

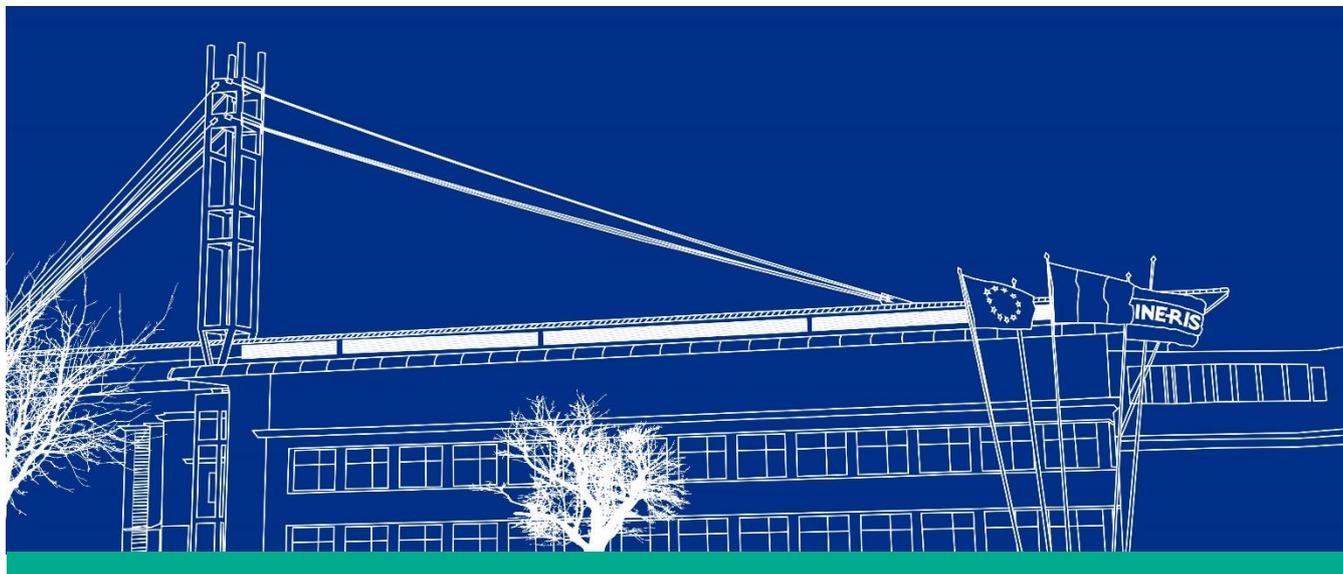


**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable*



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 221962 - 2780028 - v1.0

12/01/2024

Evaluation de l'impact de la crise énergétique de l'hiver 2022-23 sur la qualité de l'air en France

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION STRATEGIE POLITIQUE SCIENTIFIQUE ET COMMUNICATION

Rédaction : RAUX Blandine – REAL Elsa – MESSINA Palmira-Valentina – COUVIDAT Florian – COLETTE Augustin – GUION Antoine

Vérification : REAL ELSA

Approbation : MORIN ANNE - le 12/01/2024

Table des matières

1	Introduction	9
2	Méthodologie	10
3	Résultats.....	13
3.1	Comparaison des émissions et concentrations entre 2021/2022 et 2022/2023	13
3.2	Impacts relatifs de la crise énergétique et du climat de l'hiver 2022/2023	14
4	Conclusion	17
	Annexes.....	19
	Annexe 1 : Indicateurs d'évolution des émissions issus des données du Citepa	20
	Annexe 2 : Indicateurs de la sensibilité climatique des émissions résidentielles.....	28
	Annexe 3 : Comparaison de l'utilisation d'indicateurs journaliers ou mensuels.....	30
	Annexe 4 : Températures sur la période	31

Résumé

Nous présentons ici l'impact que les mesures de sobriété de l'hiver 2022/2023 ont pu avoir sur la qualité de l'air en termes de concentration de polluants dans l'air ambiant, en particulier pour les concentrations de $PM_{2.5}$. Elle s'appuie d'une part sur les émissions estimées par le Citepa pour 2022/2023, et d'autre part sur le méta-modèle ACT, qui représente de manière statistique le comportement du modèle de qualité de l'air CHIMERE et permet de simuler les concentrations de $PM_{2.5}$ en prenant en compte divers scénarios d'émissions. Les émissions du Citepa reposent sur la consommation énergétique, évaluées avec un délai de seulement quelques mois, et tiennent donc compte de l'effet des mesures de sobriété sur la consommation d'énergie mais aussi indirectement de l'effet de la météorologie (écart de température pour l'hiver 2022-2023 par rapport à la climatologie).

La baisse des émissions de particules primaires ($PPM_{2.5}$) sur les trois mois d'hiver météorologique (décembre 2022 à février 2023) par rapport à l'hiver précédent est estimée à -8% par le Citepa. Les méthodes mises en œuvre dans cette étude ont permis d'estimer la variation des concentrations de $PM_{2.5}$ par rapport à cette baisse des émissions, et d'isoler la composante liée à la variation des conditions météorologiques et la composante strictement liée à la sobriété énergétique.

Ainsi, la réduction nette des concentrations de $PM_{2.5}$ par rapport à ce qui aurait été obtenu pour les mêmes conditions météorologiques mais avec les émissions de l'hiver précédent (2021/2022) a été estimé à -4,2%, dont environ -9,5% imputable aux mesures de sobriétés associées à la crise énergétique et +5,3% aux conditions climatiques. Cet effet est très significatif quand on le compare à la baisse moyenne de PM_{10} au rythme de 2,9%/an sur la période 2005-2021, ou encore à la réduction de 2 à 5% en moyenne sur l'année 2020 suite au confinement en réponse à la pandémie de Covid-19.

Synthèse

Contexte

A partir d'octobre 2022, des mesures de sobriété ont été demandées aux particuliers et aux entreprises en France et en Europe dans le cadre de tensions sur le marché de l'énergie. En modifiant les habitudes de consommation, cette crise énergétique a eu un impact sur les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre. La question qui se pose ici est de savoir si les mesures de sobriété ont également pu avoir un effet notable sur la qualité de l'air en termes de concentration de polluants dans l'air ambiant.

L'estimation en temps réel ou quasi réel de changements brusques d'émissions sur les concentrations de polluants se heurte à deux difficultés méthodologiques. D'une part, la prévision de la qualité de l'air implique des modèles complexes qui sont coûteux à mettre en œuvre en termes de ressources de calcul. D'autre part, les inventaires d'émissions utilisés pour produire les prévisions de pollution atmosphérique pour une année N ne sont généralement disponibles qu'en septembre de l'année N+2. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser des outils plus flexibles afin de pouvoir prendre en compte un changement brutal dans les émissions, comme cela a pu survenir lors de la crise Covid ou dans le contexte de la crise énergétique de 2022/2023.

Méthodes

A cet effet, l'Ineris a développé le méta-modèle ACT, qui reproduit de manière statistique le comportement du modèle complet de qualité de l'air CHIMERE. Ce méta-modèle offre la possibilité d'estimer les concentrations d'ozone, de PM₁₀, de PM_{2.5} ou de NO₂ sur l'Europe résultantes de n'importe quel scénario de réduction d'émissions par secteur d'activité.

Le Citepa est responsable pour le compte du Ministère en charge de l'écologie de l'évaluation annuelle des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de précurseurs des polluants atmosphériques sur le territoire français métropolitain. Depuis 2020, il produit un « baromètre » de l'évolution mensuelle des émissions qui repose sur la consommation énergétique évaluée avec un délai de quelques mois seulement. Par construction, les émissions ainsi fournies tiennent compte de tous les événements ayant un impact sur la consommation d'énergie, que ce soient des mesures de sobriété ou des écarts de température par rapport à la climatologie.

Utilisées dans ACT, ces estimations d'évolution des émissions permettent de reproduire les concentrations de PM_{2.5} de l'hiver 2022/2023. Etant donné que ce méta-modèle considère en entrée d'entrée les émissions par secteur d'activité, il est nécessaire d'agrèger les émissions par polluant fournies par le CITEPA. L'approche utilisée ici consiste à prendre, pour chaque secteur d'activité, un composite calculé par combinaison linéaire des évolutions d'émissions de cinq polluants primaires (directement rejetés par une source d'émission) qui contribuent aux concentrations de PM_{2.5} dans l'atmosphère (composés organiques volatils non-méthaniques (COVNM), PM_{2.5} primaires (PPM_{2.5}), dioxyde de soufre (SO₂), oxydes d'azote (NO_x) et ammoniac (NH₃)) en fonction de leur poids relatif dans les émissions du secteur ciblé.

Comparés aux concentrations obtenues dans les mêmes conditions mais avec les émissions « de référence » de l'hiver précédent, ces résultats offrent un aperçu de l'impact des événements de l'hiver 2022/2023 sur la qualité de l'air. Or, les habitudes de consommation de l'énergie n'ont pas seulement été influencées par les mesures de sobriété, mais aussi par les anomalies de températures constatées sur certaines périodes de l'hiver 2022/2023. Isoler les effets de la crise énergétique nécessite donc d'isoler les effets climatiques.

Pour quantifier ces effets, un scénario appliqué aux émissions du secteur résidentiel et adapté au cas de la France a été construit sur le concept de « degré jour de chauffage » (Heating Degree Days, HDD). Cette méthode cherche à représenter les évolutions des habitudes de chauffage en lien avec la température extérieure, ce qui permet d'estimer la part de variation des émissions attribuable aux conditions climatiques. Le scénario ainsi obtenu est une bonne estimation de l'« effet climatique seul », bien qu'il ne tienne pas compte de la sensibilité météorologique des secteurs d'activité autres que résidentiel. Notons que ce scénario n'est pas une estimation des éventuels effets du changement climatique, mais bien une quantification de l'effet moyen des températures de l'hiver 2022/2023 par rapport à l'année précédente.

Le différentiel entre les émissions estimées de l'hiver 2022/2023 et les émissions résidentielles de l'« effet climatique seul » permet d'isoler l'« effet crise énergétique ».

Résultats

Sur la période de décembre 2022 à février 2023, le Citepa indique une baisse des émissions de particules fines primaires de -8% par rapport à l'hiver précédent (pour le $\text{CO}_{2\text{eq}}$, la baisse est de -4,5%). Les concentrations ambiantes de $\text{PM}_{2.5}$ résultantes sont donc aussi en baisse, même s'il y a des disparités en fonction des mois considérés, notamment du fait de la fluctuation des conditions météorologiques.

En moyenne sur les trois mois d'hiver météorologique (décembre 2022 à février 2023), les concentrations de $\text{PM}_{2.5}$ sont en baisse de -4,2% (soit $-0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En comparaison par rapport à l'hiver précédent (qui était lui-même très clément), les conditions climatiques de l'hiver 2022/2023 étaient légèrement plus rigoureuses, et elles auraient conduit à augmenter les concentrations de $\text{PM}_{2.5}$ de +5,3%. Les mesures de sobriété en réponse à la crise énergétique auraient donc contribué à réduire les concentrations de $\text{PM}_{2.5}$ de -9,5%.

La contribution des vagues de froid (périodes durant lesquelles les températures étaient inférieures à celles de l'hiver précédent) sur les pics de concentration de $\text{PM}_{2.5}$ sont ainsi estimées en moyenne mensuelle à +12% en décembre et +6% en février par rapport à l'hiver 2021/2022. Les concentrations obtenues à partir des émissions estimées par le Citepa ayant cependant diminué de respectivement -4 et -2,5% pour ces mois de décembre et février, la crise énergétique seule aurait donc contribué à réduire de -16 et -8,5% les concentrations de $\text{PM}_{2.5}$ totales de ces deux mois par rapport à l'année précédente.

Pour les autres mois de l'hiver 2022/2023 (octobre et novembre 2022, et janvier et mars 2023), l'anomalie climatique est plutôt dans le sens d'un hiver plus doux, et donc une tendance à la baisse des émissions qui vient s'ajouter à l'effet de la crise énergétique. En octobre et janvier, la crise énergétique aurait contribué pour moitié environ aux réductions de concentrations de $\text{PM}_{2.5}$ (qui sont respectivement estimées à -3 et -5,7% par le modèle), et pour un peu moins des deux tiers en novembre (où les réductions de concentrations atteignent -8% en moyenne mensuelle).

En mars, les effets climatiques étant quasiment nuls, il semblerait que seule la crise énergétique ait influencé les réductions de concentrations, qui sont toutefois elles-mêmes assez faibles (-2% de moyenne mensuelle).

La baisse de -9,5% imputable aux mesures de sobriété pendant l'hiver 2022/2023 peut être mise en perspective avec les autres facteurs d'évolution des particules fines en France. En moyenne sur la période 2005-2021, les concentrations de PM_{10} ont baissé de 2,9% par an. Pendant le confinement strict du printemps 2020, la baisse a pu atteindre 10 à 15%, mais en moyenne sur l'année l'effet était plutôt de 2 à 5%. Les raisons qui sous-tendent les baisses de concentrations de particules n'ont absolument rien à voir lorsque l'on considère (i) l'évolution de long terme entre 2005 et 2021, (ii) la période des confinements en 2021, (iii) la crise énergétique de 2022/2023. Mais leur comparaison permet néanmoins de noter que l'effet des mesures de sobriété prises à l'hiver 2022/2023 sur la qualité de l'air a été tout à fait significatif.

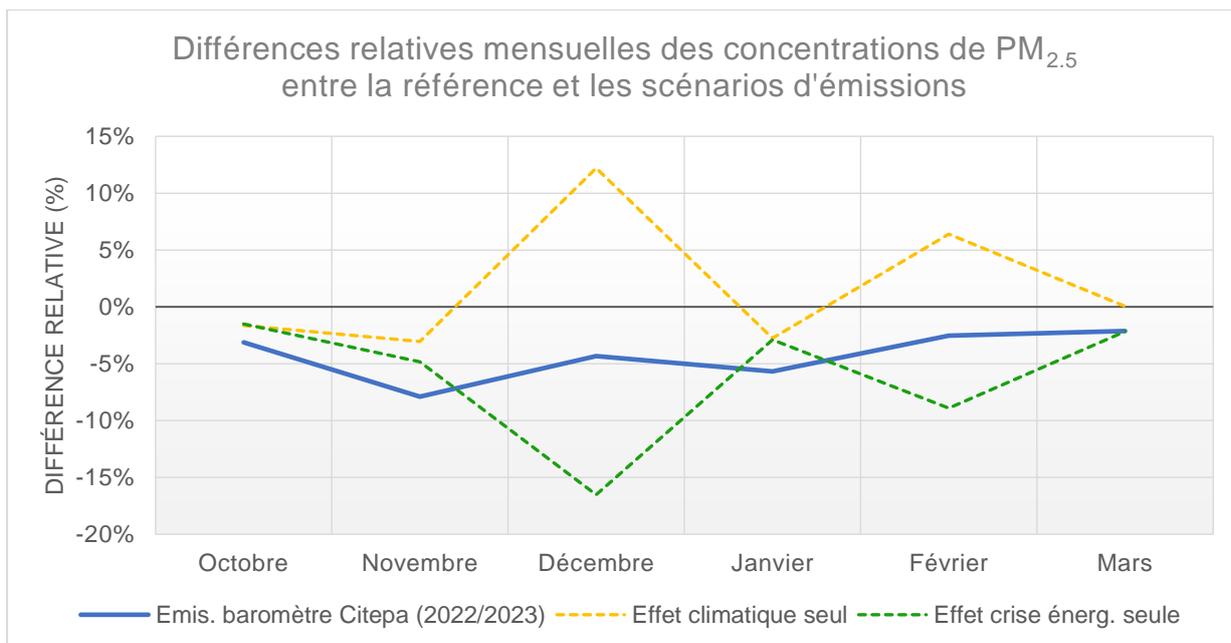


Figure 1 : Différences relatives (%) entre les concentrations de PM_{2.5} de la référence (scénario hypothétique avec la météorologie de l'hiver 2022/2023 mais les émissions de l'hiver 2021/2022) et des différents scénarios (scénario utilisant les émissions estimées du baromètre Citepa pour 2022/2023 (bleu), scénario isolant l'effet climatique (jaune), scénario isolant l'effet crise énergétique (vert)) sur la France pour les mois d'octobre 2022 à mars 2023

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Evaluation de l'impact de la crise énergétique de l'hiver 2022-23 sur la qualité de l'air en France, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 221962 - v1.0, 12/01/2024.

Mots-clés :

Crise énergétique ; sobriété énergétique ; modélisation ; qualité de l'air ; méta-modèle

1 Introduction

A partir d'octobre 2022, dans un contexte de tensions sur le marché de l'énergie, des mesures de sobriété ont été demandées aux particuliers et aux entreprises en France et en Europe. En modifiant les habitudes de consommation, cette crise énergétique a eu un impact sur les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre¹. Il est donc légitime de chercher à documenter si ces mesures de sobriété ont pu avoir aussi un effet notable sur la qualité de l'air en termes de concentration de polluants dans l'air ambiant.

L'estimation en temps réel ou quasi réel de ces changements brusques d'émissions sur les concentrations de polluants se heurte à deux difficultés méthodologiques. D'une part, la prévision de la qualité de l'air implique des modèles complexes qui sont coûteux à mettre en œuvre en termes de ressources de calcul. D'autre part, les inventaires d'émissions utilisés pour produire les prévisions de pollution atmosphérique pour une année N ne sont généralement disponibles qu'en septembre de l'année N+2. Par conséquent, il est courant d'utiliser, pour les prévisions de qualité de l'air de l'année en cours, les inventaires d'émissions d'une année « de référence » (année N-2 ou antérieure), maintenue dans le temps pour l'année N. Ce principe, très efficace de manière générale, a l'inconvénient de ne pas permettre de prendre en compte un changement brutal dans les émissions, comme lors de la crise Covid ou tel que nous cherchons ici à le mettre en évidence dans le contexte de la crise énergétique de 2022-2023.

Des outils plus flexibles doivent donc prendre le relais pour pouvoir fournir des réponses plus rapides et sur-mesure à des événements imprévus, tels qu'un confinement de la population ou une crise énergétique. A cet effet, l'Ineris a développé le méta-modèle ACT qui constitue une simplification du modèle complet de qualité de l'air CHIMERE. La méthode repose sur un entraînement statistique quotidien contraint sur un sous-ensemble limité de simulations de sensibilité. Le méta-modèle offre ainsi la possibilité d'estimer les concentrations d'ozone, de PM₁₀, de PM_{2.5} ou de NO₂ résultantes de n'importe quel scénario de réduction d'émissions² par secteur d'activité. Il s'applique uniformément sur l'Europe pour le ou les secteurs d'activité visés.

Le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (Citepa) est responsable pour le compte du Ministère en charge de l'écologie de l'évaluation annuelle des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de précurseurs des polluants atmosphériques sur le territoire français métropolitain¹. Suite à la crise sanitaire de 2020, il est apparu pertinent d'évaluer à une fréquence plus élevée l'évolution de ces émissions. Par ailleurs, la mise à disposition des statistiques et données d'entrée de la méthodologie des inventaires a été progressivement automatisée. Le Citepa produit ainsi depuis 2020 un « baromètre » de l'évolution mensuelle des émissions. Ces données représentent les réductions ou augmentations d'émissions constatées ou estimées par rapport à l'année précédente.

Dans le baromètre publié fin juin 2023, le Citepa note qu'au premier trimestre 2023, les émissions de GES ont baissé de 4.2% par rapport à la même période en 2022. Les émissions du secteur transports restent à la hausse suite au rebond post-covid (+1% entre les premiers trimestres 2022 et 2023). La baisse constatée est principalement portée par les secteurs des bâtiments (-10%) et de l'industrie (-9%) car ces deux secteurs sont fortement affectés par la crise énergétique. En ce qui concerne les polluants atmosphériques, les émissions de NO_x sont en légère baisse (-3%) mais l'effet est plus marqué pour les particules fines (-7% pour les PM_{2.5} primaires), grâce à la baisse des émissions dans le secteur du chauffage des bâtiments résidentiels.

Nous présentons ici comment les estimations d'émissions du Citepa pour les six mois de l'hiver 2022/2023 (octobre à mars) publiées à la fin du second trimestre 2023 ont été exploitées dans le méta-modèle ACT. Cette méthodologie nous a permis de quantifier les effets sur la qualité de l'air des mesures de sobriété imposées par la crise énergétique, en chiffrant également l'effet imputable à la météorologie du fait d'un hiver relativement clément en 2022/2023 (+0.8°C par rapport à la normale), mais néanmoins plus froid que l'hiver 2021/2022 (+1.2°C par rapport à la normale).

Ce rapport reprend quelques éléments méthodologiques (section 2), avant de proposer une application de ACT aux concentrations de PM_{2.5} sur les mois d'octobre 2022 à mars 2023 (section 0). De plus amples détails sont fournis en annexes.

¹ [Baromètre mensuel des émissions - Citepa](#)

² Un outil interactif basé sur ACT est disponible en ligne : [Air Control Toolbox](#)

2 Méthodologie

Le méta-modèle ACT est conçu pour reproduire la réponse du modèle CHIMERE à une perturbation des émissions anthropiques avec une précision de 2%⁴. La configuration de CHIMERE utilisée pour l'apprentissage automatique de ACT est analogue à celle mise en œuvre dans la cadre de la prévision européenne de la qualité de l'air Copernicus Atmosphere Monitoring Service³. Les données météorologiques et les conditions aux limites chimiques sont celles prévues par le modèle IFS du centre européen (ECMWF). Les cadastres d'émissions sont cartographiés pour chaque secteur et chaque polluant à partir des inventaires nationaux rapportés par les pays pour les années passées. Ils ne peuvent donc pas prendre en compte les éventuelles spécificités de l'année en cours, contrairement à la météorologie et aux conditions aux limites.

Dans le cadre de cette étude, le méta-modèle ACT a été utilisé pour simuler les concentrations de PM_{2.5} des mois d'octobre 2022 à mars 2023, en prenant en compte les évolutions mensuelles d'émissions telles qu'estimées par le Citepa dans son baromètre publié fin juin 2023. Pour davantage de détails sur le méta-modèle ACT et sur la relation entre les réductions d'émissions et les changements des concentrations, se référer à l'étude complète⁴.

La difficulté pour appliquer les différentiels d'émissions entre 2022 et 2023 publiés par le Citepa provient du fait que ACT est conçu pour pouvoir déterminer les concentrations de polluants résultant d'une réduction homogène des émissions d'un ou de plusieurs secteurs d'activité donné (ex : secteur industriel ou agricole), mais pas d'un précurseur donné (ex : baisse des émissions de NO_x ou de particules). Or, le baromètre mensuel du Citepa fournit les évolutions d'émissions par secteur et par précurseur (cf. Annexe 1, Tableau 3 et Tableau 4). Ces derniers contribuant de manière inhomogène dans les différents secteurs, une difficulté méthodologique consiste à élaborer une approche reflétant au mieux l'évolution générale d'un secteur à partir des évolutions individuelles des précurseurs.

Après une analyse comparée de plusieurs approches pour représenter la baisse des émissions par secteur, le choix s'est porté sur une approche composite utilisant, pour chaque secteur, une combinaison linéaire des évolutions d'émissions de cinq polluants primaires⁵ qui contribuent aux concentrations de PM_{2.5} dans l'atmosphère (composés organiques volatils non-méthaniques (COVNM), PM_{2.5} primaires (PPM_{2.5}), dioxyde de soufre (SO₂), oxyde d'azote (NO_x) et ammoniac (NH₃)) en fonction de leur poids relatif dans les émissions du secteur ciblé. Plus d'éléments sur les approches envisagées et les analyses ayant permis ce choix sont décrits en Annexe 1.

Le Tableau 1 détaille les réductions d'émissions résultant de cette approche composite par secteur d'activité entre 2021 et 2022 pour octobre, novembre et décembre, et entre 2022 et 2023 pour janvier, février et mars. Ces différentiels sont ensuite exploités dans le méta-modèle ACT pour reproduire l'hiver 2022/2023. Dans la suite du document, cette évaluation de la qualité de l'air prenant en compte les variations d'émissions estimées par le Citepa et agrégées par l'approche composite sera nommée simulation « émissions baromètre Citepa (2022/2023) », à mettre en regard de la simulation « référence (émissions 2021/2022) » où les émissions sont celles de 2021/2022 mais la qualité de l'air fluctue quotidiennement avec la météorologie de l'hiver 2022/2023.

Les émissions estimées par le Citepa pour 2022/2023 reposent sur la consommation énergétique évaluée avec un délai de seulement quelques mois. Celles-ci tiennent donc compte de l'effet des mesures de sobriété sur la consommation d'énergie mais aussi indirectement de l'effet de la météorologie (écart de température pour l'hiver 2022-2023 par rapport à la climatologie).

Un scénario additionnel a été construit afin de quantifier cet effet météorologique. Il repose sur le concept de « degré jour de chauffage » (Heating Degree Days, HDD) appliqué aux émissions du secteur

³ <https://regional.atmosphere.copernicus.eu/>

⁴ Colette, A., Rouil, L., Meleux, F., Lemaire, V., and Raux, B.: Air Control Toolbox (ACT_v1.0): a flexible surrogate model to explore mitigation scenarios in air quality forecasts, *Geosci. Model Dev.*, 15, 1441–1465, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-1441-2022>, 2022

⁵ Un polluant est dit « primaire » lorsqu'il est directement rejeté dans l'atmosphère par une source d'émissions (anthropique ou naturelle). Un polluant est dit « secondaire » lorsqu'il est formé par transformation chimique d'espèces déjà présentes dans l'air.

résidentiel⁶ et dont la paramétrisation a été adaptée au cas de la France⁷. Avec la température extérieure comme variable explicative, cette méthode cherche à représenter les évolutions des habitudes de chauffage en lien avec les conditions météorologiques, ce qui permet d'estimer la part de variation des émissions attribuable aux conditions climatiques. Dans la présente étude, la paramétrisation a été spécifiquement calibrée à partir d'une corrélation entre consommation de gaz et anomalies de température en France sur la période 2015-2018. Cette relation a ensuite été appliquée pour les hivers 2021/2022 et 2022/2023 afin d'estimer l'« effet climatique seul » pour la période d'octobre 2022 à mars 2023, comparé à l'hiver précédent.

Cet effet climatique est calculé pour chaque jour, mais seule la moyenne mensuelle est utilisée ici par analogie avec les données du baromètre Citepa qui sont disponibles à cette fréquence temporelle. Le lissage induit par l'utilisation de la moyenne mensuelle plutôt que par les indicateurs journaliers peut engendrer une perte de variabilité dans les résultats. Cependant, des tests de sensibilité montrent que cet effet ne change pas les conclusions de l'étude (Annexe 3).

Les réductions d'émissions qui en résultent sont décrites dans le Tableau 1, où l'on note que cet effet climatique n'est appliqué qu'au secteur résidentiel. La sensibilité météorologique des émissions des autres secteurs est écartée, bien qu'elle puisse être importante notamment pour la production d'électricité. L'estimation utilisée ici doit donc être considérée comme minorante, mais elle permet néanmoins de faire une première distinction entre les effets climatiques et les effets de la crise énergétique. La méthodologie et les limites de cette approche sont présentées succinctement en Annexe 2.

Tableau 1 : Indicateurs d'évolution des émissions de chaque secteur d'activité entre l'année précédente et l'année courante pour chacun des cas envisagés, en pourcentage (%), pour les mois d'octobre 2022 à mars 2023. La partie gauche du tableau présente les indicateurs dérivés des estimations du Citepa pour chaque secteur d'activité (ceux-ci tiennent compte à la fois des mesures de sobriété et de l'effet de l'écart par rapport à la climatologie). La partie droite présente les différences d'émissions dues uniquement à l'écart climatologique entre les hivers 2022/2023 et 2021/2022.

	Estimation des changements d'émissions en 2022/2023 par rapport à l'année précédente (effet des mesures de sobriété et effet climatique)						Estimation du changement d'émission en 2022/2023 imputable exclusivement à l'effet climatique					
	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.
	Indicateurs basés sur une combinaison linéaire (composite) des différentiels d'émissions déterminés par le Citepa pour COVNM, PPM _{2,5} , SO ₂ , NO _x et NH ₃						Indicateurs basés sur l'étude de l'influence de la température sur l'utilisation du chauffage résidentiel					
Agriculture	-0,7	+0,15	+0,02	-0,7	-0,02	-0,5	-	-	-	-	-	-
Trafic	-3,1	-1,9	-4,1	+5,1	-4,5	+1,9	-	-	-	-	-	-
Résidentiel	-29,3	-25,7	-7,6	-14,5	-4,1	-3,5	-28,7	-11,1	+29,5	-6,98	+12,9	+0,15
Industriel	-10,2	-8,4	-7,0	-4,1	+0,56	-9,8	-	-	-	-	-	-

Notons une forte réduction d'environ -30% des émissions du secteur résidentiel sur le mois d'octobre pour les deux approches, qui coïncide avec des températures douces (voir Annexe 2). Sur ce mois, l'effet climatique semble ainsi représenter la majorité des réductions d'émissions du secteur résidentiel-tertiaire.

⁶ Guevara, Marc, et al. "Copernicus Atmosphere Monitoring Service TEMPORal profiles (CAMS-TEMPO): global and European emission temporal profile maps for atmospheric chemistry modelling." *Earth System Science Data* 13.2 (2021): 367-404, <https://essd.copernicus.org/articles/13/367/2021/essd-13-367-2021.html>.

⁷ Guion, A., Couvidat, F. and Colette, A. Country-dependent Heating Degree Day parameters for NO_x and PM emissions from residential heating: application to air quality modelling and multi-year emission forecasts, (2023, in preparation).

En revanche, les mois de décembre et février sont en moyenne plus froids que l'année précédente. L'effet climatique aurait ainsi dû conduire à une hausse des émissions du secteur résidentiel (resp. +29,5% et +12,9%) mais les émissions estimées par le Citepa sont toujours à la baisse (resp. -7,6% et -4,1%) confirmant la possibilité d'effets imputables à la sobriété qui sont chiffrés plus en détail en section 3.2.

Bien que le mois de décembre 2022 montre un écart plus faible avec la température moyenne de l'année précédente que le mois de février, les variations des valeurs absolues constatées pour décembre ont un impact plus important sur le différentiel d'émissions résidentielles à cause d'un effet de seuil (voir Annexe 2). Ainsi, la moyenne nationale des températures n'est jamais descendue en-dessous de +3°C en février, tandis qu'elle a atteint 0°C par deux fois en décembre, ce qui s'est traduit pour ce mois-ci par une augmentation rapide et élevée de « degrés jours de chauffage » et donc une plus forte augmentation des émissions de chauffage que pour février.

A ce stade, nous pouvons noter que l'hiver météorologique⁸ 2022/2023 a été relativement doux par rapport à la climatologie, avec des températures de +0.8°C au-dessus des normales sur la période⁹. Néanmoins, l'hiver météorologique de l'année précédente avait été encore plus doux, avec des températures de +1.2°C au-dessus des normales¹⁰. C'est pourquoi dans les différences présentées ici entre les hivers 2022/2023 et 2021/2022, il apparaît que les variations météorologiques ont bien pu contribuer à augmenter les émissions, notamment sur les mois de décembre 2022 et février 2023 pendant lesquels des vagues de froid ont eu lieu.

⁸ L'hiver au sens météorologique désigne les trois mois les plus froids de l'année. Dans l'hémisphère nord, il correspond aux mois de décembre à février.

⁹ https://meteofrance.com/sites/meteofrance.com/files/files/editorial/comm_presse_hiver_2022-2023_web.pdf

¹⁰ https://meteofrance.fr/sites/meteofrance.fr/files/files/editorial/Bilan%20Hiver_opt.pdf

3 Résultats

3.1 Comparaison des émissions et concentrations entre 2021/2022 et 2022/2023

Les estimations d'émissions faites par le Citepa montrent une baisse des émissions entre l'année précédente et l'année courante très variables d'un précurseur à l'autre (Figure 2). De manière générale, les plus fortes réductions d'émissions sont relevées en octobre et novembre, en particulier pour les PM_{2.5} primaires¹¹ (PPM_{2.5}), tandis que les émissions retrouvent des niveaux beaucoup plus proches de ceux de l'année précédente en février et mars (à l'exception du SO₂).

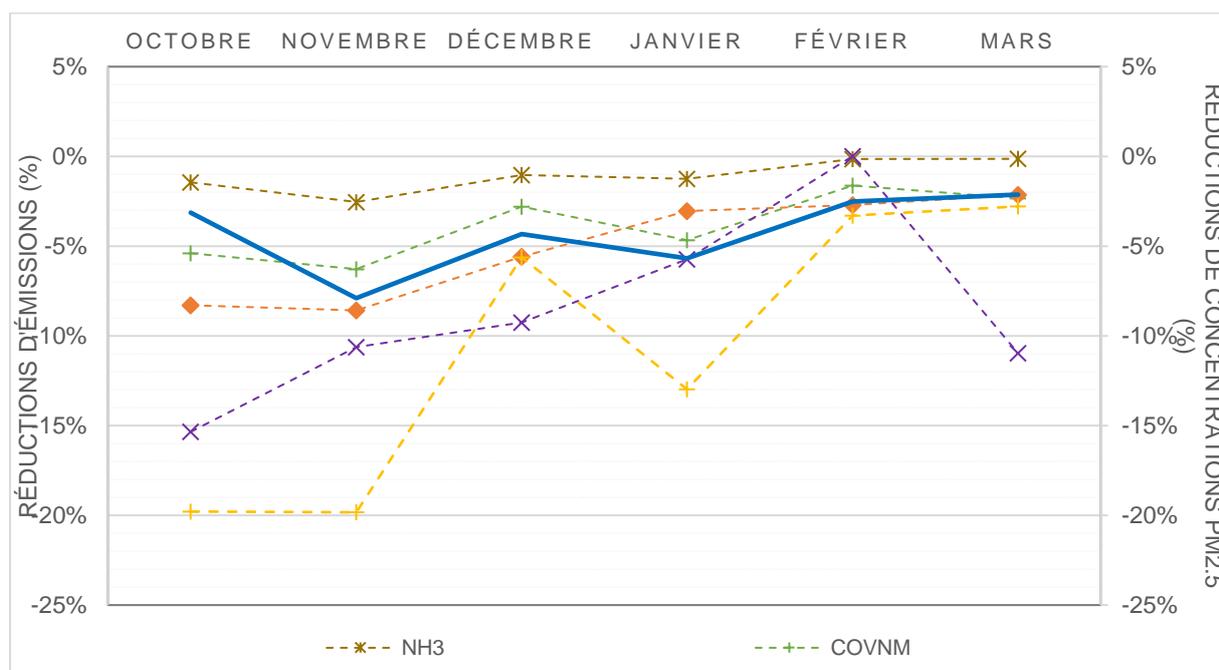


Figure 2 : Comparaison (%) des estimations de réductions d'émissions du Citepa sur l'ensemble des secteurs (lignes en pointillés, axe des ordonnées gauche) et des évolutions (%) des concentrations de PM_{2.5} associées (ligne pleine, axe des ordonnées droit) d'octobre 2022 à mars 2023

Les fluctuations d'émissions sont traduites en cartes de concentration de différents polluants sur la France avec le méta-modèle ACT, mais nous nous focalisons ici sur des moyennes sur l'ensemble du territoire français pour les PM_{2.5}.

La comparaison des réductions de concentrations obtenues en prenant en compte les émissions estimées pour 2022/2023 montre que, bien que la tendance globale soit généralement semblable, l'impact sur la qualité de l'air n'est pas totalement corrélé aux changements d'émissions.

Les réductions de concentrations en PM_{2.5} présentées en Figure 2 sont plus faibles que les réductions d'émissions de PM_{2.5} primaires. Ce résultat est lié d'une part à la non-linéarité du processus de formation des particules dans l'atmosphère : ces concentrations comprennent des particules fines primaires (PPM) mais également des particules fines secondaires, formées par condensation de gaz, tel que les COVNM, les NO_x, le SO₂ ou le NH₃. D'autre part, les concentrations de PM_{2.5} sont aussi alimentées par des émissions naturelles (telles que les poussières désertiques ou les aérosols organiques secondaires issus des COVNM biogéniques) indépendantes des émissions anthropiques.

¹¹ Un polluant est dit « primaire » lorsqu'il est directement rejeté dans l'atmosphère par une source d'émissions (anthropique ou naturelle). Un polluant est dit « secondaire » lorsqu'il est formé par transformation chimique d'espèces déjà présentes dans l'air.

3.2 Impacts relatifs de la crise énergétique et du climat de l'hiver 2022/2023

Le scénario 2022/2023 du Citepa est basé sur des statistiques de consommation énergétique. Il tient donc compte à la fois des mesures de sobriété et de l'effet des écarts de température pendant l'hiver 2022/2023 par rapport à 2021/2022. Afin d'avoir un aperçu de la contribution de la crise énergétique seule sur la pollution de l'air, l'« effet climatique » est isolé, c'est-à-dire la quantification de l'effet moyen du climat de l'hiver 2022/2023 par rapport à l'année précédente sur la consommation du secteur résidentiel (et non un éventuel effet du changement climatique comme cela peut être fait dans les études d'attribution).

A cet effet, le différentiel sur les émissions résidentielles est évalué à partir de cette corrélation entre l'écart de température et la consommation énergétique du secteur résidentiel. La sensibilité météorologique pour les autres secteurs d'activité n'est pas considérée dans cette approche. Le résultat obtenu permet d'isoler l'effet sobriété et est désigné sous le nom de « crise énergétique seule ».

Les séries temporelles de la Figure 3 (concentrations) et de la Figure 4 (différences relatives) montrent d'une part l'effet de l'écart entre les émissions des hivers 2021/2022 et 2022/2023 (estimations du baromètre Citepa), et d'autre part la décomposition de l'effet climatique seul et de l'effet de la crise énergétique seule. La Figure 5 reprend ces différences relatives de concentration de $PM_{2.5}$ en moyenne mensuelle et les compare aux différences de températures mensuelles entre les hivers 2021/2022 et 2022/2023.

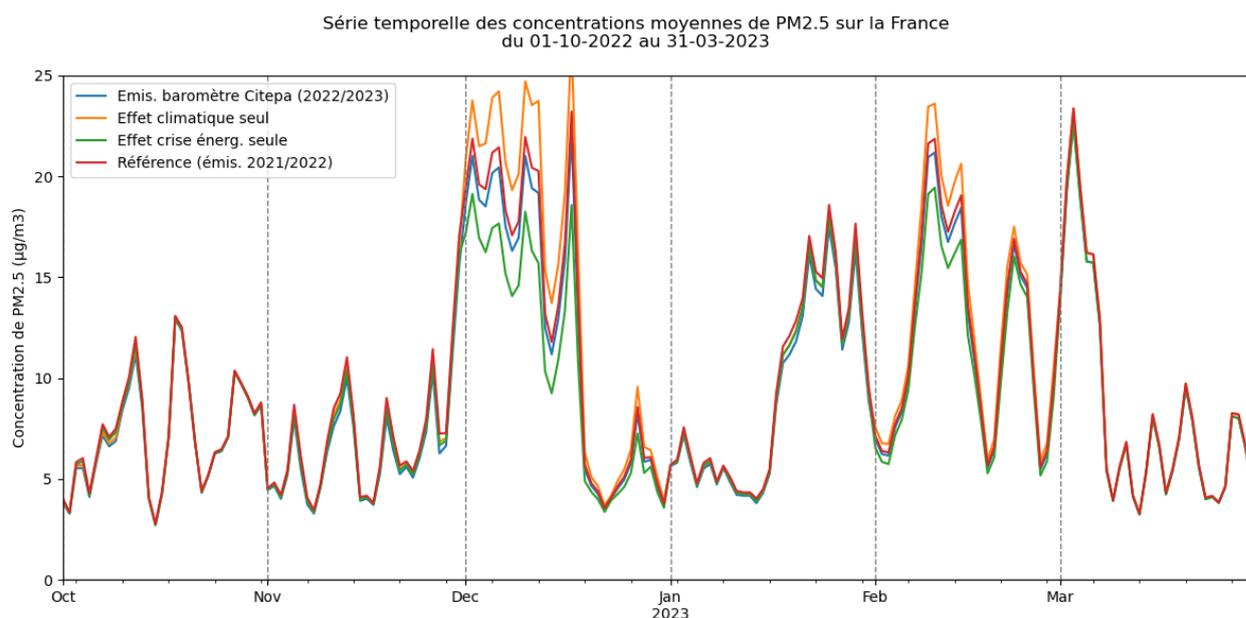


Figure 3 : Séries temporelles des concentrations moyennes de $PM_{2.5}$ sur la France ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour les mois d'octobre 2022 à mars 2023. Concentrations avec les émissions estimées pour 2022/2023 (bleu), avec le scénario de référence (rouge), et avec uniquement l'effet climatique (orange) ou uniquement l'effet de la crise énergétique (vert).

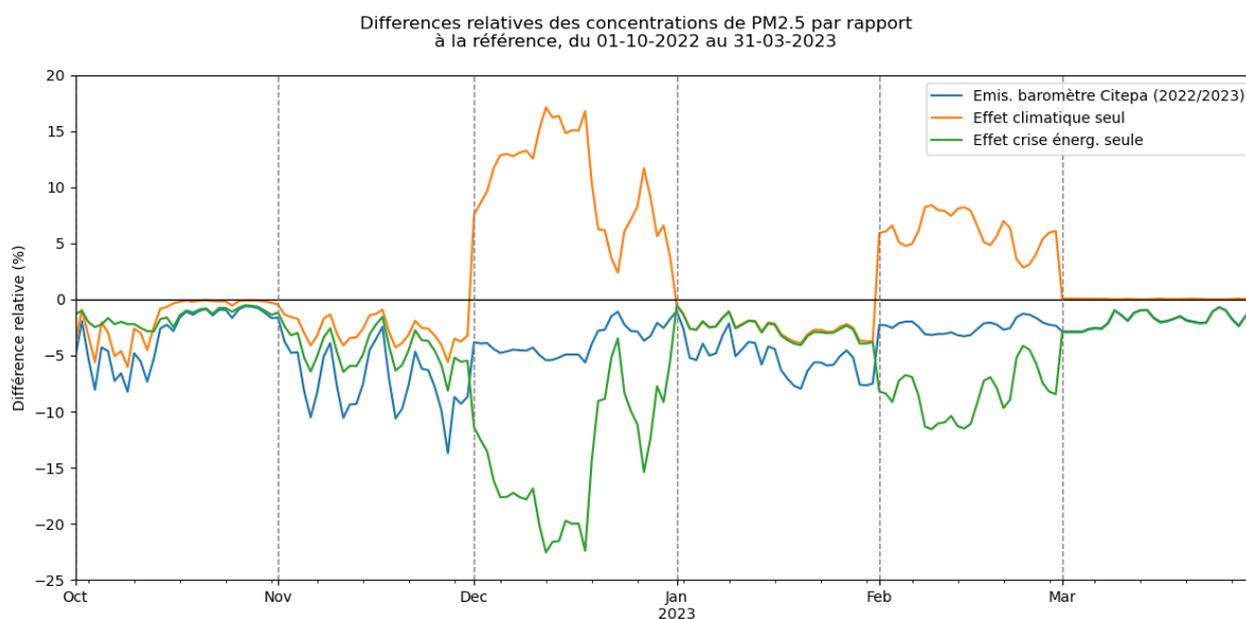


Figure 4 : Différences relatives (%) entre les concentrations de PM_{2.5} des différents scénarios et la référence (scénario hypothétique avec la météorologie de l'hiver 2022/2023 mais les émissions de l'hiver 2021/2022) sur la France pour les mois d'octobre 2022 à mars 2023.

Sur l'ensemble de la période, les concentrations obtenues avec les émissions estimées par le Citepa pour l'année 2022/2023 indiquent une baisse par rapport à la référence. Pour les mois d'octobre, novembre, janvier et mars, la part due à l'effet climatique est faible et induit une baisse des concentrations de PM_{2.5}. A l'inverse, des vagues de froid ont eu lieu au cours des mois de décembre et février, celles-ci n'étaient pas extrêmes mais néanmoins plus froides que les moyennes respectives des mois de décembre 2021 et février 2022. Lors de ces périodes, les anomalies par rapport à l'hiver précédent auraient contribué à augmenter les pics de concentration de PM_{2.5} de +12% en décembre et de +6% en février, en moyenne mensuelle (Figure 5).

Les concentrations obtenues à partir des émissions estimées par le Citepa ayant cependant diminué de respectivement -4 et -2,5% pour les mois de décembre et février, la crise énergétique seule aurait donc contribué à réduire de -16 et -8,5% les concentrations de PM_{2.5} totales de ces deux périodes par rapport à l'année précédente. Ces différences sont exprimées par rapport à l'hiver précédent, ce qui ne remet pas en cause le fait que l'hiver 2022/2023 était doux par rapport à la normale, mais néanmoins plus froid que l'hiver 2021/2022.

Pour les autres mois de l'hiver 2022/2023 (octobre et novembre 2022, et janvier et mars 2023), l'anomalie climatique est plutôt dans le sens d'un hiver plus doux, et donc une tendance à la baisse des émissions qui vient s'ajouter à l'effet de la crise énergétique. En octobre et janvier, la crise énergétique aurait contribué pour moitié environ aux réductions de concentrations de PM_{2.5} de respectivement -3 et -5,7% évaluées par le modèle, et pour un peu moins des deux tiers en novembre, où les réductions de concentrations atteignent -8% en moyenne mensuelle.

En mars, les effets climatiques étant quasiment nuls, il semblerait que seule la crise énergétique ait influencé les réductions de concentrations, qui sont toutefois elles-mêmes assez faibles avec -2% de moyenne mensuelle.

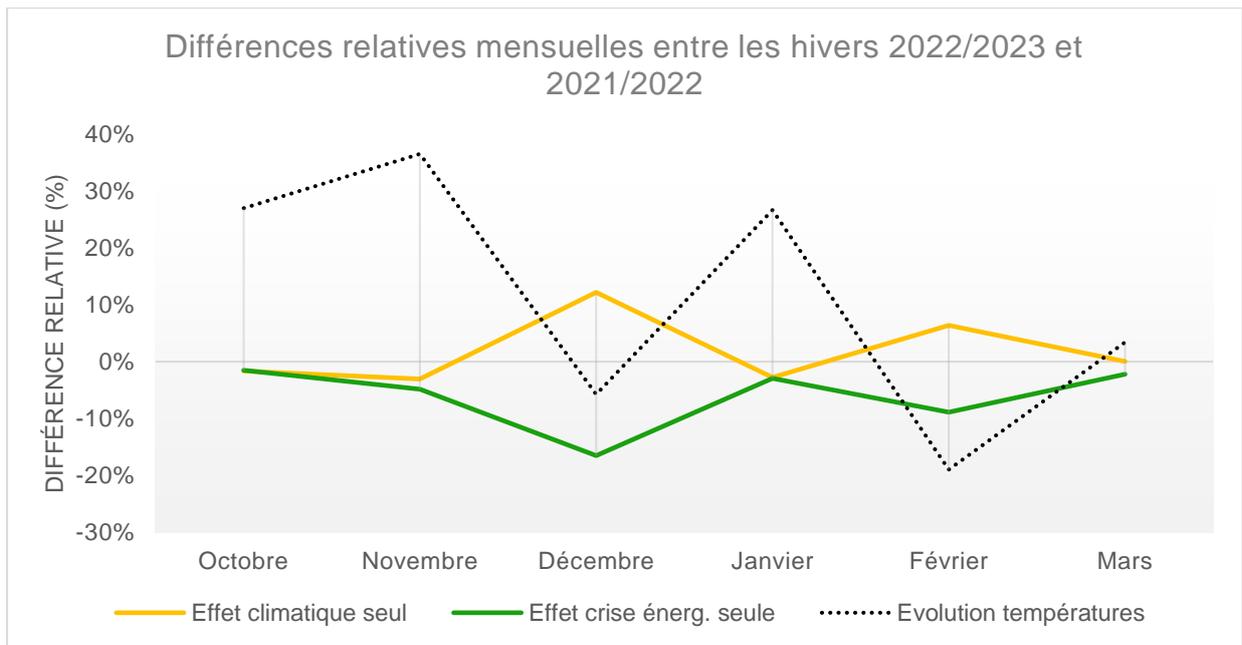


Figure 5 : Différences relatives des concentrations de PM_{2.5} pour les effets climatiques seuls (orange) et les effets crise énergétique seule (vert) en moyenne mensuelle (%), mises en perspective avec l'écart de température entre les hivers 2021/2022 et 2022/2023

4 Conclusion

Les données d'émissions du baromètre mensuel du Citepa ont été intégrées dans le système de modélisation de la qualité de l'Air Control Toolbox (ACT) afin de simuler les concentrations de polluants dans l'air pour l'hiver 2022/2023. Le méta-modèle ACT est développé par l'Ineris dans le cadre du Service Copernicus pour la Surveillance de l'Atmosphère et basé sur le modèle de chimie-transport CHIMERE.

Les particularités de cet hiver, à savoir la crise énergétique mais aussi les anomalies météorologiques, ont entraîné conjointement une diminution des concentrations de $PM_{2.5}$ sur l'ensemble du territoire métropolitain. Si la baisse d'émission de particules primaires rapportées par le Citepa était estimée à -8% sur les trois mois d'hiver (décembre, janvier, février), nous évaluons le bénéfice sur les concentrations de $PM_{2.5}$ dans l'air ambiant à -4,2%. Ce bénéfice moindre est dû au rôle des autres précurseurs sur les aérosols secondaires mais aussi à l'existence de particules fines non-anthropiques.

En croisant ces résultats avec un scénario tenant compte de l'effet de la météorologie sur le chauffage résidentiel, il a été possible de cibler plus précisément les effets de la crise énergétique seule sur la pollution de l'air durant les mois d'octobre 2022 à mars 2023. Il est indéniable que la crise énergétique a eu un fort impact sur la qualité de l'air durant les mois de l'hiver 2022/2023 et a entraîné une baisse des concentrations de $PM_{2.5}$ qui varierait entre -2 et -16% selon les mois considérés. L'impact le plus important a eu lieu durant les périodes où les températures étaient très basses, notamment en décembre (contribution de -16% de réduction sur les concentrations en moyenne mensuelle) et en février (contribution de -8,5% de réduction en moyenne). En moyenne sur les trois mois d'hiver météorologique (décembre 2022 à février 2023), l'écart des concentrations de $PM_{2.5}$ par rapport à ce qui aurait été obtenu pour les mêmes conditions météorologiques mais avec les émissions de l'hiver précédent est de $-0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (-4,2%). Cet effet net est le résultat d'un bénéfice d'environ -9,5% imputable à la crise énergétique et d'une augmentation de +5,3% liée aux conditions climatiques.

Il faut noter que l'« effet climatique » évoqué dans ce rapport fait référence aux écarts entre le climat constaté pendant l'hiver 2022/2023 par rapport à l'hiver 2021/2022. Il ne s'agit pas d'une quantification de l'effet du changement climatique. Bien que le réchauffement futur doive conduire dans les années qui viennent à augmenter les températures moyennes, y compris hivernales, il demeurera des périodes de froid qui conduiront à la formation d'épisodes de pollution. Par ailleurs, si l'hiver 2022/2023 a été plus doux que la normale (de $+0,8^\circ\text{C}$ d'après Météo-France), l'hiver précédent était encore plus doux ($+1,2^\circ\text{C}$ au-dessus de la normale).

Une réserve méthodologique doit néanmoins être notée concernant les émissions de particules du chauffage au bois dont le différentiel d'émission par rapport à 2021 n'est pas comptabilisé dans le baromètre du Citepa. Cela est dû à l'absence de statistiques rapidement disponibles, même si ces émissions sont bien sûr incluses dans les inventaires usuels qui ne seront disponibles qu'en 2024 pour l'année 2022. Seul l'effet de la crise énergétique sur la sobriété, subie ou voulue, et donc sur les émissions de polluants a été évoqué ici, mais il serait également à craindre un report d'une source d'énergie vers une autre, et donc par exemple un recours accru au chauffage au bois qui aurait pu augmenter les émissions de polluants. Il faudra revenir à l'avenir sur les estimations proposées ici pour mieux quantifier cet effet.

Pour résumer, si on se limite aux trois mois d'hiver météorologique (décembre 2022 à février 2023) en comparaison de l'hiver 2021/2022, la baisse des émissions de particules primaires de -8% chiffrée par le Citepa s'est traduite par une baisse des concentrations de $PM_{2.5}$ dans l'air ambiant de -4,2%. L'hiver 2022/2023 fut relativement doux, mais dans une moindre mesure que 2021/2022. La baisse de -4,2% des concentrations de $PM_{2.5}$ est donc le résultat d'une part de la crise énergétique qui aurait contribué à réduire de -9,5% les concentrations, alors que d'autre part la climatologie de l'hiver 2022/2023 aurait plutôt conduit à une augmentation de 5,3% par rapport à l'année précédente.

La baisse de -9,5% imputable aux mesures de sobriété pendant l'hiver 2022/2023 doit être mise en perspective avec l'évolution de long terme des particules fines en France. Dans un rapport pour l'Agence Européenne de l'Environnement¹², il a été estimé qu'en France les concentrations de PM_{10} ont baissé de 2,9% par an entre 2005 et 2021. Pendant la période du confinement du printemps 2020, la réduction

¹² Gbangou, T., Colette, A., Long-term trends of air pollutants at European and national level 2005-2021, European Topic Centre on Health and Environment, à paraître, 2023, 68pp.

des concentrations de particules en France a été de l'ordre de 10 à 15% (c'est pour le NO₂, plus lié au trafic routier, que la baisse a pu atteindre plus de 50%)¹³. Rapportée sur toute l'année 2020, la baisse des concentrations de particules était plutôt de l'ordre de 2 à 5%^{14,15}. Les raisons qui sous-tendent les baisses de concentrations de particules n'ont absolument rien à voir lorsque l'on considère (i) l'évolution de long terme entre 2005 et 2021, (ii) la période des confinements en 2021, (iii) la crise énergétique de 2022/2023. Leur mise en perspective permet néanmoins de noter que l'effet des mesures de sobriété prises à l'hiver 2022/2023 est tout à fait significatif.

¹³ Schneider, R., Masselot, P., Vicedo-Cabrera, A.M. et al. Differential impact of government lockdown policies on reducing air pollution levels and related mortality in Europe. *Sci Rep* 12, 726 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04277-6>

¹⁴ Medina S, Adélaïde L, Wagner V, de Crouy Chanel P, Real E, Colette A, Couvidat F, et al. Impact de pollution de l'air ambiant sur la mortalité en France métropolitaine. Réduction en lien avec le confinement du printemps 2020 et nouvelles données sur le poids total pour la période 2016-2019. Saint-Maurice : Santé publique France, 2021. 63 p. Disponible à partir de l'URL : www.santepubliquefrance.fr

¹⁵ Bartonova, A., Colette, A., Zhang, H., Fons, J., Liu, H.-Y., Brzezina, J., Chantreux, A., Couvidat, F., Guerreiro, C., Guevara, M., Kuenen, J.J.P., Solberg, S., Super, I., Szanto, C., Tarrason, L., Thornton, A., Gonzalez-Ortiz A., 2022, The Covid-19 pandemic and environmental stressors in Europe: synergies and interplays, ETC ATNI report 2021/16, Kjeller

Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Indicateurs d'évolution des émissions issus des données du Citepa
- Annexe 2 : Indicateurs de la sensibilité climatique des émissions résidentielles
- Annexe 3 : Comparaison de l'utilisation d'indicateurs journaliers ou mensuels
- Annexe 4 : Températures sur la période

Annexe 1 : Indicateurs d'évolution des émissions issus des données du Citepa

Alors que les inventaires d'émission et le baromètre mensuel du Citepa fournissent des chiffres d'émission par secteur et par polluant, le méta-modèle ACT requiert comme données d'entrée une baisse relative qui s'applique sur l'ensemble d'un secteur.

Trois approches ont été expérimentées pour représenter une agrégation par secteur d'émissions à partir des évolutions différenciées des émissions de polluants de ce secteur :

- l'une utilisant les évolutions d'émissions de CO₂ équivalent¹⁶,
- la seconde utilisant les évolutions d'émissions de PPM_{2.5} (PM_{2.5} primaires),
- la dernière utilisant une combinaison linéaire des évolutions d'émissions de cinq précurseurs (COVNM, PPM_{2.5}, SO₂, NO_x et NH₃).

Les deux premières approches sont une lecture directe des résultats diffusés par le Citepa, tandis que la troisième tient compte, pour les espèces sélectionnées, de l'importance relative de chaque précurseur pour chaque secteur d'émission via l'équation :

$$sect = a * evol_{COVNM} + b * evol_{ppm25} + c * evol_{SO2} + d * evol_{NOx} + e * evol_{NH3}$$

Où *sect* est l'indicateur de chaque secteur ; les *evol_x* sont les pourcentages d'évolution des émissions de chaque précurseur fournis dans le baromètre du Citepa ; et les coefficients *a*, *b*, *c*, *d*, et *e* sont calculés à partir de l'importance respective de chaque secteur pour chaque précurseur, normalisés de sorte que :

$$a + b + c + d + e = 1$$

Ces trois approches ont été regroupées dans le Tableau 2. Seuls les mois d'octobre à décembre 2022 sont présentés ici, les figures associées étant séparées dans des sections distinctes (A, B et C) pour plus de lisibilité.

Exprimés en pourcentages, ces indicateurs correspondent à l'évolution des émissions de chaque secteur entre 2021 et 2022. Notons une forte réduction commune d'environ -30% des émissions du secteur résidentiel sur les mois d'octobre et novembre.

Tableau 2 : Indicateurs d'évolution des émissions de chaque secteur de ACT entre 2021 et 2022 pour chacune des approches envisagées, en pourcentage (%), pour les mois d'octobre, de novembre et de décembre 2022

	Approche CO ₂ e			Approche PM _{2.5}			Approche composite		
	Indicateurs basés sur les émissions de CO ₂ e			Indicateurs basés sur les émissions de PPM _{2.5}			Indicateurs basés sur une combinaison linéaire des émissions de COVNM, PPM _{2.5} , SO ₂ , NO _x et NH ₃		
	Oct.	Nov.	Déc.	Oct.	Nov.	Déc.	Oct.	Nov.	Déc.
Agriculture	-1,9	-0,27	-0,54	-3,9	-0,31	0,15	-0,7	0,15	0,02
Trafic	-3,1	-1,1	-3,2	-2,8	-1,8	-4,3	-3,1	-1,9	-4,1
Résidentiel	-35,3	-29,2	-10,1	-33,5	-29,8	-7,2	-29,3	-25,7	-7,6
Industriel	-6,3	-14,8	-6,2	-7,8	-3,4	-2,4	-10,2	-8,4	-7,0

Soulignons que les chiffres exprimés dans le Tableau 2 sont des pourcentages relatifs aux totaux d'émissions diffusés par le Citepa. Les Tableau 3 et Tableau 4 reprennent ces données pour les précurseurs précités, pour mettre en évidence le poids respectif de chaque secteur dans les émissions

¹⁶ L'équivalent CO₂ (CO₂e) est une unité de mesure qui uniformise l'impact et la durée de vie dans l'atmosphère des six principaux gaz à effet de serre. Ces gaz sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), l'hexafluorure de soufre (SF₆), les hydrofluorocarbures (HFC) et les perfluorocarbures (PFC).

totales. Par exemple, pour le CO_{2e}, ce sont les secteurs industriels et trafic qui sont prépondérants, tandis que les émissions de PM_{2.5} primaires sont dominées par le secteur résidentiel.

Tableau 3 : Estimations d'émissions de CO_{2e} et de PPM_{2.5} pour l'année 2021 (source : Citepa)

	Emissions de CO _{2e} (MtCO _{2e})			Emissions de PPM _{2.5} (kt)		
	Oct.	Nov.	Déc.	Oct.	Nov.	Déc.
Agriculture	6,5	5,7	5,0	1,0	1,0	1,1
Trafic	11,2	10,7	11,1	1,7	1,6	1,7
Résidentiel	5,8	8,1	9,4	4,8	8,0	9,0
Industriel	10,1	12,2	12,4	1,8	1,9	1,8

Tableau 4 : Estimations d'émissions de COVNM, SO₂, NO_x et HN₃ pour l'année 2021 (source : Citepa)

	Emissions de COVNM (kt)			Emissions de SO ₂ (kt)			Emissions de NO _x (kt)			Emissions de NH ₃ (kt)		
	Oct.	Nov.	Déc.	Oct.	Nov.	Déc.	Oct.	Nov.	Déc.	Oct.	Nov.	Déc.
Agriculture	35,5	33,1	29,9	0,04	0,05	0,1	6,9	5,1	3,6	39,9	30,3	18,9
Trafic	5,2	4,8	5,1	0,2	0,2	0,2	33	31	32	0,4	0,4	0,4
Résidentiel	20,3	26,4	28,2	1,4	1,4	1,7	6,1	8,5	9,8	1,5	2,5	2,9
Industriel	19,8	20,0	18,7	7,1	7,1	6,6	11,6	13,2	13,2	0,7	0,7	0,8

Sélection d'une approche

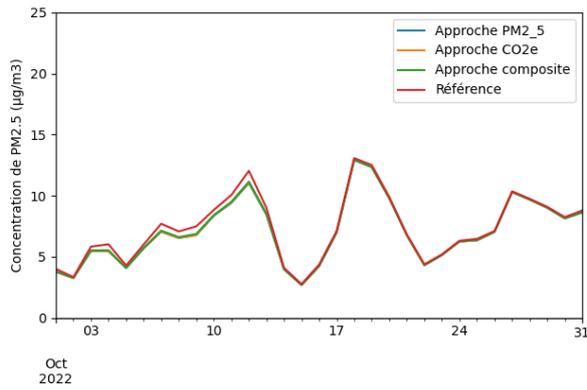
Les trois approches détaillées ci-dessus ont été appliquées aux moyennes journalières des concentrations de PM_{2.5} issues des prévisions ACT effectuées dans le cadre du Policy Service CAMS, pour les mois d'octobre, de novembre, et de décembre 2022. Les résultats ont été étudiés par le biais de séries temporelles des concentrations moyennes sur la France et de cartes des concentrations moyennes sur chaque mois. Les différences relatives entre les concentrations de référence et les concentrations des diverses approches ont été calculées dans chaque cas pour faciliter la visualisation de l'impact des scénarios sur les concentrations de PM_{2.5}.

Quel que soit le mois considéré, il a été constaté que les trois approches montrent des résultats très similaires, aussi bien temporellement que spatialement. L'approche composite étant cependant légèrement plus « conservative » que les deux autres dans la plupart des cas, avec des réductions de concentrations moindres, seule celle-ci a été conservée pour l'étude.

A. Octobre

En octobre, les réductions d'émissions ont eu une influence plus marquée sur la première moitié du mois, réduisant les concentrations de PM_{2.5} d'environ 6%, tandis que les PM_{2.5} de la seconde moitié du mois ont été émis par des sources principalement naturelles, menant à un faible impact des émissions anthropiques sur les concentrations, de l'ordre de -2% (Figure 6). Sur l'ensemble du mois, les concentrations ont été réduites en moyenne de respectivement -3,4, -3,7, et -3,2% pour les approches CO_{2e}, PM_{2.5} et composite, ce qui confirme le diagnostic d'équivalence entre les différentes approches.

Série temporelle des concentrations moyennes de PM2.5 sur la France du 01-10-2022 au 31-10-2022



Différences relatives des concentrations de PM2.5 par rapport à la référence, du 01-10-2022 au 31-10-2022

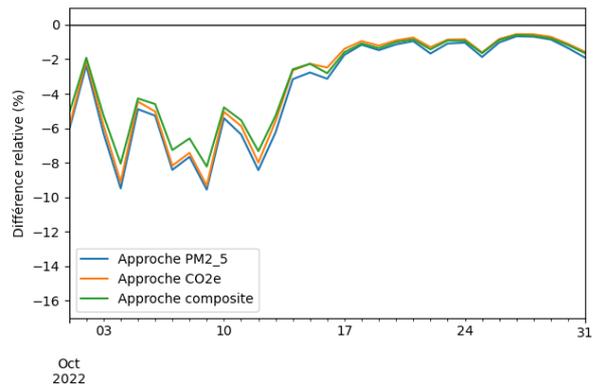


Figure 6 : Séries temporelles des concentrations moyennes de $PM_{2.5}$ sur la France pour toutes les approches (gauche) et différences relatives avec les concentrations de référence (droite) entre le 1^{er} et le 31 octobre 2022

Les réductions de concentrations sont principalement localisées dans le quart nord-est de la France et sur les départements de Savoie et Haute-Savoie (Figure 7).

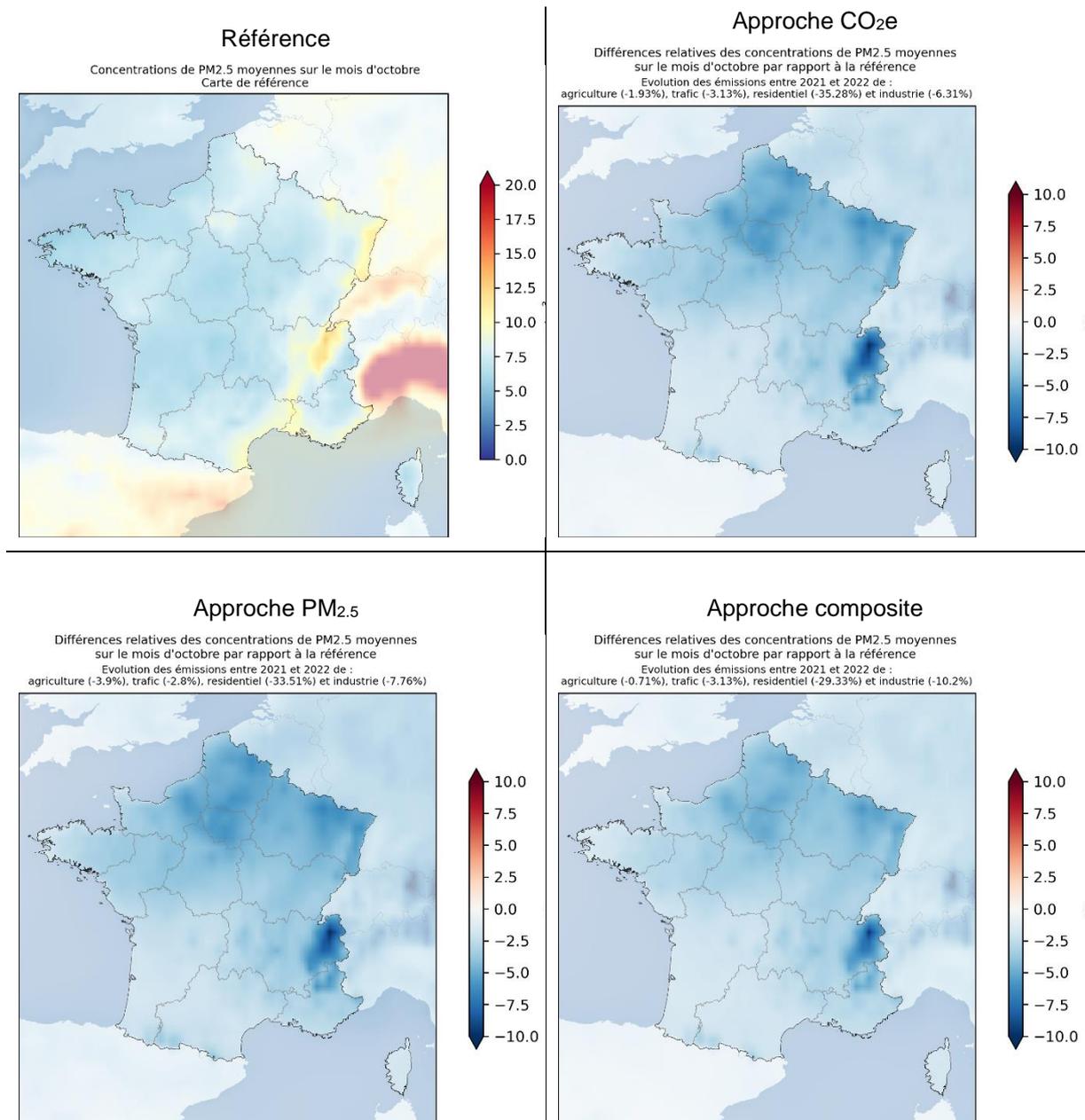


Figure 7 : Carte des concentrations moyennes de référence de PM_{2.5} (µg/m³) sur le mois d'octobre (haut à gauche) et cartes des différences relatives (%) entre les concentrations des trois approches et les concentrations de référence

B. Novembre

Pour tout le mois de novembre, les différentes approches montrent une réduction des concentrations qui est d'autant plus marquée que les concentrations de $PM_{2.5}$ sont élevées, avec jusqu'à -10 à -12% pour les pics constatés autour du 5, du 13 et du 19 novembre (Figure 8). Sur l'ensemble du mois, les concentrations ont été réduites en moyenne de respectivement -8,4, -7,9, et -7,2% pour les approches CO_{2e}, $PM_{2.5}$ et composite.

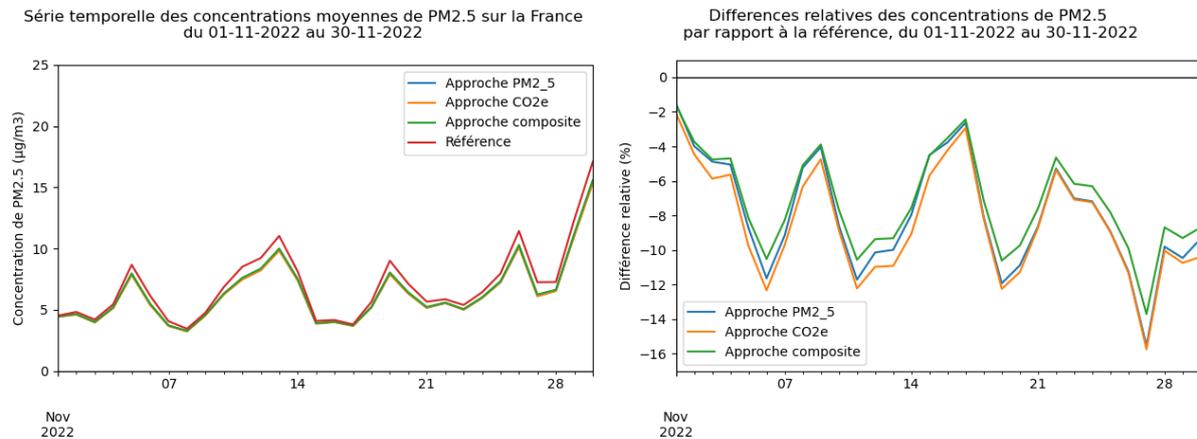


Figure 8 : Séries temporelles des concentrations moyennes de $PM_{2.5}$ sur la France pour toutes les approches (gauche) et différences relatives avec les concentrations de référence (droite) entre le 1^{er} et le 30 novembre 2022

Les réductions de concentrations sont plus marquées dans l'est de la France (particulièrement dans le quart sud-est) et en Ile-de-France (Figure 9).

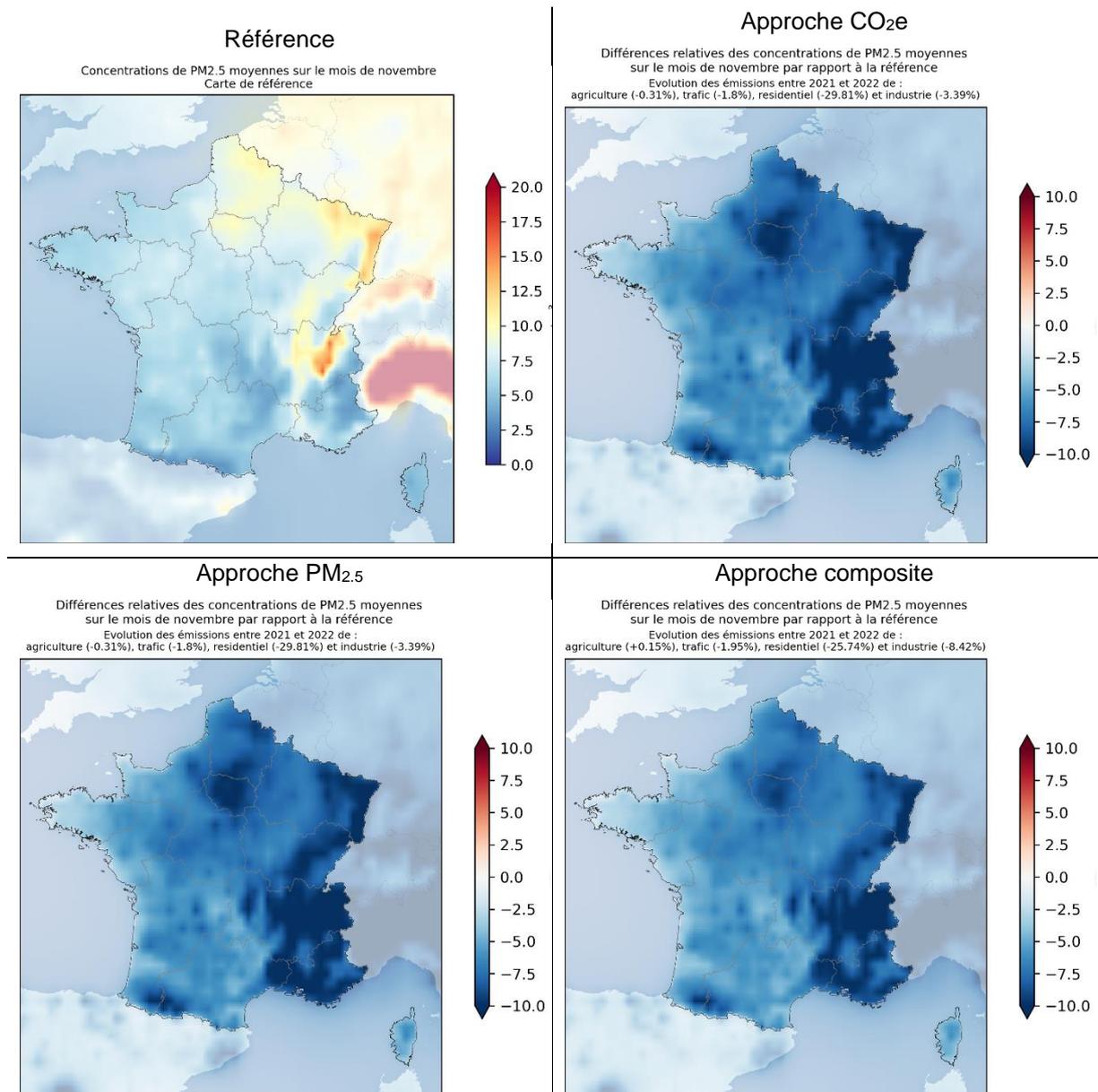


Figure 9 : Carte des concentrations moyennes de référence de PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur le mois de novembre (haut à gauche) et cartes des différences relatives (%) entre les concentrations des trois approches et les concentrations de référence

C. Décembre

En décembre, les concentrations de $PM_{2.5}$ ont été très élevées jusqu'au 18/12, en lien avec des concentrations de PM_{10} également plus élevées et, contrairement à octobre et novembre, des températures plus faibles qu'en 2021 (cf. Annexe 4, Figure 14). Cependant, aucune des trois approches ne montre d'augmentation des concentrations par rapport à l'année précédente. Au contraire, le Citepa relevait encore de légères réductions des émissions : jusqu'à -10% pour le secteur résidentiel pour le scénario CO_2e , et jusqu'à quasiment -7% pour le secteur industriel pour les approches composite et CO_2e .

Les concentrations sont réduites d'environ -4% jusqu'au 18/12, puis d'environ -2% ensuite (Figure 10). Du 1^{er} au 31 décembre, les concentrations ont été réduites en moyenne de respectivement -4,6, -3,3, et -3,8% pour les approches CO_2e , $PM_{2.5}$ et composite.

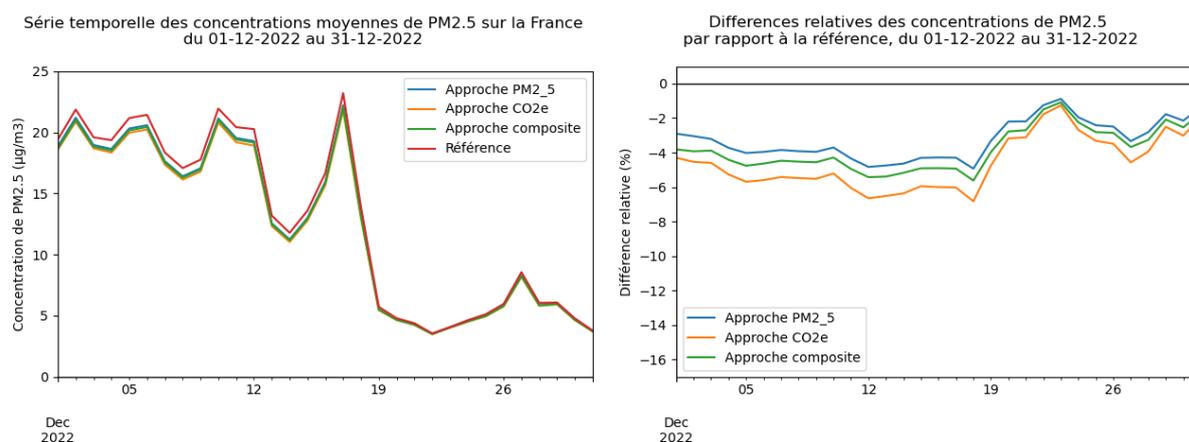


Figure 10 : Séries temporelles des concentrations moyennes de $PM_{2.5}$ sur la France pour toutes les approches (gauche) et différences relatives avec les concentrations de référence (droite) entre le 1^{er} et le 31 décembre 2022

Les réductions de concentrations sont réparties de manière très homogène sur tout le territoire français (Figure 11). Elles sont légèrement plus marquées dans l'est de la région Auvergne-Rhône-Alpes et dans les environs de Tarbes.

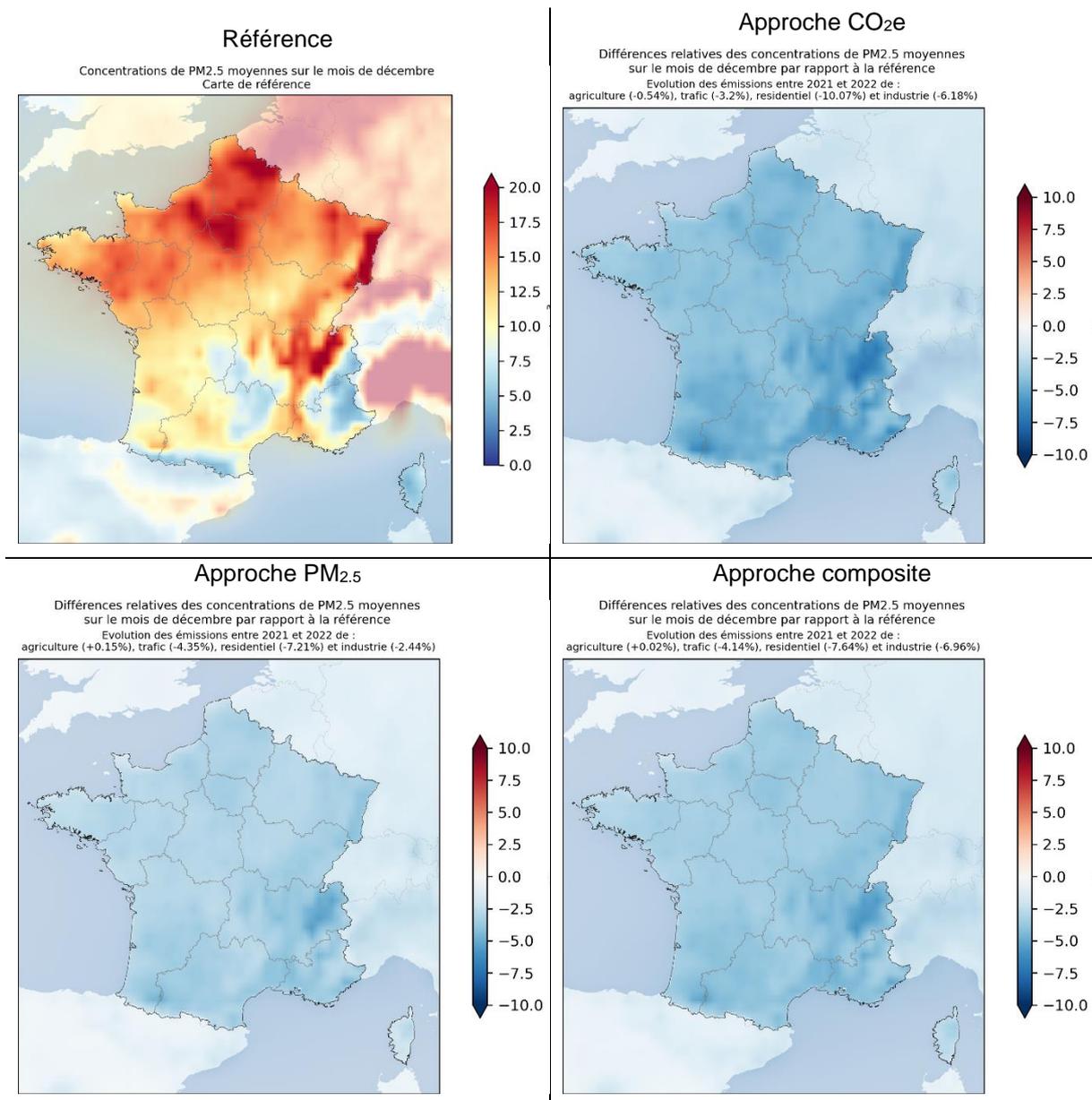


Figure 11 : Carte des concentrations moyennes de référence de PM_{2.5} (µg/m³) sur le mois de décembre (haut à gauche) et cartes des différences relatives (%) entre les concentrations des trois approches et les concentrations de référence

Annexe 2 : Indicateurs de la sensibilité climatique des émissions résidentielles

L'évolution temporelle du recours au chauffage peut être approximée à partir du concept de « degré jour de chauffage » (*Heating Degree Days*, HDD). Les HDD sont calculés pour chaque jour (d) de l'année et à chaque point de longitude (i) et de latitude (j) à partir d'un différentiel de température (Équation 1). Ce différentiel repose sur l'écart entre une température de référence à partir de laquelle le chauffage est activé (T_{heat}) et la température ambiante extérieure (T_{2m}) pour un jour et un endroit donné (i, j, d). Cela permet ensuite de déduire un facteur temporel d'activité (TF) qui distribue la fluctuation de l'intensité du chauffage autour d'une valeur moyenne annuelle égale à 1 (Équation 2).

Dans le contexte de cette analyse, ce facteur ' TF ' est calibré à partir d'une régression linéaire entre la température à 2m moyenné sur l'ensemble du territoire métropolitain et les données ouvertes disponibles de consommation de gaz nationales, à une fréquence journalière.

$$HDD(i, j, d) = \max(T_{heat} - T_{2m}(i, j, d), 0)$$

Équation 1 - Degré jour chauffage.

$$TF(i, j, d) = \frac{1}{N} \times f + \frac{HDD(i, j, d)}{\sum_{d=1}^N HDD(i, j, d)} \times (1 - f)$$

Équation 2 - Facteur temporel d'activité TF (N étant le nombre total de jours de l'année considérée).

Il s'agit donc de calibrer les paramètres ' T_{heat} ' et ' f ' à partir de données statistiques. Pour la France, nous avons accès aux données de consommation nationale journalière de gaz (distribution publique, c'est-à-dire excluant l'industrie et la production d'énergie) entre 2015 et 2018 fournies par le gestionnaire du réseau de transport de gaz naturel GRTgaz (<https://www.grtgaz.com/>). Les données spatialisées de température proviennent des réanalyses fournies par le programme européen Copernicus (Climate Data Store, <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>) à une résolution spatiale de 0.25°.

Les paramètres ' T_{heat} ' et ' f ', avec une valeur respective de 16.9°C et 0.16, représentent la solution numérique minimisant l'erreur (Figure 12). L'utilisation de deux facteurs d'ajustement (T_{heat} et f) permet de tenir compte du fait que le gaz dans la distribution publique est utilisé à la fois pour le chauffage (majoritaire et météo-dépendant), et pour d'autres activités telles que la cuisson et la production d'eau chaude.

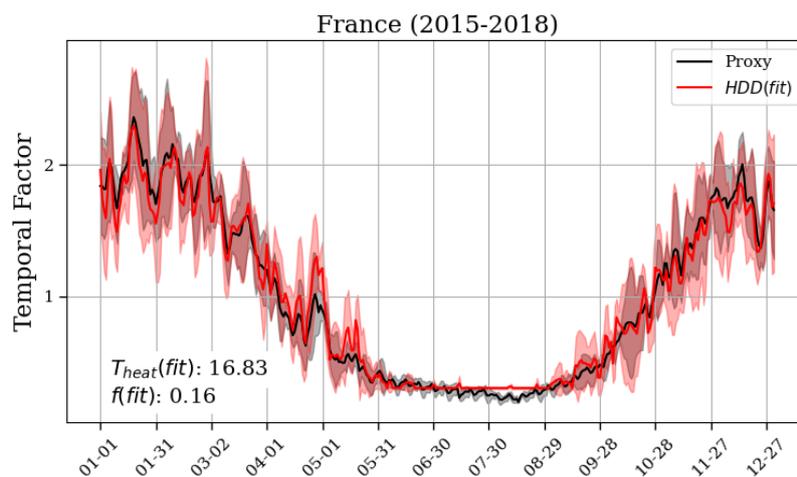


Figure 12 – Facteur temporel d'activité ajusté aux données de consommation nationale fournies par GRTgaz pour les années 2015 à 2018 en moyenne sur la période (rouge et noir, pour le fit : HDD(fit) et les données GRTgaz : proxy, respectivement) et l'enveloppe représentant deux fois l'écart type interannuel (rouge et grisé, respectivement).

A partir de la méthode présentée ci-dessus, le facteur temporel d'activité ' TF ' moyenné sur la France a été calculé pour la période octobre – mars pour 2021-2022 et 2022-2023 en normalisation par la somme des HDD conformément à l'Equation 2. La moyenne de ' TF ' sur la période considérée est donc unitaire par construction. La consommation de gaz domestique pour une période donnée (et donc les émissions de polluants du secteur domestique) est plus importante que la consommation moyenne quand TF est supérieur à 1.

L'évolution des émissions résidentielles attribuables aux conditions météorologiques est directement la différence relative entre les facteurs temporels d'activité TF des deux hivers considérés. Les valeurs obtenues dans le cas de cette étude sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Moyennes mensuelles des différences relatives entre les facteurs temporels d'activité TF de l'hiver 2022/2023 et de l'hiver 2021/2022 (%)

	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.
Secteur Résidentiel	-28,7	-11,1	+29,5	-6,98	+12,9	+0,15

Cette méthode présente toutefois plusieurs limites qui viennent nuancer l'interprétation des résultats, notamment :

- Sensibilité importante du facteur d'activité, et donc des pics de consommation en ressources pour le chauffage (et des émissions liées), aux paramètres T_{heat} et f dans le calcul des HDD. Le paramètre T_{heat} est défini comme étant la température extérieure à partir de laquelle le bâtiment n'est plus chauffé et f comme la part d'activité liée à la consommation des ressources hors chauffage (non météo-dépendante).
- Spatialisation homogène des paramètres des HDD. Les paramètres sont ajustés au niveau national du fait de la disponibilité des données de consommation de gaz à ce niveau. Cependant, des différences importantes en termes d'habitude de chauffage peuvent être attendues selon les régions, notamment du fait des caractéristiques d'isolation des logements et des ressources énergétiques utilisées.

Annexe 3 : Comparaison de l'utilisation d'indicateurs journaliers ou mensuels

Les indicateurs de la sensibilité climatique des émissions résidentielles sont déterminés en valeurs journalières, selon la méthodologie décrite en Annexe 2, mais seule la moyenne mensuelle est utilisée dans l'étude par analogie avec les données du baromètre Citepa (disponibles uniquement en valeurs mensuelles). Afin de vérifier que cela ne modifie pas les conclusions de l'étude, le scénario « effet climatique » a été calculé à partir des indicateurs journaliers puis comparé au scénario calculé à partir des indicateurs mensuels. Le scénario « effet crise énergétique » a également été déterminé en version journalière pour comparaison avec la version mensuelle.

La Figure 13 présente les différences relatives ainsi obtenues entre la référence et ces différents scénarios, en moyennes mensuelles. Les scénarios en version journalière obtiennent des différences relatives moyennes plus élevées (en valeur absolue) que dans le cas des versions mensuelles, notamment en décembre où les fortes variations de température au cours du mois ont induit une grande variabilité des concentrations dans les versions journalières, avec des maxima bien plus élevés que ce qui est obtenu avec des indicateurs en moyenne mensuelle. Par exemple, pour le scénario « effet climatique », le maximum des différences relatives sur toute la période est atteint le 12 décembre : +60% avec l'indicateur journalier, contre +17% seulement avec l'indicateur mensuel. Pour autant, les différences relatives en moyenne mensuelle montrent des écarts limités entre indicateurs journaliers et indicateurs mensuels, avec une préservation des tendances et des ordres de grandeur. Par exemple en décembre, la moyenne mensuelle des différences relatives du scénario « effet climatique » est de +14,6% dans le cas des indicateurs journaliers, contre +10,6% pour les indicateurs mensuels, et constitue dans les deux cas la différence relative maximale obtenue sur la période.

Bien que l'utilisation des indicateurs en moyenne mensuelle lisse les résultats par rapport à des indicateurs journaliers, les conclusions de l'étude demeurent inchangées.

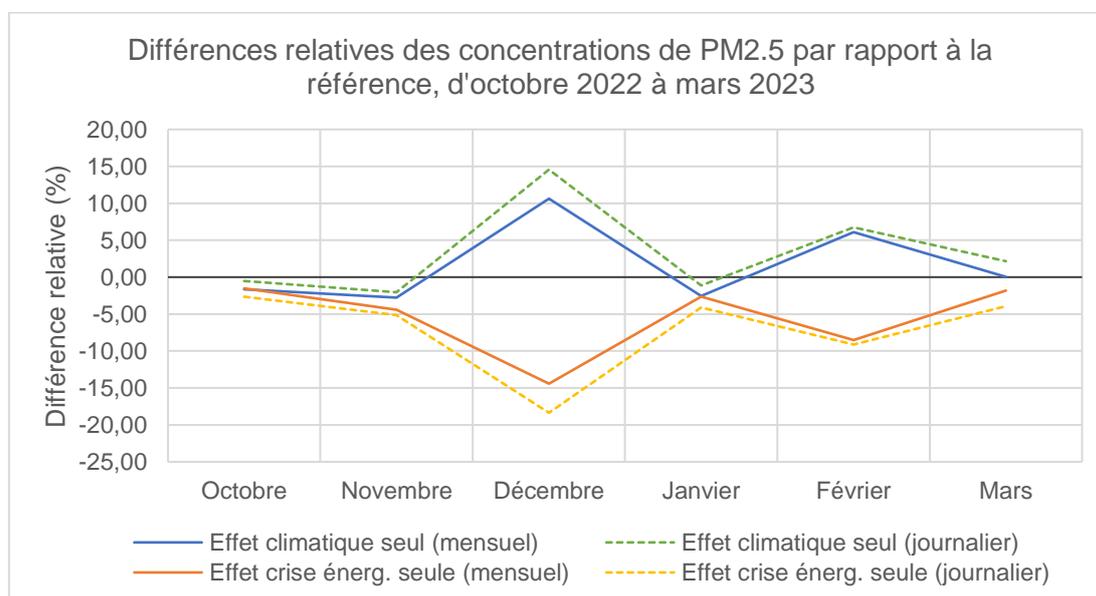


Figure 13 : Différences relatives en moyenne mensuelle (%) entre les concentrations de $PM_{2.5}$ de la référence (scénario hypothétique avec la météorologie de l'hiver 2022/2023 mais les émissions de l'hiver 2021/2022) et des scénarios effet climatique (bleu/vert) et effet crise énergétique (jaune/orange) sur la France pour les mois d'octobre 2022 à mars 2023. Les indicateurs de chaque scénario ont été appliqués soit en moyennes mensuelles (lignes pleines), soit en valeurs journalières (lignes en pointillés).

Annexe 4 : Températures sur la période

La Figure 14 présente les séries temporelles des températures constatées entre les 1^{er} octobre et 31 mars des hivers 2021/2022 et 2022/2023. La Figure 15 met en évidence les écarts entre les deux hivers, en superposant les températures moyennes mensuelles et les différences relatives associées.

La très grande majorité des jours d'octobre et de novembre 2022 montrent des températures plus élevées que celles relevées en 2021, de l'ordre de 3°C en moyenne. Pour décembre, les températures de 2022 sont tombées bien en-deçà de celles qui avaient été constatées en 2021 pour la première moitié du mois (-3°C en moyenne du 1^{er} au 18 décembre), avant de remonter brusquement (+3°C en moyenne sur le reste du mois), menant à une température moyenne en décembre 2022 très proche de celle de 2021. En janvier, les températures sont de nouveau légèrement plus chaudes en 2023 qu'en 2022, avec environ 1°C supplémentaire en moyenne sur le mois. Les températures de mars sont similaires entre les deux années comparées.

Sur toute la période considérée, seul le mois de février a été nettement plus froid que celui de l'année précédente, avec une différence de -1,5°C par rapport à 2022, soit une différence de -19% en moyenne mensuelle. En comparaison, décembre est le seul autre mois avec une différence relative négative entre les températures de l'année courante et l'année précédente, celles-ci ayant toutefois diminué de « seulement » -5,7% en moyenne mensuelle.

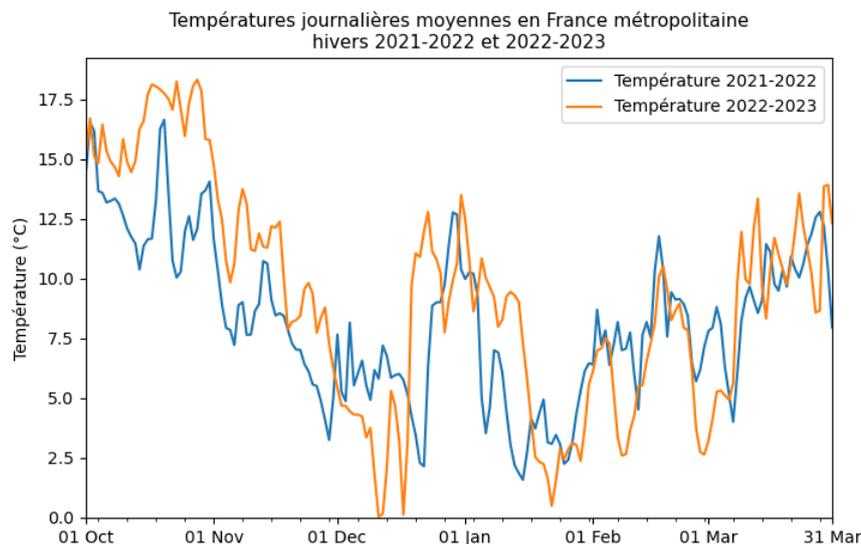


Figure 14 : Séries temporelles des températures journalières moyennes constatées en France métropolitaine sur les mois d'octobre à mars en 2021/2022 et 2022/2023 (en degrés Celsius). Données Météo-France (SYNOP)

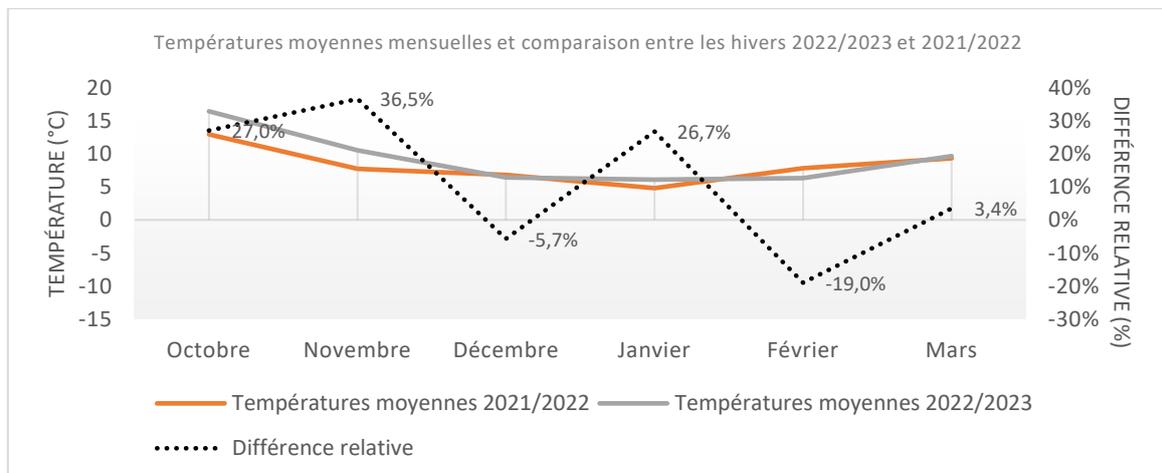


Figure 15 : Séries temporelles mensualisées des températures constatées en France métropolitaine sur les mois d'octobre à mars en 2021/2022 et 2022/2023 (°C), et différences relatives entre les deux années (%)

