

## Stratégies climatiques et de qualité de l'air

Oct.  
2024

ACRA (APR PRIMEQUAL) :  
Co-bénéfices et risques des  
stratégies d'atténuation et  
d'amélioration

Qualité de l'air et changement climatique sont fortement liés, autant au niveau des stratégies d'atténuation qu'au plan de l'adaptation. En termes d'atténuation, les politiques climatiques impliquent des mesures d'efficacité énergétique, des changements structurels, et d'autres mesures technologiques qui permettent aussi de réduire les émissions de polluants.

Le projet ACRA, coordonné par l'INERIS, explore ces co-bénéfices par des approches de modélisation et d'économétrie. Cela passe par l'imbrication de modèles de prospective énergétique (POLES, développé au GAEL), d'inventaire d'émission de polluants (CITEPA), d'impact sur la qualité de l'air puis sur la santé (CHIMERE, Air Control Toolbox et Alpha-RiskPoll, à l'INERIS) et de représentation des préférences déclarées des citoyens (LEMNA). Ces développements se situent dans le contexte de la recherche-action, en ce sens qu'ils permettent d'éclairer les scénarios de neutralité carbone.

Les résultats ont mis en évidence le fait que les consentements à payer étaient assez peu différenciés entre changement climatique et qualité de l'air, et surtout que le renforcement de la sensibilité par rapport à l'un ou l'autre de ces enjeux était mutuellement bénéfique pour l'adhésion des ménages aux politiques environnementales.

D'après les scénarios prospectifs de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC3) publiée fin 2024, les concentrations de PM<sub>2.5</sub> et NO<sub>2</sub> devraient baisser très notablement à l'avenir. La population exposée au-dessus du nouveau seuil européen de 10µg/m<sup>3</sup> pour les PM<sub>2.5</sub> devrait passer de 33 à 1 million d'habitant dès 2030. Mais seul le scénario de neutralité carbone permettrait d'approcher le seuil de 5µg/m<sup>3</sup> recommandé par l'Organisation Mondiale de la Santé. Néanmoins, ces améliorations ne permettent pas de compenser totalement l'augmentation de l'incidence de la mortalité avec le vieillissement de la population.

Avec le modèle POLES il a été possible de reproduire des scénarios de neutralité carbone analogues à ceux de la SNBC, tout en incluant diverses déclinaisons des stratégies climat et qualité de l'air, et en chiffrant les coûts associés. L'atténuation du changement climatique est toujours bénéfique pour la réduction des émissions de polluants. Si les politiques de lutte contre la pollution sont plus impactantes à l'horizon 2030, c'est la neutralité carbone qui permet de poursuivre cette trajectoire entre 2030 et 2050.

A l'horizon 2050, le scénario de neutralité carbone permet a minima de réduire les dommages sanitaires de 4 mrd €2015 (fourchette basse, c'est-à-dire avec un indicateur minorant). Il faut aussi tenir compte des 2,5 mrd€2015 de réduction des coûts de mesures d'amélioration de la qualité de l'air pour conclure que les cobénéfices de 6,5 mrd €2015 compensent de l'ordre de 60 % des coûts de la neutralité carbone.

## Contexte

---

Qualité de l'air et changement climatique sont fortement liés, autant au niveau des stratégies d'atténuation qu'au plan de l'adaptation. En termes d'atténuation, les politiques climatiques impliquent des mesures d'efficacité énergétique, des changements structurels, et d'autres mesures technologiques qui permettent aussi de réduire les émissions de polluants. Sur le plan de l'adaptation, la chimie atmosphérique est sensible aux changements climatiques, qui se traduisent aussi en termes de fréquence et de sévérité de phénomènes météorologiques et donc influent sur la formation d'épisodes de pollution (par exemple les vagues de chaleurs et la pollution à l'ozone associée). Par ailleurs, la pollution atmosphérique est un risque directement perceptible par le public, et elle peut avoir des répercussions sur l'acceptabilité à court terme des mesures prises au titre de l'atténuation du changement climatique dont les effets ne seront perceptibles qu'à beaucoup plus long terme.

La synergie entre politiques d'atténuation du changement climatique et qualité de l'air a été soulignée dans le Résumé à l'Intention des Décideurs<sup>1</sup> du 6<sup>e</sup> Rapport d'Évaluation du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat, pour ce qui concerne les leviers mutuels et en particulier à court terme, y compris en termes économiques dans les termes suivants :

- *« Deep, rapid, and sustained mitigation and accelerated implementation of adaptation actions in this decade would reduce projected losses and damages for humans and ecosystems (very high confidence), and deliver many co-benefits, especially for air quality and health (high confidence). »*
- *The economic benefits for human health from air quality improvement arising from mitigation action can be of the same order of magnitude as mitigation costs, and potentially even larger (medium confidence). »*

## Positionnement du projet et développement de méthodes

---

Nous partons ici du constat que les co-bénéfices des politiques climatiques en termes de qualité de l'air (et donc de santé) ne sont pas suffisamment pris en compte dans l'élaboration et l'évaluation de ces politiques en France. Le projet ACRA objective ces risques et co-bénéfices par des approches de modélisation et d'économétrie appliquées aux risques. Il a permis en particulier de mieux imbriquer les modèles de prospective énergétique (POLES, développé au GAEL), d'inventaire d'émission 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).

Dans le cadre du projet, le modèle POLES a été couplé à une partie du modèle GAINS (développé par l'IIASA) afin de mieux représenter les émissions de polluants et les coûts technologiques de dépollution afférents (alors que POLES était originellement centré sur les gaz à effet de serre). Différentes stratégies de compétition entre mesures climatiques et qualité de l'air ont été testées, avec notamment l'influence des coûts marginaux de dommages développés pour l'Agence Européenne de l'Environnement par l'INERIS.

Des valeurs de consentement à payer spécifiques aux enjeux climat et qualité de l'air ont été construites par le LEMNA par des enquêtes de préférences déclarées. Leur effet sur le choix des politiques a été mis en perspective par rapport aux modélisations POLES.

Les émissions de polluants correspondant à différents scénarios prospectifs de neutralité carbone ont été traduits en concentrations ambiantes de polluants, et *in fine* en impacts sanitaires et économiques par l'INERIS. Ce travail a reposé en partie sur une nouvelle version du modèle CHIMERE optimisée en termes de temps de calcul, ce qui la rend particulièrement pertinente pour l'étude de scénarios prospectifs. Le méta-modèle Air Control Toolbox a aussi été développé afin de fournir des diagnostics de traçage de source et évaluer la contribution respective des différents scénarios d'émissions dans la modélisation prospective.

Ces développements se situent dans le contexte de la recherche-action, en ce sens qu'ils permettent d'éclairer les scénarios de neutralité carbone existants mais aussi de mieux intégrer les modèles à l'avenir afin de prendre en compte ces risques et co-bénéfices en amont dans la prospective. Cette approche devrait favoriser le passage à l'action des décideurs en démontrant que les stratégies sont gagnantes sur plusieurs fronts simultanément.

---

<sup>1</sup> [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf)

# Résultats

## Scénarios prospectifs climat & qualité de l'air

Dans une première partie, nous nous focalisons, grâce au modèle POLES, sur la production de nouveaux scénarios prospectifs tendanciel et bas carbone, avec (QA+) ou sans politique ambitieuse d'amélioration de la qualité de l'air. Le scénario tendanciel (POLES/BaseGES) atteint un niveau d'émission de GES de 285 MtCO<sub>2</sub>eq en 2050, alors que la référence en 2015 est de 382 Mt, et que la neutralité carbone est atteinte en 2050 avec 100Mt CO<sub>2</sub>eq dans le cas du scénario POLES/NetZero.

Le scénario POLES/NetZero (avec ou sans mesures additionnelles pour la qualité de l'air) conduit à des co-bénéfices en termes d'effets sanitaires évités mais aussi en termes d'économies dans la lutte contre la pollution de l'air par rapport au scénario POLES/BaseGES. Cela illustre bien, comme on l'attendait, le fait que 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 PM<sub>2.5</sub>, COVNM et NH<sub>3</sub>. Les émissions de NOx et de SO<sub>2</sub> sont, elles, plus efficacement réduites avec des politiques de décarbonation, mais cela est dû à l'approche spécifique de POLES qui surestime le secteur maritime par rapport aux approches utilisées dans l'inventaire national établi par le Citepa. Il existe aussi une différence de temporalité, les mesures de dépollution livrant un bénéfice plus important entre 2015 et 2030, alors que la décarbonation permet un rattrapage entre 2030 et 2050.

Une analyse de sensibilité a été conduite pour renforcer le poids des politiques d'amélioration de la qualité de l'air dans le modèle POLES en introduisant les coûts de dommages (sanitaire et écosystémiques) à la tonne de polluant. Un effet notable a été identifié avec des baisses supplémentaires de 17 à 44% d'émission de polluants.

## Impacts sur la qualité de l'air et analyse coûts-bénéfices

Les impacts des scénarios produits avec POLES, mais aussi des scénarios de la Stratégie Nationale Bas Carbone 3 (SNBC3) publiée en 2024, sont ensuite évalués en termes de qualité de l'air, d'exposition des populations, d'impacts sanitaires, et de coûts économiques associés.

Le premier scénario considéré est le PREPA (Plan National de Réduction des Emissions de Polluants Atmosphériques) révisé en 2023 et reposant sur des projections de mesures existantes relatives aux Gaz à Effets de Serre (dénommé ici Citepa/BaseGES/QA+) qui aboutissent à des émissions de 270 Mt CO<sub>2</sub>eq en 2050. On explore aussi le Scénario de neutralité Carbone de la SNBC3 reposant sur la même méthodologie que le PREPA mais il considère, lui, l'atteinte de la neutralité carbone en 2050 (Citepa/NetZero/QA+).

Les concentrations atmosphériques de PM<sub>2.5</sub> et NO<sub>2</sub> sont évaluées avec la version optimisée du modèle CHIMERE, couplée à l'émulateur Air Control Toolbox pour quantifier l'impact relatif de chaque secteur d'activité. Dans l'exemple de la Figure 1 pour le scénario Citepa/NetZero/QA+, la réduction des concentrations de NO<sub>2</sub> moyennées sur la France est très importante pour 2030 et 2050 (-49 % et -71 %, respectivement), mais légèrement inférieure à la baisse des émissions (-55 % et -80 %). C'est le secteur du trafic routier qui contribue pour la plus grande part de ces réductions, et l'effet le plus important est noté entre 2018 et 2030. Pour les particules PM<sub>2.5</sub>, la baisse des concentrations est de -33 % et -45 % en 2030 et 2050 respectivement. L'écart par rapport à la baisse des émissions (-45 % et -60 %) est plus notable que pour le NO<sub>2</sub>, du fait de l'importance des contributions naturelles qui fait qu'un palier est atteint à terme pour les particules. Si les baisses d'émissions sont dominées par le secteur résidentiel, le trafic routier et l'agriculture jouent aussi un rôle important, en particulier entre 2030 et 2050.

La population exposée au-dessus des valeurs limites définies par la nouvelle directive sur la qualité de l'air ambiant approuvée en 2024 a été évaluée. Pour le NO<sub>2</sub>, une baisse drastique de la population exposée au-dessus du nouveau seuil UE de 20µg/m<sup>3</sup> est constatée en 2030 d'après tous les scénarios. Mais ce n'est qu'en 2050 et avec le scénario SNBC3 (Citepa/NetZero/QA+) que l'objectif est pleinement atteint. Pour les PM<sub>2.5</sub>, la population exposée au-dessus du nouveau seuil de 10µg/m<sup>3</sup> passe de 33 millions en 2018 à moins de 1 million dès 2030 dans les deux scénarios. Le seuil OMS de 5µg/m<sup>3</sup> est plus difficile à atteindre, mais le scénario de neutralité carbone (SNBC3) permet néanmoins de s'approcher de cette cible en 2050 avec 37 % de la population française qui pourrait respirer un air considéré comme sain d'après les standards internationaux à cet horizon (Figure 2).

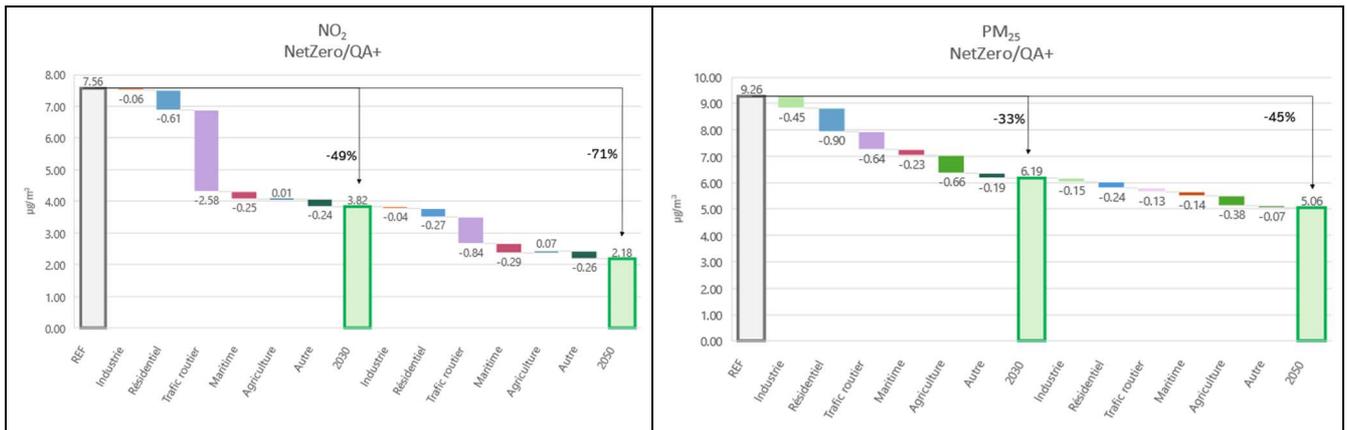


Figure 1: Concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de  $\text{NO}_2$  (gauche) et  $\text{PM}_{2.5}$  (droite) pour la référence (2018) et le scénario SNBC3 (Citepa/NetZero/QA+, 2030 et 2050) et contributions des différents secteurs d'activité à la réduction des concentrations (entre 2018 et 2030, et entre 2030 et 2050)

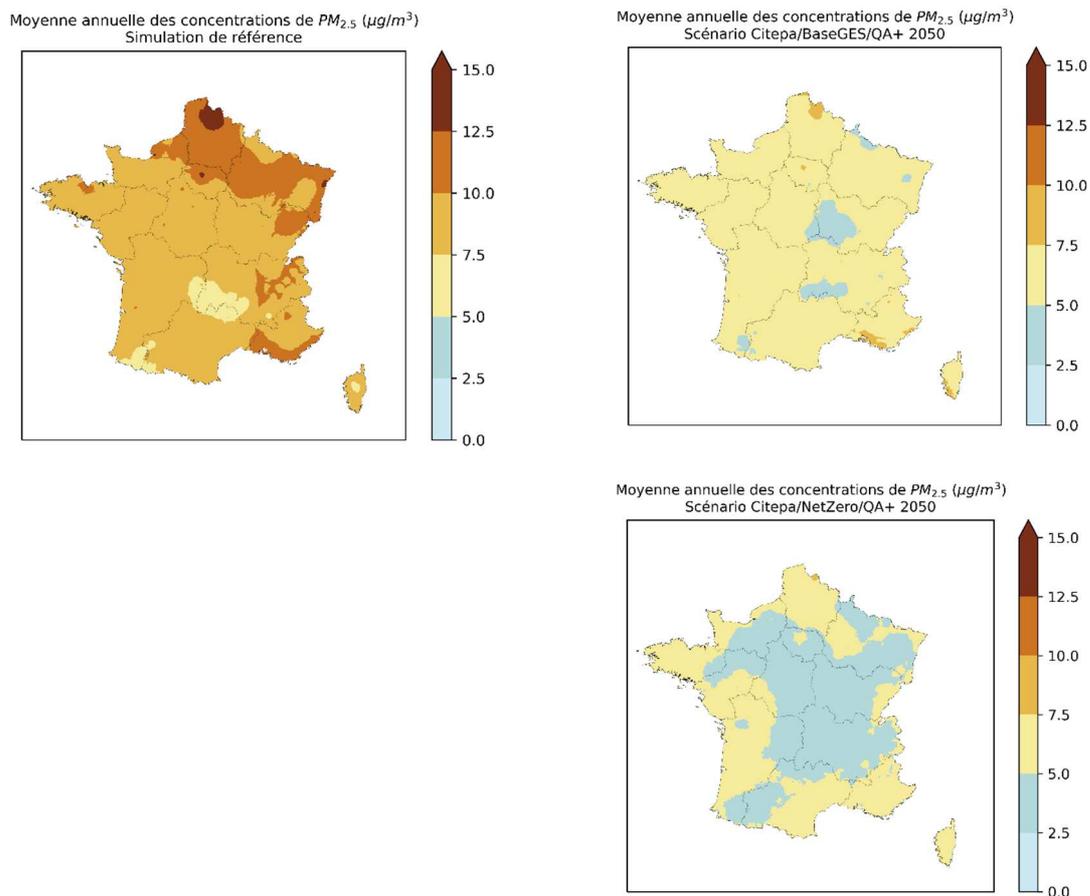


Figure 2: Moyennes annuelles de  $\text{PM}_{2.5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dans la simulation de référence pour 2018 (en haut à gauche) et dans les scénarios 2050: PREPA Citepa/BaseGES/QA+ (en haut à droite) et SNBC3 Citepa/NetZero/QA+ (en bas à droite)

La mortalité imputable à l'exposition aux PM<sub>2.5</sub> est estimée à 44 000 morts par an pour la référence en 2018, ce qui est cohérent avec les estimations de Santé Publique France. Une baisse notable à environ 32 000 morts est estimée pour 2030, mais en 2050, du fait du vieillissement de la population, la mortalité repart à la hausse avec 36 000 morts dans le scénario Citepa/BaseGES/QA+. Le scénario Citepa/NetZero/QA+ permet cependant de compenser en partie cet effet avec 31 000 morts. Un grand nombre d'autres effets sanitaires est pris en compte pour l'évaluation économique, qui inclut pour la mortalité une évaluation en termes de valeur statistique de la vie (VSL) et un indicateur des années de vie perdues (VOLY, qui constitue la référence utilisée dans la majeure partie du rapport en tant qu'indicateur conservateur au sens prudent ou minorant, c'est-à-dire qu'il minimise les impacts sanitaires et leur évaluation économiques plutôt que de les majorer).

La fourchette basse des estimations des effets sanitaires en termes monétaires indique qu'à l'horizon 2050, les dommages sanitaires totaux pourraient être réduits de 22 à 28 mrd €<sub>2015</sub> par rapport à 2018 (et cette réduction atteindrait 35 à 56 mrd €<sub>2015</sub> avec un indicateur plus majorant). En comparant les effets sanitaires des scénarios Citepa/BaseGES/QA+ et Citepa/NetZero/QA+ à l'horizon 2050, on démontre que le co-bénéfice apporté par la SNBC3 est de 3 à 6 mrd €<sub>2015</sub> (en 2030 et 2050 respectivement) avec un indicateur conservateur, mais que des indicateurs plus majorants vont jusqu'à 20 mrd €<sub>2015</sub>.

Les scénarios POLES construits dans le projet ACRA permettent d'évaluer l'effet respectif des politiques de dépollution et de décarbonation (alors que seules ces dernières sont évaluées dans les scénarios nationaux PREPA et SNBC3). La réduction des dommages sanitaires apportée par les mesures de décarbonation est très proche de celle estimée avec des scénarios nationaux. D'après les scénarios POLES, traduits en concentrations ambiantes avec le méta-modèle Air Control Toolbox, et en impact sanitaires monétisés avec Alpha-RiskPoll, nous avons estimé que le co-bénéfice des mesures de décarbonation était de 2 à 4 mrd €<sub>2015</sub> en 2030 et 2050, respectivement (contre 3 à 6 mrd €<sub>2015</sub> avec les scénarios nationaux), et ce avec un indicateur conservateur.

Le chiffrage du coût des politiques (de lutte contre la pollution de l'air et d'atténuation du changement climatique) issu de POLES permet par ailleurs de conduire une analyse coûts-bénéfices (Figure 3).

- À l'horizon 2030, le scénario POLES/NetZero/QA+ induit un surcoût pour le système énergétique (et plus largement les politiques climatiques) de l'ordre de 9 mrd €<sub>2015</sub> pour ce qui concerne les coûts d'investissement. A l'inverse il conduit à des co-bénéfices sanitaires ainsi qu'à des co-bénéfices sur les dépenses pour la lutte contre la pollution de l'air qui se situent au total entre 3 (VOLY) et 6 (VSL) milliards €<sub>2015</sub> en 2030 lorsqu'on considère les impacts sanitaires du seul polluant PM<sub>2.5</sub>.
- À l'horizon 2050, le scénario POLES/NetZero/QA+ induit un surcoût pour le système énergétique de 11 mrd €<sub>2015</sub> 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 entre 6,5 (VOLY) et 16,5 (VSL) mrd €<sub>2015</sub> en 2050.
- En utilisant l'indicateur le plus conservateur, les co-bénéfices des scénarios énergétiques pour la santé et en termes 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, les bénéfices dépassent les coûts.

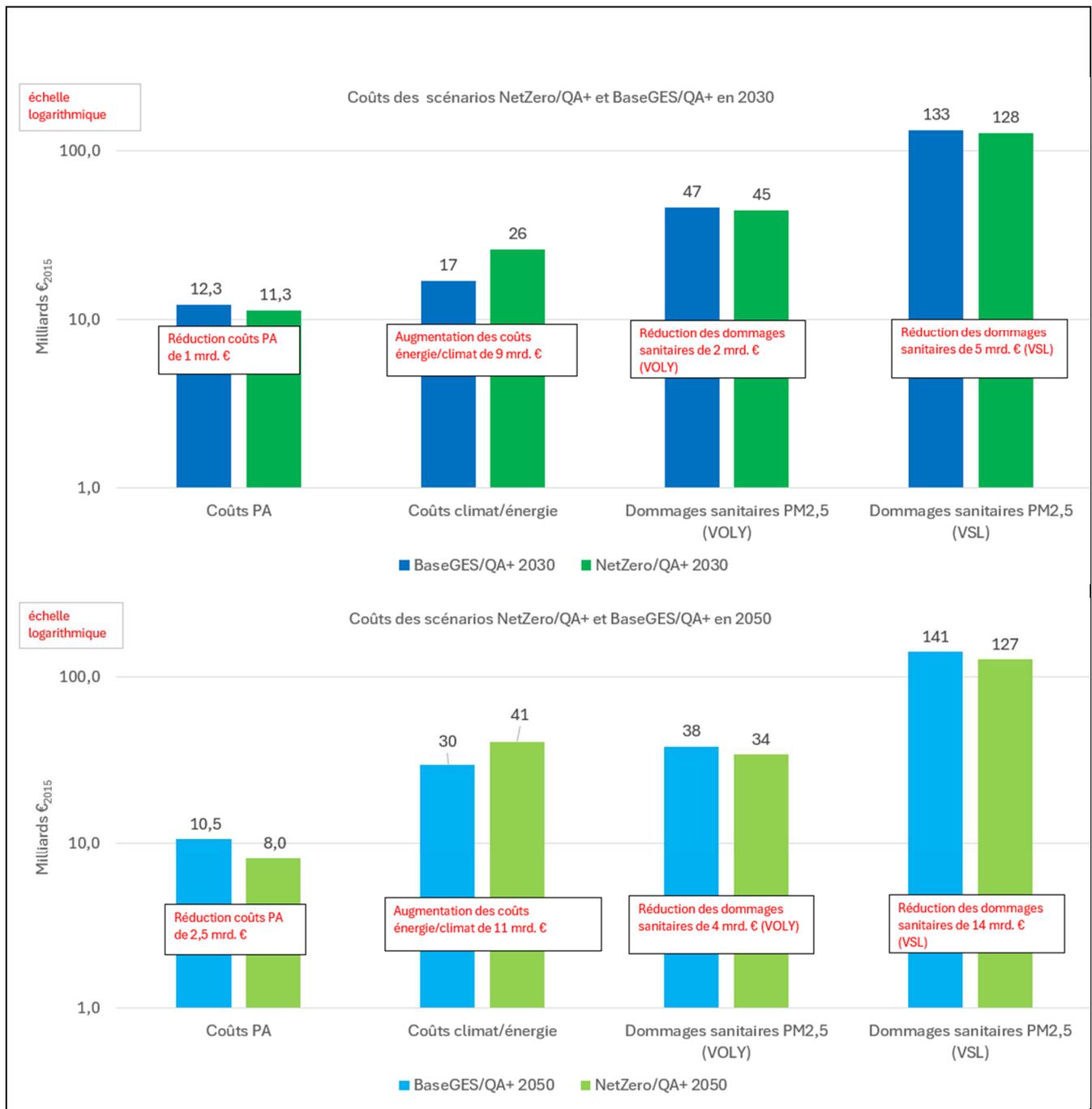


Figure 3: Coûts additionnels et co-bénéfices d'un passage du scénario POLES/BaseGES/QA+ au scénario POLES/NetZero/QA+ en 2030 (haut) et en 2050 (bas), en milliards €2015 (PM<sub>2,5</sub>)

### Acceptabilité des politiques climat et qualité de l'air

L'acceptabilité différenciée des mesures consacrées à l'atténuation du changement climatique par rapport aux politiques relatives à la qualité de l'air a été évaluée par des enquêtes reposant sur la méthode des choix multi-attributs. Des modèles économétriques de type Logit à coefficients aléatoires permettent ensuite de traduire ces préférences déclarées en consentements à payer. Des cartes de choix présentant différentes options de chauffage résidentiel plus ou moins favorables en termes d'émission de particules et de CO<sub>2</sub> ont été présentées à la fois à des propriétaires et à des locataires (pour un total de plus de 4 700 répondants), et ce, en leur apportant un niveau graduel d'information relatives à ces enjeux.

Les consentements à payer ont été évalués entre 0.65 et 1€ par m<sup>2</sup> de logement pour 1% de réduction d'émission de CO<sub>2</sub> ou de particules fines. Ces valeurs sont assez proches de la valeur tutélaire du carbone ou du coût marginal des dommages des particules fines.

L'apport d'informations supplémentaires relatives soit à la qualité de l'air, soit au changement climatique, augmente le consentement à payer face à ces deux enjeux. Il n'y a donc pas de priorisation notable d'un enjeu par rapport à l'autre.

## Conclusion et perspectives

---

Le projet ACRA co-financé par le programme PRIMEQUAL de l'ADEME et du Ministère de la Transition Ecologique, a permis d'objectiver les co-bénéfices et les risques entre atténuation du changement climatique et amélioration de la qualité de l'air.

Un consortium multidisciplinaire a été mobilisé pour proposer une démarche novatrice de modélisation particulièrement transverse : prospective énergétique (POLES/GAEL), inventaire d'émission de polluants (CITEPA et GAINS), impacts sur la qualité de l'air puis sur la santé (CHIMERE, Air Control Toolbox et Alpha-RiskPoll / INERIS) et économétrie des préférences déclarées (LEMNA).

Ces développements se situent dans le contexte de la recherche-action, en ce sens qu'ils permettent d'éclairer les scénarios de neutralité carbone avec les messages clés suivants :

- Les différents scénarios prospectifs indiquent tous une amélioration de la qualité de l'air. Mais seul le scénario bas carbone permet de s'approcher de l'objectif de qualité défini par l'Organisation Mondiale de la Santé ;
- Le consentement à payer vis-à-vis des mesures d'atténuation du changement climatique ou de la qualité de l'air apparaissent assez peu différenciés ;
- Les scénarios de décarbonation sont toujours bénéfiques pour la qualité de l'air. Les co-bénéfices compensent à minima 30 % à 60 % des coûts associés.

Les outils et méthodes issus du projet ACRA ont donc 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 sont déjà repris dans des applications opérationnelles d'aide à la décision (programme d'appui au Ministère de la Transition Ecologique de l'INERIS et Service d'Aide la Décision du programme Copernicus Atmosphere Monitoring Service de la Commission Européenne).

Enfin, de futures pistes de recherche sont identifiées par plusieurs partenaires du projet pour poursuivre la démarche enclenchée grâce au projet ACRA.

## RÉSUMÉ

Qualité de l'air et changement climatique sont fortement liés, autant au niveau des stratégies d'atténuation qu'au plan de l'adaptation. En termes d'atténuation, les politiques climatiques impliquent des mesures d'efficacité énergétique, des changements structurels, et d'autres mesures technologiques qui permettent aussi de réduire les émissions de polluants.

Le projet ACRA objective ces co-bénéfices par des approches de modélisation et d'économétrie. Ces développements se situent dans le contexte de la recherche-action, en ce sens qu'ils permettent d'éclairer les scénarios de neutralité carbone.

- Les différents scénarios prospectifs indiquent tous une amélioration de la qualité de l'air. Mais seul le scénario bas carbone permet de s'approcher de l'objectif de qualité défini par l'Organisation Mondiale de la Santé ;
- Le consentement à payer vis-à-vis des mesures d'atténuation du changement climatique ou de la qualité de l'air apparaissent assez peu différenciés ;
- Les scénarios de décarbonation sont toujours bénéfiques pour la qualité de l'air. Les co-bénéfices compensent à minima 30 % à 60% des coûts associés.

### Ce document est diffusé par l'ADEME

#### ADEME

20, avenue du Grésillé  
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : **2062c0009**

Étude réalisée par COLETTE Augustin, BONGRAND Grégoire, COUVIDAT Florian, GRESSENT Alicia, LE BOULZEC Hugo, MAHIEU Pierre-Alexandre, MATHY Sandrine, MESSINA Palmira, MIMA Silvana, REAL Elsa, RAUX Blandine, SCHUCHT Simone, TRAVERS Muriel pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Augustin COLETTE (INERIS)

Appel à projet de recherche : PRIMEQUAL (PRogramme de Recherche Interorganisme pour une MEilleure QUALité de l'air)

Coordination technique - ADEME : POISSON Nathalie  
Direction/Service : Direction Villes et Territoires Durables (DVTD) / Service Qualité de l'Air (SEQA)

### CITATION DE CE RAPPORT

COLETTE A., BONGRAND G., COUVIDAT F., GRESSENT A., LE BOULZEC H., MAHIEU P.-A., MATHY S., MESSINA P., MIMA S., REAL E., RAUX B., SCHUCHT S., TRAVERS M. 2024. Stratégies climatiques et de qualité de l'air – ACRA (APR PRIMEQUAL) : Co-bénéfices et risques des stratégies d'atténuation et d'amélioration. Synthèse, 8 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne

<https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.