



Qualité de l'air, climat et énergie : nouvelles connaissances pour des approches intégrées

Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Coordination technique : Nathalie Poisson, Thibault Prévost

Rédaction : Citizen Press avec la collaboration des porteurs
de projets et des ingénieurs de l'ADEME

Crédits photo : porteurs de projet, Getty Images.

Création et exécution graphique : Citizen Press

Brochure réf. 012869

ISBN 979-10-297-1971-4 / **EAN** 9791029719714

Dépôt légal : ©ADEME Éditions, Juin 2025

ALLER VERS DES APPROCHES INTEGREES AIR-CLIMAT-ENERGIE

Les sujets qualité de l'air et changement climatique recouvrent certaines sources ou processus communs. Ils impliquent tous deux d'agir au sein de divers secteurs (transports, agriculture, résidentiel-tertiaire, urbanisme ...) afin d'en diminuer les consommations énergétiques, de développer des énergies alternatives, de modifier nos pratiques, nos lieux de vie et notre organisation urbaine. Il est donc essentiel d'adopter des approches concertées pour éviter les effets contre-productifs sur l'un ou l'autre des enjeux.

Les évolutions climatiques auront par ailleurs un impact direct sur la qualité de l'air, en extérieur ou même à l'intérieur des bâtiments, et donc sur notre santé, qu'il faut connaître et anticiper.

Afin d'apporter un éclairage scientifique sur les articulations entre les enjeux de qualité de l'air intérieur/extérieur, du climat et de l'énergie, l'ADEME a lancé en 2019 un **appel à projets de recherche « QUALITÉ DE L'AIR, CHANGEMENT CLIMATIQUE, ÉNERGIE : vers des approches intégrées aux plans scientifique, technologique, politique, économique, sanitaire, environnemental et social »**, dans le cadre du programme **PRIMEQUAL** (programme de recherche inter-organisme pour une meilleure qualité de l'air) co-piloté avec le Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche. Cette action s'inscrit dans le cadre du PREPA (plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques).

Le présent recueil rassemble les résumés des neuf projets lauréats de cet appel à projets. Organisé sous la forme de fiches illustrées, il a vocation à rendre accessibles les principaux résultats de ces projets à un public non scientifique, et à favoriser leur appropriation par les acteurs concernés par la pollution de l'air et le changement climatique.



SOMMAIRE

1	INTERACTIONS CLIMAT ET QUALITÉ DE L'AIR	6
	ACRA Stratégies climatiques et de qualité de l'air : co-bénéfices et risques des stratégies d'atténuation et d'amélioration	
	PACC-MACS Pollution atmosphérique et changement climatique : scenarios mobilité, aménagement urbain et chauffage pour protéger la santé	
	RECAPS Interactions et rétroactions entre changements climatiques et pollutions de l'air sur des sols cultivés	
	SOURCE Stratégies politiques et citoyennes innovantes pour atténuer les effets du dérèglement climatique et améliorer la qualité de l'air et la qualité de vie urbaine	
2	INTERACTIONS AIR-CLIMAT DANS LE SECTEUR DE LA MOBILITÉ	24
	ACACIAS Quantification de l'impact des politiques publiques liées à la mobilité via de nouvelles méthodologies d'évaluation	
	FRAME Cadrage de l'information pour une mobilité durable	
3	INTERACTIONS AIR-CLIMAT DANS LE SECTEUR DU BÂTIMENT	34
	AMBRES Approche multicritères pour un bâtiment résilient et sain	
	BARIAIR Protection des bâtiments aux pollutions de sols par réduction des intrusions vers l'air intérieur	
	BATENQUE Bâtiments, énergie, climat, qualité de l'air et exposition en 2050	

1 INTERACTIONS CLIMAT ET QUALITÉ DE L'AIR

ACRA

Stratégies climatiques et de qualité de l'air : co-bénéfices et risques des stratégies d'atténuation et d'amélioration



Le projet en bref

Le projet ACRA a exploré les co-bénéfices des mesures d'atténuation du changement climatique pour la qualité de l'air. Pour cela, il a croisé des modèles de prospective énergétique, de représentations de préférences des citoyens, d'inventaires d'émissions de polluants, d'impacts sur la qualité de l'air et sur la santé humaine, y compris en termes économiques. Il s'agissait d'un projet de recherche-action destiné à éclairer les scénarios de neutralité carbone et à orienter les décideurs vers des politiques publiques aux bénéfices multiples.

Résultats marquants

- Les différents scénarios prospectifs indiquent tous une amélioration de la qualité de l'air. Le scénario de neutralité carbone de la Stratégie nationale bas carbone 3 publiée fin 2024 permet même de s'approcher de l'objectif de qualité de l'air défini par l'Organisation mondiale de la santé à horizon 2050.
- Tous les scénarios de décarbonation explorés sont bénéfiques pour la qualité de l'air, en réduisant notamment les émissions de particules fines et de dioxyde d'azote. À l'horizon 2050, le scénario de neutralité carbone permet de réduire les dommages sanitaires de 4 Mrd €₂₀₁₅ (fourchette basse, c'est-à-dire avec un indicateur minorant). Ce scénario permet aussi de réduire les coûts de mesures d'amélioration de la qualité de l'air. En fin de compte, 60 % des coûts de la neutralité carbone peuvent être compensés par les bénéfices liés à la qualité de l'air.
- Les consentements à payer vis-à-vis des mesures d'atténuation du changement climatique ou de la qualité de l'air apparaissent assez peu différenciés. Le renforcement de la sensibilité par rapport à l'un ou l'autre de ces enjeux est mutuellement bénéfique pour la mobilisation.

CONTEXTE

Les politiques d'atténuation du changement climatique impliquent des mesures d'efficacité énergétique, des changements structurels et d'autres mesures technologiques qui conduisent aussi à une baisse des émissions de polluants. Selon le sixième rapport du GIEC, la mise en œuvre de mesures d'atténuation du changement climatique apporterait de nombreux co-bénéfices, en particulier pour la qualité de l'air et la santé.

OBJECTIFS

Le projet ACRA a exploré les interactions entre les politiques d'atténuation du changement climatique et d'amélioration de la qualité de l'air. En utilisant des approches de modélisation et d'économétrie, il a quantifié les co-bénéfices et les risques

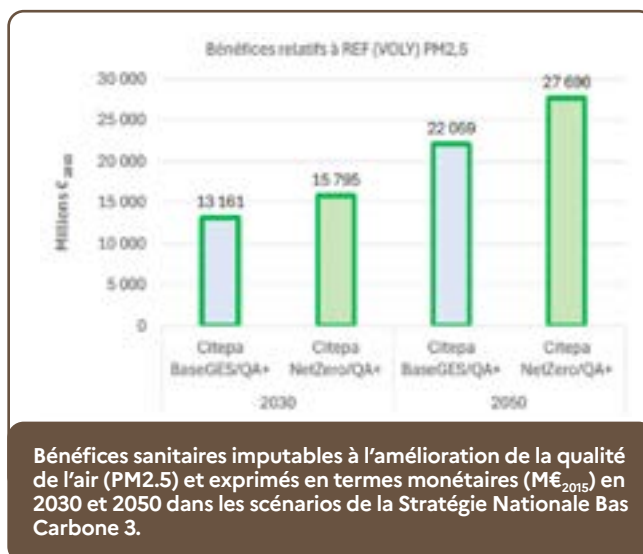
associés à ces politiques. Son principal objectif a été de mieux intégrer les impacts sur la qualité de l'air dans les stratégies de neutralité carbone afin de maximiser les bénéfices pour la santé publique et l'environnement.

MÉTHODOLOGIE

Le projet ACRA a croisé des modèles de prospective énergétique (POLES, développé au GAEL), d'inventaire d'émissions de polluants (CITEPA et GAINS), d'impact sur la qualité de l'air puis sur la santé (CHIMERE, Air Control Toolbox et Alpha-RiskPoll, à l'INERIS) et les approches de quantification des préférences déclarées (LEMNA). Plusieurs scénarios ont été évalués en termes de qualité de l'air, d'exposition des populations, d'impacts sanitaires et de coûts économiques associés : quatre

Les outils et méthodes issus du projet ACRA ont permis de tirer des enseignements pertinents pour l'analyse des risques et co-bénéfices des politiques d'atténuation du changement climatique et d'amélioration de la qualité de l'air. Ces développements commencent déjà à être repris dans des applications opérationnelles d'aide à la décision (programme d'appui au ministère de la Transition écologique de l'INERIS et service d'aide à la décision du programme CAMS de la Commission européenne).

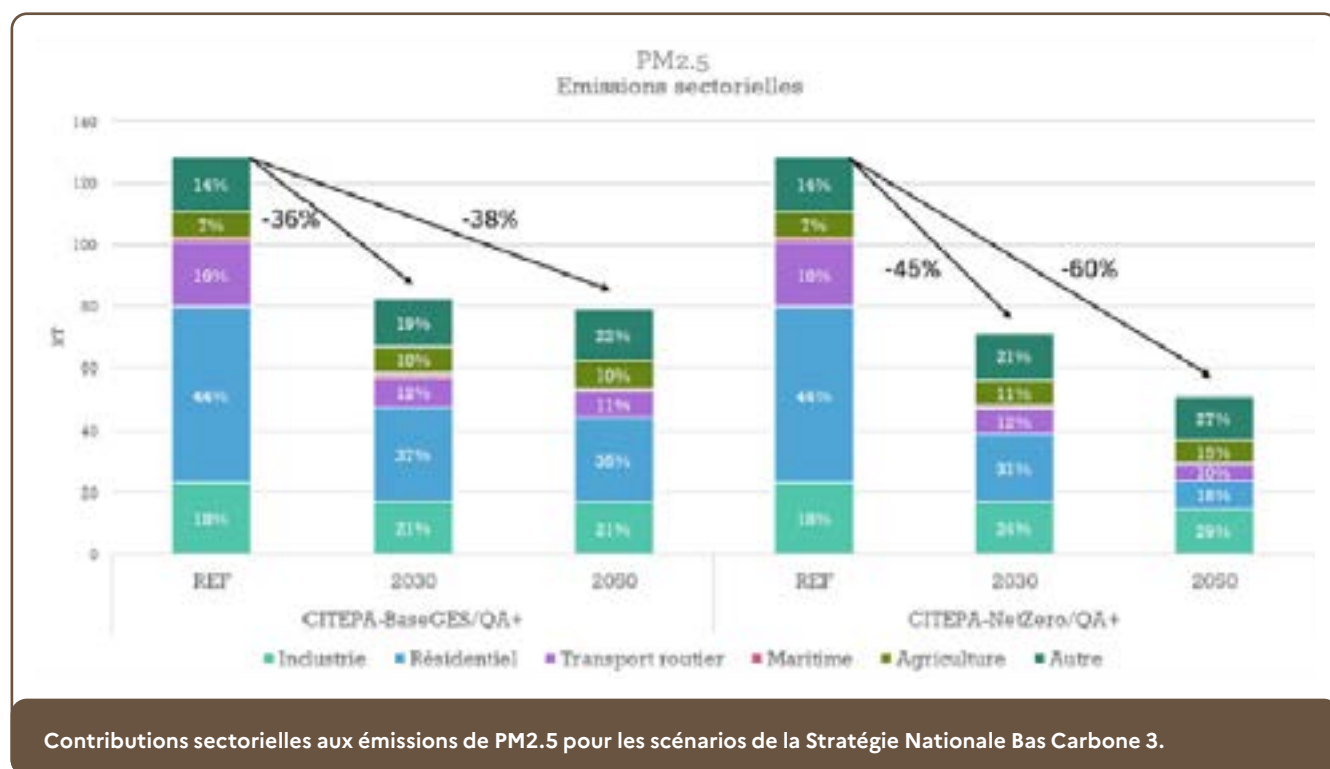
scénarios POLES (avec différents niveaux d'ambition climatique et d'amélioration de la qualité de l'air) ainsi que les scénarios de la Stratégie nationale bas carbone de la France (CITEPA). Si ces scénarios ont visé des objectifs similaires, ils diffèrent par leur approche méthodologique et leurs sources de données, POLES étant plus global et basé sur des simulations énergétiques, tandis que les scénarios chiffrés par le CITEPA



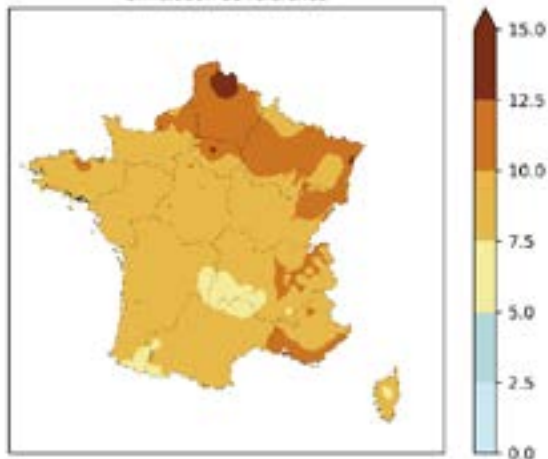
concernent la vision prospective élaborée pour la France par le ministère en charge de l'Environnement.

Les émissions des principaux polluants atmosphériques sont évaluées : les particules fines (PM2,5), les composés organiques non méthaniques volatils (NMCOV), les oxydes d'azote (NOx), l'ammoniac (NH₃) et le dioxyde de soufre (SO₂).

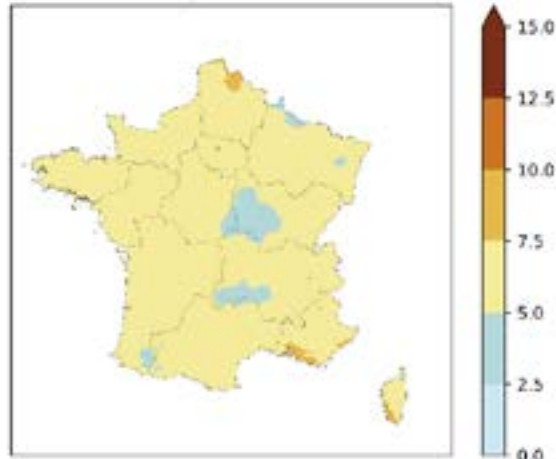
Cette méthodologie a permis de comparer, aux horizons 2030 et 2050, les effets respectifs des politiques de décarbonation et de dépollution, de mettre en perspective coûts technologiques et bénéfices sanitaires, et enfin de déterminer le consentement à payer pour l'amélioration de la qualité de l'air et l'atténuation du changement climatique.



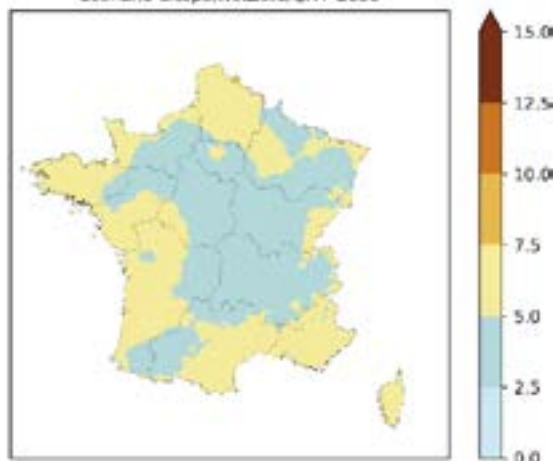
Moyenne annuelle des concentrations de $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)
Simulation de référence



Moyenne annuelle des concentrations de $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)
Scénario Citepa/BaseGES/QA+ 2050



Moyenne annuelle des concentrations de $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)
Scénario Citepa/NetZero/QA+ 2050



Moyennes annuelles de $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$) dans la situation actuelle (en haut à gauche) et à l'horizon 2050 dans un scénario tendanciel (en haut à droite) et dans le scénario de la Stratégie nationale bas carbone 3 (en bas à droite).

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Politiques climatiques et qualité de l'air :

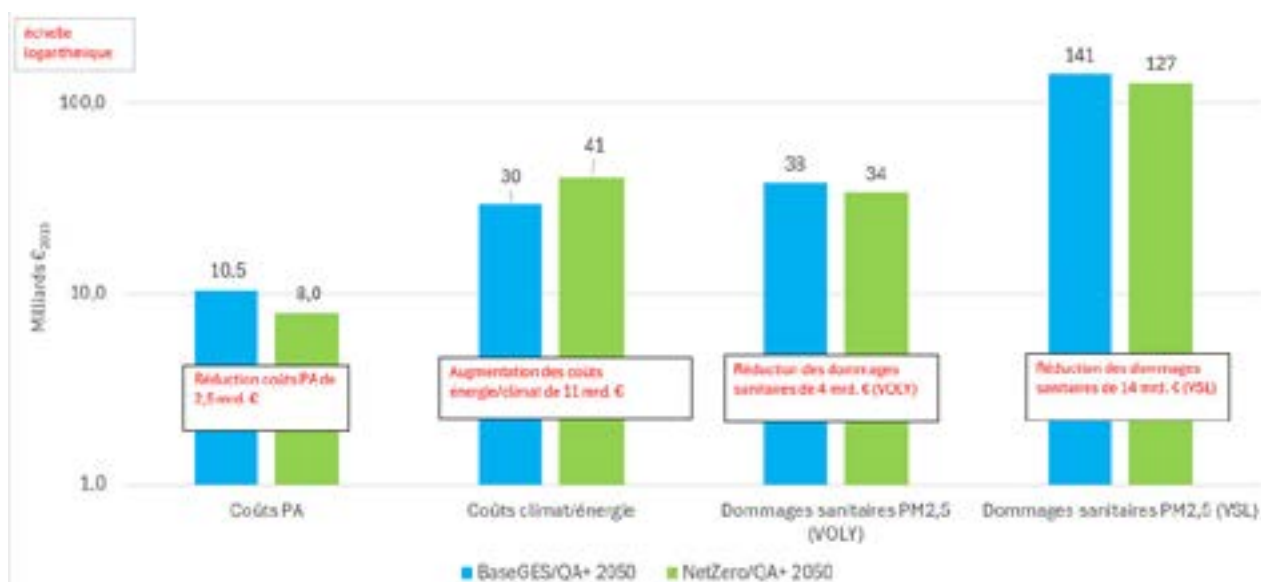
- Les politiques climatiques constituent un levier supplémentaire pour réduire les émissions de polluants. Le scénario le plus vertueux est celui qui cumule neutralité carbone et politique ambitieuse pour la qualité de l'air (POLES/NetZero/QA+). Les mesures de réduction de la pollution combinées avec la décarbonation sont plus efficaces que la décarbonation à elle seule. Cela est surtout vrai pour les émissions de particules fines, de composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) et d'ammoniac (NH_3).

Analyse coûts-bénéfices :

- À l'horizon 2050, le scénario POLES/NetZero/QA+ induit un

surcoût pour le système énergétique de 11 milliards d'euros par rapport au POLES/BaseGES/QA+. Les co-bénéfices sanitaires et les économies sur les dépenses pour la lutte contre la pollution de l'air deviennent aussi plus importants pour atteindre, à ce même horizon entre 6,5 (VOLY) et 16,5 (VSL) milliards d'euros.

- En utilisant l'indicateur le plus conservateur (VOLY, les impacts sanitaires uniquement des $PM_{2,5}$), les co-bénéfices des scénarios énergétiques pour la santé et en matière d'économies pour les politiques air compenseront à hauteur de 30 à 60 % (en 2030 et 2050, respectivement) les surcoûts des mesures énergie et climat. Mais si l'on considère des indicateurs de monétisation des bénéfices sanitaires plus majorants (VSL, incluant également les impacts sanitaires du NO_2), les bénéfices dépassent les coûts.



Coûts et dommages en 2050 dans le scénario de neutralité carbone (NetZero) et le scénario tendanciel (BaseGES), à niveau d'ambition égal pour la qualité de l'air (QA+).

Deux types de scénarios de décarbonation indépendants ont pu être analysés dans le projet : les scénarios du modèle POLES et ceux de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC3). Les estimations de réduction des dommages sanitaires imputables à la qualité de l'air sont très cohérentes avec respectivement 4 et 5,7 Mrd € d'écart entre le scénario de référence et le scénario de neutralité carbone.

Consentement à payer

- Les consentements à payer des ménages sont similaires pour les deux types de politiques, entre 0,65 et 1 € par m² de logement, indiquant une sensibilité comparable aux enjeux climatiques et de qualité de l'air.

1. Climate Change 2023, synthesis report, summary for Policymakers : https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf



INTERACTIONS CLIMAT ET QUALITÉ DE L'AIR

PACC-MACS

Pollution Atmosphérique et
Changement Climatique : scénarios
Mobilité, Aménagement urbain et
Chauffage pour protéger la Santé



CE QU'IL FAUT RETENIR

Le projet en bref

Le projet interdisciplinaire PACC-MACS a identifié et a évalué des scénarios de politiques publiques de lutte contre la pollution atmosphérique et le changement climatique à l'échelle de la métropole grenobloise à l'horizon 2050. Il s'est appuyé sur des modèles climatiques globaux et régionaux, des modèles de température et de pollution et des méthodes d'évaluation d'impacts sanitaire et économique.

Résultats marquants

PACC-MACS a produit des résultats originaux sur les impacts présents et futurs de la pollution atmosphérique et de la température à fine échelle, mettant en évidence que des efforts importants concernant la limitation des émissions de particules fines pourraient permettre, sous certaines hypothèses, de « compenser » l'impact sanitaire attendu du changement climatique médié par la température. Au total, malgré une augmentation nette de la mortalité liée à la chaleur, les évolutions combinées de la température et des PM2.5 entraîneraient une réduction nette de 4,4 % de la mortalité entre 2016 et 2050, à démographie constante.

CONTEXTE

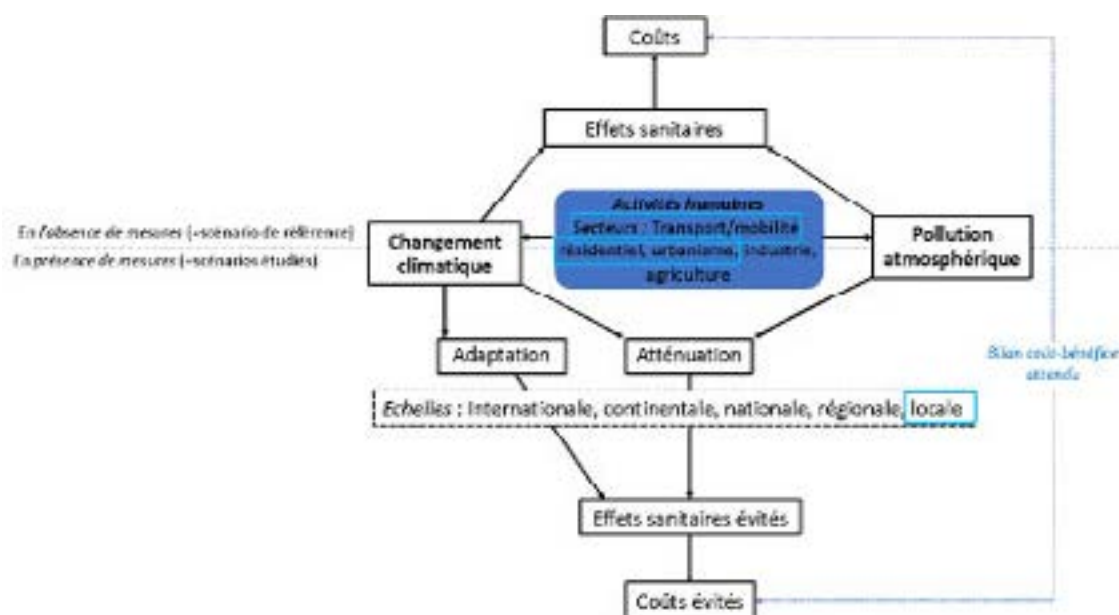
A l'échelle de l'agglomération grenobloise, les partenaires du projet avaient estimé que les particules fines étaient responsables de 145 décès par an (soit 5,6% des décès), et représentaient un coût économique de l'ordre de 500 millions d'euros par an. Le changement climatique, et notamment la hausse des températures, affecte également la qualité de l'air et pèse sur la mortalité.

OBJECTIFS

L'objectif du projet PACC-MACS était d'évaluer à l'échelle de l'agglomération urbaine grenobloise, l'impact à moyen terme (horizon 2050) des émissions de polluants atmosphériques et des émissions de gaz à effet de serre sur la qualité de l'air, la température et le climat locaux, la santé, ainsi que l'impact de scénarios d'adaptation au changement climatique, et l'estimation des coûts associés à chaque scénario.

MÉTHODOLOGIE

Le projet PACC-MACS s'inscrit dans la continuité du projet QAMECS-MobilAir développé à Grenoble, dans lequel différents scénarios concernant la mobilité et le chauffage urbain avaient été évalués, uniquement en termes de qualité de l'air, santé et coûts économiques en se plaçant dans la situation du climat d'aujourd'hui. PACC-MACS a permis d'élargir les scénarios considérés (en incluant des scénarios liés à la surface végétalisée), les facteurs environnementaux (via une modélisation de la température), en se plaçant dans la situation du climat grenoblois à l'horizon 2050. Pour évaluer l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air, PACC-MACS a comparé la période actuelle avec les projections en 2050 (selon les scénarios SSP2 4.5 et SSP5 8.5 du GIEC), grâce à une chaîne de modèles associant des modèles de climat globaux qui ont été ajustés à l'échelle des Alpes avec le modèle régional MAR, puis à l'échelle du bassin grenoblois avec le modèle WRF, ceux-ci eux-même utilisés en entrée de simulations de la qualité de l'air réalisées avec le modèle CHIMERE.



Positionnement du projet PACC-MACS

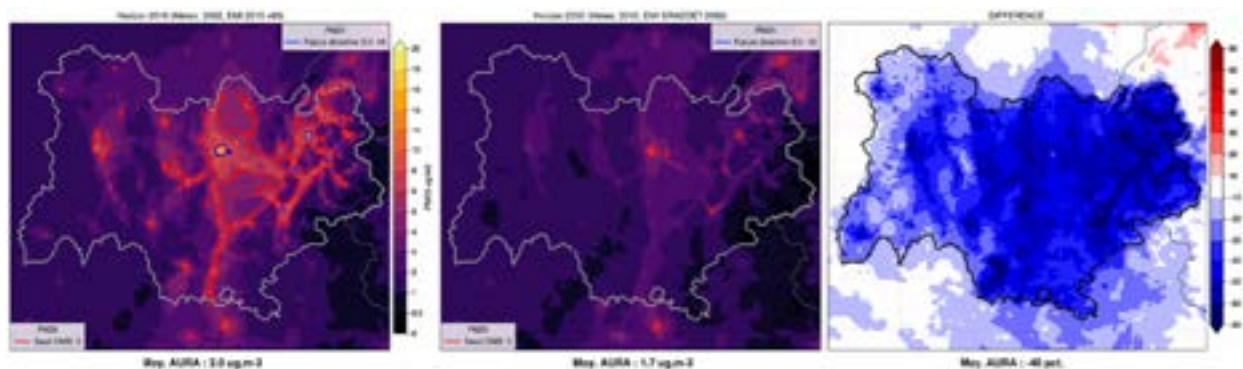
Une modélisation de la température à échelle intermédiaire (de l'ordre du km) mais sur des périodes plus longues, a permis d'estimer l'impact conjoint de la température (en distinguant celui des températures chaudes et froides, mais sans tenir compte de l'îlot de chaleur urbain et de la variabilité inter-annuelle des conditions météorologiques à ce stade) et des particules fines sur la mortalité en 2050, en comparaison avec la situation de 2016. Au total, les évolutions combinées de la température et des PM2.5 entraîneraient une réduction nette de 4,4 % de la mortalité entre 2016 et 2050, à démographie constante.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Climat

Vers la fin du siècle, le nombre de jours de canicule attendu dans la vallée de Grenoble, pour la trajectoire SSP5-8.5 est presque quatre fois supérieur à celui pour la trajectoire SSP2-4.5. Avec cette dernière, la canicule de l'année 2003, de caractère exceptionnel lorsqu'elle s'est produite, pourrait devenir un événement annuel (ou à courte périodicité) à la fin du siècle. Une canicule marquée des années 2050 dans le bassin grenoblois se traduit par des températures maximales diurnes supérieures d'environ 5°C à celles de 2023, atteignant souvent 40 à 43°C, tandis que les températures nocturnes restent voisines de 26°C dans le centre urbain de Grenoble et de 24°C dans les zones naturelles environnantes.

Les mesures d'adaptation proposées par la métropole grenobloise pour les horizons 2030 et 2050, telles que la plantation d'arbres (+15%), l'augmentation de la canopée urbaine (+30% en 2030, + 40% en 2050), l'isolation des bâtiments (+30% en 2030, +50% en 2050)... permettraient d'obtenir, en 2030, un refroidissement d'environ 0,1 à 0,5 °C pendant la journée et de 0,15 à 0,35 °C pendant la nuit lors de canicules. La politique 2050 accroît ces réductions de 0,3 à 0,5 °C supplémentaires, dépassant parfois une baisse de 1 °C dans de vastes parties de la ville. Dans le scénario de référence 2058, les baisses de température absolues peuvent être encore plus importantes : 0,5 à 1 °C pour la politique 2030 et 1 à 2 °C pour la politique 2050.



Concentration moyenne annuelle en PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour l'année de référence du présent, Horizon 2015 (gauche), et du futur, Horizon 2050 (centre), simulée par la chaîne WRF-CHIMERE mise en place dans le cadre du projet PAC-MACCS (météorologie : sorties MAR-MPI-ESM-HR-2 SSP585, émissions : cadastre v93 scénario prospective SRADDET 2050). La différence relative (futur-présent, en %) est présentée à droite de la figure.

Les cartographies de la moyenne annuelle de PM2,5 suggèrent une baisse de 40 % de la moyenne annuelle concentration en PM2,5 en région Auvergne-Rhône-Alpes, indépendamment des efforts qui pourraient être menés dans les régions voisines pour baisser les émissions de particules. Cette baisse est plus marquée dans les parties centrales et orientales de la région (région alpine en particulier). Les résultats de cette modélisation « brute » suggèrent que pour l'année de référence présent (Horizon 2015), la concentration moyenne annuelle en PM2,5 dépasse la limite fixée par la future directive européenne ($10 \mu\text{g}.\text{m}^{-3}$) uniquement dans le cœur des grandes agglomérations urbaines de la région (Lyon, Grenoble, Chambéry, Annecy) ainsi que dans certaines zones de la vallée de l'Arve et du bassin Genevois.

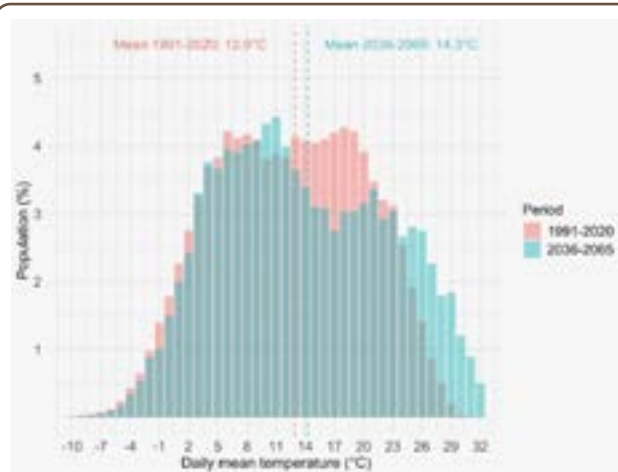
Qualité de l'air

Les objectifs de baisse des émissions de polluants atmosphériques du Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) de la Région Auvergne-Rhône-Alpes aboutissent à l'horizon 2050 à des réductions de 67 % pour les particules PM2.5, de l'ordre de 50 % pour les particules PM10 et de 75 % pour les oxydes d'azote, par rapport à l'année de référence 2015. Dans la ville de Grenoble, la baisse de la concentration moyenne en PM2,5 attendue est de plus de 70 %, passant de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2015 à $5,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à l'horizon 2050, proche de la valeur guide actuelle de l'OMS.

Santé

Dans le scénario SSP5-8.5, correspondant à une absence de contrôle des émissions de gaz à effet de serre, pour 2050, la température moyenne pondérée par la population à Grenoble augmenterait de $1,2^\circ\text{C}$. En conséquence, la fraction de mortalité liée aux températures non optimales atteindrait 9,4 % (contre 7,1 % en 2016). A l'inverse, grâce aux mesures d'atténuation, l'exposition moyenne aux particules fines et la mortalité associée diminueraient significativement. Au total, les évolutions combinées de la température et des PM2.5 entraîneraient une réduction nette de 4,4 % de la mortalité entre 2016 et 2050, à démographie constante. Ainsi, l'amélioration projetée de la qualité de l'air (dépendante de la mise en œuvre de mesures concernant le trafic routier, le parc automobile, le chauffage et l'isolation des logements notamment) permettrait de « compenser » l'impact accru de la température.

En 2016, 7,1 % (intervalle de confiance à 95 % : 4,1–10,1) de la mortalité totale dans l'agglomération grenobloise était imputable à des températures non optimales, dont 2,9 % dus à la chaleur et 4,3 % au froid. Dans le scénario SSP5-8.5 à très fortes émissions, pour 2050, la température moyenne pondérée par la population à Grenoble augmentait de 1,2 °C ; en conséquence, la fraction de mortalité liée à la température atteindrait 9,4 %, soit une augmentation nette de 2,3 % du fardeau de mortalité thermique par rapport à 2016.



Distribution de la température moyenne journalière dans l'agglomération de Grenoble dans les périodes 1991-2020 (observations) et 2036-2065 (projections).

Ces résultats doivent être interprétés avec précaution. Ils ne tiennent pas compte du phénomène d'îlot de chaleur urbain et sous-estiment la variabilité des conditions météorologiques, aboutissant probablement à minorer l'impact des températures chaudes sur la mortalité.



RECAPS

Interactions et rétroactions
entre changement climatique
et pollution de l'air sur des sols cultivés



CE QU'IL FAUT RETENIR

Le projet en bref

Le projet RECAPS a évalué les effets croisés sur la pollution atmosphérique du changement climatique et des pratiques agricoles favorables au stockage de carbone dans les sols. Dans un premier temps, il a dressé la synthèse des émissions de trois principaux composés d'origine agricole (ammoniac (NH_3), composés organiques volatils biogéniques (COVB), et protoxyde d'azote (N_2O)). Puis, dans un deuxième temps, il a modélisé l'impact du changement climatique sur les émissions atmosphériques et la qualité de l'air en Europe, en lien avec les pratiques agricoles : fertilisation organique, gestion des résidus de culture et des couverts végétaux. L'objectif était de modéliser les interactions entre pratiques favorisant le stockage du carbone dans les sols et qualité de l'air en France, en tenant compte du changement climatique.

Résultats marquants

Le projet RECAPS a mis en évidence la grande variabilité spatio-temporelle des émissions des polluants étudiés. La modélisation de l'impact des variations climatiques et de certaines pratiques agricoles indique que les émissions d'ammoniac et de NO_x augmentent avec les températures, tandis que les concentrations d'aérosols diminuent. Le projet a également permis d'améliorer la paramétrisation des modèles d'échanges de gaz entre biosphère et atmosphère, à grande échelle.

CONTEXTE

À l'échelle mondiale, l'agriculture est responsable de 10 à 12 % des émissions de gaz à effet de serre. Les terres arables jouent également un rôle central dans la pollution atmosphérique : elles sont responsables, à l'échelle mondiale, de 90 % des émissions d'ammoniac (NH_3) et génèrent également des oxydes d'azote, des composés organiques volatils et des particules fines. Le déploiement de pratiques agricoles visant à augmenter le stockage du carbone dans le sol (épandage de produits résiduels organiques (PRO), modalités de traitement de résidus de cultures, implantation de cultures de couverture, etc.) va-t-il entraîner une augmentation de rejets de gaz dans l'atmosphère ? Comment s'assurer que de telles pratiques agricoles alternatives n'aient pas de conséquences environnementales néfastes pour la qualité de l'air ?

OBJECTIFS

Le projet RECAPS a amélioré la modélisation des impacts des pratiques agricoles sur les émissions vers l'atmosphère de composés réactifs. Il a aussi quantifié les effets du changement climatique et des pratiques agricoles destinées à favoriser le stockage

du carbone dans le sol sur la qualité de l'air. Inversement, l'impact de la pollution atmosphérique à l'ozone (O_3) sur les agroécosystèmes et le stockage de carbone a également été étudié et fait l'objet d'une thèse actuellement en cours. L'objectif était de repérer les synergies et les antagonismes afin d'identifier les pratiques agricoles à la fois favorables à la séquestration de carbone et à la qualité de l'air, dans une approche "système" de couplage de modèles d'échange agroécosystèmes - atmosphère.

MÉTHODOLOGIE

La synthèse des données d'émission de NH_3 , N_2O et COVB est issue de travaux antérieurs menés à l'échelle de parcelles agricoles ou en laboratoire.

Pour la volatilisation de l'ammoniac (NH_3) issue de la fertilisation, les résultats proviennent de Massad et al. (2010) concernant les échanges bi-directionnels et de Skjoth et al. (2011) concernant la temporalisation des émissions liées au logement, au stockage et au pâturage. Pour le protoxyde d'azote (N_2O), les données sont issues de plusieurs années de mesures en continu des émissions, réalisées au moyen de chambres automatiques sur deux sites du réseau français SOERE-PRO¹.

Le projet vise à rassembler des données d'émissions de polluants atmosphériques à l'échelle de parcelles agricoles en France, pour différentes situations météorologiques, pédologiques et agronomiques, dans l'objectif de les généraliser afin de quantifier les émissions liées au changement climatique et à des scénarios de pratiques agricoles.

Composés	Maïs	Blé	Colza	Ray-grass
Méthanol	25-231	162-914	262-3557	1262
Acétaldéhyde	7-37	18-22	4,7-130	473
Acétone	46-57	18-85	6-266	219
Acide acétique	8	6,3	0,2-983	n.d.
Éthanol	n.d.	91	25-526	101
Sulfure de diméthyle	14,22	n.d.	n.d.	n.d.
Isoprène	8	3,5	3,4-272	59
Monoterpènes	4	6,6	3,7-13,7	n.d.

Facteurs d'émission des COV
de quelques grandes cultures ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

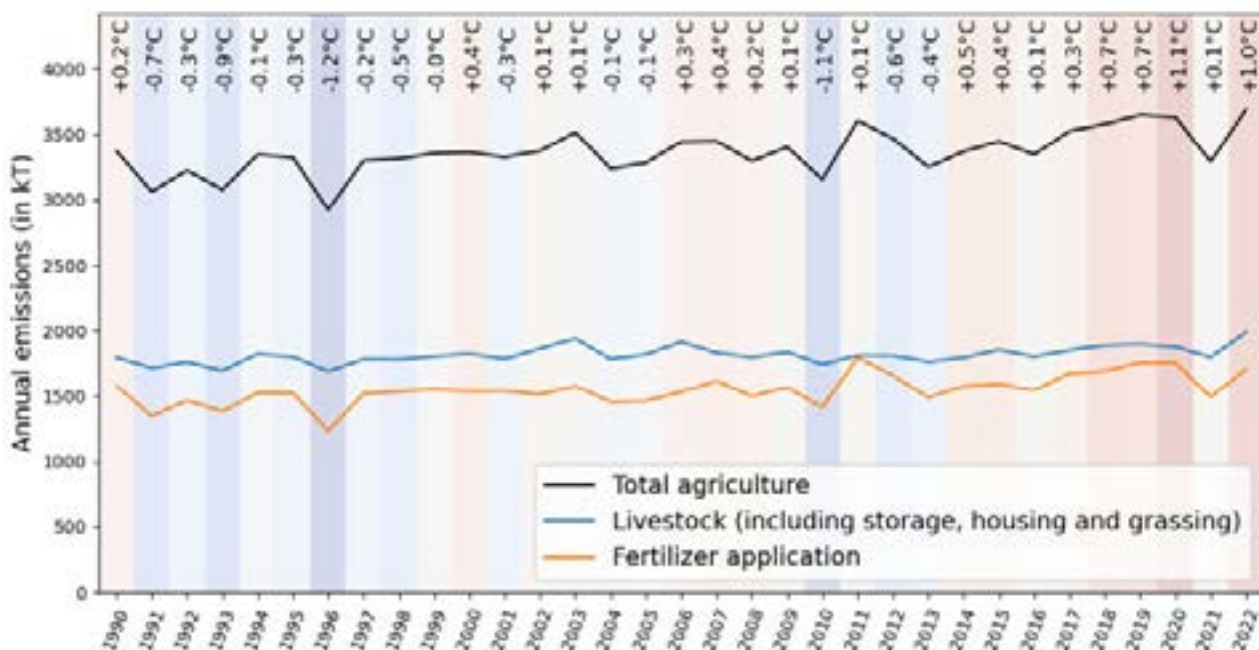
Pour les COVB, une revue de la littérature internationale a été complétée par des résultats de travaux expérimentaux menés sur différents types de fumiers (vache, cheval, mouton et chèvre) et des échantillons de boues d'épuration.

La modélisation de l'impact du changement climatique sur les émissions atmosphériques s'est appuyée sur les données du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme. Les concentrations de polluants ont ensuite été simulées avec le modèle de chimie-transport CHIMERE².

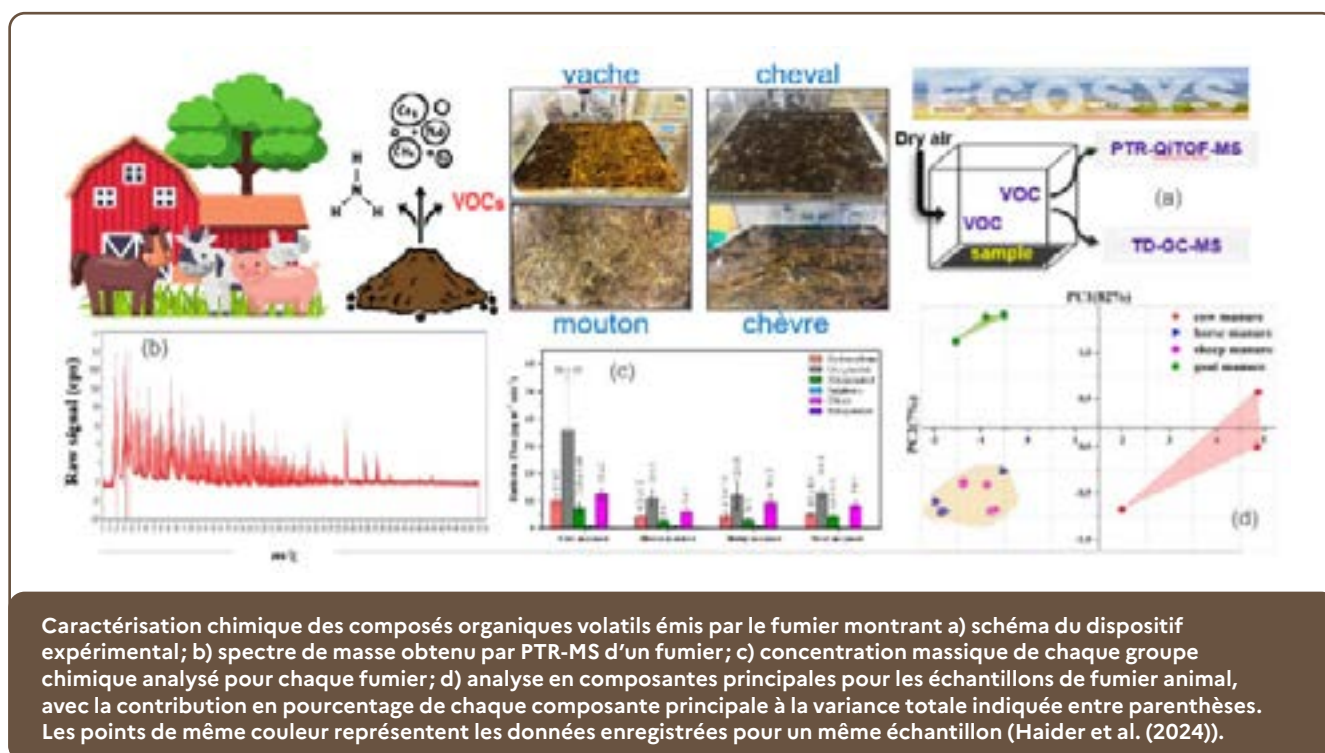
PRINCIPAUX RÉSULTATS

La synthèse des résultats d'observation collectés dans le projet RECAPS révèle une large variabilité interannuelle et spatiale des émissions de NH_3 , N_2O et COVB liée à la grande diversité des pratiques agricoles étudiées (fertilisation organique, gestion des résidus de culture et des couverts végétaux) et à la nature des produits résiduels organiques épandus (PRO). Cette variabilité rend difficile la généralisation des facteurs d'émission.

La modélisation a mis en évidence une augmentation des émissions d'ammoniac et d'oxydes d'azote liées à l'utilisation d'engrais, du fait de l'élévation des températures. Une forte diminution des



Évolution des émissions de NH_3 en Europe, à pratiques agricoles constantes, durant la période 1990-2022.



concentrations d' aérosols inorganiques secondaires (comme le nitrate d'ammonium formé par réactions chimiques entre l'ammoniac d'origine agricole et l'acide nitrique issu du trafic routier) a cependant été observée.

Les résultats obtenus concernant l'impact des scénarios climatiques, et plus précisément les changements des régimes de pluies et l'augmentation des températures, montrent que les émissions de polluants vont augmenter, tandis que l'impact sur les concentrations en polluants, notamment en PM_{2.5}, n'est pas avéré. Concernant l'impact de l'ozone sur le stockage de carbone dans les sols, les résultats d'une recherche bibliographique systématique nous ont permis de synthétiser les différents mécanismes par lesquels l'ozone troposphérique agirait sur le stockage du carbone dans les sols à savoir : (i) la diminution de la quantité et de la qualité de la litière, (ii) l'ozonation de la matière organique labile du sol, (iii) les changements dans les communautés microbiennes du sol et (iv) la diminution de l'exsudation racinaire. Nous constatons cependant que les changements de stock de carbone sont contrôlés par de nombreux facteurs supplémentaires et ceux-ci peuvent être corrélés avec les dépôts d'O₃ tels que : les concentrations de CO₂ atmosphériques, l'occupation du sol et son changement, la gestion de l'utilisation des terres (y compris l'épandage d'engrais et de fumier), le climat (différences régionales, variabilité climatique, ...), les dépôts d'azote, etc. Une approche de modélisation mécaniste serait donc nécessaire afin de compléter l'analyse bibliographique.

Les résultats obtenus concernant l'impact des scénarios climatiques, et plus précisément les changements des régimes de pluies et l'augmentation des températures, montrent que les émissions de polluants vont augmenter, tandis que l'impact sur les concentrations en polluants, notamment en PM_{2.5}, n'est pas avéré. Les connaissances en matière de quantification des émissions de NH₃, COV et N₂O liées à des pratiques agricoles stockant davantage de carbone dans le sol sont encore insuffisantes et ne reflètent pas suffisamment la diversité des pratiques agricoles et des produits épandus au champ.

1. <https://valor-pro.hub.inrae.fr/presentation-de-l-observatoire-soere-pro>
2. <https://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>



La synthèse des résultats d'observations collectés dans le projet RECAPS révèle une large variabilité interannuelle et spatiale des émissions de NH_3 , N_2O et COV liées à la nature des produits résiduels organiques (PRO) et aux diverses pratiques agricoles. Cette variabilité rend difficile la généralisation des facteurs d'émissions.



SOURCE

Stratégies politiques et citoyennes innovantes pour atténuer les effets du dérèglement climatique et améliorer la qualité de l'air et la qualité de vie urbaine



CE QU'IL FAUT RETENIR

Le projet en bref

Le projet SOURCE analyse, en croisant urbanisme et psychologie sociale et environnementale, la capacité des écolieux à participer à la transition écologique et sociale. Les écolieux sont définis comme « *des lieux de vie conçus en commun selon des principes de transition écologique, et des principes de sobriété, d'autonomie et de coconstruction d'un collectif entre résidents qui en déterminent la forme, le mode de vie collective, les valeurs et la gouvernance partagée* ».

Résultats marquants

- Les écolieux constituent des laboratoires d'innovation citoyenne pour l'adaptation au changement climatique qui s'appuie principalement sur une recherche d'autonomie, de sobriété et des dynamiques de résilience collective et de bien-être commun.
- Le moteur principal de l'engagement dans ces lieux repose sur la recherche d'une qualité de vie et d'un bien-être en lien avec la nature. Il n'est pas motivé par une meilleure qualité de l'air.
- La qualité de l'air n'est pas un levier d'action direct pour les habitants des écolieux. Contrairement au lien à la nature, à l'ambition de créer des communs, à la gestion de l'eau, des déchets ou de l'énergie, ce sujet est perçu comme trop global et systémique, rendant difficile son appropriation au niveau local.
- Les politiques publiques et les initiatives citoyennes suivent des logiques souvent parallèles, avec peu d'interactions formelles entre écolieux et collectivités locales.

CONTEXTE

Face à l'accélération du dérèglement climatique et aux défis de la pollution de l'air, les pouvoirs publics ont mis en place plusieurs stratégies telles que les Plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET), les Plans de protection de l'atmosphère (PPA), la Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique (SNACC).

Parallèlement, des initiatives citoyennes se développent en dehors des cadres institutionnels. Parmi elles, les écolieux, répertoriés notamment par le réseau Oasis, constituent des espaces de vie collective expérimentant des modèles alternatifs pour répondre aux défis écologiques, sociaux et climatiques. La recherche SOURCE s'est intéressée à ces initiatives pour comprendre comment elles s'approprient les enjeux du changement climatique et de la qualité de l'air et comment elles

interagissent (ou non) avec les politiques publiques. Cette recherche qualitative avait pour ambition de voir si les écolieux pouvaient inspirer ou compléter les politiques nationales et territoriales en matière d'adaptation aux changements climatiques et environnementaux et de bien-être collectif.

OBJECTIFS

S'appuyant sur des observations et enquêtes menées dans une dizaine d'écolieux et sur des entretiens avec des représentants des pouvoirs publics, ce projet a visé à évaluer :

- le rôle des écolieux comme possibles laboratoires d'innovation citoyenne, capables de proposer des solutions concrètes d'adaptation au changement climatique et d'atténuation des pollutions environnementales ;

Les écolieux ne se développent pas autour d'une volonté spécifique d'améliorer la qualité de l'air. Leur création et leur mode de fonctionnement sont avant tout portés par une recherche de bien-être et de qualité de vie, ancrée dans des préoccupations écologiques et sociales plus larges.



Moulin Bleu

- leur contribution aux dynamiques de résilience collective ;
- les interactions entre ces initiatives et les politiques publiques existantes, afin d'identifier les points de convergence et les écarts.

Un point particulier de l'étude a porté sur la qualité de l'air et l'adaptation au changement climatique : en quoi est-elle prise en compte dans ces dynamiques et pourquoi reste-t-elle un enjeu secondaire par rapport à d'autres préoccupations comme la nature, l'eau ou l'énergie ?

MÉTHODOLOGIE

Le projet SOURCE a reposé sur une approche qualitative approfondie, combinant :

- une analyse bibliographique sur les politiques publiques et les initiatives citoyennes ;
- des entretiens avec des représentants des collectivités locales (Cher, Loire, Île-de-France) pour comprendre leurs actions autour du changement climatique et de l'amélioration de la qualité de vie et de l'air et leur perception des écolieux et de leurs actions ;



Carte des OASIS – avril 2023

Les écolieux recensés dans la base de données interopérable développée par la Coopérative Oasis et Habitat Participatif France. Ces écolieux rassemblent entre 10 et 50 personnes chacun.



La Bascule Argoat

- une enquête de terrain dans une dizaine d'écolieux, à travers des observations participantes et des entretiens semi-directifs avec les habitants ;
- trois immersions longues dans des écolieux pour observer leur fonctionnement quotidien et leurs pratiques environnementales ;
- un croisement des données pour identifier les convergences et écarts entre politiques publiques et initiatives citoyennes.

En complément, des entretiens ont été réalisés avec des porteurs de projets d'habitat participatif, de squats et de tiers-lieux pour comparer leurs approches avec celles des écolieux.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

La création et le mode de fonctionnement des écolieux sont avant tout portés par une recherche de bien-être et de qualité de vie. Trois dynamiques majeures structurent ces aspirations :

- La reconnexion à la nature : les habitants des écolieux expriment un fort désir de retisser un lien direct avec leur environnement, en s'éloignant des cadres de vie urbains perçus comme stressants et artificialisés. La proximité avec les milieux naturels est ainsi un facteur déterminant dans leur choix de vie.
- La recherche de sobriété et d'autonomie : ces collectifs cherchent à réduire leur dépendance aux systèmes économiques et énergétiques conventionnels en privilégiant des modèles basés sur l'autoproduction alimentaire, les énergies renouvelables et la mutualisation des ressources.

- La création de nouvelles formes de vie collective : au-delà des préoccupations environnementales, les écolieux sont également des espaces de réinvention du collectif autour de lieux partagés, où se développent des modes de gouvernance horizontale, des économies de partage et des solidarités locales.

Bien que ces pratiques aient des effets bénéfiques sur la qualité de l'air, celle-ci ne constitue pas un levier d'action explicite pour les habitants. L'amélioration de l'environnement atmosphérique est davantage une conséquence indirecte de ces choix de vie qu'un objectif revendiqué en tant que tel.

Plusieurs pratiques contribuent indirectement à la préservation de la qualité de l'air et à la réduction des émissions polluantes :

- La mobilité dans les écolieux repose sur des principes de réduction des déplacements motorisés. L'usage de la voiture est limité grâce au covoiturage, aux déplacements à vélo et à l'auto-production locale qui réduit la dépendance aux circuits longs d'approvisionnement. Ces choix entraînent une diminution des émissions de particules fines et d'oxydes d'azote.
- L'utilisation de matériaux de construction naturels : la majorité des écolieux adoptent des pratiques de construction écologique, favorisant des matériaux biosourcés (bois, terre crue, paille, chanvre) qui génèrent moins d'émissions polluantes que les matériaux industriels classiques (béton, plastiques, peintures chimiques). Cela réduit l'impact des composés organiques volatils (COV) et améliore la qualité de l'air intérieur et extérieur.

L'adaptation au changement climatique et l'amélioration de la qualité de vie constituent la toile de fond de la création des écolieux. Cependant, même au sein d'un public d'experts soucieux des dimensions qui concourent à améliorer la qualité sanitaire de l'environnement, l'air intérieur ne fait pas l'objet de représentations claires et les moyens d'agir sur sa qualité ne sont pas davantage connus. Les sources de son altération sont toutefois identifiées. Les habitants des écolieux intègrent l'air comme un effet secondaire dans leur projet en relation avec les normes qui concourent à l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.



Hameau du Plessis

- Des lieux de vie inscrits dans un milieu écologique : les écolieux s'implantent dans de vastes domaines naturels et boisés, favorisant ainsi la régulation thermique et la captation des polluants atmosphériques. Cette végétalisation contribue à l'atténuation de certains effets négatifs de la pollution urbaine et participe à la création de microclimats locaux plus sains.

Ainsi, bien que la qualité de l'air ne soit pas un moteur de ces initiatives, les pratiques des écolieux s'avèrent cohérentes avec les objectifs de réduction des pollutions atmosphériques portés par les politiques publiques.

Toutefois, la recherche a montré que les politiques d'adaptation au changement climatique et d'amélioration de la qualité de vie convergeaient peu avec les initiatives des écolieux. La distance avec les politiques publiques revendiquées par certains habitants des écolieux et les représentations péjoratives de certains élus constituent un frein à de possibles rapprochements. Ce manque de dialogue contribue à maintenir une fracture entre ces dynamiques citoyennes et les stratégies publiques, alors qu'elles pourraient être complémentaires pour accélérer la transition écologique.



2 INTERACTIONS AIR-CLIMAT DANS LE SECTEUR DE LA MOBILITÉ

ACACIAS

Quantification de l'impact
des politiques publiques liées
à la mobilité via de nouvelles
méthodologies d'évaluation



CE QU'IL FAUT RETENIR

Le projet en bref

Le projet ACACIAS a consisté à coupler une base de données GPS d'usages réels de la route (approche à haute résolution spatio-temporelle, dite microscopique) avec des enquêtes ménages-déplacements (approche à l'échelle d'un territoire, dite macroscopique). Cette méthodologie de couplage, à la fois quantitative et qualitative, apporte aux villes un nouvel outil pour évaluer plus finement l'impact sur la qualité de l'air de leurs politiques en matière de mobilité et d'aménagement routier. La démarche ACACIAS a été appliquée à différents cas d'étude de la métropole de Lyon : changement d'une infrastructure de transport en commun (TC), offre de TC vs usage individuel de la voiture, mise en place d'une zone à faible émission (ZFE), Plan de déplacement urbain (PDU) 2030.

Résultats marquants

- L'approche proposée pour la modélisation des émissions a permis de mieux prendre en compte les effets de la congestion, de la topographie et des aménagements de la voirie sur la pollution de l'air, avec des écarts d'estimation des émissions pouvant aller jusqu'à 30 % par rapport à la méthodologie COPERT dans certaines situations.
- La promotion de l'écoconduite est un levier important de réduction des émissions (jusqu'à 20 % pour les vitesses supérieures à 50 km/h).
- Le couplage entre les données GPS et les enquêtes de mobilités a pu faire ressortir de potentielles « zones blanches » où l'offre de TC n'est pas adaptée (temps de trajet trop long par rapport à la voiture).
- L'outil a permis d'objectiver l'amélioration de la pollution résultant de la mise en place d'une ZFE à l'échelle du Grand Lyon en expliquant les effets de cette politique et des comportements des usagers, notamment en matière de report trafic et modal, sur les émissions liées à la mobilité.

CONTEXTE

Principal contributeur aux émissions de gaz à effet de serre (GES) en France, le secteur du transport est aussi à l'origine de la dégradation de la qualité de l'air. La métropole lyonnaise est particulièrement affectée : le secteur des transports routiers y représentait en 2018 plus de 30 % des émissions de GES, 60 % des émissions d'oxydes d'azote (NOx) et plus de 30 % des particules fines (PM10 et PM2,5).

OBJECTIFS

L'objectif du projet était de proposer de nouvelles méthodologies d'évaluation des leviers de réduction des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre avec une

double ambition :

- améliorer la qualité d'estimation des impacts environnementaux en se basant sur des données réelles de mobilité ;
- progresser dans l'évaluation des potentiels de réduction des émissions en reliant les émissions à la mobilité et ses déterminants socio-économiques.

MÉTHODOLOGIE

ACACIAS a associé deux approches complémentaires :

- Les enquêtes mobilités certifiées Cerema (EMC2), ici l'enquête Ménages Déplacements Lyon 2015 qui porte sur plus de 16 000 ménages et couvre 569 communes.

Enquête auprès de 16000 ménages de 569 communes lyonnaises et exploitation de traces GPS représentant 80 millions de kilomètres parcourus entre 2017 et 2020.

- Les traces GPS de plus de 80 millions de kilomètres parcourus entre 2017 à 2020 par les utilisateurs (anonymisés) de l'application Geco Air développée par IFP Énergies nouvelles. Celle-ci contient aussi les émissions de polluants associées aux véhicules utilisés, estimées selon le modèle d'émissions de l'IFPEN.

Ce couplage est destiné à évaluer les impacts des politiques publiques aussi bien à l'échelle locale que globale : la précision et la résolution élevées apportées par la quantité des données GPS complètent la représentativité statistique des enquêtes, indispensable à l'étude de territoires de grande taille.

Le couplage des deux sources de données a été testé sur des cas concrets dans la métropole lyonnaise :

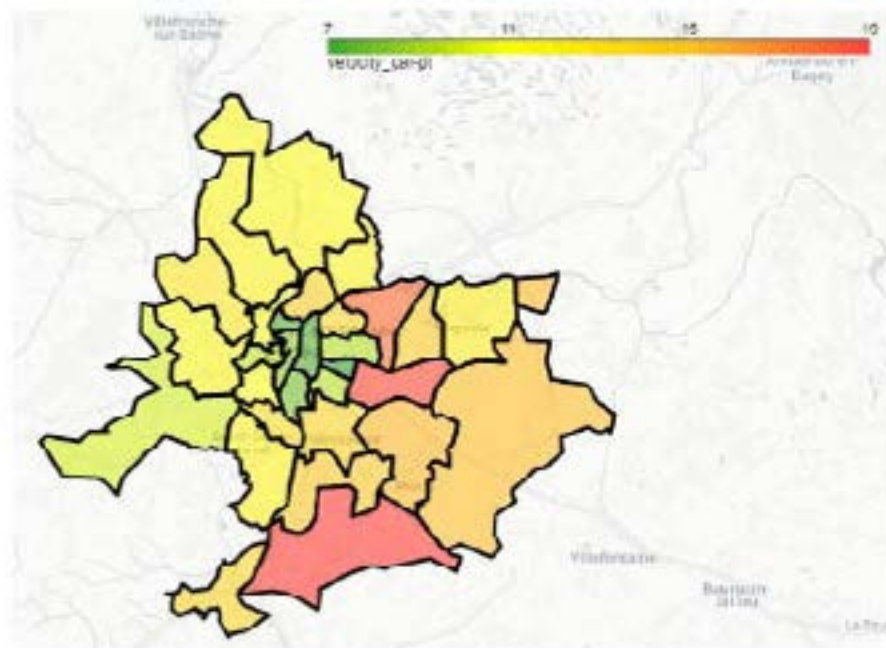
- étude des liens entre l'offre de transport et l'usage individuel de la voiture ;



Périmètre de la ZFE lyonnaise avant extension en 2024.

- étude préalable à la mise en place d'une Zone à faibles émissions (ZFE) ;
- intérêt du couplage pour l'élaboration du Plan de déplacements urbains (PDU).

Le couplage direct entre les deux bases de données, c'est-à-dire entre les individus de l'enquête EMC2 et les utilisateurs de l'application Geco air, a consisté à identifier pour chaque déplacement d'un individu de l'enquête un déplacement équiva-



Carte agrégée des différences de vitesse en km/h entre la voiture et les transports en commun pour les déplacements émanant d'une zone allant vers toutes les autres zones.



Interface de l'outil de simulation de la ZFE.

lent dans les traces GPS. Cependant, malgré les efforts d'augmentation de la taille de la base de données de trajets réels pour le couplage, le nombre de trajets appariés aux déplacements déclarés dans l'enquête reste limité pour faire des analyses ex post ou ex ante des mesures de régulation ou d'aménagement du trafic sur un territoire. C'est donc une approche de couplage indirect qui a été retenue. La base de données Geco air a ainsi été utilisée pour modéliser les choix d'itinéraire entre deux zones et créer des profils synthétiques de vitesse instantanée sur ces itinéraires. Les émissions ont ensuite été calculées à partir de ces profils de vitesse avec le modèle d'émissions de l'IFPEN. L'un des principaux avantages de cette approche de couplage indirect est de pouvoir conduire des études de scénarios qui soient représentatives.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Émissions liées à la mobilité

Appliqué à la métropole lyonnaise, la démarche ACACIAS a montré sa capacité à prendre en compte la topographie (pentes), la congestion du trafic mais aussi les aménagements et la signalisation routière pour le calcul des émissions des véhicules. La méthodologie COPERT ne différencie pas actuellement la pente dans les facteurs d'émissions des VP et VUL. Les facteurs d'émissions ACACIAS, qui disposent de cette information, sont exploités afin d'obtenir des facteurs correctifs applicables aux facteurs d'émissions COPERT.

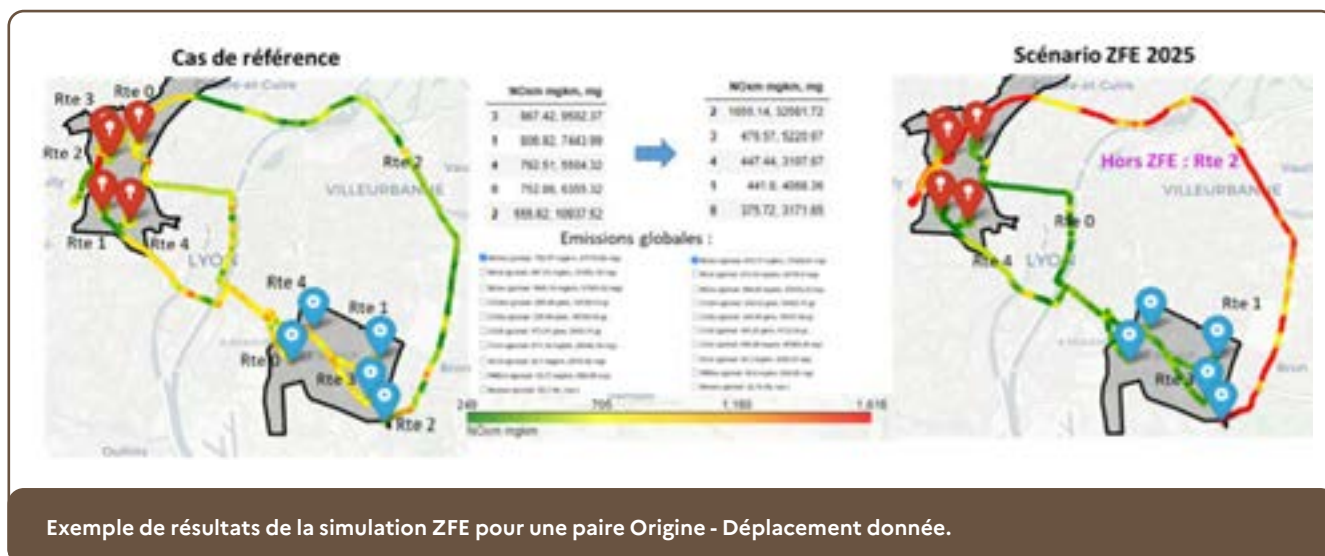
Choix modal

Le couplage des données GPS avec celles issues de l'enquête mobilité éclaire la compréhension des choix de mode de transport dans différentes zones de l'agglomération lyonnaise, en renseignant sur les différences de temps de trajet entre la voiture particulière et les transports en commun (TC), d'une zone à une autre.

Le couplage a permis de générer des données représentatives pour toutes paires origine-destination, y compris celles qui ne figuraient pas dans l'enquête Ménages Déplacements Lyon 2015. La carte des différences de vitesse moyenne entre voiture et TC à origine fixée, c'est-à-dire en calculant la vitesse moyenne de déplacement pour aller d'une origine vers toutes les autres zones

Le projet ACACIAS prend en compte de manière plus fine les effets pente, les émissions à faible vitesse, l'infrastructure routière et le style de conduite :

- en générant des données représentatives sur n'importe quelle paire d'origine-destination ;
- en identifiant les routes et segments routiers les plus émetteurs pour les déplacements entre deux zones ;
- en ajustant les facteurs d'émissions de l'inventaire d'émissions ;
- en permettant des calculs allant du microscopique au macroscopique (impacts du style de conduite sur les émissions, effets des restrictions de la ZFE).



de destination (cf. figure Carte agrégée des différences de vitesse) donne, par exemple, des informations sur la connectivité d'une zone en transport en commun.

Zone à faibles émissions (ZFE)

La méthodologie ACACIAS a permis de simuler l'impact d'une ZFE sur les déplacements des usagers et la vitesse moyenne des itinéraires à l'intérieur et à l'extérieur de la ZFE ainsi que sur les émissions associées (NOx, CO₂ et particules à l'échappement) (cf. figure Interface de l'outil de simulation de l'outil ZFE). À titre d'exemple d'utilisation de l'outil pour un choix de paramètres de simulation donnés, on observe que le scénario ZFE 2025 réduit globalement les émissions de NOx d'environ 10 % par rapport au scénario de référence avec un parc automobile de 2021 sans restriction de circulation (ceci en tenant compte de l'augmentation des émissions sur les itinéraires contournant la ZFE, cf. figure Exemple de résultats de la simulation ZFE pour une paire Origine - Déplacement donnée). ACACIAS améliore l'élaboration d'outils de planification territoriale tels que le plan de déplacements urbains (PDU) de l'agglomération lyonnaise en apportant davantage de précisions et de nouveaux paramètres, renseignant ainsi sur les actions ayant trait aux infrastructures, au parc de véhicules, mais aussi sur les comportements et en particulier sur l'éco-conduite. ACACIAS a permis de quantifier le potentiel de cette mesure inscrite dans le PDU : une réduction de 20 % des émissions de CO₂ pour les vitesses supérieures à 50 km/h.

Les résultats du projet ACACIAS peuvent avoir plusieurs apports en regard d'un outil de planification tel que le PDU. Par leur nature, ils peuvent permettre d'améliorer la chaîne d'élaboration de ce plan, du diagnostic au test de scénarios en passant par des modélisations. En effet, l'approche de couplage par modélisation retenue dans le projet ACACIAS assure la répliquabilité de la méthode à d'autres territoires uniquement sur la base de données d'enquêtes de mobilité et sans besoin de collecte préalable de données GPS d'usage réel.

1. ATMO Auvergne-Rhône-Alpes, « Bilan de la qualité de l'air en 2018 – Nouveau Rhône/Métropole de Lyon », 2018.
2. Au moment de la réalisation du projet ACACIAS le calendrier de la ZFE du Grand Lyon qui avait été mis à jour en février 2023 était le suivant : 1^{er} janvier 2023, interdiction de circulation aux voitures et 2-roues motorisées Crit'Air 5 et non classés, 1^{er} janvier 2024, extension de l'interdiction aux voitures et 2-roues motorisées Crit'Air 4, 1^{er} janvier 2025, extension de l'interdiction aux voitures et 2-roues motorisées Crit'Air 3, 1^{er} janvier 2028, extension de l'interdiction aux voitures et 2-roues motorisées Crit'Air 2. L'interdiction des voitures et 2-roues motorisées Crit'Air 3 a bien eu lieu dès le 1^{er} janvier 2025.



FRAME

Cadrage de l'information
pour une mobilité durable



CE QU'IL FAUT RETENIR

Le projet en bref

FRAME est un projet pluri disciplinaire (économie et psychologie) et pluri méthodologique. Il vise à évaluer les effets des enjeux locaux (i.e. pollution de l'air et santé) et globaux (i.e. changement climatique) sur les choix et perceptions dans divers domaines de la mobilité. Il fournit une démonstration empirique du processus d'acceptabilité des taxes routières et de l'efficacité de la perception du cadre de vie et des normes dynamiques pour favoriser des choix de mobilités durables.

Résultats marquants

Pris dans leur ensemble, les résultats valident l'approche théorique selon laquelle les préférences comportementales favorables à l'environnement ne préexistent pas mais sont, au contraire, dépendantes du contexte décisionnel et offrent ainsi plusieurs perspectives de recherche :

- Un cadre de vie facilitant les interactions sociales semble être un levier efficace, en accentuant un sentiment d'appartenance groupale pour induire en général un changement vers un mode de vie plus durable et notamment des choix de modes de transport plus respectueux de l'environnement que l'autosolisme.
- L'opposition sociale aux taxes environnementales ne résulte pas d'une incompréhension de leur fonctionnement, puisque les participants modifient leur comportement en conséquence en renonçant à l'autosolisme, sans toutefois accorder leur soutien à la mise en place de taxes environnementales
- L'exposition à une norme sociale dynamique accentue significativement le renoncement à l'autosolisme pour des trajets non réguliers de 2 heures.

CONTEXTE

Le transport est le premier émetteur de gaz à effet de serre et le trafic routier impacte fortement la qualité de l'air. Agir sur la mobilité permet à la fois d'atténuer les impacts du changement climatique et d'améliorer la santé humaine. Il est donc indispensable d'arriver à changer les pratiques. Nos comportements en faveur de l'environnement sont influencés tant par des facteurs socio-économiques que psychologiques. Différents modèles soulignent l'importance du sentiment d'appartenance à un groupe pour l'évolution de ces comportements, qui sont également conditionnés par notre prise de conscience de l'impact de nos activités. Ainsi, par exemple, plusieurs études ont montré un lien entre l'expérimentation des conséquences positives des taxes environnementales et leur acceptabilité. Enfin, la norme sociale est un levier puissant pour susciter le changement.

OBJECTIFS

L'objectif du projet était d'explorer comment différents facteurs, tels que la perception du cadre de vie, les interactions sociales, l'information et les politiques fiscales, influencent les comportements de mobilité durable et l'acceptabilité des politiques environnementales.

MÉTHODOLOGIE

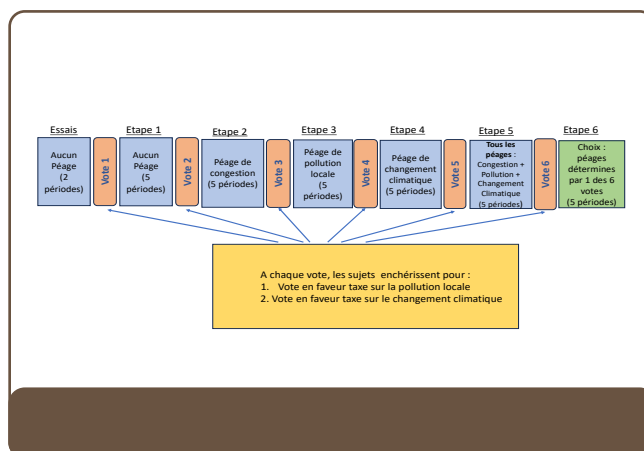
Le projet FRAME était constitué de trois études distinctes :

- 1. Effets de la proximité sociale et de la qualité résidentielle environnementale du cadre de vie sur la motivation à adopter un mode de vie durable.** Cette expérience de psychologie sociale réalisée au

Le projet FRAME fournit une démonstration empirique non seulement de l'efficacité de la perception du cadre de vie et de la mise en exergue d'une norme dynamique à induire des choix plus durables, mais aussi du processus d'acceptation des taxes routières.

Laboratoire d'Évaluation et de Simulation de l'Environnement (LSEE) de l'Université Gustave Eiffel a soumis 240 actifs résidant à Lyon et dans les communes limitrophes, à un cadre de vie simulé. Assis dans un salon, les participants renseignaient leurs préférences comportementales et leurs intentions de choix de transport, par rapport à un environnement simulé sur une fenêtre de la pièce. Deux variations (faible/forte) de deux paramètres (proximité sociale et qualité résidentielle environnementale), soit quatre cadres de vie, ont été testés.

2. Expérimenter les conséquences positives motrices de la mise en place des taxes environ-



nementales avant leur mise en pratique favorise-t-elle l'acceptabilité ? Une expérience d'économie expérimentale

L'expérience proposée a été menée au laboratoire d'économie expérimentale de l'Université de Rennes (LABEX-EM). 440 participants, divisés en 22 groupes de 20 personnes, repartis comme résidant dans deux villes fictives, ont été invités à faire des choix répétés de mode de transport (voiture ou train) sous différentes conditions de taxation (congestion, pollution de l'air locale, changement climatique). Leur choix de transport est influencé par les coûts associés, calculés en fonction des choix des participants et des taxes introduites : ainsi, par exemple, plus les participants qui choisissent la voiture sont



« proximité sociale faible et qualité résidentielle environnementale élevée »



« proximité sociale et qualité résidentielle environnementale élevées »

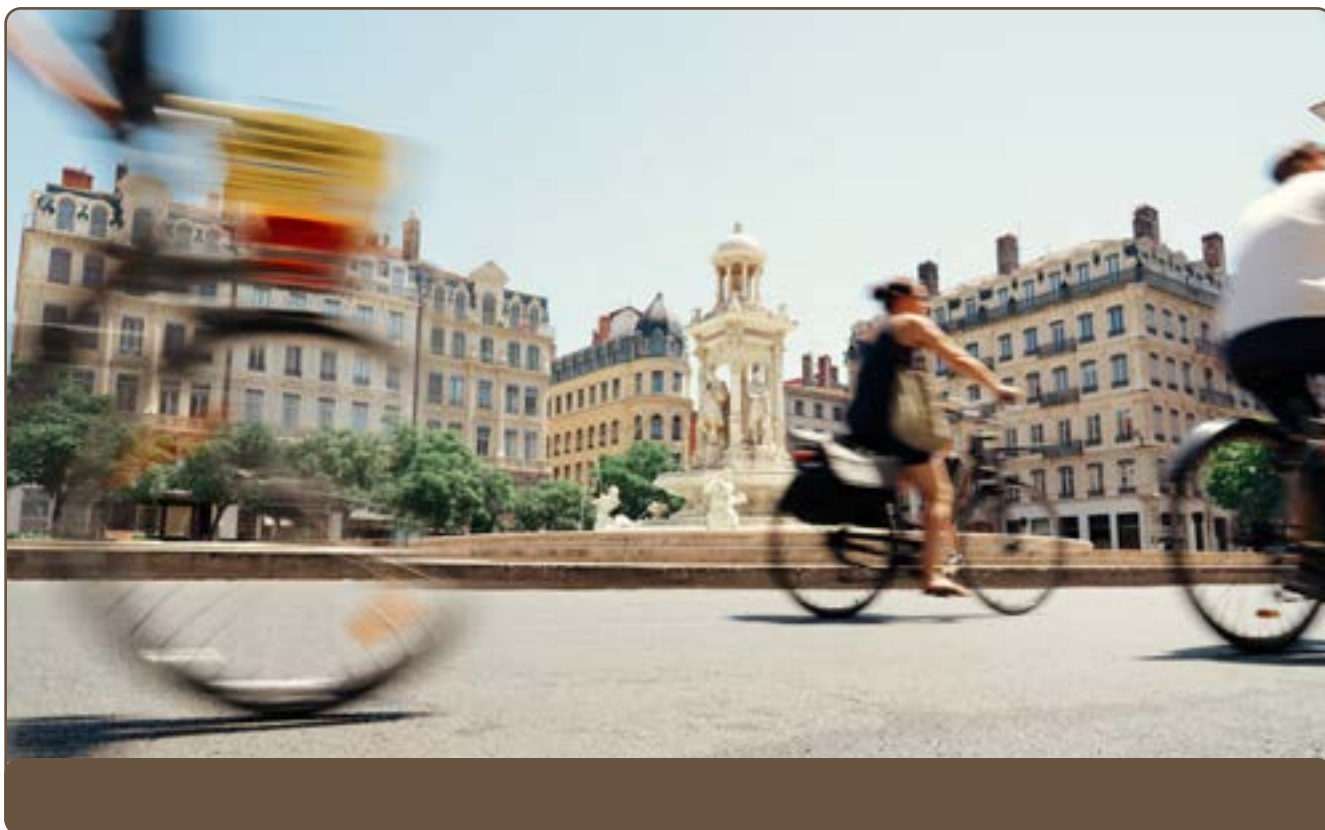


« proximité sociale et qualité résidentielle environnementale faibles »



« proximité sociale élevée et qualité résidentielle environnementale faible »

Le cadre de vie visuel et sonore projeté aux participants sur un écran intégré dans la fausse fenêtre d'une reconstitution de salon d'un logement, au Laboratoire d'évaluation et de simulation de l'environnement (LSEE) du laboratoire MODIS de l'université Gustave-Eiffel.



nombreux, plus les coûts de pollution de l'air induits par le trafic automobile augmentent et plus les coûts individuels de transport s'accroissent... Enfin, les participants votaient pour ou contre la mise en place des taxes proposées avant et après en avoir fait l'expérience, puis remplissaient un questionnaire sur leurs perceptions psychosociales. Ceci afin d'évaluer de manière ex ante si le fait d'expérimenter les conséquences économiques positives des taxes environnementales pouvait favoriser leur acceptabilité.

3. L'effet des normes dynamiques pour favoriser la sortie de l'automobilisme en faveur du covoiturage : une expérience de choix discrets

Cette enquête de préférences déclarées a rassemblé 4 500 individus résidant en France, répartis en trois groupes : un groupe contrôle (sans aucune information), un groupe soumis à une norme dynamique soustractive (c'est à dire à l'information suivante : « de moins en moins d'automobilistes se déplacent seuls, sans covoiturage de personne ou sans cotransportage de colis, pour des trajets de deux heures ») et un groupe soumis à norme dynamique additive (à savoir : « de plus en plus d'automobilistes font du covoiturage de personne ou du cotransportage de colis, pour des trajets de deux heures »). Les participants étaient confrontés à 10 cartes de choix pour lesquelles ils devaient, pour un trajet deux heures et en tant que conducteur, choisir entre les trois alternatives suivantes : i) se déplacer seul ; ii) transporter un colis ou iii) transporter une personne. Au sein des 10 cartes de choix proposées, les deux alternatives, à savoir covoiturage et cotransportage, différaient par le temps po-

tentiellement supplémentaire de trajet, la gratification accordée, la note (sur 15 avis) de la personne qui covoiturerait ou qui enverrait le colis et le type de bénéfice environnemental espéré.

Ces méthodologies ont permis d'explorer de manière approfondie les déterminants des comportements de mobilité durable et d'évaluer l'efficacité de différentes interventions pour encourager des choix plus respectueux de l'environnement.

L'ajout de taxes environnementales dans un environnement subissant déjà une pression fiscale devrait s'accompagner d'une intervention visant à accroître les préoccupations environnementales et la légitimité perçue des taxes afin de dépasser la simple acceptation comportementale, à savoir le changement de mode de transport.

La gratification, la note d'évaluation et les bénéfices environnementaux sur le climat sont des leviers efficaces afin de renoncer à l'autosolisme pour des trajets de 2 heures. Un message prenant la forme d'une norme dynamique favorise bien les changements de comportement. Ce message a plus d'effet lorsqu'il est formulé de manière négative sur la pratique majoritaire et habituelle (l'autosolisme) que de manière positive sur les solutions alternatives (covoiturage de personnes ou de colis).



PRINCIPAUX RÉSULTATS

L'expérience sur la proximité sociale et la qualité du cadre de vie n'a pas permis, du point de vue statistique, de révéler un effet direct des cadres de vie ni sur les choix comportementaux, ni sur les intentions d'adopter un mode vie plus durable. Les résultats montrent cependant qu'une qualité résidentielle environnementale dégradée augmentait la prise de conscience des conséquences négatives de l'activité humaine, et notamment du transport sur la pollution de l'air, et incitait ainsi à un changement de mode vie pour lutter efficacement contre ces conséquences négatives. Mais l'expérience a également démontré qu'un cadre de vie agréable et permettant des interactions sociales constituait un levier efficace pour induire un changement vers un mode de vie plus durable, et notamment des choix de mode de transport plus respectueux de l'environnement.

Les résultats de la deuxième expérience ont montré que l'opposition sociale aux taxes environnementales ne résultait pas d'une incompréhension de leur fonctionnement, mais témoignaient d'une très grande hétérogénéité des participants. La perception de la légitimité des taxes reste un facteur d'acceptabilité, de même que l'aversion pour l'inégalité. Enfin, les résultats de la dernière étude ont révélé que l'exposition à une norme dynamique soustractive (à savoir « de moins en moins d'automobilistes se déplacent seuls, sans covoiturage de personne ou sans cotransportage de colis, pour des trajets de deux heures ») accentuait significativement le renoncement à l'autosolisme, par rapport au groupe contrôle mais aussi par rapport à une norme dynamique additive. Laisser entendre qu'une pratique est déjà adoptée favoriserait son adoption.



3 INTERACTIONS AIR-CLIMAT DANS LE SECTEUR DU BÂTIMENT

AMBRES

Approche multicritère
pour un bâtiment résilient et sain



CE QU'IL FAUT RETENIR

Le projet en bref

Le projet AMBRES a permis de développer un outil de simulation basé sur le croisement de trois modèles d'évaluation de la performance d'un bâtiment en matière, respectivement, de consommation énergétique, de circulation d'air et de qualité de l'air intérieur (QAI). Ce nouvel outil peut être utilisé en phase de conception, de rénovation et d'utilisation et il fonctionne sur trois échelles : bâtiment, environnement urbain et parc de logement français.

Résultats marquants

- Cette approche intégrée a mis en évidence le potentiel d'amélioration du confort thermique estival offert par la ventilation naturelle et l'« effet cheminée ».
- Grâce à cet outil, des compromis ont pu être trouvés pour réduire les consommations d'énergie des bâtiments tout en assurant le confort et la santé de leurs occupants.
- L'approche prospective poursuivie a permis d'évaluer la vulnérabilité des bâtiments actuels au changement climatique, en particulier celle du parc plus ancien (construit avant les années 1980).

CONTEXTE

À l'heure où le secteur de la construction connaît une profonde transformation portée par des préoccupations énergétiques et environnementales, les solutions de rénovation et de conception des bâtiments doivent pouvoir préserver la qualité de l'air intérieur (QAI) tout en garantissant le confort thermique, en particulier durant les vagues de chaleur. Ces périodes caniculaires de plus en plus fréquentes, intenses et longues en raison du changement climatique (CC) sont amplifiées par le contexte urbain et posent un défi majeur pour le confort des populations en ville.

En effet, l'environnement bâti autour du bâtiment peut contribuer à freiner localement les vents, à absorber plus de rayonnement solaire et à renvoyer l'énergie reçue, notamment sous la forme d'un rayonnement infrarouge contribuant à réchauffer localement l'atmosphère. À l'échelle d'une ville entière, ces interactions aboutissent donc à un climat urbain très spécifique. La qualité de l'air au sein des bâtiments est affectée par l'ensemble de ces paramètres. Cependant, les études sur les performances environnementales des bâtiments sont souvent conduites en considérant les bâtiments hors de leur environnement local. Il est donc crucial d'intégrer les problématiques urbaines et de CC aux modélisations du bâtiment.

OBJECTIFS

Le projet AMBRES avait pour objet le développement d'un système de modélisation multicritère capable d'orienter les choix de conception ou de rénovation de bâtiments en visant une réduction de leurs consommations énergétiques et de leurs émissions de gaz à effet de serre tout en assurant une QAI et un confort thermique satisfaisants.

Le projet a porté sur trois échelles : le bâtiment, l'environnement urbain et enfin l'ensemble du parc de logements français. Les interactions complexes entre les bâtiments et leur environnement urbain ont aussi été prises en compte.

MÉTHODOLOGIE

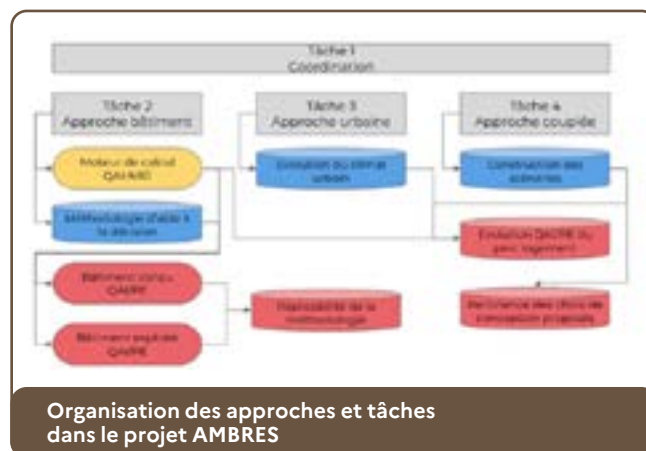
L'approche bâtiment a consisté à développer un outil d'évaluation de l'impact de différents choix de conception, de rénovation et d'exploitation sur les besoins en chauffage, le confort thermique estival et la QAI. Pour ce faire, le couplage d'un moteur de calcul de QAI (INCA-Indoor®, développé par Octopus Lab), d'un logiciel d'aérodynamique (CONTAM, développé par le National Institute of Standards and Technology des États-Unis, accessible gratuitement) et d'un logiciel de simulation

Les solutions de rénovation et de conception des bâtiments doivent pouvoir **préserver la qualité de l'air intérieur** tout en garantissant le confort thermique, en particulier durant les vagues de chaleur.

énergétique (EnergyPlus, développé par le département de l'énergie des États-Unis, gratuit et à code source ouvert), a été opéré. Ce couplage a permis de :

1. Harmoniser les paramètres d'entrée grâce à une saisie unique des paramètres de modélisation.
2. Prendre en compte les interactions entre différents phénomènes, tels que l'impact des températures sur les échanges d'air, affectant le transport des polluants entre l'intérieur et l'extérieur, ainsi que l'impact des températures sur la réactivité chimique en intérieur.
3. Enrichir la modélisation des bâtiments à l'aide d'outils multicritères facilitant la conception et l'exploitation des bâtiments.

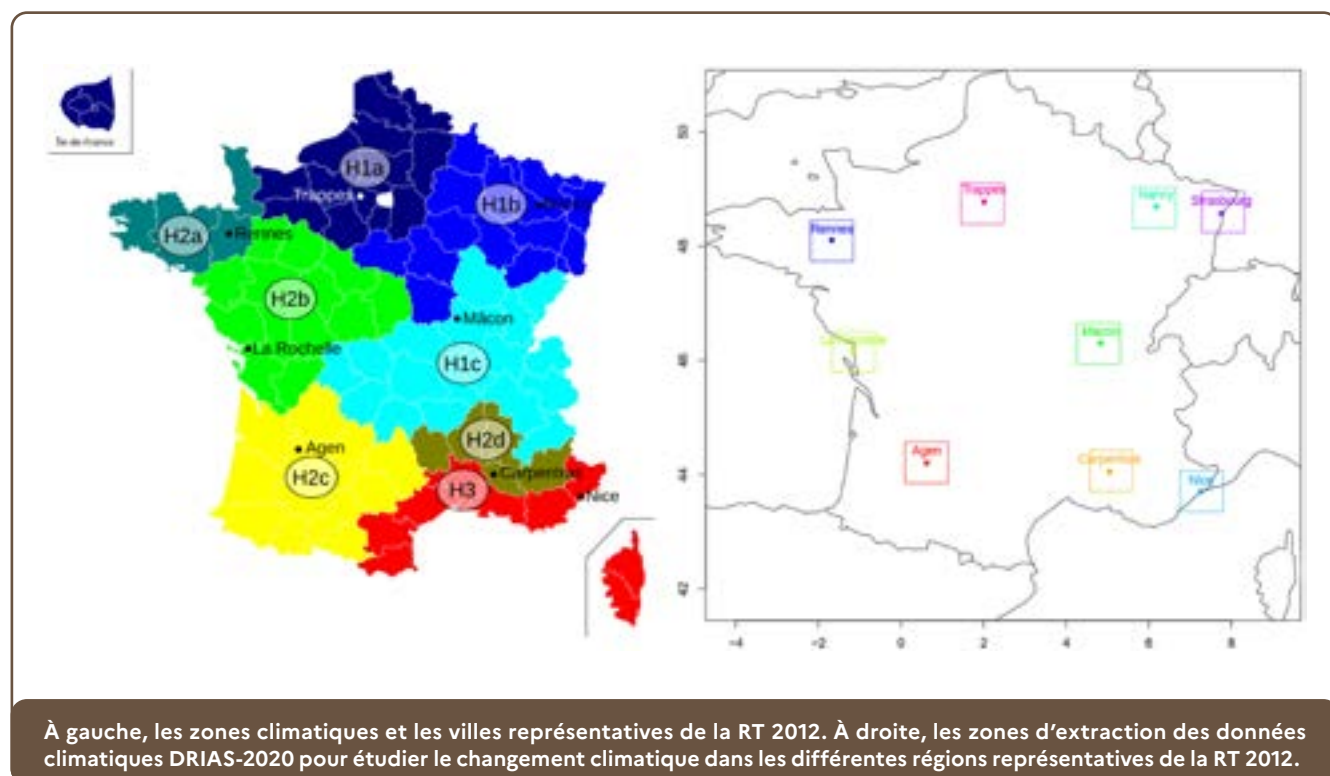
Le couplage de ces modèles a d'abord été appliqué à un bâtiment en phase de conception afin de permettre notamment

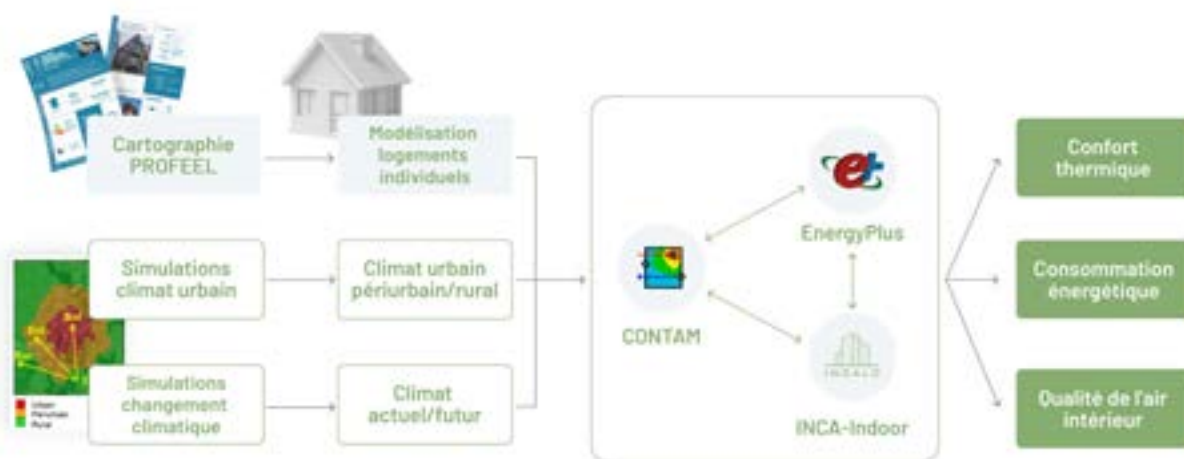


à des équipes d'aide à maîtrise d'ouvrage d'explorer les performances d'une centaine de scénarios de conception/rénovation sur plusieurs indicateurs : besoin en chauffage, inconfort thermique, indice santé.

Par la suite, il a été expérimenté sur un site en phase d'exploitation afin de piloter de manière optimale les systèmes CVC (Chauffage Ventilation Climatisation) en fonction des sollicitations extérieures (températures) et intérieures (occupation) constamment changeantes.

Cette approche bâtiment a été complétée par une approche urbaine : le climat urbain en 2050 à l'échelle de la ville de Strasbourg a été modélisé afin d'évaluer les effets urbains sur les conditions météorologiques sous l'effet du changement





La chaîne de modélisation développée dans AMBRES

climatique. Pour cela, une modélisation méso-échelle a été mise en place, permettant de modéliser les phénomènes atmosphériques sur plusieurs dizaines de kilomètres, en tenant compte ainsi du microclimat et de l'environnement plus large (zone rurale, périurbaine ou urbaine).

Enfin, ces deux approches ont été combinées afin d'étudier l'effet actuel et futur du climat urbain et du changement climatique à Strasbourg sur le parc de logement en matière de besoins énergétiques en chauffage, de confort thermique et de QAI. Pour cela, huit typologies de bâtiments représentatives du parc de logement individuel français en termes de nombre et de techniques constructives ont été sélectionnées et modélisées, à partir des données du programme Profeel (destiné à identifier les opportunités de rénovation énergétique).

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Bâtiment

Le couplage des modèles de qualité de l'air intérieur, d'aéraulique et de simulation thermique dynamique (STD) a mis en évidence l'effet de la température sur les circulations d'air et a permis de simuler l'effet cheminée. Ce phénomène généré par les différences de températures et de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment favorise la ventilation naturelle et représente un levier essentiel de rafraîchissement en période estivale.

Il a permis d'explorer les performances d'une centaine de scénarios de conception/rénovation sur plusieurs indicateurs. Cette méthodologie a montré qu'un compromis pouvait être trouvé pour améliorer la QAI et le confort thermique tout en minimisant les consommations énergétiques.

Appliquée sur un bâtiment instrumenté, une telle solution n'aurait pas pu être obtenue avec un logiciel de STD ne se focalisant que sur les aspects énergétiques, ni avec un logiciel de QAI. En phase d'exploitation, l'association des trois modèles optimise

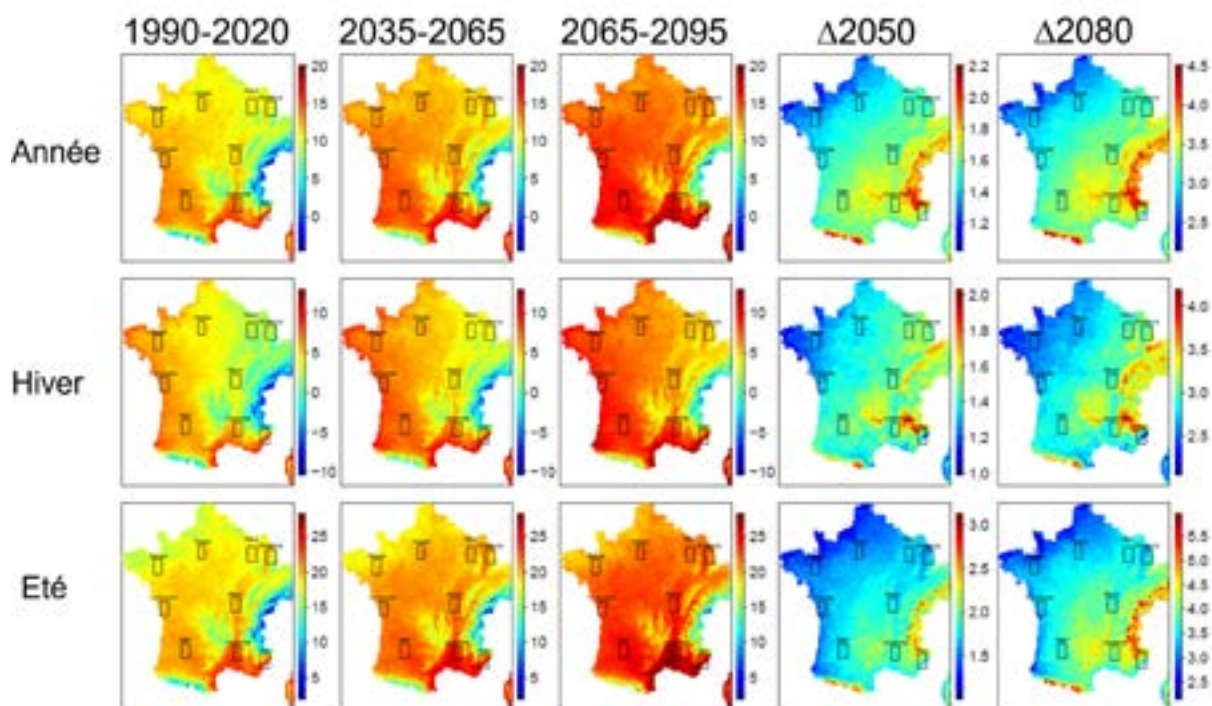
le pilotage du chauffage et de la ventilation afin de conserver une bonne qualité de l'air intérieur et un bon confort thermique associés à une baisse des consommations énergétiques de l'ordre de 50 %.

Environnement urbain

Une modélisation méso-échelle a été proposée pour mieux considérer les effets de l'environnement urbain sur un bâtiment dans un contexte de changement climatique : températures de l'air plus élevées, vent plus faible et air plus sec. L'ensemble des résultats montre l'intérêt de considérer l'environnement du bâtiment étudié, i.e. les conditions météorologiques de son quartier et la position de ce quartier dans un espace potentiellement urbanisé. Le travail montre que des approches 1D ne considérant que l'environnement très local du quartier ne peuvent apporter qu'une solution partielle.

La combinaison des effets du climat urbain, du changement climatique et d'une situation de canicule peut aboutir à une hausse de la température de l'air extérieur comprise 8 et 11 °C.

L'association des trois modèles (consommation énergétique, circulation d'air et qualité de l'air intérieur) optimise le pilotage du chauffage et de la ventilation afin de conserver une bonne qualité de l'air intérieur et un bon confort thermique associés à une baisse des consommations énergétiques de l'ordre de 50 %.



Cartes d'évolution de la température moyenne de l'air à 2 m (°C).

Parc de logements français

Les performances environnementales de huit types de bâtiments (maisons périurbaines et pavillons individuels représentatifs de l'évolution des modes constructifs) ont été étudiées dans divers types d'environnement – urbain, périurbain et rural. Les résultats montrent que l'environnement proche du bâtiment peut fortement impacter son comportement thermique. En milieu urbain plus chaud, la vitesse du vent est sensiblement réduite, ce qui diminue le taux de renouvellement d'air dans les bâtiments non équipés de VMC et peu étanches : cet effet renforce la hausse des températures en intérieur. Le changement climatique affecte aussi de manière plus intense encore ces bâtiments moins bien isolés et peu étanches : les résultats ont montré que les bâtiments

les plus vulnérables aux évolutions en matière de température et de vent sont ceux construits en centre-ville avant les premières réglementations thermiques, soit 66 % du parc.

La rénovation de ces bâtiments doit s'accompagner d'une ventilation nocturne naturelle et/ou mécanique pour éviter leur surchauffe dans un climat futur. Dans les bâtiments rénovés, le comportement de l'occupant (ouverture des fenêtres la nuit et utilisation des volets roulants en journée) reste primordial pour assurer le confort thermique en été. Une attention particulière doit être portée à l'isolation avec le sol, laquelle permet de diminuer les besoins en chauffage, mais dégrade le confort thermique en été.



BARIAIR

Protection des bâtiments contre les intrusions de vapeurs issues du sol pour préserver la qualité de l'air intérieur



CE QU'IL FAUT RETENIR

Le projet en bref

Le projet BARIAIR a exploré l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air intérieur de bâtiments construits sur des sols présentant des polluants volatils résiduels. Il s'est attaché à une mesure constructive couramment utilisée, couplant étanchéité par géomembrane et dépressurisation active des sols sous dallage (SDS). Le projet a exploré les évolutions des impacts des pollutions résiduelles des sols sur la qualité de l'air intérieur dans les conditions climatiques futures, et proposé des recommandations pour le dimensionnement des dispositifs constructifs visant à limiter les intrusions de vapeurs issues des sols.

Résultats marquants

- Les résultats ont montré une augmentation des concentrations de polluants dans l'air intérieur sous des conditions climatiques futures, notamment pour des polluants comme le benzène, le tétrachloroéthylène (PCE) et le trichloroéthylène (TCE).
- Un outil de dimensionnement des SDS a été développé et validé, mettant en évidence l'importance de la perméabilité des sols et des pertes de charge dans le réseau de drainage. La connaissance de la pollution résiduelle dans les terrains est également essentielle pour évaluer la qualité du rejet dans l'air atmosphérique et son besoin de traitement.
- Le projet a élaboré un « Guide méthodologique pour la conception et la mise en œuvre d'un système couplé géomembrane et SDS actif ».

CONTEXTE

La qualité de l'air intérieur est reconnue aujourd'hui comme un enjeu mondial de santé publique. Les pollutions volatiles résiduelles des sols sur lesquels les bâtiments sont construits peuvent en représenter une source de dégradation. Au regard de la dynamique forte de reconversion des terrains et de la préoccupation sociétale sur la qualité de l'air et le changement climatique, des mesures constructives doivent être mises en œuvre pour limiter les impacts de pollutions résiduelles des sols sur la qualité de l'air intérieur.

OBJECTIFS

Le projet BARIAIR s'est intéressé à l'efficacité de dispositifs permettant de limiter les impacts sur la qualité de l'air intérieur de pollutions volatiles résiduelles présents dans les sols. Il a étudié une mesure constructive couplant une étanchéité par

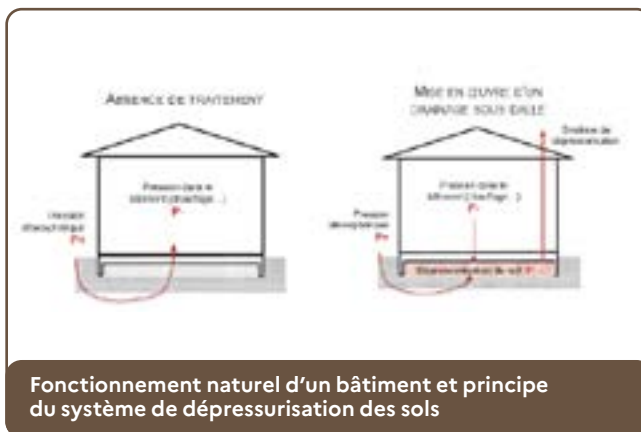
géomembrane et un système de dépressurisation actif des sols sous dallage (SDS). L'objectif principal du projet était de développer un outil de dimensionnement de ces systèmes et de formuler des recommandations pour sa conception, mise en œuvre et réception en tenant compte, le cas échéant de l'incidence du changement climatique.

MÉTHODOLOGIE

Le projet BARIAIR a étudié les impacts du changement climatique sur les transferts de composés organiques volatils (en particulier le benzène, le tétrachloroéthylène et le trichloroéthylène) du sol vers l'air intérieur, en utilisant des outils de modélisation prenant en compte les écoulements dans les milieux poreux et l'aérodynamique du bâtiment.

Les conditions climatiques actuelles et futures ont été modélisées à l'échelle journalière sur une année entière. La base de

Les outils couplés utilisés ont permis de modéliser : les transferts thermiques et l'infiltration d'eau dans les sols ; les modifications des propriétés physico-chimiques liées à la température ; le transport des polluants du sol vers l'air intérieur couplé à la modélisation thermoaéraulique du bâtiment.

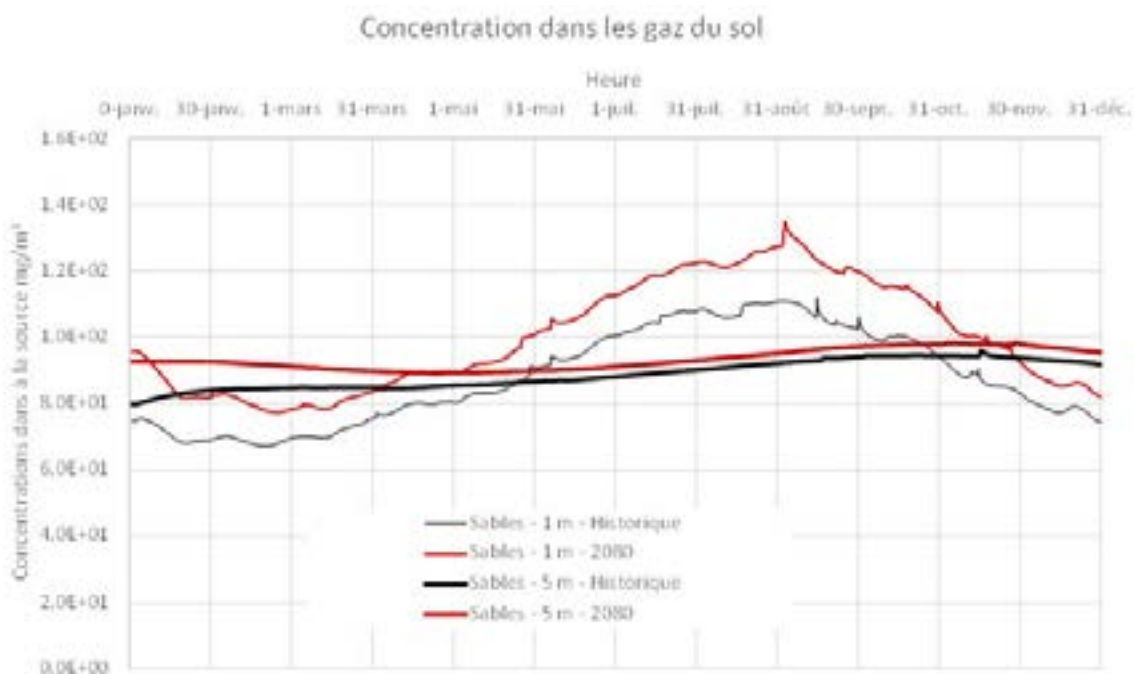


données METEONORM a été utilisée en retenant la projection du scénario RCP 8,5 en 2080. RCP 8,5 est le scénario d'émission de gaz à effet de serre le plus pessimiste du GIEC et correspond à la poursuite des émissions au niveau actuel. Le projet a également mené des expérimentations à grande échelle, avec la mise en place d'une plateforme d'essais sur un site pollué par des solvants chlorés pour tester un système de

dépressurisation actif des sols sous dallage (SDS) couplé à une géomembrane. Enfin, des travaux de modélisation ont permis d'améliorer la compréhension du fonctionnement global d'un SDS et des écoulements d'air, et de développer un outil de dimensionnement des SDS simple d'utilisation.



Mise en place de la plateforme expérimentale.



Impact du changement climatique sur les concentrations journalières en benzène dans les gaz du sol pour une source à 1 ou 5 mètres de profondeur et les conditions climatiques historique ou la projection RCP.8.5 de 2080.



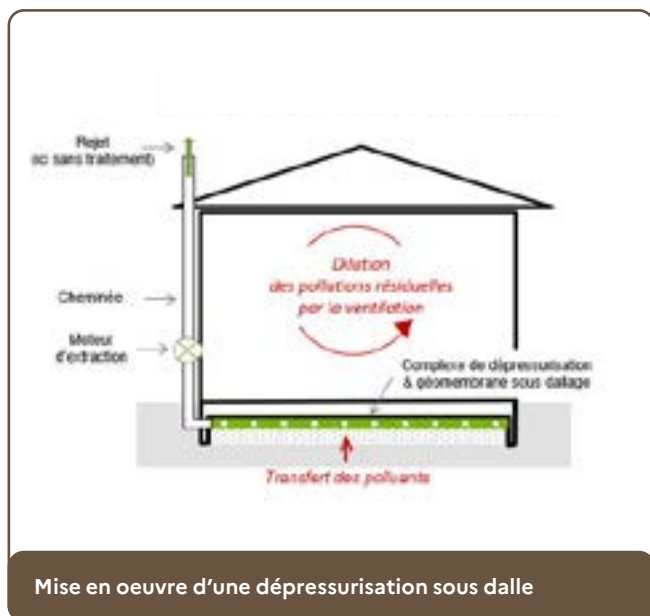
PRINCIPAUX RÉSULTATS

En considérant la projection RCP 8,5 en 2080, l'une des projections les plus pessimistes de la base de données METEONORM, pour la zone climatique méditerranéenne :

- Les concentrations dans les gaz du sol pourraient augmenter en moyenne annuelle de 12 à 23 % pour une pollution située à 1 mètre de profondeur. Cet impact est variable en fonction des terrains (conductivité thermique des sables supérieure à celles de terrains plus limoneux) et des polluants en lien avec l'incidence de la température sur les caractéristiques physico-chimiques (impact sur le tétrachloroéthylène > au trichloroéthylène > au benzène).
- Les concentrations dans l'air intérieur pourraient augmenter en moyenne annuelle de 15 à 58 % pour une pollution située à 1 mètre

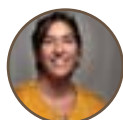
Le projet BARIAIR s'inscrit dans un besoin grandissant de confiance dans l'efficacité de dispositifs permettant de limiter les impacts de pollutions volatiles résiduelles dans les sols sur la qualité de l'air intérieur, au regard de la dynamique forte de reconversion des terrains, de la préoccupation sociétale sur la qualité de l'air et des impacts potentiels du changement climatique.

de profondeur. Les différences d'impact sont liées aux caractéristiques lithologiques des terrains, à la physico-chimie des polluants et aux systèmes de ventilation des bâtiments. L'incidence du changement climatique est plus marquée pour une ventilation mécanique double flux équilibrée par rapport à une ventilation de type simple flux par extraction. Notons cependant que la ventilation double flux conduit à une concentration en polluant inférieure à celle associée à une VMC simple flux par extraction.



Vis-à-vis du système de dépressurisation des sols, les points clés à retenir concernent i) les pertes d'intégrité de la géomembrane sur des sites présentant des aléas liés au retrait gonflement des argiles et ii) l'augmentation des concentrations en rejet liée à la volatilité accrue des polluants.

L'outil de conception de SDS actif est simple d'utilisation et permet, à partir d'une géométrie donnée (système de drains et collecteurs, taille du bâtiment, caractéristiques des sols...), de calculer les caractéristiques de fonctionnement de l'extracteur (débit, pression) intégrant l'équilibrage du réseau et une dépression suffisante pour garantir l'efficacité du système.



BATENQUE

Bâtiments, énergie,
climat, qualité de l'air
et exposition en 2050



CE QU'IL FAUT RETENIR

Le projet en bref

Le projet BATENQUE est une étude interdisciplinaire du système climat, bâtiments, énergie et qualité de l'air. L'évolution de la qualité de l'air extérieur et intérieur et de l'exposition de la population en Île-de-France à horizon 2050 a été simulée sous l'influence du changement climatique et de la transition du parc de logements. Deux trajectoires de neutralité carbone en 2050, issues des scénarios « Transition(s) 2050 » de l'ADEME, ont été développées pour quantifier l'impact du parc de logements de la région Île-de-France sur la qualité de l'air et l'exposition de la population (en faisant abstraction de l'évolution des autres secteurs : transport, industrie...). Chaque version du parc a été caractérisée par des bâtiments plus ou moins performants, des systèmes énergétiques et de ventilation différents et des comportements qui évoluent à des degrés variés.

Résultats marquants

- Dans le scénario « Tendanciel », la forte utilisation de la biomasse est associée à d'importantes émissions de composés organiques volatils et de particules dans l'atmosphère. L'exposition médiane aux particules fines (PM_{2,5}) de la population francilienne augmente de 12 % selon ce scénario par rapport à l'année de référence 2020.
- Les logements dotés d'un système VMC à débit constant (double flux ou autoréglable) évacuent plus efficacement les polluants accumulés dans les bâtiments pendant les heures de pointe.
- La projection du scénario « Sobriété » sur le parc montre en revanche une réduction significative de l'exposition aux PM_{2,5} et au NO₂ en 2050 grâce à une rénovation des bâtiments ambitieuse permettant de diminuer efficacement les consommations énergétiques.

CONTEXTE

Le secteur des bâtiments est responsable d'environ 40 % de la consommation énergétique et de 36 % des émissions des gaz à effet de serre (GES) en Europe. Les pays membres de l'Union européenne se sont engagés à une réduction de 55 % des émissions des GES d'ici à 2030 dans l'objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Pour cela, ils ont adopté des directives qui imposent des critères de performance aux bâtiments afin de réduire leurs émissions des GES. Si différentes études ont montré des co-bénéfices des politiques de neutralité carbone pour la qualité de l'air, ces mêmes études soulignent que ces co-bénéfices sont moins clairs pour le secteur du bâtiment, et que ces politiques peuvent même être antagonistes. Par exemple, l'utilisation de biomasse renouvelable pour le chauffage est une source d'émission importante de polluants atmosphériques. De la même manière, le renforcement de l'étanchéité des logements peut, en l'absence de ventilation efficace, dégrader la qualité de l'air intérieur.

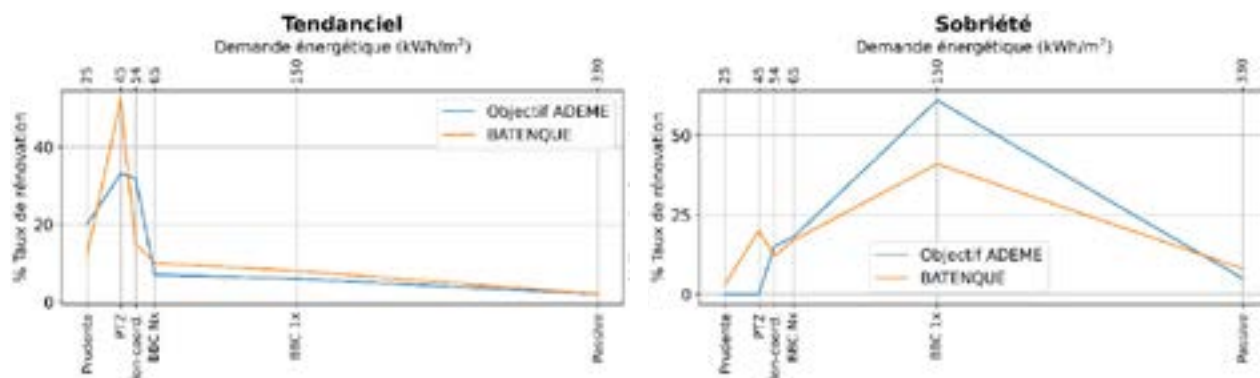
OBJECTIFS

Le projet BATENQUE a évalué comment le changement climatique et la transition du parc de logements francilien (consommation énergétique, isolation, ventilation...) pourraient affecter la qualité de l'air extérieur et intérieur et l'exposition de la population en Île-de-France à horizon 2050.

MÉTHODOLOGIE

Le projet BATENQUE a simulé l'évolution du climat au moyen du modèle informatique WRF (Weather Research and Forecasting), avec une résolution horizontale de 12 km sur l'Europe. Les périodes 2000-2009 ont été utilisées pour représenter le climat « actuel », et 2045-2054 pour représenter le climat 2050.

Les projections neutralité carbone en 2050 du parc de logements de la région Île-de-France ont été modélisées à partir



Comparaison de l'objectif de rénovation selon différents gestes tel qu'il est défini par l'ADEME avec le taux de rénovation atteint dans les deux projections du parc BATENQUE (haut de la figure).

Le projet BATENQUE vise à quantifier l'impact du secteur du bâtiment sur la qualité de l'air et l'exposition de la population. Pour cela il est considéré que les autres secteurs (transport, industrie, etc.) n'évoluent pas à l'horizon 2050.



des trajectoires « Tendanciel » et « Sobriété » des scénarios prospectifs « Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat » de l'ADEME.

Chaque parc de logements comprend un ensemble de bâtiments et de logements dotés de caractéristiques diverses comme les systèmes de chauffage et de ventilation, ou encore la perméabilité à l'air.

La consommation énergétique a été calculée avec le modèle COMETH et la qualité de l'air intérieur simulée avec le modèle MATHIS-QAI du CSTB.

La consommation énergétique a été traduite en flux d'émissions pour différents polluants atmosphériques, gaz et particules, avec des facteurs d'émissions fournis par le CITEPA.

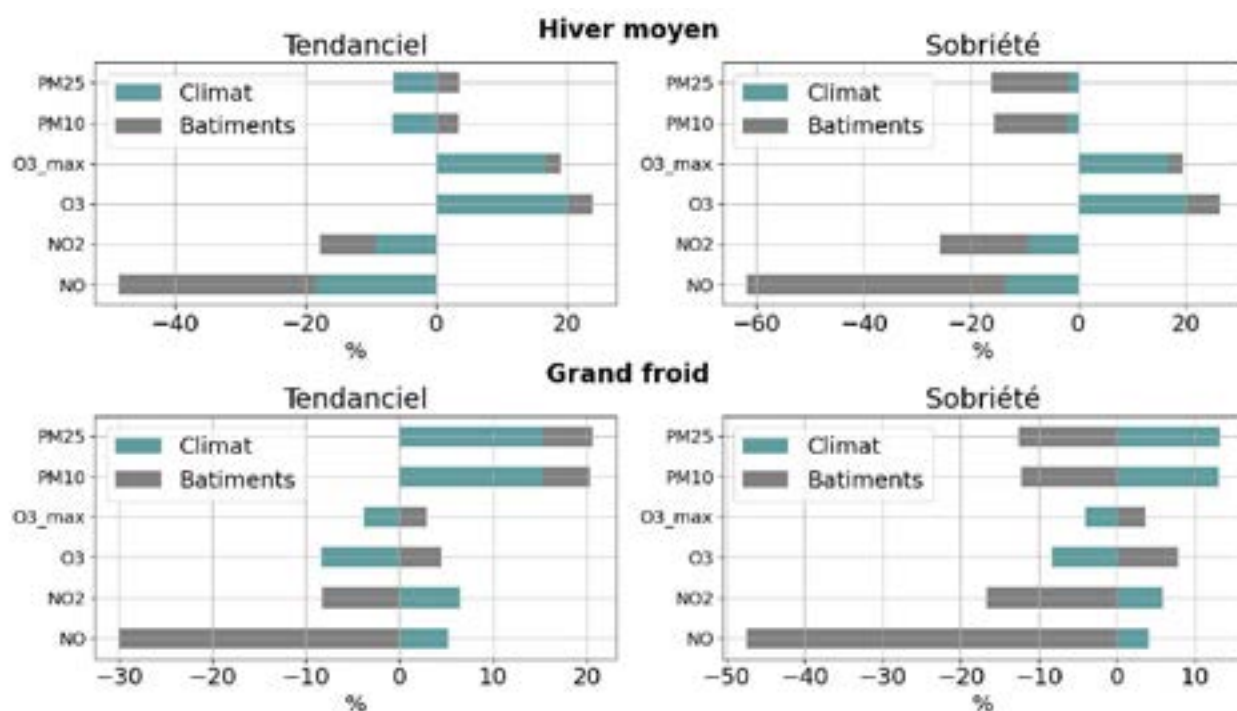
La concentration des différents polluants dans l'air extérieur a quant à elle été simulée avec le modèle de chimie-transport

CHIMERE, sur une grille de 1 x 1 km² couvrant la région parisienne. Enfin, l'exposition de la population à ces polluants a été estimée avec le modèle EXPLUME du LMD pour les trois scénarios (Référence, Tendanciel, Sobriété) du parc de logements.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Consommation énergétique

Les contributions relatives du climat et de la transition du parc de logements ont été quantifiées. La consommation totale d'énergie (tous vecteurs confondus) du parc francilien en 2050 diminue d'environ 40 % dans le scénario « Tendanciel » et de 75 % dans le scénario « Sobriété ». Cependant, le scénario « Tendanciel » aboutit à une augmentation de 40 % de l'utilisation

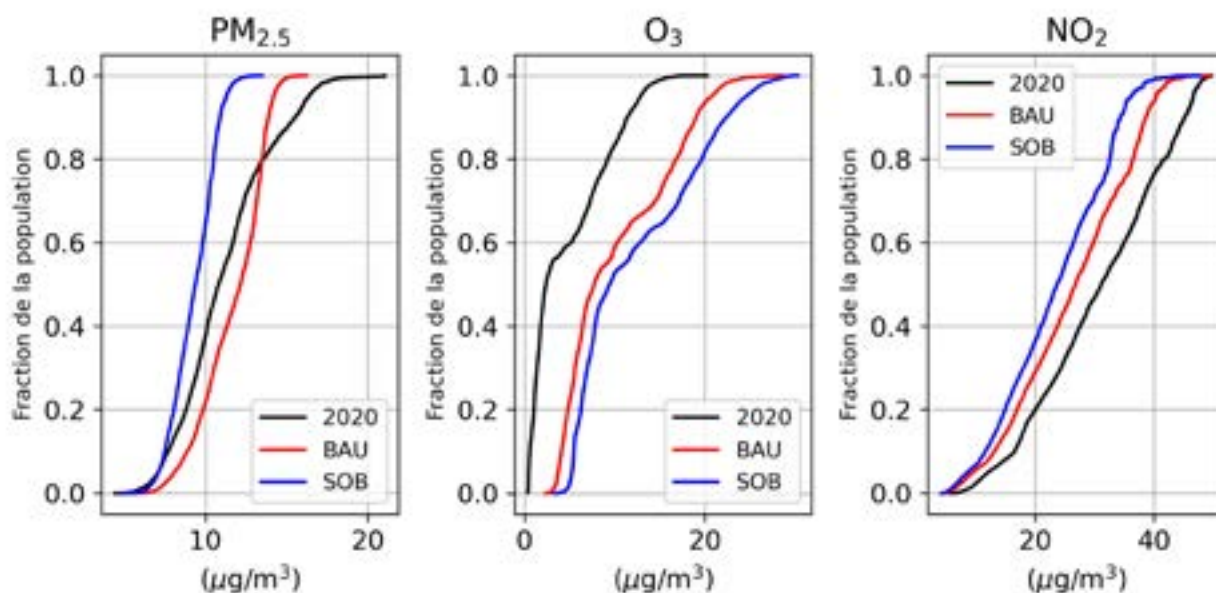


du bois pour le chauffage et de 15 % de la consommation d'électricité. Globalement la contribution du climat reste faible par rapport à la transition du parc (sauf pour les périodes caniculaires).

Émissions des polluants atmosphériques

Sous la seule influence du climat, les émissions de tous les types de polluants diminuent. La diminution est plus marquée en période estivale, hors canicule (-30 %) qu'en hiver (-10 %). La transition du parc a un impact différent selon les polluants. Ainsi, malgré la diminution liée au climat, le scénario « Tendanciel » est associé à une hausse importante des émissions des composés organiques volatiles (+20 %) et des particules en suspension de diamètre inférieur à 2,5 µm (PM2,5) (+10 %) en période d'hiver moyen (+30 et +20 % pour les périodes de grand froid). Cela est dû à l'utilisation intense de la biomasse (bois) dans ce scénario, notamment associée à la construction neuve. La réduction importante des émissions des oxydes d'azote est quant à elle en grande partie liée à la diminution de l'utilisation du gaz. Pour le scénario « Sobriété », les émissions de ces trois polluants (COV, PM2,5 et NO₂) diminuent fortement.

Le projet BATENQUE a produit une cartographie de l'exposition de la population de la région parisienne aux polluants réglementés (NO₂, O₃ et PM2,5) pour différents scénarios de transition neutralité carbone du parc de logements et en prenant en compte l'évolution du climat à horizon 2050. Il est montré que si l'évolution du climat a un impact positif en hiver sur l'exposition aux PM2,5 et au NO₂, la « sobriété » est nécessaire pour que ces effets ne soient pas contrebalancés par les émissions associées à la transition « tendancielle ».



Qualité de l'air extérieur

La contribution du climat et de la consommation énergétique sur la concentration des trois polluants, dioxyde d'azote (NO₂), ozone (O₃) et particules fines (PM_{2,5}), a été quantifiée. Pendant les périodes d'hiver moyen, la concentration de NO₂ et des PM_{2,5} diminue avec le réchauffement climatique en 2050, en raison de la réduction de la consommation d'énergie pour le chauffage. Au contraire, la concentration d'ozone progresse de 20 % par rapport à sa concentration en 2020. Cette augmentation est liée à la fois à des températures et à des taux d'ensoleillement plus importants en hiver par rapport à 2020. À l'inverse, pour les périodes de grand-froid en 2050, les concentrations de NO₂ et des PM_{2,5} grimpent respectivement de 8,1 % et 15,1 %.

Si l'on regarde l'influence de la transition du parc de logements, en période d'hiver moyen, les concentrations de tous les polluants (sauf l'ozone) reculent pour les deux scénarios. En période de grand-froid, les concentrations des PM_{2,5}, de NO et NO₂ augmentent sous l'influence de la transition du parc. Cela est dû à la forte sollicitation du chauffage combinée à des situations anticycloniques accentuées en 2050, et notamment à un vent bien plus faible.

Qualité de l'air intérieur et exposition

Le type de ventilation a un effet direct sur l'exposition des populations aux PM_{2,5} et à l'ozone : ainsi, cette dernière exposition peut être jusqu'à 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ plus élevée dans un logement avec une VMC flux autoréglable que dans un logement sans système de ventilation. Les logements avec une VMC évacuent par ailleurs plus efficacement le NO₂ vers l'extérieur : l'exposition médiane au NO₂ dans ces logements est 20 % plus faible que dans les logements sans système de ventilation.

L'exposition aux PM_{2,5} et au NO₂ en 2050 selon la projection « Sobriété » du parc (SOB) est réduite de 13 % et 24 % respectivement sur les valeurs médianes par rapport à l'exposition en 2020. Au contraire, la projection « Tendanciel » du parc mène à une augmentation de l'exposition aux PM_{2,5} de 12 % sur la valeur médiane, reflétant l'impact du chauffage au bois. L'exposition médiane au NO₂ diminue de 14 % selon le scénario « Tendanciel ». Les deux scénarios sont associés à une augmentation importante de l'exposition à l'ozone : +5 et +7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le parc « Tendanciel » et « Sobriété » respectivement.



PRÉSENTATION DE PRIMEQUAL



UN PROGRAMME PLURIDISCIPLINAIRE DÉDIÉ À L'AIR

Lancé en 1995, PRIMEQUAL, programme de recherche inter-organismes pour une meilleure qualité de l'air, a été mis en œuvre par le Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche et par l'Agence de la transition écologique (ADEME).

Il visait à fournir les bases scientifiques et les outils nécessaires aux décideurs et aux gestionnaires de territoires et d'espaces de vie pour définir, mettre en œuvre et évaluer des solutions d'amélioration de la qualité de l'air intérieur et extérieur, afin de réduire les risques pour la santé et l'environnement.

PRIMEQUAL présentait la particularité de fédérer plusieurs disciplines scientifiques concernées par la pollution de l'air et ses impacts : sciences physiques (météorologie, chimie, météorologie, ...), sciences de la vie (biologie, épidémiologie, écologie, ...), mathématiques (modélisation, statistiques) et sciences humaines (économie, sociologie, psychologie ...). Il a contribué ainsi à mobiliser et animer les communautés scientifiques sur des problématiques sociétales à forts enjeux sanitaires, environnementaux et économiques.

DES APPELS À PROPOSITIONS DE RECHERCHE THÉMATIQUES

Après trois appels à propositions de recherche (APR) généralistes, le Ministère et l'ADEME ont lancé à partir de 2002 des APR ciblés sur des problématiques spécifiques, à l'image des plus récents :

- « Contribution à l'évaluation des expérimentations de zones d'action prioritaires pour l'air - ZAPA » en 2011 (3 projets ; restitution des résultats en 2016)
- « Environnements intérieurs et approches innovantes : nouveaux bâtiments et matériaux, polluants émergents et expositions multiples » en 2011 (8 projets ; restitution des résultats en 2016)
- « Contribution à l'évaluation de l'opération pilote visant à réduire les émissions de particules fines du chauffage au bois individuel dans la zone du PPA de la vallée de l'Arve » en 2013 (2 projets ; restitution en 2018)
- « Agriculture et qualité de l'air : Evaluation, impacts, gestion et décision » en 2016 (10 projets ; restitution en 2022)
- « Villes et qualité de l'air : gouvernance et approches intégrées des dynamiques urbaines en faveur de la qualité de l'air » en 2018 (6 projets ; restitution en 2023) ;
- « Qualité de l'air, changement climatique, énergie : vers des approches intégrées aux plans scientifique, technologique, politique, économique, sanitaire, environnemental et social » en 2020 (9 projets ; restitution en 2025)

UNE GOUVERNANCE POUR VEILLER À LA PERTINENCE ET À LA QUALITÉ DES CHOIX

Le programme PRIMEQUAL était doté d'un Comité d'orientation (CO) présidé par le Chef du Service de la Recherche et de l'Innovation au Ministère en charge de l'environnement, et d'un Conseil scientifique (CS) présidé par un-e scientifique reconnu-e dans le domaine du programme :

- Le CO était composé de représentants des parties prenantes intéressées par le programme : ministères, agences et organismes, associations, milieux professionnels. Il était une interface entre le monde de la recherche, les gestionnaires, les décideurs politiques et administratifs et le monde associatif. Il permettait également de veiller à l'articulation et à la complémentarité avec d'autres programmes de recherche.
- Le CS était le garant de l'excellence scientifique du programme. Il était composé de personnes désignées intuitu personae, choisies pour leurs compétences scientifiques représentant la palette des disciplines du programme.

UNE PRIORITÉ DONNÉE À LA DIFFUSION DES ACQUIS VERS LES UTILISATEURS

Durant trente ans, le Ministère en charge de l'environnement et l'ADEME ont eu à cœur de rendre accessibles et compréhensibles les résultats produits par les projets PRIMEQUAL :

- Dix-sept colloques ont fait se rencontrer chercheurs et utilisateurs des recherches (décideurs, monde professionnel et représentants de la société civile), et ont donné lieu à la publication de recueils de résumés et de plaquettes de synthèse pour faciliter ce transfert de résultats vers les utilisateurs.
- Dès 2007 un site web dédié (<http://www.primequal.fr>) donnait accès aux rapports et synthèses des projets, ainsi qu'aux différents documents de valorisation publiés (actes de colloque, plaquettes de synthèse, ouvrages thématiques). En 2025 il rejoindra le site <https://recherche.ademe.fr/index.php/thematiques/air>

Responsables du programme :

ADEME : **Nathalie POISSON**
nathalie.poisson@ademe.fr

Ministère de la Transition écologique : **Thibault PREVOST**
thibault.prevost@developpement-durable.gouv.fr

PRIMEQUAL c'est :

Près de
300
ACTIONS DE RECHERCHE
SOUTENUES

Un montant total
d'aide de
26
MILLIONS D'EUROS



Depuis 2020 le programme **AQACIA** (Amélioration de la Qualité de l'Air : Comprendre, Innover, Agir), mis en œuvre par l'ADEME, **rassemble l'ensemble des soutiens sur les problématiques de qualité de l'air intérieur et extérieur** jusque-là apportés par les programmes PRIMEQUAL, CORTEA, AACT'Air-volet R&D et Impacts-volet Air.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME – l'Agence de la transition écologique – nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines – énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, déchets, sols... – , nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère en charge de l'environnement, du ministère en charge de l'énergie et du ministère en charge de la recherche.

www.ademe.fr

 @ademe

Les collections de l'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur :

Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert :

Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent :

Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en oeuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir :

Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

QUALITE DE L'AIR, CLIMAT ET ENERGIE: nouvelles connaissances pour des approches intégrées

Les sujets qualité de l'air et changement climatique recouvrent certaines sources ou processus communs. Ils impliquent tous deux d'agir au sein de divers secteurs (transports, agriculture, résidentiel-tertiaire, urbanisme ...) afin d'en diminuer les consommations énergétiques, de développer des énergies alternatives, de modifier nos pratiques, nos lieux de vie et notre organisation urbaine. Il est donc essentiel d'adopter des approches concertées pour éviter les effets contre-productifs sur l'un ou l'autre des enjeux.

Les évolutions climatiques auront par ailleurs un impact direct sur la qualité de l'air, en extérieur ou même à l'intérieur des bâtiments, et donc sur notre santé, qu'il faut connaître et anticiper.

Afin d'apporter un éclairage scientifique sur les articulations entre ces enjeux, l'ADEME a lancé en 2019 un appel à projets de recherche, dans le cadre du programme PRIMEQUAL (programme de recherche inter-organisme pour une meilleure qualité de l'air) co-piloté avec le Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche.

Le présent recueil rassemble les résumés des neuf projets lauréats de cet appel à projets. Organisé sous la forme de fiches illustrées, il a vocation à rendre accessibles les principaux résultats de ces projets à un public non scientifique, et à favoriser leur appropriation par les acteurs concernés par la pollution de l'air et le changement climatique.

Contact

Nathalie Poisson
ADEME/SEQA
primequal@ademe.fr

012869

