O), n'en font pas partie.

Pour éviter toute confusion, cette publication adopte la classification simplifiée illustrée dans la Figure 3.



Les industries des combustibles fossiles peuvent également polluer les **écosystèmes aquatiques** – cependant, lors des opérations régulières, cela concerne principalement les eaux usées générées pendant l'extraction et le prétraitement. Selon la géologie locale, le type de combustible et la phase du processus, ces eaux usées peuvent contenir des concentrations élevées de **sels** (souvent du chlorure de sodium), **d'acides** (principalement de l'acide sulfurique), de **métaux lourds**, de **substances chimiques organiques** et **d'éléments radioactifs** (principalement du radium). Les composés organiques peuvent provenir du combustible lui-même (appelés hydrocarbures totaux du pétrole ou TPH ; voir Encadré 3) ou des additifs utilisés lors de l'extraction du pétrole. Si elles ne sont pas correctement gérées, ces eaux peuvent s'infiltrer dans les masses d'eau voisines, les nappes phréatiques et les écosystèmes terrestres, causant des dommages environnementaux significatifs.



Encadré 3. Que sont les hydrocarbures totaux du pétrole (TPH) ?

Les hydrocarbures totaux du pétrole (TPH) désignent un ensemble mal défini de substances chimiques présentes dans les produits pétroliers. Comme les produits de raffinage du pétrole (voir [Section 2.2.2](#) et Figure 2), les TPH sont classés en fonction du nombre d'atomes de carbone. Par exemple, les « composés de la gamme essence » contiennent de 6 à 10 atomes de carbone, tandis que les « composés de la gamme diesel » en contiennent de 10 à 22. Ces deux sous-groupes incluent les BTEX (dans l'essence) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (dans le diesel), des substances principalement détectées dans l'air (en tant que composés organiques volatils non méthaniques ; voir Encadré 2), mais que l'on peut également trouver dans l'eau et le sol.

Les TPH comprennent un large éventail de composés, incluant à la fois des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, sans distinction précise entre les sous-classes. Leur analyse est complexe et nécessite diverses techniques analytiques.

Cette définition est conforme aux normes environnementales qui utilisent la mesure des TPH pour évaluer la pollution liée aux hydrocarbures dans différents milieux, notamment l'eau et le sol.

3.1.2 Vue d'ensemble par type de combustible fossile et phase du processus

Bien que les processus d'extraction et de transformation des combustibles fossiles libèrent des mélanges relativement constants et caractéristiques de polluants, chaque type de combustible et chaque



phase de traitement présentent une « empreinte » d'émission unique. Comprendre l'origine de cette empreinte peut aider les citoyens à identifier les substances à prioriser dans leurs initiatives de surveillance communautaire.

La Figure 4 (en haut) met en évidence les principaux polluants atmosphériques émis lors de **l'extraction et de la transformation du pétrole et du gaz naturel**. Les **composés organiques volatils (COV)** provenant des fuites de gaz, du dégazage, du traitement des eaux usées et de la stabilisation du brut constituent les principales émissions atmosphériques durant la phase d'extraction. Dans les installations pratiquant le *gas flaring* (combustion en torchère), on observe des **émissions supplémentaires liées à la combustion**, notamment des particules fines, des oxydes d'azote (NO_x), du dioxyde de soufre (SO₂), du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de carbone (CO₂) ainsi que des hydrocarbures non brûlés ou partiellement brûlés (autres COV).

Des métaux lourds spécifiques sont également émis : pour le pétrole, principalement du vanadium et du nickel ; pour le gaz naturel, principalement du mercure et de l'arsenic. De même, les raffineries émettent des COV et des polluants associés à la combustion en torchère, ainsi que des composés soufrés issus de la désulfuration (SO₂, H₂S, mercaptans) et des polluants liés à la combustion dans les centrales électriques des raffineries. Les émissions des **usines pétrochimiques** varient selon les caractéristiques spécifiques du processus et sont donc difficiles à généraliser. On peut rechercher les **COV** en tant que groupe, mais chaque procédé possède une empreinte unique permettant d'identifier l'unité émettrice – par exemple, la production de plastique polyéthylène peut libérer de l'éthylène, son matériau de base.



Durant les opérations normales, la mauvaise gestion des eaux usées constitue un problème surtout lors de l'extraction et du prétraitement du brut.

Alors que l'exploitation du pétrole et du gaz affecte principalement la qualité de l'air local, l'extraction et la transformation du charbon ont un impact environnemental plus complexe (Figure 4, en bas). La majorité des émissions atmosphériques liées au charbon proviennent de sa **combustion** dans les centrales électriques, souvent situées à proximité des sites d'extraction. Comparée au pétrole et au gaz, la combustion du charbon libère davantage de **particules et de métaux lourds**, en plus de tous les autres polluants liés à la combustion.

Le processus d'extraction lui-même émet uniquement du méthane et d'autres COV piégés dans les roches. Si les déchets issus de l'extraction et de la combustion du charbon ne sont pas correctement gérés, ils peuvent s'auto-enflammer et libérer des polluants supplémentaires liés à ce phénomène (voir [Section 6.4.2](#)).

L'extraction du charbon impacte également de manière significative les **écosystèmes aquatiques et terrestres** environnants. Au contact de l'eau, le charbon et ses déchets libèrent des **sels, des acides et des métaux lourds** – le polluant dominant dépend de la composition chimique du minerai. Par exemple, le charbon contenant de la pyrite (un minéral de fer et de soufre) libère de l'acide sulfurique au contact de l'eau, tandis que les gisements riches en halogènes (comme en Pologne ; voir [Section 6.3](#)) forment des solutions plus salées que l'eau de mer lorsqu'ils sont mouillés.

Le charbon peut être mouillé lors du processus d'extraction (par exemple lors du lavage du minerai), mais aussi lorsque les mines à ciel ouvert ou les tas de déchets sont exposés à la pluie. Si le drainage résultant n'est pas correctement géré, il peut détériorer l'écosystème



en augmentant excessivement la salinité, l'acidité et les concentrations de métaux toxiques.

Cette analyse s'appuie sur des données issues d'inventaires d'émissions et d'études scientifiques récentes, mettant en lumière la complexité des impacts selon le type de combustible et la phase d'exploitation.

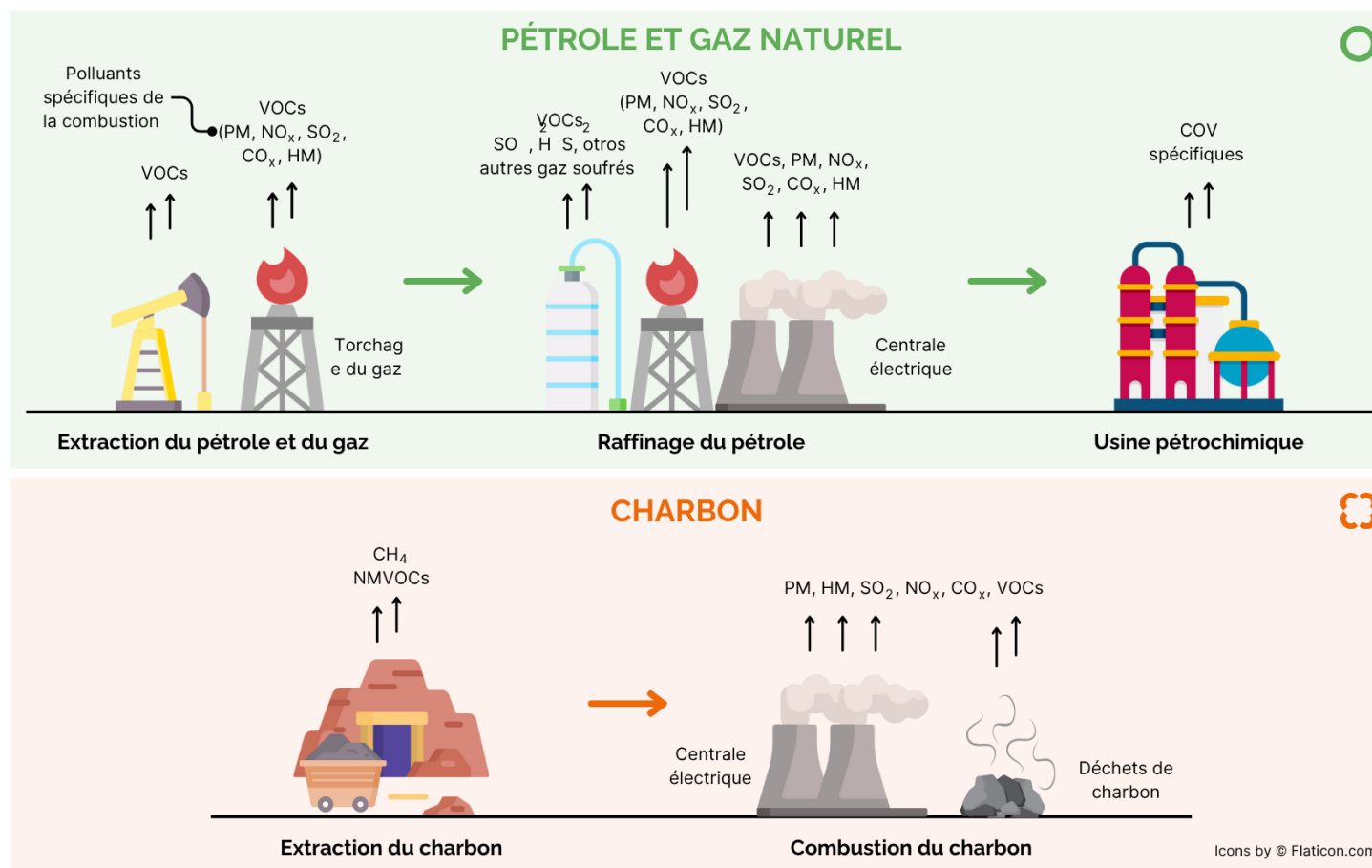


Figure 4 – Représentation schématique des impacts environnementaux de l'extraction et de la transformation des combustibles fossiles. Les fuites accidentelles et autres incidents ne sont pas inclus dans ce schéma.

Légende : HM = métaux lourds (« heavy metals »), CO_x = oxydes de carbone (monoxyde de carbone et CO₂), COV = composés organiques volatils, COVNM = composés organiques volatils non méthaniques (voir Figure 3)



3.2 Quelle est la dangerosité de ces substances ?

Selon un principe bien connu en toxicologie chimique, c'est « la dose qui fait le poison » - autrement dit, toute substance chimique peut être nocive à forte dose, tandis que des substances considérées comme dangereuses peuvent être inoffensives à faible concentration. Ce principe s'applique également aux polluants issus de l'industrie des combustibles fossiles.

Les sections suivantes expliquent comment ces polluants affectent la santé humaine ([Section 3.2.1](#)) et résument les normes et lignes directrices relatives à la qualité environnementale ([Section 3.2.2](#)) - c'est-à-dire les seuils au-dessous desquels les concentrations de polluants sont considérées comme sûres pour la santé humaine. Pour simplifier, l'attention est portée sur les composés les plus pertinents identifiés précédemment.



3.2.1 Effets sur la santé humaine – À quels polluants devons-nous prêter attention ?

Les polluants issus de l'exploitation des combustibles fossiles peuvent nuire à la santé humaine de plusieurs façons : ils peuvent affecter les poumons, le cerveau et même provoquer des cancers. Voici un aperçu simplifié de ces effets, basé sur deux sources principales. [L'Agence internationale pour la recherche sur le cancer](#) (IARC), qui classe les substances selon leur risque cancérigène :

- **Groupe 1:** cancérigènes avérés pour l'homme
- **Groupe 2A:** cancérigènes probables
- **Groupe 2B:** cancérigènes possibles
- **Groupe 3:** ne peuvent pas être classifiés ([voici la liste complète](#)).

Nous avons également résumé les effets toxicologiques de chaque polluant en nous basant sur les profils de [l'Agence américaine pour les substances toxiques et le registre des maladies](#) (ATSDR). Ces profils complets sont accessibles via les liens hypertextes dans les tableaux suivants.

Le tableau 1 présente les risques sanitaires liés aux principales substances organiques associées à l'extraction et à l'exploitation des combustibles fossiles. Le benzène, le 1,3-butadiène et l'oxyde d'éthylène sont les composés les plus cancérigènes, suivis du benzo[a]pyrène, un hydrocarbure aromatique polycyclique typique. Bien qu'ils ne causent pas nécessairement le cancer, tous les autres composés organiques volatils non méthaniques ont des effets sur le foie, le système nerveux et le développement.

Le méthane est surtout préoccupant pour son potentiel de réchauffement climatique ; son impact direct sur la santé humaine est



négligeable aux concentrations normalement rencontrées en extérieur.

Polluant	Classification CIRC	Autres effets sur la santé (ATSDR)
Benzène	Groupe 1	Gastro-intestinal, hématologique, immunologique, neurologique [ref]
Benzo[a]pyrène	Groupe 2A	Développement, hépatique, reproducteur [tous les HAP ; ref]
1,3-Butadiène	Groupe 1	Développement, gastro-intestinal, hématologique, neurologique, reproducteur [ref]
CH ₄ (Méthane)	Groupe 3	n.d.
Éthylbenzène	Groupe 2B	Développement, hépatique, neurologique, rénal [ref]
Oxyde d'éthylène	Groupe 1	Développement, endocrinien, hématologique, neurologique, reproducteur, respiratoire [ref]
Toluène	Groupe 3	Cardiovasculaire, développement, immunologique, neurologique, respiratoire [ref]
Xylènes	Groupe 3	Cutané, hépatique, neurologique, rénal, respiratoire [ref]

Tableau 1 – Classification CIRC et autres effets sur la santé pour des substances organiques spécifiques liées à l'extraction et au traitement des combustibles fossiles. (n.d. = non disponible)

Parmi les substances émises lors de la combustion des combustibles fossiles, les particules sont l'élément le plus nocif pour la santé humaine: il peut provoquer le cancer, des maladies cardiaques, des maladies respiratoires, des troubles neurologiques et augmenter le taux de mortalité (voir Tableau 2). Des niveaux élevés de dioxyde de soufre (SO₂) peuvent également entraîner des effets respiratoires, en particulier chez les enfants et les groupes sensibles. Comme nous le verrons dans [Section 6.2](#), les preuves de problèmes respiratoires chez les enfants ont été déterminantes pour déclencher une mise à jour de



la législation sur les émissions de SO₂ autour de la raffinerie pétrolière de Sarlux.

Polluant	Classification CIRC	Autres effets sur la santé (ATSDR)
NO _x	Groupe 3	Aucune [ref]
PM _{2.5}	Groupe 1	Mortalité, cardiovasculaires, respiratoires et neurologiques. [ref]
PM ₁₀	Groupe 1	
SO ₂	Groupe 3	Respiratoires [ref]

Tableau 2 – Classification CIRC et autres effets sur la santé pour les polluants atmosphériques spécifiques à la combustion.

Les particules PM_{2,5} et PM₁₀ sont des particules dont la taille est comprise respectivement entre 1 et 2,5 µm et entre 2,5 et 10 µm. (n.d. = non disponible)

Certains métaux lourds peuvent également nuire à la santé humaine (voir Tableau 3). Le vanadium et le nickel sont les métaux lourds les plus pertinents en ce qui concerne le pétrole et peuvent être libérés lors de sa combustion. Alors que le vanadium ne suscite pas d'inquiétudes majeures, certains composés du nickel sont classés cancérogènes du **Groupe 1**.

Polluant	Classification CIRC	Autres effets sur la santé (ATSDR)
Arsenic	Groupe 1 (Inhalation, Métabolique) Groupe 3 (Oral)	Cardiovasculaire, cutané, endocrinien, gastro-intestinal, hématologique, neurologique, rénal, respiratoire [ref]
Cadmium	Groupe 1 (Métabolique, Inhalation, Oral)	Gastro-intestinal, musculo-squelettique, rénal, respiratoire [ref]
Chrome (VI)	Groupe 1 (Inhalation, Oral) Groupe 3 (Métabolique)	Dermatologique, gastro-intestinal, hématologique, reproducteur, respiratoire [ref]
Plomb	Groupe 2A (Inhalation) Groupe 2B	Cutané, gastro-intestinal, hématologique,



	(Métabolique) Groupe 3 (Oral)	reproducteur, respiratoire [ref]
Mercure	Groupe 2B (Oral) Groupe 3 (Inhalation, Métabolique)	Cardiovasculaire, développement, immunologique, neurologique, rénal, reproducteur [ref]
Manganèse	n.d.	Développement, neurologie, reproduction, appareil respiratoire [ref]
Nickel	Groupe 1 (Inhalation, Oral) Groupe 2B (Métabolique)	Cutané, développement, immunologique, respiratoire [ref]
Vanadium	Groupe 2B	Développement, gastro- intestinal, hématologique, neurologique, respiratoire [ref]

Tableau 3 – Classification CIRC et autres effets sur la santé de certains métaux lourds émis lors de l'extraction, du traitement et de la combustion des combustibles fossiles. La classification CIRC est exprimée pour trois catégories de composés : composés inorganiques (I), composés organiques (O) et éléments métalliques (M). Pour le chrome, le tableau ne rapporte que des données concernant les chromates (également connus sous le nom de chrome (VI) ou chrome hexavalent). La classification du vanadium concerne uniquement le pentoxyde de vanadium.



L'arsenic et le mercure, qui peuvent également être émis lors de la combustion du gaz naturel, peuvent avoir des effets négatifs sur la santé humaine : par exemple, l'arsenic et ses composés inorganiques causent le cancer. D'autres métaux lourds comme le cadmium et les chromates (composés avec le chrome à son état d'oxydation le plus élevé) sont également cancérogènes.

3.2.2 Normes et lignes directrices de qualité environnementale : de quelles concentrations devons-nous nous inquiéter ?

Bien que la majorité des polluants liés à l'exploitation des combustibles fossiles – et aux activités humaines en général – ait un impact sur la santé humaine, viser un environnement totalement exempt de pollution n'est pas réaliste. Cependant, chacun a le droit de vivre dans un lieu sûr, propre et sain, ce qui rend essentiel de définir quels niveaux de polluants peuvent être considérés comme « acceptables ».

Selon la matrice environnementale et les critères d'évaluation, différents référentiels peuvent être utilisés pour définir ce que signifie « acceptable ». Un premier référentiel est constitué par les lignes directrices de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), des recommandations flexibles basées sur des données scientifiques, utilisables pour une évaluation générale de la pollution. Dans ce document, nous faisons référence aux lignes directrices de l'OMS sur les polluants atmosphériques [polluants atmosphériques](#) et la qualité des [eaux récréatives](#).

Les normes de qualité environnementale représentent un second ensemble de valeurs de référence. Contrairement aux lignes directrices de l'OMS, ces normes fixent des limites juridiquement contraignantes sur les niveaux maximaux de polluants, équilibrant la



protection de la santé avec des facteurs économiques. Ici, nous nous concentrons sur la plus récente [Directive sur la Qualité de l'Air de l'Union Européenne](#) et sur la [Directive relative aux Normes de Qualité Environnementale](#), également de l'UE, deux cadres réglementaires applicables à tous les États membres.

Les références complètes à ces documents et à d'autres sources pertinentes se trouvent dans la [Section 7](#).

Air

Le Tableau 4 résume les normes de qualité de l'air et les lignes directrices de l'OMS pour les principaux polluants émis lors de l'extraction des combustibles fossiles. Sauf indication contraire, les concentrations sont exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Polluant	Concentrations annuelles dans l'air (µg/m³)		Cause-t-il le cancer ?
	OMS	EU	
Principaux COV liés aux combustibles fossiles			
Benzène	1.7 ^a	5	*
Benzo[a]pyrène	0.012 ^a	0.001	
1,3-Butadiène	n.d.	n.d.	*
CH ₄	n.d.	n.d.	
Éthylbenzène	n.d.	n.d.	
Oxyde d'éthylène	n.d.	n.d.	*
Toluène	260 ^b	n.d.	
Xylènes	n.d.	n.d.	
Polluants liés à la combustion			
NO ₂	n.d. ^e	200 ^e [18] ^d	
	25 ^c	n.d. ^c	
	10	40	
PM _{2,5}	15 ^c	n.d. ^c	*
	5	25	
PM ₁₀	45 ^c	50 ^c	*
	15	40 [35] ^c	
SO ₂	n.d. ^e	350 ^e [24] ^d	
	40 ^c	125 ^c [3] ^d	
Métaux lourds			
Arsenic	0.0066 ^a	0.006 ^f	*
Cadmium	0.005	0.005 ^f	*



Chrome (VI)	0.00025 ^a	n.d.	*
Plomb	0.5	0.5 ^f	
Mercure	1	n.d.	
Manganèse	0.15	n.d.	
Nickel	0.025 ^a	0.02 ^f	*
Vanadium	1	n.d.	

Tableau 4 – Lignes directrices de l'OMS pour la qualité de l'air et Directive UE sur la qualité de l'air (2008/50/CE) pour certains polluants associés à l'exploitation des combustibles fossiles (n.d. = non disponible) La dernière colonne indique les agents cancérogènes de classe 1 selon la classification IARC (Tableaux 1-3). Niveau de référence estimé en supposant un risque acceptable de cancer sur une vie de 1 sur 100 000. ^b Moyenne hebdomadaire. ^c Moyenne journalière. ^d Dépassements autorisés par an ou par jour. ^e Moyenne horaire. ^f Mesuré comme teneur en métaux dans le PM₁₀.

Pour les COV individuels, l'Union européenne établit des normes de qualité de l'air uniquement pour le benzène et le benzo[a]pyrène. D'autres cancérogènes de classe 1, comme le 1,3-butadiène et l'oxyde d'éthylène, sont réglementés dans certains pays, mais pas en Europe (voir Section 6.1) – par exemple, l'[Ontario](#) (Canada) fixe une moyenne annuelle maximale de 2 µg/m³ et 0,04 µg/m³ respectivement pour le 1,3-butadiène et l'oxyde d'éthylène.

Les COV en tant que classe sont difficiles à réglementer en raison de leur hétérogénéité. L'UE n'a pas encore imposé de limites légales pour les COV totaux dans l'air, même si, depuis 2016, elle exige des États membres qu'ils réduisent les émissions de COV non méthaniques. [Certains pays européens](#) ont également imposé des seuils nationaux pour les COV dans les environnements intérieurs. À titre indicatif, les COV totaux devraient être ≤ 300 µg/m³ dans les environnements intérieurs et ≤ 2 000 µg/m³ à proximité des installations industrielles.

Pour les polluants émis lors de la combustion des combustibles fossiles, les limites varient en fonction de la période de moyenne. La réglementation européenne permet également de dépasser certaines valeurs journalières un nombre fixe de fois au cours de l'année. Par exemple, pour le SO₂, la Directive sur la Qualité de l'Air fixe des



moyennes maximales horaires et journalières de 350 et 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement, en autorisant jusqu'à 24 dépassements horaires et 3 dépassements journaliers par an. L'OMS et l'UE fixent toutes deux des limites annuelles pour l'ozone et le monoxyde de carbone.

Bien qu'il ne soit pas directement lié à l'exploitation des combustibles fossiles, l'ozone se forme en présence d'une grande quantité de COV, de NOx et de lumière solaire – des conditions qui se produisent souvent pendant la journée à proximité des raffineries (Figure 4). Le monoxyde de carbone est un produit secondaire de la combustion et peut se former lors de la combustion du pétrole, du gaz ou du charbon – par exemple, dans les centrales électriques situées à proximité des mines de charbon ou des raffineries.

En ce qui concerne les métaux lourds, l'UE réglemente l'arsenic, le cadmium, le nickel et le plomb (tous quantifiés comme teneur en métaux dans les PM10). L'OMS recommande également des niveaux de référence pour le chrome (VI), le mercure, le manganèse et le vanadium.

Bien que le sulfure d'hydrogène (H_2S) ne soit pas toxique aux concentrations généralement rencontrées dans l'air libre (l'irritation oculaire, premier symptôme pour la santé, se produit à 15 000–30 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ce composé a une forte odeur. Pour éviter les désagréments, l'OMS recommande une moyenne journalière maximale de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et une moyenne sur 30 minutes de 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Eau

Le Tableau 5 résume les concentrations moyennes annuelles (en $\mu\text{g}/\text{L}$) de certains polluants pertinents lors de l'extraction et du traitement des combustibles fossiles. La liste exclut le méthane et d'autres espèces présentes uniquement dans l'air, comme les particules en suspension.



Polluant	Concentration annuelle dans les eaux superficielles (µg/L)		Cause le cancer ?
	WHO	EU	
Principaux COV liés aux combustibles fossiles			
Benzène	200	10 [50] ^a	*
Benzo[a]pyrène	n.d.	0.00017 [0.27] ^a	
1,3-Butadiène	n.d.	n.d.	*
Éthylbenzène	10'000	n.d.	
Oxyde d'éthylène	n.d.	n.d.	*
Toluène	14'000	n.d.	
Xylènes	6'000	n.d.	
Métaux lourds			
Arsenic	200	n.d.	*
Cadmium	60	0.08 – 0.25 ^b [0.45 – 1.5] ^{a,b}	*
Chrome	1'000	n.d.	*
Plomb	200	1.2 [14] ^a	
Mercuré	n.d.	n.d. [0.07] ^a	
Manganèse	8'000	n.d.	
Nickel	1'400	4 [34] ^a	*
Vanadium	n.d.	n.d.	

Tableau 5 Valeurs de référence pour les eaux superficielles tirées des lignes directrices de l'OMS sur la qualité des eaux récréatives et de la directive UE sur les normes de qualité environnementale (eaux superficielles intérieures ; n.d. = non disponible). La troisième colonne indique les substances chimiques reconnues comme cancérogènes de Classe 1 selon la classification CIRC (Tableaux 1-3).^a Concentration maximale autorisée lors d'événements de pollution à court terme. ^b Les valeurs dépendent de la dureté de l'eau.

Les lignes directrices pour la qualité de l'eau à usage récréatif sont disponibles pour les BTEX et pour plusieurs métaux lourds, et se situent typiquement dans la gamme des mg/L. Pour le toluène, l'éthylbenzène et le xylène, les concentrations recommandées sont supérieures à leur seuil olfactif : en d'autres termes, l'eau peut être sûre même si elle sent mauvais. L'OMS dispose également de lignes directrices pour la qualité de l'eau potable, qui sont plus strictes (environ 20 fois plus basses) et couvrent un plus grand nombre de substances que celles destinées aux eaux récréatives.



La Directive européenne sur les normes de qualité environnementale fournit des moyennes annuelles et des limites maximales admissibles (pour la pollution à court terme) pour certaines substances chimiques spécifiques aux industries des combustibles fossiles. Cette directive réglemente également le naphtalène et l'anthracène, deux HAP non inclus dans le Tableau 5, ainsi que les solvants chlorés et d'autres polluants prioritaires.

La conductivité et le pH ne sont pas couverts par la législation européenne ni par les lignes directrices de l'OMS, mais ils constituent des indicateurs utiles de pollution : leur mesure est rapide et peu coûteuse, et des valeurs hors norme sont des signes clairs de contamination (voir par exemple les Sections [6.3](#) et [6.4.2](#)). Ces deux paramètres ont des valeurs typiques qui varient selon la géologie ; en général, les eaux douces non polluées ont un pH entre 6,5 et 8,5 et une conductivité comprise entre 50 et 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En revanche, les eaux affectées par le drainage minier peuvent avoir un pH aussi bas que 2 à 3, tandis que les eaux usées industrielles et l'eau de mer ont des conductivités supérieures respectivement à 10 000 et 55 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Illustrations by Storyset

4. Quels sont les outils que les citoyens peuvent utiliser pour surveiller la santé de leur environnement ?



L'un des objectifs principaux d'ERICA est d'aider les communautés vivant à proximité des industries des combustibles fossiles à recueillir des informations fiables sur la qualité de l'environnement local. Cette section présente une série d'outils accessibles à tous pour le suivi de l'air et de l'eau, avec une attention particulière aux polluants indiqués dans la [Section 3.1](#): dans l'air, les COV, H₂S, SO₂ et autres substances liées à la combustion ; dans l'eau, acides, sels, métaux lourds et substances chimiques organiques comme les TPH.

Nous avons classé ces outils selon (1) leur origine et leur coût ; et (2) leur approche. Selon le premier critère, les technologies disponibles peuvent être commerciales ou « faites maison » (DIY, do-it-yourself). Les outils commerciaux ont un coût faible ($\leq 2\,000$ €) ou moyen ($2\,000 - 30\,000$ €), tandis que les technologies fait maison coûtent généralement moins de $2\,000$ € – même si elles ne sont pas toujours moins chères que les dispositifs commerciaux à bas coût. Si les technologies à coût moyen peuvent dépasser le budget des particuliers, elles peuvent représenter une option valable pour des organisations à but non lucratif ou autres entités disposant de financements. Concernant la collecte des données, les approches comprennent (1) la mesure des concentrations de polluants, (2) la collecte d'échantillons et (3) l'enregistrement d'autres données (par exemple, des photos géoréférencées montrant des signes évidents de pollution).

Le Tableau 7 offre un aperçu de ces technologies avec des liens vers leurs sites web respectifs ; une sélection de ces outils est décrite plus en détail dans le reste du chapitre. En général, la plupart des outils à bas coût et fait maison pour l'air détectent les particules de différentes tailles et parfois les COV totaux. Pour l'eau, les kits colorimétriques sont l'option la plus accessible pour les acides, les métaux lourds et autres polluants.



La qualité des données est un inconvénient général des approches à bas coût : tandis que les technologies à bas coût et fait maison sont excellentes pour l'éducation et la sensibilisation, les projets nécessitant des données de haute qualité devraient envisager une collaboration avec des universités ou des laboratoires accrédités. Dans ce cas, les citoyens peuvent toujours jouer un rôle actif dans le projet en collectant des échantillons ou d'autres types de données. Dans le cadre de la justice environnementale, ces observations apparemment banales ont souvent un impact plus important que les données collectées avec des outils coûteux (voir par exemple la Section [6.4.1](#)) et représentent des outils puissants pour initier des processus de changement par le bas.

	Les citoyens mesurent des concentrations			Les citoyens collectent des échantillons		Les citoyens collectent d'autres données
	Commercial		Fait maison	Commercial	Fait maison	
	Faible coût	Coût moyen		Faible coût		
AIR	• Smart citizen kit • PurpleAir • Airnote	• Aeroqual S500	• DustBox • Frackbox • airRohr • CanAirIO • Simple Air Sensor • Photomètre solaire GLOBE	• Radiello	• Bucket Monitor • Strisce al rame	• Odeur (es., OdourCollect) • Photos ou inspections • Bioindicateurs
EAU	• Kits colorimétriques: – ChemMetrics – SenSafe – Modern Water RaPID assay – Hanby TPH test kit^a • Compteurs compacts Horiba LAQUAtwin • Photomètre eXact iDip	• Sonde multiparamètres Hanna • Analyseur de laboratoire UVF-500D • Analyseur de laboratoire UVF-TRILOGY • enviroFlu-HC 500	• capteurs pour l'eau de Publiclab	• échantillonneurs passifs (es., qui)	• Un simple conteneur	• Photos ou inspections • Bioindicateurs • Images satellites

Table 7 : Panorama des technologies à bas prix pour la détection de la pollution de l'air et de l'eau liée à l'exploitation des combustibles fossiles. Les éléments en surbrillance sont décrits plus en détail dans le texte.^a Un système similaire est disponible pour la [détection des TPH dans le sol](#).



4.1 Outils pour le suivi de la qualité de l'air

4.1.1 Échantillonneurs commerciaux à faible et moyen coût

Il existe une large gamme de capteurs économiques pour la surveillance des polluants atmosphériques, y compris certains spécifiquement destinés à l'industrie des combustibles fossiles. Leur principe de fonctionnement dépend du polluant : par exemple, les particules sont généralement détectées par des compteurs optiques de particules, les COV par des détecteurs de photoinisation, tandis que les NOx, l'ozone et le monoxyde de carbone sont souvent mesurés avec des capteurs à oxyde métallique ou électrochimiques.

La qualité des données peut représenter une limite importante pour les capteurs à bas coût. Le Centre d'Évaluation des Performances des Capteurs de Qualité de l'Air ([AQ-SPEC](#)), un programme qui évalue les performances des capteurs coûtant moins de 2 000 dollars, est une ressource excellente pour identifier les dispositifs adaptés à chaque besoin. Le site d'AQ-SPEC fournit une liste complète de produits classés par fournisseur et polluant, avec les coûts, spécifications techniques et rapports de performance comparant les capteurs aux méthodes de référence.

Parmi les différents modèles disponibles, nous recommandons [PurpleAir](#) et [Aeroqual S500](#). Pour moins de 300 euros, PurpleAir est largement utilisé pour la détection en temps réel des PM_{2,5} et est très populaire dans les programmes communautaires de surveillance de la qualité de l'air. Les modèles les plus récents (PurpleAir Zen, Touch et Flex) détectent également les COV totaux grâce à un capteur à oxyde métallique. Bien que plus coûteux (2 100 – 2 800 €), l'Aeroqual S500 est une excellente alternative permettant de détecter une gamme plus large de polluants, dont certains spécifiques aux combustibles fossiles. En changeant la tête du capteur, cet instrument portable peut



détecter les COV totaux, CH₄, H₂S, SO₂, NO₂ et particules, avec des limites de détection généralement de l'ordre de dizaines de parties par milliard (ppb) – donc inférieures aux valeurs légales fixées par l'Union européenne (Figure 5). Selon [AQ-SPEC](#), l'Aeroqual S500 est l'une des meilleures options à bas coût actuellement disponibles pour les COV totaux.

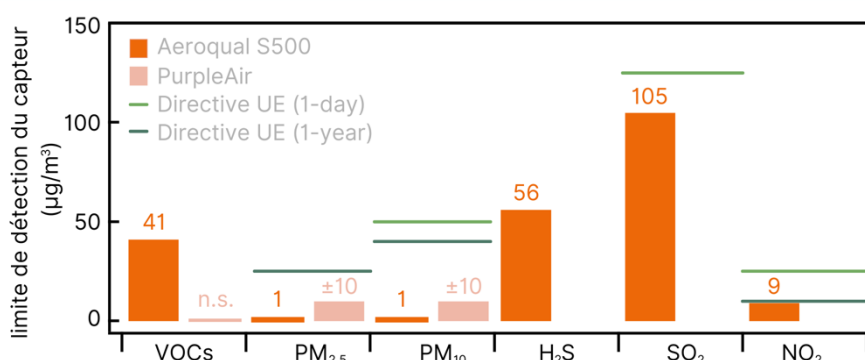


Figure 5- Limites de détection pour les deux capteurs de qualité de l'air recommandés par rapport aux valeurs établies par la Directive UE sur la qualité de l'air 2008/50/CE (Tableau 4). Le site web de PurpleAir ne spécifie pas les limites de détection pour les COV totaux (n.s.). La Directive UE 2008/50/CE n'inclut pas les COV totaux ni le H₂S ; pour les lignes directrices sur les niveaux acceptables pour ces substances chimiques, voir la Section [3.2.2](#). Les limites de détection en ppm ont été converties en µg/m³ comme indiqué dans la [Section 7](#).

4.1.2 Échantillonneurs fait maison

La plupart des capteurs d'air fait maison sont des compteurs optiques de particules enfermés dans un boîtier et connectés à un système automatique de collecte de données. La [DustBox](#) est un bon exemple de cette configuration. Développé par l'initiative [Citizen Sense](#), ce dispositif utilise un capteur de particules à bas coût logé dans un boîtier imprimé en 3D et se connecte au WiFi via un microcontrôleur (Figure 6). Bien que le [manuale di costruzione](#) soit détaillé et approfondi, la fabrication de la DustBox nécessite des connaissances en électronique, soudure et programmation. Le coût total n'est pas



précisé, mais selon nos estimations, il s'élève à quelques centaines d'euros. La [Frackbox](#), également développée par Citizen Sense, est un capteur spécifiquement conçu pour mesurer les impacts du pétrole et du gaz naturel. La Frackbox détecte les COV totaux à l'aide d'un détecteur à photoionisation à bas coût, ainsi que le NO₂, l'ozone et les données météorologiques. Les limites de détection sont de 9 µg/m³ pour le NO₂ et de 20 µg/m³ pour les COV totaux, tout comme l'Aeroqual S500 (Figure 5). Actuellement, ce dispositif est encore un prototype et les instructions détaillées pour sa construction ne sont pas disponibles.

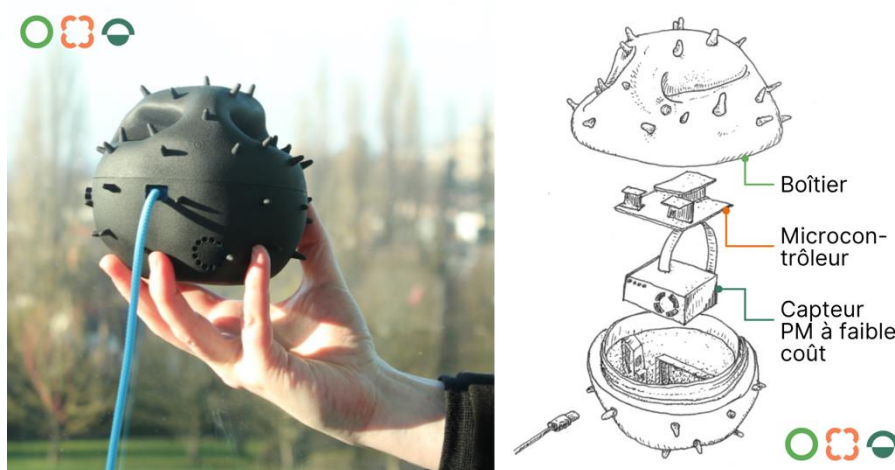


Figure 6- Image et schéma d'une DustBox 2.0. Adapté du matériel en ligne de [Citizen Sense](#).

4.1.3 Échantillonneurs commerciaux et fait maison

Comme alternative aux capteurs à bas coût, il est possible d'impliquer les citoyens dans la collecte d'échantillons. Les **échantillonneurs passifs** sont particulièrement adaptés pour la surveillance de l'air : ils sont utilisés pendant une période déterminée (généralement quelques semaines), sont légers et ne nécessitent pas d'alimentation électrique. En revanche, les **échantillonneurs actifs** forcent l'air à travers un sac de collecte pendant une période plus courte (habituellement une heure) et nécessitent généralement de l'électricité. Après la collecte, les deux types d'échantillonneurs sont



envoyés à des laboratoires académiques ou certifiés, qui analysent les échantillons avec des méthodes standard. Par exemple, les COV individuels peuvent être détectés avec la [méthode standard EPA TO-15](#), qui permet de mesurer 97 polluants atmosphériques au-dessus de 0,5 ppb (environ 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Les coûts et limites de détection varient selon le laboratoire, les polluants et la méthode utilisée.

Les échantillonneurs commerciaux tout comme ceux fait maison conviennent aux initiatives de science citoyenne. Avec un coût de 400 à 600 euros pour 20 unités (analyse chimique incluse), [Radiello](#) est une option économique si des fonds sont disponibles. Cette entreprise italienne propose différents modèles adaptés à divers polluants et besoins de prélèvement. Par exemple, [Source International](#) a utilisé les échantillonneurs Radiello pour surveiller le sulfure d'hydrogène autour de l'installation pétrolière COVA en Val d'Agri, tandis que des chercheurs de l'Université Polytechnique de Catalogne ont utilisé des dispositifs similaires pour mesurer les niveaux de base de 1,3-butadiène autour du complexe pétrochimique de Tarragone (Section [6.1](#)). Comparés à des capteurs comme l'Aeroqual S500 (Section [4.1.1](#)), les échantillonneurs Radiello ont des limites de détection beaucoup plus basses (Figure 7), mais nécessitent des temps d'installation plus longs (de plusieurs dizaines d'heures à plusieurs jours) et fournissent uniquement des niveaux moyens de concentration sur la période d'exposition.

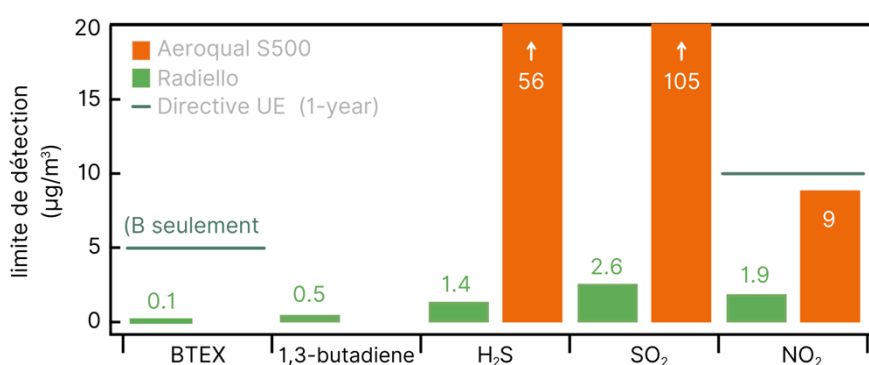




Figure 7 - Comparaison entre les limites de détection de Radiello et de l'Aeroqual S500 par rapport à la Directive UE sur la qualité de l'air 2008/50/CE (Tableau 4). Parmi les quatre BTEX, la Directive UE ne réglemente que le benzène (B). Les références pour ces chiffres sont indiquées dans la [Section 7](#).

Le [Bucket Monitor](#) est un exemple de échantillonneurs actif fait maison pour les COV et les substances volatiles contenant du soufre. Développé dans les années 1990 par des résidents californiens préoccupés par la pollution des installations pétrochimiques, il est approuvé par l'Agence américaine de protection de l'environnement pour le suivi participatif de la qualité de l'air (voir par exemple la [Section 6.4](#)). Le Bucket Monitor est constitué d'un seau de 20 litres contenant un sac Tedlar de 5 litres. L'air est collecté à l'aide d'une pompe de camping (alimentée par batterie) ou de vélo, et l'échantillon est envoyé au laboratoire dans les 24 à 72 heures suivant la collecte. Chaque seau coûte environ 75 € (hors analyses) mais nécessite des temps de collecte plus courts que les échantillonneurs passifs, ce qui en fait une méthode efficace pour détecter les pics de pollution.

4.1.4 Autres approches

Il existe d'autres méthodes à faible coût que les communautés peuvent utiliser pour recueillir des preuves de la mauvaise qualité de l'air. Les mauvaises odeurs sont une cause fréquente d'actions locales, comme cela a été observé à Tarragone ([Section 6.1](#)) et à Sarroch ([Section 6.2](#)). Étant donné que les odeurs peuvent avoir des origines variées – pas seulement les raffineries de pétrole et les installations pétrochimiques – des plateformes dédiées à la cartographie participative des mauvaises odeurs ont déjà été développées. [OdourCollect](#) et [Smell My City](#) (disponible uniquement aux États-Unis) sont deux exemples de ces outils. Développé dans le cadre du projet européen [D-NOSES](#), OdourCollect permet aux utilisateurs d'enregistrer la localisation, le type, l'intensité et la durée des odeurs



partout dans le monde. D-NOSES a également lancé l'[Observatoire International des Odeurs](#) pour partager connaissances, témoignages et bonnes pratiques sur la pollution olfactive.

Les citoyens peuvent aussi prendre des photos géoréférencées d'événements de pollution ou partager leurs avis sur les activités industrielles locales. Lorsque ces données sont collectées sur une carte, le processus est appelé « [“cartographie participative”](#) ». La cartographie participative des activités de torchage de gaz en Amazonie équatorienne est un exemple frappant de la puissance et de l'efficacité de cette approche apparemment simple (Section [6.4.1](#)).

Enfin, le **biomonitoring** offre un moyen engageant d'évaluer la qualité de l'air tout en apprenant à connaître la biodiversité locale. Le biomonitoring consiste à surveiller la présence et la santé d'organismes très sensibles à la pollution – par exemple, certaines espèces de plantes et de lichens. L'initiative Citizen Sense a développé une boîte à outils de « <https://phyto-sensor-toolkit.citizensense.net/phytocapteurs> » contenant ressources et directives pour détecter la pollution atmosphérique à l'aide des plantes – par exemple, de nombreuses espèces végétales sont sensibles à [l'ozone](#) : aux États-Unis, il existe un réseau entier de « [Ozone Gardens](#) ». De même, à Marseille, le projet de science citoyenne [VOCE](#) a impliqué les citoyens dans [l'évaluation de la qualité de l'air](#) basée sur la biodiversité des lichens et la croissance et floraison de plantes du genre Petunia (Section [6](#))



4.2 Outils pour le suivi de la qualité de l'eau

4.2.1 Kits commerciaux à faible coût

Les kits colorimétriques sont le choix idéal pour tester l'eau de manière semi-quantitative et qualitative et sont largement utilisés dans divers programmes de surveillance participative (comme [Freshwater Watch](#)). Ils sont intuitifs et rapides à utiliser. Leur coût se situe généralement entre 50 et 200 € pour 30 à 100 tests, et ils peuvent être achetés auprès de fournisseurs génériques (comme [Sigma Aldrich](#)) ou de sociétés spécialisées (comme [ChemMetrics](#) et [SenSafe](#)). Le fonctionnement des kits consiste à ajouter un réactif à l'échantillon (ou à immerger une bandelette réactive dans l'échantillon). Après une courte attente, la couleur de l'échantillon (ou de la bandelette) est comparée à une carte de référence qui associe la couleur à une plage de concentrations (Figure 8). Pour certaines substances, les kits sont disponibles avec différents intervalles de concentration, les limites de détection variant généralement dans l'ordre des parties par million (ppm).

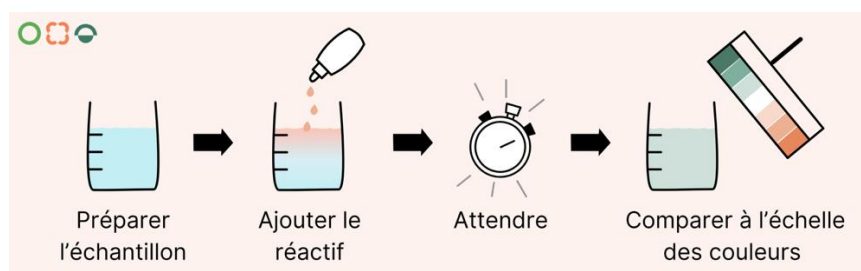


Figure 8 - Principe de fonctionnement d'un kit colorimétrique utilisant des réactifs liquides.

La plupart des kits sont capables de détecter des indicateurs généraux de la qualité de l'eau tels que le pH et les métaux solubles – notamment l'arsenic, le chromate, le manganèse et le plomb. Certains produits ont été conçus pour des polluants industriels comme le sulfure d'hydrogène (H₂S) et des substances organiques – par



exemple, certains produits de ChemMetrics peuvent détecter les [sulfures](#) et les [phénols](#) dans l'eau. Il existe également des options plus coûteuses spécifiques aux hydrocarbures dérivés du pétrole : le [Modern Water RaPID Assay](#) et le [Hanby TPH Test Kit](#). Le premier quantifie le total des BTEX/TPH dans l'eau en utilisant un test immunologique à particules magnétiques et fournit un résultat en moins de 60 minutes. Le second est une option plus qualitative qui consiste à extraire l'échantillon avec un solvant organique et à comparer la couleur de l'extrait avec une échelle chromatique. Ces deux kits sont également disponibles pour l'analyse des sols.

4.2.2 Capteurs commerciaux à bas coût

Les capteurs commerciaux à bas coût mesurent principalement des paramètres simples de la qualité de l'eau tels que le pH et la conductivité. Parmi les nombreux modèles disponibles, nous recommandons les appareils compacts [Horiba LAQUAtwin](#) et le photomètre [eXact iDip](#). Pour quelques centaines d'euros, Horiba propose des appareils portables pour mesurer le pH, la conductivité, le potentiel d'oxydo-réduction et des ions spécifiques. Au même prix, le photomètre eXact iDip quantifie les métaux et d'autres polluants, notamment les sulfures et le cyanure d'hydrogène, ainsi que les paramètres généraux de la qualité de l'eau. Cet appareil fonctionne comme un kit colorimétrique (Figure 8), mais utilise un photomètre pour quantifier précisément le changement de couleur – donc les concentrations

4.2.3 Autres approches

Comme pour l'air, **l'inspection visuelle** géoréférencée et les **photographies** constituent des alternatives à faible coût valables pour



le suivi participatif de la qualité de l'eau. Par exemple, [Public Lab](#) décrit une méthode permettant de distinguer entre des films bactériens naturels et une pollution pétrolière, une approche qui peut aider à localiser les eaux contaminées. L'initiative Good Karma Project (Section [6.1](#)) a également mobilisé les habitants pour signaler la pollution par des granulés plastiques sur une [carte en ligne](#). Le **biomonitoring** est aussi une excellente option pour les écosystèmes aquatiques : par exemple, l'association française VOCE a organisé des activités de suivi avec le club de plongée local afin d'évaluer l'impact du complexe pétrochimique de Marseille sur la [biodiversité marine](#).



Illustrations by Storyset

5. Comment utiliser les données pour stimuler un changement



Les projets de science citoyenne portant sur l'exploitation des combustibles fossiles sont souvent lancés dans le but de provoquer un changement au niveau des opérations industrielles, des réglementations politiques et de la société civile. Les connaissances acquises dans ces contextes dépassent ainsi les simples objectifs académiques : ces données peuvent redonner du pouvoir aux citoyens, soutenir les communautés locales dans leurs luttes juridiques et aider à résoudre les conflits environnementaux. Dans cette section, nous introduisons et expliquons le concept de connaissance exploitable (« actionable knowledge »), tout en offrant des conseils concrets pour transformer les projets de science participative en opportunités réelles d'apporter des changements tangibles dans les sociétés locales.

5.1 Qu'est-ce que l' *actionable knowledge* ?

Le terme « **connaissance praticable** » (ou « actionable knowledge » en anglais) désigne les idées et informations générées par la recherche scientifique qui créent les conditions pour un changement positif dans la société. En d'autres termes, cela signifie traduire des données scientifiques en informations utilisables dans les débats publics, l'éducation et les campagnes de sensibilisation, contribuant ainsi à orienter les processus décisionnels et à renforcer le rôle actif des citoyens dans la vie publique.

Contrairement à la recherche académique, l'efficacité de la connaissance praticable dépend d'un ensemble complexe de facteurs – il ne suffit pas que les professionnels recueillent des données de manière techniquement correcte. Pour que les projets génèrent un changement réel dans la société, il est essentiel qu'ils soient clairement liés à des applications concrètes et qu'ils impliquent dès le départ les membres de la communauté et les décideurs politiques. Il



est également crucial d'adopter divers mécanismes de financement, afin d'assurer la durabilité à long terme du projet et un partenariat actif entre tous les acteurs concernés. Impliquer tous les intéressés possibles dans la planification du projet, la collecte et la validation des données est fondamental pour réaliser une véritable « **démocratie de la connaissance** » – c'est-à-dire produire des informations légitimées par une pluralité d'acteurs de la société civile, et pas seulement par les « autorités de la connaissance » (par exemple, les institutions académiques). Impliquer les communautés locales dans la collecte des données via des méthodes variées – quel que soit le type de données, pas seulement les concentrations de polluants – représente aussi une forme de « **justice cognitive** », car cela reconnaît et valorise des systèmes de connaissance historiquement dévalorisés ou ignorés, comme ceux des populations indigènes (par exemple, les peuples autochtones d'Amérique).

Pour être efficace, la connaissance praticable doit tenir compte de la complexité des problèmes qu'elle cherche à résoudre et de la diversité des données impliquées. Dans ce contexte, **gérer correctement l'incertitude** est fondamental. L'incertitude des données doit être clairement définie et communiquée à tous les acteurs – certains chercheurs ont même suggéré d'organiser des activités pour développer une « sensibilité à l'incertitude ». Au moins en partie, l'incertitude doit aussi être acceptée. Cet objectif peut être atteint en adoptant une **approche scientifique « post-normal »**, dans laquelle l'incertitude est reconnue comme un facteur déterminant dans la connaissance relative à des questions complexes telles que l'environnement et la santé. L'incertitude peut également être atténuée en adoptant certaines des stratégies décrites dans la section suivante.



5.2 Comment activer les données environnementales pour créer un changement ?

Cette section résume les meilleures pratiques pour maximiser la production de connaissance praticable (« actionable knowledge ») dans les projets de science participative. Ces pratiques se divisent en deux catégories : les pratiques **socio-techniques**, qui concernent les améliorations technologiques et les changements organisationnels, et les pratiques **socio-politiques**, qui portent sur les normes sociales, les comportements et les politiques.

Meilleures pratiques socio-techniques incluent 3 actions clés (Figure 9, côté gauche) :

1. Améliorer la **communication et la visibilité du projet** en utilisant des plateformes existantes, en interagissant avec les médias (traditionnels et modernes) et en organisant des réunions en présentiel pour favoriser les interactions interpersonnelles.
2. **Relier les résultats du projet à des objectifs politiques** en impliquant les décideurs dans la conception et en alignant les résultats sur les priorités politiques.
3. Garantir **l'exactitude des données** grâce à la formation et au soutien de professionnels.

Meilleures pratiques socio-politiques se concentrent sur 3 thématiques principales (Figure 9, côté droit) :

1. Définir la **meilleure manière d'impliquer les citoyens** – les projets avec un engagement citoyen plus fort ont plus de chances de générer une connaissance praticable.



2. Adopter une **approche axée sur la justice**, en garantissant à chaque citoyen l'accès à des connaissances pertinentes et en visant à instaurer une « démocratie de la connaissance ».
3. Veiller à ce que les **données soient socialement** robustes en incluant les savoirs traditionnels, en s'assurant que les données sont co-produites et en gérant correctement l'incertitude.



SOCIO-TECHNIQUE

1. Améliorer la visibilité et la bonne communication

1.1 Mettre en place un portail d'information en ligne sur la science citoyenne, incluant une base de connaissances sur les initiatives à travers l'Europe, les thèmes abordés, les outils et ressources.

1.2 Communiquer de manière transparente sur les méthodologies utilisées et respecter les bonnes pratiques.

1.3 Promouvoir la disponibilité des données de science citoyenne sur des plateformes ouvertes existantes ou nouvelles et s'assurer que les mécanismes officiels de rapport peuvent accepter et intégrer ces données.

1.4 S'engager efficacement avec les médias traditionnels (journaux, TV) ainsi qu'avec les communicateurs scientifiques ; utiliser les réseaux sociaux et plateformes.

1.5 Organiser des rencontres en présentiel permettant l'interaction sociale et valorisant les succès

2. Relier les résultats aux priorités politiques

2.1 Cibler les cadres politiques environnementaux à différentes échelles. Rendre explicites les relations entre les projets de science citoyenne, les thèmes du Green Deal et les Objectifs de Développement Durable.

2.2 Sensibiliser davantage les décideurs, en particulier les autorités locales, à la pertinence des résultats de la science citoyenne – par exemple, organiser des événements de mise en relation pour favoriser les échanges et le transfert de connaissances.

3. Qualité des données comme étant précise

3.1 Fournir des formations et ressources sur les méthodologies de gestion de la qualité des données et les standards des bonnes pratiques.

3.2 Illustrer comment la fiabilité des données a été atteinte, afin d'être digne de confiance et conforme aux exigences réglementaires et de surveillance environnementale des gouvernements.



SOCIO-POLITIQUE

4. Définir le mode de participation approprié

4.1 AReconnaître le meilleur mode d'engagement citoyen en considérant les quatre niveaux définis par Haklay (2013) : crowdsourcing, intelligence distribuée, science participative, participation extrême.

4.2 Utiliser des sciences fortement participatives (« extrêmes ») dans les controverses environnementales pour permettre aux communautés polluées de faire entendre leur voix.

5. Adopter des approches orientées vers la justice

5.1 Adopter la justice des savoirs – garantir que toutes les communautés, en particulier celles marginalisées ou plus impactées par les problèmes environnementaux, aient accès aux connaissances scientifiques et techniques pertinentes, en tenant compte de l'existence de différents systèmes de savoir.

5.2 Viser à atteindre la démocratie des savoirs par la validation des connaissances publiques dans le domaine public.

6. La qualité des données comme étant socialement solide

6.1 Renforcer la légitimité des données en impliquant un cercle plus large de personnes dans la discussion des savoirs (pas seulement ceux avec une accréditation institutionnelle), et en formant des communautés de pairs élargies (par ex., jurys citoyens, groupes de discussion, consensus de référence)

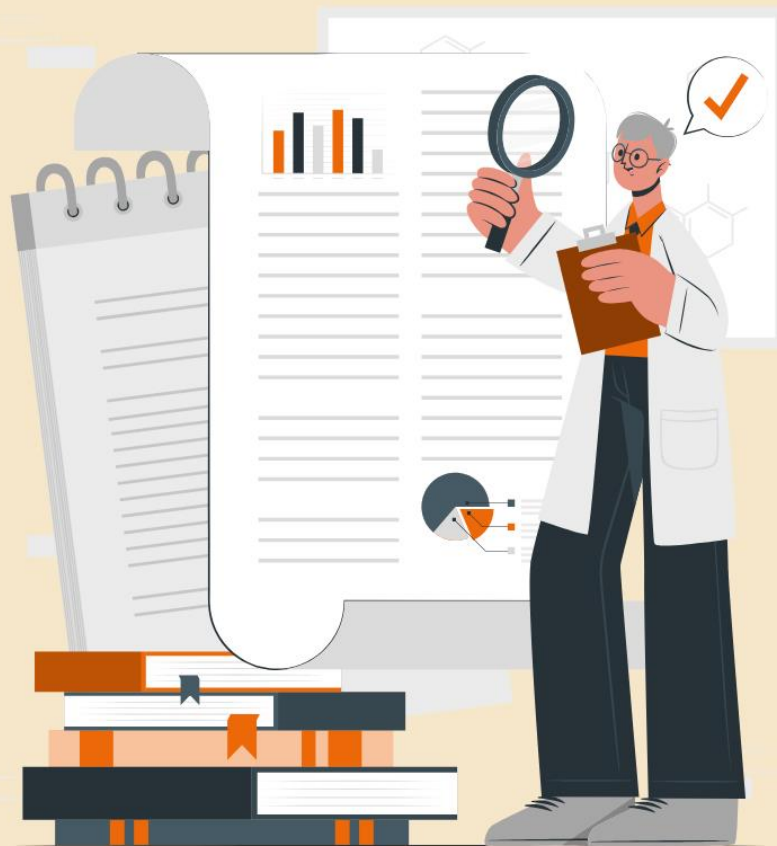
6.2 Co-produire les savoirs en incluant une pluralité de perspectives légitimes et un dialogue inclusif.

6.3 Adopter des stratégies de construction de crédibilité en mettant en œuvre différentes techniques à différentes étapes du projet, en priorisant la formation, le conseil scientifique, la publication et l'utilisation par la gestion.

6.4 Illustrer que les citoyens engagés dans la surveillance ont un niveau de formation et d'expérience leur permettant d'être définis comme experts.

6.5 Gérer l'incertitude en reconnaissant la complexité de la co-production des savoirs et en promouvant une « sensibilité à l'incertitude » à travers une série d'activités, par exemple des séminaires impliquant les parties prenantes.

Figure 9- Résumé des pratiques socio-techniques et socio-politiques pour maximiser la production de connaissance praticable (« actionable knowledge ») dans les projets de science participative.



Illustrations by Storyset

6. Quelques exemples pour s'inspirer, en Europe et dans le monde



Cette section conclut en décrivant des projets de science citoyenne initiés par des citoyens préoccupés par l'impact de l'exploitation des combustibles fossiles dans leurs communautés. Ces initiatives ont impliqué les citoyens à divers niveaux et ont toutes rencontré du succès, bien que de manières différentes : si seules certaines ont conduit à des changements tangibles, toutes ont contribué à sensibiliser et éduquer les communautés locales ou à recueillir les premières preuves d'une pollution encore non identifiée par les autorités. Ces expériences ont souligné l'importance d'inclure tous les acteurs – responsables politiques, membres de la communauté et universitaires – dans la collecte des données et de contextualiser les connaissances. Certains des projets les plus réussis se sont appuyés sur des observations apparemment simples et évidentes – comme la signalisation d'odeurs désagréables ou d'épisodes de torchage de gaz – mettant encore plus en lumière combien la connaissance directe des habitants d'un territoire peut être aussi précieuse que des données scientifiques obtenues avec des instruments sophistiqués et coûteux.

Notre analyse a identifié huit projets européens de science participative portant sur l'extraction et le traitement des combustibles fossiles, dont la plupart se sont concentrés autour de grandes raffineries et installations pétrochimiques en Europe occidentale (Figure 10).

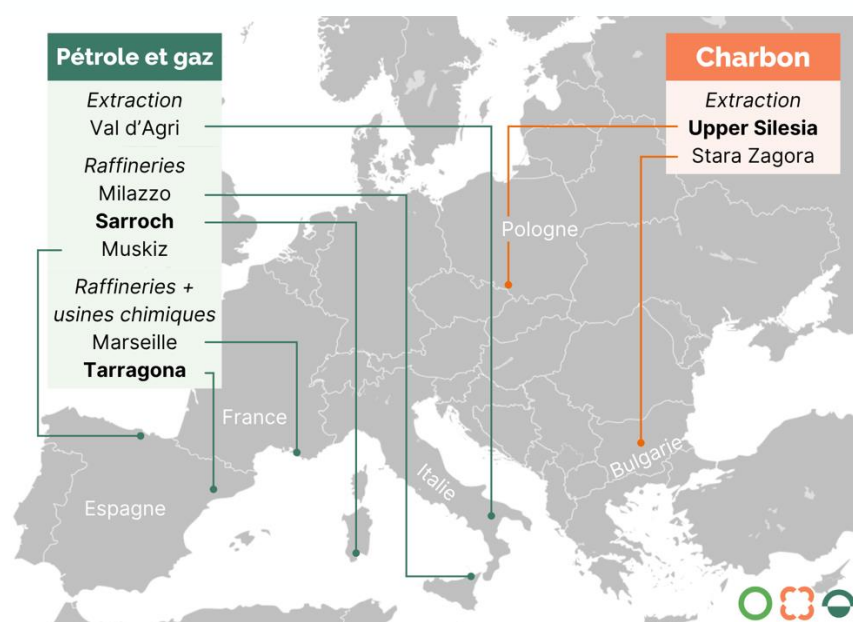


Figure 10 - Sites des initiatives européennes de science participative sur l'extraction et la transformation des combustibles fossiles. Les projets décrits plus en détail dans le texte sont mis en gras ; voir la Section 7 pour plus de détails sur les autres initiatives présentées dans la figure.

Nous analyserons en détail seulement trois études de cas : celle relative au complexe pétrochimique de Tarragone (Section 6.1) ; celle sur la raffinerie Saras en Sardaigne (Section 6.2) ; et celle sur les mines de charbon en Pologne (Section 6.3). La Section 6.4 conclut ce chapitre avec quelques exemples exemplaires en dehors de l'Europe – que nous espérons pouvoir inspirer de futures initiatives de justice environnementale de terrain.



6.1 Le complexe pétrochimique de Tarragone

6.1.1 Le problème

Tarragone, sur la côte espagnole de la Méditerranée septentrionale, abrite le plus grand complexe pétrochimique d'Europe du Sud. Opérationnel depuis les années 60, le complexe comprend environ 30 entreprises et s'étend sur plus de 1 200 hectares. Repsol est l'une des principales entreprises et possède une raffinerie ainsi que plusieurs installations pétrochimiques. Les carburants et les matières plastiques sont les principaux produits fabriqués à Tarragone. En plus de quelques grands désastres environnementaux – comme le rejet d'eaux usées toxiques dans la rivière Francolí (2008) et la fuite de 40 000 tonnes de naphta dans les nappes phréatiques (2013) –, les habitants se plaignent depuis longtemps des mauvaises odeurs persistantes autour du complexe industriel. À la suite d'une fuite de pellets plastiques en 2018, la préoccupation concernant la pollution par les microplastiques le long du tronçon côtier adjacent à l'usine s'est également accrue.

6.1.2 Les initiatives

En 2008, certains résidents des communautés proches du complexe pétrochimique ont créé [Plataforma Cel Net](#), une organisation de la société civile visant à collecter des données indépendantes sur la qualité de l'air local. Avec le soutien d'autres organisations, Plataforma Cel Net a commandé en 2014 une étude à l'Université Polytechnique de Catalogne, qui a détecté plus de 200 composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) dans des échantillons d'air prélevés autour du complexe pétrochimique. La présence d'inflammables tels que le 1,3-butadiène et l'oxyde d'éthylène a suscité une inquiétude particulière, car ce sont des substances cancérogènes mais encore non réglementées en Europe ([Section 3.2](#)).



Ces résultats ont conduit à des [campagnes](#) de sensibilisation populaires telles que « Something smells bad » (« Quelque chose sent mauvais »), « Saps què respire? » (« Tu sais ce que tu respire ? ») et « Tu també ho respire » (« Toi aussi tu le respire »), organisées par Plataforma Cel Net en collaboration avec [GEPEC-EdC](#), (Groupe d'étude pour la protection de l'écosystème catalan) et La [La Canonja3](#). Le groupe catalan Ingénieurs Sans Frontières ([Enginyeria Sense Fronteres](#)) a également mené des activités similaires. Dans l'ensemble, ces initiatives ont favorisé d'autres campagnes de collecte de données, sensibilisé l'opinion publique et soutenu l'élaboration de nouvelles réglementations. L'université locale a par ailleurs réalisé des études complémentaires sur la qualité de l'air pour identifier les COV non méthaniques responsables des mauvaises odeurs et d'autres substances toxiques non réglementées, afin d'aider à identifier les entreprises responsables de ces émissions.

Après une fuite de pellets plastiques en 2018, l'association à but non lucratif [Good Karma Projecta](#) lancé [MEDPELLETS](#), une initiative de science participative visant à comprendre les dynamiques de pollution par les pellets plastiques dans la Méditerranée occidentale. Ce projet est réalisé avec le soutien de la communauté locale de surfeurs.

6.1.3 Les résultats

Bien que les efforts de Plataforma Cel Net et de ses partenaires aient été essentiels pour sensibiliser les parties prenantes locales au problème, leur travail est loin d'être terminé. Un succès partiel a été obtenu en 2015 avec la création d'un Comité Territorial pour la Qualité de l'Air, un organisme regroupant citoyens, associations de la société civile, administrations, centres de recherche et entreprises, qui vise à créer un nouveau système de contrôle, de réglementation, de prévention et de protection au sein de la zone pétrochimique.



Cependant, puisque de nombreux composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) ne sont pas encore réglementés, le Comité a jusqu'à présent eu du mal à obtenir des résultats concrets.

En 2023, le Parlement catalan a adopté une motion pour augmenter les points de surveillance de la qualité de l'air autour du complexe pétrochimique et pour inclure le 1,3-butadiène parmi les polluants à surveiller. Parmi d'autres succès figurent l'installation de deux stations de surveillance en temps réel à [El Morel](#) et de capteurs pour détecter les fuites de benzène autour du complexe ; la formation du [Groupe de Qualité de l'Air de Tarragone](#), une initiative pilotée par l'industrie pour financer des études sur la qualité de l'air ; et le travail du [Colectivo Ronda](#), qui a poursuivi Repsol en justice pour avoir causé un cancer à un travailleur. Au fil des années, l'industrie elle-même a aussi montré une certaine capacité d'autorégulation, comme en témoigne la réduction significative des émissions de 1,3-butadiène (diminution de 40 à 80 % depuis 2013). À ce jour, Plataforma Cel Net continue de faire pression pour obtenir une réglementation formelle du 1,3-butadiène et de l'oxyde d'éthylène, qui ne sont pas encore inclus dans la législation européenne et nationale ([Section 3.2.2](#)).

Concernant les microplastiques, les données recueillies par Good Karma Project ont suscité des inspections supplémentaires dans les entreprises locales, entraînant des sanctions et l'ouverture de procédures pour négligence. Dans la proposition de prochaine législation sur les déchets, le Parlement de Catalogne a également inclus une section sur la gestion des pellets plastiques. Si elle est adoptée, cette disposition ferait de la Catalogne un pionnier en Europe dans la lutte contre la pollution par les microplastiques.



6.2 La raffinerie Sarlux

6.2.1 Le problème

Saras S.p.A., active depuis 1965, gère la raffinerie Sarlux à Sarroch, en Sardaigne, l'une des plus grandes d'Europe. La raffinerie produit du gaz de pétrole liquéfié (GPL), de l'essence, de la naphta, du gazole et du carburant pour l'aviation, principalement destinés aux marchés italien et espagnol. Au fil des années, la raffinerie a accumulé un historique de catastrophes environnementales et d'impacts chroniques, régulièrement dénoncés par des associations locales telles que Donne Ambiente Sardegna et Sardegna Pulita. Au début des années 2000, des conditions sociopolitiques favorables ont permis à ces efforts de se concrétiser dans un projet cohérent.

6.2.2 Les initiatives

En 2006, la municipalité de Sarroch, en collaboration avec les universités de Florence et de Cagliari, a lancé le projet "[Sarroch Ambiente e Salute](#)". L'initiative est née d'une étude réalisée en 2006 par l'Université de Florence, qui démontrait une incidence plus élevée de certains types de cancers et de pathologies respiratoires chez les habitants de la zone adjacente à la raffinerie Sarlux. Parmi les causes possibles, l'étude identifiait la pollution locale de l'air comme un facteur déterminant de ces maladies. Lors de la première phase du projet (2006-2008), les partenaires ont organisé des activités de diffusion, publié des lignes directrices sur les pathologies respiratoires chez les enfants et mené deux études épidémiologiques sur les enfants et la qualité de l'air. La municipalité a également acquis une station mobile de surveillance de la qualité de l'air à utiliser aux alentours de la raffinerie. Collectivement, ces études ont confirmé une augmentation de l'incidence des pathologies respiratoires chez les enfants et renforcé le lien entre les problèmes de santé et les niveaux



élevés de SO₂, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et de métaux lourds. La deuxième phase du projet a débuté en 2009 avec de nouvelles études épidémiologiques et sur la qualité de l'air, ainsi que la création d'une « biobanque » où des échantillons biologiques prélevés auprès des habitants peuvent être conservés pour des études futures. La biobanque a été ouverte en 2010 et a fonctionné jusqu'en 2016.

6.2.3 Les résultats

Pendant ses « années d'or » (2006 – 2009), le projet a atteint plusieurs résultats significatifs. Le plus notable a été la réduction du seuil d'attention pour le SO₂, passant de 500 à 100 µg/m³ (concentrations horaires), un résultat obtenu en 2008 lors d'une table ronde avec les autorités nationales. Au cours de cette réunion, le Ministère a également réduit les émissions annuelles de SO₂ de Sarlux, de 14 000 à 7 000 tonnes, demandant en outre à la raffinerie de surveiller les émissions de PM₁₀ et d'installer des filtres. En 2014, la municipalité a mesuré des niveaux de SO₂ constamment en dessous des limites légales (un résultat obtenu chaque année depuis 2009) et a observé une diminution des hospitalisations pour problèmes respiratoires – bien que d'autres pathologies soient restées au-dessus de la moyenne régionale. Des rapports plus récents de Sarlux ([2022 – 2024](#)) et de l'Université de Cagliari ([2022](#)) ont confirmé cette réduction substantielle des niveaux de SO₂, qui se maintiennent régulièrement en dessous des limites imposées par l'État italien et l'OMS.

Outre son rôle fondamental dans la sensibilisation aux impacts environnementaux de la raffinerie, le projet « Sarroch Ambiente e Salute » a également mis en évidence l'importance cruciale d'un fort soutien politique pour obtenir un changement. Si l'engagement de la municipalité a été déterminant pour le lancement du projet, le faible



intérêt des administrations suivantes a sans doute contribué à son déclin. Selon une [lettre](#) de Donne Ambiente Sardegna, en 2021, aucune étude épidémiologique supplémentaire n'a été réalisée et la biobanque a disparu.

6.3 Extraction de charbon en Pologne

6.3.1 Le problème

Entre fin juillet et début août 2022, le fleuve Oder en Pologne a été touché par un grave épisode de pollution ayant causé la mort de 360 tonnes de poissons et autres organismes. Des enquêtes menées par des experts polonais, allemands et les [autorités de l' UE](#) ont toutes identifié comme cause probable de cette catastrophe écologique la prolifération de l'algue toxique *Prymnesium parvum*. Selon ces investigations, la croissance rapide de cet organisme – qui prospère dans des eaux saumâtres – a été provoquée par une augmentation anormale de la salinité des eaux fluviales. Bien qu'aucune source unique de pollution n'ait pu être identifiée, toutes les enquêtes ont convenu que la cause était largement d'origine anthropique.

Cet événement, qui constitue la pire catastrophe fluviale de l'histoire moderne européenne, a attiré une nouvelle attention sur l'impact environnemental de l'extraction du charbon en Haute-Silésie. Dans cette région de Pologne, les mines de charbon produisent des eaux usées extrêmement salées : lors de l'extraction, les eaux souterraines pénètrent dans la mine et dissolvent les halogénures (des minéraux contenant des sels facilement solubles dans l'eau) naturellement présents dans ces gisements ([Section 2.3](#)). En novembre 2022, Greenpeace Pologne a réalisé une [étude indépendante](#) qui a révélé des concentrations de sel extrêmement élevées dans plusieurs rejets d'eaux usées provenant de mines de charbon, non seulement dans l'Oder mais aussi dans la Vistule, le plus long fleuve de Pologne. Lors



de certaines enquêtes sur les causes possibles de cette pratique incorrecte, Greenpeace a dénoncé le comportement discutable du gouvernement national, qui a renouvelé les permis de plusieurs mines sans exiger d'évaluation d'impact environnemental. Cette faille a permis aux entreprises de continuer à opérer comme avant les années 1990, époque où les réglementations environnementales modernes n'existaient pas encore. Bien que la loi polonaise soit désormais alignée sur les directives de l'UE, les mines ayant renouvelé leurs permis durant cette période « favorable » continuent à fonctionner comme il y a 40 ans.

6.3.2 L'initiative et les résultats attendus

Parallèlement aux activités menées par les militants de Greenpeace Pologne, l'association polonaise de pêche a lancé **#WPŁYWOWI**, une initiative de science participative conduite en collaboration avec la banque BNP Paribas, l'entreprise Expert Float et l'Université de Varsovie. Le projet vise à surveiller la conductivité de l'eau du fleuve en utilisant la « **AGUARD float** », un flotteur pour poissons qui mesure la température et la conductivité en temps réel. Lancée en avril 2024, l'initiative se propose d'atteindre 2 000 personnes d'ici décembre 2024 – c'est le nombre de flotteurs mis à disposition dans le cadre de la campagne **BNP Paribas #WPŁYWOWI**. Jusqu'à présent, l'initiative a obtenu un large soutien médiatique, notamment de la part des plateformes Onet Group et Noizz.pl.

Bien que la catastrophe soit trop récente pour avoir produit des changements concrets, les initiatives en cours ont un grand potentiel pour stimuler les discussions et les changements concernant les pratiques d'extraction du charbon en Pologne. **#WPŁYWOWI** contribue à éduquer la population locale et à la sensibiliser à la pollution de l'eau, un sujet moins souvent traité que la pollution de



l'air. Parallèlement, Greenpeace Pologne maintient une forte vigilance sur les pratiques minières polonaises, soutenant la nécessité d'évaluations d'impact environnemental pour toutes les mines de charbon, la mise en œuvre de technologies de désalinisation, l'harmonisation de la législation et la création d'un parc national le long du tronçon sud du fleuve Oder.

6.4 Exemples vertueux hors d'Europe

Cette dernière section décrit deux exemples d'initiatives de science participative « extrêmes » menées hors d'Europe : en Équateur (Section [6.4.1](#)) et au Myanmar (Section [6.4.2](#)). D'autres exemples notables incluent le travail de la « [Louisiana Bucket Brigade](#) », une association à but non lucratif américaine qui a utilisé le « Bucket Monitor » (Section [4.1.3](#)) pour soutenir les habitants du « Cancer Alley » en Louisiane ; et « [Citizen Sense](#) », une initiative académique basée en Angleterre qui aide des communautés réparties dans le monde entier à surveiller la santé environnementale – par exemple, Citizen Sense a développé la Frackbox (Section [4.1.2](#)) pour aider les résidents proches d'une [installation de fracturation hydraulique en Pennsylvanie](#) qui surveille la qualité de l'air locale. Outre les États-Unis, on mentionne également l'initiative nigériane « [Media Awareness and Justice Initiative](#) », qui a joué un rôle clé dans la promotion de la justice environnementale dans le delta du Niger, l'une des zones les plus polluées au pétrole au monde.

6.4.1 Interdiction du torchage du gaz en Équateur

En 1989, l'UNESCO a établi la Réserve de biosphère du Yasuní pour protéger la biodiversité et le patrimoine culturel de l'Amazonie équatorienne. Malheureusement, certaines parties de la réserve chevauchent des gisements de pétrole et de gaz exploités depuis les années 1970. Chevron-Texaco a été la principale entreprise opérant



dans la région, causant une grave dégradation environnementale par ses activités d'extraction. Bien que l'entreprise ait déjà été poursuivie en justice et déclarée coupable, les pratiques d'extraction de Chevron-Texaco – en particulier l'usage inconsidéré du torchage du gaz (gas flaring) ou combustion à la torche ([Encadré 2](#)) – suscitent encore des inquiétudes en raison de leur impact environnemental significatif.

Le projet de science participative [A.M.A.Z.O.N.Y.A.](#) – « Mapping gas flaring from below » – a été lancé en réponse à deux facteurs indépendants : les mouvements populaires et le milieu académique. En 2020, des chercheurs de l'Université de Padoue ont utilisé des données satellitaires pour identifier les torches actives entre 2010 et 2017 dans l'Amazonie équatorienne. Ce travail a révélé des sites actifs également dans la Réserve Yasuní et a fourni des preuves de 34 nouveaux sites, dont 12 dans le champ de Tiputini, une zone protégée. Partant de ces résultats, A.M.A.Z.O.N.Y.A. a impliqué les communautés indigènes et agricoles locales dans un exercice de cartographie participative du territoire.

Ce projet a poursuivi plusieurs objectifs, notamment la validation des données satellitaires, l'identification de nouveaux sites de combustion et la génération d'informations indépendantes et accessibles pour promouvoir la justice environnementale au niveau local. A.M.A.Z.O.N.Y.A. a identifié 295 sites de torchage de gaz jamais cartographiés auparavant, dont certains dans la zone de protection intégrale de la Réserve. La communauté locale a joué un rôle fondamental dans le projet, en identifiant des torches invisibles sur les cartes satellitaires et en rapportant des impacts environnementaux généralement non pris en compte, tels que des dommages aux insectes et au sol. Outre l'Université de Padoue, A.M.A.Z.O.N.Y.A. a également impliqué l'Unión de Afectados y Afectadas por las Operaciones Petroleras de Texaco et la Fundación Alejandro Labaka,



une organisation à but non lucratif dédiée à la recherche, à la promotion culturelle et au soutien des communautés indigènes de l'Amazonie septentrionale.

En février 2020, ces résultats ont donné lieu à la campagne « ¡Apaguen Los Mecheros! », qui a conduit à une action en justice auprès du tribunal de Nueva Loja pour un arrêt total du torchage du gaz en Équateur. Bien que rejetée initialement, en janvier 2021, la Cour a accepté la requête, accordant aux entreprises 18 mois pour fermer tous les sites de torchage du gaz à proximité des zones peuplées et jusqu'en 2030 pour mettre fin à toutes les activités de torchage du gaz. Malgré ce succès juridique, l'Équateur lutte encore pour que cette décision se traduise par des actions concrètes de la part des compagnies pétrolières.

En février 2020, ces résultats ont donné lieu à la campagne « ¡Apaguen Los Mecheros! », qui a conduit à une action en justice auprès du tribunal de Nueva Loja pour un arrêt total du torchage du gaz en Équateur. Bien que rejetée initialement, en janvier 2021, la Cour a accepté la requête, accordant aux entreprises 18 mois pour fermer tous les sites de torchage du gaz à proximité des zones peuplées et jusqu'en 2030 pour mettre fin à toutes les activités de torchage du gaz. Malgré ce succès juridique, l'Équateur lutte encore pour que cette décision se traduise par des actions concrètes de la part des compagnies pétrolières.

6.4.2 Améliorer les pratiques d'extraction du charbon au Myanmar

Après la découverte de gisements de charbon dans la région de Ban Chaung, en 2011, le gouvernement du Myanmar a accordé à la East Star Company une licence d'extraction de charbon d'une durée de 25 ans. En 2015, les habitants ont commencé à remarquer la présence de



cendres incandescentes dans un grand tas de déchets à proximité du site d'extraction. Outre la pollution atmosphérique causée par la combustion, ce phénomène a provoqué un grave inconfort pour les résidents en raison du risque d'incendies de forêt. Suite à de multiples signalements, en 2017, le gouvernement a ordonné à la East Star Company d'améliorer ses pratiques de gestion des déchets. L'entreprise a répondu en recouvrant le tas de déchets d'une couche d'un mètre de terre et de feuilles de bananier, qui s'est rapidement mise à s'éroder. Au cours de l'année suivante, des volontaires locaux ont signalé 47 cas de cendres incandescentes ou d'épisodes de combustion, mettant en évidence l'inefficacité des mesures de réhabilitation entreprises par l'entreprise.

Au début de 2019, un scientifique de l'Université Naresuan (Thaïlande) a impliqué la communauté locale dans un projet de science citoyenne (*[citizen science](#)*) sur la gestion des risques liés aux déchets de l'extraction du charbon. L'initiative a démarré à l'été 2019 avec deux enquêtes de terrain où des preuves de combustion lente au sol ont été recueillies à l'aide de caméras thermiques et visuelles. L'équipe a également utilisé des dispositifs portables pour détecter les gaz typiquement associés à la combustion du charbon, notamment les COV, SO₂, H₂S et monoxyde de carbone. Des analyses chimiques d'échantillons d'eau et de sol ont en outre confirmé la présence d'une contamination par drainage acide, avec des valeurs de pH comprises entre 2,3 et 3,1 (Section [3.2.2](#)). L'équipe a aussi analysé des photos et rapports d'incidents passés, des résultats de prélèvements indépendants et des évaluations sanitaires collectées auprès de la population locale entre 2015 et 2019.

Après la collecte des données, le chercheur a formé les résidents aux différentes méthodes possibles de gestion des déchets issus de l'extraction du charbon et a animé la discussion. Bien que les habitants



préféraient la cimentation, l'extinction des incendies et l'élimination externe, ils se sont également déclarés ouverts à l'étanchéification superficielle – la pratique choisie par l'entreprise – à condition qu'un système de surveillance environnementale à long terme soit mis en place. Cette contribution, fruit des informations collectées auprès de la communauté, devait être prochainement transmise à l'administration locale pour évaluer les actions correctives entreprises par East Star Company.



Illustrations by Storyset

7. Références sélectionnées et lectures recommandées



Co-funded by
the European Union



www.ericaproject.eu



UNIVERSITAT DE
BARCELONA



UNIWERSYTET
IM. ADAMA MICKIEWICZA
W POZNANIU



Ce projet a reçu un financement du programme Erasmus+ 2023 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention n° 2023-1-NL01-KA220-ADU-000154929. Financé par l'Union européenne. Les points de vue et avis exprimés n'engagent toutefois que leur(s) auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'Union européenne ou de l'Agence exécutive européenne pour l'éducation et la culture (EACEA). Ni l'Union européenne ni l'EACEA ne sauraient en être tenues pour responsables.

Section 2

Cette section est basée sur le matériel pédagogique de l'Autorité Nationale Italienne pour les Hydrocarbures (« [Conosciamo il gas e il petrolio](#) »), du Smithsonian National Museum of Natural History (« [What are fossil fuels?](#) ») et de l'Union of Concerned Scientists (« [How coal works](#) ») ; le livre [Petroleum formation and occurrence](#) (Tissot et Welte, Springer, 1987) ; la publication « [Petrolio e biodiversità in Val d'Agri](#) » de Diantini (2016) ; et le guide [EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook](#) (2023). Les informations sur le torchage du gaz (Encadré 1) proviennent de [Facchinelli et al. \(2020\)](#), du site [Earthworks](#) et du site de la [Banque Mondiale](#).

Section 3

La Section 3.1 est basée sur la publication [EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook](#) (2023), en particulier sur les sections 1.B.1.a, 1.B.2.a.i, 1.B.2.b, 1.B.2.c et 2.B. Des informations plus détaillées sur la radioactivité naturelle des eaux usées peuvent être trouvées dans les documents suivants : [USGS Fact Sheet FS-142-99 \(1999\)](#) et [Hosseini et al. \(2012\)](#). Les informations présentées dans les Encadrés 2 et 3 proviennent principalement [TPH Risk Evaluation at Petroleum-Contaminated Sites](#) (Chapitre 4, 2018) et [manuel de l'analyseur d'hydrocarbures UVF-Trilogy](#).

Les lignes directrices relatives à la qualité de l'air sont tirées des documents suivants : [WHO Global Air Quality Guidelines](#) (2021) et [Air Quality Guidelines for Europe](#) (deuxième édition, 2000). Les valeurs de référence pour les COV ont été obtenues sur le site de [l'Agence fédérale allemande](#) de l'environnement (300 µg/m³ ; valeur en

intérieur) et dans le texte de la [EU Industrial Emission Directive \(Directive 2010/75/EU\)](#) (2 000 µg/m³). Les lignes directrices pour la qualité de l'eau proviennent du document [Guidelines on Recreational Water Quality, Volume 1: Coastal and Fresh Waters](#) (2021). D'autres documents utiles, non utilisés directement dans le texte, sont [Guidelines for Drinking Water Quality](#) (4e édition, 2022) et [Guidelines for Drinking Water Quality: Small Water Supplies](#) (2024).

Les normes de qualité environnementale auxquelles il est fait référence dans le texte sont les plus récentes disponibles au moment de la rédaction, notamment la [EU Air Quality Directive](#) (Directive 2008/50/CE) et la [Environmental Quality Standards Directive](#) (Directive 2013/39/UE). D'autres réglementations pertinentes dans l'Union européenne, non explicitement mentionnées, incluent l'[Industrial Emission Directive](#), la [Drinking Water Directive](#), la [Water Framework Directive](#) et la [Groundwater Directive](#). Pour les composés non réglementés dans l'UE, le lecteur est renvoyé à l'Agence américaine de protection de l'environnement (par exemple pour l'[air](#)), au [Canadian Council of Ministers of the Environment](#), ou à des agences d'autres pays.

Des informations supplémentaires sont disponibles dans le document de revue sur les [outils et technologies existants pour la surveillance environnementale](#), accessible sur le site d'ERICA.

Section 4

Si des informations supplémentaires et des détails techniques sur les instruments sélectionnés ne sont pas directement fournis dans le texte, ils peuvent être trouvés dans la revue technique sur les [instruments et les technologies existantes pour la surveillance environnementale](#) disponible sur le site d'ERICA.

Les données relatives aux capteurs Aeroqual S500 dans la Figure 5 ont été obtenues sur le [site du fabricant](#). Les limites de détection (LD) en ppm ont été converties en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ selon la formule suivante : $\text{LD } [\mu\text{g}/\text{m}^3] = \text{LD } [\text{ppm}] * \text{PM } [\text{g}/\text{mol}] * 1000 / 24,45$, où PM est le poids moléculaire. Pour les COV totaux, nous avons utilisé un poids moléculaire moyen de 100 g/mol.

Les données de Radiello dans la Figure 7 ont été fournies par le fabricant. Les limites de détection sont de 0,05 – 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (BTEX ; exposition de 7 jours) ; 0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le 1,3-butadiène (exposition intérieure de 8 heures) ; 1 ppb (= 1,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour le H₂S (exposition de 1 jour) ; 1 ppb (= 2,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour le SO₂ (exposition de 7 jours) ; et 1 ppb (= 1,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour le NO₂ (exposition de 7 jours). Les données pour l'Aeroqual S500 proviennent de la Figure 5.

Section 5

Les pratiques socio-politiques présentées dans la Figure 9 sont principalement issues des travaux de [Marres \(2018\)](#) sur le concept de « démocratie de la connaissance », de [Visvanathan \(2005\)](#) concernant la « justice cognitive », et de Functowicz et Ravetz ([1993](#), [2003](#) sur la « science post-normale »). Parmi les autres auteurs importants figurent Barbara Allen, promotrice du projet de science participative à Marseille (Section [6](#)) et auteure de plusieurs livres et articles sur la science citoyenne pour la justice environnementale (par exemple, Allen, 2003 ; Allen, 2017 ; Allen, 2018), ainsi que Leona F. Davis, qui dans une publication récente a analysé des projets de science citoyenne ayant entraîné un changement social ([Davis and Ramirez-Andreotta, 2021](#)). Une liste complète des références bibliographiques est disponible dans notre revue sur les meilleures pratiques pour des

connaissances exploitables (actionable knowledge), document accessible sur le site du projet.

Les meilleures pratiques socio-techniques ont été résumées dans le document [Best Practices in Citizen Science for Environmental Monitoring](#) (Commission européenne, 2020) ainsi que dans deux publications académiques : [Turbè et al. \(2019\)](#) et [Hecker et al. \(2018\)](#).

Section 6

Pour plus d'informations sur les initiatives de *citizen science* présentées dans la Figure 10, consultez, pour la Val d'Agri, le site de [COVA Contro](#) et l'article de [Diantini \(2016\)](#) ; pour Muskiz, le site web de [Coordinadora Anticoke](#) ; pour Marseille, [Jeanjean et al. \(2023\)](#), le site web de [VOCE](#) et le site web d'[EPSEAL-FOS](#).. Pour des informations plus détaillées sur les initiatives citées dans la Figure 10 et la Section 6, consultez notre [revue sur la citizen science pour la surveillance environnementale](#) disponible sur le site du projet.