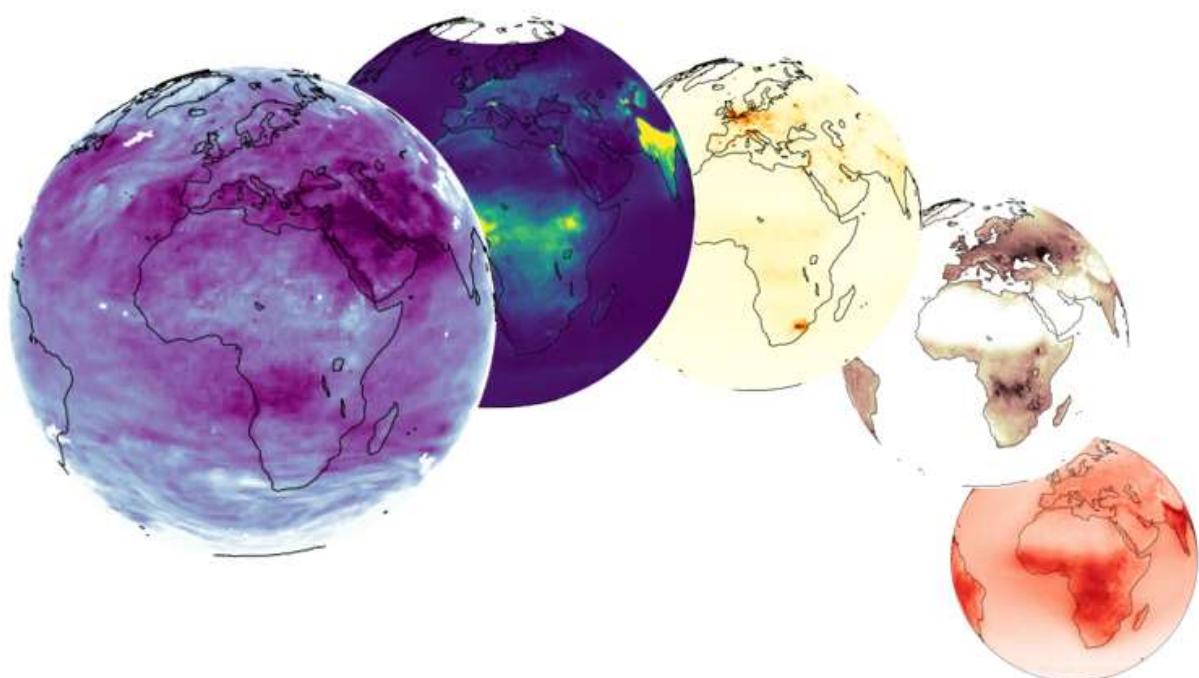


Rayonnement solaire et O₃

Apport de l'estimation satellitaire de l'éclairement solaire pour caractériser l'ozone de surface



Diffusion : Avril 2024

Siège social :
3, allée des Sorbiers 69500 BRON
Tel. 09 72 26 48 90
contact@atmo-aura.fr



Conditions de diffusion

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (décret 98-361 du 6 mai 1998) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO.

Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. La structure agit dans l'esprit de la charte de l'environnement de 2004 adossée à la constitution de l'Etat français et de l'article L.220-1 du Code de l'environnement. Elle gère un observatoire environnemental relatif à l'air et à la pollution atmosphérique au sens de l'article L.220-2 du Code de l'Environnement.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux.

A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site www.atmo-auvergnerhonealpes.fr

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : © Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, 2024, Rayonnement solaire et O₃ : Apport de l'estimation satellitaire de l'éclairement solaire pour caractériser l'ozone de surface

Les données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure.

Par ailleurs, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

- depuis le [formulaire de contact](#)
- par mail : contact@atmo-aura.fr
- par téléphone : 09 72 26 48 90



Remerciements

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes remercie les Mines Paris pour la mise à disposition de l'outil Solar Geometry 2 permettant l'estimation de l'éclairement solaire incident au sommet de l'atmosphère. Informations accessibles ici: <https://github.com/gschwind/sg2> (dernier accès le 28/06/2023)

Les données d'éclairement solaire incident en surface SARAH-3 distribuées par le CMSAF sont accessibles via: https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V003 (dernier accès le 15/05/2023)

Les observations pyranométriques d'éclairement solaire sont mises à disposition par la base de données GEBA. GEBA est co-financé par le Bureau Fédéral de Météorologie et de Climatologie MeteoSwiss dans le cadre de GCOS Switzerland. <https://geba.ethz.ch/> (dernier accès le 28/09/2022)

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes remercie Mr Jörg Trentmann (Chercheur au Deutscher WetterDienst/CM SAF) pour ses compléments d'informations sur les données SARAH et la sélection des données GEBA.

> Financement

Cette étude d'amélioration de connaissances a été rendue possible grâce à l'aide financière particulière de la Région Auvergne Rhône Alpes.



Toutefois, elle n'aurait pas pu être exploitée sans les données générales de l'observatoire, financé par l'ensemble des membres d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Résumé

L'ozone (O_3) est un gaz irritant, nocif pour la santé humaine et la végétation. Sa formation dans les basses couches de l'atmosphère dépend de la présence de composés précurseurs (oxydes d'azotes et composés organiques volatils, influencée notamment par la température) mais aussi du rayonnement solaire initiateur des réactions photochimiques. Par ailleurs, l'ozone est le seul polluant atmosphérique pour lequel aucune tendance à la baisse n'a été observée au cours des dernières décennies en Région Auvergne-Rhône-Alpes. En parallèle, température et rayonnement sont en hausse en lien respectivement avec le réchauffement climatique et la baisse de la pollution particulaire (réduction de l'absorption et réflexions du rayonnement par les aérosols). Dans cette étude, l'apport de données satellitaires de rayonnement solaire, comme données d'entrée du modèle à la place de données modélisées (WRF), est évalué dans le but d'étudier la potentielle amélioration des outils de modélisation permettant de représenter les concentrations en O_3 dans la région.

Les données satellitaires permettent d'obtenir une estimation assez fiable du rayonnement solaire à la surface à une résolution spatiale de 5 kilomètres et temporelle de 30 minutes. Dans cette étude, les données satellitaires SARAH-3 ont été évaluées à l'aide de mesures au sol. Cette évaluation confirme la tendance à la hausse significative du rayonnement solaire au cours des dernières décennies en Région Auvergne-Rhône-Alpes (+3.1 $W.m^{-2}$ par décennie) et le bon accord entre données satellites et mesures au sol en termes de tendances et de variabilité interannuelle. L'analyse de ces tendances montrent cependant une augmentation du rayonnement solaire principalement lors de certains mois du printemps et de l'été (avril, juillet, août). L'analyse des tendances de concentration en O_3 ne révèle pas de tendances mensuelles similaires. La comparaison de données satellitaires de rayonnement avec celui issu du modèle numérique de prévision WRF, a mis en évidence une surestimation du modèle par rapport aux données satellitaires, principalement au printemps et en été et dans les zones montagneuses (localement 15 à 20%).

La suite de l'étude s'est focalisée sur la sensibilité des niveaux d' O_3 modélisés par Atmo AuRA aux données de rayonnement solaire satellitaire SARAH-3. Pour ce faire, le rayonnement solaire simulé par le modèle WRF a été remplacé par le rayonnement satellitaire SARAH-3 en entrée du modèle de chimie-transport CHIMERE. L'analyse de ces simulations utilisant le rayonnement solaire satellitaire en entrée a montré un très faible impact sur les concentrations d' O_3 en journée, soit une baisse de 0,2 à 0,4 $\mu g.m^{-3}$ (-0,25 à -0,5%) pour la moyenne régionale. Localement (vallées alpines et leurs agglomérations), cette baisse a été un peu plus prononcée (>1%). L'utilisation du rayonnement solaire satellitaire n'a donc pas eu d'impact significatif sur les niveaux d' O_3 modélisés au niveau des stations du réseau d'Atmo AuRA.

En conclusion, ces résultats suggèrent un intérêt limité à développer des méthodes d'assimilation de données ou de correction statistiques à partir de données satellitaires de rayonnement solaire dans les modèles de chimie-transport d'aujourd'hui, puisque qu'aucune amélioration significative de la modélisation des concentrations en ozone dans la Région Auvergne-Rhône-Alpes n'a été observée.



Sommaire

1. Introduction.....	7
1.1. L'ozone de surface, un polluant photo-chimique	7
1.2. L'éclairement solaire incident	8
1.3. La chaîne de modélisation régionale d'Atmo AURA : WRF-CHIMERE	12
1.4. Problématique et objectifs	13
2. Analyse des tendances Ozone et éclairement solaire	14
2.1 Tendances Ozone en Région Auvergne-Rhône Alpes	14
2.1 Tendance rayonnement solaire observé en Région Auvergne Rhone-Alpes	16
3. Apport des mesures satellitaire du rayonnement solaire pour la modélisation de l'Ozone.....	19
3.1 Méthodologie	19
3.2 Comparaison rayonnement solaire WRF et satellitaire	20
3.3 Résultats des tests de sensibilités avec le modèle CHIMERE	23
4. Discussion	28
5. Conclusions et perspectives	32

1. Introduction

1.1. L'ozone de surface, un polluant photo-chimique

L'ozone est un polluant gazeux d'origine secondaire qui se forme à la fois dans la haute et la basse atmosphère. Il se forme principalement à plus de 15 km d'altitude (stratosphère) où son absorption du rayonnement solaire ultraviolet est essentiel. L'ozone se forme aussi dans la basse atmosphère (troposphère) où il affecte la santé humaine (ex : Bell *et al.*, 2014 , Orellano *et al.*, 2020 , Zheng *et al.*, 2021) via ses propriétés de gaz irritants (forte capacité oxydante des voies respiratoire) et la biodiversité, en particulier les plantes (ex : Fuhrer *et al.*, 2016 ; Emberson, 2020). En effet, l'absorption de l'ozone au niveau des stomates situés à la surface des feuilles provoque le jaunissement puis le dépérissement de celles-ci. En France, l'exposition sur le long-terme à de fortes concentrations d'ozone serait responsable aux cours des années 2010 d'environ 6000 décès prématurés chaque année (Orru *et al.*, 2019). Les pertes économiques associées aux pertes de productivité primaire des plantes exposée à l'ozone se chiffrent annuellement en milliards d'€ pour l'agriculture et pour la sylviculture au cours de la décennie 2010 selon l'étude Apollo publiée par l'ADEME en 2020 (Schucht *et al.*, 2019).

L'ozone troposphérique se forme via des cycles photo-chimiques impliquant deux types de composés, principalement émis par les activités humaines, appelés précurseurs : les oxydes d'azote (NOx) et les composés organiques volatiles (COV) (ex : Monks *et al.*, 2015). Les composés organiques volatils sont également émis par les plantes, on parle alors de COV d'origine biogénique. En région Auvergne-Rhône-Alpes, ces COVs biogéniques sont majoritaires par rapport à celles d'origines anthropiques. Les quantités de COVs émises par les plantes sont influencées par la météorologie (vent, T°, rayonnement, humidité du sol...). Le méthane (CH_4) est également un précurseur de la formation d'ozone en plus d'être un gaz à effet de serre. Le méthane est également présent naturellement dans l'atmosphère, mais au cours des dernières décennies, les émissions d'origine anthropique sont devenues largement majoritaires.

Les cycles complexes de réactions chimiques menant à la formation d'ozone sont mis en action par photolyse via le rayonnement solaire. Ces réactions sont complexes car la quantité totale d'ozone qui peut finalement être formée ne varie pas linéairement avec les concentrations de précurseurs (NOx et COVs) présentes initialement dans l'air, mais aussi en fonction des rapports de concentrations de chacun des précurseurs. Ainsi, les concentrations maximales d'ozone ne se retrouvent pas au centre des grandes agglomérations urbaines, là où les émissions de précurseurs sont les plus élevées mais plutôt dans les régions sub-urbaines ou rurales situées sous le panache d'émissions provenant des grandes villes. Dans les grandes villes, la présence d'oxydes d'azotes en grande quantité, en particulier l'espèce NO a pour effet de consommer l' O_3 , ce qui fait baisser les concentrations dans l'atmosphère, en particulier la nuit. En journée, sous l'action du rayonnement, le dioxyde d'azote (NO_2) et le dioxygène (O_2) se recombinent pour former de l'ozone. Cette reconversion est d'autant plus efficace que le rayonnement est fort (angle solaire zénithale faible et nébulosité faible), ce qui explique la présence plus importante d'ozone l'été et en journée. La quantité de rayonnement solaire incidente est donc une variable importante à considérer pour modéliser la production d'ozone dans l'atmosphère et ainsi prévoir la pollution de l'air.

Au cours des dernières années, l'ozone en Région Auvergne-Rhône-Alpes (de même qu'en France) est l'un des rares polluants atmosphériques pour lesquels on n'observe pas de tendance à la baisse. Il faut en effet mentionner deux phénomènes distincts observés pour les concentrations en ozone :

1°) une baisse constatée des pics d'ozone en été 2°) une tendance à la stagnation, voire à la hausse dans certaines stations de la moyenne annuelle. La baisse des pics d'ozones en période estivale peut être attribuées aux diminutions des émissions régionales de précurseurs (COV associés aux activités industrielles, NOx associés au trafics). En revanche, la moyenne annuelle (l'ozone de « fond »), est susceptible d'être influencée par d'autres facteurs, notamment climatiques : d'abord la hausse des températures en lien avec le changement climatique influant sur le temps de résidence de certains oxydes d'azote et les émissions de COV par les plantes, ensuite la hausse des concentrations atmosphériques de méthane (CH₄, gaz à effet de serre et précurseur de l'ozone) en lien avec l'augmentation des émissions globales, et enfin, les possibles transports d'ozone à l'échelle intercontinentale. En raison des impacts sanitaires et économiques et de l'absence de baisse observées des concentrations, un Plan Régional Ozone a été mis en œuvre au sein de la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes. Ce plan vise notamment à adopter des actions opérationnelles visant à faire baisser les émissions de précurseurs et les concentrations en O₃, mais également à améliorer l'état des connaissances. Dans ce contexte, nous allons évaluer dans cette étude quel peut être l'apport de l'utilisation de données satellitaires de rayonnement solaire afin d'améliorer nos outils de modélisation permettant de représenter les concentrations d'ozone en Région AuRA. La pertinence de ces données satellitaire pour suivre les évolutions sur le long terme du rayonnement solaire et pour mieux comprendre les relations entre concentration d'O₃ et rayonnement seront également analysées dans cette étude.

1.2. L'éclairement solaire incident

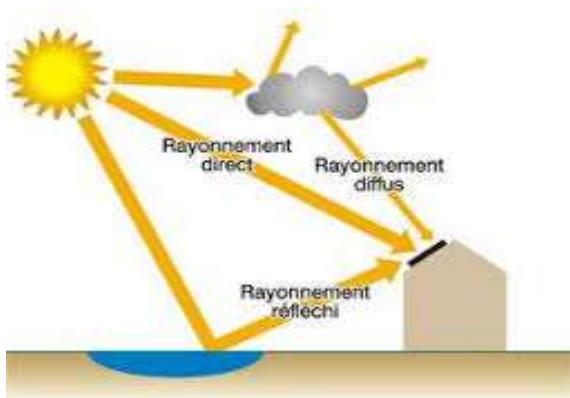


Figure 1 : Schéma illustrant les composantes directes et diffuses du rayonnement solaire arrivant sur une surface plane. Source : <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/>

Dans cette section, nous définissons l'éclairement solaire incident au sol, ou DSSI en anglais (Downwelling Surface Solar Irradiance), appelé rayonnement solaire par simplification dans la suite de ce rapport, ou rayonnement courtes longueurs d'ondes (short-wave). C'est la quantité (exprimé comme un flux) de rayonnement solaire atteignant la surface, après son interaction avec les gaz, aérosols et nuages présents dans l'atmosphère. Il s'exprime généralement en W.m⁻² et intègre un domaine spectral borné, c'est-à-dire, les longueurs d'ondes comprises entre 290 nm à 3000 nm (WMO, 2021) qui correspondent aux domaines visibles et proche infrarouge (les longueurs inférieures à 290 nm correspondent aux domaines des ultra-violets ou UV).

UV). Plus précisément, le rayonnement solaire (DSSI) se définit comme l'éclairement global sur un plan horizontal, soit la somme des flux de rayonnement venant de l'hémisphère au-dessus de ce plan. Il est composé de l'éclairement solaire direct et l'éclairement diffus (Figure 1).

L'éclairement diffus résulte des différentes interactions (réflexion, diffraction) du rayonnement solaire avec les différents composés (gaz, aérosols, eau des nuages...) qui constituent l'atmosphère au cours de la traversée de celle-ci. Ces différentes interactions des composés présents dans l'atmosphère ont lieu dans l'ensemble des directions (sans direction préférentielle). En conséquence, le rayonnement diffus reçu par une surface plane est indépendant de son inclinaison et de son orientation. Le rayonnement solaire direct est celui issus plus directement de l'astre solaire et dépend de la direction de celui-ci. Logiquement, la quantité de rayonnement solaire direct qui sera reçue par une surface proche du sol sera fonction de son inclinaison et son orientation. Par ciel clair (nubulosité faible ou

nulle), l'éclairement solaire qui arrive sur une surface horizontale à la mi-journée sera composé en majorité de rayonnement direct (environ 75-80%). Par temps complètement couvert, la quasi-totalité du rayonnement solaire reçu sera composée de rayonnement diffus. L'éclairement solaire (ou DSSI) peut être quantifié par sa mesure au sol, l'estimation satellite ou encore la modélisation météorologique (Sengupta *et al.*, 2020).

Depuis la fin des années 80, la diminution de la pollution particulaire en France ainsi que dans de nombreux pays occidentaux a eu pour conséquence une augmentation du rayonnement solaire incident à la surface. Nabat *et al.*, (2014) ont ainsi estimé que cette diminution des aérosols d'origine anthropique présents dans l'atmosphère serait responsable d'environ $81 \pm 16\%$ de la tendance à la hausse du rayonnement solaire observé en Europe durant la période 1980-2012 qui s'élève à environ $+4 \text{ W.m}^{-2}$ par décennies. Cette augmentation du rayonnement solaire a un effet de réchauffement non négligeable qui s'ajoute à celui de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre. Ainsi, cette même étude (Nabat *et al.*, 2014) estime à $23 \pm 5\%$ la part de réchauffement observé en Europe depuis le début des années 80 due à cette diminution de la pollution particulaire d'origine anthropique.

1.2.1. Mesures au sol du rayonnement solaire : la base de données GEBA

Le rayonnement solaire fait partie des variables météorologiques essentielles mesurées au sol dans les stations de référence des réseaux nationaux (ex. Météo-France). La mesure du rayonnement solaire se fait à l'aide d'instruments nommés pyranomètres qui se composent d'un dôme hémisphérique en verre et d'un capteur qui convertit l'énergie reçue sous forme de rayonnement en un courant électrique qui peut être mesuré (voir Figure 2).



Figure 2 : Photo illustrant un pyranomètre solaire installé en milieu montagneux. Source : <https://www.essearth.com/delta-t-spn1/pyranometer-in-australia/>

La validité des mesures de rayonnement solaire à l'aide de pyranomètre peut être dégradée en raison de dépôts de particules de poussières ou de pollution à la surface du dôme de verre qui le constitue, ou biaisée par la présence de neige ou de givre sur ou aux alentours du capteur. Disposer de mesures de rayonnement solaire stables et fiables dans le temps s'avère donc coûteux en maintenance car les capteurs doivent être nettoyés manuellement régulièrement. De plus, à l'instar de nombreuses variables météorologiques, le rayonnement solaire se caractérise par une très forte variabilité spatio-temporelle. Il est donc très compliqué de quantifier avec certitudes l'évolution du rayonnement solaire dans le temps et dans l'espace à partir de quelques mesures ponctuelles issues des stations météorologiques, en particulier dans une région à la topographie complexe telles que la Région Auvergne-Rhône-Alpes (AuRA).

La base de données GEBA met néanmoins à disposition des données (moyennes mensuelles) de rayonnement solaire dans de nombreux pays. La Figure 3 (a) permet de visualiser les stations de mesures du rayonnement solaire présente en région AuRA et dans les régions voisines ainsi que la profondeur temporelle des données disponibles. Des informations sur les stations disposant d'enregistrement stables et fiables dans le temps sont également disponibles en appliquant les tests de contrôle de qualité fournis par J. Trentmann (Chercheur au Deutscher WetterDienst, CMSAF), ce qui permet d'appréhender avec moins d'incertitudes les tendances sur plusieurs décennies. Seules les stations identifiées comme fiables sont utilisées par nos analyses de tendance sur le rayonnement dans la Région (Figure 3 (b)).

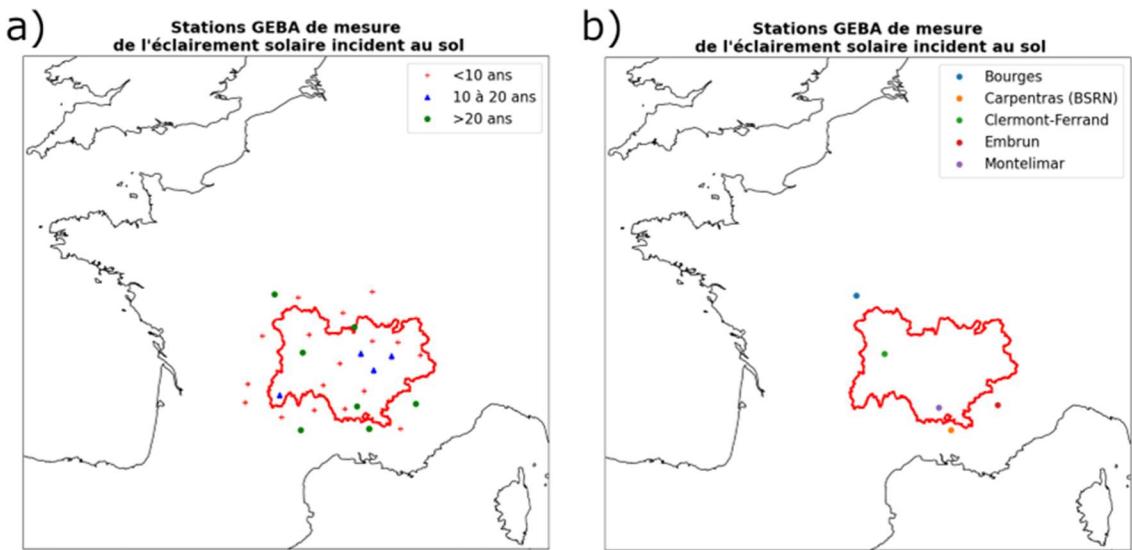


Figure 3 : a) Carte de localisation des stations de la base de données GEBA situées dans/ou à proximité de la Région AuRA (contours de la Région indiqués en rouge). La symbologie indique la profondeur temporelle des enregistrements disponibles .b) Carte des stations de la base de donnée retenues pour l'étude des tendances suite au contrôle qualité de J. Trentma

1.2.2. Mesures satellitaires du rayonnement solaire : la base de données SARAH

L'estimation satellitaire fournit une information spatialisée, couvrant plusieurs décennies (fin des années 1970) jusqu'à aujourd'hui. Les satellites météorologiques géostationnaires permettent d'avoir cette information avec une fréquence horaire voire infra-horaire (ex : Pfeifroth *et al.*, 2023). Des comparaisons entre données satellites, prévisions météorologiques et mesures de surface de référence montrent un accord généralement meilleur entre mesures au sol et estimations satellites qu'entre mesures au sol et prévisions issues de modèles atmosphériques (Jiménez *et al.*, 2016; Jiménez *et al.*, 2022). Les estimations satellites d'éclairement solaire peuvent d'ailleurs être utilisées pour étudier la validité de prévisions numériques (Yang & Perez, 2019).

La dernière version de la base de données « Surface Solar Radiation data set – Heliosat », SARAH-3 (Pfeifroth *et al.*, 2023) utilisée dans cette étude couvre la période 1983-2022. Ces données sont générées à partir des observations satellitaires provenant des instruments embarqués sur les satellites METEOSAT première et seconde génération. Elles sont disponibles à la résolution temporelle de 30 minutes et à la résolution horizontale régulière de 0.05° (environ 5 kilomètres). Par rapport aux versions précédentes de l'algorithme, les données SARAH-3 présentent des incertitudes réduites sur les surfaces enneigées (e.g. régions alpines), notamment grâce à l'utilisation d'un masque des surfaces enneigées recalculé en permanence par l'algorithme. Cette caractéristique est d'intérêt premier pour une application sur la région Auvergne-Rhône-Alpes.

Concrètement, l'algorithme SARAH se base sur les rapports entre les réflexions mesurées en un instant t (R), et les réflexions minimales (R_{min}) et maximales (R_{max}) mesurées pour chaque mois, chaque point de grille et chaque moment de la journée (1) afin d'obtenir l'albedo effectif des nuages (CAL) qui représente la faculté des nuages à refléter le rayonnement solaire :

$$CAL = \frac{R - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \quad (1)$$

Le rayonnement solaire incident à la surface (SIS) est ensuite estimé à partir de l'albédo effectif des nuages via la connaissance du rayonnement incident par ciel clair (SIS_{clear}) via (2).

$$CAL^{-1} = \frac{SIS}{SIS_{(clear)}} \quad (2)$$

Le rayonnement solaire incident à la surface par ciel clair est obtenu à l'aide d'un modèle spectral de transfert radiatif par ciel clair (SPECMAGIC). Celui-ci nécessite en entrée la connaissance de la colonne totale d'ozone et de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Celles-ci sont fournies par les réanalyses ERA-5 (Hersbach *et al.*, 2020). Enfin, l'estimation du rayonnement solaire incident par ciel clair nécessite également la connaissance de l'albédo spectral de la surface. Celui-ci est obtenu à partir des données MODIS à haute résolution (Blanc & Wald, 2012).

Malgré les améliorations apportées à la version récente de l'algorithme, il est nécessaire de rappeler que l'utilisation de données satellitaires pour estimer le rayonnement solaire incident à la surface comporte des incertitudes, en particulier en région montagneuse. D'une part, à cause de la présence d'un manteau neigeux, qui même s'il est pris en compte dans la dernière version de la base de données SARAH-3, reste par moment difficile à discriminer de la présence de nuages bas. Par ailleurs, l'ombre portée des massifs montagneux peut également perturber la réflectance mesurée et donc l'estimation faite du rayonnement solaire incident à la surface.

1.2.3. Modélisation du rayonnement solaire dans un modèle atmosphérique

La modélisation du rayonnement solaire incident à la surface dans un modèle numérique de prévision ou dans un modèle atmosphérique régional se fait à partir d'un modèle de transfert radiatif. Dans les modèles, l'atmosphère est discrétisée horizontalement selon des « boîtes » ou maille de grille dont la résolution varie de 1 à plusieurs dizaines de kilomètres. Selon la verticale, l'atmosphère est divisée selon des niveaux verticaux dont l'épaisseur varie de quelques mètres à proximité sol, à quelques centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres à haute altitude. Il est assez simple d'estimer la quantité de rayonnement solaire arrivant au sommet de l'atmosphère à un endroit et un moment donné grâce à la connaissance des paramètres orbitaux terrestres (rotation de la terre, calcul angle zénithale etc.). La propagation du rayonnement solaire à travers les différentes couches de l'atmosphère est ensuite calculée par le modèle de transfert radiatif qui permet d'estimer, à chaque niveau vertical, la quantité de rayonnement qui peut être absorbée ou réfléchie par les différents composés gazeux (O_3 , vapeur d'eau...), liquide (eau des nuages) ou solide (cristaux de glace, aérosols) présents dans l'atmosphère. Les processus physiques permettant d'estimer l'absorption ou la réflexion du rayonnement solaire par différents composés ou particules atmosphériques sont représentés dans les modèles de transfert radiatif.

Actuellement, l'ensemble des schémas radiatifs courtes longueurs d'onde (short-wave) implémentés dans le modèle WRF (Skamarock *et al.*, 2021) utilisé dans cette étude sont des schémas une dimension (1D), c'est-à-dire que le transfert du rayonnement solaire à travers chaque colonne atmosphérique est traité indépendamment, ce qui est une bonne approximation tant que l'épaisseur des niveaux verticaux reste substantiellement plus petite que la résolution horizontale. Dans cette étude, nous utiliserons le schéma Dudhia (`ra_sw_physics=1`) qui effectue une simple intégration du rayonnement solaire descendant en tenant compte de la diffusion dans l'atmosphère « sèche », de l'absorption par la vapeur d'eau et de la réflexion et absorption par les nuages. Des tables de correspondance (Look-up tables) sont utilisées pour évaluer l'effet des nuages. Enfin, les dernières versions du schéma permettent de prendre en compte l'inclinaison des surfaces (effet de la pente) et de l'ombrage lié à la présence de montagne (mais non activé dans cette étude).

Une estimation précise du rayonnement solaire incident à la surface nécessite cependant une bonne description des quantités de vapeur d'eau, d'eau liquide ou de cristaux de glace nuageux ainsi que des aérosols présents dans les différentes couches de l'atmosphère. Ceci peut générer d'importantes incertitudes car la résolution horizontale ou verticale des modèles atmosphériques est souvent trop grossière pour décrire certains types de nébulosité, ce qui est d'autant plus vrai dans une région au

relief complexe tel que la région AuRA : nuages bas formés par inversion de température et persistants dans certaines vallées alpines, nuages cumuliformes dont la formation peut être générée ou renforcée par la présence de reliefs escarpés, nuages moyens ou élevés de faible extension verticale... Par ailleurs, les processus physiques menant à la formation de nuages se déroulent également à des échelles bien plus fines que celles des modèles atmosphériques, la description de ces processus est donc décrite de façon implicite (paramétrisée) ce qui génère également des incertitudes sur l'estimation du contenu en eau des nuages, de leur phase... Enfin, la prise en compte de l'effet des aérosols (naturels ou anthropiques) sur le rayonnement solaire est également source d'incertitude.

1.3. La chaîne de modélisation régionale d'Atmo AuRA : WRF-CHIMERE

La chaîne de modélisation WRF-CHIMERE est utilisée de façon routinière à Atmo AuRA, notamment pour générer des données de modélisation de la qualité de l'air, qui servent de base à la réalisation des prévisions quotidiennes, à la réalisation de la cartographie annuelle où à la réalisation de différentes études prospectives ou de scénarios. Le modèle numérique de prévision WRF est contraint aux limites par les données opérationnelles du modèle global de prévision américain GFS (Global Forecast System). Le modèle de chimie-transport atmosphérique CHIMERE¹ est développé conjointement par l'INERIS et le LISA (ex. Menut *et al.*, 2021). Depuis la version 2020 du modèle, le modèle CHIMERE est exécuté sur une même grille horizontale que le modèle WRF. Dans cette étude, notre configuration se base sur une configuration de trois domaines imbriqués de résolution horizontale de 27, 9 et 3 km respectivement (Figure 4). Le modèle WRF est donc d'abord exécuté afin d'obtenir des conditions météorologiques simulées à haute résolution sur la région Auvergne-Rhône-Alpes qui sont ensuite utilisées en entrée du modèle CHIMERE.

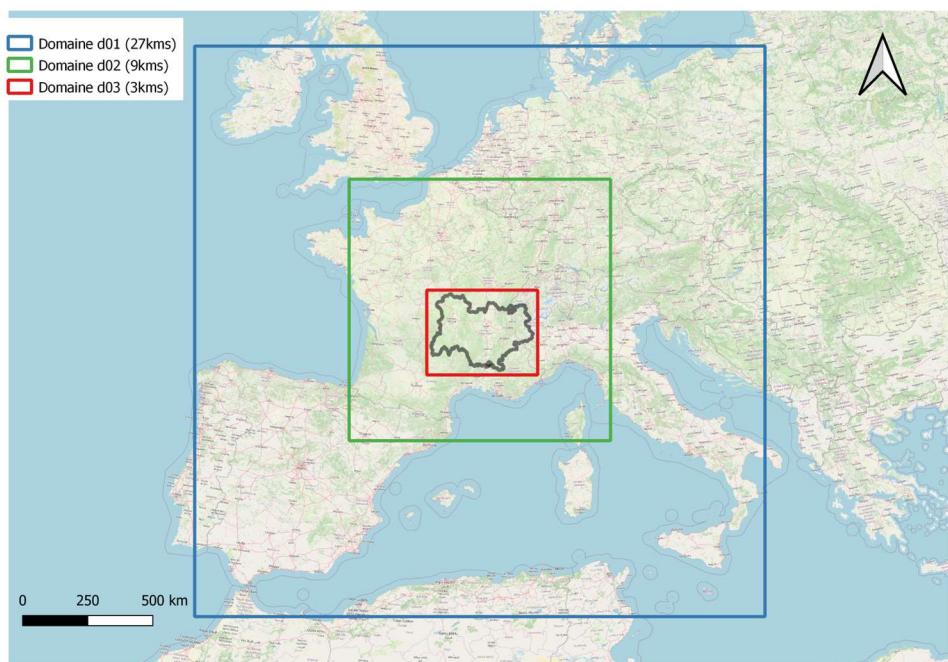


Figure 4 : Emprise des domaines d'intégration WRF et CHIMERE (version 2020r3) d01 (bleu), d02 (vert) et d03 (rouge) de résolution horizontale respective : 27, 9 et 3 kms. Les contours de la Région AuRA sont indiqués en gris

¹ <https://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>

En plus de données d'entrée pour les conditions météorologiques, le modèle CHIMERE nécessite en entrée des données d'émissions anthropiques pour un grand nombre de polluants. Celle-ci sont fournies dans cette étude par le cadastre (v73) d'Atmo AuRA pour le territoire de la Région, et le cadastre d'émission européen EMEP est utilisé pour les territoires à l'extérieur. Dans cette étude, la version de CHIMEREv2020r3 a été utilisée, dans une configuration avec 9 niveaux verticaux.

1.4. Problématique et objectifs

Au cours de l'introduction, nous avons pu voir que la production d'ozone, bien que dépendante de la concentration de précurseurs présents dans l'atmosphère, est également fonction de la quantité de rayonnement solaire arrivant près du sol. Or, on a observé des tendances marquées à l'augmentation en lien avec le réchauffement climatique et la diminution de la pollution particulaire au cours des dernières décennies. Nous avons également pu voir que la modélisation du rayonnement solaire arrivant au sol à l'aide de modèles numériques de prévision dont les sorties sont utilisées pour modéliser et prévoir la qualité de l'air, dont la concentration en O₃ sont sujettes à de nombreuses incertitudes alors que les données satellitaires permettent d'avoir une estimation fiable, avec une bonne résolution spatiale et temporelle, du rayonnement solaire arrivant au sol.

Dans ce contexte, au cours de cette étude, nous allons :

- Evaluer les tendances sur les concentrations en ozone observées en Auvergne-Rhône-Alpes à l'aide des stations du réseau de mesure d'Atmo Aura. Nous ferons de même pour le rayonnement solaire à l'aide des stations de la base de données GEBA et des données satellitaires SARAH-3, ce qui permettra au passage d'évaluer l'accord entre ces deux jeux de données. Enfin, pour les deux variables (O₃ et rayonnement), les tendances seront évaluées conjointement afin d'évaluer si les mêmes tendances se dégagent (section 2).
- Réaliser des expériences de modélisation (modèle CHIMERE) dans lesquelles le rayonnement solaire modélisé par le modèle atmosphérique WRF sera remplacé par celui fourni par les données satellitaires SARAH-3. Ces expériences permettront d'estimer la sensibilité du modèle CHIMERE au rayonnement solaire fourni en entrée et d'évaluer l'utilisation de données satellitaires de rayonnement solaire dans le but d'obtenir de meilleurs scores pour la modélisation des concentrations en O₃ dans la région. De manière générale, ces expériences de modélisation permettront d'évaluer le potentiel d'amélioration dans le cadre de prévisions ou de scénarisation de l'ozone en région Auvergne-Rhône-Alpes lié à l'utilisation de données satellitaires de rayonnement solaire (section 3). Ces expériences sont des tests de sensibilité mais restent incomplètes fondamentalement. En effet, le changement du rayonnement solaire dans les sorties du modèle WRF par les données SARAH-3 ne permet pas complètement de prendre en compte l'influence de ces données d'un point de vue météorologique (échange de chaleur, développement de la couche limite, nuage etc...). En réalité cette modification serait physiquement cohérente si elle intervenait en sortie du schéma radiatif de WRF qui recalculerait ensuite les autres variables en fonction des modifications introduites pendant le calcul. L'expérience reste donc un test de sensibilité permettant de voir l'impact ou la sensibilité du modèle CHIMERE au rayonnement solaire pour la formation d'Ozone.

2. Analyse des tendances Ozone et éclairement solaire

2.1. Tendances Ozone en Région Auvergne-Rhône Alpes

Dans cette analyse, l'évolution de l'ozone en Région Auvergne-Rhône-Alpes a été évaluée en ne conservant uniquement que les données issues de stations rurales représentatives de l'ozone « de fond ». Ce choix se justifie par la volonté de s'affranchir de l'effet que pourrait avoir des changements locaux importants en émissions de précurseurs à proximité des stations urbaines ou industrielles. Dans le but d'obtenir des résultats robustes sur une longue série temporelle, pour chaque mois et chaque station, l'anomalie mensuelle ou annuelle (écart à la moyenne calculée sur l'ensemble de la période de référence) est calculée uniquement si un minimum de 60% de données sont disponibles pour le mois de la station considérée (les stations qui ne respectent pas ces critères sont exclues de l'analyse). La combinaison de l'ensemble de ces critères, tout en cherchant à étudier la période la plus longue possible, nous a conduit à choisir la période 2000-2019 pour laquelle les données de trois stations sont disponibles : Sommet du Puy-de-Dôme, Haut Beaujolais et Le Casset. Les anomalies mensuelles et annuelles « multi-stations » représentatives de la moyenne régionale sont calculées à partir de la moyenne des anomalies de chacune de ces trois stations. Les tendances sur les anomalies mensuelles ou annuelles sont calculées à l'aide d'une régression de Theil-Sen dont la pente représente la médiane de toutes les valeurs de pente possibles entre deux points de l'échantillon (voir Figure 5). Cette méthode permet d'obtenir une valeur de tendance moins sensible aux valeurs extrêmes, telles que celles observées lors de l'été 2003, en comparaison à l'utilisation d'une méthode de régression linéaire classique. Les tendances obtenues pour chacune des trois stations sont reprises dans le Tableau 1. Les tendances trouvées ne sont statistiquement significatives ($p\text{value} < 0.05$) pour aucune des trois stations.

	Tendance 2000-2019 ($\mu\text{g.m}^{-3}.10 \text{ ans}^{-1}$)
Sommet Puy de Dôme	+1,2
Haut Beaujolais	+0,5
Le Casset	+1,6

Tableau 1 - Tendance (régression de Theil-Sen) de la concentration en O₃ ($\mu\text{g.m}^{-3}.10 \text{ ans}^{-1}$) pour la période 2000-2019 pour les stations rurales de fond.

On peut remarquer que l'on retrouve une tendance significative ($p\text{value} < 0.05$) pour la moyenne régionale multi-station sur la période 2000-2019 uniquement pour les mois de décembre et janvier, avec +5.2 et +3.0 $\mu\text{g.m}^{-3}.10 \text{ ans}^{-1}$ respectivement. Le mois de juin est caractérisé par une tendance négative importante (-5.0 $\mu\text{g.m}^{-3}.10 \text{ ans}^{-1}$), mais qui n'apparaît pas significative statistiquement au vu de la forte variabilité annuelle.

Anomalie mensuelle Ozone stations Atmo-AuRA 2000-2019

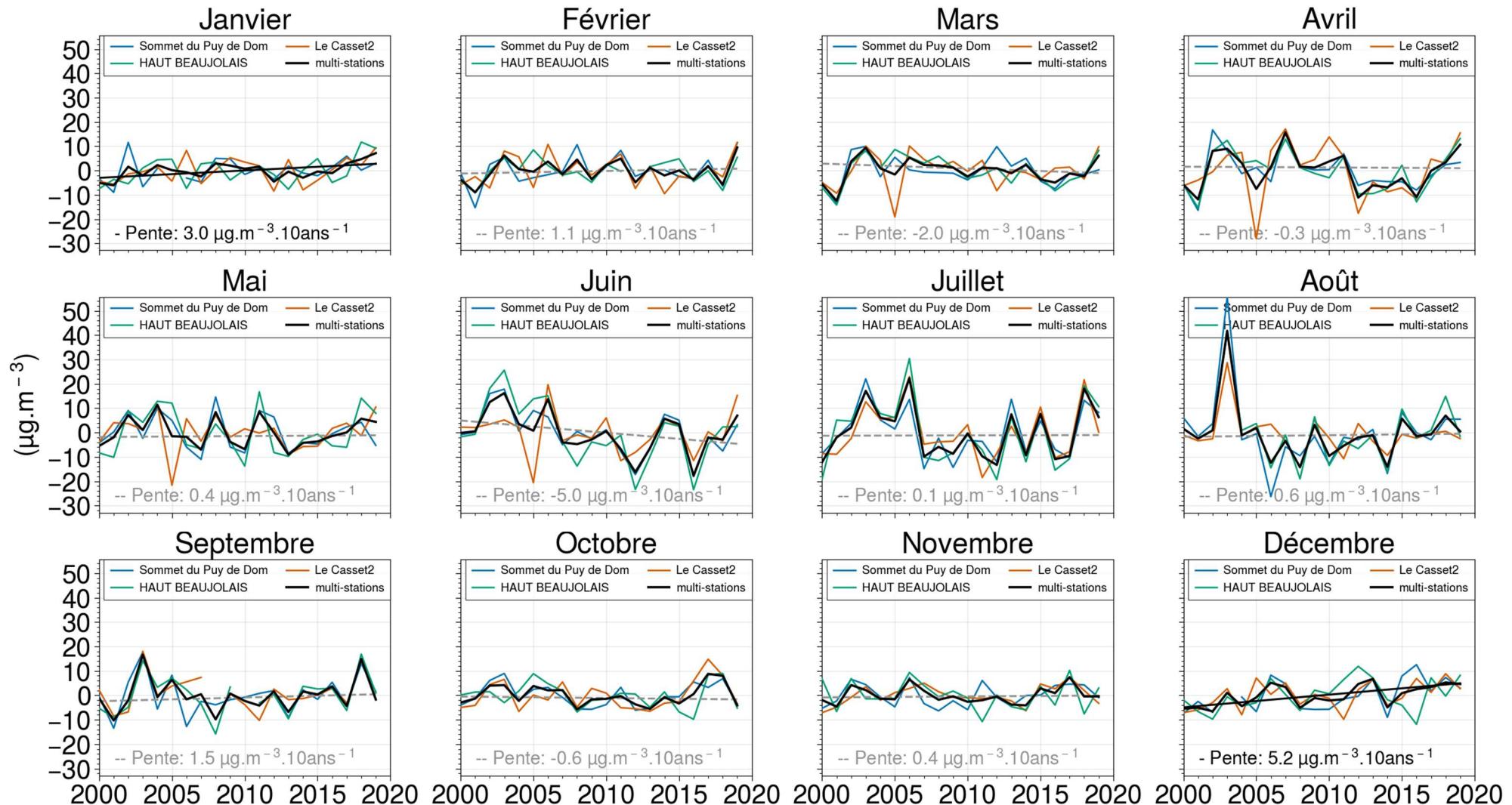


Figure 5 : Anomalies mensuelles de la concentration en O_3 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) pour la période 2000-2019 pour les stations rurales de fond : Sommet du Puy de Dôme, Haut Beaujolais, Le Casset ainsi que moyenne multi-station (noir). Les tendances (régression de Teil-Sen) (non)-significatives sont représentées par un trait (pointillé) plein.

2.2. Tendance rayonnement solaire observé en Région Auvergne Rhône-Alpes

Les tendances de rayonnement solaire pour la Région Auvergne-Rhône-Alpes ont été évaluées à partir des données stations de la base de données GEBA et de la base de données satellitaires SARAH-3. Pour la base de données GEBA, seules les données stations considérées comme fiables et stables dans le temps d'après le contrôle qualité de J. Trentmann (voir section 1.2, Figure 3) ont été utilisées dans l'analyse. Pour les données satellitaires SARAH-3, l'analyse de l'évolution temporelle des cartes d'éclairement met en évidence de possibles instabilités de la géolocalisation des données, en particulier entre 1983 et 2004, avant la mise en orbite des satellites Meteosat Seconde Génération. Pour éviter, les problèmes liés à cet artefact, nous limiterons notre analyse de la tendance à celle de la moyenne régionale.

Une tendance significative de 3.1 W.m^{-2} par décennie (Figure 6) a pu être mise en évidence, ce qui est cohérent avec les nombreuses augmentations de rayonnement solaire rapportées en Europe à partir du milieu des années 80 en lien avec la diminution de la pollution particulaire d'origine anthropique (ex. Nabat *et al.*, 2014).

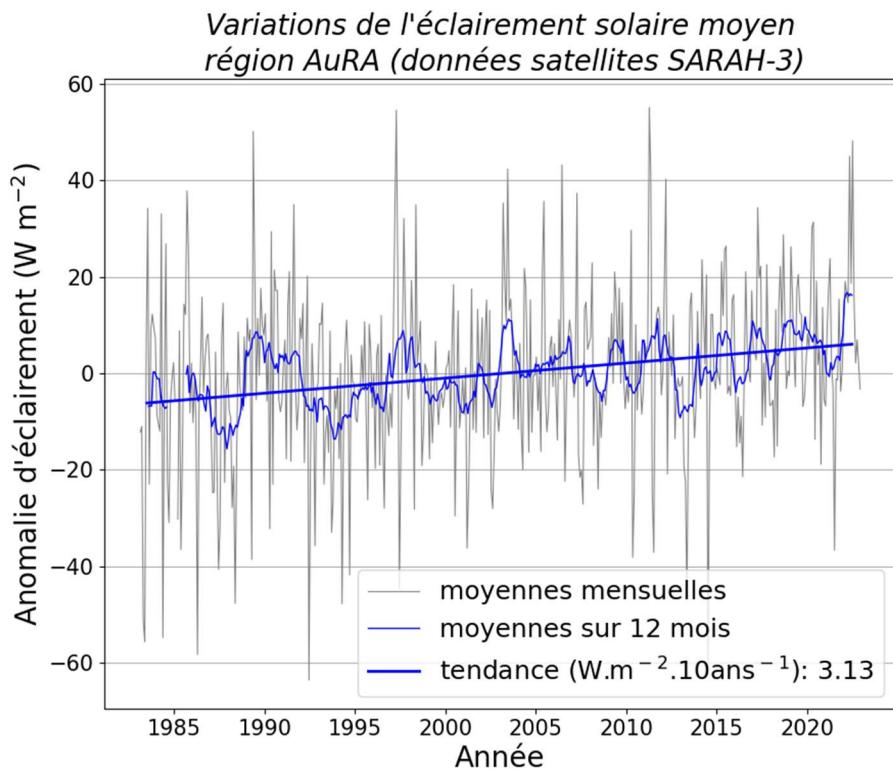


Figure 6 : Anomalies mensuelles d'éclairement solaire (W.m^{-2}) en Région AuRA pour la période 1983-2022 à partir des données satellitaire SARAH-3. La moyenne glissante sur 12 mois (trait plein bleu) et la droite obtenue à partir d'une régression de Theil-Sen sont également présentée. Une tendance significative ($+3.1 \text{ W.m}^{-2}.10\text{ans}^{-1}$) a été trouvée.

L'évolution du rayonnement solaire par mois calendaire estimée à partir des données GEBA et SARAH3 est présentée à la Figure 7. Cette analyse, notamment de la tendance a été effectuée sur la période 2000-2019 afin de pouvoir la mettre en parallèle avec celle effectuée sur les tendances des mesures d'ozone (section 2.1). On peut voir sur cette figure, un bon accord sur les anomalies mensuelles entre les données SARAH-3 et la moyenne multi-station estimée à partir des données GEBA. Cet accord est cependant meilleur au printemps-été ($r>0.9$) qu'en hiver ($r=0.74$ en janvier par exemple), ce qui pourrait s'expliquer par une moindre fiabilité des données satellites et des mesures au sol en hiver en raison de la présence d'un manteau neigeux, ou en raison

d'angles solaires zénithaux en général plus élevé (soleil bas sur l'horizon), ce qui peut dégrader la qualité de la mesure satellite.

On observe également un bon accord entre les données SARAH-3 et GEBA en ce qui concerne le signe, la magnitude et la significativité des tendances estimées pour cette période 2000-2019. A noter, des tendances positives assez importantes pour plusieurs mois du printemps et été : avril, juillet, août (significative) et septembre dans une moindre mesure. Aucune tendance positive substantielle sur l'ozone mesuré dans les stations rurales « de fond » n'est observée pour ces mois dans la période en question (section 2.1, Figure 5). Par ailleurs, aucune tendance significative sur le rayonnement solaire mesuré au cours des mois d'hiver (décembre, janvier) n'est observée, alors qu'une tendance positive et significative a été trouvée pour l'ozone des stations « de fond » pour ces mois. Il est donc probable que les tendances observées pour l'éclairement solaire aient joué un rôle mineur dans les tendances d'ozone (augmentation non-significative pour les stations rurales de fond) et que d'autres processus soient possiblement en jeu (ex : transports intercontinentaux, augmentation de la concentration atmosphérique de méthane, augmentation des émissions et/ou de la durée de vie de certains précurseurs en lien avec la température...).

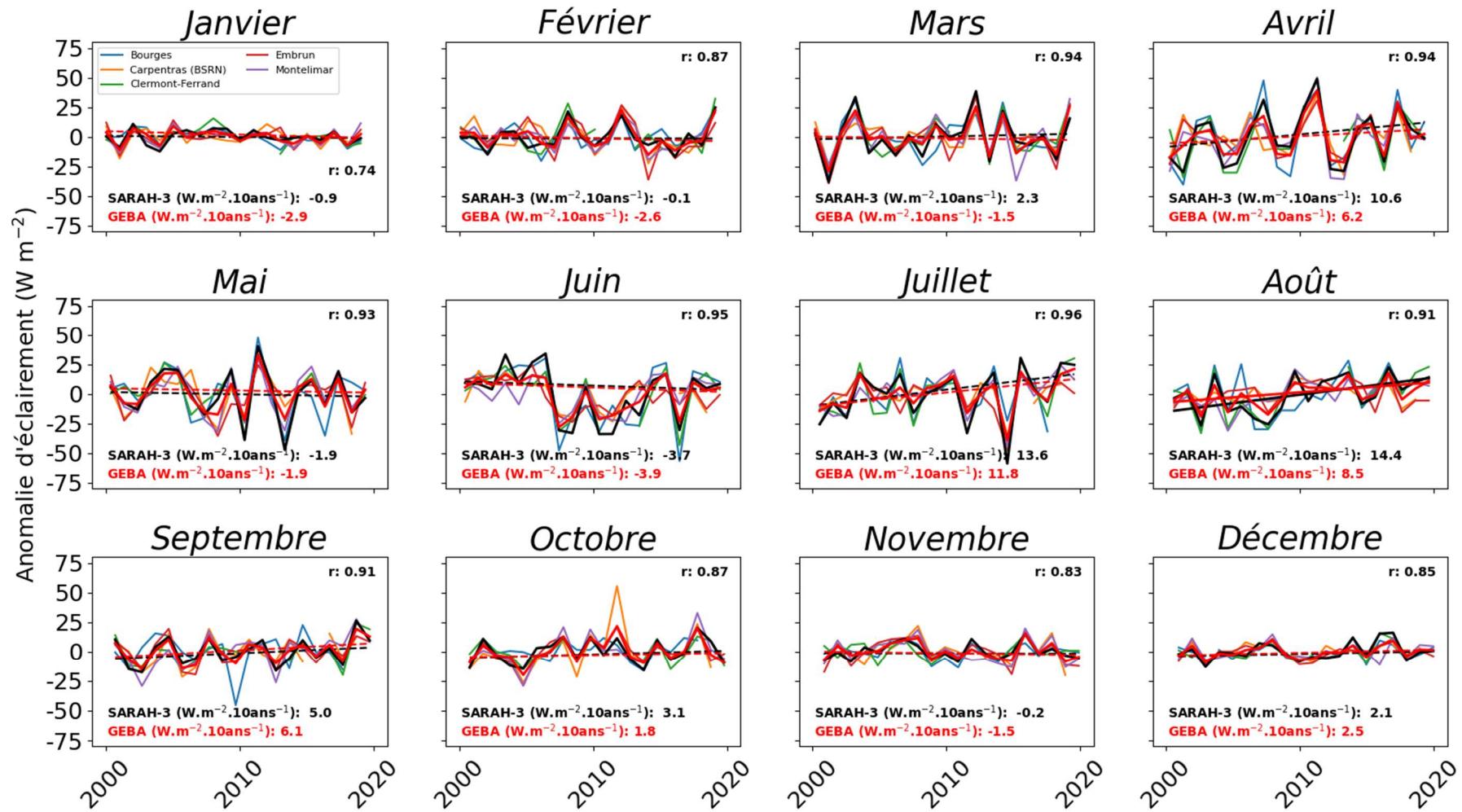


Figure 7 : Moyenne régionale (Région AuRA) de l'anomalie mensuelle d'éclairement solaire (en W.m^{-2}). Les traits en couleurs correspondent aux différentes stations de la base de données GEBA, avec la moyenne multi-stations en rouge, et la moyenne régionale pour les données satellites SARAH-3 en noir. La tendance (régression de Theil-Senn) est également présentée par une droite pleine (pointillée) pour les tendances (non) significatives. Les valeurs des tendances (en $\text{W.m}^{-2}.10\text{ans}^{-1}$) sont également données pour chaque mois, ainsi que la valeur du coefficient de corrélation entre la moyenne multi-station GEBA et la moyenne régionale SARAH-3.

3. Apport des mesures satellitaire du rayonnement solaire pour la modélisation de l'Ozone

3.1. Méthodologie

Dans cette partie de l'étude, une comparaison du rayonnement solaire modélisé par le modèle WRF avec celui estimé dans la base de données satellitaires SARAH-3 a d'abord été réalisée (section 3.2). Cette évaluation permet de mieux anticiper et discuter les résultats des expériences de modélisation présentées et discutées dans les sections 3.3 et 4. Pour réaliser cette évaluation du rayonnement solaire, les données de rayonnement au pas de temps horaire de la base de données SARAH-3 (résolution horizontale d'environ 5.5 kms) ont été interpolées sur la grille du domaine WRF de résolution 3 km x 3 km (appelé d03) via une méthode d'interpolation au plus proche voisin, ainsi que sur les domaines de résolution horizontale 9 et 27 kms (d02 et d01) via une méthode d'interpolation conservative de la moyenne², ce qui est généralement préconisé en cas d'interpolation depuis une résolution élevée vers une résolution plus faible.

A partir du rayonnement SARAH-3 interpolé sur les différentes grilles WRF (voir Figure 4), nous avons réalisés plusieurs expériences de modélisation :

- Une expérience de contrôle, appelée REFERENCE, où les trois domaines de CHIMERE de résolution 27, 9 et 3 kms sont forcés normalement par les données météorologiques du modèle WRF (avec le rayonnement solaire issue du modèle lui-même).
- Un premier scénario : SCENARIO1, où le rayonnement solaire WRF est remplacé par le rayonnement satellitaire SARAH-3 uniquement pour le domaine à haute résolution d03 (3kms)
- Un second scénario : SCENARIO2, où le rayonnement solaire WRF est remplacé par le rayonnement satellitaire SARAH-3 pour l'ensemble des trois domaines d'intégration du modèle CHIMERE (à 27, 9 et 3 kms)

Par comparaison à la simulation REFERENCE, le SCENARIO1 permet d'évaluer l'impact de la modification du rayonnement solaire, et notamment l'introduction de valeur de rayonnement a priori plus fiable, sur la modélisation de l'ozone produit en Région AuRA. La même comparaison du SCENARIO2 avec la simulation REFERENCE permet une intégration complète de la modification du rayonnement solaire pour évaluer son impact sur la formation d'Ozone provenant de l'extérieur comme de l'intérieur de la région (mais sans impact hors Europe). De manière générale, les SCENARIO1 et SCENARIO2 permettent d'évaluer la sensibilité de l' O_3 au rayonnement solaire dans le modèle CHIMERE et le potentiel d'amélioration associé à l'utilisation de données de rayonnement solaire plus fiables, provenant notamment de données satellitaires, pour la modélisation de l' O_3 en Région AuRA. Les résultats nous permettront donc d'évaluer l'intérêt à développer des applications de prévision ou de scénarisation de l'ozone à partir de modélisation intégrant des données satellitaires de rayonnement solaire.

² Fonction Regridder du package Python xesmf, avec méthode « conservative » :
https://xesmf.readthedocs.io/en/latest/notebooks/Compare_algorithms.html

3.2. Comparaison rayonnement solaire WRF et satellitaire

La comparaison entre le rayonnement solaire modélisé par le modèle WRF et celui estimé à partir de la base de données satellitaire SARAH-3 sont présentées à la *Figure 8* pour les différentes saisons météorologiques : hiver (DJF³), printemps (MAM⁴), été (JJA⁵) et automne (SON⁶). Des différences importantes (surestimation de WRF par rapport à SARAH-3) apparaissent au printemps/été sur la zone Alpine. Ces surestimations sont de l'ordre de 20 à 40 W.m⁻², soit environ 10 à 20% du rayonnement moyen reçu au cours de ces saisons. Au printemps, ces différences semblent plutôt se limiter aux Préalpes, aux vallées alpines et à la Haute-Maurienne. Des différences similaires sont également observables dans l'est de l'Auvergne (Livradois-Forez, Haute Ardèche). Enfin, on notera qu'en hiver le rayonnement est en revanche sous-estimé dans WRF par rapport à SARAH-3 sur certaines zones du nord de la Région dans des proportions qui peuvent paraître faibles en absolu (10 à 20 W.m⁻²), mais qui représentent 15 à 25% du rayonnement reçu au cours de cette saison.

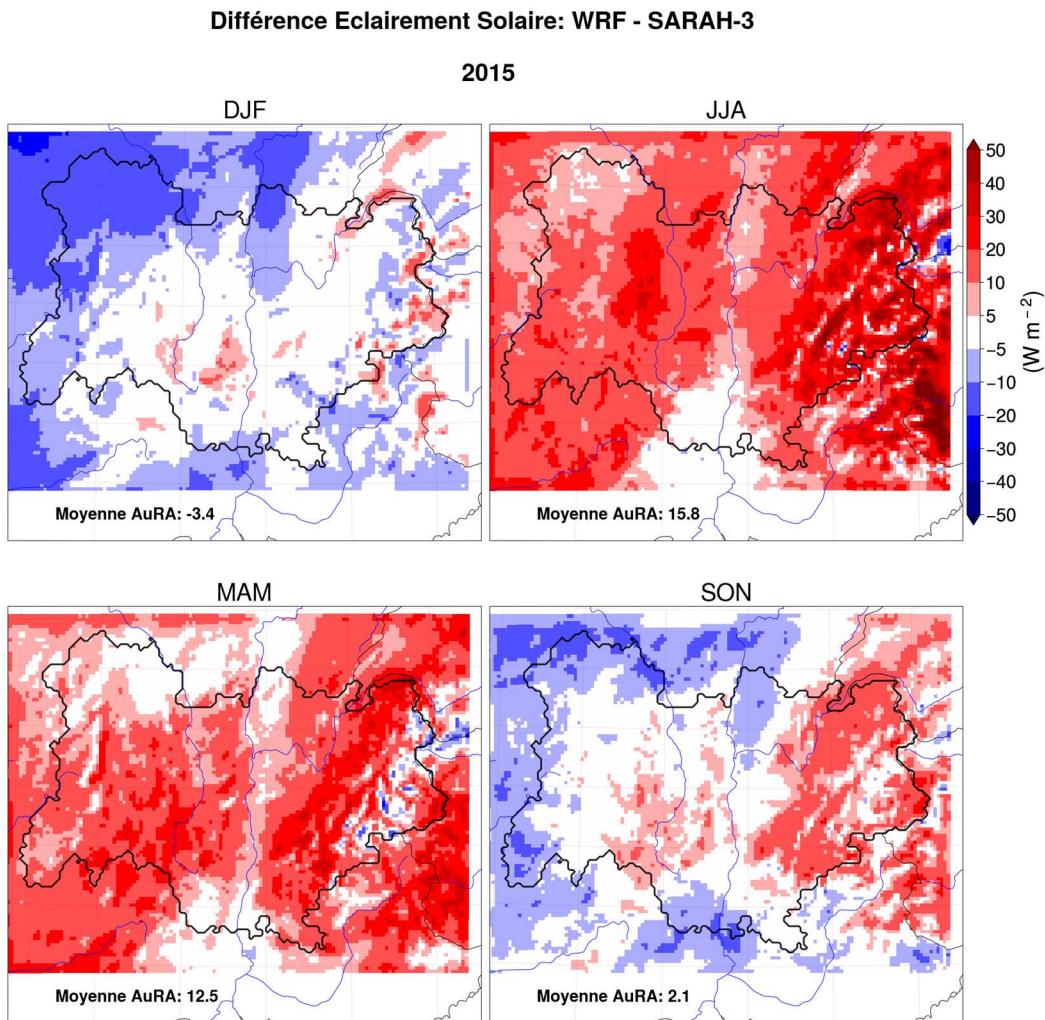


Figure 8 : Différence d'éclairement solaire (W.m⁻²) entre le modèle WRF et les données satellitaires SARAH-3 pour l'année 2015 par saison sur le domaine d'intégration d03 (3km). Les contours de la Région Auvergne-Rhône-Alpes sont indiqués en noir.

³ Décembre Janvier Février

⁴ Mars Avril Mai

⁵ Juin Juillet Août

⁶ Septembre Octobre Novembre

Dans la Figure 9, nous présentons une comparaison du cycle journalier du rayonnement solaire WRF et SARAH-3 par saison (ou profil moyen horaire par saison). Pour le printemps, été et automne dans une moindre mesure, on observe un assez bon accord entre WRF et SARAH-3 le matin. Le rayonnement solaire issu de WRF commence à diverger de celui de SARAH-3 en fin de matinée. La différence de rayonnement est maximale en début d'après-midi, où elle atteint jusqu'à 100 W.m^{-2} en été en moyenne régionale.

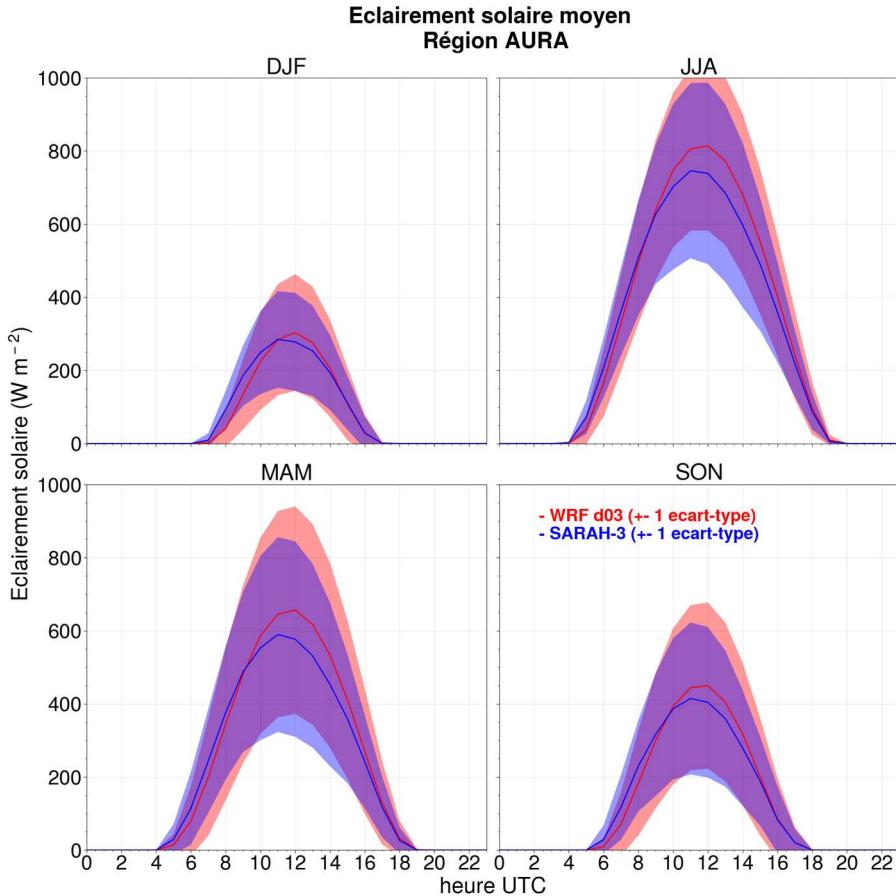


Figure 9 : Cycle journalier moyen de l'éclairement solaire (W.m^{-2}) pour le modèle WRF (rouge) et les données satellitaires SARAH-3 (bleu) pour l'année 2015, par saison. Les données interpolées sur la grille du domaine d03 à 3km sont moyennées sur le territoire de la Région AURA. Les zones ombragées correspondent à l'intervalle ± 1 écart-type.

La saisonnalité (printemps/été), la temporalité (milieu de journée) et la localisation (massifs montagneux) laisse à penser que cette différence de rayonnement solaire dans WRF par rapport à SARAH-3 est sans doute due à un déficit de nuages convectifs (cumulus, cumulonimbus) simulés dans le modèle atmosphérique. Nous avions vu dans l'introduction que ce type de nébulosité est complexe à modéliser à l'aide d'un modèle atmosphérique, en particulier dans une région aux reliefs aussi abrupts que la région AuRA. Bien que comme nous le verrons par la suite, l'utilisation d'une résolution horizontale de 3km représente déjà une plus-value importante, elle peut s'avérer toujours insuffisante pour modéliser certains types de nébulosités à faible étendue horizontale. Cette hypothèse est également appuyée par les résultats de la Figure 10 où sont présentées, en chaque point du domaine d03 (3kms) et à chaque pas de temps horaire, la comparaison entre les valeurs d'indice de clarté (K_t) issus du modèle WRF et ceux dérivés des données SARAH-3. Cet indice de clarté représente le rapport entre le rayonnement solaire incident au sol et le rayonnement solaire attendu au même endroit et au même moment par ciel clair. Cet indice est donc inversement proportionnel à la nébulosité. On peut voir un bon accord entre WRF et SARAH-3 pour les valeurs élevées de K_t (ciel clair) et les valeurs faibles (ciels complètement couverts, opaques). En revanche,

on observe une dispersion importante (désaccord) pour les valeurs intermédiaires de kt représentatifs de ciels avec nébulosités partielles (présence de cumulus, stratocumulus, nuages élevés de faible extension verticale...), qui demeurent complexe à modéliser avec un modèle atmosphérique y compris avec une résolution horizontale de 3 kms.

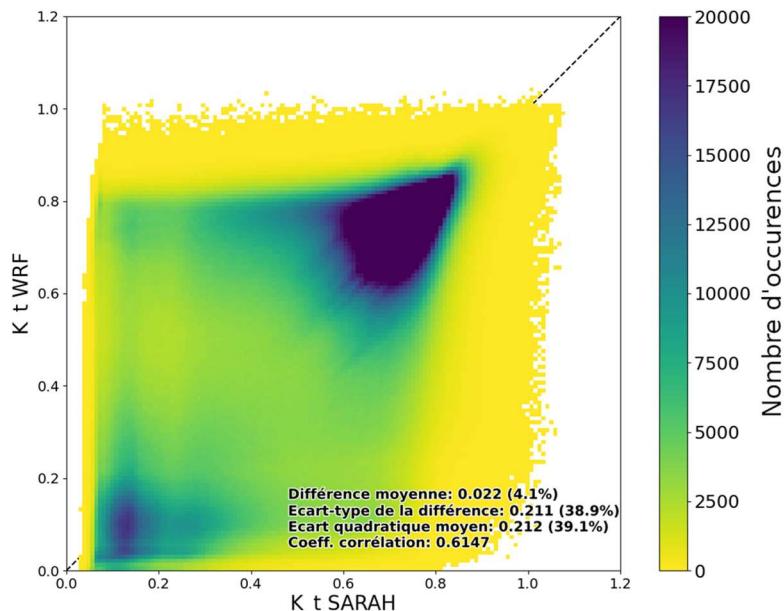


Figure 10 : Comparaison des indices de clarté (Kt) dérivés des sorties du modèle WRF pour le domaine d03 (3kms) et dérivés des données satellitaires SARAH-3. La comparaison est effectuée pour chaque point de grille et chaque pas de temps horaire.

Le rayonnement solaire modélisé par le modèle atmosphérique WRF a également été comparé avec celui des données satellitaires SARAH-3 pour le domaine d02 à une résolution de 9 kms. Les résultats présentés à la Figure 11 montrent des différences beaucoup plus importantes que celles constatées pour le domaine à 3kms avec une surestimation et sous-estimation importante du rayonnement dans WRF par rapport à SARAH-3 respectivement au quart sud-est et au quart nord-ouest du domaine. Les différences au sud et à l'est, sur les régions Méditerranéennes sont de l'ordre de +25% à +50% en toutes saisons. Elles sont du même ordre de grandeur mais de signe opposé (-25% à -50%) sur les régions du Nord et de l'Ouest de la France à l'automne et en hiver. On peut observer l'empreinte du domaine à 3kms (d03) sur les résultats de la comparaison, en particulier pour l'été et le printemps. Cela est dû à l'activation de l'option « two-way nesting » dans WRF, qui permet d'utiliser les sorties du domaine d03 en entrée du calcul du domaine d02 pour le pas de temps suivant. De manière générale, des écarts beaucoup moins importants par rapport à SARAH-3 pour le domaine d03 de WRF en comparaison à d02 démontrent d'une plus-value déjà importante de l'utilisation d'une résolution horizontale de 3kms pour la modélisation de la nébulosité et donc du rayonnement pour une région à la topographie complexe telle que la Région AuRA.

Difference relative Eclairement Solaire : WRF(d02) - SARAH-3

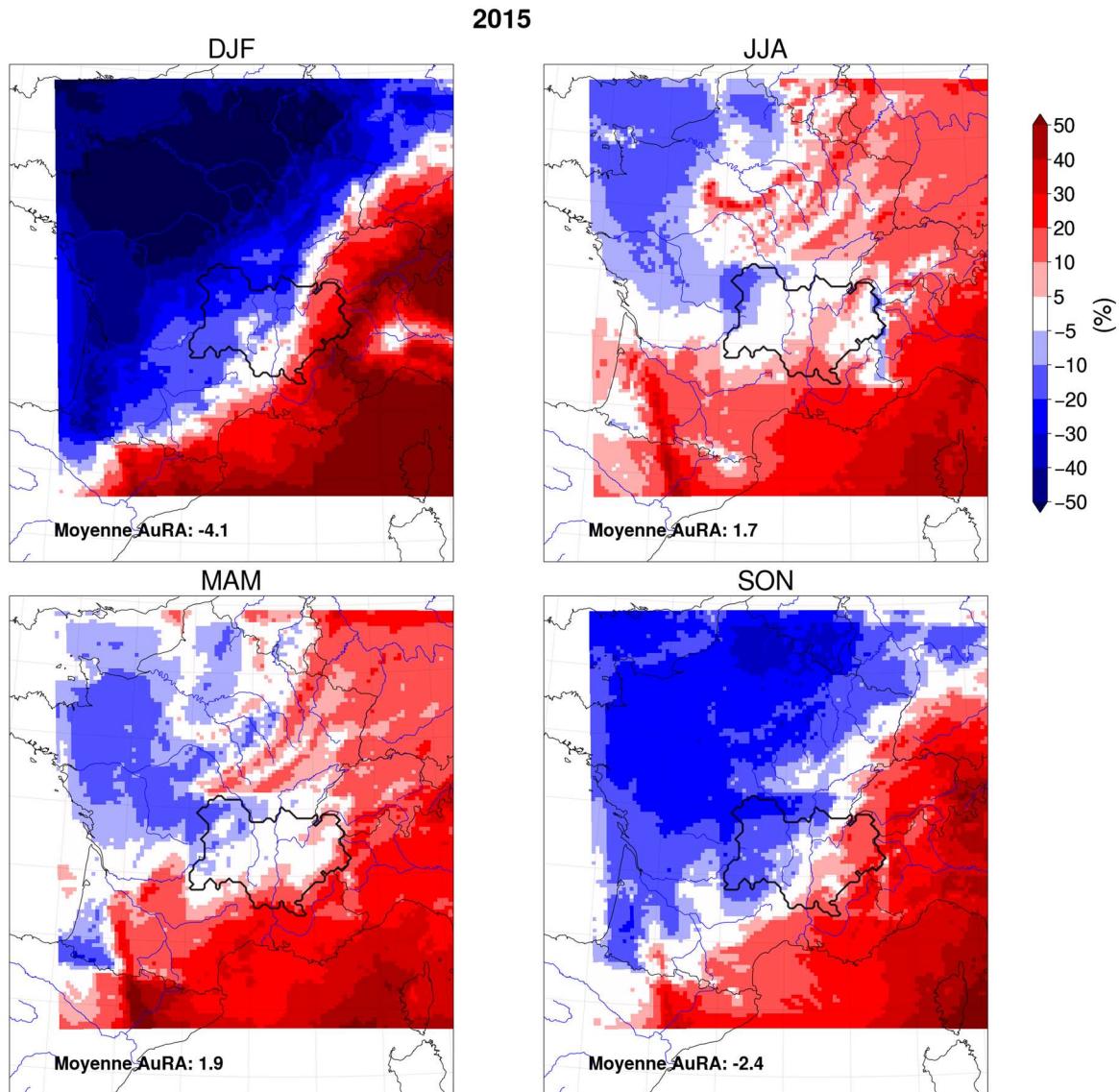


Figure 11 : Différence relative d'éclairement solaire (en %) entre le modèle WRF et les données satellitaires SARAH-3 pour l'année 2015 par saison sur le domaine d'intégration d02 (9km). Les contours de la Région Auvergne Rhône-Alpes sont indiqués en noir.

3.3. Résultats des tests de sensibilités avec le modèle CHIMERE

L'évaluation du rayonnement solaire modélisé par le modèle WRF à partir des données SARAH-3 nous a montré des écarts absolus (en W.m^{-2}) importants pour le printemps et l'été. Par ailleurs, ces saisons représentent la période durant laquelle les concentrations en O_3 à proximité de la surface sont les plus élevées et où le risque de pics est le plus important, ce qui présente des risques importants tant d'un point de vue sanitaire que d'un point de vue de l'économie et de la biodiversité via l'impact de concentrations élevées d'ozone sur la croissance et le développement des plantes. Pour ces raisons, la simulation de référence et les tests de sensibilités ont été réalisés à l'aide du modèle CHIMERE uniquement pour la période s'étendant du 1er avril au 30 septembre. Cette « saison de l'ozone » est utilisée classiquement comme référence dans différentes études (ex : Otero *et al.*, 2018). Ces simulations ont été réalisées pour l'année 2015 à l'aide de la version 73 du cadastre

d'Atmo AuRA pour les émissions régionales. Etant donné que l'introduction du rayonnement solaire satellitaire (SARAH-3) est susceptible d'impacter principalement les concentrations d'ozone en journée, les différents scénarios pour lesquels le rayonnement solaire de WRF est remplacé par celui de SARAH-3 sont comparés à la simulation de référence via le calcul de l'indice MDA8 (Mean values of the Daily maximum Average 8h). Cet indice représente, pour chaque journée, la valeur maximale d'ozone moyennée sur 8 heures glissantes. La simulation de référence ainsi que les deux scénarios ont également été évalués via la comparaison aux données d'observations issues des stations du réseau d'Atmo AuRA (stations « industrielles » et « trafic» exclues) et le calcul de statistiques classiques d'évaluation au pas de temps horaires et journaliers.

3.3.1 Scénario 1

Le scénario 1 a été produit en remplaçant le rayonnement du modèle WRF par le rayonnement solaire satellitaire SARAH-3 uniquement pour le domaine à haute résolution d03 (3kms). L'impact sur les concentrations en ozone simulée pour la période avril-septembre de l'année 2015 est présenté à la Figure 12. Cette figure montre la différence pour le MDA8 (maximum journalier d'ozone sur une moyenne de 8 heures glissantes) moyen calculé sur l'ensemble de la période entre SCENARIO1 et la simulation REFERENCE. A l'échelle de la Région, la différence sur le MDA8 atteint la valeur de $-0,18 \mu\text{g.m}^{-3}$, ce qui est assez faible et ne représente qu'environ 0,25% de la valeur du MDA8 moyen régional pour cette période de l'année. On voit que localement, cette différence sur les valeurs de MDA8 est un peu plus importante et atteint jusqu'à $0,8 \text{ à } 1 \mu\text{g.m}^{-3}$ dans les vallées alpines, notamment le sillon alpin (vallée du Grésivaudan, vallée de l'Arve...). Les écarts semblent même maximum pour les zones correspondants aux agglomérations de Grenoble, Chambéry-Aix et Annecy. Les écarts sur ces zones restent cependant relativement minimes car ils correspondent à environ 1% de la valeur moyenne du MDA8 pour la période avril-septembre.

Différence MDA8 CHIMERE : SCENARIO1 - REFERENCE

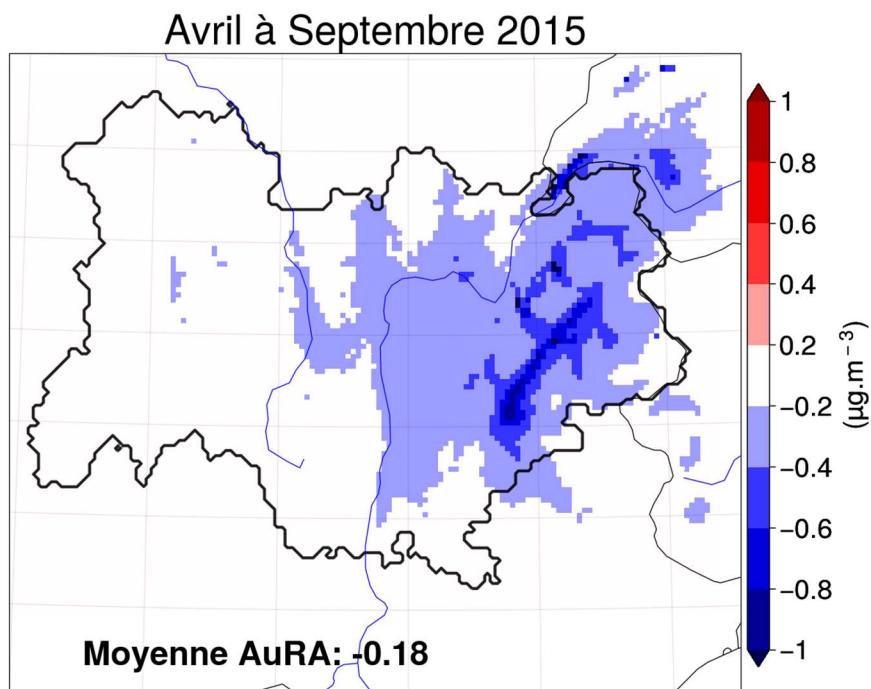


Figure 12 : Différence pour le MDA8 moyen ($\mu\text{g.m}^{-3}$) de la saison d'Ozone (avril-septembre) 2015 entre la simulation SCENARIO1 (remplacement du rayonnement solaire WRF par SARAH-3 uniquement pour le domaine d01) et la simulation REFERENCE. Les contours de la Région Auvergne Rhône-Alpes sont indiqués en noir.

Le jour où la différence entre la simulation REFERENCE et la simulation SCENARIO1 est maximale au cours de la saison d'ozone a été recherché : il s'agit du samedi 18 juillet 2015 où la différence à l'échelle de la Région atteint $-1,16 \mu\text{g.m}^{-3}$. La carte de différence de MDA8 à l'échelle régionale ainsi que quelques informations sur les conditions météorologiques correspondants à cette journée sont présentées dans les annexes.

Afin d'évaluer si l'introduction du rayonnement solaire d'origine satellitaire a amélioré la modélisation de l'ozone, différents scores pour la modélisation des moyennes horaires sont présentés à la Figure 13 pour la simulation REFERENCE et SCENARIO1. Moyenné sur l'ensemble des stations du réseau d'Atmo AuRA (stations d'influence « trafic » et « industrielles » exclues), on constate très peu de différences sur les scores horaires pour la modélisation de l' O_3 , et l'on ne peut dire que l'introduction du rayonnement solaire SARAH-3 pour le domaine CHIMERE à haute résolution (d03) est bénéfique pour la modélisation de l'ozone. Comme il a été mis en évidence à la Figure 12, que les vallées alpines sont les zones où la différence en MDA8 modélisé est la plus forte entre les deux simulations, les statistiques pour les stations situées dans ces vallées ont été extraites et rassemblées dans un tableau (voir Annexe). A nouveau, on observe peu de différences sur les scores de la simulation REFERENCE et SCENARIO1 pour la modélisation de l'ozone au pas de temps horaire et on ne peut affirmer l'existence d'un quelconque gain de performance associé à l'utilisation du rayonnement satellitaire y compris dans les vallées alpines.

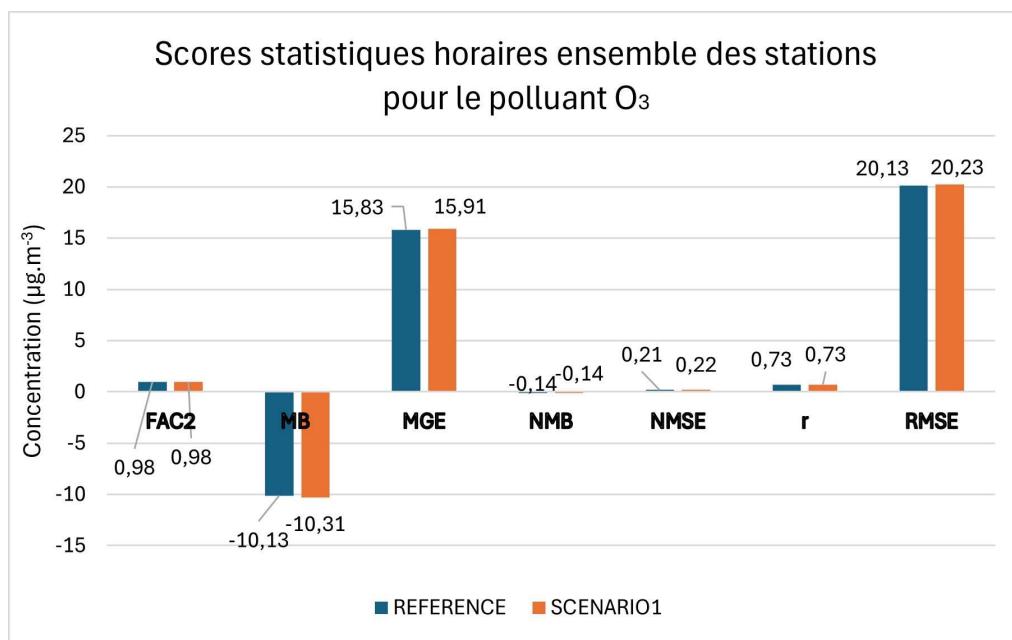


Figure 13 : Scores statistiques horaires sur la période avril-septembre 2015 pour le polluant ozone pour l'ensemble des stations (« industrielles » et « trafic » exclues) pour la simulation REFERENCE (bleu foncé) et SCENARIO1 (bleu clair). Scores calculés pour les indicateurs suivants : biais moyen (MB), biais moyen normalisé (NMB), coefficient de corrélation (r), erreur quadratique moyenne, fraction inférieure au facteur 2 (FAC2), erreur géométrique moyenne (MGE), et erreur géométrique normalisée (NMGE)

3.3.2 Scénario 2

Le SCENARIO2 a été produit en remplaçant le rayonnement du modèle WRF par le rayonnement solaire satellitaire SARAH-3 pour les trois domaines CHIMERE d01, d02, d03 (27, 9 et 3kms). Comme pour SCENARIO1, la différence sur le MDA8 moyen calculé sur l'ensemble de la période avril-septembre 2015 entre SCENARIO2 et la simulation REFERENCE est présenté (Figure 14). A l'échelle de la Région, la différence sur le MDA8 est multipliée par deux par rapport à la différence SCENARIO1-REFERENCE, et atteint une valeur moyenne de $-0,36 \mu\text{g.m}^{-3}$. Cette valeur reste relativement faible car cela correspond toujours à moins de 0,5% de valeur moyenne du MDA8

régional au cours de cette saison. Néanmoins, la zone concernée par une différence d'au moins $0,4 \mu\text{g.m}^{-3}$ ($\sim 0.5\%$) pour la valeur moyenne du MDA8 est nettement plus importante que pour l'expérience SCENARIO1 et concerne désormais l'ensemble des régions à l'est (rive gauche) du Rhône. A nouveau, les vallées alpines et leurs agglomérations sont les zones pour lesquelles on observe les différences les plus importantes de MDA8 moyen (de $-0,8$ à $-1,2 \mu\text{g.m}^{-3}$). Pour ces régions cependant, il ne semble pas y avoir un doublement de la différence sur le MDA8 en comparaison à l'expérience SCENARIO1 comme on peut l'observer pour la moyenne régionale, mais plutôt une augmentation de la différence d'environ $-0,2 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Différence MDA8 CHIMERE : SCENARIO2 - REFERENCE

Avril à Septembre 2015

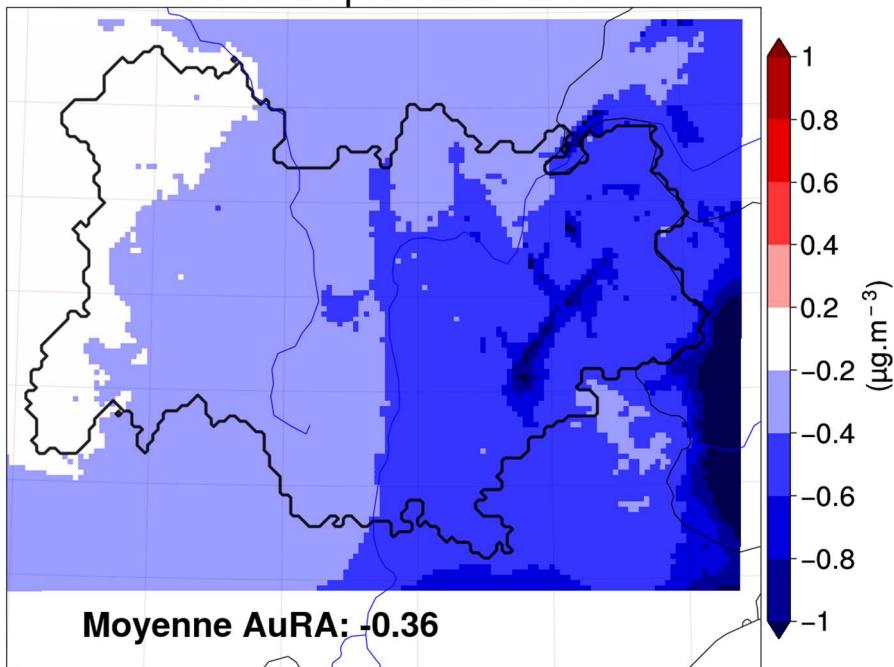


Figure 14 : Différence pour le MDA8 moyen ($\mu\text{g.m}^{-3}$) de la saison d'Ozone (avril-septembre) 2015 entre la simulation SCENARIO2 (remplacement du rayonnement solaire WRF par SARAH-3 pour les trois domaines) et la simulation REFERENCE. Les contours de la Région AuRA sont indiqués en noir.

Comme pour SCENARIO1, le jour avec la plus grande différence de MDA8 a été recherché : il s'agit cette fois du 08 août 2015, avec une différence à l'échelle régionale d'environ $-1.5 \mu\text{g.m}^{-3}$. La carte de différence en MDA8 ainsi que des informations sur les conditions météorologiques associées à cette journée sont présentées en annexe.

Tout comme pour la simulation SCENARIO1, les potentiels gains en termes de modélisation apportés par l'utilisation du rayonnement satellitaire SARAH-3 pour l'ensemble des trois domaines CHIMERE ont été évalués en calculant les scores horaires pour les concentrations en O_3 dans les différentes stations du réseau d'Atmo AuRA. A nouveau, on observe très peu de différences que soit pour les statistiques sur l'ensemble des stations (voir Figure 15), ou en isolant les statistiques des stations des vallées alpines (voir annexes) où l'on observe le plus de différences en termes de MDA8 modélisés entre les simulations SCENARIO2 et REFERENCE. Aucun gain en termes de scores pour la modélisation de l' O_3 associé à l'utilisation des données satellitaires de rayonnement SARAH-3 n'est donc identifié.

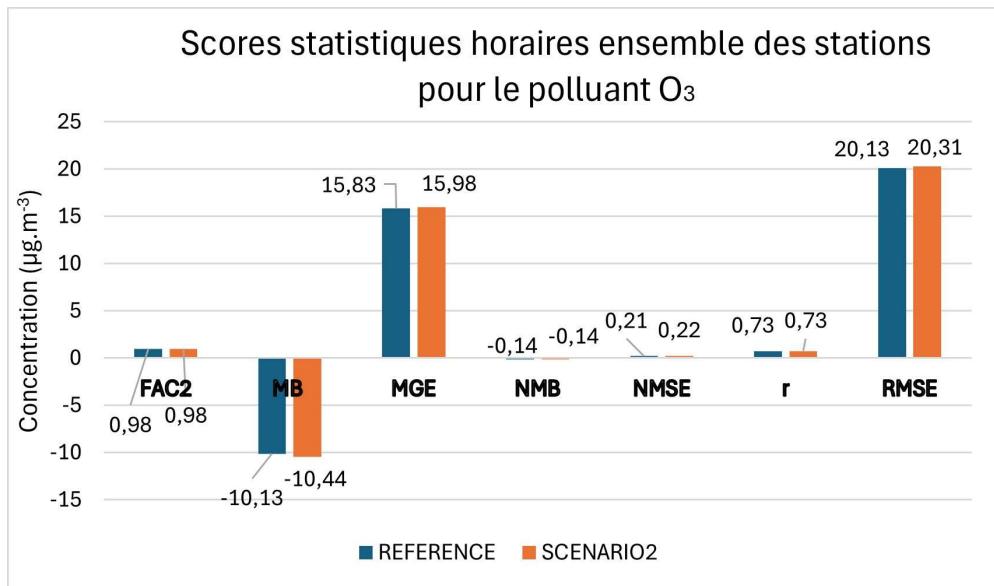


Figure 15 : Scores statistiques horaire sur la période avril-septembre 2015 pour le polluant ozone pour l'ensemble des stations (« industrielles » et « trafic » exclues) pour la simulation REFERENCE (bleu foncé) et SCENARIO2 (bleu clair). Scores calculés pour les indicateurs suivants : biais moyen (MB), biais moyen normalisé (NMB), coefficient de corrélation (r), erreur quadratique moyenne, fraction inférieure au facteur 2 (FAC2), erreur géométrique moyenne (MGE), et erreur géométrique normalisée (NMGE)

4. Discussion

Les faibles différences de concentration en O₃ modélisés entre les simulations CHIMERE utilisant le rayonnement satellitaire SARAH-3 et celles utilisant le rayonnement solaire WRF peuvent paraître étonnantes lorsque l'on connaît le rôle important que joue le rayonnement dans la formation d'ozone. Néanmoins, même si le rayonnement joue un rôle clé sur la formation d'ozone, l'influence du rayonnement solaire sur les variations inter-journalières de concentration en ozone, est à relativiser comme cela a été mis en évidence dans l'étude d'Otero *et al.*, (2018). Cette étude a mis en évidence les liens entre valeurs journalières de MDA8 en Europe et facteurs météorologiques à partir de régressions linéaires multiplient sur les valeurs issues des observations et de simulations de chimie-transport. Les résultats pour la région correspondant à la France suggèrent une influence assez faible du rayonnement solaire avec une part de la variance du MDA8 journalier expliquée d'environ 5 à 10 %, celle-ci est inférieure aux trois prédicteurs principaux que sont la concentration en O₃ du jour précédent (persistance), la température maximale et l'humidité relative à proximité de la surface.

Lorsque l'on considère l'ordre de grandeur des différences sur le rayonnement solaire entre WRF et SARAH-3 (quelques % sur la moyenne régionale et saisonnière et localement au maximum 15 à 20% pour le domaine à haute résolution, 3kms) ainsi que la faible part de la variance sur les concentrations journalières en O₃ (MDA8) expliquées par le rayonnement solaire dans les résultats d'Otero *et al.*, (2018), les faibles différences trouvées dans nos expériences de modélisations apparaissent cohérentes. De même, nos résultats sont cohérents avec ceux d'Oikonomakis *et al.*, (2018) qui, à partir d'expériences de modélisation (modèle CAMx), ont cherché à mettre en évidence l'impact indirect de la diminution de la pollution particulaire (aérosols) observés en Europe à partir des années 1990 sur les concentrations en ozone via l'augmentation du rayonnement solaire (réduction de l'absorption et réflexion du rayonnement solaire par les aérosols). A partir de différences de rayonnement du même ordre que celles appliquées dans nos expériences, soit environ 9 à 17 W.m⁻² (environ 3-5%), ces auteurs ont trouvé des différences minimes en termes de concentration en O₃ modélisées (0,4 à 0,8 ppb, soit 0,7 à 1,5%).

Un aspect intéressant des résultats de cette étude est la distribution spatiale des différences en concentration en O₃ modélisé entre les scénarios et la simulation de référence. En effet, les différences les plus marquées s'observent dans les vallées Alpines et leurs agglomérations. Certes, ces zones figurent parmi les régions où des différences importantes entre les rayonnements WRF et SARAH-3 ont été mises en évidence, mais des différences similaires ont aussi été mises en évidence dans certaines zones de montagne (Pré-Alpes, Haute Maurienne, Auvergne...) alors que très peu de différences en termes d'ozone modélisé ont été trouvées pour ces zones de montagnes à partir des expériences menées avec les données de rayonnement WRF et SARAH-3. Il semblerait donc qu'une même modification du rayonnement solaire aurait plus d'impact sur les concentrations en ozone dans les régions où la présence de précurseurs est importante (oxydes d'azotes, COV...) et où la proportion d'ozone formé localement est possiblement plus importante. Ce résultat est également visible dans les différences de concentration en ozone dans notre domaine de résolution horizontale intermédiaire de 9 kms (non présentés) où l'on observe les différences les plus fortes dans la Plaine du Pô et d'autres régions d'Italie qui sont connues comme étant des régions présentant de forts niveaux d'émissions de précurseurs d'ozone. Ces résultats sont également similaires avec ceux d'Oikonomakis *et al.*, (2018) qui avaient également mis en évidence dans leur simulation à basse résolution sur l'ensemble de l'Europe, un plus fort impact de l'augmentation du rayonnement sur les régions (ex. Plaine du Pô) avec des concentrations importantes en précurseurs.

Pour aller plus loin dans l'analyse de ce phénomène, nous avons également analysé les corrélations spatiales (Figure 16) et temporelles (Figure 17) entre différence de rayonnement solaire et différence de concentration en ozone (MDA8) modélisées. Sur la Figure 16, on peut voir la valeur du coefficient de corrélation de Spearman (r) en chaque point de notre domaine entre la différence de MDA8 journalier modélisé dans les expériences CHIMERE (SCENARIO1 – REFERENCE) et la différence de rayonnement solaire entre WRF et SARAH3 (moyenne journalière) utilisée en entrée de ces simulations. On voit clairement apparaître dans ces figures une plus forte corrélation dans les vallées urbanisées ou concernées par un trafic ou une activité agricole importante (présence de précurseurs) : vallées alpine, vallée du Rhône, plaine de la Limagne et agglomération de Clermont-Ferrand, plaines de l'Allier etc. A contrario, on retrouve des coefficients de corrélation moindres dans les zones de haute et de moyenne montagne.

Coefficient de corrélation (r) Differences MDA8 et SWRD SCENARIO1 - REFERENCE

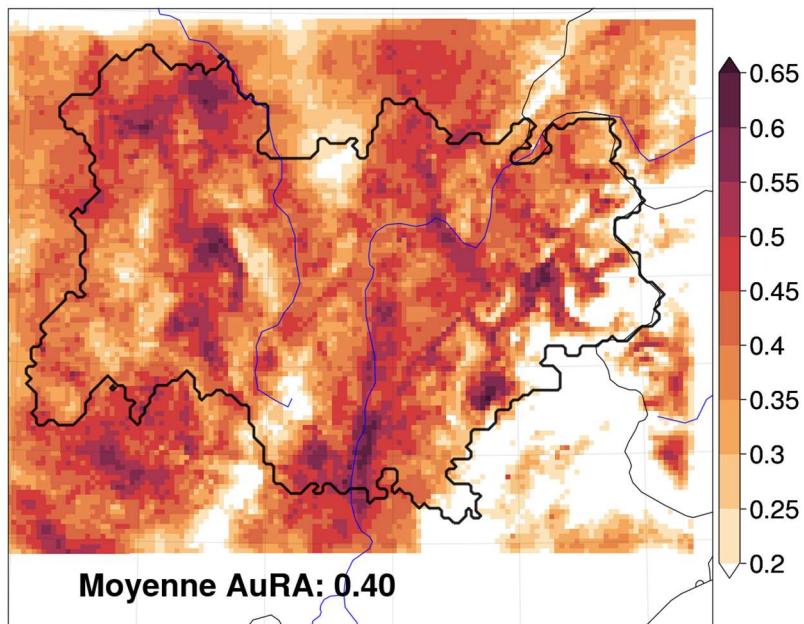


Figure 16 : Coefficient de corrélation (r) entre différences de concentration en ozone (MDA8 journalier) modélisée (SCENARIO1 - REFERENCE) et différence de rayonnement solaire (WRF – SARAH3) utilisé en entrée de ces simulations. Les contours de la région AuRA sont affichés en noir.

Dans la Figure 17, on peut voir un nuage de points où chaque point représente la différence de MDA8 modélisé (SCENARIO1 – REFERENCE) et la différence de rayonnement solaire (WRF-SARAH-3) utilisée en entrée de chacune de ces simulations moyennées à l'échelle de la Région AuRA pour chaque jour de la simulation (avril à septembre 2015).

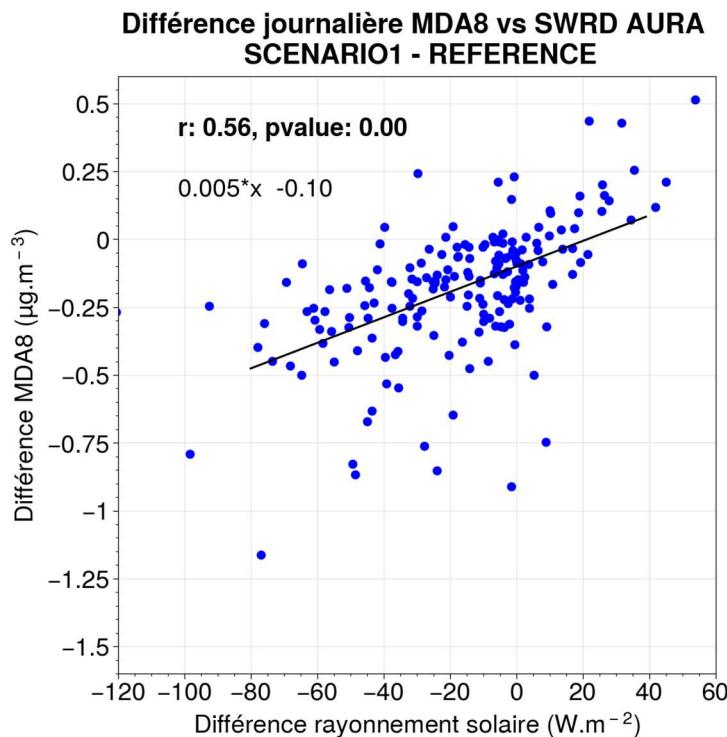


Figure 17 : Nuage de points entre la différence (SCENARIO1 – REFERENCE) de concentration en O₃ modélisée (MDA8 journalier en µg.m⁻³) et la différence (SARAH-3 – WRF) de rayonnement solaire moyen journalier (moyennes sur la région AuRA). L'équation de la régression linéaire et le coefficient de corrélation sont également indiqués.

Le coefficient de corrélation temporelle (régression linéaire sur l'ensemble des points) n'est pas aussi élevé qu'attendu (0,56) et une même différence de rayonnement solaire peut engendrer des différences de MDA8 très différentes dans la région, sans doute en fonction des régions concernées par ces différences de rayonnement (présence ou non de précurseurs) et de la météorologie de la journée en question.

Bien que le rayonnement solaire satellitaire soit a priori plus fiable (le rayonnement satellitaire est utilisé pour évaluer les modèles atmosphériques), l'utilisation du rayonnement SARAH-3 à la place du rayonnement issu de modèle atmosphérique WRF a engendré de très faibles différences en termes de concentrations en ozone modélisées (<1%) et surtout cela n'a occasionné aucune amélioration des scores de modélisation des concentrations horaires d'O₃ aux stations du réseau d'Atmo AuRA. Cette absence d'amélioration des scores peut paraître surprenante, mais d'abord il faut à nouveau rappeler l'influence relative du rayonnement solaire sur les concentrations journalières d'O₃ mis en évidence dans nos résultats et dans des études antérieures (Otero *et al.*, 2018, Oikonomakis *et al.*, 2018). Ensuite, bien qu'il s'agisse d'expériences de modélisation intéressantes afin de mettre en évidence la sensibilité des concentrations en O₃ modélisées au rayonnement solaire utilisé en entrée, ces simulations présentent des limitations importantes, et même une part d'incohérences physique. En effet, dans ces simulations, nous remplaçons uniquement le rayonnement solaire par le rayonnement satellitaire SARAH-3, tout en laissant l'ensemble des autres variables météorologiques inchangées. Or, les erreurs de rayonnement solaire modélisé par le modèle atmosphérique WRF ont généralement pour origine des biais dans la modélisation de certains types de nuages. Ces erreurs seront elles-mêmes à l'origine d'erreurs (biais) sur la température de l'air modélisée à proximité de la surface, et donc également d'erreurs sur l'humidité relative.

L'étude d'Otero *et al.*, (2018) a montré que ces variables (humidité relative et température l'air) ont un poids statistique (part de la variance expliquée) au moins aussi important (voir plus) que le rayonnement solaire par rapport aux variations inter-journalières de concentrations d'ozone. Or, ces

variables météorologiques de surface sont difficilement accessibles à partir de mesures satellitaires. Il apparaît donc plus souhaitable de chercher à optimiser le rayonnement solaire dans le modèle atmosphérique (WRF) en prenant, par exemple, le rayonnement satellitaire comme une référence afin d'obtenir par la suite des données météorologiques d'entrées (température, humidité relative) modifiée de façon cohérente, ce qui serait susceptible d'avoir un impact important sur la modélisation de l'ozone.

5. Conclusions et perspectives

Dans cette étude, nous avons évalué la pertinence des données satellitaires de rayonnement solaire SARAH-3 pour suivre l'évolution du rayonnement solaire en Région Auvergne-Rhône-Alpes ainsi que le potentiel de ces données pour améliorer la caractérisation de l'ozone de surface dans la Région à l'aide d'outils de modélisation.

Conformément aux résultats d'études antérieures, les données SARAH-3 suggèrent une augmentation significative du rayonnement solaire en Région Auvergne-Rhône-Alpes aux cours des 40 dernières années (1983-2022) : $+3.1 \text{ W.m}^{-2}$ par décennies. Cette tendance à la hausse du rayonnement est principalement expliquée par la baisse de la pollution particulières (aérosol). La comparaison des données satellitaires SARAH-3 avec des données de stations de mesures au sol (base de données GEBA) a également permis de mettre en évidence un bon accord entre ces deux jeux de données, à la fois sur les tendances et sur la variabilité interannuelle à l'échelle de la Région. Les données SARAH-3 et GEBA suggèrent que les tendances à la hausse du rayonnement solaire au cours des 20 dernières années (2000-2019) s'explique principalement par de fortes tendances à la hausse durant certains mois du printemps et de l'été (avril, juillet, août). Les données des stations d'ozone « de fond » du réseau d'Atmo AuRA suggèrent en revanche une tendance à la hausse de l'ozone sur cette même période principalement dominée par des tendances positives durant les mois d'hiver (janvier, février), ce qui permet difficilement d'établir de lien entre les tendances des deux variables (rayonnement solaire et ozone).

Nous avons ensuite procédé à des tests de sensibilité en remplaçant le rayonnement solaire issu du modèle numérique de prévision (WRF) par le rayonnement solaire satellitaire (SARAH-3) afin d'alimenter en entrée le modèle de chimie-transport (CHIMERE) utilisé de façon routinière par Atmo AuRA pour alimenter les prévisions, la cartographie annuelle et les scénarisations de la qualité de l'air, dont l'ozone. Ces expériences ont permis d'évaluer la sensibilité des concentrations en ozone modélisées par le modèle CHIMERE au rayonnement solaire utilisé en entrée. Au préalable, les données de rayonnement SARAH-3 ont été comparées au rayonnement du modèle WRF et suggèrent une surestimation du modèle WRF par rapport à SARAH-3, principalement au printemps et en été. Cette surestimation concerne plutôt les régions montagneuses (localement 15 à 20%) et est plus marquée à la mi-journée, probablement en raison d'un déficit de nuages de type convectif dans le modèle WRF. L'introduction du rayonnement solaire SARAH-3 à la place du rayonnement WRF a eu un impact très faible sur les concentrations d'ozone modélisée en journée (MDA8) durant la période d'avril à septembre : de -0,2 à -0,4 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (-0,25 à -0,5%) à l'échelle de la Région. Localement, l'impact sur les concentrations a été un peu plus important, principalement dans les vallées alpines et leurs agglomérations : environ -1 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (>1%). Ce résultat suggère une sensibilité plus élevée aux variations de rayonnement solaire dans les régions où les concentrations en précurseurs d'ozone (oxydes d'azote et composés organiques volatils) sont importantes et où la part d'ozone formée localement est importante et est similaire avec les résultats d'une étude précédente réalisée à l'échelle de l'Europe.

Le remplacement du rayonnement solaire WRF par le rayonnement satellitaire SARAH-3 n'a pas eu d'impact significatif sur les scores horaires des concentrations en O_3 modélisées aux stations du réseau d'Atmo AuRA (scores inchangés). Au vu des faibles différences de concentrations en ozone modélisées et de l'absence d'amélioration des scores horaires ou journaliers aux stations, il n'apparaît pas souhaitable de développer des méthodes d'assimilation de données ou de correction statistiques à partir de ces données satellitaires de rayonnement solaire afin d'améliorer la modélisation de l'ozone dans des contextes de prévision ou de scénarisation. En revanche, les données satellitaires

de rayonnement solaire peuvent servir de référence afin d'évaluer le rayonnement solaire dans les modèles numériques de prévision tel que WRF, notamment dans le cadre de tests visant à optimiser les options physiques et la configuration du modèle atmosphérique afin d'obtenir en sortie des variables météorologiques plus fiables et notamment moins biaisées en termes de rayonnement solaire. Cet exercice permettrait d'obtenir des variables météorologiques corrigées et améliorées de manière physiquement cohérente, notamment pour des variables telles que la température et l'humidité relative à proximité de la surface qui ont également une influence importante sur les concentrations journalières en ozone.

Annexes

A. Scores aux stations

Tableau 2 : Scores statistiques horaire sur la période avril-septembre 2015 pour le polluant O3 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) pour les stations situées dans les vallées alpines pour la simulation **REFERENCE**. Scores calculés pour les indicateurs suivants : biais moyen (MB), bias moyen normalisé (NMB), coefficient de corrélation (r), erreur quadratique moyenne, fraction inférieure au facteur 2 (FAC2), erreur géométrique moyenne (MGE), et erreur géométrique normalisée (NMGE)

si_isit	id_site	si_type	FAC2	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
Albertville	FR33121_11	Urbain	71,38	18,26	26,74	31,11	45,55	33,54	0,61
Annecy Loverchy	FR33201_11	Urbain	58,09	-14,04	29,38	-22,09	46,21	38,33	0,53
Annemasse	FR33211_11	Urbain	83,61	-1,68	21,55	-2,41	30,96	28,03	0,55
Chambéry le Haut	FR33102_11	Urbain	74,16	-12,34	26,77	-16,45	35,70	34,14	0,53
Chamonix	FR33120_11	Urbain	61,80	28,61	35,98	48,21	60,63	43,92	0,35
Champ-sur-Drac	FR15013_11	Péri-Urbain	76,77	11,00	27,73	15,57	39,25	34,43	0,52
Grenoble les Frênes	FR15043_11	Urbain	55,91	-3,43	31,41	-5,86	53,64	39,64	0,45
Grenoble Peri-urbain Sud	FR15045_11	Péri-urbain	89,37	-0,91	20,80	-1,21	27,50	26,00	0,64
Grésivaudan Periurbain	FR15048_11	Péri-urbain	72,87	19,48	28,01	31,93	45,92	35,28	0,55
Novel	FR33202_11	Urbain	69,23	-15,99	28,35	-22,18	39,32	36,98	0,51
Passy	FR33220_11	Urbain	71,48	16,75	25,65	29,69	45,46	31,81	0,54
Pasteur	FR33101_11	Urbain	66,06	-11,63	28,95	-16,79	41,76	36,26	0,53
Saint Jean	FR33111_11	Urbain	77,63	1,68	24,89	2,43	35,89	31,40	0,42
St-Martin-d'Hères	FR15038_11	Urbain	52,32	-24,30	34,22	-35,82	50,45	44,13	0,52
Voiron Urbain	FR15018_11	Urbain	89,12	1,53	20,70	2,11	28,57	25,85	0,59
Moyenne			71,32	0,87	27,41	2,55	41,79	34,65	0,52

Tableau 3 : Scores statistiques horaire sur la période avril-septembre 2015 pour le polluant O3 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) pour les stations situées dans les vallées alpines pour la simulation **SCENARIO1**. Scores calculés pour les indicateurs suivants : biais moyen (MB), bias moyen normalisé (NMB), coefficient de corrélation (r), erreur quadratique moyenne, fraction inférieure au facteur 2 (FAC2), erreur géométrique moyenne (MGE), et erreur géométrique normalisée (NMGE)

si_isit	id_site	si_type	FAC2	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
Albertville	FR33121_11	Urbain	71,73	17,80	26,45	30,33	45,07	33,21	0,62
Annecy Loverchy	FR33201_11	Urbain	58,14	-14,30	29,38	-22,49	46,22	38,34	0,53
Annemasse	FR33211_11	Urbain	83,47	-1,94	21,57	-2,79	30,99	28,04	0,55
Chambéry le Haut	FR33102_11	Urbain	74,29	-12,73	26,78	-16,97	35,71	34,11	0,53
Chamonix	FR33120_11	Urbain	61,83	28,37	35,87	47,80	60,44	43,80	0,34
Champ-sur-Drac	FR15013_11	Péri-Urbain	76,80	10,53	27,66	14,91	39,16	34,33	0,52

Grenoble les Frênes	FR15043_11	Urbain	56,00	-3,91	31,31	-6,68	53,46	39,58	0,44
Grenoble Periurbain Sud	FR15045_11	Péri-urbain	89,39	-1,28	20,81	-1,69	27,51	25,99	0,64
Gresivaudan Periurbain	FR15048_11	Péri-urbain	73,03	19,09	27,82	31,30	45,62	35,05	0,55
Novel	FR33202_11	Urbain	69,25	-16,29	28,38	-22,60	39,37	37,03	0,51
Passy	FR33220_11	Péri-Urbain	71,48	16,75	25,65	29,69	45,46	31,81	0,54
Pasteur	FR33101_11	Urbain	66,17	-11,92	28,95	-17,20	41,77	36,23	0,53
Saint Jean	FR33111_11	Urbain	77,66	1,35	24,90	1,95	35,89	31,44	0,42
St-Martin-d'Hères	FR15038_11	Urbain	52,27	-24,64	34,28	-36,33	50,54	44,21	0,52
Voiron Urbain	FR15018_11	Urbain	89,21	1,30	20,67	1,80	28,53	25,81	0,59
Moyenne			71,38	0,55	27,37	2,07	41,72	34,60	0,52

Tableau 4 : Scores statistiques horaire sur la période avril-septembre 2015 pour le polluant O3 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) pour les stations situées dans les vallées alpines pour la simulation **SCENARIO2**. Scores calculés pour les indicateurs suivants : biais moyen (MB), bias moyen normalisé (NMB), coefficient de corrélation (r), erreur quadratique moyenne, fraction inférieure au facteur 2 (FAC2), erreur géométrique moyenne (MGE), et erreur géométrique normalisée (NMGE)

si_isit	id_site	si_type	FAC2	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
Albertville	FR33121_11	Urbain	71,80	17,67	26,37	30,11	44,92	33,11	0,62
Annecy Loverchy	FR33201_11	Urbain	58,05	-14,40	29,39	-22,66	46,23	38,35	0,53
Annemasse	FR33211_11	Urbain	83,47	-2,09	21,58	-3,00	31,00	28,03	0,55
Chambéry le Haut	FR33102_11	Urbain	74,18	-12,86	26,81	-17,15	35,75	34,14	0,53
Chamonix	FR33120_11	Urbain	61,94	28,18	35,75	47,48	60,23	43,61	0,35
Champ-sur-Drac	FR15013_11	Péri-Urbain	76,82	10,37	27,60	14,68	39,08	34,26	0,52
Grenoble les Frênes	FR15043_11	Urbain	55,95	-4,02	31,29	-6,87	53,42	39,56	0,44
Grenoble Periurbain Sud	FR15045_11	Péri-urbain	89,32	-1,44	20,81	-1,90	27,52	25,99	0,64
Gresivaudan Periurbain	FR15048_11	Péri-urbain	73,22	18,93	27,72	31,03	45,46	34,92	0,55
Novel	FR33202_11	Urbain	69,18	-16,41	28,39	-22,77	39,38	37,04	0,51
Passy	FR33220_11	Péri-Urbain	71,56	16,60	25,56	29,43	45,30	31,69	0,54
Pasteur	FR33101_11	Urbain	66,11	-12,04	28,97	-17,38	41,80	36,25	0,53
Saint Jean	FR33111_11	Urbain	77,56	1,21	24,87	1,74	35,85	31,39	0,42
St-Martin-d'Hères	FR15038_11	Urbain	52,13	-24,75	34,30	-36,48	50,57	44,22	0,52
Voiron Urbain	FR15018_11	Urbain	89,23	1,12	20,64	1,54	28,49	25,78	0,59
Moyenne			71,37	0,40	27,34	1,85	41,67	34,56	0,52

B. Jours avec différences de MDA8 maximums

Scenario 1 :

Le jour où la différence entre la simulation REFERENCE et la simulation SCENARIO1 est maximale au cours de la saison d'ozone a été recherché : il s'agit du samedi 18 juillet 2015. La différence pour le MDA8 calculé au cours de cette journée est présentée à la Figure 18. A l'échelle de la Région, la différence atteint $-1,16 \mu\text{g.m}^{-3}$, mais on voit qu'elle atteint -2 à $-3 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour une vaste zone comprenant les vallées alpines, la vallée du Rhône, l'Ain, ainsi que l'agglomération de Clermont-Ferrand. D'un point de vue météorologique, cette journée a été caractérisée par un faible flux de Sud, chaud et instable (situation de marais barométrique), une certaine chaleur (+33°C à Grenoble, +32°C à Lyon et Clermont Ferrand), la présence de précipitations localisées (2mm à Lyon, 6mm à Clermont) et un ensoleillement limité (6 à 7h sur ces villes), sans doute en raison de la présence de nuages de type convectifs.

Jour difference max. MDA8 : SCENARIO1 - REFERENCE

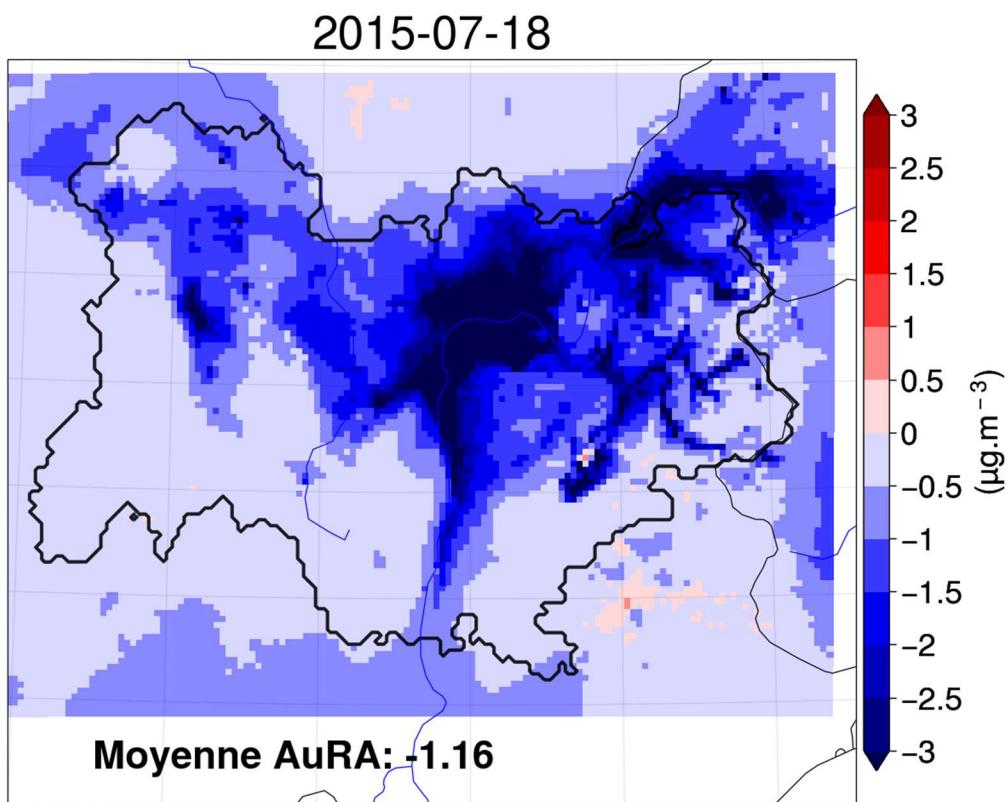


Figure 18 : Journée (18 juillet 2015) avec différence pour maximale du MDA8 journalier ($\mu\text{g.m}^{-3}$) lors de la saison d'Ozone (avril-septembre) 2015 entre la simulation SCENARIO1 (remplacement du rayonnement solaire WRF par SARAH-3 pour le domaine d03) et la simulation REFERENCE. Les contours de la Région AuRA sont indiqués en noir

Scenario 2 :

Comme pour SCENARIO1, le jour avec la plus grande différence de MDA8 a été recherché : il s'agit cette fois du 08 août 2015, avec une différence à l'échelle régionale d'environ $-1.5 \mu\text{g.m}^{-3}$. On observe pour cette date à nouveau des différences importantes (2 à $3 \mu\text{g.m}^{-3}$, voire plus) sur les vallées alpines, la vallée du Rhône, l'Ain, les plaines de l'Allier...mais on observe aussi des différences importantes ($>3 \mu\text{g.m}^{-3}$) sur les zones de haute altitude situées à la frontière avec l'Italie. D'un point de vue

météorologique, cette journée était une journée de transition : les jours précédents, la région était concernée par de fortes chaleurs (37°C à Clermont, 38°C à Grenoble, 39°C à Lyon le 07 août) apportées un courant de sud-ouest (« heat plume » ou plume de chaleur) aspiré par une dépression atlantique qui s'est isolée ensuite en goutte froide sur le Golfe de Gascogne. Le décalage vers l'ouest de l'air froid en altitude a généré des instabilités orageuses qui ont provoqué des précipitations modérées qui sont arrivées le 08 (20 mm à Clermont, 7 mm à Lyon et 6 mm à Grenoble) sur l'Ouest et le centre de la région et ont gagné les Alpes par la suite. L'arrivée des précipitations et d'une masse d'air plus froide par l'ouest a aussi provoqué une baisse des températures lors du 08 août (21°C à Clermont, 26 à Lyon, 33 à Grenoble). Au cours de cette journée, l'ensoleillement était encore important à Grenoble (9h) mais limité à Lyon (2,5h) et Clermont (0,3h).

Jour difference max. MDA8 : SCENARIO2 - REFERENCE

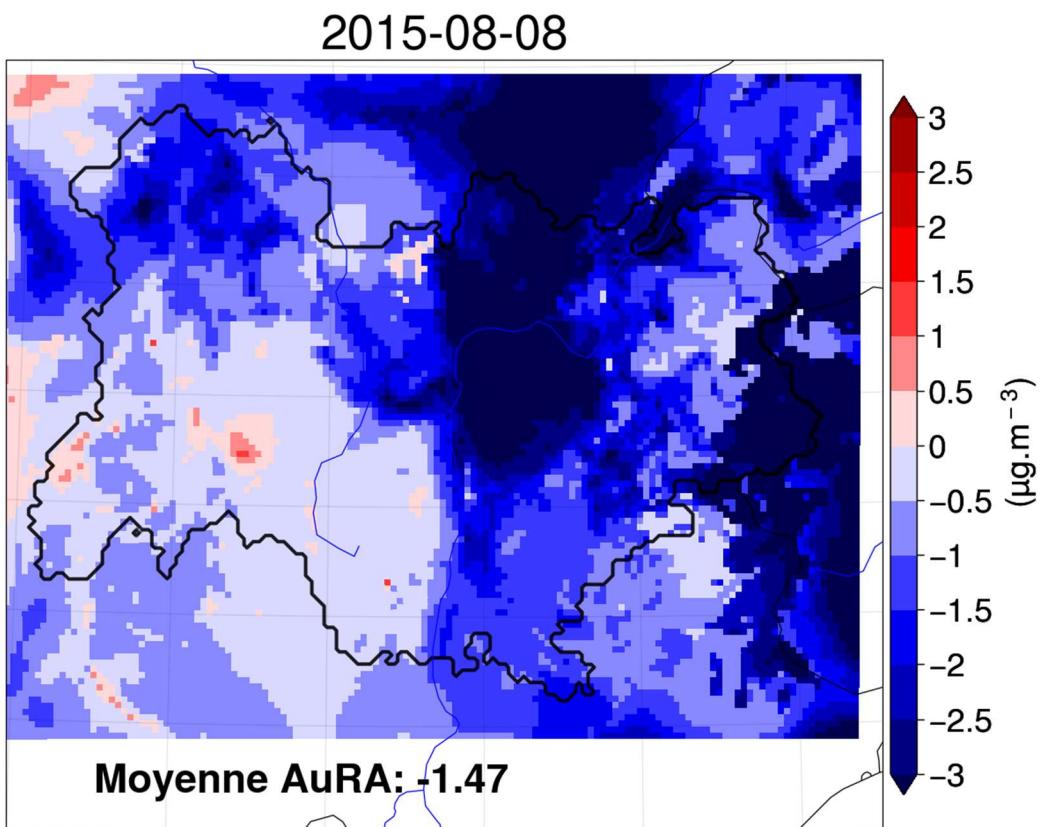


Figure 19 : Journée (08 août 2015) avec différence pour maximale du MDA8 journalier ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) lors de la saison d'Ozone (avril-septembre) 2015 entre la simulation SCENARIO2 (remplacement du rayonnement solaire WRF par SARAH-3 pour les 3 domaines CHIMERE) et la simulation REFERENCE. Les contours de la Région AuRA sont indiqués en noir.



Bibliographie

Bell ML, Zanobetti A, Dominici F (2014) Who is More Affected by Ozone Pollution? A Systematic Review and Meta-Analysis. *American Journal of Epidemiology* 180:15–28. <https://doi.org/10.1093/aje/kwu115>

Blanc Ph, Wald L (2012) The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the Sun for multi-decadal time period. *Solar Energy* 86:3072–3083. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.018>

Driemel A, Augustine J, Behrens K, Colle S, Cox C, Cuevas-Agulló E, Denn FM, Duprat T, Fukuda M, Grobe H, Haeflalin M, Hodges G, Hyett N, Ijima O, Kallis A, Knap W, Kustov V, Long CN, Longenecker D, Lupi A, Maturilli M, Mimouni M, Ntsangwane L, Ogihara H, Olano X, Olefs M, Omori M, Passamani L, Pereira EB, Schmithüsens H, Schumacher S, Sieger R, Tamlyn J, Vogt R, Vuilleumier L, Xia X, Ohmura A, König-Langlo G (2018) Baseline Surface Radiation Network (BSRN): structure and data description (1992–2017). *Earth System Science Data* 10:1491–1501. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1491-2018>

Emberson L (2020) Effects of ozone on agriculture, forests and grasslands. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 378:20190327. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0327>

Führer J, Val Martin M, Mills G, Heald CL, Harmens H, Hayes F, Sharps K, Bender J, Ashmore MR (2016). Current and future ozone risks to global terrestrial biodiversity and ecosystem processes. *Ecology and evolution*, 6(24), 8785–8799. <https://doi.org/10.1002/ece3.2568>

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.* 2020; 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Jiménez PA, Hacker JP, Dudhia J, Haupt SE, Ruiz-Arias JA, Gueymard CA, Thompson G, Eidhammer T, Deng A (2016) WRF-Solar: Description and Clear-Sky Assessment of an Augmented NWP Model for Solar Power Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society* 97:1249–1264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00279.1>

Jiménez PA, Yang J, Kim J-H, Sengupta M, Dudhia J (2022) Assessing the WRF-Solar Model Performance Using Satellite-Derived Irradiance from the National Solar Radiation Database. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 61:129–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0090.1>

Menut, L., Bessagnet, B., Briant, R., Cholakian, A., Couvidat, F., Mailler, S., Pennel, R., Siour, G., Tuccella, P., Turquety, S., and Valari, M (2021).: The CHIMERE v2020r1 online chemistry-transport model, *Geosci. Model Dev.*, 14, 6781–6811, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6781-2021>.

Monks PS, Archibald AT, Colette A, Cooper O, Coyle M, Derwent R, Fowler D, Granier C, Law KS, Mills GE, Stevenson DS, Tarasova O, Thouret V, von Schneidemesser E, Sommariva R, Wild O, Williams ML (2015) Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15:8889–8973. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>

Nabat, P., S. Somot, M. Mallet, A. Sanchez-Lorenzo, and M. Wild (2014), Contribution of anthropogenic sulfate aerosols to the changing Euro-Mediterranean climate since 1980, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5605–5611, <https://doi.org/10.1002/2014GL060798>

Orellano P, Reynoso J, Quaranta N, Bardach A, Ciapponi A (2020) Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2.5), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) and all-cause and cause-specific mortality:

Orru, H., Åström, C., Andersson, C., Tamm, T., Ebi, K. L., & Forsberg, B. (2019). Ozone and heat-related mortality in Europe in 2050 significantly affected by changes in climate, population and greenhouse gas emission. Environmental Research Letters, 14(7), 074013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1cd9>

Pfeifroth U, Kothe S, Drücke J, Trentmann J, Schröder M, Selbach N, Hollmann R (2023) Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 3. Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF). https://doi.org/10.5676/eum_saf_cm/sarah/v003 (dernier accès le 11/05/2023)

Sengupta M, Habte A, Wilbert S, Gueymard C, Remund J (2021). Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Third Edition. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5D00-77635. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77635.pdf> (dernier accès le 22/06/2023)

Schucht S., Tognet F., Colette A., Letinois L., Lenoble C., Agasse S., Mathieu Q. et ADEME, Chambre d'Agriculture et INEREIS (2019). Apollo : Analyse économique des impacts de la pollution atmosphérique de l'ozone sur la production agricole et sylvicole en France. 182p. <https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/327-cout-economique-pour-l-agriculture-des-impacts-de-la-pollution-de-l-air-par-l-ozone.html> (dernier accès le 15/03/2024)

Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, Gill D O, Liu Z, Berner J, Wang W, Powers J G, Duda M G, Barker D, Huang X-Y (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4 (No. NCAR/TN-556+STR). <http://dx.doi.org/10.5065/1dfh-6p907>

Tournadre B (2020) Heliosat-V: une méthode polyvalente d'estimation du rayonnement solaire au sol par satellite. Thèse de doctorat. Université Paris sciences et lettres. [\(NNT : 2020UPSLM063\). \(tel-03227271\)](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03227271)

Wild M, Ohmura A, Schär C, Müller G, Folini D, Schwarz M, Hakuba MZ, Sanchez-Lorenzo A (2017) The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: a database for worldwide measured surface energy fluxes. Earth System Science Data 9:601–613. <https://doi.org/10.5194/essd-9-601-2017>

World Meteorological Organization (WMO) (2021). Chapter 7 : Measurement of radiation, in Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Volume I – Measurement of Meteorological Variables (2021 edition). WMO-No. 8. Accès via https://library.wmo.int/index.php?id=12407&lvl=notice_display (dernier accès le 28/06/2023)

Yang D, Perez R (2019) Can we gauge forecasts using satellite-derived solar irradiance? Journal of Renewable and Sustainable Energy 11:023704. <https://doi.org/10.1063/1.5087588>

Zheng Y-X, Orellano P, Lin H-L, Jiang M, Guan W-J (2021) Short-term exposure to ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide and emergency department visits and hospital admissions due to asthma: A systematic review and meta-analysis. Environment International 150:106435. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106435>



Annexes

A. Scores aux stations.....	34
B. Jours avec différences de MDA8 maximums	36

Illustrations

- Figure 1 : Schéma illustrant les composantes directes et diffuses du rayonnement solaire arrivant sur une surface plane. Source : <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/> 8
- Figure 2 : Photo illustrant un pyranomètre solaire installé en milieu montagneux. Source : <https://www.essearth.com/delta-t-spn1-pyranometer-in-australia/> 9
- Figure 3 : a) Carte de localisation des stations de la base de données GEBA situées dans/ou à proximité de la Région AuRA (contours de la Région indiqués en rouge). La symbolique indique la profondeur temporelle des enregistrements disponibles .b) Carte des stations de la base de donnée retenues pour l'étude des tendances suite au contrôle qualité de J. Trentma 10
- Figure 4 : Emprise des domaines d'intégration WRF et CHIMERE (version 2020r3) d01 (bleu), d02 (vert) et d03 (rouge) de résolution horizontale respective : 27, 9 et 3 kms. Les contours de la Région AuRA sont indiqués en gris 12
- Figure 5 : Anomalies mensuelles de la concentration en O₃ ($\mu\text{g.m}^{-3}$) pour la période 2000-2019 pour les stations rurales de fond : Sommet du Puy de Dôme, Haut Beaujolais, Le Casset ainsi que moyenne multi-station (noir). Les tendances (régression de Theil-Sen) (non)-significatives sont représentées par un trait (pointillé) plein..... 15
- Figure 6 : Anomalies mensuelles d'éclairement solaire (W.m^{-2}) en Région AuRA pour la période 1983-2022 à partir des données satellitaire SARAH-3. La moyenne glissante sur 12 mois (trait plein bleu) et la droite obtenue à partir d'une régression de Theil-Sen sont également présentée. Une tendance significative ($+3.1 \text{ W.m}^{-2}.10\text{ans}^{-1}$) a été trouvée..... 16
- Figure 7 : Moyenne régionale (Région AuRA) de l'anomalie mensuelle d'éclairement solaire (en W.m^{-2}). Les traits en couleurs correspondent aux différentes stations de la base de données GEBA, avec la moyenne multi-stations en rouge, et la moyenne régionale pour les données satellites SARAH-3 en noir. La tendance (régression de Theil-Senn) est également présentée par une droite pleine (pointillée) pour les tendances (non) significatives. Les valeurs des tendances (en $\text{W.m}^{-2}.10\text{ans}^{-1}$) sont également données pour chaque mois, ainsi que la valeur du coefficient de corrélation entre la moyenne multi-station GEBA et la moyenne régionale SARAH-3..... 18
- Figure 8 : Différence d'éclairement solaire (W.m^{-2}) entre le modèle WRF et les données satellitaires SARAH-3 pour l'année 2015 par saison sur le domaine d'intégration d03 (3km). Les contours de la Région Auvergne-Rhône-Alpes sont indiqués en noir. 20
- Figure 9 : Cycle journalier moyen de l'éclairement solaire (W.m^{-2}) pour le modèle WRF (rouge) et les données satellitaires SARAH-3 (bleu) pour l'année 2015, par saison. Les données interpolées sur la grille du domaine d03 à 3km sont moyennées sur le territoire de la Région AuRA. Les zones ombragées correspondent à l'intervalle ± 1 écart-type. 21
- Figure 10 : Comparaison des indices de clarté (Kt) dérivés des sorties du modèle WRF pour le domaine d03 (3kms) et dérivés des données satellitaires SARAH-3. La comparaison est effectuée pour chaque point de grille et chaque pas de temps horaire..... 22
- Figure 11 : Différence relative d'éclairement solaire (en %) entre le modèle WRF et les données satellitaires SARAH-3 pour l'année 2015 par saison sur le domaine d'intégration d02 (9km). Les contours de la Région Auvergne Rhône-Alpes sont indiqués en noir. 23
- Figure 12 : Différence pour le MDA8 moyen ($\mu\text{g.m}^{-3}$) de la saison d'Ozone (avril-septembre) 2015 entre la simulation SCENARIO1 (remplacement du rayonnement solaire WRF par SARAH-3 uniquement pour le domaine d01) et la simulation REFERENCE. Les contours de la Région Auvergne Rhône-Alpes sont indiqués en noir..... 24

Figure 13 : Scores statistiques horaires sur la période avril-septembre 2015 pour le polluant ozone pour l'ensemble des stations (« industrielles » et « trafic » exclues) pour la simulation REFERENCE (bleu foncé) et SCENARIO1 (bleu clair). Scores calculés pour les indicateurs suivants : biais moyen (MB), biais moyen normalisé (NMB), coefficient de corrélation (r), erreur quadratique moyenne, fraction inférieure au facteur 2 (FAC2), erreur géométrique moyenne (MGE), et erreur géométrique normalisée (NMGE)	25
Figure 14 : Différence pour le MDA8 moyen ($\mu\text{g.m}^{-3}$) de la saison d'Ozone (avril-septembre) 2015 entre la simulation SCENARIO2 (remplacement du rayonnement solaire WRF par SARAH-3 pour les trois domaines) et la simulation REFERENCE. Les contours de la Région AuRA sont indiqués en noir.	26
Figure 15 : Scores statistiques horaire sur la période avril-septembre 2015 pour le polluant ozone pour l'ensemble des stations (« industrielles » et « trafic » exclues) pour la simulation REFERENCE (bleu foncé) et SCENARIO2 (bleu clair). Scores calculés pour les indicateurs suivants : biais moyen (MB), biais moyen normalisé (NMB), coefficient de corrélation (r), erreur quadratique moyenne, fraction inférieure au facteur 2 (FAC2), erreur géométrique moyenne (MGE), et erreur géométrique normalisée (NMGE)	27
Figure 16 : Coefficient de corrélation (r) entre différences de concentration en ozone (MDA8 journalier) modélisée (SCENARIO1 - REFERENCE) et différence de rayonnement solaire (WRF – SARAH3) utilisé en entrée de ces simulations. Les contours de la région AuRA sont affichés en noir.	29
Figure 17 : Nuage de points entre la différence (SCENARIO1 – REFERENCE) de concentration en O₃ modélisée (MDA8 journalier en $\mu\text{g.m}^{-3}$) et la différence (SARAH-3 – WRF) de rayonnement solaire moyen journalier (moyennes sur la région AuRA). L'équation de la régression linéaire et le coefficient de corrélation sont également indiqués.....	30
Figure 18 : Journée (18 juillet 2015) avec différence pour maximale du MDA8 journalier ($\mu\text{g.m}^{-3}$) lors de la saison d'Ozone (avril-septembre) 2015 entre la simulation SCENARIO1 (remplacement du rayonnement solaire WRF par SARAH-3 pour le domaine d03) et la simulation REFERENCE. Les contours de la Région AuRA sont indiqués en noir	36
Figure 19 : Journée (08 août 2015) avec différence pour maximale du MDA8 journalier ($\mu\text{g.m}^{-3}$) lors de la saison d'Ozone (avril-septembre) 2015 entre la simulation SCENARIO2 (remplacement du rayonnement solaire WRF par SARAH-3 pour les 3 domaine CHIMERE) et la simulation REFERENCE. Les contours de la Région AuRA sont indiqués en noir.	37

➤ Tableaux

Tableau 1 - Tendance (régression de Theil-Sen) de la concentration en O₃ ($\mu\text{g.m}^{-3}. 10 \text{ ans}^{-1}$) pour la période 2000-2019 pour les stations rurales de fond.	14
Tableau 2 : Scores statistiques horaire sur la période avril-septembre 2015 pour le polluant O₃ ($\mu\text{g.m}^{-3}$) pour les stations situées dans les vallées alpines pour la simulation REFERENCE. Scores calculés pour les indicateurs suivants : biais moyen (MB), bias moyen normalisé (NMB), coefficient de corrélation (r), erreur quadratique moyenne, fraction inférieure au facteur 2 (FAC2), erreur géométrique moyenne (MGE), et erreur géométrique normalisée (NMGE)	34
Tableau 3 : Scores statistiques horaire sur la période avril-septembre 2015 pour le polluant O₃ ($\mu\text{g.m}^{-3}$) pour les stations situées dans les vallées alpines pour la simulation SCENARIO1. Scores calculés pour les indicateurs suivants : biais moyen (MB), bias moyen normalisé (NMB), coefficient de corrélation (r), erreur quadratique moyenne, fraction inférieure au facteur 2 (FAC2), erreur géométrique moyenne (MGE), et erreur géométrique normalisée (NMGE)	34