

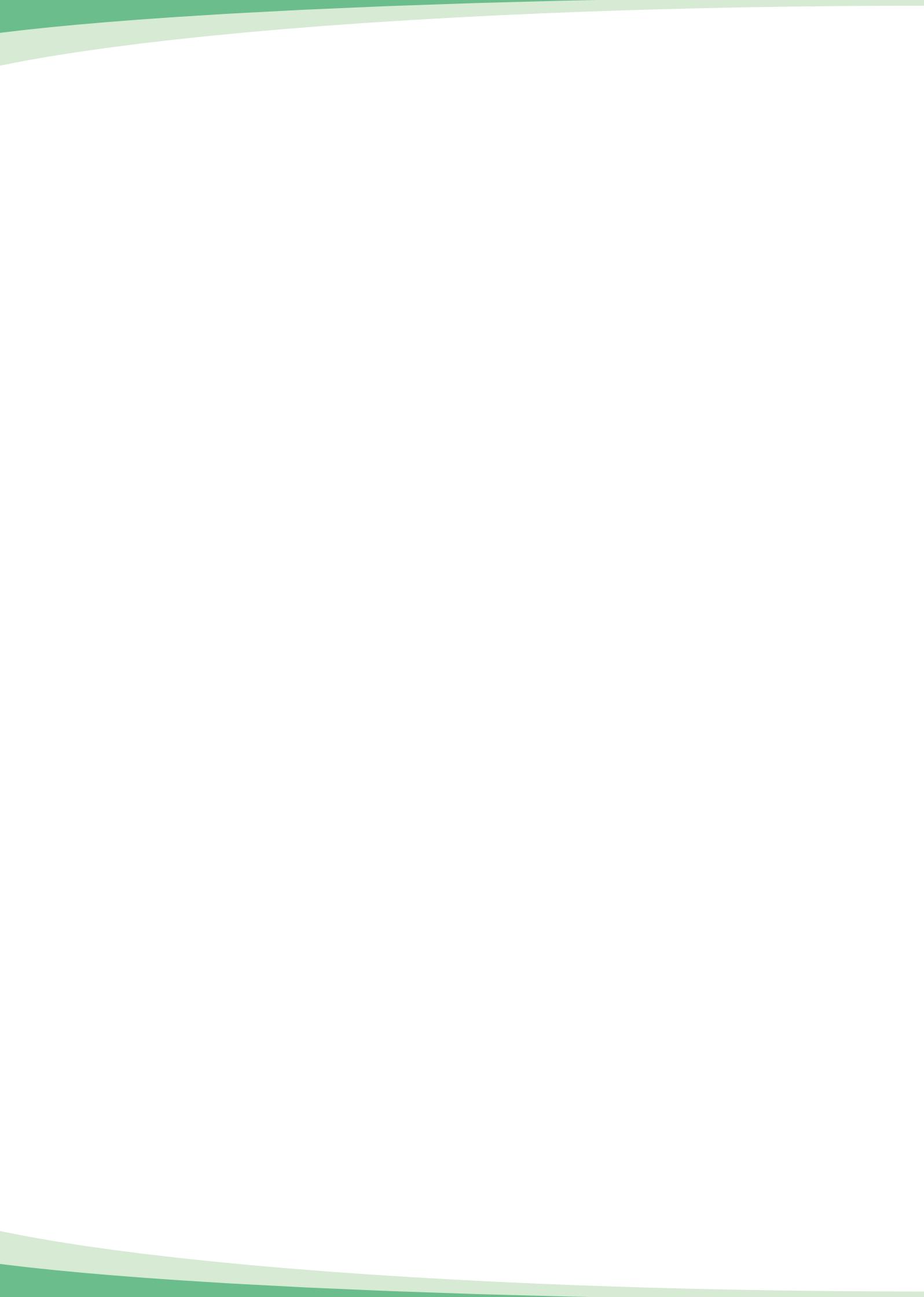


Livre Blanc

-

Outil d'aide à la décision : pour une meilleure prise en compte des enjeux du changement climatique en région Hauts-de-France





SOMMAIRE

5	Préface
7	Introduction générale
9	Cartographie du territoire
10	I. Etat des lieux de la qualité de l'air en milieu urbain et rural
13	● 01. Une influence significative des émissions liées à la combustion de biomasse sur la pollution particulaire en saison froide.
15	● 02. Enjeux de la régulation des émissions de particules ultrafines issues des transports.
17	● 03. Les particules industrielles et leur dispersion au-dessus de la ville.
19	● 04. Influence de la pollution trans-frontalière sur la qualité de l'air en région Hauts-de-France.
21	● 05. La qualité de l'air : une question qui se pose également en milieu rural. COBIACC - une campagne d'observations d'envergure.
24	II. Dynamique des milieux et de la biodiversité
27	● 06. Qualité de l'air et changement climatique : quelles interactions ? quel est le rôle de la chimie ?
29	● 07. Quand les gaz se transforment en particules.
31	● 08. Importance du suivi à long terme des observations atmosphériques.
33	● 09. Temps de pluie et qualité de l'eau.
35	● 10. Questionner l'impact des politiques publiques sur la qualité de l'eau de la Marque : une analyse rétrospective.
37	● 11. Processus de colonisation et de dispersion en milieux fortement anthropisés : exemple sur deux espèces de crapaud.
39	● 12. Augmentation des surprises climatiques dans l'océan : conséquences sur l'équilibre des écosystèmes marins.
42	III. Atténuation du changement climatique et perspectives d'adaptation
45	● 13. Enquête sur la perception des populations du changement climatique : quels sont les leviers et les freins au passage à l'action ?
47	● 14. Atténuation du changement climatique par l'utilisation de biocarburants.
49	● 15. Atténuation des effets du changement climatique sur les écosystèmes par le paillage.
51	● 16. Favoriser le service écosystémique de pollinisation en ville dans un contexte de changement climatique.
53	● 17. Suivi de la connectivité entre dunes littorales au moyen de la Pensée des dunes comme espèce indicatrice.
55	● 18. Remédier aux carences en fer de l'océan pour préserver sa capacité d'absorption du CO ₂ .
58	IV. Impacts sur la santé humaine
61	● 19. Modèles expérimentaux <i>in vitro</i> et <i>in vivo</i> pour comprendre les effets de la pollution atmosphérique et des changements climatiques sur la santé.
63	● 20. Analyse en population de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique.
65	● 21. Cartographie d'indices de vulnérabilité et de résilience des territoires face au changement climatique.
68	Glossaire
69	Annuaire
70	Remerciements

CODE COULEURS et PICTOGRAMME

● Sciences humaines et sociales ● Réservoir eau : rivière et océan ● Réservoir atmosphère et combustion ● Biodiversité ● Santé ● Focus pratique

Préface

Changement climatique, érosion de la biodiversité, pollution de l'eau ou de l'air : face aux enjeux environnementaux et leurs implications en matière de santé, il y a plus que jamais besoin de construire des connaissances solides, spécifiques à chaque contexte, à chaque région, pour comprendre les causes, les mécanismes, les conséquences, et éclairer les leviers d'action et les choix de société.

Cela demande de nouvelles approches, aussi bien pour co-produire ces connaissances, que pour les partager.

Porté par le dynamisme de la communauté scientifique en sciences de l'environnement des Hauts-de-France, le projet CLIMBIO, soutenu dans le cadre d'un Contrat Plan Etat-Région, représente un effort impressionnant de structuration d'un réseau interdisciplinaire et de production de connaissances nouvelles. La prise en compte des besoins d'informations en lien avec les problématiques régionales ouvre des voies de recherches très larges, visant à des ruptures de connaissances aussi bien qu'à des applications immédiates.

Ce livre blanc illustre aussi un effort majeur pour rendre accessible ces connaissances, grâce à des fiches très claires et synthétiques, qui expliquent les enjeux, les méthodes scientifiques, décrivent les résultats obtenus grâce au financement de ce projet de recherche, et les nouvelles perspectives ainsi ouvertes. Autant de motivations pour renforcer cette dynamique régionale, et la poursuivre !

Ce formidable travail reflète le dynamisme et le rayonnement des jeunes scientifiques, des chercheuses et chercheurs impliqués dans ce projet, un dynamisme que j'ai pu apprécier lors de multiples interactions quand j'ai été invitée à la 2ème journée scientifique Climibio à Lille, au printemps 2019. Je félicite tout particulièrement les coordinateurs du projet Climibio, Xavier Vekemans et Pascale Desgroux, pour la mobilisation de l'intelligence collective, pour les progrès des connaissances vis-à-vis des enjeux environnementaux, et pour cet outil d'aide à la décision que constitue ce livre blanc.

Bonne lecture !

Valérie Masson-Delmotte

Directrice de recherches CEA, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement /
Institut Pierre Simon Laplace / Université Paris Saclay
Co-présidente du groupe I du GIEC (bases physiques du changement climatique) pour le
6ème cycle d'évaluation

Introduction générale

Le projet CLIMIBIO est un projet de recherche pluridisciplinaire en lien avec le changement climatique. Il est né d'une motivation très forte des chercheurs et chercheuses en sciences de l'environnement de la région Hauts-de-France de contribuer à une meilleure compréhension de ce défi pour l'humanité et les écosystèmes, en se plaçant à l'échelle du territoire des Hauts-de-France. Le projet a bénéficié d'un financement dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région (CPER) 2015-2020 et du Programme Opérationnel FEDER Nord-Pas-de-Calais 2014-2020 de l'Union Européenne. Il a joué un rôle fortement structurant dans le domaine des sciences environnementales et a impliqué 16 équipes ou laboratoires de recherche, associés à 9 partenaires institutionnels (Université de Lille, Institut Mines Télécom Nord Europe, Université du Littoral Côte d'Opale, CNRS, INSERM, Université d'Artois, Junia, Institut Pasteur, CHU Lille) regroupant un total de 255 scientifiques permanents. Le projet a été soutenu à hauteur de 14,7 M€ (région Hauts-de-France : 4,1 M€ ; Etat : 1,1 M€ ; FEDER : 5,8 M€ ; partenaires institutionnels : 3,7 M€). Il a permis d'acquérir des instruments d'observation, d'expérimentation et d'analyse à hauteur de 4,9 M€ et de recruter des personnels contractuels de recherche ou d'appui à la recherche à hauteur de 5,1 M€, ce qui correspond à 149 CDD de un an.

Les efforts de recherche à l'échelle internationale ont abouti à prouver que les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités anthropiques ont conduit à une élévation continue de la température de notre planète depuis des décennies. Le réchauffement induit engendre à son tour de multiples répercussions environnementales sur, par exemple, la composition et le fonctionnement des écosystèmes, la régulation des précipitations, la fonte des glaciers, la hausse du niveau des mers. Dans le cas de la biodiversité, les effets du changement climatique contribuent, avec d'autres phénomènes tels que les changements d'occupation des territoires, l'exploitation directe de certaines espèces d'intérêt économique, et la pollution, à une augmentation sans précédent des taux d'extinction d'espèces et à la fragilisation de certains écosystèmes. Par ailleurs, la qualité de l'air et des eaux est non seulement impactée par les activités humaines, mais aussi par le changement climatique par le biais d'interactions complexes. En effet, le changement climatique agit sur les déplacements des masses d'air, la formation des nuages et la composition chimique de l'atmosphère. Il s'ensuit que les études sur les impacts du changement climatique sont intrinsèquement liées à celles liées à la qualité de l'air et du réservoir eau.

Le projet CLIMIBIO s'est attelé à travailler à la fois dans des champs disciplinaires établis (qualité de l'air et des eaux, santé, dynamique de la biodiversité, sciences humaines et sociales) tout en favorisant les synergies interdisciplinaires. Les objectifs de recherche ont concerné une large gamme de thématiques et questions scientifiques allant du très fondamental et général à des applications concrètes et spécifiques en lien avec des problématiques régionales en Hauts-de-France.

Afin de rendre compte de ce travail, nous avons opté pour la réalisation de ce Livre Blanc. Celui-ci a pour objectif de restituer une partie de l'excellence du travail de recherche conduit au sein de CLIMIBIO en fournissant des données objectives sur les mesures de l'impact du changement climatique et sur les actions qu'il est possible d'entreprendre. Il se veut être une interface entre la sphère scientifique et la sphère publique et politique. Dans ce Livre Blanc, nous avons sélectionné quelques contributions concrètes qui illustrent l'importance du financement public de la recherche dans le domaine du changement climatique et de l'environnement en général.

L'ouvrage s'organise autour de 21 fiches thématiques réparties au sein de 4 thèmes :

- Etat des lieux de la qualité de l'air en milieu urbain et rural ;
- Dynamique des milieux et de la biodiversité ;
- Atténuation du changement climatique et perspectives d'adaptation ;
- Impacts sur la santé humaine.

Un sommaire détaillé permet au lecteur ou à la lectrice de se reporter aisément à la fiche de son choix. Chaque fiche comporte un recto présentant des aspects généraux du thème choisi et un verso plus académique illustrant l'apport concret du financement de CLIMIBIO à l'augmentation du savoir. Le livre se conclut par un glossaire et une liste de personnes disponibles pour servir de relais auprès des différentes instances œuvrant à une meilleure prise en compte des effets du changement climatique.

Nous vous souhaitons une agréable lecture et espérons que ce Livre Blanc contribuera à alimenter vos réflexions avec des éléments concrets et pertinents.

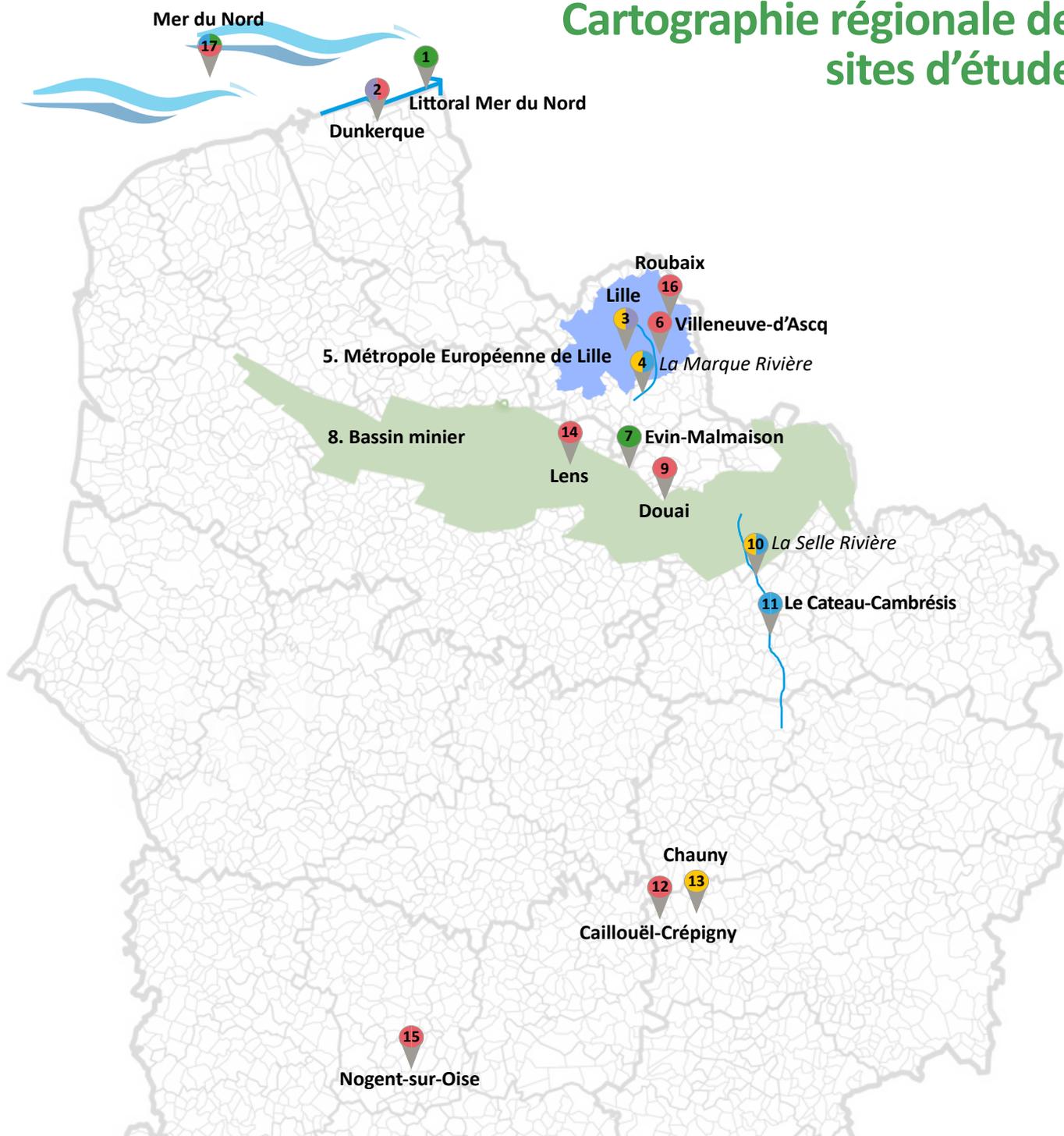
Xavier Vekemans

Professeur des Universités (Université de Lille - Laboratoire EEP)
Co-coordonateur du Contrat Plan Etat-Région CLIMIBIO

Pascale Desgroux

Directrice de recherche au CNRS (Laboratoire PC2A)
Co-coordinatrice du Contrat Plan Etat-Région CLIMIBIO

Cartographie régionale des sites d'études



LEGENDE

1. Littoral Mer du Nord

- Connectivité entre dunes littorales (p.53)

2. Dunkerque

- Etudes en lien avec la qualité de l'air (p.13 + p.17 + p.29)
- Analyse en population de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique (p.63)

3. Lille

- Enquête en sciences humaines et sociales. (p.45)
- Analyse en population de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique (p.63)

4. La Marque Rivière

- Etude sur la qualité des eaux de surface (p.33)
- Analyse rétrospective de l'impact des politiques publiques sur la qualité de l'eau (p.35)

5. Métropole Européenne de Lille

- Etude sur les pollinisateurs (p.51)

6. Villeneuve-d'Ascq

- Etude en lien avec la qualité de l'air (p.31)

7. Evin-Malmaison

- Effets du paillage sur les écosystèmes (p.49)

8. Bassin minier

- Etude sur la diversité génétique des crapauds (p.37)

9. Douai

- Etude en lien avec la qualité de l'air (p.13)

10. La Selle Rivière

- Etude sur la qualité des eaux de surface (p.33)
- Analyse rétrospective de l'impact des politiques publiques sur la qualité de l'eau (p.35)

11. Le Cateau-Cambrésis

- Etude sur la qualité des eaux de surface (p.33)

12. Caillouël-Crépigny

- Etudes en lien avec la qualité de l'air (p.13 + p.29)
- COBIACC - campagne de mesures intensive (p.21)

13. Chauny

- Enquête en sciences humaines et sociales. (p.45)

14. Lens

- Etudes en lien avec la qualité de l'air (p.13 + p.29)

15. Nogent-sur-Oise

- Etude en lien avec la qualité de l'air (p.13)

16. Roubaix

- Etudes en lien avec la qualité de l'air (p.13 + p.29)

17. Mer du Nord

- Etude sur les surprises climatiques dans l'océan p.39)
- Etudes sur les carences en fer de l'océan (p.55)

CODE COULEURS et PICTOGRAMME

● Sciences humaines et sociales ● Réservoir eau : rivière et océan ● Réservoir atmosphère et combustion ● Biodiversité ● Santé ● Focus pratique

|

-

Etat des lieux de la qualité de l'air en milieu urbain et rural



I - Introduction

La pollution atmosphérique impacte la santé des populations, notre environnement et a également des conséquences directes et indirectes sur le changement climatique. Cette pollution induit un coût social conséquent, estimé à environ 166 milliards d'euros^a par an en Europe, selon les derniers chiffres du rapport publié par l'Alliance Européenne pour la Santé Publique (EPHA) en 2020.

La région Hauts-de-France est un territoire diversifié, au carrefour de l'Europe (à la fois proche du Benelux et de l'Île-de-France) et qui comporte de nombreux espaces urbains, industriels, côtiers et ruraux. Les préoccupations environnementales de la Métropole Européenne de Lille, de la Communauté Urbaine de Dunkerque, ou encore de communes telles que Caillouël-Crépigny (Aisne) sont forcément différentes. Par exemple, les particules atmosphériques en suspension dans l'air n'ont pas la même origine en fonction de la zone géographique. Elles peuvent être d'origine naturelle (pollens, éruptions volcaniques, incendies de forêts, etc.) ou d'origine anthropique (transports, chauffages individuels et collectifs, industries, agriculture et élevage, incinération des ordures ménagères, activités domestiques, etc.). Cette connaissance territoriale des sources, mais également des processus et des réactions physico-chimiques est un prérequis à intégrer pour mener à bien les différentes concertations et plans d'actions climat et pollution. En effet, il existe des interactions fortes entre pollution atmosphérique et changement climatique. Le climat en région change et depuis 1955 on constate une tendance moyenne à l'élévation de la température de 0,29°C par décennie^b. Cette hausse des températures n'est pas le seul symptôme puisque les épisodes de fortes pluies ou les vagues de chaleur sont en hausse et impactent la formation, la durée de vie et la distribution des polluants dans l'atmosphère.

Ainsi, si des mesures existent déjà en cas d'épisode de pollution^c (vitesses réglementaires réduites sur certains axes routiers ou encore instauration de la circulation différenciée), les travaux de recherche revêtent une importance majeure pour étayer les décisions et comprendre les différents paramètres en lien avec la qualité de l'air. Pour faire face aux défis rencontrés par la région Hauts-de-France sur cette thématique, les travaux engagés dans le cadre du CPER CLIMIBIO permettent une meilleure compréhension des émissions liées aux phénomènes de combustion, notamment celle de la biomasse (**Fiche 01**) ou encore celles issues des moteurs qui conduisent à la mise en place de normes européennes plus strictes pour les particules issues des transports (**Fiche 02**). De plus, les travaux menés apportent des compléments concernant les émissions liées aux activités industrielles et en lien avec les facteurs météorologiques (**Fiche 03**), les flux d'air en provenance des régions frontalières et lointaines qui apportent eux aussi leurs lots de particules (**Fiche 04**), et les émissions de particules en zones rurales (**Fiche 05**).

^ahttps://www.francetvinfo.fr/sante/environnement-et-sante/la-pollution-de-l-air-coute-166-milliards-d-euros-par-an-en-europe-selon-un-rapport_4150189.html

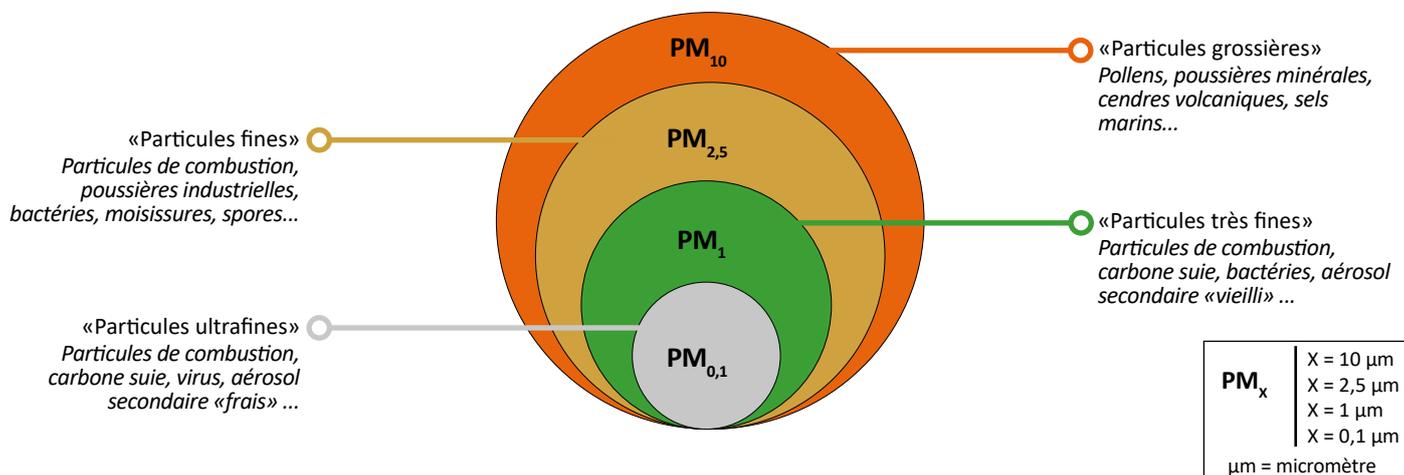
^b<http://www.observatoireclimat-hautsdefrance.org/Les-ressources/Ressources-documentaires/Evolution-climatique-en-Hauts-de-France-donnees-2017>

^c<https://www.nord.gouv.fr/Actualites/Actualites/Pollution-atmospherique>

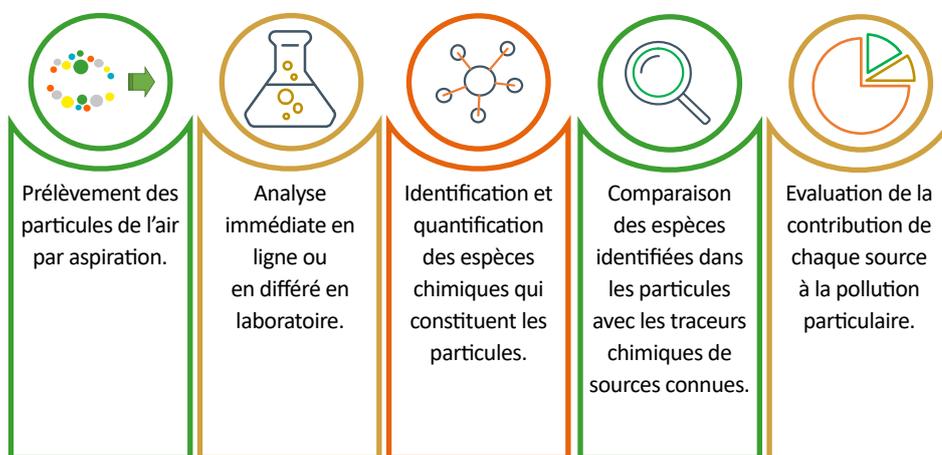


01. Une influence significative des émissions liées à la combustion de biomasse sur la pollution particulaire en saison froide

Les particules atmosphériques en suspension dans l'air sont composées d'un mélange hétérogène de matière minérale et organique, d'origine naturelle et anthropique, c'est-à-dire liée aux activités humaines. Les particules anthropiques sont responsables de la plupart des effets toxiques sur la santé et les écosystèmes. Ce sont celles sur lesquelles on peut agir pour diminuer la pollution atmosphérique. Elles résultent de nos activités quotidiennes (transport, chauffage des locaux, préparation de repas...) et sont émises par nos différents secteurs d'activité (production et utilisation d'énergie, industrie et commerce, agriculture et élevage...). **Connaître les sources primaires à l'origine des particules dans l'air est essentiel pour agir contre la pollution particulaire.** L'une des méthodes pour identifier les sources affectant un lieu donné est d'analyser la composition chimique des particules, en fonction de leur taille.



La connaissance de la composition chimique des particules est la clé pour déterminer leurs sources



Définition

Un **traceur chimique** est une espèce qui est émise majoritairement par un seul type de source. Par exemple, le levoglucosan, une molécule issue de la décomposition thermique de la cellulose, est un traceur de combustion de biomasse.

Chiffre clé

50% au moins de la masse des particules PM₁₀ proviennent des activités humaines. Pour les PM₁, quelle que soit la saison, 40 à 50% des particules en métropole lilloise sont des aérosols carbonés d'origine anthropique.

Perspectives de gestion

Intérêts

- Connaître les sources anthropiques qui contribuent le plus à la pollution particulaire de l'atmosphère ;
- Décider sur quelles sources il faut agir pour diminuer la pollution.

Avantages

- Améliorer l'efficacité des actions de réduction de la pollution atmosphérique ;
- Suivre les améliorations de la qualité de l'air suite aux actions mises en place ;
- Prévenir les effets dommageables sur la santé humaine et les écosystèmes.

Analyseur en ligne de gaz et particules inorganiques (MARGA).

Analyseur en ligne d'aérosols carbonés (carbone suie) liés à la combustion (Aethalomètre).



Préleveur de filtres à haut débit (Digital DA80).



Analyseur en ligne de particules organiques et inorganiques (ACSM).



Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Introduction

Dans le cadre du CPER CLIMIBIO, l'étude de la composition physico-chimique des particules atmosphériques et la recherche de leurs sources ont été menées à différentes échelles et selon différents objectifs :

- pour les PM_{10} (résolution temporelle : 24h) sur 4 sites urbains (Lens, Nogent-sur-Oise, Roubaix, Rouen) et un site naturel dans les Ardennes (Revin) ;
- pour les particules plus fines ($PM_{2,5}$ ou PM_{1}) à résolution horaire : à proximité de la zone industrielle de Dunkerque, dans le Bassin Minier (Douai), dans une aire d'activités agricoles de l'Aisne (Caillouël-Crépigny) ou en métropole lilloise.

→ voir Fiche 05 : La qualité de l'air : une question qui se pose également en milieu rural. COBIACC - une campagne d'observations d'envergure. p.21.

2. Augmentation des particules issues directement de la combustion de biomasse en périodes froides

La combustion de biomasse en région Hauts-de-France est principalement liée à l'usage de bois-énergie à des fins de chauffage lors des périodes froides, même si une partie peut être imputée à l'éco-bouage de déchets agricoles ou de déchets verts par les particuliers, pourtant sujet à réglementation.

Cette activité anthropique génère directement des particules fines d'aérosols carbonés (émissions primaires), ainsi que des émissions gazeuses dues à la combustion, notamment les oxydes d'azote (NO_x) ou certaines espèces organiques – souvent toxiques, susceptibles de contribuer à la formation de particules secondaires.

→ voir Fiche 07 : Quand les gaz se transforment en particules. p.29.

La contribution de ce type de particules peut être estimée soit lors de campagnes de mesures sur le terrain ciblées sur les périodes hivernales (Figure 1), soit lors d'observations en continu par comparaison entre les saisons estivales et hivernales (Figure 2).

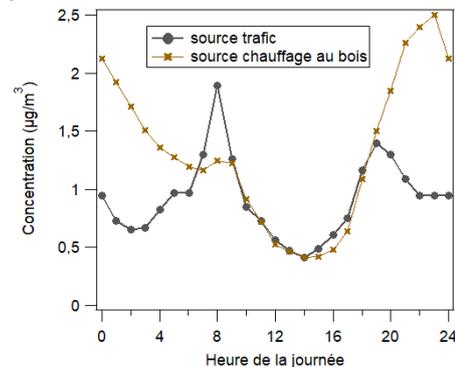


Figure 1 : Profils journaliers caractéristiques des sources locales d'aérosol organique identifiées dans la fraction PM_1 à Douai lors d'une campagne hivernale : trafic (pics aux heures de forte circulation automobile) et chauffage résidentiel au bois (pic intense en soirée).

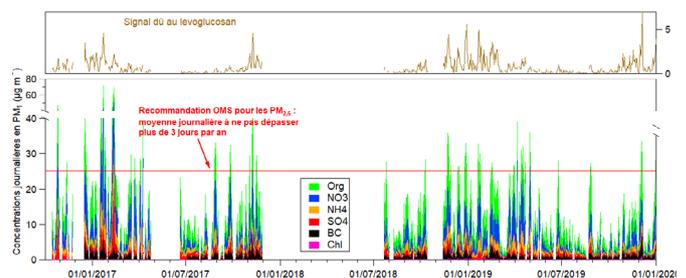


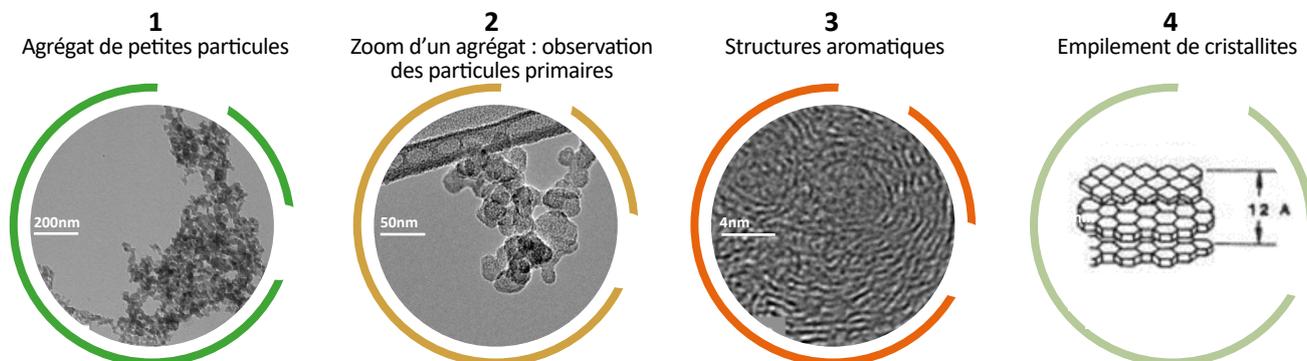
Figure 2 : Evolution temporelle des espèces chimiques identifiées dans les PM_1 en métropole lilloise (mesures réalisées via la Plateforme d'Observation de Lille à Villeneuve-d'Ascq) entre septembre 2016 et décembre 2019 : aérosol organique (Org), nitrate (NO_3), ammonium (NH_4), sulfate (SO_4), carbone suie (BC), ainsi que le signal lié au levoglucosan, traceur de combustion de biomasse. La ligne rouge indique le seuil recommandé par l'Organisation mondiale de la Santé à ne pas dépasser plus de 3 jours par an pour les $PM_{2,5}$.

Conclusions

En région Hauts-de-France, les particules les plus fines sont souvent sources de dépassements, avec une influence significative de celles liées à la combustion locale de biomasse en hiver. Cela confirme la nécessité de poursuivre les efforts pour une meilleure isolation des bâtiments, et pour des systèmes de chauffage moins polluants.

● 02. Enjeux de la régulation des émissions de particules ultrafines issues des transports

Le trafic routier est une source importante d'émissions de particules PM dont la distribution en taille est très large : PM_{10} , $PM_{2.5}$ ainsi qu'une forte proportion de particules submicroniques ($PM_{0.5} < 0,5 \mu m$). Des améliorations majeures apportées à la technologie des moteurs ainsi que l'utilisation de carburants alternatifs au cours des dernières années ont conduit à diminuer notamment les émissions de particules de suie. Ces progrès sont fortement incités par la mise en place de régulations sur les émissions de plus en plus restrictives. Ainsi, la législation européenne (EURO 6) limite à la fois la masse et le nombre de particules émises par les moteurs. Les processus d'abrasion des pneus, du freinage et de la chaussée sont aussi sources de particules.



Définition

Une particule de suie se présente sous la forme d'un agrégat de petites particules (1, 2) dites primaires (2, 3), quasi sphériques et constituées essentiellement de carbone. La taille des particules primaires se situe entre quelques nanomètres (nm) et quelques dizaines de nm. La particule primaire est formée d'un empilement de cristallites (4) composés de structures aromatiques.

Evolution des normes anti-pollution EURO

EURO 0	EURO 2	EURO 4	EURO 6
Texte de référence 88/77	Texte de référence 91/542(B)	Texte de référence 1999/96	Règlement (CE) n°595/2009
Mise en oeuvre : 1990	Mise en oeuvre : 1996	Mise en oeuvre : 2006	Mise en oeuvre : 2013
NOx (g/kWh) 14,4	NOx (g/kWh) 7	NOx (g/kWh) 3,5	NOx (g/kWh) 0,4
Particules (g/kWh) -	Particules (g/kWh) 0,15	Particules (g/kWh) 0,02	Particules (g/kWh) 0,01

Chiffre clé

44%

C'est le pourcentage de diminution des émissions de $PM_{2.5}$ due aux transports (tous types confondus) depuis 2000. En revanche, les émissions de particules $PM_{2.5}$ et PM_{10} dues au transport aérien ont augmenté de 30%.

Perspectives de gestion

Aspects sanitaires

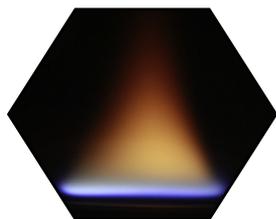
- La **législation** se concentre sur les **particules solides** de plus de **23 nanomètres de diamètre**. Elles peuvent être mesurées précisément avec les technologies (granulomètres) disponibles sur le marché ;
- L'Organisation mondiale de la Santé estime que **7 millions de personnes meurent chaque année à cause de l'exposition aux particules fines** ;
- Le **caractère cancérigène** des **particules Diesel** a été reconnu en 2012 par le Centre international de Recherche sur le Cancer.
- Les **particules de suie** en raison de leur petite taille et de la composition chimique sont très **nocives**. En effet, elles pénètrent dans l'organisme jusqu'aux alvéoles pulmonaires.

Efforts de développement

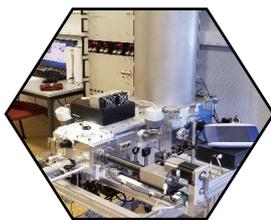
- **Constructeurs automobiles** et **chercheurs** sont mobilisés pour **limiter les émissions des particules ultrafines (PUF) $PM_{0.1}$** ;
- **Détecter et mesurer les PUF** par le développement de nouvelles technologies ;
- **Déterminer la composition chimique** des PUF avec une attention particulière à la **détection des HAP** (hydrocarbures aromatiques polycycliques) qui sont **identifiés comme hautement toxiques, mutagènes et / ou cancérigènes** ;
- L'utilisation de **systèmes portables de mesure des émissions (PEMS)** montés à bord des véhicules est une piste envisagée pour assurer une **meilleure surveillance des émissions**.

Spectromètre de masse haute résolution.

nanoSMPS.



Flamme de laboratoire formant des suies.



Oscilloscope rapide.



Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

Dans le cadre du projet européen PEMS4nano «Portable Nano-Particle Emission Measurement System» et de CLIMIBIO, une étude réunissant industriels et universitaires européens a porté sur la mise au point d'une technologie robuste et précise de mesure de particules (jusque 10 nm de diamètre) à l'émission de moteurs essence.



Photo : Distribution de suies (couleur jaune) au sein de la chambre de combustion d'un moteur Diesel.

1. Détection des suies dans les flammes ou à l'échappement

Nous avons développé la technique LII (Laser Induced Incandescence) dans le but de détecter les plus petites particules de suie émises par les systèmes de combustion. Des tailles aussi petites que 2-3 nm ont pu être identifiées. Ces particules sont également détectables après prélèvement au moyen de granulomètres (nanoSMPS). La technique LII a été appliquée à l'échappement du moteur dans le projet PEMS4nano.

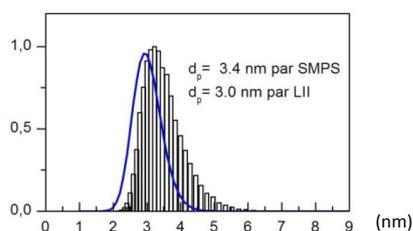


Figure : Comparaison de la distribution en taille (nanomètre) de nanoparticules de suie par les techniques LII et SMPS.

2. Analyse chimique des nanoparticules de suie

L'analyse de la composition chimique de surface des nanoparticules de suie est effectuée par désorption et ionisation laser couplée à la spectrométrie de masse. Le développement conjoint des méthodologies expérimentales et analytiques a permis d'atteindre une détection hautement résolue en masse et extrêmement sensible. De subtiles différences de composition chimique ont été révélées, permettant ainsi d'identifier l'impact des sources de production et des paramètres de combustion sur leur composition.

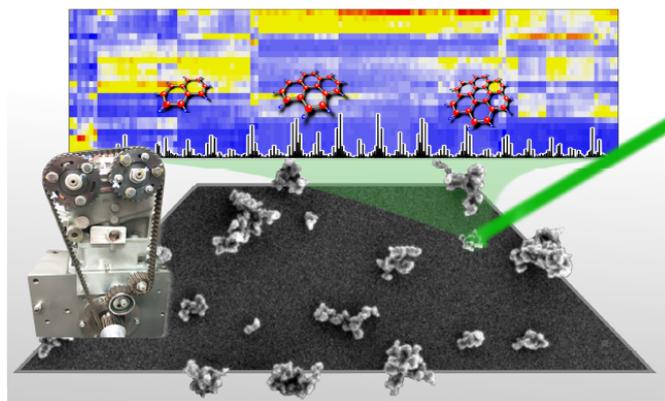


Figure : Représentation schématique de l'analyse par spectrométrie de masse de nanoparticules de suie émises par un moteur automobile.

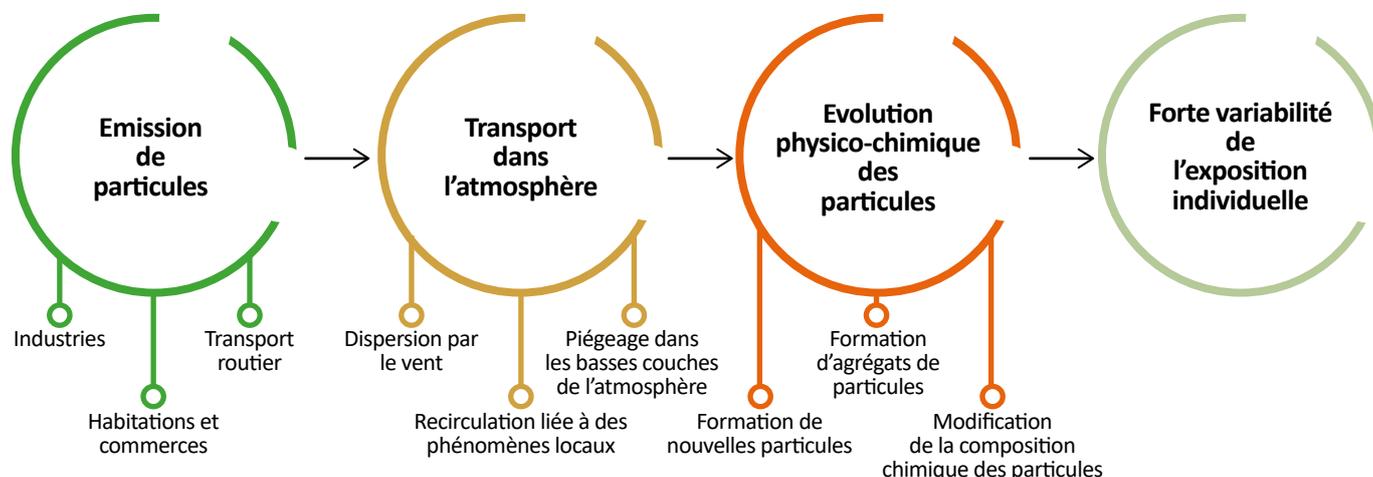
Ces analyses montrent une évolution importante de la composition chimique des suies avec leur taille, les nanoparticules les plus petites portant la fraction organique la plus importante. Suite à ces résultats, une recommandation a été rédigée par le Programme de Mesures des Particules (PMP) de la Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe afin d'abaisser la limite de mesure des particules émises par les moteurs automobiles de 23 nm actuellement à 10 nm.

Perspectives de recherche

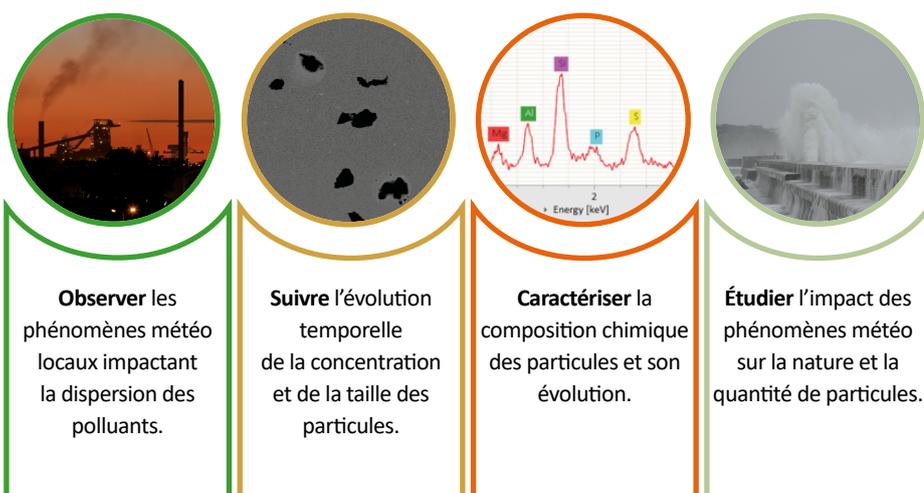
Le potentiel d'analyse des particules (taille, concentration, composition chimique) développé au cours de CLIMIBIO sera transposé pour étudier de grandes variétés d'aérosols émis par les systèmes de combustion, le transport (pneus, freinage), les aérosols atmosphériques, les micro/nano-plastiques etc.

03. Les particules industrielles et leur dispersion au-dessus de la ville

Les **particules atmosphériques (PM)** peuvent provenir de nombreuses sources dont les activités industrielles. Les **conditions météorologiques** favorisent leur **dispersion** dans l'atmosphère ou au contraire leur **stagnation**, ce qui aboutit dans ce dernier cas à des **pics de pollution**. En plus des émissions directes de particules, encore appelées **particules primaires**, on observe dans l'atmosphère la formation de nouvelles particules à partir de gaz précurseurs, par divers processus physico-chimiques. Ces **particules dites secondaires** s'ajoutent, voire modifient, les particules primaires directement émises dans les masses d'air et peuvent constituer une part non négligeable des PM.



Caractériser la variabilité à petite échelle de l'aérosol : comment ?



Définition

La **couche limite atmosphérique** est la partie basse de l'atmosphère dans laquelle se concentrent les polluants. Elle varie entre **50 et 300 m d'épaisseur la nuit**, alors qu'elle peut atteindre plus de **2000 m d'épaisseur aux heures les plus ensoleillées de la journée**. Dépendante de l'ensoleillement et des températures, elle est plus basse en hiver qu'en été.

Chiffre clé

22

Nombre moyen de jours de pollution en PM₁₀ par an, en région Hauts-de-France de 2017 à 2019 (seuil réglementaire d'information du public).

Caractériser la variabilité à petite échelle de l'aérosol : pourquoi ?

Intérêts

- **Améliorer la prévision des niveaux de pollution** par la prise en compte des phénomènes météorologiques locaux ;
- **Anticiper l'impact sur la pollution des phénomènes météo extrêmes** (canicules...) qui seront plus fréquents et intenses en raison du changement climatique.

Avantages

- **Industries** : choisir l'heure des rejets afin de maximiser la dispersion des polluants au plus loin ;
- **Collectivités** : adapter le plan de déplacement (notamment mobilités douces) afin de minimiser l'exposition des populations ;
- **Particuliers** : choisir l'heure et le lieu de ses activités extérieures afin de limiter son exposition à la pollution.



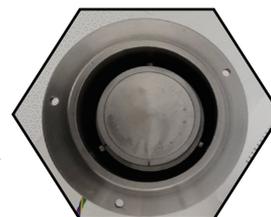
Périscope du lidar vent à balayage (Dunkerque, Halle aux Sucres).



Site d'étude installé sur le Dunkerquois.



Lidar profileur de vent et anémomètre à ultrasons (campagne COBIACC).



Système de prélèvement des particules atmosphériques (TRAPS).

Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Vers une cartographie des particules au-dessus de la ville

Les LIDARS (Light Detection And Ranging) permettent d'estimer la quantité de particules présentes le long d'un faisceau laser se propageant dans l'atmosphère. Les systèmes comme celui représenté sur la figure, équipés d'un périscope pour orienter le faisceau, permettent également de réaliser des balayages horizontaux au-dessus de la ville comme cela a été fait à Dunkerque.

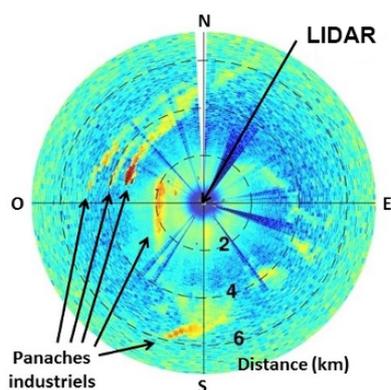


Figure : Cartographie des aérosols réalisée à l'aide d'un LIDAR.

Convertir l'intensité du signal lidar en nombre ou en masse de particules n'est pas simple. Plusieurs types de mesures *in-situ* ont été testés pendant 8 mois et il apparaît que, pour réaliser une cartographie des aérosols au-dessus de la ville, le plus efficace serait de mailler le territoire avec des mini-capteurs à bas coût afin de calibrer le signal lidar en temps réel.

2. Evolution temporelle de la composition des particules

Le TRAPS (Time-Resolved Atmospheric Particle Sampler) est un échantillonneur mis au point permettant d'obtenir des prélèvements de particules atmosphériques résolus dans le temps. Il permet ainsi d'observer, voire d'analyser par microscopie analytique par exemple, la taille, la morphologie et la composition élémentaire des particules, à un instant précis de la journée ou du mois échantillonné, selon la programmation réalisée du TRAPS.

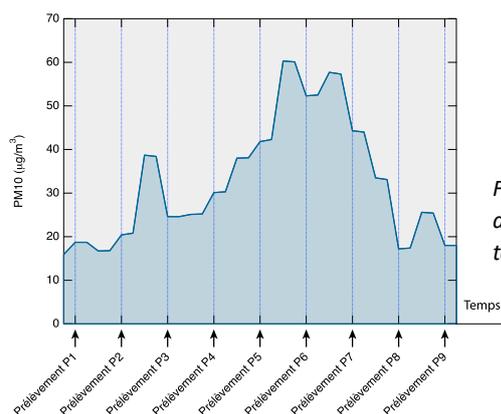


Figure : Evolution des PM_{10} au cours du temps.

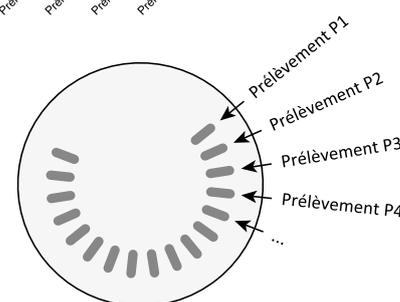


Figure : Support de prélèvement du TRAPS.

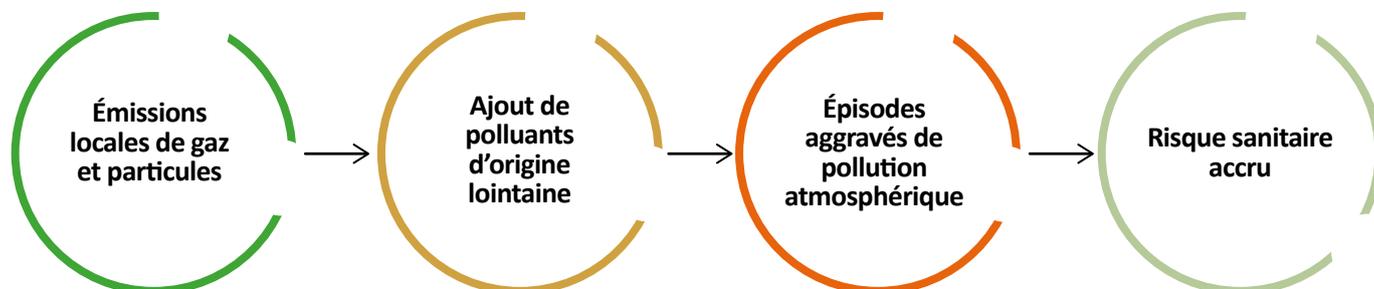
En collectant en continu, il permet *a posteriori* de renseigner par exemple un événement de pollution en analysant uniquement les traces d'impactions correspondant à la période temporelle de l'évènement considéré.

Perspectives de recherche

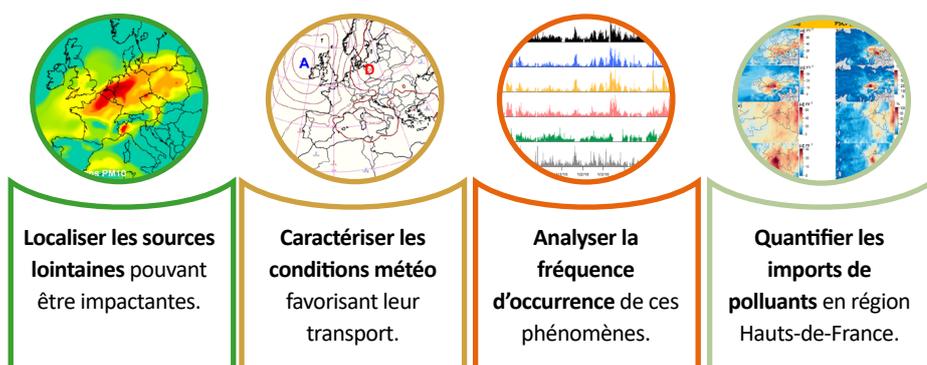
- Dans le cadre du projet Territoire d'Innovation « Dunkerque l'énergie créative » soutenu par le Grand Plan d'Investissement, un réseau de mini-capteurs à bas coût va être déployé sur le Dunkerquois, ce qui **permettra de tester la méthode de cartographie des aérosols** évoquée ci-dessus ;
- Une campagne intensive d'observations sera réalisée sur le Dunkerquois en 2021, avec un focus sur les événements de pollution. Elle nous permettra de **progresser sur notre compréhension de l'impact de la dynamique atmosphérique à l'échelle urbaine sur les caractéristiques physico-chimiques des particules de pollution.**

● 04. Influence de la pollution transfrontalière sur la qualité de l'air en région Hauts-de-France

Une forte densité de population associée à un trafic routier élevé ainsi que des activités industrielles, agricoles et des besoins énergétiques importants, font des Hauts-de-France **une région particulièrement affectée par la dégradation de la qualité de l'air**. A ces sources locales peuvent s'ajouter, de par sa situation géographique au cœur de l'Europe industrielle, des **sources d'origines lointaines**. Mieux comprendre le rôle de ces transports régionaux de polluants est donc nécessaire pour mettre en place, de manière efficace, des **mesures visant à améliorer la qualité de l'air** dans cette région en concertation avec les régions et pays limitrophes.



Nécessité de connaître l'impact des sources lointaines de polluants



Définition

Un **épisode de pollution** est le résultat de processus complexes incluant les **émissions locales**, les **transformations physico-chimiques**, les **conditions de dispersion** ainsi que les **apports régionaux** et les **dépôts**.

Chiffre clé

40% Pourcentage moyen, en masse, des particules PM₁₀ provenant du transport transfrontalier lors des épisodes de pollution particulaire observés en région.

Perspectives de gestion

Faits à retenir

- Les épisodes de pollution particulaire élevée, perçus localement, résultent à la fois de facteurs météorologiques, des émissions locales et du transport transfrontalier de polluants (40% en moyenne pour les PM₁₀) ;
- En raison de la prédominance des vents dans l'axe Sud-Ouest à Nord-Est, le transport transfrontalier de polluants s'effectue à double sens :
 - par vents de Nord-Est, la pollution particulaire issue des Pays-Bas, de Belgique et d'Allemagne impacte les Hauts-de-France ;
 - par vent de Sud-Ouest, ce sont les émissions originaires des Hauts-de-France qui impactent les régions voisines.

Comment agir ?

- **Structurer un réseau d'alerte des situations à risque de pollution particulaire élevée** (laboratoires de recherche, Atmo Hauts-de-France, DREAL Hauts-de-France...);
- **Prévoir et mettre en oeuvre les mesures de réduction locales des polluants** lors des situations à risque ;
- **Renforcer la coopération transfrontalière pour lutter contre la pollution atmosphérique.**

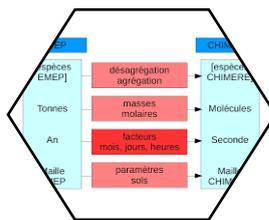
Modèle déterministe de chimie-transport CHIMERE.



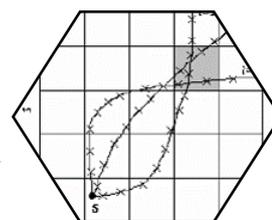
Estimation des quantités de polluants émis dans l'air (inventaire des émissions).



Méthode statistique sources- récepteurs.



Base de données de mesures de polluants.



Evaluation de la contribution des pays proches à la pollution atmosphérique aux PM₁₀

1. La méthodologie

La méthodologie développée dans le cadre du CPER CLIMIBIO trouve son originalité dans l'utilisation de 2 approches complémentaires :

1. Un modèle déterministe de chimie-transport (CHIMERE)

qui simule les émissions, le transport, les transformations physico-chimiques et les dépôts de polluants gazeux et particulaires. La démarche consiste à réaliser deux types de simulation : une première de référence dans laquelle l'ensemble des sources de pollution à l'échelle européenne est pris en compte et une seconde de test dans laquelle sont éteintes les sources de polluants dans une zone géographique spécifique. La contribution de cette zone géographique à la pollution particulaire en région Hauts-de-France est donc estimée en comparant les deux types de simulation.

2. Une méthode statistique, dite « sources-récepteurs »,

qui corrèle la fréquence de passage des trajectoires des masses d'air et leur temps de résidence au-dessus de zones géographiques (« sources » potentielles) avec les concentrations en particules, mesurées dans 12 stations des Hauts-de-France (sites récepteurs). Cette approche permet d'identifier les zones-sources impactant le plus probablement les Hauts-de-France.

Ces 2 méthodes sont largement utilisées dans la communauté des sciences atmosphériques pour étudier la qualité de l'air et ses impacts environnementaux et sanitaires. Notamment, elles peuvent permettre d'évaluer l'efficacité de stratégies de réduction d'émissions de polluants à l'échelle locale et régionale.

2. Les résultats

En cohérence avec la direction des principaux vents provenant du continent Européen, **3 zones géographiques pouvant impacter la qualité de l'air en région Hauts-de-France** sont étudiées pour l'année 2010, considérée comme année standard : les résultats issus des deux approches (déterministe et statistique) indiquent une **pollution transfrontière importante** depuis les **régions du proche Est (Near-East)** contribuant de 10 à 40% à la pollution en particules modélisée en région Hauts-de-France. **Les contributions les plus importantes ont lieu durant les pics de pollution.**

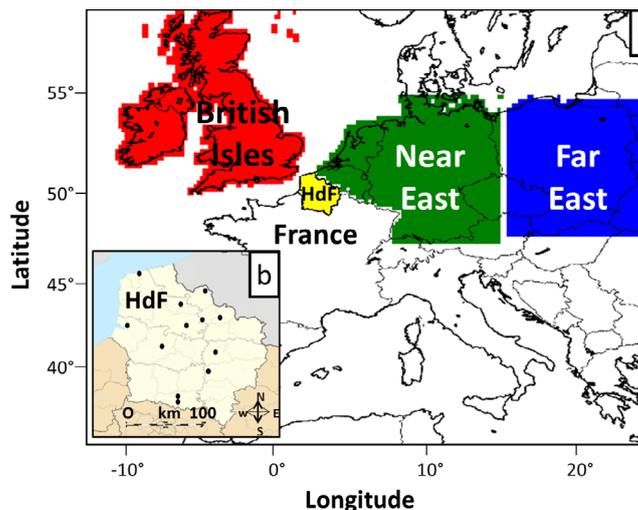


Figure :

a. Trois zones géographiques sources de pollution utilisées dans l'approche déterministe (modèle CHIMERE) pouvant impacter la région Hauts-de-France (jaune) : Îles Britanniques (rouge), Benelux-Allemagne-ouest République Tchèque (verte) et Pologne-Slovaquie-est République Tchèque (bleue).

b. L'encadré en bas à gauche indique les 12 sites de mesures de concentrations en particules utilisés dans l'approche statistique (sources-récepteurs)

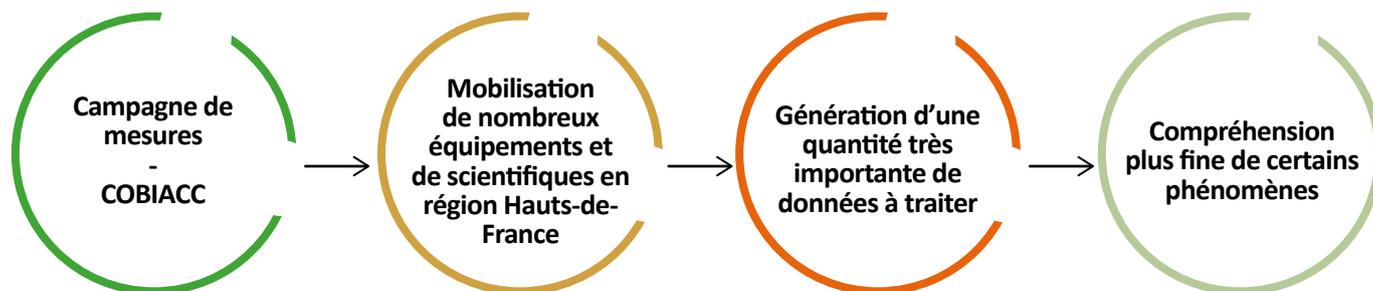
Les imports depuis les Îles Britanniques sont modérés, en moyenne de 8 à 15%. L'influence de l'Europe de l'Est (Far East) est peu fréquente mais ponctuellement significative (jusqu'à 50%) durant les épisodes de pollution les plus intenses. Cette étude montre également que **ces zones géographiques sources de pollution favorisent la formation de nitrates en région Hauts-de-France** (5 à 8% en moyenne), via l'import de gaz précurseurs. Sur une période plus longue de 2009 à 2013, **la modélisation statistique confirme que la pollution atmosphérique particulaire issue du proche Est (Benelux, Allemagne, ouest de la République Tchèque) impacte fréquemment la région Hauts-de-France**, y compris pendant les pics de pollution. Cependant, en conditions de vents faibles limitant le transport à longue distance, les centres urbains de la région (métropole lilloise) ou ceux qui la bordent (région parisienne) peuvent contribuer aussi significativement à la pollution atmosphérique en Hauts-de-France.

Perspectives de recherche

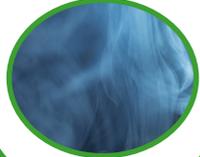
- Améliorer la prévision des situations de dépassements de seuils de concentration réglementaires et, plus généralement, de risque de pollution élevée ;
- Disposer d'informations en temps réel permettant de comprendre les niveaux de pollution observés localement ;
- Quantifier l'influence des pôles urbains et zones émettrices de la région Hauts-de-France et du bassin parisien sur la pollution observée.

05. La qualité de l'air : une question qui se pose également en milieu rural. COBIACC - une campagne d'observations d'envergure

Les scientifiques de l'atmosphère cherchent à comprendre l'impact des activités humaines sur le climat et la qualité de l'air. Pour mieux cerner ces phénomènes, les approches varient. L'une d'entre elles consiste à réaliser des campagnes de terrain qui permettent de caractériser de façon très détaillée l'atmosphère. **Les mesures de terrain sont une partie fondamentale de la compréhension de l'atmosphère du « monde réel »**. Elles permettent de guider les expériences en laboratoire et servent de point de comparaison pour les modèles atmosphériques. Dans le cadre de cet approfondissement de connaissances, **une campagne de mesures intensive** intitulée **COBIACC** (Campagne d'OBServations Intensive des Aérosols et de leurs précurseurs gazeux sur le site de **Caillouël-Crépigny**) a vu le jour durant l'été 2019, en partenariat avec le Labex CaPPA et avec le soutien de ATMO Hauts-de-France. **Son but : offrir une meilleure compréhension de l'atmosphère en région rurale en période estivale** (en particulier durant les événements de canicules qui augmentent en fréquence et en intensité).



Les objets d'étude de la campagne COBIACC

 <p>Dynamique atmosphérique</p> <p>Les scientifiques s'intéressent au mouvement des masses d'air responsables d'échanges importants entre différents points géographiques, mais aussi dans différentes couches de l'atmosphère.</p>	 <p>Phase particulaire</p> <p>Les particules en suspension dans l'atmosphère ont un rôle majeur sur le climat, y compris sur la formation des nuages, et sur la santé humaine. Des questions importantes existent sur les sources et caractéristiques physico-chimiques des particules éloignées des sources comme dans les zones rurales.</p>	 <p>Phase gazeuse</p> <p>Les composés gazeux réactifs dans l'atmosphère sont originaires d'une multitude de sources naturelles ou humaines. Ces espèces impactent les caractéristiques chimiques de l'atmosphère et peuvent avoir des effets sanitaires importants ou devenir des particules.</p>	 <p>Réactivité atmosphérique</p> <p>L'atmosphère est comme un chaudron où des réactions chimiques ont lieu en permanence. La réactivité identifie de façon générale ce taux de réactions chimiques, qui varie fortement selon les conditions météorologiques et les niveaux de polluants dans l'atmosphère.</p>	<p>Chiffres clés</p> <ul style="list-style-type: none"> 22 Nombre d'instruments déployés. 5 Nombre de semaines de campagne. 20 Nombre de scientifiques mobilisés en continu sur l'ensemble de la campagne. 5 Nombre de laboratoires mobilisés. 15 tonnes Masse des équipements présents sur le site de Caillouël-Crépigny.  <p><i>Photo : Site d'études de la campagne COBIACC à Caillouël-Crépigny (Aisne).</i></p>
--	---	--	---	--

Les intérêts...

... pour la compréhension de l'atmosphère

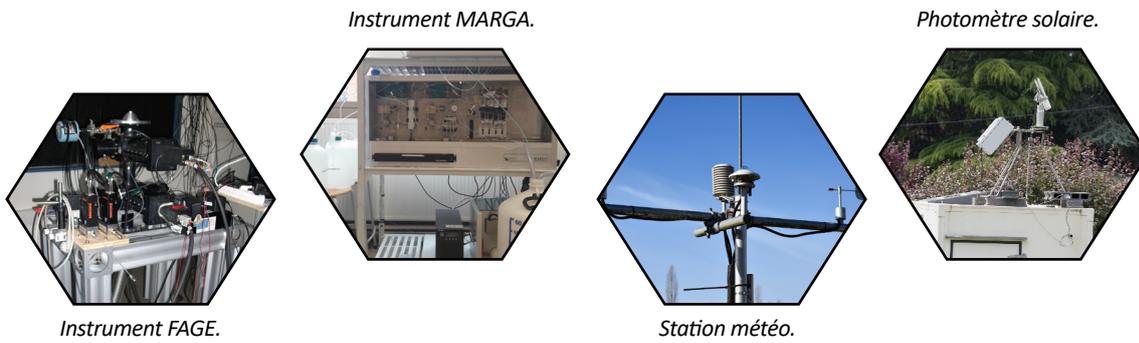
- Recueillir des données scientifiques sur une longue période via plusieurs instruments en simultané ;
- Approfondir les connaissances en lien avec la qualité de l'air dans une zone rurale ;
- Mutualiser des équipements de haute technologie régionaux.

... pour les territoires ruraux

- Prise de conscience de certains enjeux scientifiques souvent peu connus ;
- Comprendre qu'avec les fortes températures, il y a une augmentation des composés gazeux émis par la végétation ce qui tend à augmenter la pollution ;
- Perspectives d'un travail futur de sensibilisation des habitants.

... pour la prise de décisions

- Reprendre certaines mesures mises en place dans les zones urbaines (circulation alternée, baisse de la vitesse,...) ;
- Veiller à ce que l'interdiction de brûler des déchets verts soit respectée (d'autant plus durant les fortes chaleurs).



Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Température

La Figure 1 montre la température de l'air à Caillouël-Crépigny pendant la campagne COBIACC. **Deux événements de forte chaleur y ont été observés** (fin juin et fin juillet). A titre d'exemple, en région, le record de température à Lille a été battu pendant la deuxième vague de chaleur (41,4°C, contre le record précédent de 37,6°C de 2018).

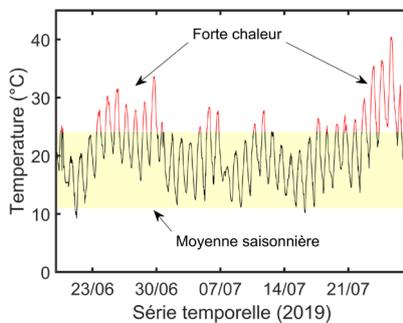


Figure 1 : Température de l'air pendant la campagne COBIACC à Caillouël-Crépigny. La bande jaune indique les températures moyennes saisonnières des 30 dernières années.

2. Effets des vagues de chaleur sur la composition de l'atmosphère

Plusieurs effets se produisent dans l'atmosphère lors d'une augmentation importante des températures :

- **Modification de la dynamique de l'atmosphère** (direction et intensité des vents). Ce type de changement engendre une modification du transport et de la distribution des polluants sur le territoire. Une baisse de dispersion est souvent observée, occasionnant une accumulation des polluants dans l'atmosphère.
- **Modification des taux des réactions chimiques dans l'atmosphère** (globalement nommée réactivité) due aux fortes températures et à l'ensoleillement. Les fortes températures vont typiquement augmenter le taux de formation de certains polluants tel que l'ozone ou les $PM_{2,5}$.
- **Modification des concentrations de composés atmosphériques.** Certains composés issus de la végétation (dits biogéniques) peuvent être fortement émis durant les vagues de chaleur (Figure 2).

Température moyenne observée durant la campagne COBIACC (juillet 2019)

Température moyenne attendue selon les modèles climatiques pour 2050.

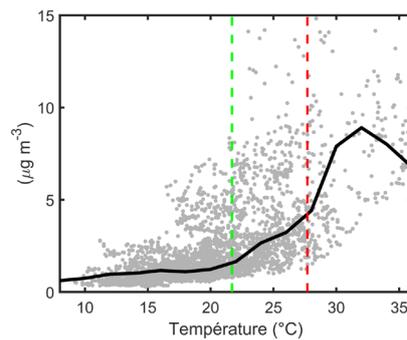


Figure 2 : Concentration des composés d'origine biogénique (isoprène et ses produits secondaires) selon la température de l'air pendant la journée. Les cercles sont tous issus des observations menées pendant COBIACC et la courbe noire est la variation moyenne de ces observations.

Ces composés vont subir des réactions chimiques multiples dans l'atmosphère. Ils peuvent alors devenir des particules d'aérosols qui risquent d'avoir un impact sanitaire important. Ces réactions sont largement accélérées à partir des polluants d'origine humaine (par exemple NO_2 , issus du transport et de l'industrie).

3. Impact des vagues de chaleur sur les particules d'aérosols

La Figure 3 montre comment la concentration des aérosols inorganiques (d'origine industrielle, par exemple) et organiques (y compris véhiculaire, industrielle, et végétation) **varie selon la température de l'air**. Une importante augmentation des aérosols organiques est observée avec la température. Il s'agit du résultat des réactions entre des polluants émis par l'homme avec la réaction de la végétation due au stress liée à la chaleur (hausse des températures).

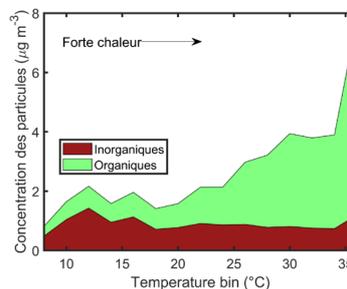


Figure 3 : Concentration des particules pendant COBIACC en fonction de la température de l'air pendant la journée.

En zone rurale dans l'Aisne, **COBIACC a pu documenter les changements atmosphériques lors de deux événements de forte chaleur**. Un de ces résultats a été la forte augmentation d'émission des composés biogéniques (par la végétation). Ces derniers ont réagi avec des polluants émis par l'homme, apportant ainsi une augmentation sensible des particules d'aérosols.

Perspectives de recherche

Avec ces résultats novateurs, des modèles de prévision de qualité de l'air pourront être améliorés pour mieux représenter des épisodes de vagues de chaleur de plus en plus fréquents, et ainsi **guider des actions pour éviter une dégradation de la qualité de l'air en région**. De plus, l'exploitation en cours des mesures détaillées de la campagne COBIACC permettra d'envisager quelle pourrait être l'évolution de la composition atmosphérique au cours du XXI^{ème} siècle, afin de mieux anticiper ses impacts potentiels.



II

-

Dynamique des milieux et de la biodiversité



II - Introduction

Les milieux qui nous entourent (air, eau) sont soumis à des contraintes telles que les émissions de composés chimiques d'origine naturelle ou anthropique. Une fois dans l'air ou l'eau, ces composés peuvent évoluer en concentration et en composition en fonction des conditions météorologiques et des transformations chimiques qu'ils subissent, c'est ce que l'on appelle la dynamique des polluants. Ces évolutions sont fortement impactées par le changement climatique qui entraîne des épisodes de pluie plus intenses mais également de canicule et de sécheresse plus fréquents.

Dans l'atmosphère, les composés chimiques gazeux émis peuvent s'oxyder et générer d'autres espèces chimiques dites secondaires, comme l'ozone (irritant et gaz à effet de serre) ou les particules fines. Les études de laboratoire visant à mieux comprendre la chimie atmosphérique sont présentées dans ce chapitre dans la **Fiche 06**. L'analyse de l'évolution au cours du temps de la concentration et de la composition des particules dans différents sites de la région (**Fiche 07**) met en évidence l'importance des transformations chimiques qui produisent presque la moitié des $PM_{2,5}$ (particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 micromètres, appelées "particules fines") en région Hauts-de-France. Le suivi local sur des périodes longues de la dynamique des polluants permet de mieux identifier les sources (émissions locales, lointaines, transformations) et de mieux évaluer et prédire l'évolution de la qualité de l'air et des pics de pollution. C'est ce qui est réalisé dans la métropole lilloise grâce à une station de suivi de certains gaz et des particules (**Fiche 08**).

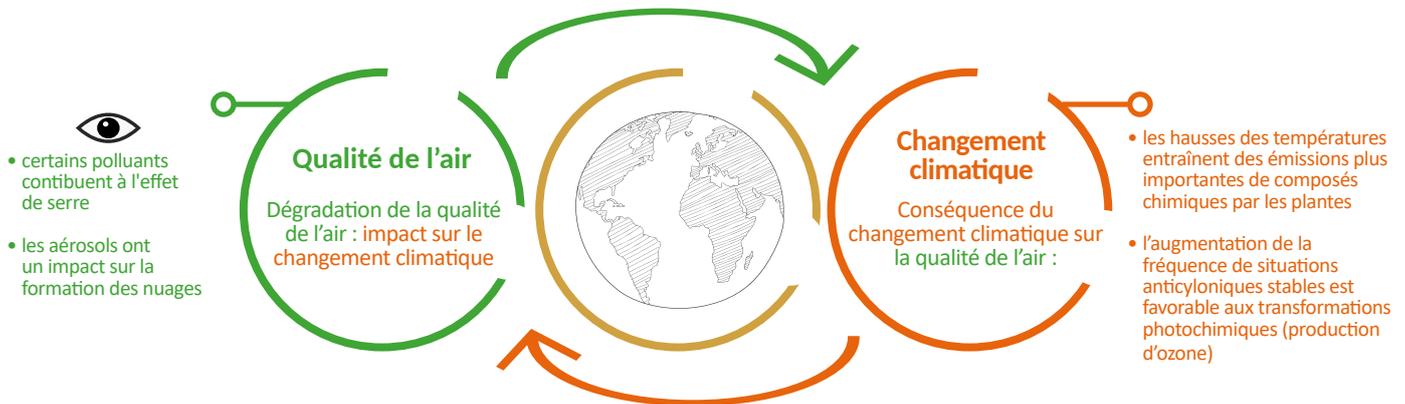
En ce qui concerne les cours d'eau naturels, la région Hauts-de-France a ses spécificités avec des cours d'eau plutôt de petite taille avec des débits faibles. La qualité de leur eau est influencée par la présence de sources multiples régionales et les conditions climatiques sous la forme d'épisodes dit « extrêmes » susceptibles de s'accroître dans les décennies à venir. Des mesures fréquentes réalisées pendant les épisodes de pluie ou de sécheresse sur deux cours d'eau de la région (la Marque Rivière et la Selle Rivière) sont présentées dans la **Fiche 09** afin de mieux comprendre les différents apports à un cours d'eau en fonction des conditions météorologiques et leur effet sur la présence des polluants. De même, ces mesures permettent de mieux évaluer l'impact des politiques publiques sur la qualité des eaux continentales comme cela est présenté dans la **Fiche 10** pour les eaux de la Marque Rivière.

L'évolution des conditions climatiques et les modifications du paysage impactent également l'abondance et la composition en espèces des communautés marines et terrestres. A l'aide d'outils de simulation, il est possible de prévoir quantitativement ces impacts en fonction de différents scénarios de réchauffement (**Fiche 12** pour une étude en milieu marin). A l'aide d'analyses de séquences ADN issues d'échantillons populationnels, il est possible de retracer les voies de colonisation en milieu perturbé et d'évaluer l'impact des éléments du paysage sur la migration des individus au sein des espèces (**Fiche 11** pour une étude en milieu terrestre sur le crapaud).



06. Qualité de l'air et changement climatique : quelles interactions ? quel est le rôle de la chimie ?

La qualité de l'air est gouvernée par la présence en quantité plus ou moins grande de polluants dans l'air. Ces polluants peuvent être directement émis ou produits par des transformations chimiques. Pour **améliorer la qualité de l'air**, il faut identifier les sources de polluants primaires, mais également comprendre comment ils sont transformés quand ils sont émis dans l'atmosphère. **Certains de ces polluants impactent le changement climatique** car les espèces chimiques émises ou formées par transformation chimique dans l'air peuvent contribuer au changement climatique (exemple de l'ozone : gaz à effet de serre, ou des aérosols). En retour, les conséquences du changement climatique (hausse des températures, augmentation des événements extrêmes comme les périodes de canicules, de sécheresse,...) impactent les émissions, les transformations chimiques et la qualité de l'air. Il y a donc un **lien étroit entre l'évolution de la qualité de l'air et du changement climatique**. C'est pour cela qu'il est nécessaire de **mieux comprendre les transformations chimiques dans l'atmosphère pour mieux prédire l'évolution de la qualité de l'air et du climat**.



Définitions

La **chimie atmosphérique** est définie comme l'ensemble des transformations chimiques se produisant dans l'atmosphère. Elles impliquent des oxydants gazeux qui transforment les composés chimiques gazeux en composés plus oxygénés jusqu'à former des aérosols secondaires (issus de la chimie). Ces transformations s'accompagnent souvent de la formation d'ozone.

Forçage radiatif : Variation du flux de rayonnement résultant (différence entre l'éclairement descendant et l'éclairement ascendant, exprimée en $W m^{-2}$), à la tropopause ou au sommet de l'atmosphère, due à une modification d'un agent externe du changement climatique, par exemple une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou du rayonnement solaire. (source : glossaire du GIEC)

Chiffres clés

> à **10000**

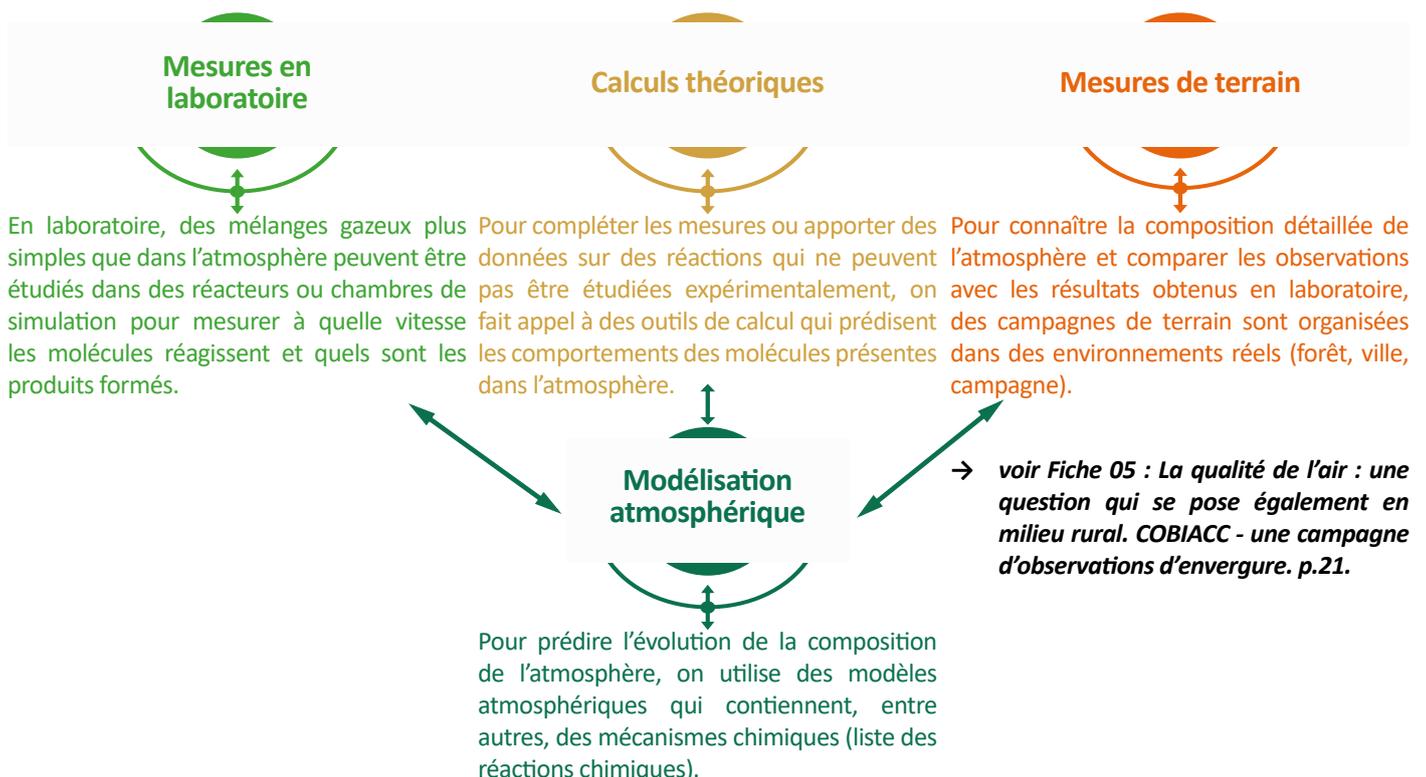
Nombre de polluants différents émis dans l'atmosphère et susceptibles d'y être transformés par réactions chimiques.

3^{ème}

L'ozone (O_3) est le 3^{ème} plus important GES en terme de forçage radiatif. Les 2 premiers sont le dioxyde de carbone et le méthane.

Nécessité de mieux comprendre la chimie atmosphérique

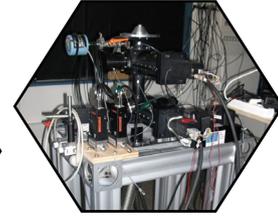
Devant la complexité de la composition de l'atmosphère (très grand nombre de composés chimiques et de réactions chimiques pouvant se produire), il est nécessaire de combiner différentes approches scientifiques pour identifier et quantifier l'impact des transformations chimiques sur la qualité de l'air et la concentration des GES.



Chambre de simulation DouAir.



Instrument FAGE (Fluorescence Assay by Gas Expansion).
Mesure du radical OH.



Chambre de simulation CHARME
(CHamber for the Atmospheric Reactivity and
the Metrology of the Environment).



Réacteur à écoulement.
Etude de la formation des Aérosols
Organiques Secondaires.

Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Chimie de jour

Le jour, le principal oxydant de l'atmosphère est le radical hydroxyle : OH. Il est principalement formé par des réactions impliquant la présence du soleil. Il réagit avec la plupart des composés gazeux émis dans l'atmosphère et ces réactions sont une source importante d'ozone.

Cette chimie peut être influencée par les conditions atmosphériques comme les variations d'humidité. Nous avons étudié l'influence de la variation de l'humidité sur les réactions entre le méthanol et l'éthanol avec OH.

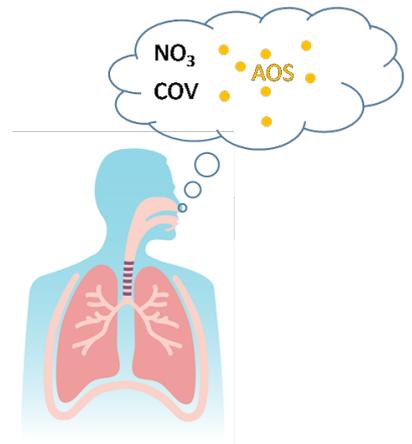
Ces expériences ont montré que l'humidité n'avait pas d'influence sur ce type de réaction, ce qui est important pour prédire l'évolution de ces composés chimiques dans l'atmosphère dans le futur.

La bonne connaissance des réactions impliquant OH est importante pour l'étude du climat car OH est directement impliqué dans la transformation des COV, la formation de l'ozone et la durée de vie de certains GES (méthane).

2. Chimie de nuit

La nuit, le principal oxydant de l'atmosphère est le radical nitrate : NO₃. Il est formé à partir de la réaction entre l'ozone (O₃) et le dioxyde d'azote (NO₂). NO₃ réagit avec de nombreux Composés Organiques Volatils (COV).

Nous avons étudié dans la chambre de simulation CHARME la réactivité entre des composés émis lors de la combustion du bois (les méthoxyphénols) et le radical NO₃ et nous avons observé que cette réaction est une source d'Aérosols Organiques Secondaires (AOS). Ces AOS peuvent avoir un impact sur la santé car ce sont des nanoparticules qui peuvent pénétrer profondément dans les voies respiratoires et entrer dans la circulation sanguine via les alvéoles pulmonaires. En outre, ces aérosols ont un impact sur le climat qui est encore mal connu. Il est suggéré qu'ils refroidissent l'atmosphère, contrairement aux gaz à effet de serre qui la réchauffent.



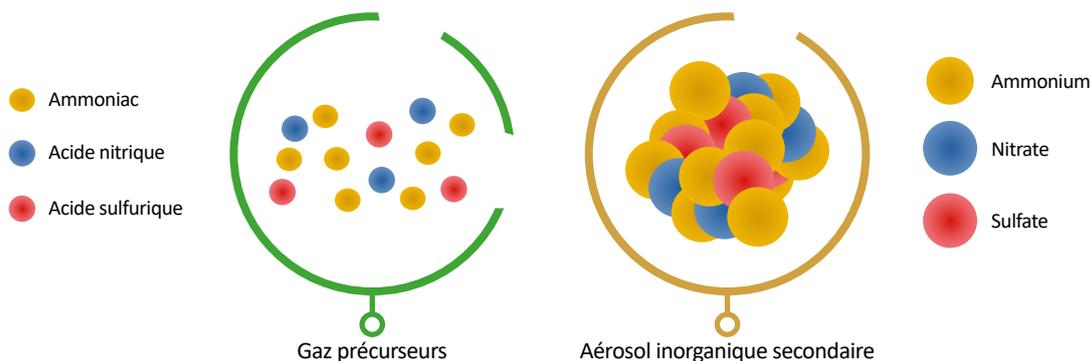
Perspectives de recherche

Afin de poursuivre nos travaux de recherche sur les transformations chimiques dans l'atmosphère, les réactions d'autres molécules avec les principaux oxydants de l'atmosphère seront étudiées grâce aux différents dispositifs de mesure développés pendant le projet CLIMIBIO. L'impact de ces réactions sur la qualité de l'air et sur la présence des GES dans l'atmosphère peut être étudié en intégrant ces réactions dans des modèles atmosphériques. Les instruments développés (FAGE, chambre DouAir) peuvent être utilisés sur le terrain pour être confrontés à des conditions atmosphériques réelles.

07.

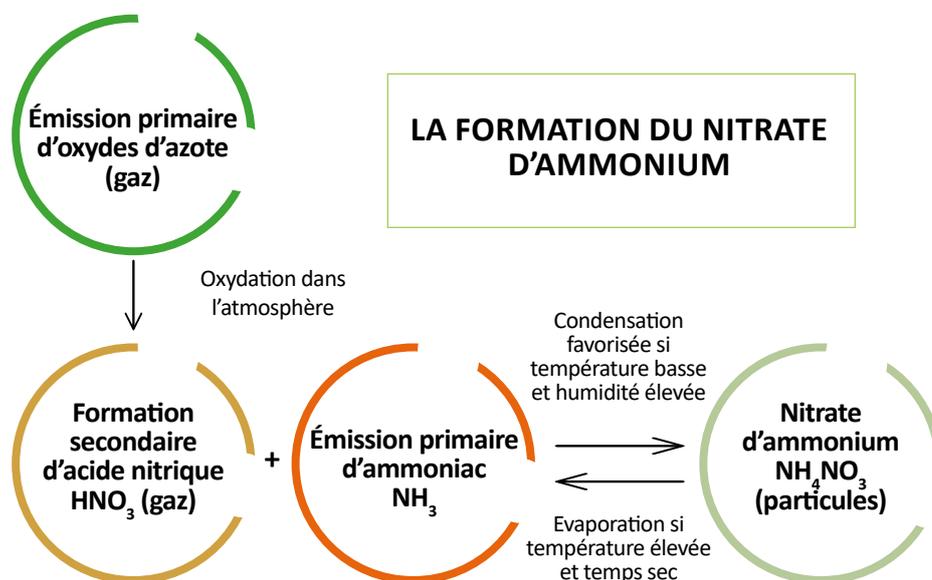
Quand les gaz se transforment en particules

Les particules fines $PM_{2.5}$ en région Hauts-de-France proviennent pour près de la moitié de leur masse des **aérosols** dits **inorganiques secondaires**, formés dans l'atmosphère à partir de **gaz précurseurs**. Pour limiter les particules secondaires, il faut diminuer les émissions de leurs gaz précurseurs : les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO_2) et l'ammoniac (NH_3). Les oxydes d'azote et de soufre peuvent se convertir en acide nitrique et acide sulfurique, composants des pluies acides mais aussi des aérosols secondaires.



Des gaz précurseurs aux aérosols inorganiques secondaires

Dans l'atmosphère, le processus majeur de formation des aérosols inorganiques secondaires (AIS) résulte de la neutralisation des gaz acides (acide nitrique ou sulfurique) par l'ammoniac. Ces AIS sont sensibles à la température et à l'humidité. Le climat océanique (frais et humide) de la région favorise leur formation.



Définition

Un **aérosol secondaire** est un mélange de gaz précurseurs et de particules formées par réaction chimique entre ces gaz.

Chiffre clé

40%

au moins de la masse des particules fines $PM_{2.5}$ en région Hauts-de-France correspond à des particules inorganiques secondaires.

Les particules de **nitrate d'ammonium** sont « fragiles », c'est-à-dire sensibles aux changements de température et d'humidité. Elles sont moins présentes en été, car le temps sec et chaud favorise leur décomposition en gaz précurseurs. De même elles sont moins présentes le jour que la nuit. Elles peuvent se former ou se décomposer très rapidement (en quelques secondes), localement.

Perspectives de gestion



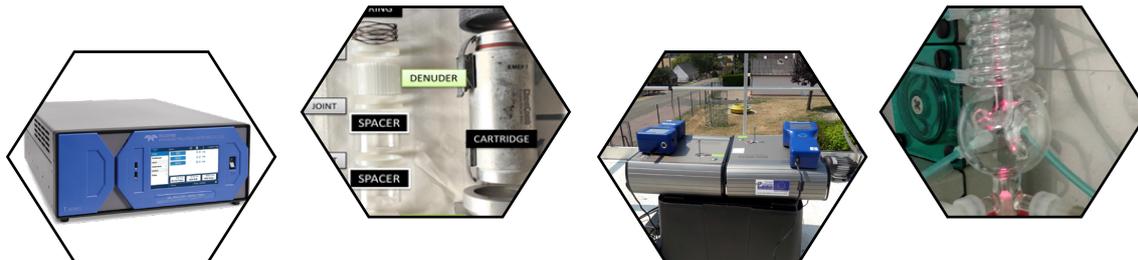
Recommandations

- Diminuer les émissions des transports, du chauffage et de l'industrie (émetteurs de NO_x) ;
- Améliorer les pratiques culturales (réduction et enfouissement rapide des fertilisants) et diminuer les émissions des élevages (émetteurs de NH_3) ;
- Limiter l'utilisation de combustibles soufrés comme le charbon et les fiouls et accompagner les industries (émetteurs de SO_2) ;
- Favoriser la coopération transfrontalière (émetteurs lointains).

Avantages

- Améliorer l'efficacité des mesures de lutte contre la pollution particulaire, en prenant en compte sa formation secondaire à partir de gaz précurseurs.

Mesure des gaz précurseurs inorganiques, notamment oxydes d'azote, dioxyde de soufre et ammoniac.



Mesure de la composition chimique des particules atmosphériques, notamment en nitrate, sulfate et ammonium.

Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Une prépondérance du nitrate d'ammonium à l'échelle régionale

En région, quel que soit le site de mesure, les particules de nitrate d'ammonium comptent pour au moins 1/3 de la masse des particules PM₁₀ (Figure 1). Elles proviennent à la fois du transport extrarégional et d'une formation locale.

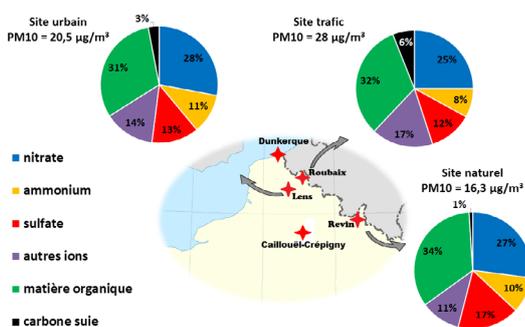


Figure 1 : Composition chimique des particules PM₁₀ (% en masse).

Les particules de nitrate d'ammonium sont présentes tout au long de l'année, mais des concentrations plus élevées sont observées au printemps et à l'automne lors des périodes d'épandages agricoles. Les pics de nitrate et d'ammonium sont parfois corrélés aux pics de sulfate, notamment lorsque ces aérosols ont une origine plus lointaine (Figure 2).

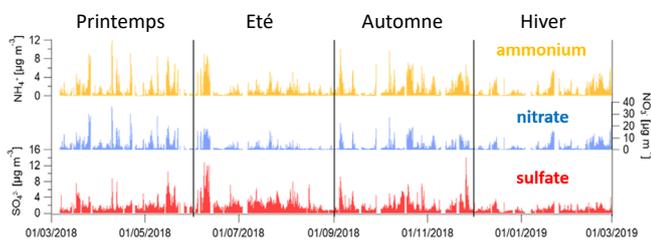


Figure 2 : Evolution annuelle des concentrations en ammonium, nitrate et sulfate dans les particules PM_{2,5} à Caillouël-Crépigny.

2. L'influence locale de certaines sources industrielles sur le sulfate d'ammonium

Les particules de sulfate d'ammonium proviennent de la réaction entre les gaz acide sulfurique et ammoniac. L'acide sulfurique se forme principalement dans l'air par oxydation du dioxyde de soufre (SO₂), émis par certains procédés industriels et centrales thermiques, le transport maritime ou le chauffage au fioul/charbon. L'origine des particules de sulfate d'ammonium est plutôt lointaine (Europe centrale), car la formation de l'acide sulfurique est lente (plusieurs heures ou jours).

À l'échelle locale, on peut néanmoins observer des concentrations parfois élevées de sulfate d'ammonium particulaire, généralement à proximité de sources industrielles spécifiques. C'est le cas d'observations réalisées à Dunkerque pendant plus d'un an, qui ont notamment montré que les niveaux moyens de concentrations en PM₁ provenant du secteur industriel n'étaient pas plus élevés qu'en secteur urbain, mais que les particules étaient de nature chimique différente et beaucoup plus acides en raison des émissions de dioxyde de soufre (SO₂) rapidement converties en sulfate (Figure 3).

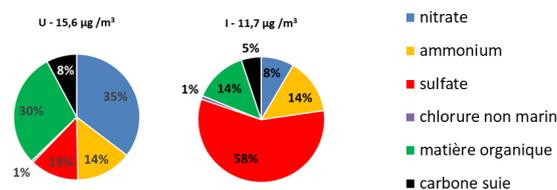


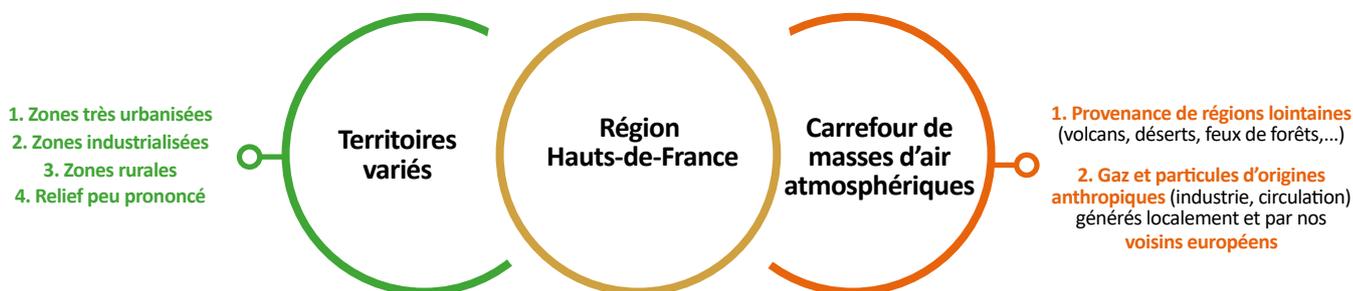
Figure 3 : Contributions relatives des espèces chimiques aux concentrations observées en PM₁ à Dunkerque pour des vents provenant (gauche) du secteur urbain, U, et (droite) du secteur industriel, I. En rouge, la contribution massique des sulfates particulaires.

Conclusions

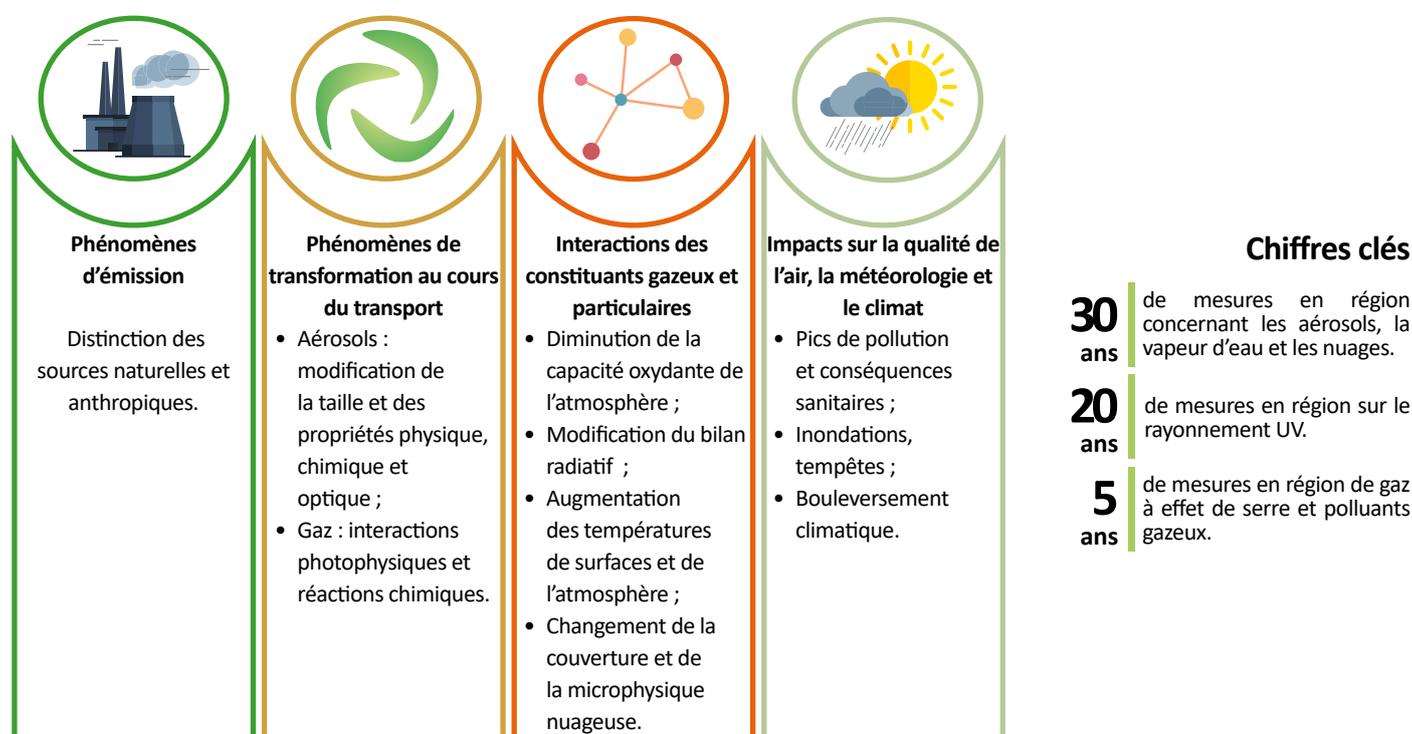
La lutte contre la pollution atmosphérique liée aux particules secondaires passe par la diminution des émissions de gaz précurseurs d'aérosols dans l'atmosphère, dues aux transports, à l'industrie et à l'agriculture. Des recherches futures sont nécessaires pour comprendre l'évolution en région des aérosols secondaires sous l'effet du changement climatique.

08. Importance du suivi à long terme des observations atmosphériques

La détermination précise de la composition atmosphérique et son évolution est au cœur des études concernant la qualité de l'air, la prévision météorologique ou le climat. **Une meilleure compréhension de la physique et la chimie qui influencent les phénomènes d'émissions, transformations, et interactions des constituants gazeux et particulaires, nécessite des équipements permettant d'accéder à des mesures de l'échelle globale (par satellites) à l'échelle locale (sites et plateformes d'observations).**



Composition de l'atmosphère



Observation et évolution



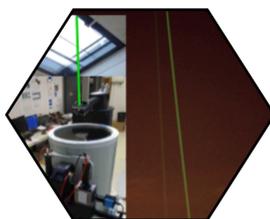
Mesures de l'atmosphère lilloise et régionale dans ses différents compartiments : mesures *in-situ*, au sol, mesures à distance (par télédétection) dans la couche limite atmosphérique (sol-1.5km), et jusqu'à 20 km (basse stratosphère).

Radiomètre micro-ondes.

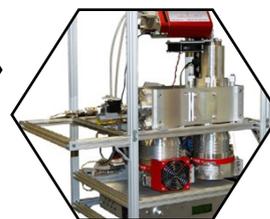
Prototype CHRIS
(Compact High-spectral Resolution Infrared Spectrometer).



Site d'observation
atmosphérique.



LiDAR Mie-Raman
multispectral LILAS.



Aerosol Chemical
Speciation Monitor.

Certains de ces équipements sont intégrés dans des réseaux nationaux, européens (EARLINET), internationaux (AERONET/NDACC) et dans des infrastructures de recherche atmosphérique (ACTRIS), comme la plateforme du Service National d'Observation PHOTONS.

Des résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Pollution en SO₂

Suite à l'éruption du volcan Islandais Bardarbunga, le Nord de la France a connu une pollution de l'air exceptionnelle en SO₂ et particules fines.

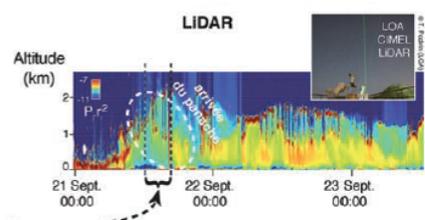


Figure : Détection d'une concentration importante de particules fines et distribution en altitude, corrélée avec l'arrivée du panache volcanique.

2. Concentration d'aérosols exceptionnelle à Lille

Depuis 1992, année durant laquelle les premiers relevés atmosphériques sur le site de l'Université de Lille ont eu lieu, jamais une concentration en particules aussi élevée n'avait été mesurée.

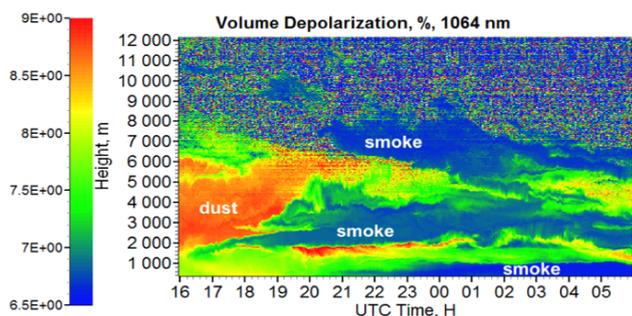


Figure : Structure de l'atmosphère lilloise en particules désertiques (dust) et issues de feux de forêt (smoke) au cours d'un événement extrême (tempête Ophélie) en octobre 2017 vue par le Lidar Mie-Raman LILAS.

La synergie des mesures Lidar et photométrique permet de distinguer l'arrivée d'aérosols de différentes natures dans le ciel lillois et de détailler leurs caractéristiques respectives (type, altitude, taille et forme des particules).

Perspectives de recherche

Les moyens d'observations vont continuer à progresser permettant (1) de poursuivre l'acquisition des séries temporelles aérosols, nuages, rayonnement, et GES ; (2) le développement de nouvelles capacités observationnelles (innovation) pour continuer à répondre aux besoins régionaux, nationaux et internationaux, ainsi qu'aux besoins des missions spatiales d'observation de l'atmosphère.

La tempête Ophélie provoque la rencontre de deux masses d'air transportant respectivement des quantités abondantes de poussières désertiques et de particules issues de feux de forêt au Portugal.

3. Taux d'humidité dans l'atmosphère

La figure ci-dessous montre une très faible humidité relative entre 0 et 2 km (couche limite). Cela est typique d'une période de sécheresse.

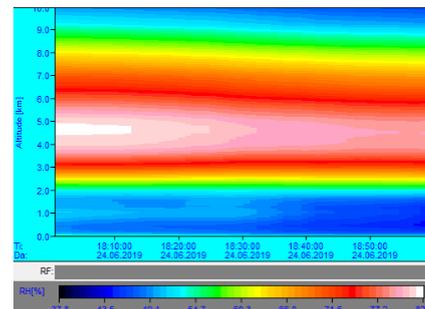


Figure : Mesures de l'humidité relative RH (en %) en fonction du temps et de l'altitude à partir du radiomètre micro-ondes localisé sur la Plateforme d'Observation de Lille le 24/06/2019.

4. Mesures précises du CO₂

La figure ci-dessous illustre l'importance des variabilités temporelles et spatiales (horizontale et verticale) des concentrations de CO₂ atmosphériques mesurées par le prototype instrumental CHRIS (Compact High-spectral Resolution Infrared Spectrometer) lors de campagnes de validations des gaz à effet de serre obtenus par satellites. Le site d'observation se situe autour du Centre Ballons du CNES.

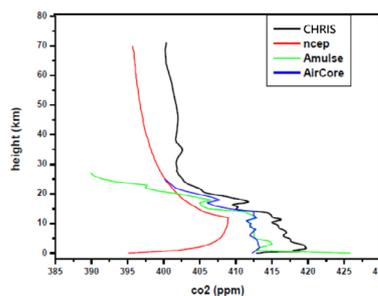
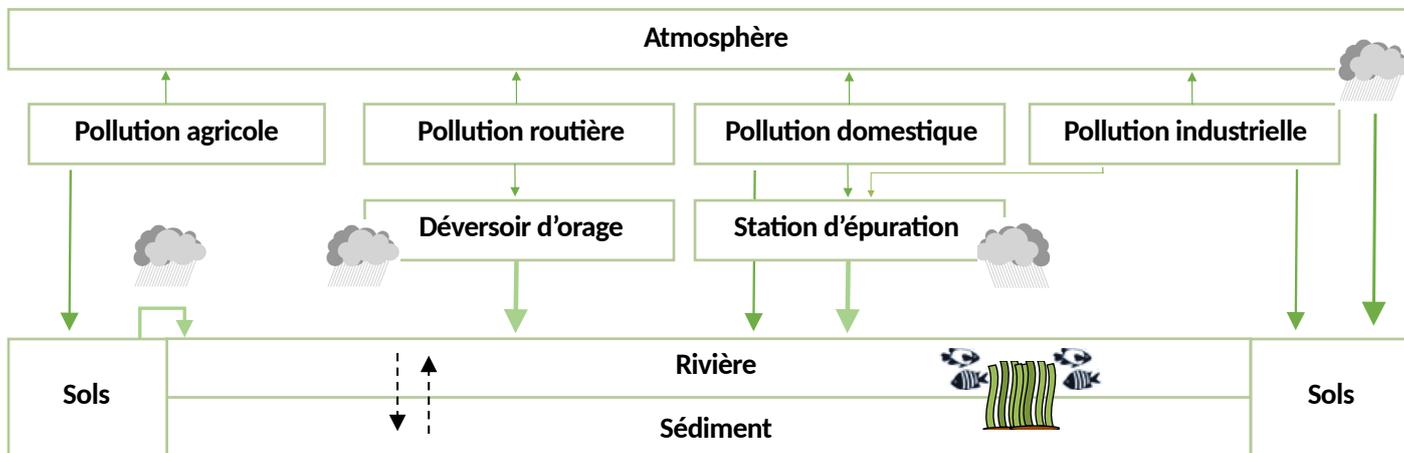


Figure : Comparaison de différents profils de CO₂ obtenus le 18/06/2019 à Aire-sur-l'Adour.

09.

Temps de pluie et qualité de l'eau

En Hauts-de-France, les cours d'eau naturels sont de petites tailles et avec des vitesses d'écoulement et des débits faibles. Certains sont principalement alimentés par la nappe d'eau souterraine, alors que d'autres sont alimentés par ruissellement lors des pluies. Par ailleurs, les environnements urbain, industriel et agricole sont très importants dans notre région et sont susceptibles d'entraîner des pollutions ponctuelles et diffuses d'envergure et durables dans ces petits cours d'eau. **Les temps de pluie sont particulièrement critiques** car le lessivage des surfaces polluées, les débordements de stations d'épuration, l'érosion et les chasses des déversoirs d'orage peuvent apporter des contaminations complémentaires, même si l'apport d'eau de pluie peut également contribuer à la dilution de certains polluants.



Le suivi des masses d'eau



Prélèvements ponctuels riches en information mais peu représentatifs du milieu.



Echantillonneurs passifs introduits directement dans la masse d'eau intégrant les flux de contaminants. Spatialement et temporellement intéressants mais obtention de valeurs moyennes.



La mesure haute fréquence riche en information temporelle mais couverture spatiale et nombre de paramètres limités.

Définition

La **mesure haute fréquence** s'appuie sur un ensemble d'appareillages qui réalise des mesures en ligne ou *in situ* avec un pas de temps adapté au suivi des temps de pluie en cours d'eau, en général de l'ordre de la demi-heure.

Chiffre clé

-10% Baisse des précipitations à l'horizon 2070 avec hausse des événements exceptionnels (sécheresse/orage) par rapport à la période de référence 1961-1990.

Temps de pluie et qualité de l'eau

Les temps de pluie changent drastiquement la qualité chimique des cours d'eau. Ces évolutions sont transitoires mais pourraient avoir des impacts durables sur les organismes.

L'utilisation de traceurs chimiques pour remonter aux sources des pollutions est nécessaire mais complexe à mettre en place pour arriver à des données quantitatives. De par l'intensification des événements extrêmes, le changement climatique devrait accentuer la variabilité de la qualité de l'eau, et de façon générale sa dégradation (ne serait-ce que via l'érosion et le ruissellement).

Une réduction drastique des apports polluants au cours d'eau est nécessaire en améliorant la collecte, le traitement et la gestion des eaux usées et pluviales, ainsi qu'en limitant les phénomènes d'érosion. En période d'étiage, les stations d'épuration contribuent au maintien du débit des cours d'eau alimentés par le lessivage ou ruissellement. **Les collectivités seront donc probablement amenées à gérer des conflits d'usage en cas de pénurie de la ressource en eau** (irrigation ou maintien du cours d'eau par exemple).

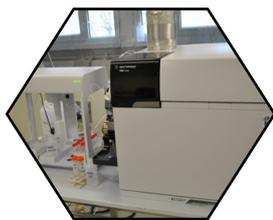


Spectrométrie par torche à plasma.

La Selle Rivière.



Station automatique.



La Marque Rivière.



Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. La Marque Rivière (59)

La station d'épuration représente plus de 70% du débit de la rivière par temps sec. Une réutilisation de l'eau des stations de traitement des eaux usées (STEU) pour d'autres besoins (arrosage des espaces verts...) pourrait conduire périodiquement à des assècs.

L'eau de la Marque est riche en nutriments et en matière organique biodégradable liés à des apports urbains. On assiste donc à des phénomènes d'eutrophisation très importants. En été, la dégradation de la matière organique l'emporte sur la photosynthèse de sorte que les teneurs en oxygène sont très basses.

Par temps de pluie, on observe des pics en métaux, notamment en zinc qui dépassent alors largement les valeurs seuils pour l'atteinte du bon état écologique. Le zinc est un contaminant ubiquiste qui provient des lessivages de sols, voiries, gouttières, STEU et de la remise en suspension de sédiments anoxiques. L'ammonium voit également ses concentrations augmenter très fortement, témoin d'apports d'eaux urbaines riches en matière organique. Lors d'orages importants, l'oxygène peut disparaître totalement du cours d'eau et provoquer une mortalité piscicole. L'absence d'oxygène induit une réduction des oxydes de manganèse et une libération de manganèse dissous effectivement détecté dans la Marque. Cette libération de manganèse peut également s'accompagner de la dissolution d'autres métaux plus toxiques comme le zinc, le plomb ou le cadmium.

Au vu de l'ensemble des résultats collectés et des changements météorologiques à venir, il est recommandé pour les décideurs de travailler à court et moyen termes sur le maintien d'un débit minimal, tout en améliorant la qualité au travers du traitement tertiaire dans les STEU, du raccordement d'effluents urbains au réseau, de la protection du cours d'eau face aux activités agricoles et des débordements accidentels d'effluents.

2. La Selle Rivière (59)

La Selle rivière est alimentée par temps sec à plus de 95% par les nappes phréatiques, le reste des apports provenant des STEU.

Les teneurs en nitrates sont très importantes et proviennent des eaux souterraines. Les campagnes de mesures haute fréquence en amont et aval de la ville du Cateau-Cambrésis ont permis de mettre en évidence les impacts d'une agglomération par temps de pluie avec par exemple des chutes de concentrations en oxygène et des apports en phosphore, matières en suspension et ammonium conséquents.

Plusieurs traceurs ont également été utilisés pour comprendre les apports urbains (sodium, potassium, caféine, carbamazépine, gadolinium). Les excès en sodium et potassium dans l'eau sont de bons traceurs de la population du bassin versant de la Selle.

Certains résultats montrent cependant des incohérences, probablement en raison de la complexité du fonctionnement du système aquatique qu'il est difficile de modéliser sur la base de quelques campagnes ponctuelles. Par exemple, les déversoirs d'orage, même de tailles importantes, ne sont pas instrumentés et pourraient être des sources importantes de contaminants en cas de pluie.

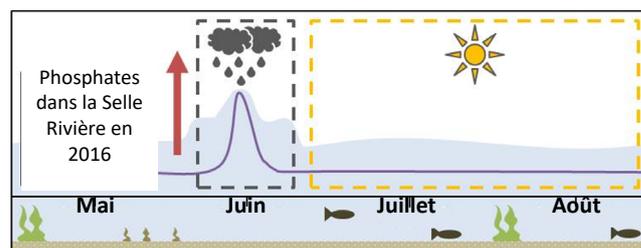


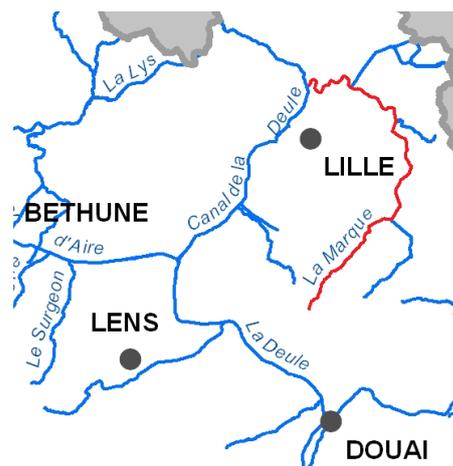
Figure : Effets de la pluviométrie sur la concentration en phosphates.

Perspectives de recherche

- Doter la région d'une ou de plusieurs stations de mesures automatiques pour transformer ces études prospectives en études de routine et obtenir des conclusions plus robustes ;
- Instrumenter les rejets au niveau des déversoirs d'orage ;
- Comprendre l'impact de ces changements de qualité sur les organismes aquatiques ;
- Elargir la gamme des polluants suivis en haute fréquence à la matière organique et aux polluants organiques et donc développer de nouveaux outils et protocoles d'analyse.

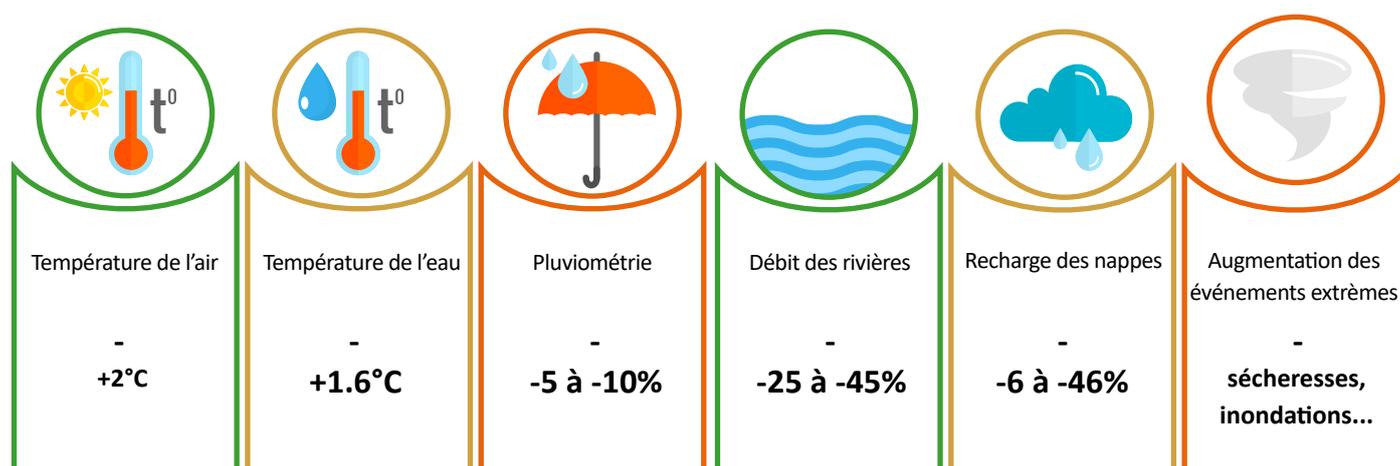
10. Questionner l'impact des politiques publiques sur la qualité de l'eau de la Marque : une analyse rétrospective

Elément essentiel de nos activités domestiques et économiques, l'eau superficielle a connu au cours du siècle précédent **une forte dégradation de sa qualité** due à un manque de gestion. La Marque Rivière, cours d'eau de la métropole lilloise n'y fait pas exception. Autrefois **extrêmement polluée par la pression anthropique et les activités industrielles** présentes autour de Lille, celle-ci se trouve aujourd'hui **toujours en état de pollution manifeste** malgré les nombreux efforts consentis au cours des précédentes décennies. En effet, la Marque Rivière continue d'être affectée par la présence de l'Homme que ce soit par l'intermédiaire d'activités antérieures (l'industrie et la pollution induite) ou du développement actuel (l'urbanisation galopante et le poids démographique). **Réaliser une analyse prospective a permis de déceler une prise en compte croissante du changement climatique et de son impact à l'échelle de la région, du département et des territoires locaux.** Il est possible de voir ceci dans les différents documents étatiques, qu'ils concernent l'environnement, l'urbanisme ou encore les politiques publiques. L'analyse a également permis de voir une accélération de l'encadrement de la ressource en eau, de l'environnement et de l'urbanisme et ce à plusieurs échelles.



Un cours d'eau sous pression

D'ores et déjà sous contrainte, la Marque Rivière (comme les autres cours d'eau du bassin Artois-Picardie) doit également s'attendre à **subir les conséquences des modifications climatiques** à l'échelle du bassin hydrographique au cours des prochaines décennies.



De manière plus précise, **le changement climatique aura des répercussions qui augmenteront sensiblement les perturbations déjà observées ponctuellement sur la Marque Rivière.**

Effets du réchauffement climatique

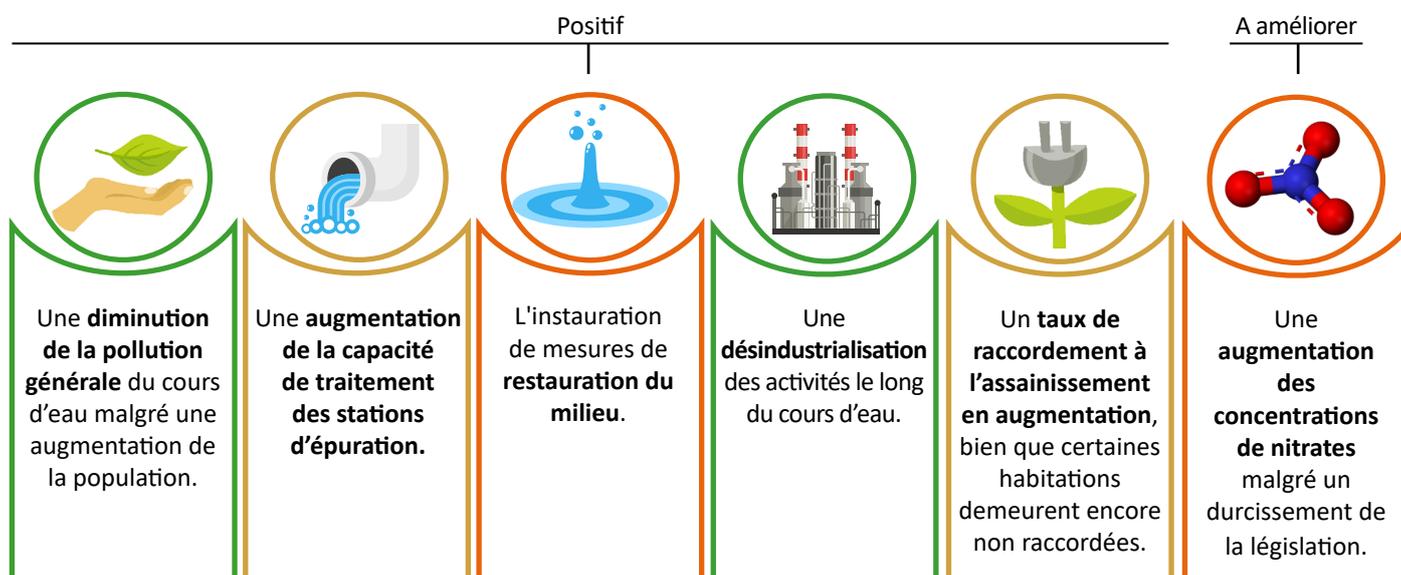
- Le débit de la Marque devrait baisser au cours des prochaines décennies (le débit de la Marque étant déjà assuré à hauteur de 40% par la Station de Traitement des Eaux Usées (STEU) de Villeneuve-d'Ascq) ;
- Les débits d'étiage du cours d'eau devraient diminuer au cours des prochaines années. En l'état et sans l'appui des STEU, certaines sections du cours d'eau pourraient même temporairement s'assécher ;
- La concentration en polluants devrait augmenter dans le cours d'eau en raison de la diminution des débits d'étiage.



L'impact des politiques publiques sur la qualité de l'eau

Depuis la première loi sur l'eau de 1964, les politiques publiques ont grandement contribué à **l'amélioration de la gestion de la ressource en eau en France**.

Du point de vue de la Marque Rivière, cet investissement s'est traduit par des efforts positifs, même si certains paramètres n'atteignent toujours pas les recommandations prévues par la loi.



Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. La qualité de l'eau, un enjeu essentiel de la politique publique

La poursuite du développement de politiques publiques utiles à la gestion de la ressource en eau relève d'**une réelle nécessité face aux enjeux que peuvent représenter la qualité de l'eau et surtout le changement climatique**. En effet, déjà non conforme aux critères européens pour de multiples raisons (notamment la pollution historique du cours d'eau et le ré-haussement de ces critères), la qualité de l'eau de la Marque Rivière se verra inéluctablement **impacté par le changement climatique au cours des prochaines années**. L'inaction pourrait donc s'avérer coûteuse aussi bien économiquement qu'environnementalement parlant, bien qu'il soit encore difficile de les évaluer.

En effet, à l'horizon 2070, selon les projections «Explore 2070» du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, les cours d'eau seront de plus en plus sous pression. La Marque Rivière n'y échappera pas, d'où l'importance d'agir.

2. Perspectives d'actions

Afin d'éviter les conséquences néfastes, ou du moins réduire l'impact du changement climatique sur la qualité de l'eau de la Marque, certaines actions nous semblent pertinentes à mener :

- **Développer davantage l'assainissement collectif** en améliorant le taux de raccordement des habitations ;
- **Lutter contre les rejets illicites** de tous types et de toutes natures (particuliers, entreprise, agriculteurs...) ;
- **Renaturer le cours d'eau** (mise en place d'un écoulement sans obstacles, végétalisation des berges, reconstitution de la biologie du cours d'eau...) ;

L'exemple de l'Yzeron à Oullins (69), commune de la métropole de Lyon, est particulièrement représentatif du type d'actions à mener en matière de renaturation d'un cours d'eau. En effet, ces actions ont notamment permis de **diminuer le risque d'inondation tout en augmentant la biodiversité et en assurant la fonction naturelle de ce cours d'eau**.

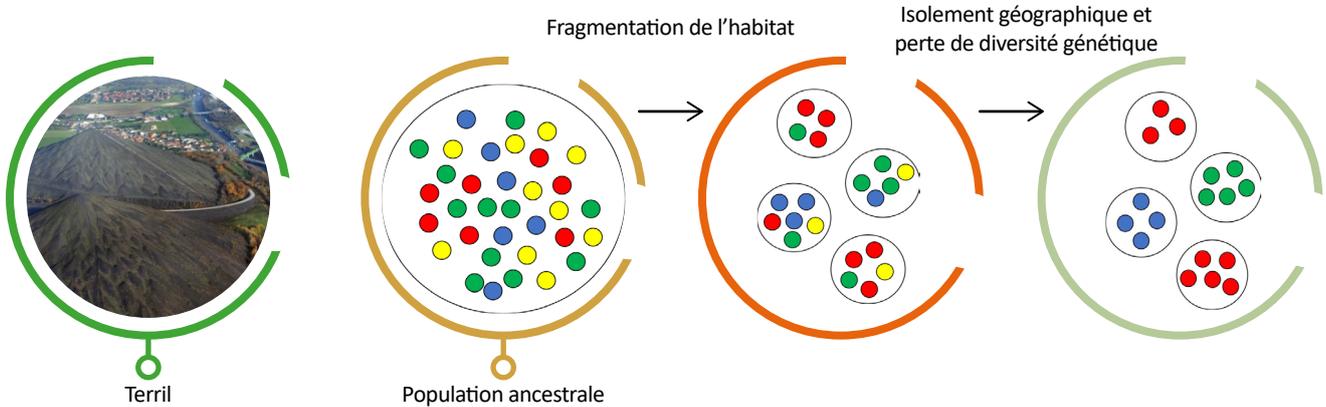
Perspectives de recherche

Dans la perspective d'un prolongement du travail effectué jusqu'à présent sur l'impact des politiques publiques sur la qualité de l'eau de la Marque Rivière, plusieurs pistes complémentaires peuvent être suivies.

Il serait tout d'abord intéressant d'étudier de manière plus précise les polluants présents dans le cours d'eau lors d'événements climatiques (pluie, sécheresse, ...). Ensuite, s'interroger au sujet de **l'impact des secteurs non raccordés à l'assainissement** sur le cours d'eau pourrait s'avérer utile afin de déterminer la quantité et le type de polluants imputables à ces secteurs. Enfin, l'observation des effets de la renaturation sur un cours d'eau similaire à la Marque peut nous permettre d'**appréhender l'impact** que pourrait avoir cette mesure dans le contexte présent et futur.

11. Processus de colonisation et de dispersion en milieu fortement anthropisés : exemple sur deux espèces de crapaud

La notion de biodiversité peut s'appréhender à plusieurs échelles : au niveau des écosystèmes, des communautés d'espèces, **mais aussi au niveau de l'espèce**. Cette diversité au sein de l'espèce peut être caractérisée au niveau moléculaire, donnant lieu alors à la dénomination de **diversité génétique**. Celle-ci est essentielle pour tout être vivant car elle détermine les capacités d'un organisme à **évoluer et s'adapter à des changements environnementaux**. Au travers des changements globaux, l'utilisation intensive des terres à des fins agricoles, urbaines ou industrielles a provoqué un déclin et une **fragmentation des habitats** naturels non perturbés. Ceci réduit la connectivité entre les populations et l'absence d'échanges de gènes entraîne alors une diminution des niveaux de diversité génétique au sein des populations. Le **risque de consanguinité locale est donc accru**, avec pour conséquence une augmentation de la vulnérabilité face aux stress et changements environnementaux.



Importance du maintien des sites miniers comme unité de conservation

Cette région est très anthropisée avec seulement 10% de zones naturelles ou semi-naturelles.

Nouveaux sites à forte valeur patrimoniale et culturelle hébergeant diverses communautés d'espèces.

Depuis la cessation des activités minières, ces sites ont été colonisés par diverses espèces pionnières dont le crapaud calamite et le pélodyte ponctué.

Le rôle des collectivités est d'assurer une bonne gestion des friches industrielles afin de maintenir des mares temporaires.

Définition

La diversité génétique mesure la variation génétique de l'ADN des individus au sein de populations d'une espèce biologique. L'ADN peut être extrait par prélèvement salivaire.

Chiffre clé

> à 300 Nombre de terrils présents en région Hauts-de-France.
10% % d'habitats naturels ou semi-naturels en région. Le reste du territoire se compose de 16% de surfaces urbanisées et 70% de zones agricoles.

Résultats clés et perspectives de gestion

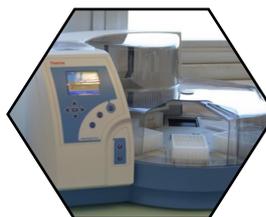
Population	Forces et faiblesses	Importances des sites miniers
<ul style="list-style-type: none"> • Méthode : prélèvements salivaires ; • Période : Printemps ; • 2 espèces : Crapaud calamite / Pélodyte ponctué ; • Lieu : site minier ; • Objectif : caractériser l'identité génétique de chaque individu à partir de l'ADN contenu dans les cellules de l'épithélium buccal. 	<p style="text-align: center;">Points forts</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aucune trace de consanguinité ; • Forte diversité génétique. <p style="text-align: center;">Points faibles</p> <ul style="list-style-type: none"> • Isolement génétique fort ; • Absence de migration des individus entre populations spatialement proches. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité de conservation à définir sur la base de la structure génétique observée ; • Nécessité d'amélioration de la connectivité entre populations.

Stockage des prélèvements salivaires à -20°C.



Échantillonnage et cartographie des populations.

Génotypage des individus au moyen d'un séquenceur automatique ABI 3100 (Applied Biosystems).



Robot d'extraction d'ADN.

Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Histoire évolutive et processus de colonisation

Il ressort de cette étude que l'origine des populations de Crapaud calamite et de Pélodyte ponctué observées dans le bassin minier est complexe. Celle-ci résulte à la fois d'une remontée des individus depuis le dernier épisode glaciaire ayant eu lieu il y a environ 15 000 ans, mais aussi des **activités humaines**



Bufo [Epidaleia] calamita

récentes qui ont probablement joué un rôle de catalyseur de diversité génétique intraspécifique au travers de la dispersion et de l'introduction accidentelle d'individus dans plusieurs sites du bassin minier.

Aucune trace de consanguinité n'est observée au sein de ces zones industrielles, une **très forte diversité génétique** y est observée, et plusieurs lignées maternelles d'origines géographiques différentes ont été découvertes. L'aspect positif de ces «hot-spot» de diversité génétique au sein d'habitats pourtant fortement impactés par l'homme est à nuancer : des **discontinuités génétiques très fortes** entre populations sont observées, ceci tout particulièrement pour le Pélodyte ponctué et ceci à des échelles d'observations très fines (< 5 km). Cette absence de migration est imputable aux infrastructures humaines dans cette région qui est fortement urbanisée.

2. Éléments paysagers modulant les flux de gènes

L'impact de la fragmentation du paysage dans l'élaboration de ces discontinuités génétiques a été étudié au moyen d'analyses SIG (systèmes d'informations géographiques) impliquant la construction de matrice de résistance paysagère à une résolution de 5 m.

Cette résistance paysagère a été définie au moyen de calculs de chemins de moindres coûts ou de conductance globale du paysage. Les déterminants critiques de la matrice paysagère dans la modulation des flux génétiques et l'apparition de cassures génétiques frappantes au sein du bassin minier sont apparus être les suivants :

- les **milieux pionniers** ainsi que les **prairies** sont des **éléments facilitateurs de flux génétiques** ;
- les **routes à faible trafic** peuvent faire office de **corridors migratoires** ;
- les **forêts, terres agricoles** et **zones urbaines** (villes et autoroutes) entravent au contraire les processus de dispersion et entraînent la formation de **réseaux de populations extrêmement disjoints**.

Cette étude comparative met en évidence les enjeux de la connectivité paysagère dans les zones post-industrielles. Peu d'habitats réellement favorables sont disponibles et **les populations sont réellement tributaires d'espaces ouverts fournis par les friches industrielles des sites miniers.**



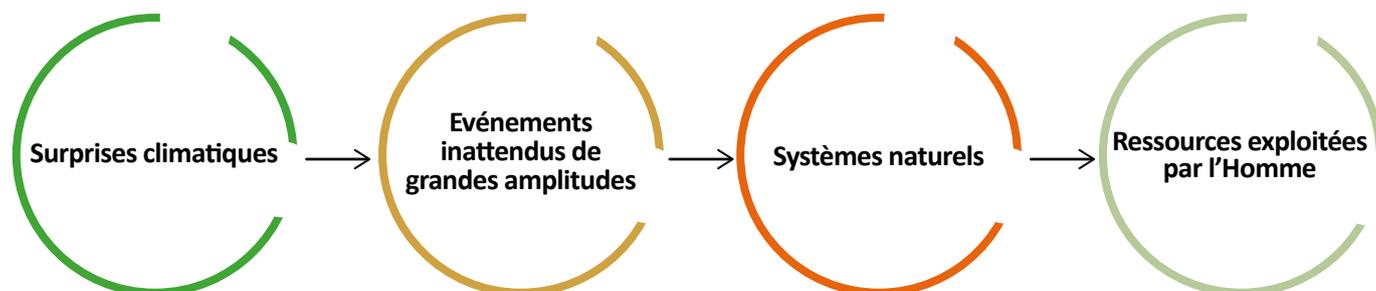
Pelodytes punctatus

Perspectives de recherche

Les changements globaux induits par les activités humaines peuvent conduire à des flux passifs d'individus sur de longues distances, produisant des patrons biogéographiques complexes et des structures génétiques de populations reflétant des dynamiques anthropiques passées. La détermination des sources et foyers d'introduction du Crapaud Calamite au sein de ces nouveaux habitats secondaires créés par l'homme lors de la révolution industrielle des trois siècles derniers constitue donc une piste de recherche intéressante d'un point de vue scientifique et historique.

12. Augmentation des surprises climatiques dans l'océan : conséquences sur l'équilibre des écosystèmes marins

Bien que de nombreux résultats attestent déjà d'une réponse des organismes marins à l'augmentation des températures, peu d'études de l'évolution de la biodiversité marine en relation avec le changement climatique global ont été conduites à de grandes échelles spatiales. Les raisons principales sont que les océanologues manquent encore cruellement d'une connaissance exhaustive sur la composition de la biodiversité marine (90% des espèces n'ayant pas encore été décrites) ainsi que de précieuses informations sur la biologie, la biogéographie et l'écologie des espèces. Il est par conséquent nécessaire de développer des modèles numériques afin de comprendre et anticiper les changements biologiques et écologiques dans les océans et mers, lesquels couvrent plus de 70% de superficie du globe. **Les chercheurs de CLIMIBIO se sont intéressés en particulier aux surprises climatiques car elles peuvent avoir des conséquences biologiques et socio-économiques considérables.**



Définition

Une **surprise climatique** est un changement inattendu de grande amplitude qui a des conséquences biologiques, écologiques et socio-économiques importantes. Les changements s'opèrent en général en quelques années, voire une seule dans les cas les plus extrêmes. Ces phénomènes étaient très mal compris et, dans le contexte climatique, la communauté scientifique ne disposait pas d'outils pour les prédire. Les chercheurs de Climibio ont développé un modèle permettant de mieux comprendre ce phénomène et de les anticiper à l'échelle globale.

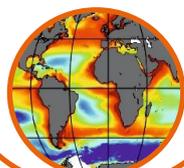
Le suivi indispensable des océans



Comprendre les processus responsables des changements biologiques en milieu océanique.



Modéliser les interactions entre composantes biologiques, océaniques et climatiques.



Anticiper les effets du changement climatique dans les systèmes biologiques et écologiques à l'aide de modèles numériques.

Chiffres clés

1
milliard

Nombre de personnes pour qui l'océan représente la source principale de protéine animale.

60%

% de la population mondiale qui vit à moins de 50 km de l'océan et des mers.

50%

% d'oxygène produit au minimum par l'océan.

15-51
trillions

Montant estimé en euros de l'apport des services écosystémiques de régulation et d'approvisionnement de l'océan.

Exemple de surprise climatique dans le Pacifique Nord

Cas concret

Le Pacifique Nord a connu un tel phénomène en 1976 : un changement des champs de pression atmosphérique a entraîné une modification du régime des vents, impactant alors l'équilibre des écosystèmes, avec des conséquences visibles sur tous les compartiments biologiques, du plancton végétal aux poissons. Autrefois dominées par la crevette rouge, les ressources exploitées ont alors fait place à une pêche dominée par la morue d'Alaska. Les conséquences socio-économiques ont été considérables.



Anticipation

- La modélisation permet d'**identifier les zones sensibles au changement climatique** ;
- L'anticipation des changements de biodiversité permet de **prévoir les conséquences sur les revenus de pêche**.

Implémentation d'un modèle CLIMIBIO océanique unique au monde

Les chercheurs de CLIMIBIO ont utilisé une approche originale basée sur une nouvelle théorie macroécologique de l'organisation de la vie dans les océans : **la théorie METAL**. De nombreuses lacunes existant sur la biologie des espèces marines, un grand nombre d'espèces fictives (créées numériquement) a été généré. Chaque espèce présente une réponse unique à la variabilité des températures. Ces espèces théoriques sont en mesure de coloniser des régions océaniques dès lors qu'elles résistent aux fluctuations climatiques locales, en particulier thermiques : la colonisation progressive d'un grand nombre d'espèces est ainsi modélisée et les espèces s'assemblent alors en communautés. En utilisant cette approche, les chercheurs de CLIMIBIO ont reconstitué la biodiversité actuelle de l'océan superficiel (les 200 premiers mètres de la colonne d'eau) et leurs résultats démontrent une relation forte entre la biodiversité observée et la biodiversité théorique et ce, pour un grand nombre de groupes d'espèces tels que les foraminifères, les crustacés (copépodes et euphausiacés), les poissons (requins océaniques et poissons osseux) et les cétacés.

Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Cartographie des changements de biodiversité

Le modèle développé au cours du projet CLIMIBIO a été appliqué sur l'ensemble des océans afin d'identifier, par période de 5 ans de 1960 à 2015, les régions influencées par des surprises climatiques. Alors que pour certaines périodes les changements biologiques sont faibles et ne concernent qu'une faible superficie de l'océan (p. ex. 2005-2009), pour d'autres, les changements sont beaucoup plus marqués et étendus spatialement (en rouge sur la Figure 1).

Ainsi, le modèle prédit des changements biologiques substantiels sur une grande partie de l'hémisphère Nord au cours de la période 2010-2014, les changements prédits dans le Pacifique Nord résultant de l'effet combiné d'un épisode majeur d'El Niño et de la présence d'une vaste zone d'eau anormalement chaude située en plein Pacifique Nord Est, le « blob Pacifique ».

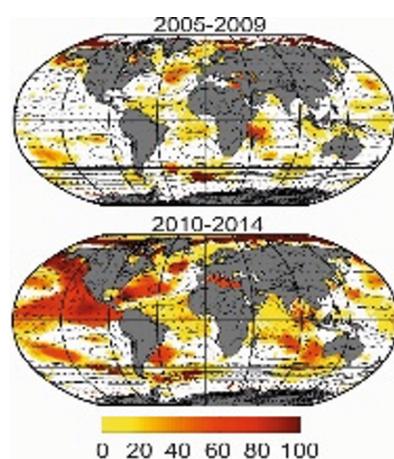


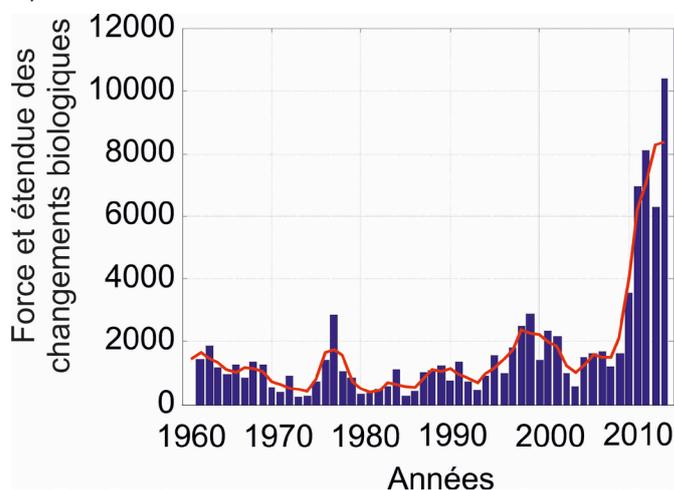
Figure 1 : Pourcentage de la superficie de l'océan qui subit des changements substantiels de biodiversité.

Application du modèle pour les périodes 2005-2009 (haut) et 2010-2014 (bas).

2. Changements à long-terme

Le modèle développé montre une augmentation sans précédent de l'étendue et de la force des surprises climatiques océaniques durant la période 1960-2015 (Figure 2). Reste maintenant à déterminer si cette augmentation est exceptionnelle, c'est-à-dire si elle va perdurer dans les années à venir, avec l'augmentation globale des températures.

Figure 2 : Force et étendue des surprises climatiques à l'échelle globale pour la période 1960-2015.



Remarque : Il s'agit d'un indice sans unité. On peut comparer la valeur de l'indice (période récente) par rapport à celle de période passée. On note ainsi une très forte augmentation de l'étendue et la force des changements.

Les programmes d'observation de la biodiversité marine couvrent une faible superficie des océans et prennent bien souvent place dans des régions proches des côtes. Le modèle proposé dans le contexte du programme Climibio offre une couverture spatiale globale et permet d'identifier rapidement les changements biologiques majeurs qui pourraient affecter fortement la biodiversité marine. Dans la plupart des cas, le modèle prédit un événement un an avant qu'il se produise, permettant alors d'anticiper les changements biologiques majeurs et d'identifier les régions de biodiversité « à risque », mais actuellement non couvertes par les programmes d'échantillonnage.

Conséquences du changement climatique sur la biodiversité océanique à grande échelle

Les modifications de la biodiversité marine observées dans le contexte de CLIMIBIO s'accompagneront de conséquences significatives sur les services écosystémiques de régulation et d'approvisionnement. Alors que la biodiversité marine permet l'exploitation annuelle de 80 millions de tonnes de poissons et d'invertébrés marins, les changements attendus de biodiversité se traduiront par une réorganisation globale des espèces et des communautés dans l'océan, et notamment des espèces commerciales (pêche, aquaculture), bénéfiques pour l'Homme (compléments alimentaires, médicaments...), ou encore potentiellement dangereuses (méduses et autres organismes planctoniques, crabes toxiques ou mortels, poissons dangereux...). Dans un monde plus chaud, les services de régulation seront donc fortement perturbés et ces modifications de biodiversité pourraient affecter les cycles biogéochimiques, en particulier la pompe de carbone océanique.



III

-

Atténuation du changement climatique et perspectives d'adaptation



III - Introduction

Le changement climatique dont nous sommes témoins actuellement est provoqué par les actions anthropiques. Seule l'action de l'être humain peut y remédier. Ce phénomène est en marche et est doté d'une très forte inertie. Cela signifie qu'un arrêt total des émissions de gaz à effet de serre (GES)^a d'origine anthropique ne permettrait pas de l'atténuer instantanément. Un retour vers un niveau d'émission de GES acceptable prendra probablement des décennies et nous n'avons d'autres alternatives que de mettre en place des actions nous permettant de nous adapter à court terme à ce changement climatique tout en mettant en œuvre des actions pour atténuer durablement les émissions de GES sur le moyen et le long terme. Ces actions doivent être impulsées conjointement par des décisions gouvernementales fortes à l'échelle internationale (par exemple l'Accord de Paris^b), nationale (par exemple la Loi Energie-Climat^c) et territoriale (par exemple la mise en place du Plan Climat-Air-Energie territorial PCAET). Mais c'est aussi à l'échelle de l'individu que doit se faire la transformation, par une prise de conscience que chacun à son niveau peut contribuer à limiter les émissions de GES. La perception des populations sur le changement climatique fait l'objet de la **Fiche 13** de ce chapitre. Sur le plan de l'atténuation des émissions des GES, une alternative mise en œuvre depuis plusieurs années s'appuie sur l'utilisation des biocarburants comme vecteurs d'énergie (**Fiche 14**). Un autre aspect moins connu du grand public concerne la capacité de l'océan à absorber le CO₂. La **Fiche 18** s'intéresse au moyen de favoriser cette vertu de l'océan. Enfin sur le plan de la biodiversité nous voyons comment des actions peuvent localement contribuer efficacement à adapter au changement climatique le milieu et les organismes qu'il héberge par exemple par la mise en place de techniques de paillage (**Fiche 15**) ou en favorisant l'implantation d'abeilles en milieu urbain (**Fiche 16**). Enfin nous montrons comment une gestion efficace basée sur le renforcement de la flore des dunes permet de remédier à la vulnérabilité du cordon dunaire de la mer du Nord (**Fiche 17**), avec l'exemple de la Pensée des dunes.

^aA chaque GES peut être associé un potentiel de réchauffement global (PRG) dépendant de sa nature et de la durée sur laquelle il est calculé, qui peut différer de sa durée de vie dans l'atmosphère. Par exemple, le PRG du méthane est de 84 en considérant sa durée de vie moyenne de 20 ans, et de 28 environ lorsqu'il est calculé sur 100 ans. Ainsi le PRG (à 100 ans) du méthane (CH₄) est 25 fois plus élevé que celui du dioxyde de carbone (CO₂). Les inventaires de GES sont généralement exprimés avec un PRG à 100 ans, ce qui permet de donner plus de poids aux gaz persistants qu'aux gaz ayant une courte durée de vie.

Des informations plus détaillées sont disponibles sur : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/4-panorama-mondial-des-emissions-de>

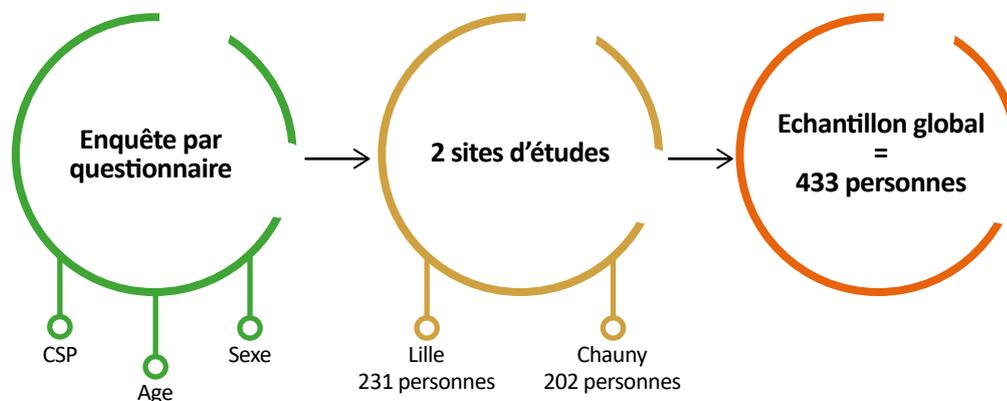
^bhttps://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_fr

^c<https://www.ecologie.gouv.fr/loi-energie-climat>

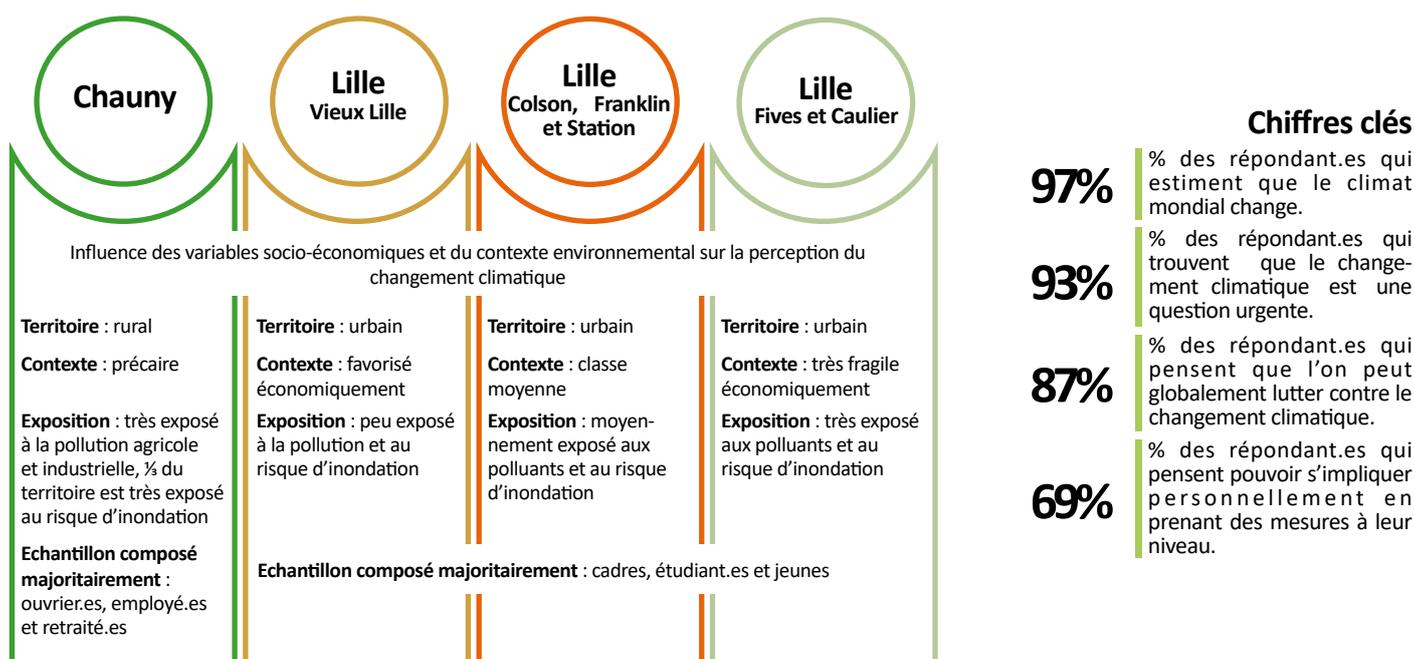


13. Enquête sur la perception des populations du changement climatique : quels sont les leviers et les freins au passage à l'action ?

La relation que les individus entretiennent à l'environnement et au climat est liée **aux perceptions et représentations** qu'ils ont de ces problèmes. Pourquoi étudier les perceptions et les représentations ? L'étude des représentations sur le changement climatique réalisée de juin à septembre 2017 permet de comprendre le sens que les habitant.es donnent au changement climatique. Une partie des attitudes et des comportements adoptés dépendra de leur appréhension du problème. C'est pourquoi une enquête a été réalisée auprès de **433 personnes** en Hauts-de-France pour étudier ces perceptions.



Populations enquêtées



Principales préoccupations des enquêtés



59 % des enquêté.es déclarent avoir mis en œuvre des mesures individuelles permettant de lutter contre le changement climatique. Néanmoins les Lillois.es sont plus nombreux et nombreuses (65%) que les Chaunois.es (53%) à déclarer mettre en œuvre des mesures.

1. Les actions mises en oeuvre

Parmi les enquêté.es qui déclarent agir en faveur du climat, plus de la moitié (**52%**) prennent des mesures en adaptant leur mode de transport. Les enquêté.es ont répondu le plus souvent qu'ils.elles avaient adapté leur mode de transport (en utilisant davantage le vélo, moins souvent leur voiture, ... par exemple).

Puis, ont été cités le fait de **réduire les déchets (36%)** et de **faire attention à sa consommation d'eau et d'énergie (34%)**. Les modifications des habitudes alimentaires (circuits courts, produits bio) font également partie des pratiques perçues comme participant à la lutte contre le changement climatique à l'échelle des Hauts-de-France, notamment pour les Lillois.es (**33%** contre **7%** à Chauny).

Le registre des actions mises en œuvre dans les 2 territoires reflète à la fois la différence des solutions à disposition des individus mais aussi un moindre intérêt des Chaunois.es porté à la question environnementale face aux difficultés économiques auxquelles ils.elles sont confronté.es.

Les freins à l'action

1. Le manque d'information

27% des répondant.es lillois.es contre **8%** des répondant.es chaunoi.ses disent ne pas savoir comment faire alors même qu'ils.elles souhaiteraient prendre des mesures. Il y a donc une méconnaissance des mesures à mettre en application. Elle est le résultat d'un déficit d'information à la fois qualitatif et quantitatif.

2. La responsabilité des industriels

21% des répondant.es n'ayant pas pris de mesures pensent que ce sont les entreprises et les industries qui doivent agir contre le changement climatique. Les industriels, perçus comme étant la principale source d'émissions de GES et de pollution, sont considérés comme les acteurs devant agir en prenant pleinement leur part de responsabilité.

2. Les leviers

L'offre d'alternatives modales

Parce qu'ils.elles ont des alternatives modales plus nombreuses à leur disposition, les Lillois.es sont plus nombreux et nombreuses (**61%**) que les Chaunois.es (**40%**) à déclarer réduire l'usage de la voiture. Le secteur des transports constitue donc un des leviers d'action que les populations mobilisent lorsque l'offre d'alternatives est suffisamment développée au sein des territoires.

Le niveau de revenu

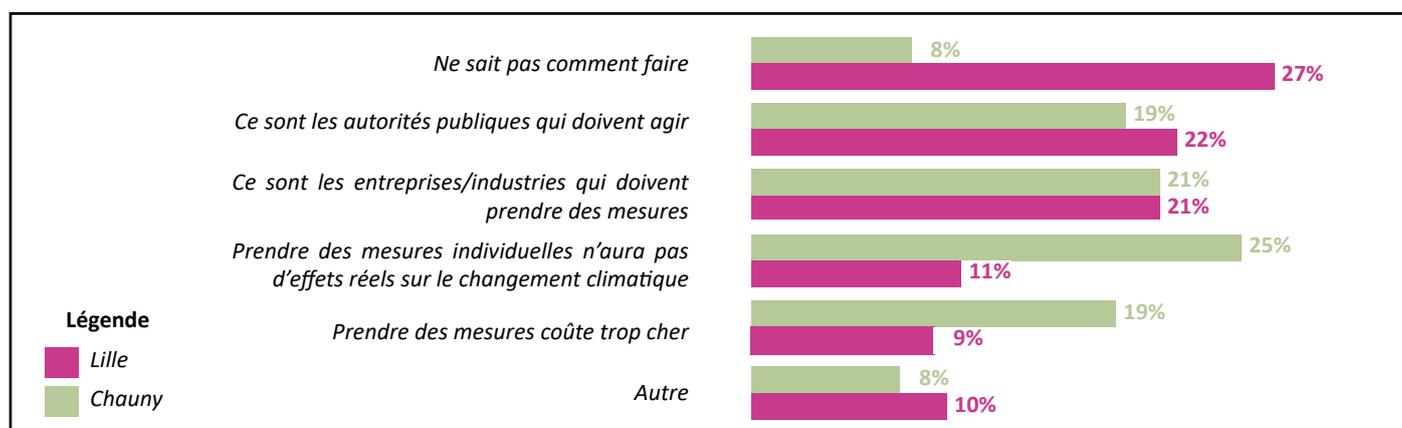
La lutte contre le changement climatique doit être menée en tenant compte des **inégalités socio-économiques**. Nos résultats montrent des corrélations entre les niveaux de vie économiques et les mesures de lutte. Les personnes avec des revenus élevés développent des pratiques qui, pour beaucoup d'entre elles, engendrent des dépenses (**isolation du logement, achats bio et locaux...**) contrairement aux faibles revenus dont la capacité d'action semble plus restreinte.

3. Le coût des mesures

Les enquêté.es chaunoi.ses sont plus nombreux et nombreuses à dire que prendre des mesures coûte trop cher (**19%**), c'est 9 points de plus qu'à Lille (**10%**). Ce constat invite à prendre en considération les difficultés économiques comme des barrières importantes dans la lutte contre le changement climatique.

4. La responsabilité des pouvoirs publics

20% des enquêté.es pensent que ce sont les autorités publiques qui doivent prendre des mesures. Dans ce groupe, il y a un transfert de responsabilité vers des groupes d'acteurs collectifs qui peut s'expliquer par le sentiment d'une faible efficacité des actions individuelles face au changement climatique.

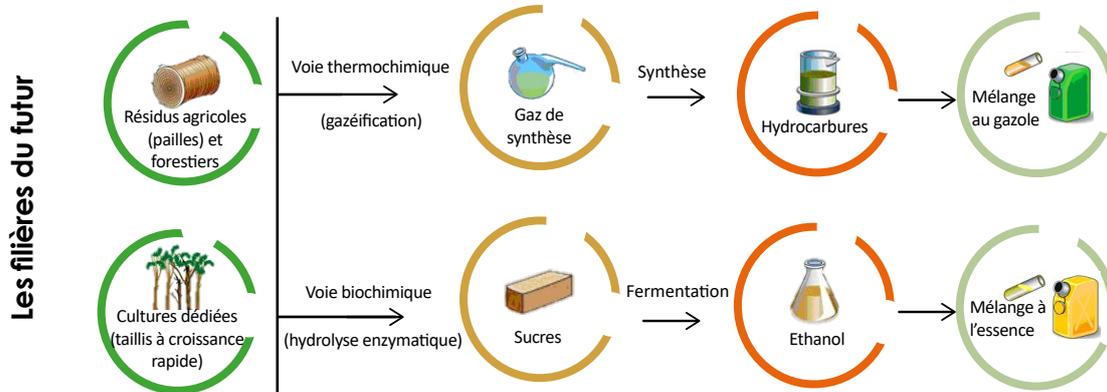


Conclusion

La population des Hauts-de-France est consciente du changement climatique et de ses conséquences. Cependant, cette question est perçue comme étant moins prioritaire comparée aux difficultés économiques, à l'insécurité liée au terrorisme. Différentes stratégies de lutte contre le changement climatique sont développées par les habitant.es de la région qui reflètent l'hétérogénéité des situations et la grande disparité des niveaux de vie des populations.

● 14. Atténuation du changement climatique par l'utilisation de biocarburants

Le transport routier et le secteur résidentiel sont responsables de 60% des émissions de CO₂ en France, soit 50% des émissions totales de gaz à effet de serre (GES), exprimées en équivalent CO₂. Lors de la combustion de ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel et GPL), le CO₂ émis provient du carbone stocké dans le sol depuis des millions d'années. Au contraire l'utilisation de biocarburants et biocombustibles permet d'atténuer le bilan net de ces émissions. En effet, le CO₂ réémis dans l'atmosphère après combustion a été absorbé au préalable lors de la photosynthèse des plantes, et ce lors d'un cycle de vie plus court du carbone. Les biocarburants produits par transformation chimique ou thermique de la biomasse (matière organique végétale ou animale) peuvent être substitués aux carburants fossiles dans des proportions variables. Ils présentent alors les avantages supplémentaires d'une production d'énergie autonome, mais leurs impacts sur la formation de polluants et le secteur agricole doivent être clarifiés.



Faire les bons choix en matière de biocarburants

S'assurer que la biomasse ne soit pas exploitée au détriment de la filière alimentaire (blé, betterave, maïs).
Favoriser la production de biomasse issue des végétaux à croissance rapide, des déchets organiques, des huiles alimentaires usagées ou des graisses animales.

Privilégier les circuits courts afin que le transport de la matière première n'occasionne pas des émissions supplémentaires.

Optimiser les processus de synthèse des biocarburants ainsi que la formulation (composition chimique) des nouveaux carburants.

Maitriser les émissions de gaz polluants et guider la formulation des carburants.

Définition

Les biocarburants sont des hydrocarbures (souvent oxygénés) issus de la transformation de la matière organique utilisée en remplacement partiel ou total des carburants fossiles. A l'heure actuelle, les bioessences sont essentiellement formulées à l'aide d'éthanol ou d'ETBE (éther éthylique tertiobutyle), et les biodiesels contiennent principalement des esters méthyliques d'acides gras ou d'huiles végétales hydrogénées.

Chiffre clé

85% % de l'énergie globale mondiale qui provient de combustibles fossiles.

Perspectives de gestion

Intérêts

- **Production locale** et autonome d'énergie ;
- **Réduction** des émissions de GES ;
- **Valorisation** des déchets organiques urbains ou ruraux ;
- **Réduction** de certains polluants (notamment les particules de suie).

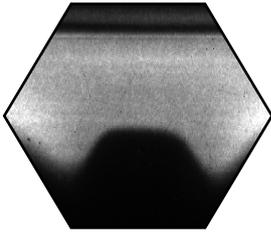
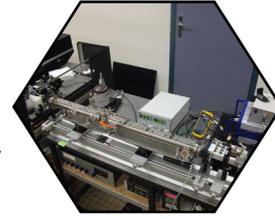
Incertitudes

- **Formation** d'autres polluants ?
- **Performances** ;
- **Coût** de certaines filières ;
- **Compatibilité** avec le parc automobile existant ;
- Disponibilité suffisante de biomasse non alimentaire.

Débitmètre liquide CEM.



Banc de mesure de HCN par absorption CRDS.



Imagerie par fluorescence induite par laser d'une flamme froide stabilisée.



Chromatographe en phase gazeuse.

Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

Les composés extraits de la biomasse sont de nature chimique variée, et contiennent des molécules différentes de celles présentes dans les carburants conventionnels. Or la qualité d'un carburant (par exemple son pouvoir calorifique, son impact sur les émissions polluantes) est très dépendante de sa composition chimique. Les études en laboratoire portant sur la réactivité des différents biocarburants extraits de la biomasse sont donc primordiales afin de comprendre leur comportement, mais aussi d'éclairer le choix de la bonne molécule. Les propriétés réactionnelles recherchées doivent conduire à des délais d'auto-inflammation proches de ceux des carburants conventionnels pour lesquels les moteurs sont conçus et doivent répondre aux normes environnementales en matière d'émissions polluantes à l'échappement moteur.

1. Formulations des biocarburants

A l'aide de travaux en laboratoire, on identifie les **bons candidats** en vue d'une intégration optimale dans les carburants essence ou diesel. Le pré-nol, futur biocarburant de type « essence », s'est ainsi avéré très efficace pour augmenter l'**indice d'octane**, à l'aide d'une étude fondamentale de sa combustion au sein d'un mélange représentatif d'un carburant commercial.

D'autres composés pressentis comme d'intéressants candidats, comme l'anisole ou le crésol, se sont révélés moins attractifs, du fait par exemple d'une stabilité réduite lorsqu'intégrés à un mélange, ou de par la formation d'espèces nocives suite à leur combustion.

Des codes de simulation ont été développés afin de prédire la réactivité et la formation de polluants lors de la combustion d'une sélection de potentiels futurs biocarburants. Ces codes intègrent des milliers de réactions nécessaires à la description correcte de la formation des espèces (polluantes ou non) impliquées.

2. Emissions polluantes

L'impact environnemental immédiat des biocarburants est la limitation des émissions de GES (cycle de vie plus court du CO₂). **Mais qu'en est-il de leur impact sur la formation des polluants atmosphériques ?** (NOx, particules de suie et leurs précurseurs gazeux toxiques comme les HAP).

Des expériences ont permis de comparer les concentrations en NO ou en HAP émis lors de la combustion d'une flamme de laboratoire alimentée en méthane, ou avec un mélange méthane partiellement substitué avec un composé oxygéné cyclique (potentiel biocarburant).

Il a été observé que selon la nature chimique du composé oxygéné, **l'effet peut être positif ou négatif** sur la quantité de NO formé et semble être corrélé à la propension de la molécule à former des intermédiaires réactionnels comme l'acétylène ou le formaldéhyde.

Les études concernant la formation des précurseurs de suie lors de l'oxydation de biocarburants tendent à montrer que ceux-ci forment des HAP oxygénés (HAPO) potentiellement **plus toxiques que les HAP**.

Perspectives de recherche

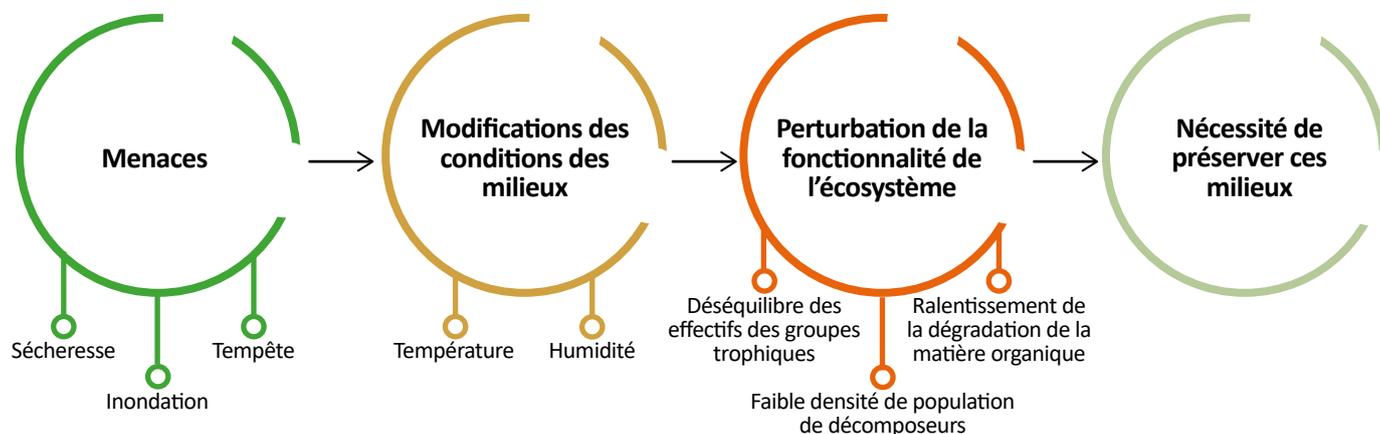
Afin de mieux comprendre les processus chimiques mis en jeu lors de l'oxydation de combustibles oxygénés (issus de la biomasse), une inter-comparaison des processus chimiques mis en jeu lors de la combustion est nécessaire. Une meilleure compréhension de ces processus détaillés devrait permettre d'établir une classification des composés chimiques issus de la biomasse en fonction de leur **comportement réactionnel** (de la basse à la haute température) et des **émissions générées** lors de leur oxydation (NOx, HAP, HAPO, suies, ainsi que des espèces non encore réglementées comme le formaldéhyde).

Il s'agit donc d'établir une **cartographie** des nouveaux composés issus de la biomasse (envisagés comme substitutif aux ressources fossiles) en fonction de leur comportement à l'auto-inflammation, et à leur propension à former des espèces néfastes à l'émission du processus de combustion.

D'autres part, ces recherches peuvent être enrichies d'une étude plus poussée de l'**impact sanitaire** de ces biocarburants. Il s'agira alors d'éclaircir, à l'aide d'études en lien avec les sciences médicales, quelles distributions de polluants (et *in fine* quels carburants) sont les plus néfastes à la santé.

15. Atténuation des effets du changement climatique sur les écosystèmes par le paillage

Pour assurer le **bon fonctionnement des écosystèmes**, le sol joue des rôles très variés comme des **fonctions d'habitat**, de **filtre de la pollution** ou encore de **recyclage**. Le sol est le siège de nombreux cycles biogéochimiques comme le cycle du carbone. Près de 25% de la biodiversité mondiale y est abritée ce qui en fait un réservoir de ressources génétiques et chimiques. Toutefois, **le sol est un milieu fragile**. A l'échelle mondiale, tous les 5 ans, une surface de sols fertiles équivalant à la superficie de la France est perdue ! Il est donc nécessaire de le **préserver des menaces** qui pèsent sur lui en **assurant son intégrité physique, chimique et biologique pour maintenir ses fonctions**.



Nécessité de préserver ces milieux

<p>Limiter les stress comme la dessiccation dans les écosystèmes terrestres affectés par les changements climatiques.</p>	<p>S'assurer que le milieu présente des conditions favorables à la présence, au bon développement et au maintien des organismes.</p>	<p>Présence « d'espèces clés »</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ingénieur du sol ; • Prédateur ; • Décomposeur. 	<p>Créer les conditions de reconnexion pour permettre aux communautés de la faune du sol (pédofaune) d'accéder à ces milieux.</p>
--	---	---	--

Définition

La **technique de paillage** ou **mulching** est définie comme l'apport à la surface du sol d'une couche de matériaux artificiels ou naturels, par opposition aux matériaux qui sont incorporés dans le sol. Ainsi, **tout matériau déposé ou cultivé à la surface du sol peut être considéré comme un paillis**.

Chiffre clé

-2°C

Différence moyenne de température sous les paillis, par rapport à un sol nu ou sous une bâche plastique sur la période printemps/été.

Perspectives de gestion

Intérêts

- Enrichissement en matière organique ;
- Limitation de l'évapotranspiration ;
- Régulation des conditions microclimatiques ;
- Limitation de l'érosion ;
- Récupération des déchets verts ;
- Limitation du développement des adventives ;
- Esthétique.

Avantages collectivités

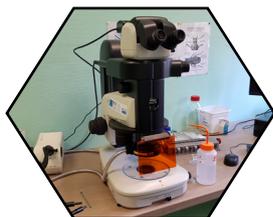
- Limite l'utilisation d'intrants chimiques ;
- Limite l'utilisation d'herbicides ;
- Limite les risques sanitaires ;
- Limite le coût d'entretien et la pénibilité du travail ;
- Valorise les déchets à faible coût ;
- Limite la consommation d'eau ;
- Service culturel / bien être ;
- Contrôle de la circulation piétonne.

Avantages biodiversité

- Offre des conditions microclimatiques favorables à la pédofaune ;
- Habitat pour les organismes ;
- Favorise le déplacement des organismes ;
- Nourrit le sol ;
- Pédofaune moins soumise à la pollution.

Matériel de mesure comme ce LI-COR: LI-8100-S1
Survey package (mesures des échanges gazeux).

Dispositif expérimental à Evin-Malmaison
site Atelier Metaleurop.



Stéréo-microscope de recherche à
épifluorescence NIKON SMZ18.



Ensemble de 5 enceintes climatiques permettant de contrôler
les conditions de températures, d'humidité et de luminosité.



Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Le cloporte

Les isopodes terrestres ou cloportes, apparaissent être un modèle intéressant pour étudier les changements climatiques.

L'hypothèse avancée dans cette étude est que pour faire face aux changements de conditions des milieux, les cloportes pourraient **passer moins de temps à chercher de la nourriture** et plus de temps à s'abriter pour réduire le risque de mortalité par dessiccation, **perturbant les cycles biogéochimiques** du sol.

Les expérimentations réalisées en **microcosmes** (conditions contrôlées) visaient à évaluer l'impact de l'*Humidité Relative* de l'air (90 et 50% HR) sur la décomposition de la litière par les cloportes. Un suivi comportemental, morphologique et de 4 paramètres physiologiques a été mené. 4 espèces d'isopodes connues pour avoir différentes sensibilités microclimatiques ont été utilisées simultanément. La sensibilité des mâles et des femelles a été testée. Le suivi de la dégradation de la litière a aussi été réalisé.

Quelle que soit l'espèce étudiée, le **taux de survie** est significativement **plus faible** dans les conditions de **sécheresse** ainsi que le **taux de décomposition** de la litière étudiée. Les 4 espèces étudiées n'ont pas été affectées de façon identique : les **espèces forestières étant les plus touchées**. Une différence entre les sexes apparaît.

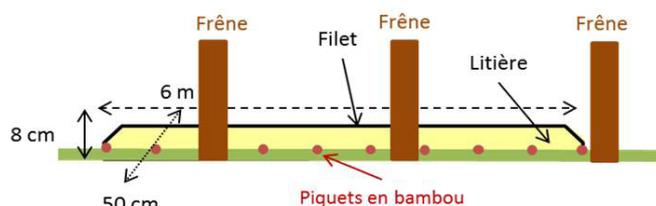
Ces conclusions sont importantes pour la planification d'expériences futures sur les cloportes. Elles pourraient aussi refléter de possibles **perturbations à long terme**, sur la **dynamique des populations** d'isopodes. En effet, si un sexe est favorisé, des **troubles de la reproduction** devraient être pris en considération.



2. Le paillage

Le paillage peut être une solution pour limiter les impacts des activités anthropiques et des changements globaux sur la **fonctionnalité des écosystèmes**.

L'objectif de cette expérimentation était de comparer l'efficacité de **5 types de paillis** (du Bois Raméal Fragmenté, une bâche plastique, du *Miscanthus*, des feuilles mortes et de la paille de blé). A cet effet, des **activités microbiennes** (FDA, Laccases et Urease), des **facteurs abiotiques** (température, taux de carbone organique et ratio carbone/azote) ainsi que la colonisation par la **faune du sol** (macro et mésofaune) ont été suivis pendant plus d'un an. Dans un souci de gestion, leur **taux de dégradation** a été pris en compte. Pour cela, 18 bandes de paillis ont été installées sur le site expérimental (voir schéma ci-dessous).



Les paillis organiques contribuent à **restaurer la fonctionnalité** dégradée du sol par son enrichissement en carbone organique, azote et autres nutriments. Ils **limitent le stress de dessiccation en offrant des températures plus favorables (en moyenne une diminution de 2°C sur la période printemps/été)**. Ils offrent un habitat et des conditions microclimatiques attractives pour les organismes puisque des **espèces dépendantes de milieux forestiers** mais aussi des espèces plus inféodées à des **milieux plus ouverts** ont été identifiées. Ainsi, il permet la **reconnexion des milieux** et **favorise le déplacement** des individus. La fonge, source de nourriture pour de nombreux organismes du sol, s'y développe bien. Tous les maillons du réseau trophique y sont présents. On compte aussi la présence de grands et petits individus qui ont des capacités de dispersion différentes.

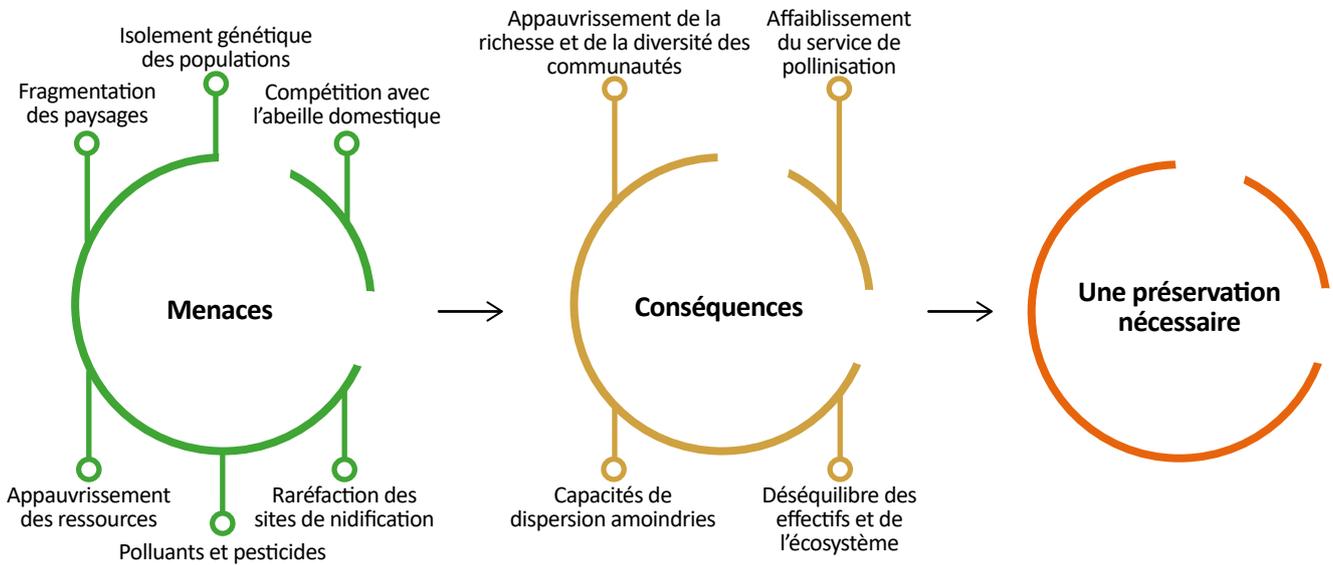
Perspectives de recherche

Afin de poursuivre nos investigations sur le potentiel de la technique de mulching pour maintenir des conditions d'humidité optimales et limiter le stress de dessiccation dans les écosystèmes terrestres affectés par le changement climatique, des expérimentations complémentaires doivent être réalisées. Il s'agira de tester différentes hauteurs et compositions de mulchs dans deux conditions (optimale 90% HR et sèche 50% HR (scénario du GIEC)) au regard de divers paramètres abiotiques, activités enzymatiques du sol et de l'activité des isopodes terrestres, décomposeurs de la litière.

L'objectif est d'étudier la technique de paillage en vue de préserver les conditions de milieu favorables aux organismes du sol, notamment lors des épisodes de canicule ainsi que pour favoriser leurs déplacements. Il s'agira finalement d'évaluer la durabilité des effets obtenus. Enfin il sera également intéressant de suivre l'évolution de la composition des populations dans ces deux conditions, notamment les proportions de mâles et femelles et les tailles des individus.

16. Favoriser le service écosystémique de pollinisation en ville dans un contexte de changement climatique

Les abeilles contribuent à la **conservation des ressources naturelles en ville en assurant le service écosystémique de pollinisation**. Fortement impactées par la fragmentation et la modification de leur habitat, **les abeilles sont en déclin**. Afin de maintenir et renforcer la présence des abeilles en ville, les initiatives favorables à l'abeille domestique se multiplient, mais elles sont **peu favorables ou sont même défavorables aux abeilles sauvages**. Or, ces dernières sont **des pollinisateurs plus efficaces** que leur homologue domestique avec lequel elles sont en compétition. On dénombre en région environ 400 espèces d'abeilles sauvages et une espèce d'abeille domestique. La préservation des abeilles sauvages est difficile car les citoyens sont peu familiers des abeilles sauvages et les actions renforçant la présence des abeilles en ville sont peu structurées.



Une préservation nécessaire

- Maintien et restauration des habitats.**
- Création ou restauration des continuités écologiques.**
- Atténuer la compétition avec l'abeille domestique.**

Chiffres clés

- 35% à 75% de la production agro-alimentaire mondiale est dépendante, au moins partiellement, de la pollinisation par les animaux.
- 78% de la flore sauvage des climats tempérés est pollinisée par les insectes, essentiellement les abeilles.
- Il existe une forte dépendance des abeilles aux ressources florales et donc aux saisons.
- La fructification induite par les abeilles sauvages est 2 fois plus élevée que celles des abeilles domestiques.



Forte interdépendance plante-abeille

Distinguer les abeilles sauvages et l'abeille domestique

Absence de vie en colonies	Des nids dans des matériaux diversifiés	Solitaires et indépendantes	Capacité de dispersion faible
La plupart des abeilles sauvages ne vivent pas en colonies, ni dans des ruches. Sauf les bourdons qui forment des colonies de petite taille (200-300 individus).	Les abeilles sauvages nichent le plus souvent dans les sols nus (pour 70% d'entre elles), le bois mort , les tiges de bois creux ou les galeries d'autres animaux.	Bien que souvent grégaires, les abeilles sauvages sont solitaires et indépendantes . Elles travaillent pour leurs propres larves et ne produisent pas de miel.	Beaucoup d'espèces d'abeilles sauvages ont une faible capacité de dispersion , elles ne peuvent pas couvrir de longues distances. Leur rayon de dispersion, pour la plupart, oscille entre 100 et 300 m alors qu'il est de plus 1 km pour l'abeille domestique.

Cartographie de l'occupation du sol (rayon de 500 m) réalisée à partir des données BD Topo® (IGN) et des photographies aériennes.

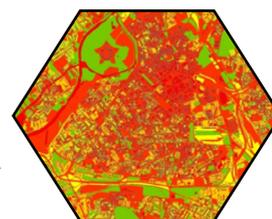
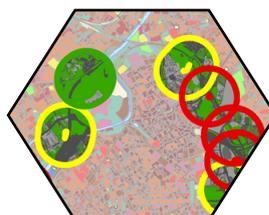
Identification des connectivités potentielles en faveur des abeilles sauvages - méthode des graphes paysagers.



Sélection des sites d'études - Métropole Européenne de Lille.



Classification selon un gradient d'urbanisation en 3 classes.



Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Cartographie et gradient d'urbanisation

L'urbanisation a longtemps été décrite par un seul facteur pour expliquer les effets du milieu urbain sur la flore. Pourtant, le milieu urbain est hétérogène. Il est en effet plus ou moins perméable et donc plus ou moins favorable au déplacement des espèces. Les occupations du sol présentes autour d'un espace sont des descripteurs physiques influençant la dispersion des individus.



L'hypothèse avancée dans cette étude est que la présence des plantes à fleurs en ville, dans les jardins privés ou dans les espaces verts publics, peut jouer un **rôle fondamental pour assurer les déplacements** des abeilles et, en retour, **garantir la pollinisation**.

La cartographie réalisée par photo-interprétation permet d'identifier les sites selon un gradient d'urbanisation à 3 niveaux.

2. Identification des continuités écologiques

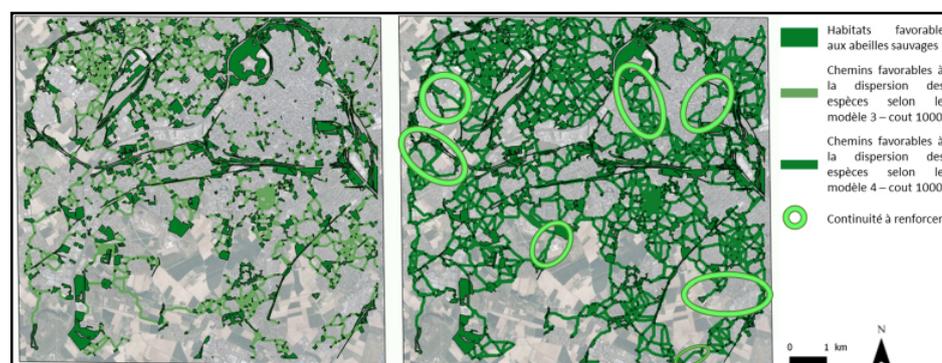
En fonction de leur taille et de la disponibilité des ressources, les abeilles peuvent voler plusieurs centaines de mètres pour butiner.

La **méthode des graphes paysagers** permet d'identifier des connectivités potentielles en faveur des abeilles sauvages. La méthode consiste à déterminer des « **chemins** » **préférentiels de dispersion** et à **définir un coefficient de perméabilité** pour chaque type d'occupation du sol.

Finalement, 3 niveaux d'urbanisation et 4 distances de dispersion ont fait l'objet d'une analyse cartographique, aboutissant à la création de 12 modèles.

Les graphes permettent de proposer des scénarii de continuités potentielles tenant compte des contraintes :

- **écologiques** : capacité de dispersion des abeilles sauvages (et éventuellement de présence de ruches) ;
- **structurelles** : occupation du sol actuelle et de hiérarchie d'importance des espaces de nature étudiés ;
- **foncières** : propriété des parcelles (publiques, privées) ;
- **futures** : potentialités de modification des espaces de nature ou de modification d'actions de gestion.



Selon les modèles choisis, les sites d'étude sont plus ou moins bien connectés entre eux. Les jardins privés peuvent jouer un rôle important dans la dispersion des abeilles sauvages. L'implantation de ruches peut aussi accentuer des ruptures déjà existantes. Les modèles ont également mis en évidence des continuités fragiles à préserver ou à renforcer.

Perspectives de recherche

L'étude pourra permettre d'étudier l'opérationnalité des actions de gestion : faisabilité, notamment financière des actions, mutabilité des espaces, portage des actions. Plusieurs acteurs peuvent être mobilisés : la ville de Lille (propriétaire de plus de 400 parcelles sur le territoire d'étude) ou l'établissement public foncier. Ces derniers agissent déjà en faveur des abeilles sauvages via un préverdissement du foncier libéré et participent aux semis de prairies fleuries d'espèces locales.

Les continuités identifiées ont été élaborées par rapport à la situation des 12 sites d'études. Dans le prolongement de ce travail, la méthodologie pourra être étendue au territoire de la MEL ou à toute autre zone urbanisée.

● 17. Suivi de la connectivité entre dunes littorales au moyen de la Pensée des dunes comme plante indicatrice

Outre leur valeur paysagère, **les cordons dunaires côtiers permettent de protéger l'arrière-dune des submersions marines**. Le maintien de ce service écosystémique pour les générations à venir impose de **préserver la dynamique de la végétation dunaire**, moteur de la formation et de la fixation des dunes. Pour que ce processus ait lieu naturellement, les espèces végétales permettant cette dynamique doivent être présentes localement : le cordon dunaire doit donc être aussi continu que possible, mais également formé d'une mosaïque de paysages dunaires d'âges variés et végétalisés naturellement. Or, le cordon dunaire du littoral de la mer du Nord a été interrompu et modifié par les activités humaines, rendant la côte vulnérable à la montée des eaux.

Fixation de la dune grâce à la succession végétale



Menaces

Fragmentation du cordon dunaire et fixation des dunes

- Fragmentation et perte d'habitat pour ce type d'espèces ;
- Passage aux stades suivants : maintien de la dynamique des dunes ?

Services

- Protection de l'arrière-dune ;
- Erosion réduite.

Evaluer la connectivité de ces milieux

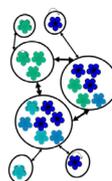
La **Pensée des dunes** est une espèce pérenne endémique des dunes côtières de la mer du Nord, protégée en France. L'étude de ses populations renseigne sur la connectivité fonctionnelle des dunes jeunes en voie de fixation.



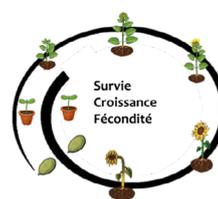
Une espèce emblématique, la Pensée des dunes.



Recensement des populations.



Structure de la diversité génétique.



Modifications de caractères affectant la dynamique des populations ?

Etat des lieux et perspectives de gestion

Connaissances générales

- Cordons dunaires **très fragmentés**, en particulier en France et en Belgique ;
- **Restaurer autant que possible la connectivité des cordons dunaires** pour une meilleure protection du littoral contre l'érosion ;
- **Maintenir des mosaïques paysagères**, y compris des dunes jeunes, pour permettre une dynamique naturelle des cordons dunaires.

Perspective

- Renforcements des populations de Pensées des dunes afin de **privilégier des apports locaux** d'individus.

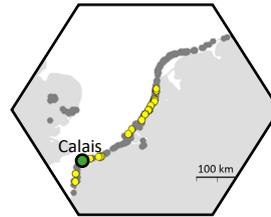
Menace

- Populations de Pensées des dunes **isolées génétiquement** et consanguines en France et Belgique.

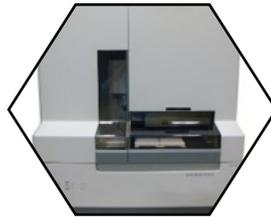
Lyophilisateur pour conservation des tissus végétaux.



Lieu de recensement des populations.



Séquenceur pour typage ADN.



Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

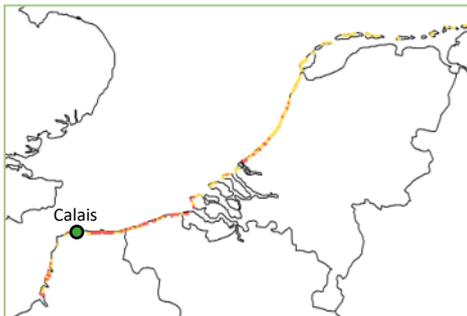
1. Connectivité entre populations en milieu naturel

Les cordons dunaires sont plus fragmentés en France et en Belgique qu'aux Pays-Bas.

A l'exception de la population des dunes de Merlimont, la diversité génétique des populations françaises de Pensées des dunes est très faible par rapport à celle des Pays-Bas, et les individus y sont plus consanguins.

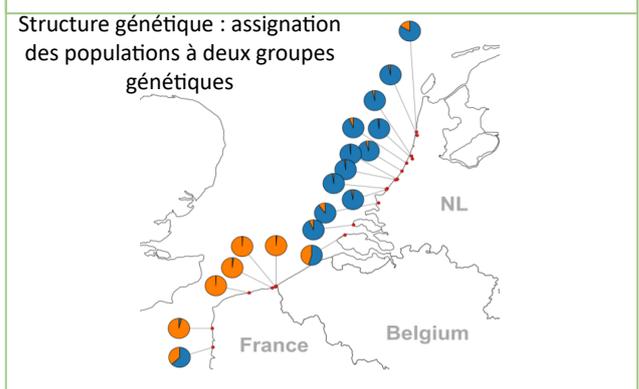
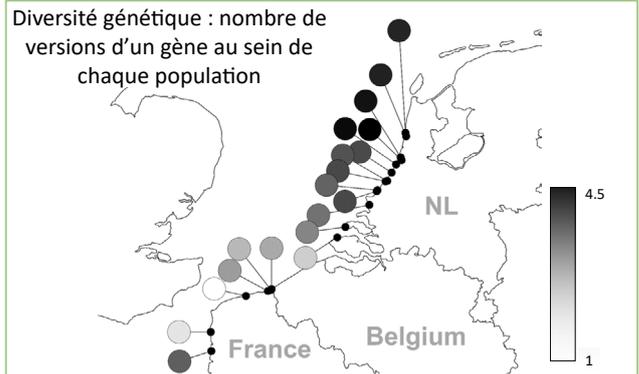
La Pensée des dunes présente deux groupes génétiques très différenciés : populations françaises et populations néerlandaises.

La migration entre populations françaises semble très réduite.



Perte des cordons dunaires du littoral de la mer du Nord depuis le milieu du XIX^{ème} siècle.

(rouge : dunes présentes au XIX^{ème} siècle et actuellement disparues)



2. Impact de l'habitat sur les caractères des plantes

La fécondité des plantes des populations françaises est inférieure à celle des populations des Pays-Bas.

Les plantes des populations françaises produisent moins de fleurs que les plantes des Pays-Bas, mais ont une plus forte croissance.

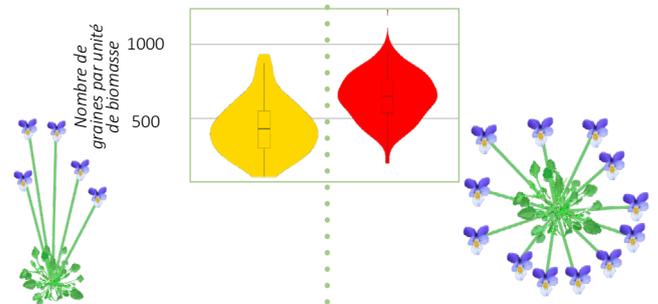
Cette plus forte croissance est probablement due à la végétalisation des dunes françaises, qui entraîne une forte compétition pour la lumière.

Populations françaises : habitat enrichi

- compétition pour la lumière ;
- plantes plus grandes avec peu de fleurs ;
- faible fécondité ;
- viabilité des populations ?

Populations hollandaises : dunes jeunes

- peu de compétition ;
- plantes petites avec beaucoup de fleurs ;
- forte fécondité.



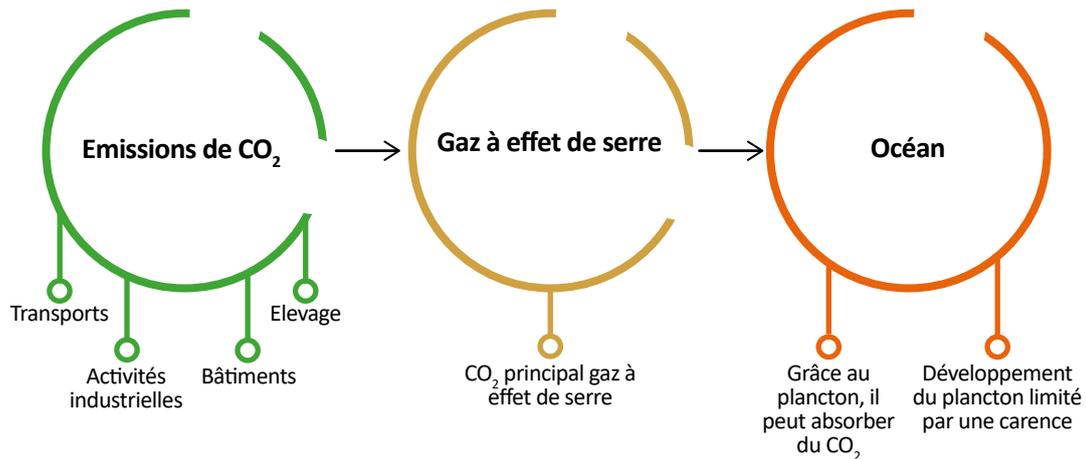
Sources : cartes historiques : Topographic map of Belgium (1846-1854) <http://www.mapire.eu> ; Carte de l'état major (1820-1866) <http://www.geoportail.fr> ; Topographic and military map of the Kingdom of the Netherlands (1861) <http://www.mapire.eu> ; actuel : photographies aériennes.

Perspectives de recherche

- La population de Pensées des dunes de Merlimont semble d'origine hybride entre deux groupes génétiques : possibilité de renforcement des populations françaises par des plantes des Pays-Bas à envisager ?
- La Pensée des dunes est-elle représentative d'autres espèces typiques du même habitat ?
- Il serait intéressant de déterminer si les taux d'autofécondation supérieurs constatés chez les populations de Pensées des dunes françaises (par rapport aux populations des Pays-Bas) sont dus à un manque de pollinisateurs.

18. Remédier aux carences en fer de l'océan pour préserver sa capacité d'absorption du CO₂

L'océan mondial à lui seul ne peut contrecarrer l'augmentation des teneurs en CO₂ dans l'air, principal gaz à effet de serre (GES). Il n'en demeure pas moins qu'il fixe une bonne partie du CO₂ grâce au plancton qui l'utilise pour se développer. Malheureusement ce développement est parfois limité par une carence en fer, micronutriment indispensable à la croissance du plancton. D'où l'idée, dès les années 90, de « saupoudrer » une partie de l'océan mondial avec des composés du fer (ce dernier existe sous plusieurs formes), afin de réamorcer ce que l'on appelle couramment la pompe biologique du CO₂... Résultats mitigés car l'appétence du plancton varie avec la nature chimique du fer ajouté. Par ailleurs tous les organismes planctoniques ne le « digèrent » pas de la même manière. Les scientifiques s'accordent néanmoins sur le fait que les dépôts de poussières atmosphériques constituent bien l'essentiel des apports de fer aux eaux de surface. D'où la nécessité de mieux cerner ces apports, afin d'être en mesure de prévoir comment, à l'avenir, l'océan va pouvoir participer à la limitation de l'augmentation du CO₂. Malheureusement toutes les poussières ne se valent pas !



Il y a poussières et poussières...

Rejets de l'industrie, émissions automobiles, cendres volcaniques, tempêtes de sable, tous ces aérosols contenant du fer possèdent chacun des propriétés différentes. **Celles-ci vont influencer sur l'assimilation du fer par le plancton.** On caractérise cette assimilation par la biodisponibilité du fer qui représente la part effectivement assimilée par l'organisme.

Définition

Un **aérosol** est une suspension de particules, solides ou liquides, dans un gaz. Dans l'air ambiant on parlera d'aérosols atmosphériques, terme communément employé pour désigner les particules présentes.

La **biodisponibilité** est la plupart du temps difficile à quantifier. On l'estime donc en mesurant la part du nutriment, ici le fer, que l'organisme peut potentiellement utiliser pour se développer. C'est ce que l'on appelle **bioaccessibilité**. Une première estimation de la bioaccessibilité consiste à mesurer simplement la fraction soluble du nutriment. Il s'agira donc ici notamment d'estimer la quantité de fer dissoute dans les gouttelettes de nuages.

... et dépôts et dépôts !

Les pluies représentent l'essentiel de l'apport de fer atmosphérique aux océans

Ce dépôt spectaculaire de poussières sahariennes sur une voiture peut être trompeur : la majorité des émissions d'aérosols finissent par retomber via les pluies. On parlera alors de dépôt « humide » par opposition au dépôt par voie sèche.



C'est donc partiellement dissous (et par là même déjà potentiellement bioaccessible) que le fer atteindra en majorité la surface des océans. Il est ainsi essentiel de déterminer la quantité de fer soluble qui se forme au sein des masses nuageuses.

Spectromètre de masse -
mesure la composition isotopique du fer.

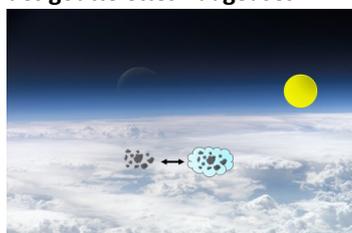


Site industriel dunkerquois.

Quelques résultats marquants

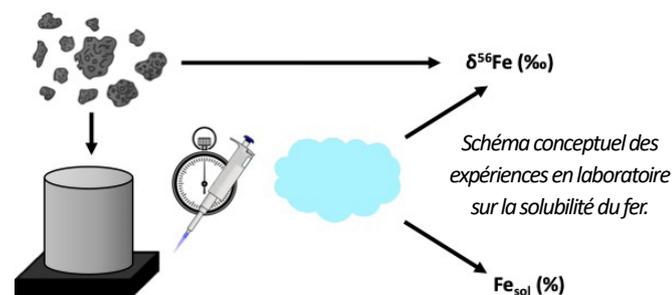
1. Les questions posées

Un nuage se forme, la plupart du temps, autour de poussières agissant comme noyaux de condensation. Notre travail a donc consisté à **mesurer la quantité de fer soluble produite lors d'expériences simulant les phénomènes se déroulant au sein des gouttelettes nuageuses.**



Le fer contenu dans les aérosols émis par l'homme (industrie, trafic automobile) est-il plus soluble ou moins soluble que celui présent dans les poussières naturelles ?

En plus de mesurer la solubilité du fer en eau nuageuse, nous avons déterminé la composition isotopique de ce fer soluble ($\delta^{56}\text{Fe}$). Cet indicateur pourrait permettre, à l'avenir, de **mieux estimer la part du fer atmosphérique présent dans les eaux de surface océaniques.**



Les poussières véhiculant le fer (à gauche) sont introduites dans un réacteur contenant de l'eau nuageuse. A différents intervalles de temps nous prélevons une partie de cette eau qui est analysée pour mesurer le fer dissous dans l'eau et déterminer sa composition isotopique

Perspectives de recherche

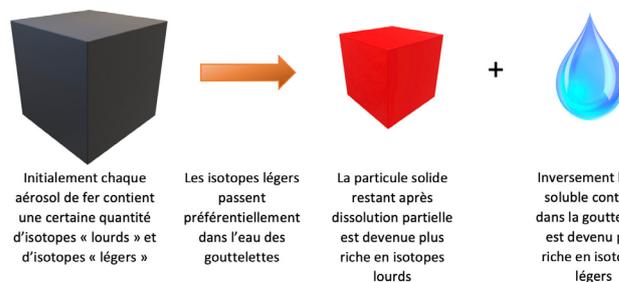
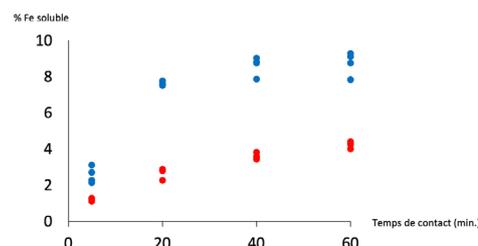
Les travaux entrepris jusqu'à présent ont permis de montrer :

- d'une part que le fer d'origine industrielle était deux fois plus soluble que le fer naturel, ce qui en fait une composante importante de fer bioaccessible ;
- d'autre part que ces réactions au sein des nuages modifiaient la signature isotopique du fer, signature souvent employée pour remonter à l'origine de ce nutriment océanique.

Cependant l'industrie n'est pas la seule source de fer liée aux activités de l'homme ; le transport, le chauffage, constituent d'autres sources importantes d'aérosols de fer, dont la réactivité nuageuse devra être également étudiée. **Mais la limitation des émissions de dioxyde de carbone demeure dans tous les cas une priorité.** Par ailleurs d'autres carences, en cuivre ou zinc par exemple, seraient susceptibles de limiter la croissance du plancton et ainsi contrecarrer la pompe biologique océanique du CO_2 ... Leur comportement dans l'atmosphère devra donc également être précisé, notamment vis à vis des eaux nuageuses.

2. L'industrie, une source de fer disponible pour le plancton océanique

Dans la figure ci-dessous, les points bleus représentent l'évolution de la solubilité du fer présent dans des poussières collectées dans les cheminées d'une usine métallurgique, et les points rouges, cette même évolution, pour du fer présent dans des poussières sahariennes (les temps de contact représentent des « durées de vie » de gouttelettes nuageuses). Le fer « industriel » est donc bien plus soluble que le fer « naturel », sans doute en raison de l'acidité des poussières industrielles.



Cette évolution implique que la fraction de fer bioaccessible aura une composition isotopique bien particulière dont devront tenir compte les futurs travaux s'intéressant au cycle du fer dans les eaux de surface océaniques.



IV

-

**Impacts sur la santé
humaine**

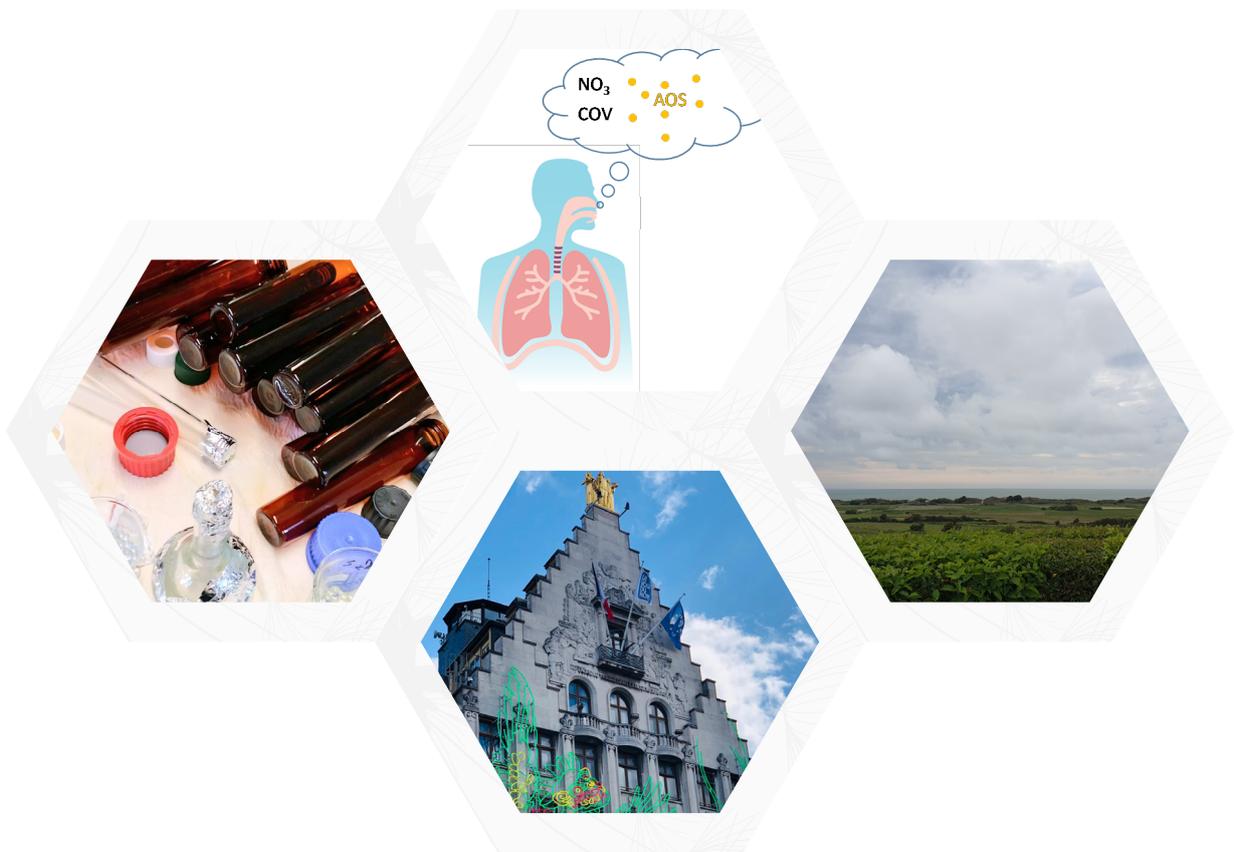


IV - Introduction

Actuellement, la pollution peut être considérée comme le plus grand risque environnemental pour la santé. En 2015, selon l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), les maladies causées par la pollution ont été responsables de 9 millions de décès prématurés dans le monde, soit 16% de l'ensemble des décès toutes causes confondues. La pollution de l'air, à elle seule, serait responsable de près de 80% de ces décès. En France, elle provoquerait environ 48000 morts par an, représentant ainsi la troisième cause de mortalité, derrière le tabac et l'alcool ; dans les Hauts-de-France, le nombre de morts prématurées liées à la pollution de l'air atteindrait 6500, soit 18 décès par jour. Les expositions chroniques pendant plusieurs années réduisent l'espérance de vie, principalement en raison d'un risque accru de maladies cardiovasculaires, respiratoires et de cancer du poumon. Il existe également des preuves de liens possibles avec le diabète, l'obésité, certaines maladies digestives, le déclin cognitif, la démence et diverses complications de la grossesse. Par ailleurs, les expositions à court terme peuvent également avoir des conséquences sanitaires et occasionner des décès prématurés, notamment pour les personnes les plus fragiles, en aggravant certaines maladies respiratoires ou en déclenchant des événements cardiovasculaires.

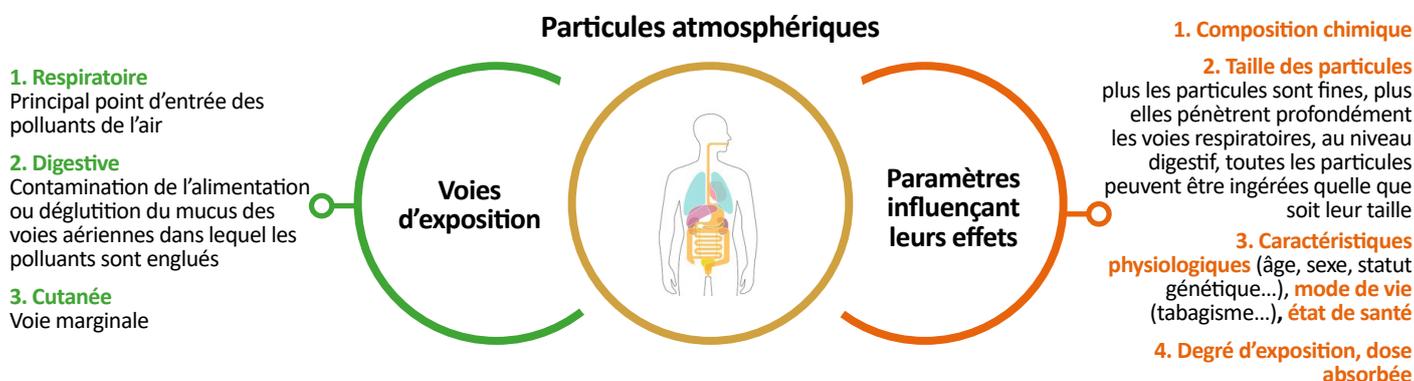
Le changement climatique, qui résulte des activités humaines, représente une menace supplémentaire pour la santé humaine. Ce changement multiplie les événements météorologiques extrêmes (canicules, sécheresse, inondations, tempêtes...) et contribue à l'expansion des zones chaudes et humides à la surface du globe. Tout ceci favorise l'augmentation des populations d'insectes vecteurs de micro-organismes pathogènes et l'émergence ou la réémergence de maladies infectieuses. Par ailleurs, la qualité de l'air se dégrade du fait de l'accroissement des émissions de composés organiques volatils sous l'effet de l'élévation des températures, et des processus intenses de pollution photo-oxydante.

De nombreuses études épidémiologiques ont permis de comprendre le lien entre la pollution de l'air et ses différents effets néfastes sur la santé. Ces constats ont contribué à la mise en place de réglementations sur les émissions de polluants à l'échelle nationale et européenne. Cependant, les données concernant l'impact réel de l'environnement sur la santé demeurent parcellaires. En effet, il est souvent complexe d'établir un lien de causalité entre l'exposition à un facteur chimique environnemental donné et la survenue d'une maladie particulière. Ainsi, pour répondre aux enjeux préoccupants que constituent l'impact sanitaire de la pollution de l'air et l'inégalité des individus face à cet environnement, les travaux engagés dans le cadre du CPER CLIMIBIO présentent deux défis majeurs interdépendants : d'une part, l'analyse, à l'aide de modèles cellulaires et de modèles animaux innovants, des mécanismes de toxicité des polluants aériens afin d'identifier des marqueurs biologiques précoces de lésions tissulaires ainsi que des facteurs de susceptibilité à ces composés (**Fiche 19**) ; d'autre part, la recherche et l'évaluation en population générale de biomarqueurs et de liens entre exposition à la pollution atmosphérique et pathologies (**Fiche 20**). A ces deux défis s'associe une approche transversale de bio-surveillance environnementale consistant à regrouper, au sein d'un système unique d'information géographique, des données environnementales, sanitaires et socio-économiques (systèmes géo-statistiques SIGLE) permettant de corréler ces différentes informations (**Fiche 21**).



19. Modèles expérimentaux *in vitro* et *in vivo* pour comprendre les effets de la pollution atmosphérique et des changements climatiques sur la santé

Le changement climatique est responsable en partie de modifications de la concentration de fond des polluants atmosphériques. Il est indéniable que la **dégradation de la qualité de l'air** pose un problème de santé publique considérable en contribuant à la **genèse ou l'exacerbation de nombreuses maladies inflammatoires chroniques** touchant en particulier les voies aériennes et digestives. Cependant, l'impact sanitaire réel sur le long terme, ainsi que **les mécanismes d'action toxique de niveaux faibles à modérés de pollution atmosphérique restent à évaluer**. C'est pourquoi, il est indispensable de développer **des modèles expérimentaux *in vitro* et *in vivo*** pertinents afin de pouvoir caractériser, parmi les principaux paramètres altérés par l'exposition à ces polluants, ceux jouant un rôle primordial dans l'équilibre physiologique au niveau pulmonaire et intestinal.



Pollution de l'air : impacts sanitaire et socio-économique

Les particules en suspension dans l'air sont les principales responsables des effets de la pollution sur la santé. Les effets des particules grossières et fines ont été plus étudiés que ceux des particules ultrafines.

On a longtemps insisté sur les effets néfastes des pics de pollution; on sait dorénavant **que les effets de la pollution de fond sur le long terme sont probablement encore plus graves que ces pics.**

De nombreuses agglomérations françaises dépassent régulièrement les normes européennes de qualité de l'air.

Chiffres clés

92% Proportion de la population mondiale respirant un air ambiant trop pollué.

68000 Nombre de décès prématurés occasionnés par la pollution de l'air en France chaque année.

70-100 milliards Montant estimé en euros des dépenses de santé en France liées à la pollution de l'air.

Perspectives de gestion

Intérêts en santé publique

- Corrélation des biomarqueurs de pollution aux maladies respiratoires et digestives à composante environnementale ;
- Compréhension des mécanismes pathologiques à l'origine de ces affections ;
- Développement de nouvelles stratégies pour leur prévention et leur traitement ;
- Meilleure surveillance des populations exposées ;
- Diminution à long terme des dépenses de santé.

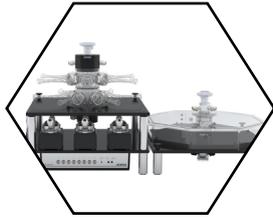
Intérêts scientifiques

- Compréhension des mécanismes d'action toxique des polluants atmosphériques ;
- Identification de marqueurs biologiques d'effet des polluants atmosphériques ;
- Identification de facteurs de prédisposition génétique et/ou épigénétique à la toxicité des polluants atmosphériques.

Intérêts pour l'environnement

- Transmission des données aux organismes en charge des polluants de l'air et de leurs effets sur la santé, aux instances chargées de la réglementation de leurs émissions ainsi qu'aux industriels ;
- Contribution à une meilleure prise de décision quant à la réduction des émissions des polluants les plus préoccupants.

Chambre d'exposition de souris à la pollution aérienne.



Chambre d'exposition cellulaire.



Cytomètre en flux (recherche de biomarqueurs).

Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Impact pulmonaire des particules atmosphériques

Analyses *in vitro* - Des modèles cellulaires d'épithélium bronchique 3D dérivant de donneurs sains, asthmatiques ou atteints de BPCO (bronchopneumopathie chronique obstructive) ont été exposés à des particules fines (PF, $PM_{2.5}$) et ultrafines (PUF, $PM_{0.18}$) collectées à Grande-Synthe. **Une réaction inflammatoire et des modifications épigénétiques plus importantes ont été observées dans les cellules issues des patients atteints d'asthme ou de BPCO.** La dérégulation de gènes contribuant potentiellement à l'aggravation des phénomènes inflammatoires et au remodelage bronchique n'a été observée que dans ces mêmes cellules.

L'exposition d'une lignée cellulaire bronchique immortalisée à ces mêmes particules, à des doses n'induisant pas de mort cellulaire, a montré **l'apparition de modifications fonctionnelles et dynamiques des mitochondries**, suggérant que ces organites sont des cibles précoces des particules dans les cellules pulmonaires et que leur dysfonctionnement pourrait jouer un rôle clé dans l'initiation ou l'exacerbation des pathologies causées par une exposition à la pollution particulaire.

Analyses *in vivo* - Des souris ont été exposées par voie intranasale de manière aiguë ou subchronique pendant 1 mois ou 3 mois aux PF et PUF collectées à Grande-Synthe. Une inflammation chronique et un remodelage du tissu pulmonaire ont été observés chez les souris exposées de manière répétée. **L'apparition de zones lésionnelles est cependant plus précoce et plus intense chez les souris exposées aux PUF par rapport à celles exposées aux PF.** Des altérations transcriptomiques et épigénétiques plus marquées, probablement liées à la réponse inflammatoire exacerbée, ont également été observées chez les souris exposées aux PUF.

2. Impact intestinal des particules atmosphériques

Analyses *in vivo* - Bien que des données épidémiologiques suggèrent l'existence d'un lien entre la pollution atmosphérique et les pathologies intestinales, peu d'études se sont intéressées à ce sujet.

Notre objectif dans CLIMIBIO était de déterminer chez l'animal l'impact d'une exposition à la pollution atmosphérique sur l'homéostasie intestinale et les mécanismes impliqués afin de pouvoir prévenir les effets néfastes de cette pollution. Nous avons dans un premier temps ciblé nos recherches sur la pollution aux particules.

Pour cela, des particules grossières ont été collectées à Douai. Leur caractérisation métallique a montré la typologie urbaine de ces particules, typologie comparable à celle d'autres villes européennes du même ordre. Nous avons exposé des souris à ces particules pendant 15 jours en chambre d'inhalation corps entier.

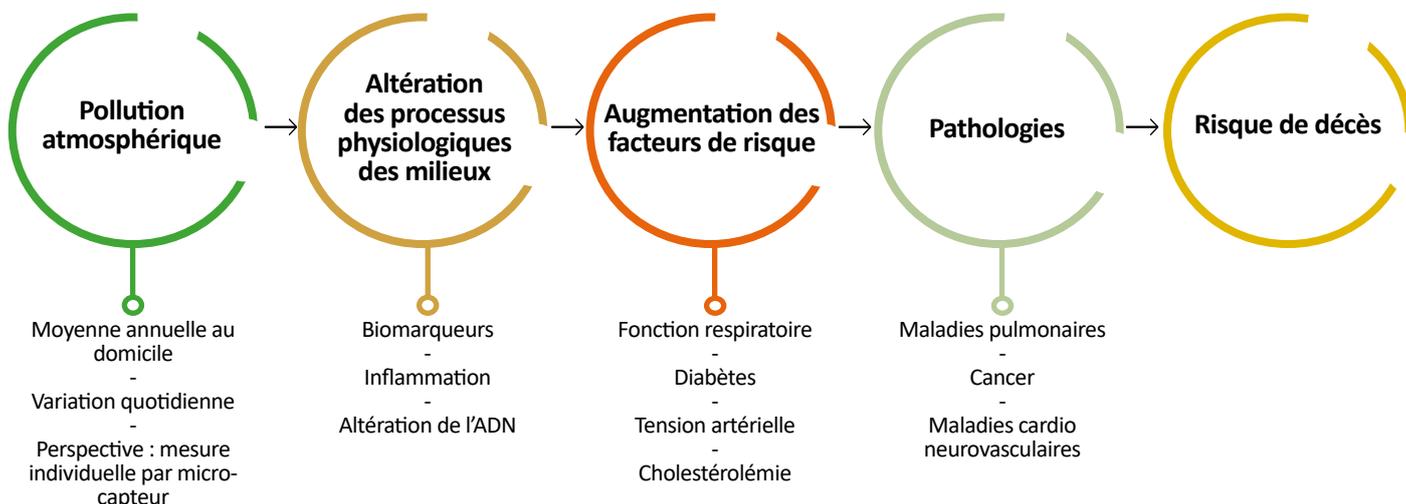
Nous avons ainsi démontré que **l'inhalation de particules de l'air induisait chez la souris une inflammation dans le côlon**, parallèlement à l'inflammation observée dans le poumon. D'un point de vue mécanisme, nous avons montré que cette inflammation était médiée par le stress oxydant et pouvait être abolie par l'administration orale d'un anti-oxydant. Nous avons également montré que **cette exposition induisait une modification de la flore intestinale et rendait les souris plus susceptibles à une inflammation intestinale induite.** Ces résultats montrent que les particules de l'air sont capables d'avoir un effet néfaste sur l'intestin et pourraient être un facteur de risque de développement ou d'exacerbation de maladies inflammatoires de l'intestin.

Perspectives de recherche

Les données épidémiologiques indiquent que les polluants gazeux (monoxyde de carbone, oxyde nitrique, dioxyde de soufre, composés organiques volatils) peuvent également avoir un impact sur le développement des maladies inflammatoires chroniques des voies respiratoires et digestives. Dans la suite du travail réalisé dans le cadre du projet CLIMIBIO, nous poursuivons nos travaux sur **l'effet des particules à court, moyen ou long terme et, notamment, nous comparerons les effets de particules de tailles, de sources et de compositions différentes.** Nous analyserons également l'impact des polluants gazeux et d'atmosphères complexes simulées et contrôlées. Enfin, nous étudierons **les effets d'une exposition gestationnelle à la pollution atmosphérique** sur la survenue de pathologies pulmonaires ou intestinales chez la descendance.

20. Analyse en population de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique

Les études chez l'homme de l'impact de la pollution atmosphérique se font par l'analyse des **associations entre la mesure de la pollution atmosphérique à laquelle les individus sont exposés et la santé**, la survenue de pathologie ou la mortalité. Une manière indirecte d'évaluer l'exposition à long terme à la pollution atmosphérique est de connaître le niveau moyen de la qualité de l'air (généralement annuel) à **l'adresse de résidence**. Les associations à court terme peuvent être étudiées en s'intéressant aux variations quotidiennes des niveaux de pollution atmosphérique et leur impact sur la survenue ou l'exacerbation de certaines pathologies. Il est possible d'étudier dans les études épidémiologiques la mortalité, la survenue de pathologies mais aussi des marqueurs biologiques, cliniques ou physiologiques. Il est nécessaire d'avoir des résultats cohérents dans de nombreuses études épidémiologiques et fondamentales pour établir les effets sur la santé. L'apparition des **micro capteurs** devrait permettre à l'avenir d'avoir une quantification plus précise **individuelle** du niveau d'exposition à la pollution de l'air.

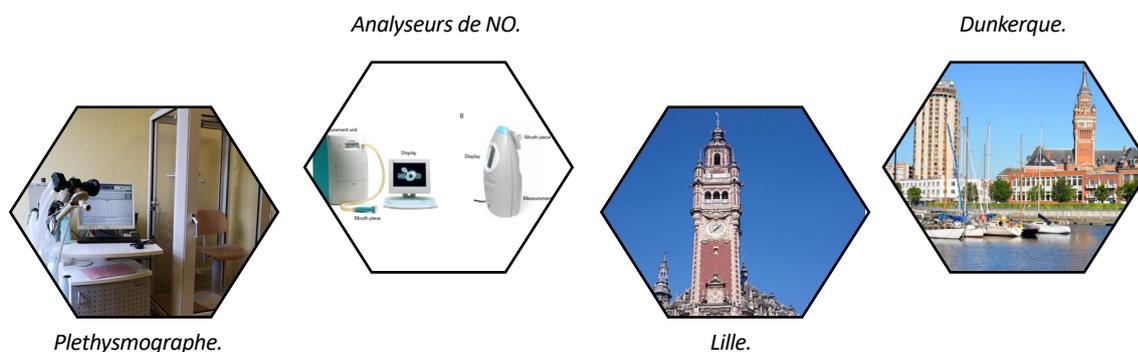


Impacts de la pollution



Etat des lieux ou perspectives de gestion





Plethysmographe.

Analyseurs de NO.

Lille.

Dunkerque.

Les résultats marquants obtenus durant CLIMIBIO

1. Présentation de l'enquête ELISABET

Le programme Climibio a permis de renforcer l'exploitation de l'Enquête Littoral Souffle Air Environnement ELISABET, de permettre le géocodage des participants, de garantir la conservation de la banque biologique ELISABET.

ELISABET est une étude transversale à partir d'un échantillon représentatif en population générale de sujets âgés de 40 à 64 ans tirés au sort sur les listes électorales des communautés urbaines de Dunkerque (CUD) (n=1 607) et de Lille (CUDL) (n=1 669).

Le recrutement s'est déroulé de janvier 2011 à novembre 2013. L'objectif principal de l'enquête était de comparer la prévalence des troubles ventilatoires obstructifs (TVO) dans la CUD touchée par la pollution industrielle à celle retrouvée dans la CUDL.



Des examens à domicile ont été réalisés comportant un questionnaire des mesures anthropométriques et des explorations respiratoires (une Epreuve Fonctionnelle Respiratoire, des mesures de NO et de CO dans l'air expiré et un recueil de condensas dans l'air expiré). Une biobanque (sérothèque, plasmathèque, DNATHèque, cheveux et urine) a été constituée.

2. Les principaux résultats

Grâce à la géolocalisation des volontaires ELISABET et aux modélisations fournies par ATMO Hauts-de-France nous avons pu estimer l'exposition des volontaires à la pollution atmosphérique sur leur lieu de vie.

Nous avons observé que le niveau annuel moyen de pollution était associé à **une augmentation de l'Hémoglobine glyquée (marqueur du diabète)** et à **une moins bonne fonction pulmonaire (diminution des volumes et augmentation de l'obstruction pulmonaire)**. L'étude de la fonction respiratoire a également retrouvé une diminution significative des débits à bas volume, potentiels marqueurs précoces d'atteinte respiratoire qui sont plus rarement étudiés dans les études épidémiologiques. A court terme, nous avons également observé que la moyenne du jour et de la veille de l'examen du NO₂ était associée à une diminution des paramètres ventilatoires marqueurs de l'obstruction pulmonaire. Les variations quotidiennes de NO₂ et de PM₁₀ étaient associées aux débits à bas volume pulmonaire. Enfin les PM₁₀ étaient associés à **une inflammation systémique** marquée par une augmentation de la protéine C réactive (CRP ultrasensible). Les effets que nous avons observés sont pour la plupart d'une importance trop faible pour être ressentis par les individus non malades. Mais ces associations ont été retrouvées dans l'ensemble de la population, y compris les personnes ne souffrant d'aucune pathologie. Si ces effets sont relativement modérés sur le plan individuel, le fait qu'ils touchent **l'ensemble de la population pourrait induire un impact en santé publique important**.

Perspectives de recherche

A terme, la collaboration avec les autres équipes de CLIMIBIO devrait permettre de concevoir des études épidémiologiques incluant une mesure individuelle de l'exposition. Ces futures études permettraient d'évaluer les expositions à la pollution de l'air intérieur et d'éventuelles mesures de prévention.

Résultats attendus :

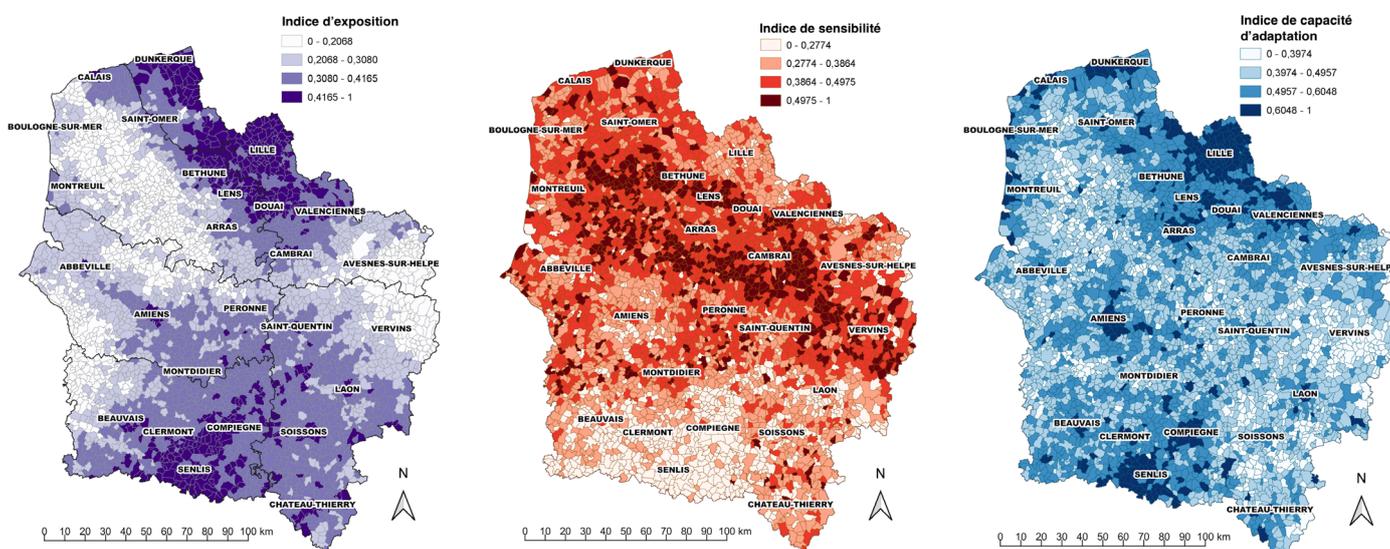
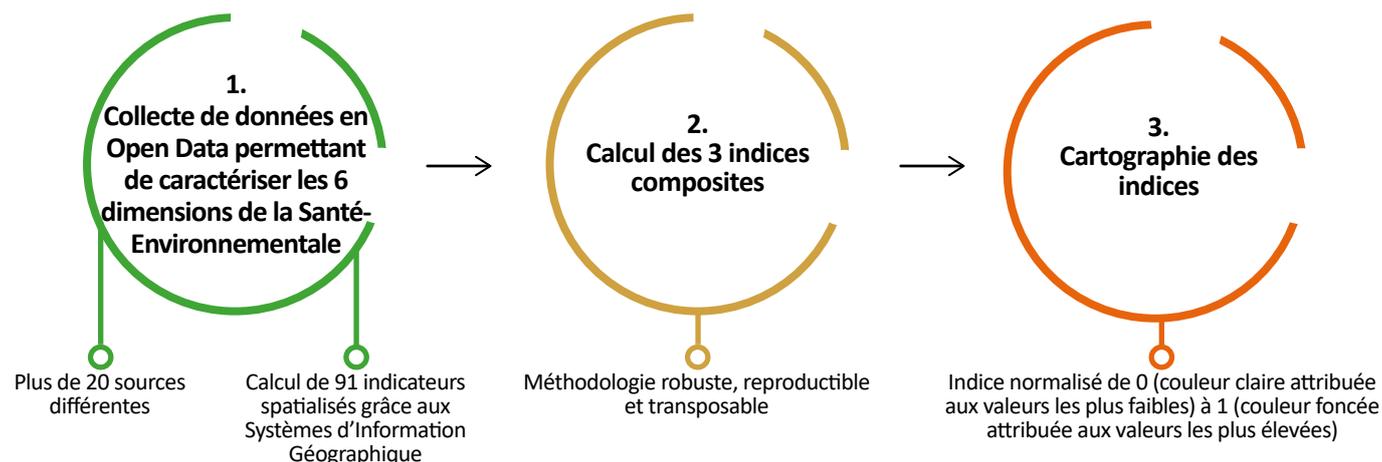
- Identifier les marqueurs biologiques les plus pertinents associés à la pollution atmosphérique ;
- Mieux quantifier les impacts sur la santé de la pollution atmosphérique, pour mieux informer les populations sur les risques et aider à orienter les politiques publiques.



21. Cartographie d'indices d'exposition, de sensibilité et d'adaptabilité des territoires face au changement climatique

Les inégalités d'exposition aux facteurs de risques environnementaux (nuisances, pollutions, climat) - combinées aux inégalités sociales et économiques - peuvent accentuer les phénomènes d'inégalités spatiales de santé à l'échelle régionale des Hauts-de-France. Ces phénomènes complexes sont aujourd'hui difficiles à caractériser du fait (i) de l'exposition complexe des populations à l'environnement, que celui-ci soit générateur d'impacts négatifs ou positifs sur la santé, (ii) de l'étiologie multifactorielle des maladies chroniques (facteurs génétiques, environnementaux), (iii) d'un manque d'interopérabilité des données disponibles, du fait de la compartimentation de la surveillance de la santé, de l'air, de l'eau, des sols ou du climat (objectifs initiaux, échelles spatiales et temporelles, format des données). Il apparaît nécessaire de caractériser de façon globale les déterminants territoriaux de santé-environnement pour mieux appréhender les inégalités de santé et concourir à une gestion plus adaptée aux territoires. Nous proposons le calcul d'indices composites spatialisés comme outil d'aide à la décision politique pour l'identification et la hiérarchisation des points noirs régionaux. L'enjeu est ici d'orienter les actions préventives et curatives en matière de santé-environnement.

Les grandes étapes



Mesurer l'exposition, la sensibilité et l'adaptabilité des territoires à l'aide d'indices composites



1. Récolte de données spatialisées

Un travail de fouille de données a dans un premier temps été réalisé, afin d'identifier les sources d'information permettant de caractériser les communes des Hauts-de-France selon les dimensions ayant un impact sur la santé humaine. Une vingtaine de bases de données régionales, nationales et internationales disponibles en open data ont été sélectionnées (ex : INSEE, IGN, DREES, COPERNICUS). Le schéma représente les six dimensions, ainsi que les différents thèmes qui ont été recherchés.

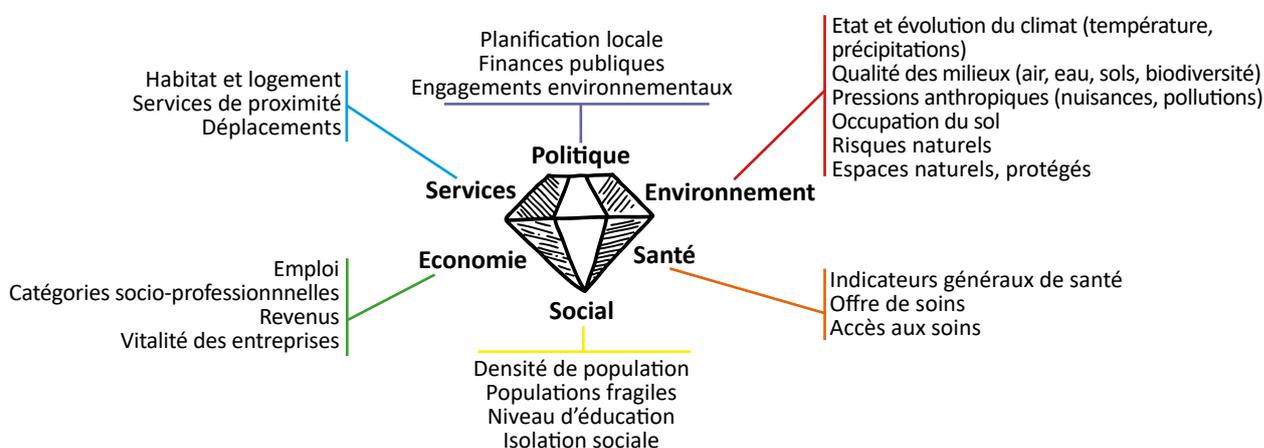
3. Calcul et cartographie des indices composites

La méthodologie de calcul d'indices composites proposée par la Commission Européenne a été utilisée pour élaborer les trois indices. Les grandes étapes sont l'imputation de données manquantes, l'analyse multivariée pour éviter la redondance d'information, la standardisation pour harmoniser les variables exprimées dans différentes unités, l'agrégation et pondération par Analyse en Composantes Principales, et la catégorisation pour la représentation cartographique.

2. Calcul d'indicateurs spatialisés

A partir de ces bases, 91 indicateurs spatialisés ont ensuite été validés à l'échelle communale (N = 3817). Ces indicateurs sont issus, soit de données existantes (36% des indicateurs ; ex : taux de chômage, taux de natalité), soit de calculs réalisés à l'aide des systèmes d'information géographique (64% des indicateurs ; ex : surface d'espaces verts par habitant, indice de diversité des professionnels de santé).

Les indicateurs climatiques concernent la température (moyenne, variabilité, vagues de chaleur, vagues de froid) et les précipitations (moyenne, variabilité annuelle et saisonnière). Parmi les indicateurs environnementaux en lien avec le réchauffement climatique, nous retrouvons notamment la pollution des milieux (particules atmosphériques, ozone, pesticides), la fertilité des sols et leur potentiel d'érosion, l'artificialisation et la végétalisation des surfaces communales, les risques de feux de forêt, d'inondation ou de retrait-gonflement d'argiles.



Les réussites

1. Sur le plan scientifique



- **Combiner au sein d'une même approche de santé-environnement des informations environnementales, sanitaires, socio-économiques et politiques à très fine échelle.** Ces indices sont habituellement calculés à l'échelle des pays ou régions ;
- **Rendre interopérables des bases de données nationales en open data à l'échelle communale** grâce aux techniques de data-reuse et d'analyse spatiale ;
- **Réutiliser des données publiques et proposer un outil de datavisualisation**, afin de construire de nouveaux points de vue sur la société ou sur l'action publique.

2. Sur le plan politique, social et économique

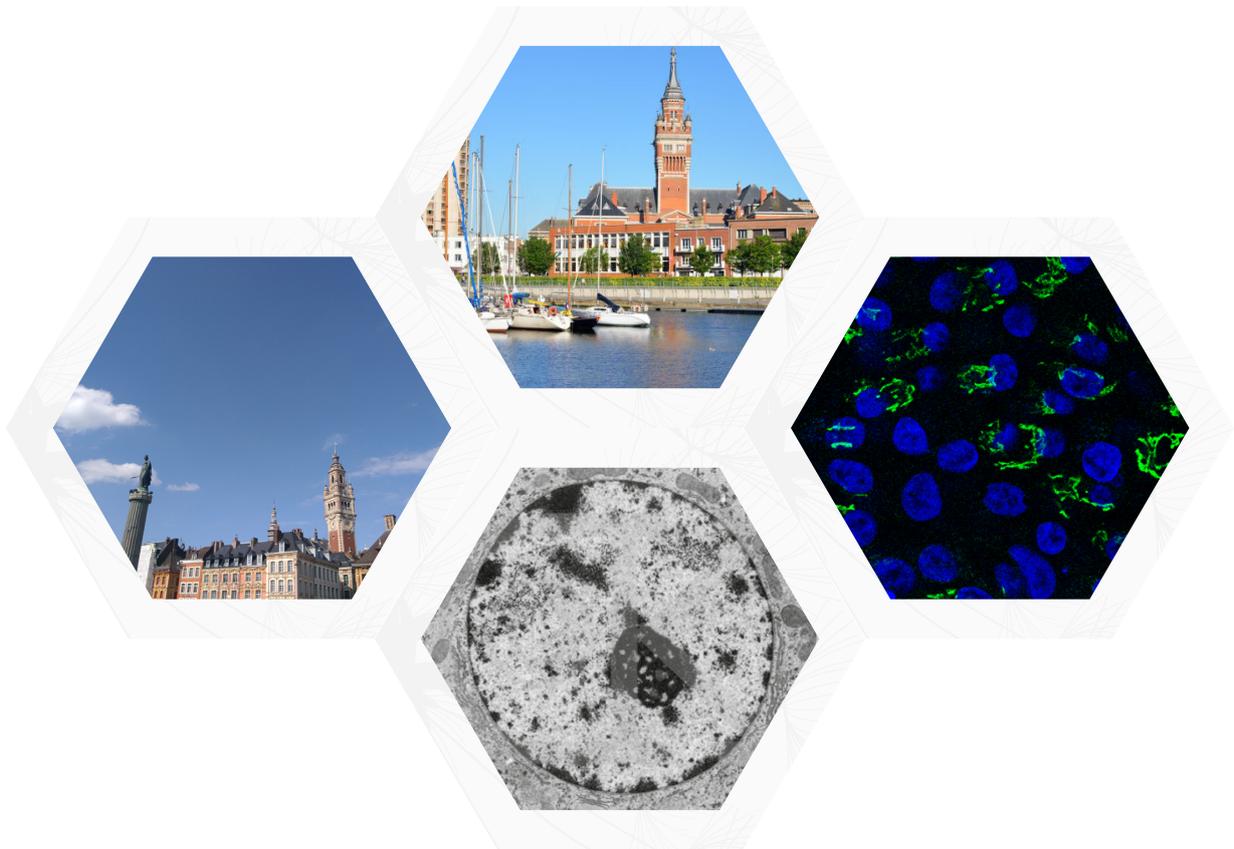


- **Création d'un outil d'aide à la décision** pour les politiques publiques en faveur de la santé environnementale ;
- **Outil transposable à d'autres régions** : étude en cours sur le territoire de la Wallonie ;
- **Outil transposable à d'autres échelles** : études en cours sur les territoires de la Métropole Européenne de Lille et de la Communauté Urbaine de Dunkerque ;
- Les données pourront être intégrées dans les observatoires régionaux de santé-environnement et du changement climatique.

Perspectives de recherche

Ces données seront mises en relation avec les indicateurs de santé disponibles en région, telles que l'incidence de la maladie de Crohn, des événements coronariens, de l'insuffisance rénale terminale et de la prématurité.

Ces résultats permettent d'identifier des points noirs environnementaux ainsi que des territoires sur lesquels de futures études épidémiologiques (cohortes) pourraient être mises en place afin de suivre l'état de santé des populations sur le long terme.



Glossaire

- **ADN** = Acide désoxyribonucléique
- **AOS** = Aérosols organiques secondaires
- **ATMO** = Association de surveillance de la qualité de l'air
- **BPCO** = Bronchopneumopathie chronique obstructive
- **CRP** = Protéine C réactive
- **CSP** = Catégories socioprofessionnelles
- **COV** = Composés organiques volatils
- **CUD** = Communauté Urbaine de Dunkerque
- **CUDC** = Centre universitaire du diabète et de ses complications
- **ETBE** = Ether éthyle tertiobutyle
- **GES** = Gaz à effet de serre
- **GIEC** = Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- **GPL** = Gaz de pétrole liquéfié
- **HAP** = Hydrocarbures aromatiques polycycliques
- **HAPO** = Hydrocarbures aromatiques polycycliques oxygénés
- **LIDAR** = « Light detection and ranging » (soit en français « détection et estimation de la distance par la lumière »)
- **MEL** = Métropole Européenne de Lille
- **PEMS** = Portable Nano-Particle Emission Measurement System (soit en français « systèmes portables de mesure des émissions »)
- **PF** = Particules fines
- **PM** = Particules atmosphériques
- **PM₁₀** = Particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique inférieur à 10 micromètres
- **PM_{2,5}** = Particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 micromètres, appelées « particules fines »
- **PM_{1,0}** = Particules en suspension dans l'air, dont le diamètre est inférieur à 1,0 micromètre, appelées « particules très fines »
- **PM_{0,1}** = Particules en suspension dans l'air, dont le diamètre est inférieur à 0,1 micromètre, appelées « particules ultrafines » ou « nanoparticules »
- **PUF** = Particules ultra-fines
- **SIG** = Systèmes d'informations géographiques
- **STEU** = Station de traitement des eaux usées
- **TRAPS** = «Time-Resolved Atmospheric Particle Sampler »
- **TVO** = Trouble ventilatoire obstructif

Annuaire

● Sciences humaines et sociales

- Magalie Franchomme - TVES - magalie.franchomme@univ-lille.fr
- Séverine Frère - TVES - severine.frere@univ-littoral.fr

● Réservoir eau : rivière et océan

- Gabriel Billon - LASIRE - gabriel.billon@univ-lille.fr
- Pascal Flament - LPCA - pascal.flament@univ-littoral.fr
- Pierre-Jean Superville - LASIRE - pierre-jean.superville@univ-lille.fr

● Réservoir atmosphère et combustion

- Marie Choël - LASIRE - marie.choel@univ-lille.fr
- Suzanne Crumeyrolle - LOA - suzanne.crumeyrolle@univ-lille.fr
- Arnaud Cuisset - LPCA - arnaud.cuisset@univ-littoral.fr
- Hervé Delbarre - LPCA - herve.delbarre@univ-littoral.fr
- Pascale Desgroux* - PC2A - pascale.desgroux@univ-lille.fr
- Philippe Dubuisson - LOA - philippe.dubuisson@univ-lille.fr
- Philippe Goloub - LOA - philippe.goloub@univ-lille.fr
- Benjamin Hanoune - PC2A - benjamin.hanoune@univ-lille.fr
- Hervé Herbin - LOA - herve.herbin@univ-lille.fr
- Nadine Locoge - CERI EE - nadine.locoge@imt-nord-europe.fr
- Esperanza Perdrix - CERI EE - esperanza.perdrix@imt-nord-europe.fr
- Olivier Pujol - LOA - olivier.pujol@univ-lille.fr
- Jérôme Riedi - ICARE - jerome.riedi@univ-lille.fr
- Véronique Riffault - CERI EE - veronique.riffault@imt-nord-europe.fr
- Guillaume Vanhove* - PC2A - guillaume.vanhove@univ-lille.fr

* personnes relais concernant la thématique de la combustion

● Biodiversité

- Yves Piquot - Evo-Eco-Paléo - yves.piquot@univ-lille.fr
- Jean-François Arnaud - Evo-Eco-Paléo - jean-francois.arnaud@univ-lille.fr
- Sébastien Lemièrre - LGCGE - sebastien.lemiere@univ-lille.fr
- Maxime Pauwels - LASIRE - maxime.pauwels@univ-lille.fr

● Santé

- Cécile Vignal - INFINITE UMR1286 - cecile.vignal2@univ-lille.fr
- Jean-Marc Lo Guidice - ULR 4483 IMPECS - jean-marc.lo-guidice@univ-lille.fr
- Guillaume Garçon - ULR 4483 IMPECS - guillaume.garçon@univ-lille.fr
- Régis Matran - URL 4483 IMPECS - regis.matran@univ-lille.fr

Remerciements

Laboratoires :

PC2A, UMR CNRS 8522 - Université de Lille / **EEP**, UMR CNRS 8198 - Université de Lille / **LOG**, UMR CNRS 8187 - Université de Lille / **LOA**, UMR CNRS 8518 - Université de Lille / **PhLAM**, UMR CNRS 8523 - Université de Lille / **LASIRE**, UMR CNRS 8516 - Université de Lille / **Clersé**, UMR CNRS 8019 - Université de Lille / **ICARE**, UMS CNRS 2877 - Université de Lille / **TVES**, ULR 4477 - Université de Lille, Université Littoral Côte d'Opale / **LGCgE**, ULR 4515 - Université de Lille, Junia, Université Artois & Institut Mines-Télécom Nord Europe / **IMPECS**, ULR 4483 - Université de Lille / **RID-AGE**, UMR INSERM 1167 - Université de Lille / **INFINITE**, U1286 - Université de Lille, Inserm, CHU Lille / **CERI EE**, Institut Mines-Télécom Nord Europe / **LPCA**, UR 4493 - Université du Littoral Côte d'Opale / **UCEIV**, UR 4492 - Université du Littoral Côte d'Opale.

Tutelles impliquées dans le projet:

Université de Lille / Université Littoral Côte d'Opale / Institut Mines-Télécom Nord Europe / Centre National de la Recherche Scientifique / Inserm / Institut Pasteur de Lille / Centre Hospitalier Universitaire de Lille. **Autres tutelles associées** : Junia / Université d'Artois.

Financeurs :

Région Hauts-de-France / Union Européenne par le biais des fonds FEDER / Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation / Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie.

Membres de Climibio impliqués dans la rédaction et la constitution du Livre Blanc :

JF. Arnaud (EEP) / G. Beaugrand (LOG) / V. Bêche (CLIMIBIO) / G. Billon (LASIRE) / C. Coeur (LPCA) / L. Dauchet (Inserm-U1167) / K. Deboudt (LPCA) / P. Desgroux (PC2A) / E. Dieudonne (LPCA) / J. Dransart (LGCgE) / P. Dubuisson (LOA) / A. Duputié (EEP) / J. Ferreira de Brito (CERI EE) / P. Flament (LPCA) / C. Focsa (PhLAM) / P. Goloub (LOA) / M. Fourmentin (LPCA) / M. Franchomme (TVES) / S. Frère (TVES) / G. Garçon (IMPECS) / H. Herbin (LOA) / N. Lamoureux (PC2A) / N. Locoge (CERI EE) / JM. Lo-Guidice (IMPECS) / O. Marega (TVES) / R. Matran (IMPECS) / F. Occelli (LGCgE) / E. Perdrix (CERI EE) / JC. Péré (LOA) / G. Pitrel (Clersé) / J. Prygiel (Agence de l'eau Artois-Picardie) / O. Pujol (LOA) / V. Riffault (CERI EE) / C. Schoemaeker (PC2A) / A. Tomas (CERI EE) / G. Vanhove (PC2A) / C. Vignal (U1286 INFINITE).

Partenaires :

A. Bigot – Mairie de Lille / E. Briand – CERDD / C. Bugner – Région Hauts-de-France / D. Cuny – Université de Lille / S. Massal – MEL / M. Morbelli – CPIE des Pays de l'Aisne / F. Vève - CERDD.

Directeur.trice.s de la publication :

P. Desgroux, X. Vekemans.

Comité éditorial :

V. Bêche, P. Desgroux, X. Vekemans.

Comité de rédaction :

JF. Arnaud, V. Bêche, C. Focsa, P. Desgroux, P. Dubuisson, P. Flament, P. Goloub, R. Matran,
N. Locoge, X. Vekemans.

Conception graphique, mise en page et réalisation :

V. Bêche.

Photos © CLIMIBIO sauf,

page 16 © IFPEN (G. Pilla)

pages 12, 23, 26, 44 © N. Visez.

Impression :

Université de Lille.



MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'INNOVATION



l'Europe
s'engage
en
Hauts-de-France
avec le FEDER



CPER_CLIMIBIO

<http://climibio.univ-lille.fr/>



Inserm

