

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	3
TABLE DES MATIÈRES.....	4
PRÉAMBULE	5
1. INTRODUCTION.....	6
1.1. Projet	6
1.2. Intégration des SIG	6
2. PRÉSENTATION DES DONNÉES.....	7
2.1. Données énergétiques	7
2.2. Données climatiques	8
2.3. Indicateurs climatiques	10
2.4. Incertitudes des prévisions climatiques.....	10
3. MÉTHODOLOGIE ET MARCHE À SUIVRE	12
3.1. Données énergétiques	13
3.2. Indicateurs climatiques	16
3.3. Données GIS	19
3.4. Population	26
4. RÉSULTATS.....	28
4.1. Données énergétiques	29
4.1.1. Intrants du modèle.....	29
4.1.2. Extrants du modèle	29
4.2. Données climatiques	36
4.2.1. Degrés-jours et températures.....	36
4.2.2. Vagues de chaleur	39
4.2.3. Précipitations et vagues de sécheresse	40
4.2.4. Vents.....	43
5. ANALYSE ET DISCUSSION.....	43
5.1. Données géomatiques.....	43
5.2. Problèmes rencontrés	44
5.2. Perspectives et améliorations	45
5.3. Autre.....	46
6. CONCLUSION	47
7. BIBLIOGRAPHIE	48
8. ANNEXES	51

PRÉAMBULE

Ce rapport s'inscrit dans le cadre d'un stage dans le bureau d'études scientifiques et de conseils en gestion, ORDECSYS². Cette entreprise est spécialisée dans la recherche opérationnelle pour l'aide à la décision en logistique, gestion du risque, systèmes de management, gestion de l'énergie et de l'environnement. Elle entreprend notamment des études technico-économiques et environnementales à travers le modèle d'optimisation ETEM (*Energy-Technology-Environment-Model*).

Le stage s'est déroulé sur une durée de 4 mois à plein temps, du 1 juin au 30 septembre. Ce stage consistait à intégrer de l'information géographique dans le modèle d'optimisation énergétique ETEM-AR développé sous mandat, en collaboration avec KanLo³, dans le cadre du projet GICC (Gestion et Impact du Changement Climatique) piloté par le MEDDE (Ministère du Développement Durable et de l'Énergie) et soutenu par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) et par l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique).

² Site Internet d'ORDECSYS : <http://www.ordecsys.com>

³ Site Internet de KanLo : <http://www.kanlo.net/>

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la problématique du réchauffement climatique et de l'arrivée massive des énergies renouvelables, le projet mené par la société ORDECSYS, en collaboration avec la société KanLo, vise à développer un modèle d'optimisation du système énergétique en prenant en compte les aspects technico-économiques et environnementaux et en y intégrant les impacts du changement climatique.

1.1. *Projet*

Ce projet est un projet pilote mis en œuvre dans la région Midi-Pyrénées, dans le Sud-ouest de la France, visant à aider les responsables de la conception du « schéma régional (SCRAE)⁴ » de la région à identifier les mesures d'atténuation et d'adaptation des systèmes énergétiques de la région face aux changements climatiques possibles.

Le modèle ETEM-AR (Adaptation et Robustesse) identifie les choix technologiques, énergétiques et les investissements appropriés dans le secteur énergétique de la région Midi-Pyrénées afin d'atténuer les impacts liés aux contraintes du changement climatique, tout cela pour un coût optimal. C'est un modèle de type coût/efficacité. Celui-ci intègre également de la robustesse afin de faire face à différentes sources d'incertitude : (i) incertitudes du modèle lui-même ; (ii) incertitudes des impacts du changement climatique.

L'objectif de ce modèle est de proposer différentes mesures de précaution dans la gestion du système énergétique d'ici à l'horizon 2050. Investir aujourd'hui pour adapter le système énergétique de demain, c'est diminuer les risques futurs. Mais il faut faire le bon choix et optimiser l'efficacité tout en optimisant les coûts.

Le modèle a un pas de temps de 5 ans (nommé cycle) et s'étend de 2005 à 2049, ce qui fait un total de 9 cycles. Le temps est également divisé en trois saisons (été, hiver et période intermédiaire) et en jour/nuit. Dans ce but, un bouquet de résultats est présenté aux décideurs prenant en compte différents scénarios tant dans le choix technologique (comme l'abandon du nucléaire) que dans le choix de différentes contraintes d'émission de gaz à effet de serre. Les impacts du changement climatique constituent une incertitude qui est plutôt liée au choix des modèles climatiques utilisés qu'au choix des scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Ceci va être développé dans le chapitre 2.3..

1.2. *Intégration des SIG*

Dans ce projet, la société ORDECSYS a décidé d'intégrer un nouvel aspect dans ses travaux de recherche et ses études. Le modèle ETEM pouvant représenter la dimension spatiale, il a été décidé de développer plus en profondeur cet aspect en intégrant les systèmes d'information géographique à l'analyse et à la présentation des données. Les impacts du

⁴ Schéma régional air et énergie.

changement climatique peuvent varier d'un endroit à l'autre. Pour cela, le développement d'indices représentant les impacts du climat sur le système énergétique nécessite une représentation spatialisée. La région Midi-Pyrénées a un territoire très hétérogène. Avec le relief escarpé des Pyrénées au sud, une plaine en son centre et le relief arrondi qu'est le Massif central au nord, la région Midi-Pyrénées est baignée dans un climat très contrasté [METEOFRACTANCE 2012 ; REGION MIDI-PYRENEES 2012]. Les systèmes énergétiques d'un pays ou d'une région sont dépendants de l'environnement local, de ce fait, il est important d'évaluer localement les changements sur l'environnement que va avoir le réchauffement climatique dans le futur. Les systèmes d'information géographique permettent de bien représenter cette hétérogénéité spatiale.

Les systèmes d'information géographique sont également des outils puissants dans la transmission de l'information, étape primordiale dans l'aide à la décision. La représentation graphique facilite la compréhension de données spatialisées.

Deux types de données géoréférencées sont présentées dans le cadre de ce projet : (i) des données énergétiques ; (ii) des données climatiques. Il y a également deux approches dans l'intégration des données géographiques avec le modèle ETEM-AR. D'un côté, les SIG sont utilisés pour produire des intrants au modèle et de l'autre côté, ils permettent de présenter certains résultats en sortie du modèle.

2. PRÉSENTATION DES DONNÉES

Comme dit précédemment, deux types de données ont été utilisées. La distinction entre les données énergétiques et climatiques peut être faite en raison de la différente approche de traitement de ces données. Les données énergétiques ont été peu travaillées, alors que les données climatiques ont été beaucoup plus travaillées afin de développer des indicateurs d'impact du changement climatique sur les énergies.

2.1. Données énergétiques

Les données énergétiques ont été utilisées principalement pour présenter les résultats et les données sources plus que pour créer des intrants du modèle. Celles-ci ont servi principalement à visualiser les données afin d'avoir un aperçu de la situation énergétique actuelle et future à travers les résultats du modèle ETEM-AR. Les données de production d'énergie pour l'année de référence (2005) ont été fournies par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) pour les données relatives aux parcs éoliens, par la Direction générale de l'Environnement, de l'aménagement et du Logement (DREAL) de la région Midi-Pyrénées pour les données relatives aux puits géothermiques, aux zones d'exploitation géothermiques et éoliennes, aux cours d'eau et aux bassins versants, par l'Observatoire Régional de l'Energie en Midi-Pyrénées (OREMIP) pour les données relatives à l'hydroélectricité, au photovoltaïque et à l'éolien, par l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) pour les données sur les centrales électriques thermiques, ainsi que par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) pour les

cartes administratives telles que les limites départementales utilisées pour situer la région Midi-Pyrénées, mais également pour la création de cartes climatiques.

2.2. Données climatiques

Une première approche des données climatiques a été faite à travers la base de données du projet ENSEMBLES. Le but du projet ENSEMBLES est de maintenir et d'étendre la prééminence européenne sur la distribution d'informations pertinentes quant au changement climatique et ses interactions avec la société. Pour cela, il se base sur des modèles européens globaux et régionaux de haute résolution [ECMWF 2012].

Finalement, ce sont les données de réduction d'échelle du CERFACS⁵ qui ont été choisies par ORDECSYS pour son projet. La réduction d'échelle est faite de manière statistique pour différents modèles climatologiques globaux européens. Les modèles utilisés dans ce projet sont :

- ARPEGE : Centre National de Recherches Météorologiques, France
- CNCM33 : Centre National de Recherches Météorologiques, France
- IPCM4 : Institut Pierre Simon Laplace, France
- HADGEM2 : Met Office Hadley Center, Royaume-Unis
- MPEH5C : Max Planck Institutes for Meteorology, Allemagne
- DMIEH5C : Danish Meteorological Institute, Danemark

Le scénario d'émissions de gaz à effet de serre sélectionné et utilisé aux travers des modèles est le scénario A1B. Le scénario A1B est le scénario *tendance* et correspond aux prévisions actuelles de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) pour 2050 [LAVAUD 2009]. Ce scénario est également privilégié dans ce projet en raison du grand nombre de modèles l'utilisant en France, selon le « rapport Jouzel » [PEINGS *et al.* 2012]. Le scénario A1B correspond, sur le plan énergétique, à une évolution technologique qui maintient un équilibre relatif entre les sources d'énergie. Au plan climatique, ce scénario résulte en des émissions de gaz à effet de serre intermédiaires, en comparaison avec les autres scénarios proposés par le GIEC. Le scénario A2, scénario plutôt pessimiste, est également sélectionné pour ce projet, mais est utilisé uniquement à travers le modèle ARPEGE. Ce scénario décrit une forte croissance démographique et une évolution technologique plus lente que dans les autres scénarios [IPCC 2000]. Le scénario A2 permet de valider l'hypothèse que les variations dues aux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 ne sont pas les plus importantes. Il se trouve même que d'ici l'horizon 2050, le scénario A2 enregistre des températures moyennes inférieures au scénario A1B [Fig.1].

La résolution spatiale des modèles est de 8km X 8km et la résolution temporelle est journalière. Les fichiers ont été récupérés en format *NetCDF*⁶ et peuvent être directement visualisés à l'aide de l'application multi-plateforme *Panoply 3.1.3*⁷ [Fig.2].

⁵ Centre Européen de Recherche et de Formation Avancées en Calcul Scientifique situé à Toulouse : <http://www.cerfacs.fr/~page/#>

⁶ Network Common Data Form

⁷ L'application *Panoply* permet de visualiser le résultat des tables des formats *NetCDF*, *HDF* et *GRIB* : <http://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>

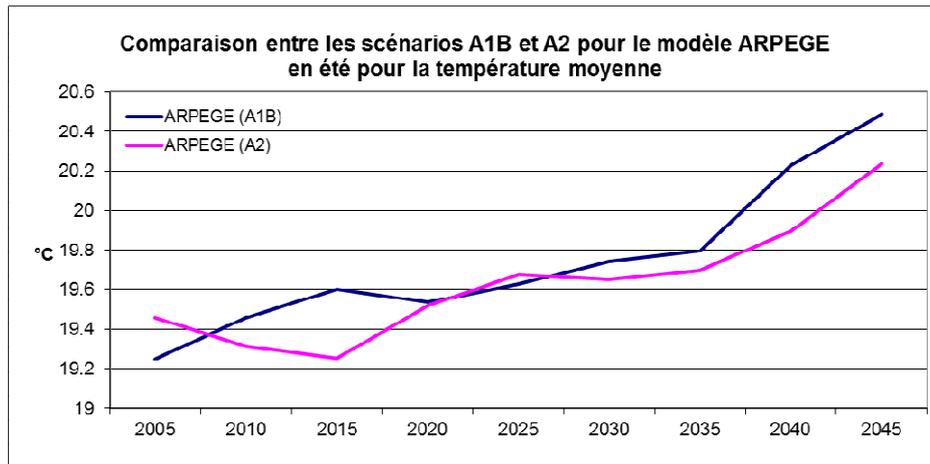


Figure 1 : Il y a très peu de variations entre le scénario A1B et A2 d'ici 2050. Il se trouve même que le scénario A2 enregistre des températures légèrement inférieures en 2050.

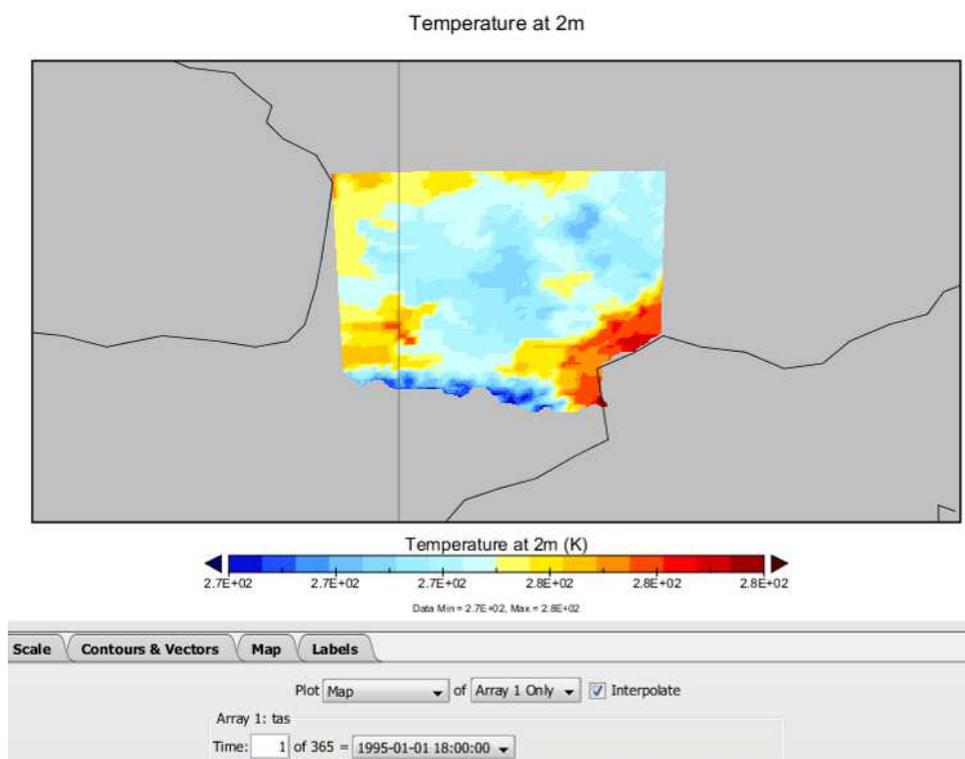


Figure 2 : Visualisation des températures moyennes au-dessus de la région Midi-Pyrénées au moyen de l'application *Panoply 3.1.3* pour le 1 janvier 1995. L'application extrait directement les informations des fichiers *NetCDF*. (Source : cartes créées à partir des données du *CERFACS 2010*)

Les variables météorologiques utilisées dans ce projet sont :

- La température moyenne (K) : utilisée pour calculer les degrés-jours de chauffage et de refroidissement qui permettent d'évaluer la demande de chauffage et de climatisation.
- La température maximale (K) : utilisée afin de calculer les périodes de canicule et ainsi estimer l'impact sur les systèmes de refroidissement des centrales thermiques.
- Les précipitations ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) : utilisées comme indicateur complémentaire pour estimer la vulnérabilité de la centrale nucléaire, ainsi que pour estimer, au moins

qualitativement, l'impact possible de la demande énergétique dans le domaine de l'agriculture pour le pompage de l'eau et l'arrosage.

2.3. Indicateurs climatiques

Pour mesurer l'impact du changement climatique sur le système énergétique, il faut créer des indicateurs climatiques à partir des variables climatiques extraites des modèles numériques de prévision climatique. Les indicateurs peuvent être classés en deux catégories : les indicateurs directs et les indicateurs indirects. Les indicateurs directs et quantitatifs sont (i) les degrés-jours de chauffage et de refroidissement utilisés pour évaluer les besoins de chauffage et de climatisation en fonction du climat futur et (ii) les vagues de chaleur qui permettent d'évaluer la baisse possible de la disponibilité de la centrale nucléaire de Golfech. Les indicateurs indirects sont (i) les variations des précipitations et (ii) les vagues de sécheresse, qui permettent d'estimer le niveau de vulnérabilité des installations hydroélectriques.

- Indicateurs directs :
 - Les degrés-jours permettent d'évaluer la demande de chauffage (seuil à 18°C) ou de refroidissement (seuil à 22°C). Si la température journalière dépasse le seuil, c'est-à-dire si elle est respectivement inférieure ou supérieure au seuil, cela est considéré comme une demande de chauffage dans le premier cas et de refroidissement dans le deuxième. Plus la température dépasse le seuil, plus la demande est grande.
 - Les jours de vagues de chaleur sont comptabilisés du moment où la température maximale dépasse 30°C durant au moins 6 jours.
- Indicateurs indirects :
 - Les précipitations sont données en mm/jour.
 - Les jours de vagues de sécheresse sont comptabilisée du moment où les précipitations ne dépassent pas 1 mm/jour durant au moins 6 jours.

2.4. Incertitudes des prévisions climatiques

Le choix de se baser principalement sur un unique scénario d'émissions de gaz à effet de serre (A1B), et sur plusieurs modèles numériques est le résultat d'analyses préliminaires des informations fournies par le « rapport Jouzel » [PEINGS *et al.* 2012] ainsi que des discussions avec l'équipe de recherche du CERFACS situé à Toulouse [Page 2012].

Les prévisions climatiques comportent trois catégories d'incertitudes : (i) l'incertitude due aux variabilités internes du système climatique ; (ii) l'incertitude due aux différents modèles utilisés ; (iii) l'incertitude sur les scénarios futurs d'émission de gaz à effet de serre.

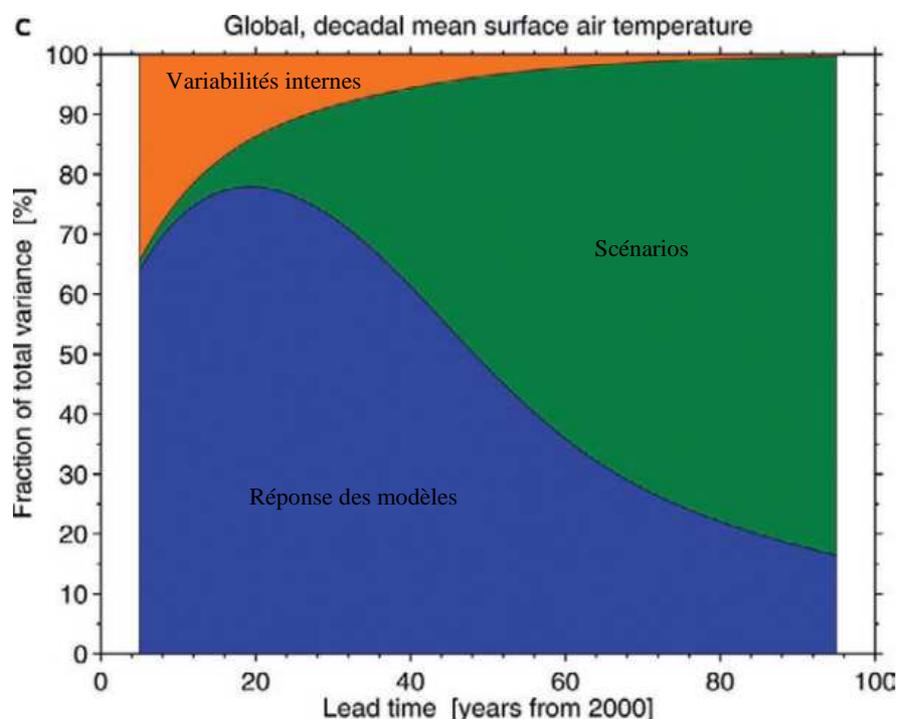
(i) La première incertitude résulte des fluctuations naturelles qui surviennent même en l'absence de forçage radiatif anthropogénique. Ces fluctuations peuvent inverser, à court

terme, les tendances attendues à long terme sous l'effet de la contribution de l'Homme aux changements climatiques.

(ii) La deuxième incertitude résulte des réactions différentes des modèles à un même forçage radiatif. Cette incertitude est aussi connue sous le nom d'incertitude de réponse.

(iii) La troisième et dernière incertitude est liée aux hypothèses de développement technico-économique de la société, résultant en différents scénarios possibles d'émissions de gaz à effet de serre, tels que proposés par le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) [IPCC 2007].

Hawkins et Sutton [2009] montrent que ces différentes incertitudes prennent une part plus ou moins grande dans l'incertitude générale de la prédiction climatique dépendant du court, moyen et long terme. Ainsi, jusqu'à l'horizon 2040-2050, l'incertitude liée aux modèles reste plus grande que l'incertitude liée aux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et celle liée au système climatique, tandis que l'incertitude associée aux émissions futures domine à plus long terme [Fig.3].



Ces incertitudes peuvent varier également dans l'espace. L'incertitude liée aux modèles est considérée plus importante dans les hautes latitudes tandis qu'à l'opposé, l'incertitude liée aux scénarios est moins importante dans les hautes latitudes [Fig.4].

Le modèle ETEM-AR étant utilisé, dans ce projet, sur l'horizon 2005-2050 et pour une région spécifique du Sud de la France, les incertitudes dominantes sont celles liées aux modèles climatiques. Ainsi, la figure 3 montre que pour la 4^{ème} décennie pour la région Midi-Pyrénées, l'incertitude liée aux modèles se situe entre 60% et 80% de la part d'incertitude totale, alors que la part d'incertitude liée aux choix du scénario se situe entre 0% et 20%. Ceci appuie

notre choix d'analyser les informations fournies par différents modèles numériques plutôt que d'analyser différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.

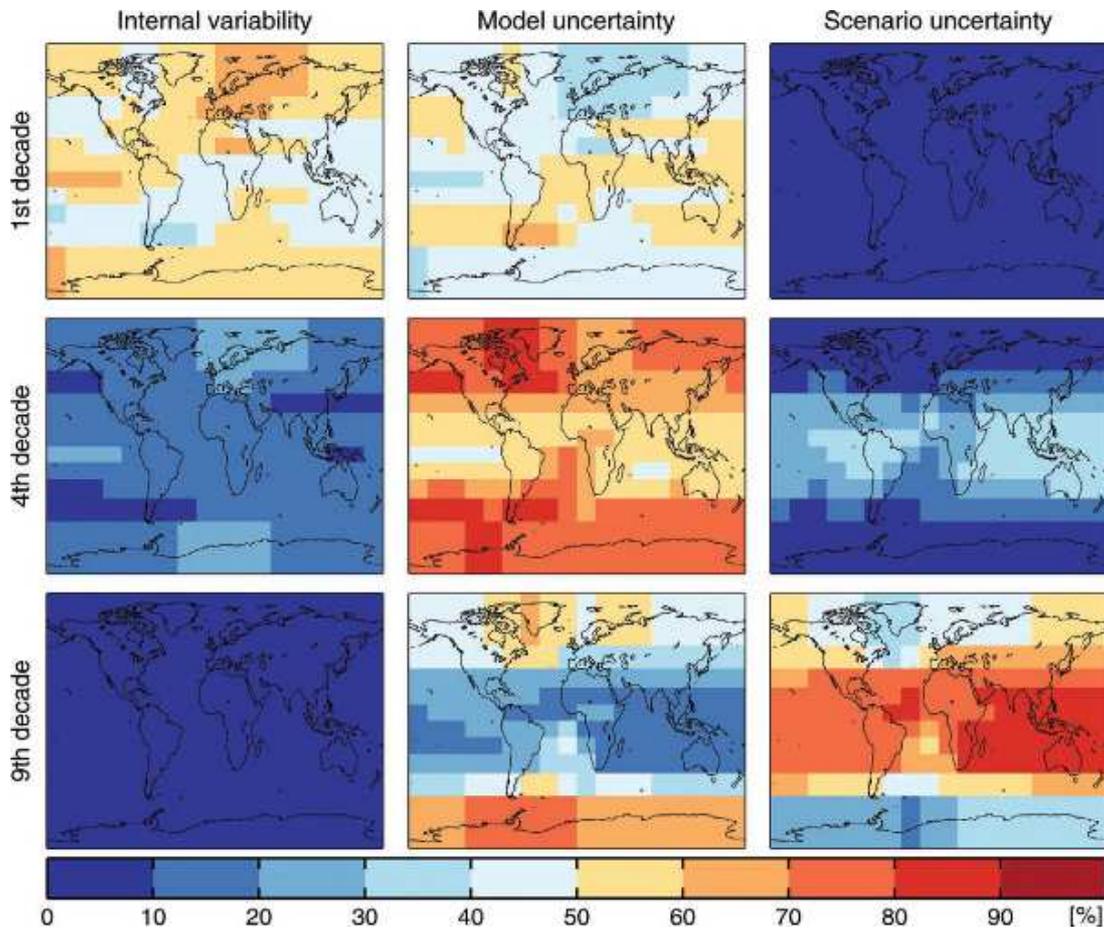


Figure 4 : Les trois incertitudes liées aux fluctuations naturelles, aux choix des modèles et aux choix des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre varient dans l'espace et dans le temps. Cette figure montre la part des incertitudes pour la température de surface moyenne décennale pour les trois incertitudes (incertitude de variabilités internes pour la 1^{ère} colonne ; incertitude des modèles pour la 2^{ème} colonne ; incertitude des scénarios pour la 3^{ème} colonne) et pour la première décennie (1^{ère} ligne) ; quatrième décennie (2^{ème} ligne) ; 9^{ème} décennie (3^{ème} ligne). Les incertitudes sont géographiquement hétérogènes. (Source : HAWKINS et SUTTON 2009)

3. MÉTHODOLOGIE ET MARCHÉ À SUIVRE

Ce projet s'est reposé sur différentes possibilités d'utilisation des Systèmes d'Information Géographique. Il a fallu créer des données SIG, récupérer des données déjà existantes, faire des analyses de données avec l'outil SIG et arranger les données afin qu'elles soient présentables en y développant un symbolisme adaptée. Une partie des données a également été publiée sur Internet à travers un guichet cartographique.

L'outil SIG utilisé dans le cadre de ce projet est le logiciel *Quantum GIS (QGIS)*, un outil en libre accès développé par une équipe internationale très active⁸. Le choix a été porté sur ce

⁸ Voir le site Internet du projet Quantum GIS : <http://www.qgis.org>

logiciel, car ORDECSYS souhaite, dans la logique de son modèle ETEM-AR, pouvoir mettre à disposition de ses clients des outils en libre accès.

3.1. Données énergétiques

Une première étape du travail fut de créer un projet GIS comprenant toutes les informations sur la production énergétique (principalement électrique) de la région Midi-Pyrénées. Pour cela, il a fallu dans un premier tant acquérir des données déjà existantes auprès d'institutions publiques. Les données de limites administratives départementales (GEOFLA) ont été extraites du catalogue de données gratuites de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN)⁹. Des données géographiques concernant les unités de productions éoliennes et géothermiques ainsi que les zones de potentiel géothermique et éolien tout comme la délimitation des bassins versants ont été extraites gratuitement sous le Catalogue ADéLie de DREAL¹⁰ Midi-Pyrénées¹¹. Toutes les données ont été extraites en format *shapefile*, format compatible avec QGIS.

Les données restantes ont été produites à partir de fichiers de données Excel et digitalisées sur QGIS. Il s'agit des unités hydroélectriques pour 2005 ainsi que de la production photovoltaïque totale, fournies par l'OREMIP¹² et données des parcs éoliens en 2005, fournies par l'ADEME¹³. Les données concernant la centrale nucléaire de Golfech ont été trouvées sur le site Internet d'EDF¹⁴ et celles concernant la production thermique d'électricité (en cogénération et hors cogénération) ont été fournies par l'INSEE¹⁵.

Un projet QGIS a été créé afin de réunir toutes ces informations. Le système de référence géodésique utilisé est le RGF93 (Réseau Géodésique Français – 1993) et le système de projection est le Lambert 93, qui est une projection englobant toute la France [CERTU 2008a]. Le système RGF93/Lambert 93 a été officialisé lors du décret n° 2000-1276 du 28 décembre 2000¹⁶. Ce système de référence a été choisi étant donné que c'est le système en France le plus récent et qu'il est géré par l'entité nationale qu'est l'IGN. Le choix s'est porté sur les systèmes de projection unique Lambert 93 recouvrant toute la France et non sur les projections plus locales composé de 9 systèmes nommés CC42 à CC50¹⁷ [CERTU 2008b], dans la perspective d'étendre l'utilisation d'ETEM-AR à d'autres régions en France. Ainsi, avoir un système homogène pour toute la France semble plus pertinent.

Afin d'automatiser la digitalisation des unités hydroélectriques qui sont nombreuses, l'outil *Totally Awesome Mapping*¹⁸ a été utilisé. Cet outil permet, à partir d'un fichier Excel préalablement formaté pour être compatible avec le logiciel, de créer un fichier KML positionnant les entités sous forme de point aux coordonnées estimées par le logiciel à partir des adresses des entités. Ici les entités sont les centrales hydroélectriques. Les coordonnées sont fournies dans le système de projection WGS 84. Certaines unités hydroélectriques n'ont

⁹ Catalogue de donnée gratuite de l'IGN : <http://professionnels.ign.fr/gratuit>

¹⁰ Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

¹¹ Catalogue de l'ADéLie : http://adelie.application.developpement-durable.gouv.fr/patrimoine/DREAL_Midi-Pyr

¹² Observatoire de l'Energie en Midi-Pyrénées : <http://www.oremip.fr/content/>

¹³ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie : <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=11433&m=3&cid=96>

¹⁴ Site Internet d'EDF : <http://energie.edf.com/nucleaire/carte-des-centrales-nucleaires/centrale-nucleaire-de-golfech/presentation-45906.html>

¹⁵ Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques : <http://www.insee.fr/fr/>

¹⁶ Pour accéder au Décret : <http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO200024/SomThema.htm>

¹⁷ CC pour Projections Coniques Conformées.

¹⁸ Site Internet de Totally Awesome Mapping : <http://totallyawesomemapping.com/>

pas été situées dans la bonne commune. Il a fallu donc reprendre ces dernières en vérifiant où se situait la commune à partir de *Google Maps* et de la couche « vecteur » des communes de Midi-Pyrénées. Certaines données ont également été importées de fichiers KML. Ces fichiers sont facilement importables dans *QGIS*, mais il faut bien avoir en tête que le système de projection est en *WGS 84*, il faut donc le transformer en *RGF93/Lambert 93*.

Par la suite, les tables d'attributs des différentes couches ont été organisées, mises en forme et complétées par des jointures, après avoir préalablement introduits des tables en format *CSV* et *DBF* dans le projet *QGIS*.

Pour compléter le projet avec une carte de fond, une carte d'ombrage a été créée à partir d'un modèle numérique de terrain. Finalement, cette option a été abandonnée pour privilégier une carte de fond prise en *OpenLayer* créée par *OpenCycleMap*¹⁹ qui est plus complète (comprend aussi les noms des villes et réseaux routiers) et qui a une structure pyramidale bien élaborée (aspects visuelles qui change avec le zoom) [Fig.5]. La dernière étape afin de terminer le projet fut de créer la symbologie pour les différents types de production énergétique. Pour cela, il a fallu créer des images vectorielles en format *SVG*. Ces images ont été créées à partir du logiciel *Inkscape*. Le but étant d'avoir une symbologie visible, homogène traitant de l'énergie [Fig. 6].

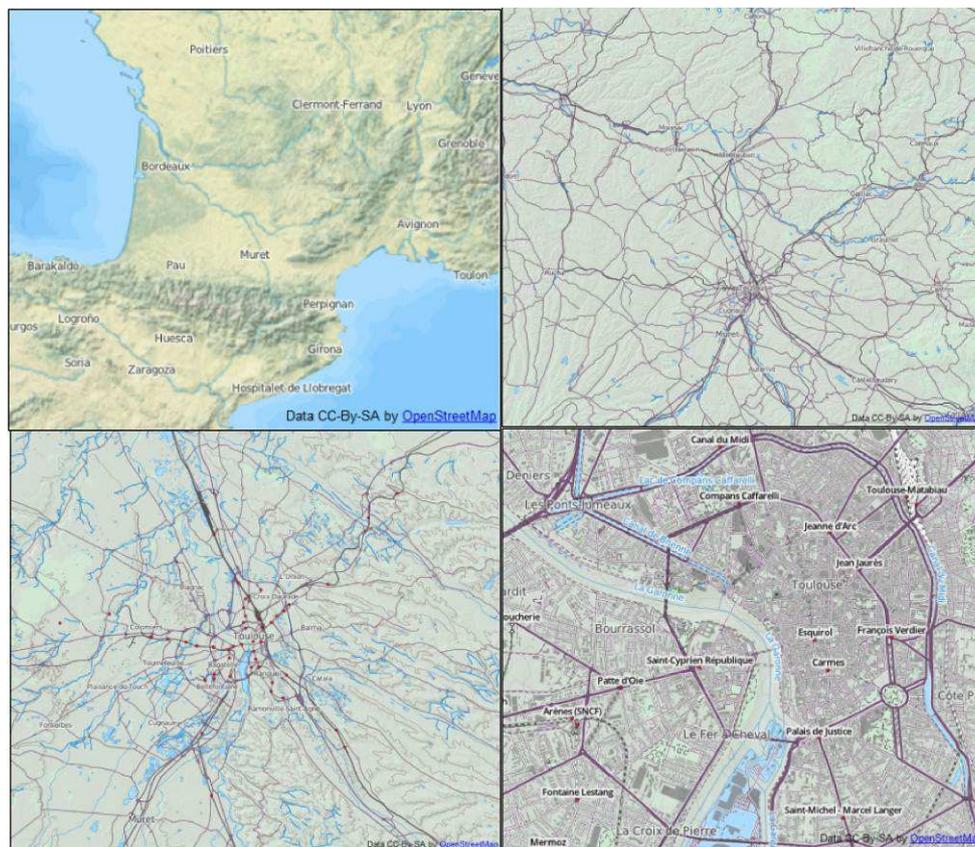


Figure 5 : différents zooms de l'Open Layer « OpenCycleMaps Landscape » avec une construction pyramidale de bonne qualité. Prise de vue de la région du Sud de la France et zoom sur Toulouse.

¹⁹ Site Internet d'OpenCycleMap : <http://www.opencyclemap.org/>

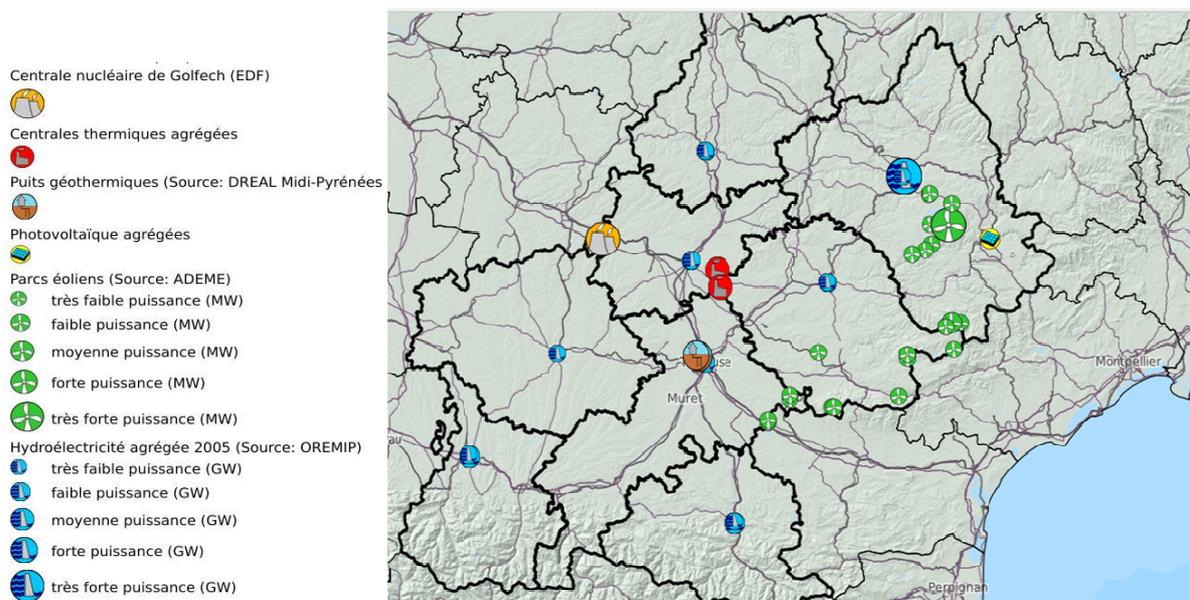


Figure 6 : Symbologie créée en image SVG pour représenter la production énergétique. La grandeur des symboles est proportionnelle à la puissance des installations pour les parcs éoliens et pour la production hydroélectrique agrégée.

Certaines unités de production sont agrégées et donc ne sont pas réellement géoréférencées, mais situées dans le département correspondant pour le cas de l'hydroélectricité (où les grosses unités (>0.01 GW) sont agrégées ensemble et les petites unités (<0.01 GW) ensemble) et au milieu de la région Midi-Pyrénées pour la production des centrales thermiques (regroupée en cogénération et hors cogénération). Le choix d'utiliser une symbologie en point et non des surfaces pour représenter les données agrégées ressort de la volonté de représenter la production énergétique de la même manière et d'avoir une symbologie représentative. Cette logique suit la volonté de l'entreprise ORDECSYS. Il faut donc bien être vigilant en observant les données agrégées et ne pas comprendre ces données comme étant des données précisément géoréférencées.

Le but de la création de ces données énergétiques était de les publier sur un serveur afin de pouvoir y accéder à travers le site Internet du projet « Modéliser l'atténuation et l'adaptation dans un plan climat territorial »²⁰. A cette fin, j'ai participé à la Quatrième Réunions des Utilisateurs de QGIS à Berne et ai suivi un Workshop sur QGIS web-server / server-client. Cela a permis de faire connaissance avec une application créée pour fonctionner avec l'outil QGIS permettant de publier rapidement et de manière simple des projets sur le Web. Il s'agit de l'application QGIS Cloud²¹ développée par SourcePole²². Il a été décidé s'utiliser dans un premier temps cette application afin de pouvoir publier rapidement des résultats sur le Web. Dans un deuxième temps, l'installation de QGIS MapServer devait être faite sur le serveur d'ORDECSYS, mais en raison d'un problème technique lors de l'installation de l'application sur le serveur, cela ne s'est pas fait. QGIS MapServer est une application qui permet d'implémenter des fichiers WMS, qui par la suite, peuvent être visualisés par des clients sur le Web à travers des interfaces de visualisation. C'est exactement ce que QGIS Cloud fait, sans avoir besoin d'utiliser son propre serveur. Cependant, à cela font face beaucoup de contraintes. Les capacités de stockage sur le serveur mis à disposition sont limitées tout comme la personnalisation du guichet

²⁰ Adresse du projet : <http://etem-ar.ordecys.com/>

²¹ QGIS Cloud disponible sous : <http://qgiscloud.com/>

²² Pour plus d'informations sur SourcePole : <http://www.sourcepole.com/services>

cartographique et il n'est pas encore possible de publier des données raster. De plus, cette application est en développement et reste donc encore très instable.

L'utilisation est très simple, il suffit de charger les différentes couches du projet sur le serveur mise à disposition par SourcePole, puis de publier les couches chargées sur Internet à travers un compte créé sur le site Internet de *QGIS Cloud*²³. Lors de la publication, un fichier contenant la symbologie est également créé. Tout ceci se fait depuis le logiciel de bureau *Quantum GIS*.

D'autres données climatiques ont été produites et présentées au moyen de cartes. Il s'agit des extraits du modèle ETEM-AR. Ces données ont simplement été extraites des fichiers *Excel* de sortie du modèle et arrangées et formatées dans un nouveau fichier *Excel* afin d'être transformées en format texte *CSV* et importées dans *QGIS*.

3.2. Indicateurs climatiques

La seconde partie du travail fut de créer des indicateurs climatologiques à partir de données extraites de modèles numériques climatologiques. Les données climatologiques étant très volumineuses et nécessitant une certaine organisation, elles sont généralement stockées sous le format *NetCDF*. Ce format permet le stockage d'un grand nombre de données et une exploration facile de celles-ci. Ce format permet de gérer plusieurs variables, ainsi que la dimension temporelle. Le format *NetCDF* est composé de bibliothèques logicielles et est auto-documenté, ce qui permet la création, l'accès et le partage de données scientifiques stockées sous la forme de tableaux²⁴ [UNIDATA 2012]. Les données utilisées recouvrent l'ensemble du territoire français et s'étendent de 1995 à 2060. Pour explorer, traiter et analyser ces données, la bibliothèque *CDO (Climate Data Operators)* utilisant des lignes de commande *MS-DOS* fut utilisée. *CDO* rassemble de nombreuses fonctions permettant de traiter des données climatiques de sortie de modèles numériques [SCHULZWEIDA et KORNBLUEH 2009]. Le traitement de ces données a été automatisé au moyen de fichiers de commandes *MS-DOS* (format *.bat*) [exemple cf. annexe 1]. Toutes les étapes de traitement qui vont être expliquées ci-dessous sont effectuées sur des fichiers *NetCDF* et donne en sortie également des fichiers *NetCDF*.

Une première étape fut d'extraire la zone d'étude, c'est-à-dire la région de Midi-Pyrénées, afin de réduire la taille des fichiers, ce qui facilite par la suite son traitement et son analyse. La zone sélectionnée s'étend de 46°N ; -0°6'W à 42°N ; 4°E. La commande *CDO* utilisée est :

```
cdo sellonlatbox,-0.6,4,42,46 input.nc output.nc
```

Où *input* correspond aux données ayant comme étendue toute la France et *output* correspond aux données cadrées sur la région de Midi-Pyrénées.

L'étape suivante fut d'effectuer une moyenne glissante sur les données de températures moyennes, de vitesse moyenne des vents et de précipitations. La moyenne glissante permet de lisser la courbe [Fig.7], ce qui permet de conserver la tendance des dispersions tout en effaçant les variations extrêmes. Un modèle de prévision climatique prévoit correctement la

²³ Création d'un compte *QGIS Cloud* : https://qgiscloud.com/en/account/sign_up

²⁴ Pour plus d'information : <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>

tendance des extrêmes dans le futur, mais ces extrêmes ne sont pas prédits temporellement avec précision par le modèle. Il prédira des tendances et non des événements précis. Il convient donc de lisser ces extrêmes pour des analyses se basant sur les tendances et non les extrêmes comme les températures moyennes et les degrés-jours de chauffage et refroidissement [PAGE 2012]. Aucune commande permettant de faire cette moyenne glissante directement n'étant disponible dans la bibliothèque *CDO*, il a fallu contourner le problème. Pour chaque année, des groupes ont été composés contenant l'année en question et les 5 années antérieures et postérieures (le but étant de faire une moyenne glissante sur 11 ans). La moyenne a été calculée pour chacun de ces groupes, ce qui a permis d'avoir une moyenne sur 11 ans pour chaque année. La moyenne pour chaque groupe a été calculée avec la commande :

```
cdo ydaymean input.nc output.nc
```

Où *input* est le groupe formé de 11 années et *output* est le résultat de la moyenne sur ces 11 années.

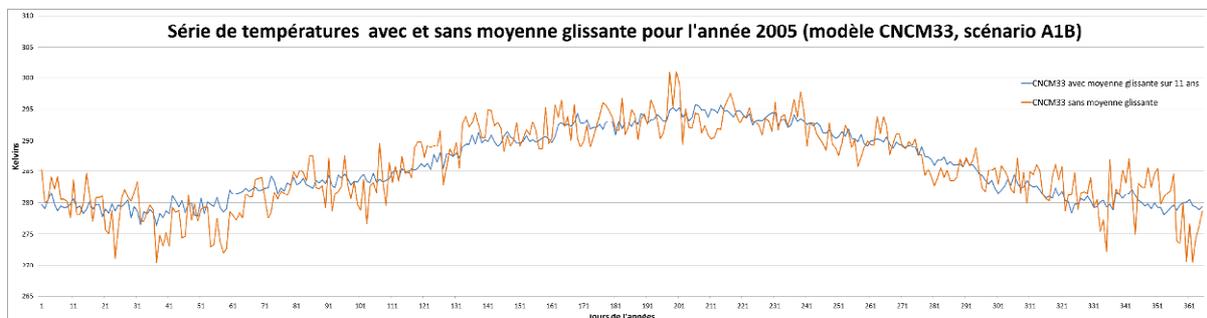


Figure 7 : Comparaison d'une courbe avec moyenne glissante avec une courbe sans. La tendance est conservée en supprimant les extrêmes.

Le modèle ETEM-AR étant divisé en 3 saisons, il a fallu diviser nos données en trois saisons. Un fichier de commande *MS-DOS* a été créé comprenant la commande *CDO* suivante :

```
cdo selmon,mois_1,mois_2,mois_n... input.nc output.nc
```

Où *mois* correspond aux mois de la saison voulue, *input* est le fichier *NetCDF* contenant l'année entière et *output* est le fichier de sortie *NetCDF* de la saison voulue.

Les variables climatiques ayant été formatées à notre convenance, il ne manque plus qu'à créer les indicateurs climatiques qui vont être utilisés par la suite par le modèle ETEM-AR. Certains indicateurs ont été calculés directement avec des commandes de la bibliothèque *CDO*, alors que d'autres ont été calculés sous *MS Excel*. Pour ce fait, il a fallu extraire les données des fichiers *NetCDF* pour les importer dans *MS Excel*. L'Add-In²⁵ (Complément) *NetCDF4Excel* écrit en VBA fonctionnant uniquement sous *MS Excel 2007* permet de faire cela. Les calculs des indicateurs sous *MS Excel* ont été automatisés au moyen de macros écrites en VBA.

²⁵ Vous pouvez trouver cet Add-In sous ce site Internet : <http://code.google.com/p/netcdf4excel>

- Degrés-jours :

Les degrés-jours ont été calculés sous *MS Excel* de manière suivante :

DJC (Degrés-Jours de Chauffage) : $(T_{18} - T_j)$

DJR (Degrés-Jours de Refroidissement) : $(T_j - T_{22})$

Où T_{18} est le seuil de chauffage (18°C), T_{22} est le seuil de refroidissement (22°C) et T_j est la température journalière. Ces seuils ont été choisis selon les valeurs habituellement utilisées pour de telles analyses [BLÁZQUEZ, BOOGEN et FILIPPINI 2012 pp.8 et 11]. Il existe donc une zone de confort située entre 18°C et 22°C où il n'y a ni demande de chauffage, ni demande de refroidissement. Les degrés-jours calculés pour chaque jour ont ensuite été sommés pour chaque saison (été : juin, juillet, août, septembre ; hiver : novembre, décembre, janvier, février, mars ; intermédiaire : avril, mai, octobre) où seules les valeurs positives ont été utilisées. Puis, afin d'avoir un résultat pour chaque cycle de 5 ans du modèle ETEM-AR, les sommes des 5 années pour chaque cycle ont été moyennées. Le résultat est donc la totalité des degrés-jours par saison pour chaque cycle de 5 ans.

- Vagues de chaleur :

Les vagues de chaleur ont été calculées au moyen de la commande *CDO* suivante :

```
cdo eca_hwdi,6,0 input.nc inputSeuil.nc output.nc
```

Où *input* est le fichier *NetCDF* de la série de températures journalières maximales et *inputSeuil* est un fichier *NetCDF* de la même extension géographique et temporelle que le fichier *input* et comprenant le seuil préalablement fixé (ici 30°C). Le nombre 6 correspond au nombre de jours consécutifs durant lesquelles la température doit dépasser le seuil afin que le jour soit comptabilisé et le chiffre 0 est le nombre de degrés supérieurs aux données du fichier *inputSeuil* que les données du fichier *input* doivent avoir pour être comptabilisées. Ici il est fixé à 0, car les jours sont considérés comme étant caniculaires dès que la température dépasse le seuil de 30°C. En *output*, les résultats sont le nombre de jours de canicules ainsi que le nombre de périodes de canicule (une période est au moins 6 jours consécutifs au-delà de 30°C) stockés dans un fichier *NetCDF*. Les données utilisées pour calculer les vagues de chaleur n'ont pas été corrigées par la moyenne glissante sur 11ans, car les vagues de chaleur se calculent à partir des variabilités extrêmes supérieures et donc, aplatir la courbe correspondrait à effacer ces variabilités. L'agrégation des résultats sur 5 ans permet d'atténuer les incompatibilités temporelles.

- Précipitations :

Le seul calcul qui a été fait pour les précipitations est le changement d'unité en passant de $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en mm jour^{-1} . Il suffit donc de multiplier les données de précipitations par 86'400 (86'400 secondes en un jour).

- Vagues de sécheresse :

Les vagues de sécheresse ont été calculées au moyen de la commande *CDO* suivante :

`cdo eca_hwdi,6,0 -mulc,-1 input.nc inputSeuil.nc output.nc`

Où *input* est le fichier *NetCDF* comprenant les précipitations journalières, *inputSeuil* est le fichier *NetCDF* comprenant le seuil (ici 1 mm/jour) en-dessous duquel les journées sont considérées comme sèches et *output* est le fichier *NetCDF* contenant les résultats en nombre de jours de sécheresse. Le nombre 6 est le nombre de jours consécutifs durant lesquels les précipitations ne doivent pas atteindre 1 mm/jour et le nombre 0 correspond aux nombres de mm/jour supérieurs au seuil que les données du fichier *input.nc* doivent avoir pour être comptabilisées. Ici il est fixé à 0, car les jours sont considérés comme étant secs dès que les précipitations sont inférieures au seuil de 1 mm/jour. La commande utilisée est exactement la même que pour les vagues de chaleur, mais il faut ajouter la commande *-mulc,-1* (multiplier par -1) qui permet de changer le signe des valeurs, car la commande *eca_hwdi* comptabilise les valeurs supérieures au seuil et non inférieures. Il faut donc inverser tous les signes pour que les valeurs inférieures à 1 mm/jour deviennent supérieures. Les données pour calculer les vagues de sécheresse n'ont pas été corrigées au moyen de la moyenne glissante, car cela effacerait les extrêmes inférieurs des précipitations, c'est-à-dire les sécheresses.

- Autre :

D'autres cartes ont également été créées pour avoir une vision d'ensemble et mieux comprendre les conditions climatiques futures, mais elles n'ont pas été utilisées dans le modèle ETEM-AR. Il s'agit de la carte de la vitesse moyenne des vents et des températures moyennes. Ces variables ont été créées à partir de données corrigées par la moyenne glissante afin d'avoir les tendances. Aucun calcul n'a été fait pour ces variables si ce n'est le passage pour la température de Kelvin à degrés Celsius (température en Kelvin – 273.15 = températures en degrés Celsius).

3.3. Données GIS

Afin d'importer les données dans l'outil *QGIS*, il a fallu tout d'abord les importer dans *MS Excel*, pour celles qui ne l'avaient pas encore été, au moyen de l'Add-In *NetCDF4Excel*. Toutes les données ont ensuite été organisées afin de les rendre compatible à l'importation dans *QGIS*. Pour ce fait, un scripte en VBA [exemple cf. annexe 2] a été écrit afin d'organiser les données dans un onglet de manière suivante : Une 1^{ère} colonne pour les longitudes ; une 2^{ème} colonne pour les latitudes ; une 3^{ème} colonne pour la variable en question ; une 4^{ème} colonne si nécessaire pour une deuxième variable comme le cas des vagues de chaleur et de sécheresse où il y a une variable donnée en nombre de jours et une en nombre de périodes d'au moins six jours. Le tableau *Excel* ainsi créé a été ensuite exporté en format texte *CSV* (Comma-Separated Values), qui peut être importé dans *QGIS* au moyen de l'extension « Ajouter une couche de texte délimité ». Les données ainsi importées dans *QGIS* ont des coordonnées de type *WGS 84*, alors que le projet que nous voulons créer est en *RGF93/Lambert 93*. Il a donc fallu transformer le système de projection pour homogénéiser toutes nos données. Ce nouveau projet a été créé séparément du projet des productions énergétiques [cf. chapitre 3.1.]. Une fois les données importées et transformées dans le bon

système de projection, cela donne une couche avec un grillage de points comprenant les valeurs des variables et leurs coordonnées [Fig.8].

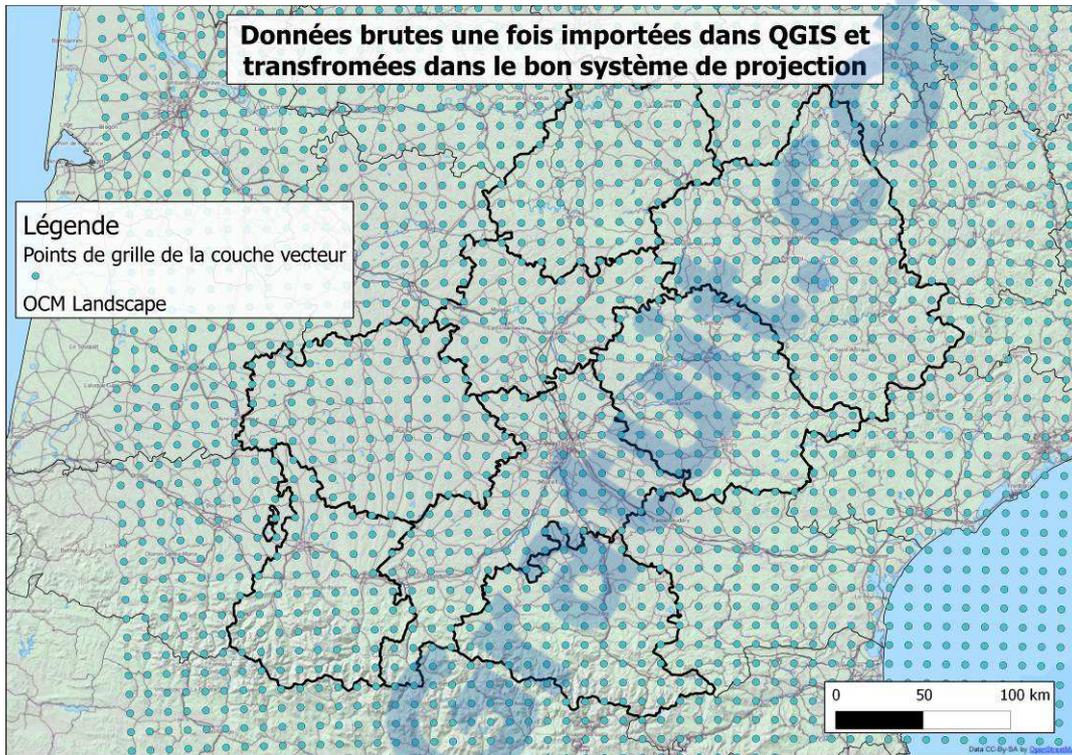


Figure 8 : Grille de points brute après importation dans QGIS. Cette grille de points a été découpée de la grille de points de sortie des modèles climatiques recouvrant toute la France. (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

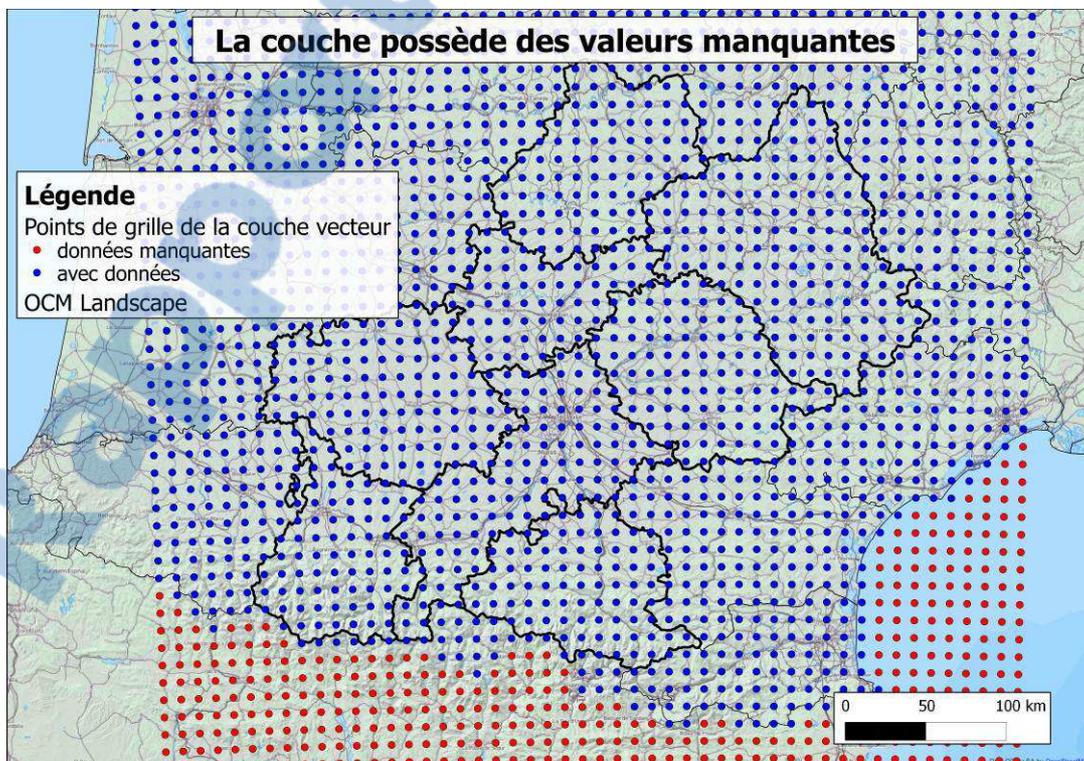


Figure 9 : La grille de points importée comporte des valeurs manquantes en raison de la sélection au-dessus de la région Midi-Pyrénées faite avec la commande CDO. (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

Cette grille comprend un certain nombre de points avec des valeurs manquantes [Fig.9]. Ce sont les points qui ont été ajoutés durant le découpage au-dessus de la région Midi-Pyrénées avec la commande *CDO*. Ayant fait un cadre de sélection et le modèle étant limité au frontière de la France, des points ont été ajoutés afin de remplir le cadre de sélection. Ces points ajoutés n'ont aucune valeur. Il a fallu donc supprimer ces points dans *QGIS* pour toutes les variables. Ces points manquants se trouvant en-dehors des frontières de la France, un découpage de chaque couche vectorielle d'indicateur climatique a été effectué avec la couche administrative départementale de France [Fig.10]. Pour ce fait, l'extension « fTools » de *QGIS* comprenant un outil de découpage a été utilisé.

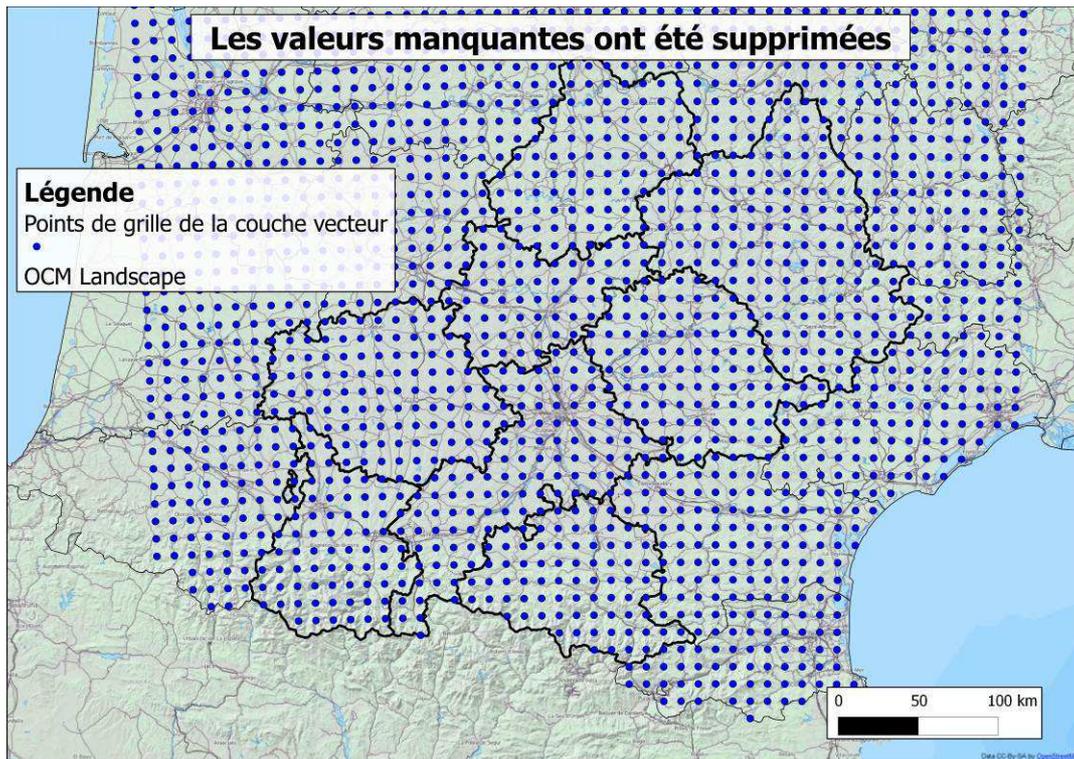


Figure 10 : Couche vectorielle après découpage des valeurs manquantes se trouvant en-dehors des frontières de la France. (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

Les différents indicateurs ont ensuite été formatés et organisés afin d'être compatibles au modèle ETEM-AR.

- Degrés-jours :

Les degrés-jours correspondent au nombre de degrés dépassant le seuil pour chaque jour et sont ensuite pondérés par la population. Plus les degrés-jours sont importants et plus la population est nombreuse, plus la demande est importante. Pour cette raison, étant donné que la pondération se fait à partir de l'agrégation par département, un département possédant une partie de son territoire sur le sommet des Pyrénées verra sa température moyenne fortement diminuer et donc ses degrés-jours de chauffage augmenter et ses degrés-jours de refroidissement baisser. Cependant, ces régions sont très peu habitées, ce qui en résulte une surestimation de la demande de chauffage et une sous-estimation de la demande de refroidissement. Pour pallier à ce problème, un masque a été posé au-dessus de la région des

sommets des Pyrénées afin de supprimer les valeurs non désirées [Fig.11]. Par la suite, les degrés-jours ont été agrégés par département afin de pouvoir pondérer les valeurs avec celles de la population données par département également. Pour ce fait, l'outil « Joindre les attributs par localisation » de l'extension « fTools » a été utilisé. Celui-ci permet de regrouper des entités se trouvant dans une zone (par exemple un département) par différentes méthodes d'agrégation comme la moyenne, minimum, maximum, somme et médiane. Dans ce cas, la moyenne a été utilisée. Afin de limiter le nombre de données, une couche comportant uniquement les départements de Midi-Pyrénées a été utilisée pour agréger les variables [Fig.12]. La nouvelle couche créée possède donc les informations des départements de Midi-Pyrénées et la moyenne des valeurs pour la variable en question et ceci pour chaque saison, chaque cycle (5 années) et chaque modèle climatique. Les données de chaque année ont ensuite été extraites dans *MS Excel* par un simple copier/coller afin de pouvoir créer des graphiques d'évolution temporelle (9 valeurs, une pour chaque cycle) [Fig.13]. Pour la création des graphiques, les degrés-jours non pondérés par la population sont utilisés ainsi que les degrés-jours pondérés, mais uniquement pour l'ensemble de la région Midi-Pyrénées. Cette pondération est la moyenne des pondérations de chaque département [Fig.13 et 41-b]. Cette information est à nouveau agrégée parce que le modèle ETEM-AR traite des demandes de refroidissement et de chauffage de manière agrégée.

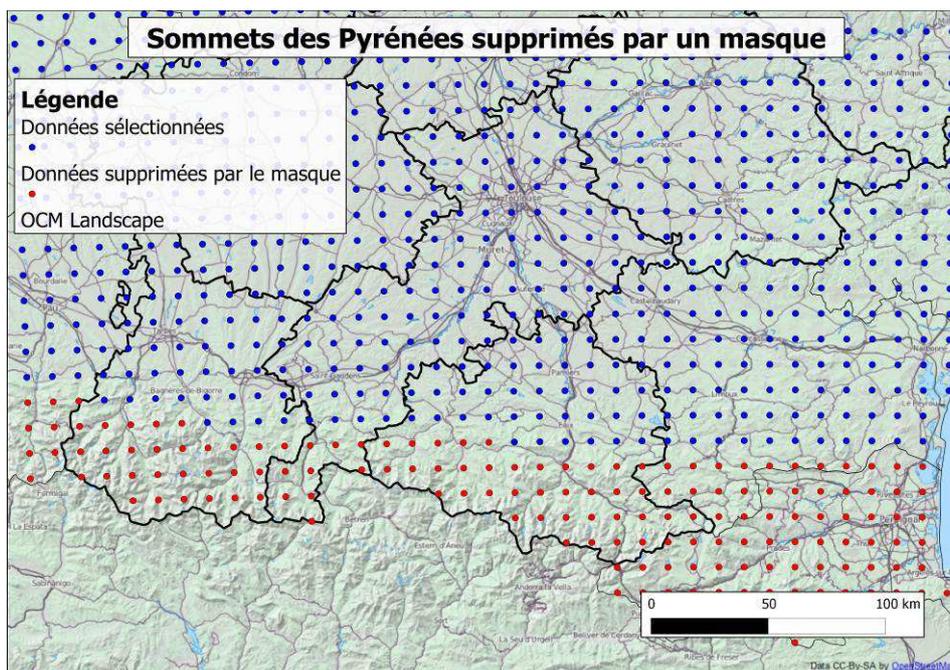


Figure 11 : Un masque a été posé sur les sommets des Pyrénées afin de supprimer les valeurs qui pourraient fausser le résultat des degrés-jours. (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

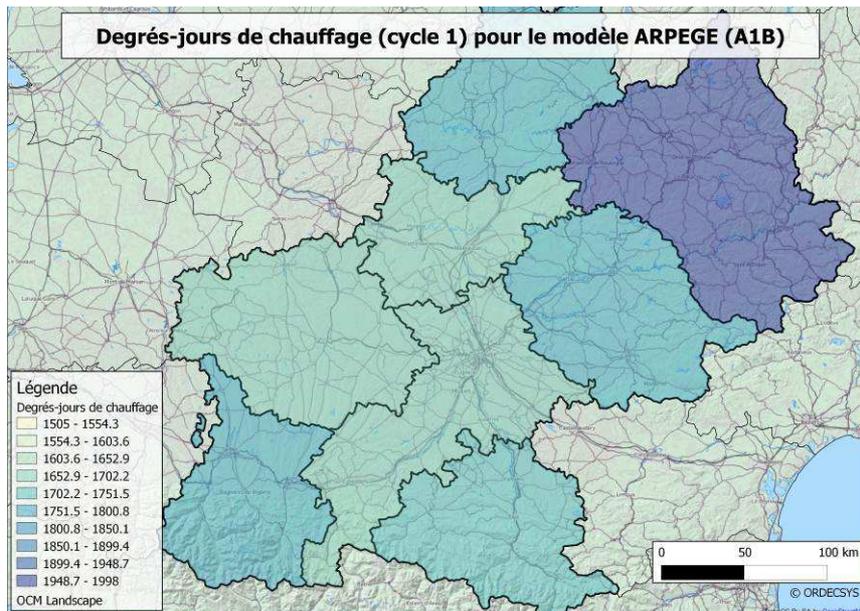


Figure 12 : Données agrégées par département de Midi-Pyrénées. Chaque département possède une valeur (dans ce cas de température) qui est le résultat de la moyenne de la valeur de tous les points se trouvant dans le département en question.
 (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

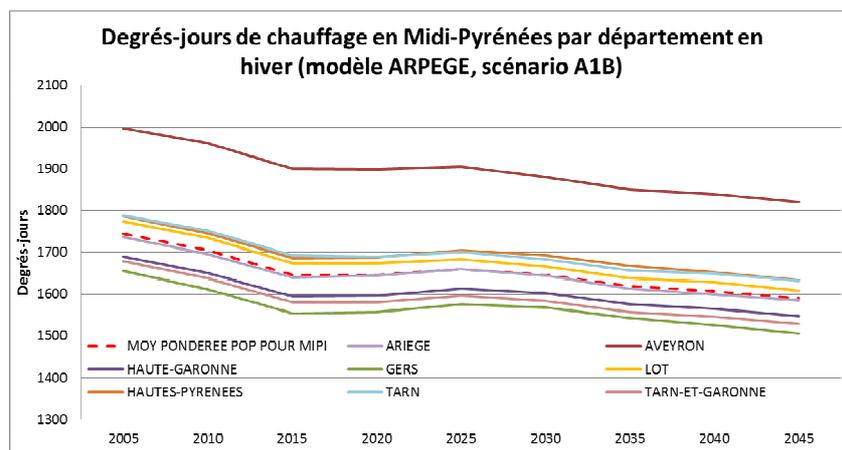


Figure 13 : Graphique temporelle créé à partir de l'agrégation faite dans QGIS. Seule la moyenne pondérée pour toute la région Midi-Pyrénées sera utilisée.

- Vagues de chaleur :

Les vagues de chaleur n'ont pas été agrégées par département, car ce sont des phénomènes beaucoup trop localisés pour les généraliser à un département. Pour cette raison, une autre stratégie a été utilisée. La plus pertinente aurait été de faire une interpolation des valeurs, mais à ceci s'opposent deux problèmes. Le premier est que le centre cartographique *QGIS Cloud* ne supporte pas encore le format raster (cf. chapitre 5.2.) et le deuxième est que l'outil *QGIS* ne dispose pas encore d'outil d'interpolation très puissant permettant d'avoir de bons résultats. Interpoler à travers les outils de *GRASS* a été envisagé, mais il semble y avoir un problème de compatibilité, ce qui a freiné la recherche dans ce sens-là. Finalement, il a été décidé, étant donné la haute résolution de la grille de point (8 km X 8 km) de simplement utiliser une symbologie constituant un pixel de la même résolution. Ainsi, cela donne une sorte d'interpolation avec des pixels de 8km sur 8km en format vecteur [Fig.14].

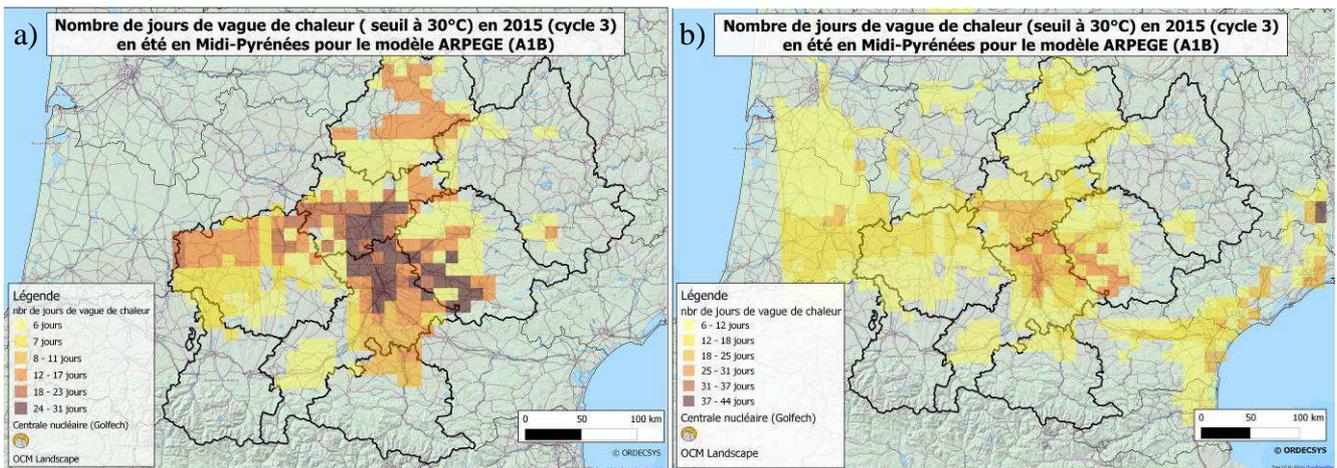


Figure 14 : Alternative à l'interpolation : création de pixels de la même résolution que la grille de valeur afin de simuler une interpolation à une résolution de 8 km sur 8 km. En a) se trouve la symbologie pour représenter les données cantonnées à la région Midi-Pyrénées et en b) se trouve la symbologie si les données hors Midi-Pyrénées sont prises en compte. La représentation est moins précise en b). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

Pour faciliter la création de la graduation des valeurs, un découpage de la grille a été fait pour conserver uniquement les valeurs de la région Midi-Pyrénées. Ayant des régions hors Midi-Pyrénées avec un nombre de jours de vagues de chaleur beaucoup plus élevé, supprimer ces valeurs permet de réduire l'amplitude des valeurs. Ceci permet donc d'avoir un dégradé de couleur moins lourd visuellement et d'avoir une variation de couleur assez importante en Midi-Pyrénées afin d'avoir une information plus riche [Fig.14]. Les vagues de chaleur n'ont été créées que pour la saison d'été.

- **Précipitations :**

Les précipitations ont été abordées par deux approches différentes. La première est l'agrégation des précipitations moyennes par département, afin d'avoir un aperçu général sur l'état d'humidité des départements [Fig.15-a]. La deuxième approche a été développée dans la perspective d'utiliser les précipitations comme information quantitative en estimant un débit de rivière à partir des précipitations. Pour cela, les précipitations n'ont pas été agrégées par département, mais par bassin versant [Fig.15-b]. Ainsi, il aurait été possible de calculer un volume d'eau disponible par bassin versant en connaissant la surface du bassin, chose facile avec les SIG. Cette possibilité n'a cependant pas été approfondie pour le projet pour deux raisons. La première est que le temps à disposition pour récolter des données supplémentaires comme les types de sols et pour procéder aux analyses n'était pas suffisant. L'idéal serait d'avoir un modèle numérique hydrologique permettant de calculer les débits des rivières tel que l'outil SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) développé par le service de recherche agricole au laboratoire de recherche des prairies, des sols et de l'eau à Temple au Texas (USA)²⁶. Le deuxième problème est que, selon Julien Lavaud [2012], observateur des changements climatiques à l'ARPE²⁷ à Toulouse, les effets du changement dans les précipitations avec le changement climatique en Midi-Pyrénées sont négligeables et influencent peu les installations hydroélectriques.

²⁶ Site Internet de l'outil SWAT : <http://swat.tamu.edu/>

²⁷ Site Internet de l'ARPE : <http://www.arpe-mip.com/>

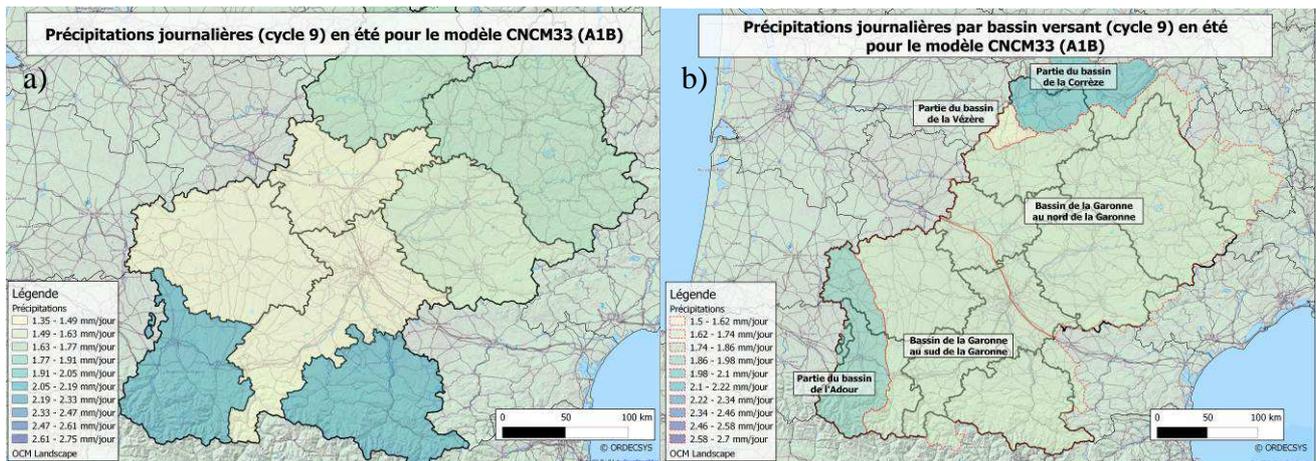


Figure 15 : Représentation des précipitations par département (a) et par bassin versant (b). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

Les bassins versants ont été digitalisés à l'aide d'informations sur les bassins hydrologiques fournies par la DREAL Midi-Pyrénées et à l'aide d'un modèle numérique de terrain fourni par l'ARPE. La digitalisation s'est faite en suivant les sommets des crêtes montagneuses séparant les différents bassins versants. Le bassin versant de la Garonne a été divisé en deux par le cours de la Garonne. Il en ressort ainsi un bassin Nord et un bassin Sud. Le choix de séparer ce bassin résulte du fait que les précipitations venant du Massif central (nord) et celles venant des Pyrénées (sud) peuvent avoir un régime hétérogène dans le temps et dans l'espace. Ainsi, cela peut permettre de calculer des débits différents en relation avec les différents régimes de ces différentes sources de précipitations. Dans ce projet, l'indicateur climatique des précipitations n'a eu qu'un rôle informatif afin d'estimer l'effet potentiel sur la production (hydroélectricité) et la demande d'énergie (agriculture).

- Vagues de sécheresse :

Les vagues de sécheresse ont été traitées sur le même principe que les vagues de chaleur. Cette indicateur n'a pas été agrégé par département, mais représenté sous forme de pseudo-raster vectoriel avec une symbologie imitant une pixellisation de 8km de résolution [Fig.16]. La sécheresse calculée est la sécheresse météorologique.

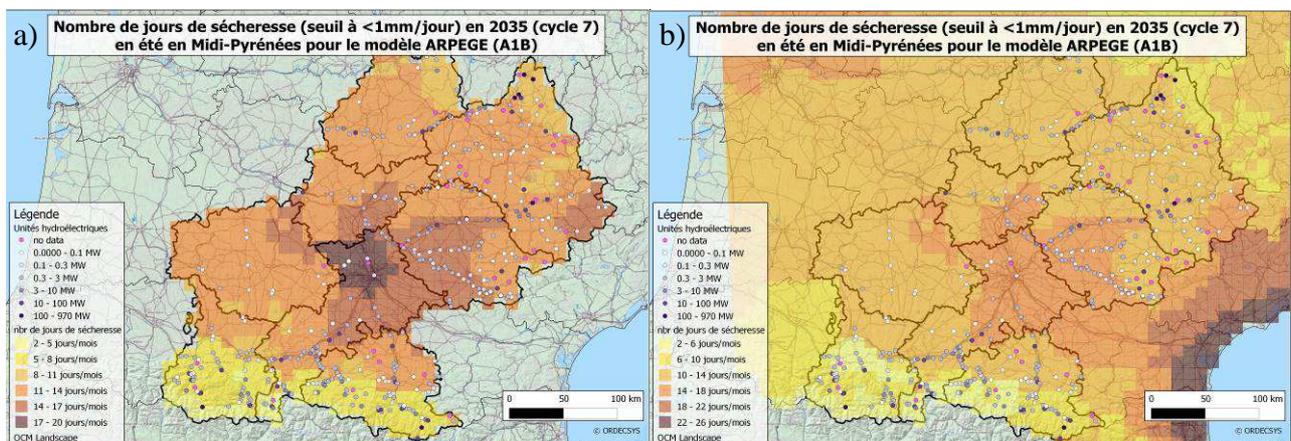


Figure 16 : Représentation sous forme de symbologie imitant une pixellisation de 8km de résolution. En a) représentation cantonnée à la région Midi-Pyrénées et en b) représentation sur une zone plus large. L'information pour Midi-Pyrénées est moins riche en b) qu'en a) en raison d'une plus grande amplitude des valeurs de nombre de jours. (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

Tout comme pour le cas des vagues de chaleur, les données de sécheresse sélectionnées pour créer la carte ont été limitées à la région Midi-Pyrénées. Cela améliore la richesse de l'information pour la région Midi-Pyrénées [Fig.16-b]. Le nombre de jours de vagues de chaleur a été comptabilisé en nombre de jours moyens par mois afin de pouvoir permettre la comparaison entre les saisons. Effectivement, les saisons ayant un nombre de mois différents et donc un nombre de jours différents, une saison ayant plus de jours aura plus de chance d'avoir plus de jours de sécheresse qu'une saison ayant moins de jours. Ceci rendant la comparaison entre les saisons difficile, il est plus aisé de parler en terme de nombre de jours moyens par mois que de nombre de jours par saison. Ceci n'était pas nécessaire pour les vagues de chaleur étant donné que seule la saison d'été a été analysée.

3.4. Population

Une analyse de la population en région Midi-Pyrénées a été faite afin d'avoir une meilleure vision de la répartition de la demande d'énergie et des zones potentiellement plus sensibles aux risques liés à des changements climatiques comme les inondations, aspect qui n'a finalement pas été intégré dans le modèle ETEM-AR. Cette carte de population [Fig.17] a également permis de créer le masque au-dessus des sommets des Pyrénées afin de ne pas prendre en compte les degrés-jours au-dessus de cette région (cf. chapitre 3.3). Ces données de population ont été téléchargées sur le site Internet du *socioeconomic data and applications center* de la NASA²⁸ et sont disponibles uniquement pour l'année 2005, 2010 et 2015. Tout d'abord, il a fallu importer ces rasters dans *QGIS*. Le système de projection étant en *WGS 84*, il a fallu le transformer en *RGF93/Lambert 93*. Puis finalement, la symbologie a été créée de façon à être adaptée à la région Midi-Pyrénées, c'est-à-dire que l'amplitude des valeurs correspond aux valeurs minimales et maximales se trouvant en Midi-Pyrénées.

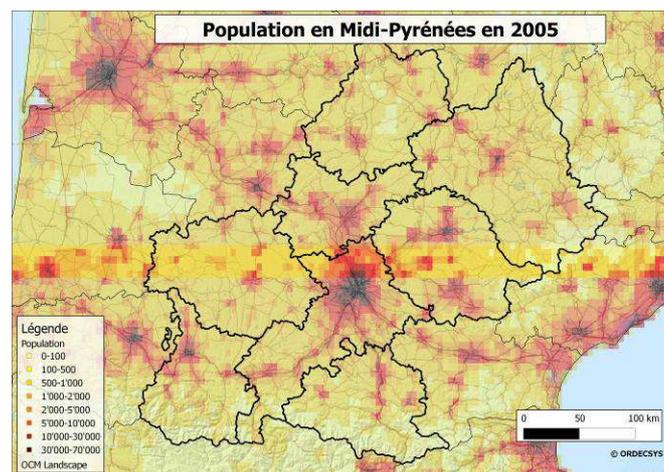


Figure 17 : Carte de la population en Midi-Pyrénées pour l'année de référence du modèle ETEM-AR (2005). Il peut être remarqué que les sommets des Pyrénées sont très peu habités ce qui justifie la décision de supprimer les données de cette région pour l'analyse des degrés-jours. (Source : carte créée à partir des données du CIESIN *et al.* 2012)

²⁸ Site Internet du *socioeconomic data and applications center* : <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v3>

Une carte d'évolution de la population entre 2005 et 2010 et une entre 2005 et 2015 ont été faites principalement pour des raisons méthodologiques et afin d'avoir un support visuel agréable pour présenter l'évolution de la population à la place de simplement visualiser un graphique [Fig.18 et 19]. Cela permet également de mieux se rendre compte de l'urbanisation de la région et de l'exode rural de part une représentation géographiquement plus détaillée [Fig.20 et 21]. Les cartes d'évolution de la population ont été faites au moyen d'un outil permettant de faire des calculs avec des fichiers rasters. Cette simple calculatrice permet d'entrer des équations simples. L'équation utilisée dans ce cas est la suivante :

$$X = ((P_2/P_1)-1)*100$$

Où X est l'évolution de la population en %, P₂ est la population au temps 2 et P₁ est la population au temps 1. 1 est soustrait au taux (P₂/P₁) afin d'avoir la part d'évolution de P₁ pour arriver à P₂ et le tout est multiplié par 100 afin d'avoir les résultats en pourcentage.

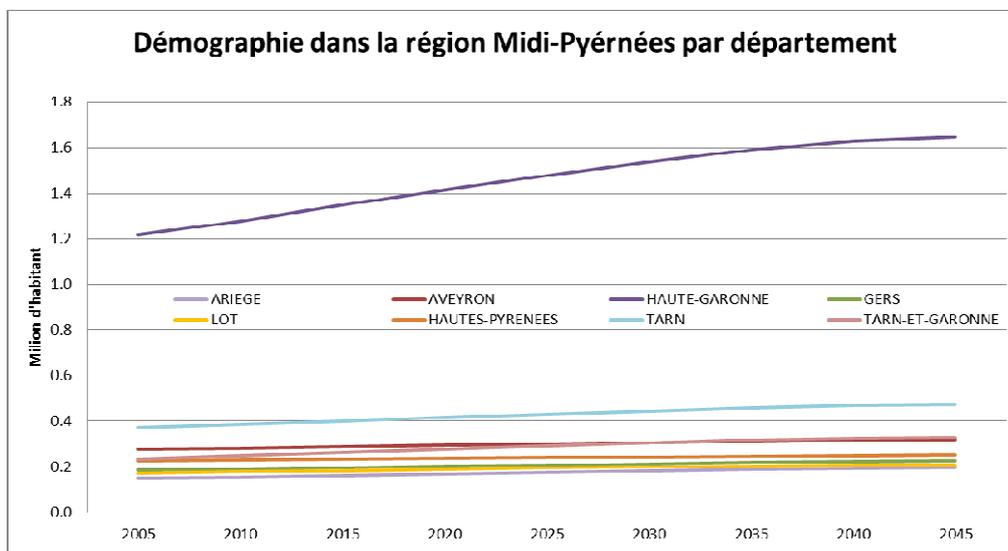


Figure 18 : Evolution de la population entre 2005 et 2045 par département. (Source : INSEE 2010a et 2010b)

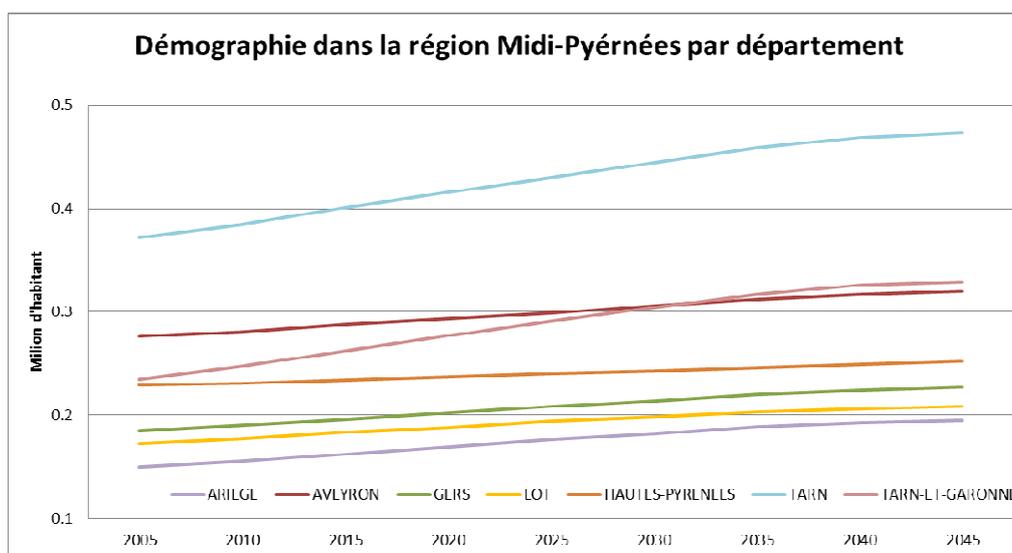


Figure 19 : Evolution de la population entre 2005 et 2045 par département sans la Haute-Garonne. (Source : INSEE 2010a et 2010b)

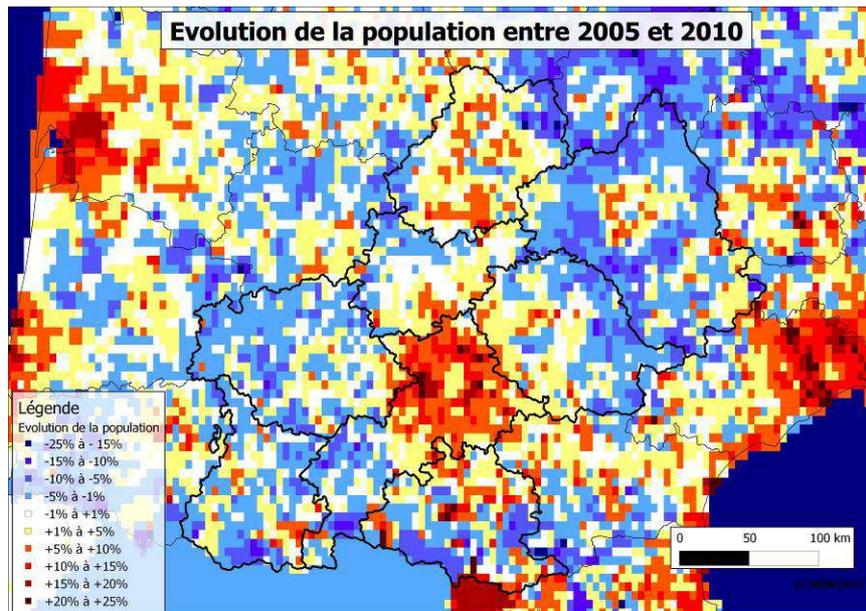


Figure 20 : Evolution de la population entre 2005 et 2010. Il est possible d’observer un déplacement de population qui semble être un exode rural. (Source : carte créée à partir des données du CIESIN *et al.* 2012)

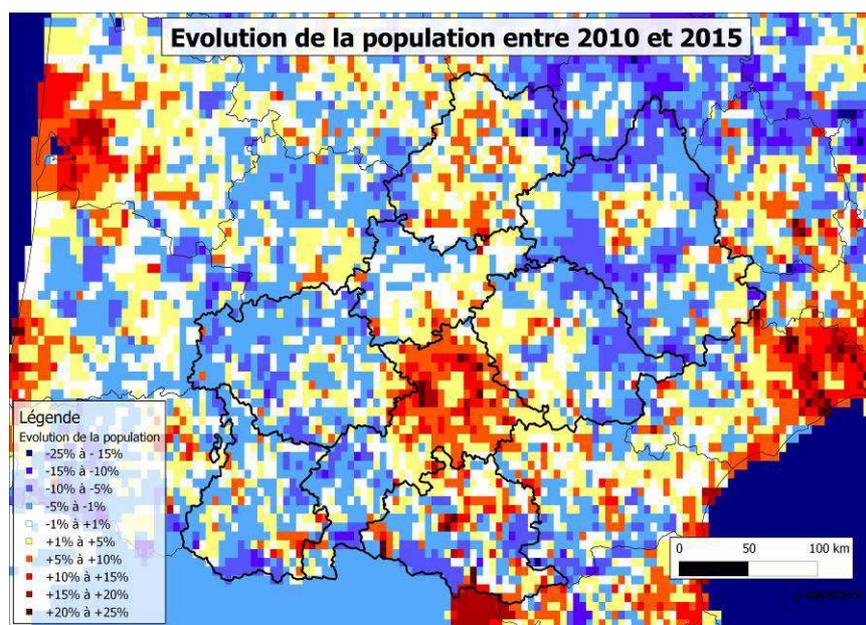


Figure 21 : Evolution de la population entre 2010 et 2015. L’évolution semble garder une certaine conformité par rapport à 2005-2010. (Source : carte créée à partir des données du CIESIN *et al.* 2012)

4. RÉSULTATS

Comme dit précédemment, il y a deux types de données : les données énergétiques et les données climatiques. Différentes cartes et graphiques ont été créés pour présenter ces résultats. Ce chapitre va présenter un petit échantillon des cartes et graphiques créés.

4.1. Données énergétiques

Les données énergétiques sont divisées en deux parties. D'une part, se trouvent les données de capacité de production qui vont être utilisées par le modèle et qui sont présentées à travers un guichet cartographique, et d'autre part, les données de capacité de production, de demande et d'émissions produites par le modèle ETEM-AR.

4.1.1. Intrants du modèle

Ces données sont représentées géographiquement afin d'avoir un aperçu de la répartition du parc énergétique de la région Midi-Pyrénées, excepté pour les données agrégées qui n'ont pas pu être désagrégées comme les centrales thermiques par exemple [Fig.22].

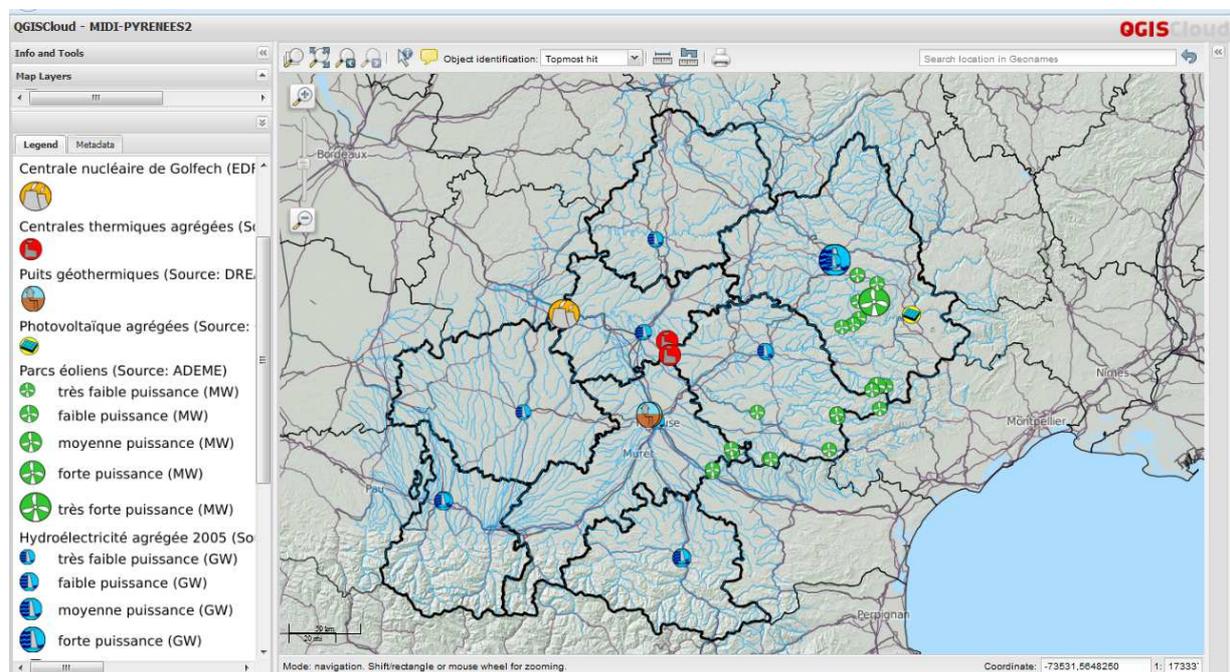


Figure 22 : Guichet cartographique créé à partir de QGIS Cloud pour présenter les données énergétiques en 2005.²⁹

4.1.2. Extrants du modèle

Le modèle ETEM-AR a produit plusieurs extrants pour différentes années, différents scénarios et différentes variables. Il a été demandé, dans le cadre de ce projet de représenter, avec les systèmes d'information géographique, certaines de ces variables pour certains scénarios. Les différentes variables qui ont été cartographiées sont : la capacité de production hydroélectrique ; la capacité de production éolienne ; la consommation résidentielle ; la demande de chaleur et de froid pour le résidentiel et le commercial ; les émissions équivalant CO₂. Le scénario choisi pour représenter ces variables est le scénario BAU (*business as usual*) avec l'impact du changement climatique pris en compte.

²⁹ Pour accéder au guichet et aux sources des données : <http://qgiscloud.com/Ordecys/MIDI-PYRENEES2>

- Capacité de production hydroélectrique :

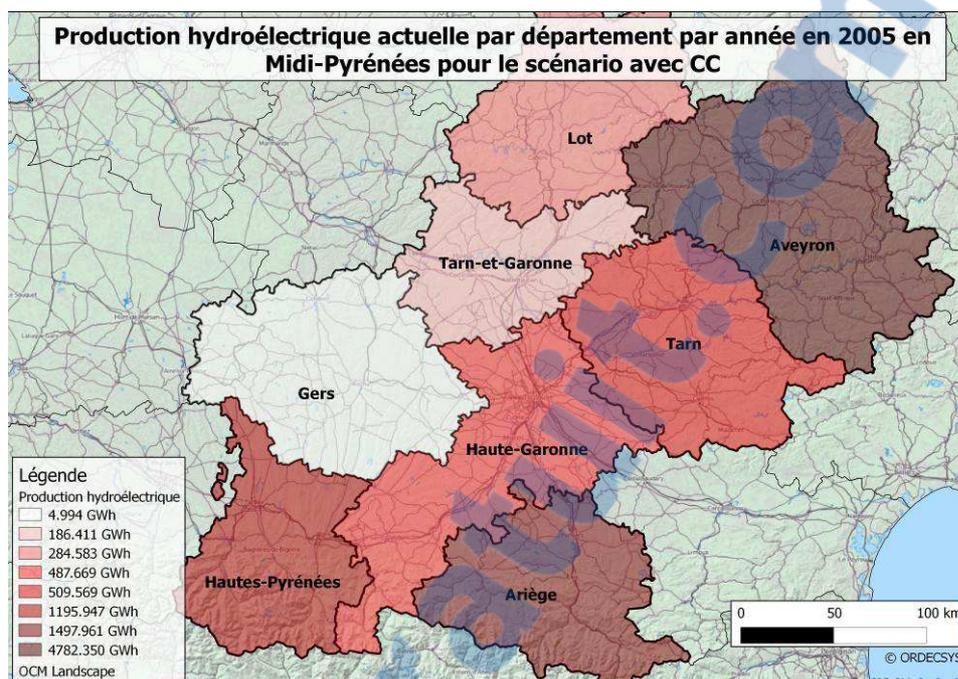


Figure 23 : Capacité de production hydroélectrique en 2005 par département.

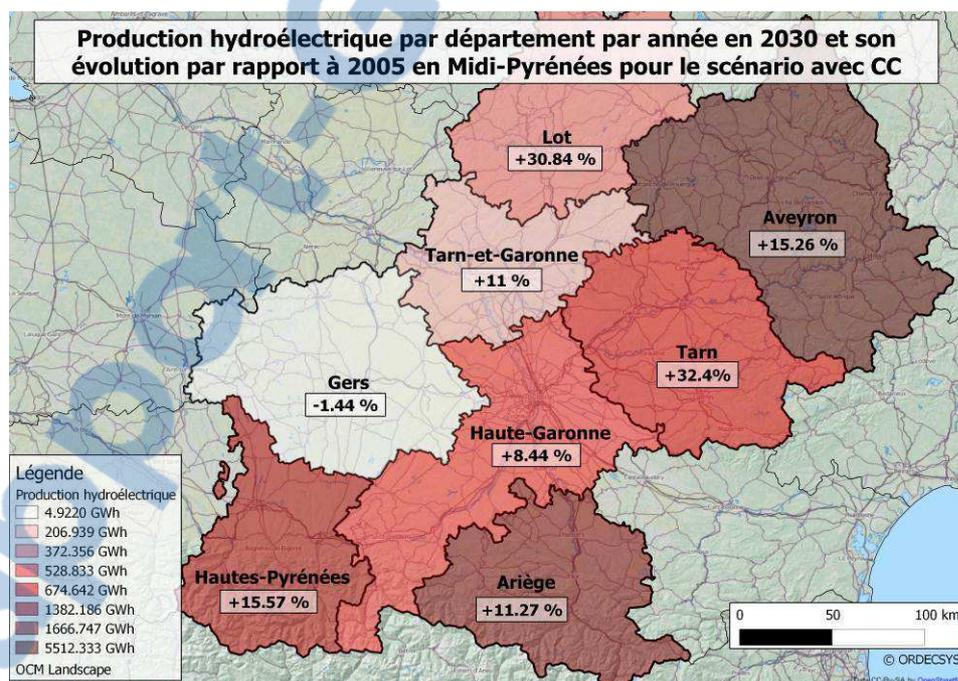


Figure 24 : Capacité de production hydroélectrique en 2030 et l'évolution de la production entre 2005 et 2030 par département.

La production est logiquement plus importante dans les régions de montagne [Fig.23], mais la plus grande production se trouve sur les versants du Massif central avec notamment de grosses unités de production comme la centrale de Gourdan-Polignan avec une puissance de plus de 900 MW. C'est également au pied du Massif central que l'augmentation de la capacité de production est la plus importante [Fig.24].

- Capacité de production éolienne :

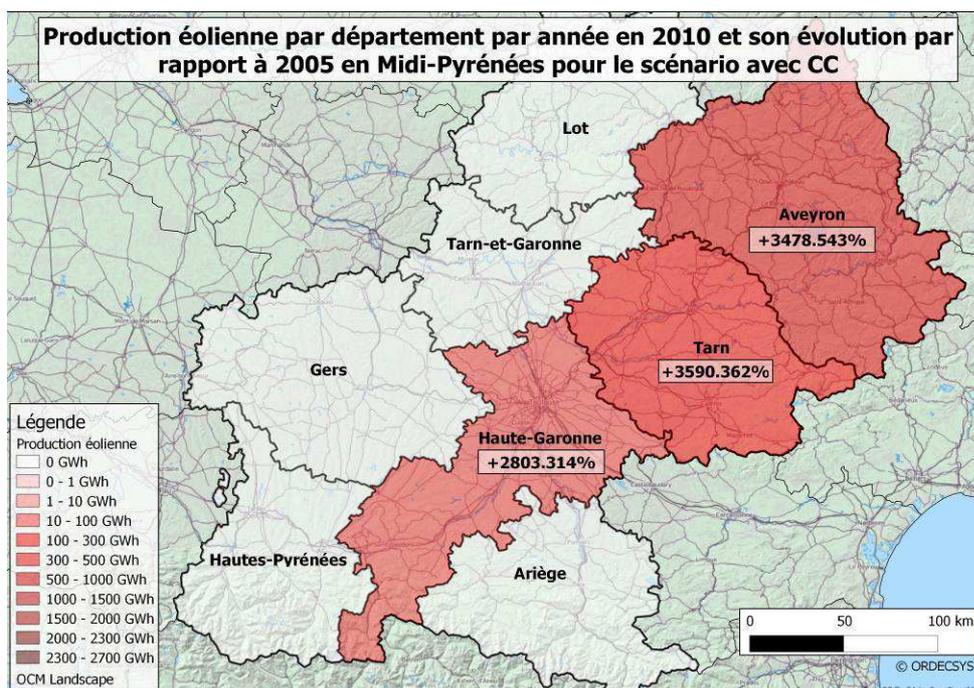


Figure 25 : Capacité de production éolienne en 2010 et son augmentation en pourcent par rapport à 2005. L'augmentation est très forte entre 2005 et 2010.

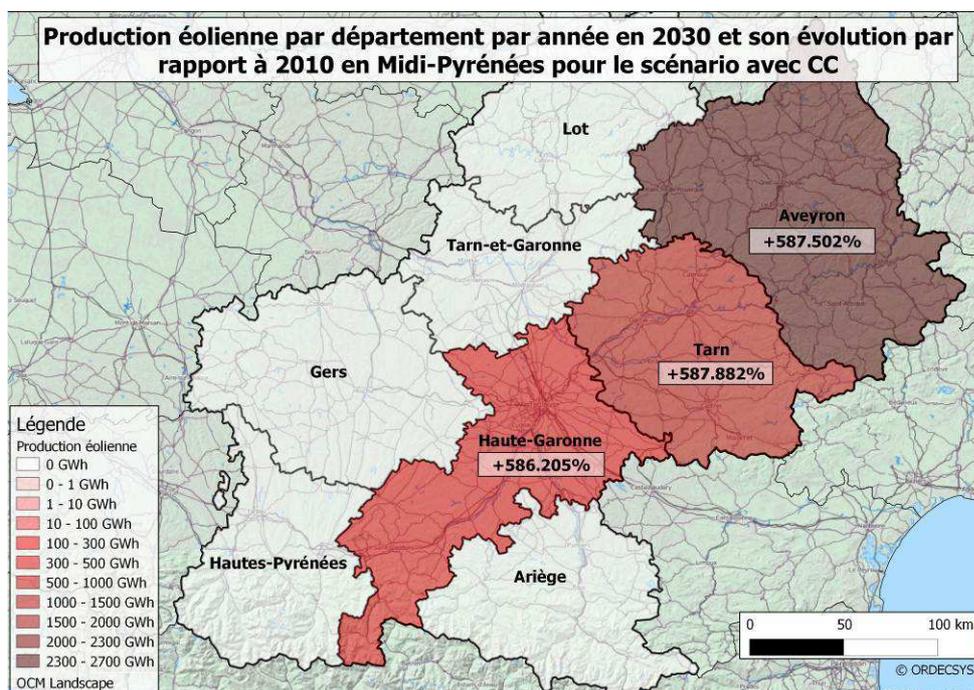


Figure 26 : Capacité de production éolienne en 2030 et son augmentation en pourcent par rapport à 2010. L'augmentation est plus faible qu'entre 2005 et 2010.

La capacité de production du parc éolien a un fort potentiel, principalement parce que la capacité de production en 2005 est très faible (<1 GWh). Entre 2005 et 2010, la capacité de production éolienne augmente rapidement, mais en valeur absolue reste relativement faible [Fig.25]. Cependant, entre 2010 et 2030, elle continue à augmenter à un rythme soutenu pour atteindre plus de 2000 GWh par année pour le

département de l'Aveyron [Fig.26]. Le choix du potentiel éolien est basé sur le rapport du SRCAE (Schéma Régional Climat-Air-Energie en Midi-Pyrénées) avec 60% pour l'Aveyron, 30% pour le Tarn et 10% pour la Haute-Garonne [SRCAE 2011, p.45]. Cependant, il faut faire attention avec la représentation de cette simulation de potentiel futur, car le modèle ETEM-AR n'a pas encore de facteur de décision basé sur la localisation. C'est pour cette raison que l'éolien se développe uniquement dans ces trois départements, où la technologie était déjà présente en 2005.

- Consommation résidentielle :

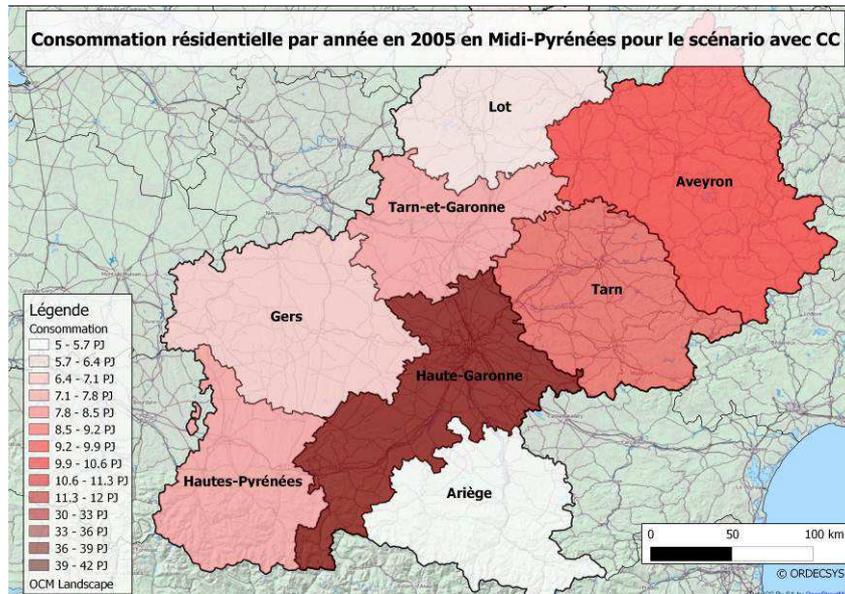


Figure 27 : Consommation résidentielle toutes énergies confondues par département en 2005.

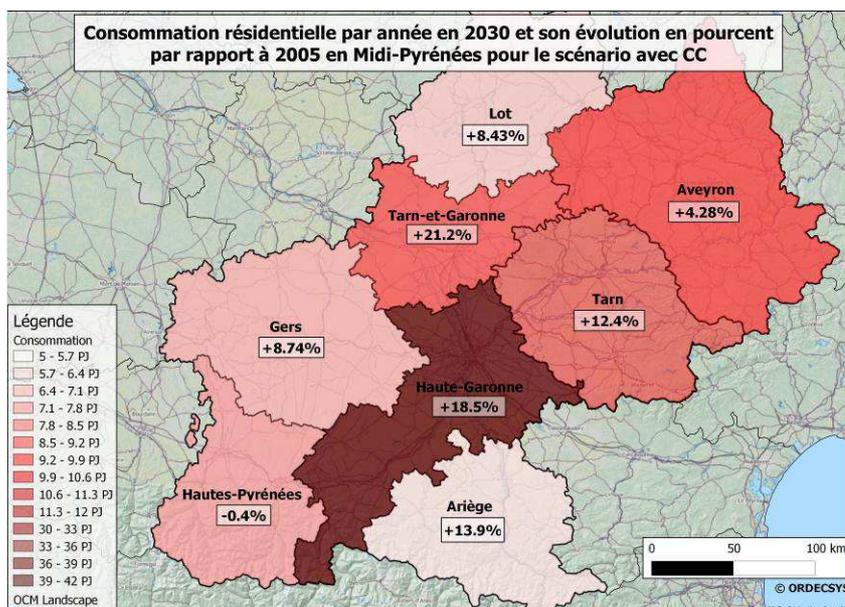
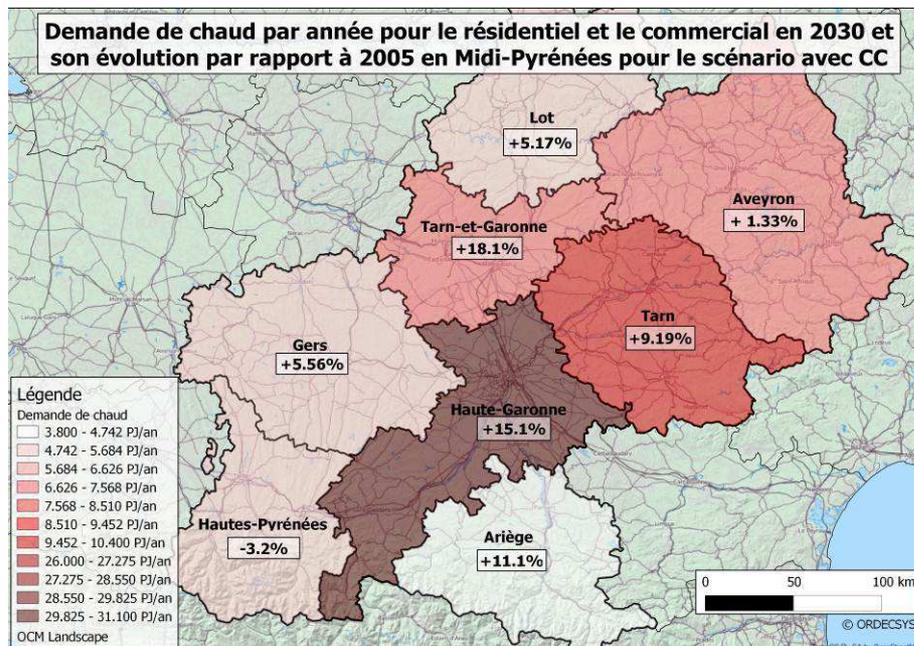
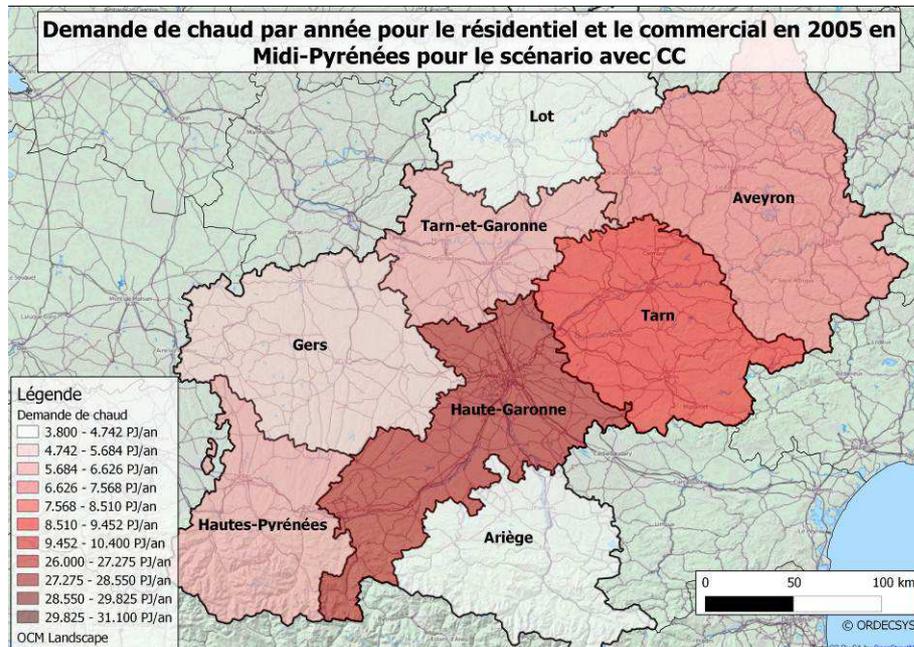


Figure 28 : Consommation résidentielle toutes énergies confondues par département en 2030 et l'évolution de cette consommation entre 2005 et 2030.

La consommation peut évoluer pour plusieurs raisons dont : la baisse ou la hausse de la demande de refroidissement ou de chauffage et l'augmentation de la population.

La demande est plus importante en Haute-Garonne [Fig.27] en raison de la présence de Toulouse et ses 439'553 habitant (état en 2008) [TOULOUSE METROPOLE 2011, p.22] et elle diminue en Hautes-Pyrénées [Fig.28] en raison principalement de la baisse de la demande de chauffage et non par la baisse de la population étant donné que même dans cette région, la population augmente [Fig.19].

- Demande de chaleur et de froid pour le résidentiel et le commercial :



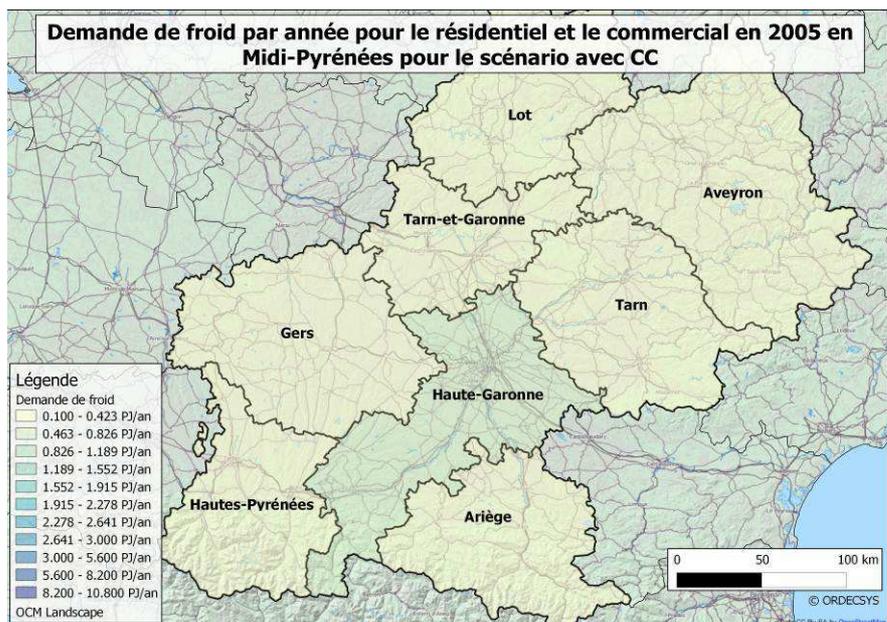


Figure 31 : Demande énergétique de froid (électrique) pour le résidentiel et le commercial pour l'année 2005.

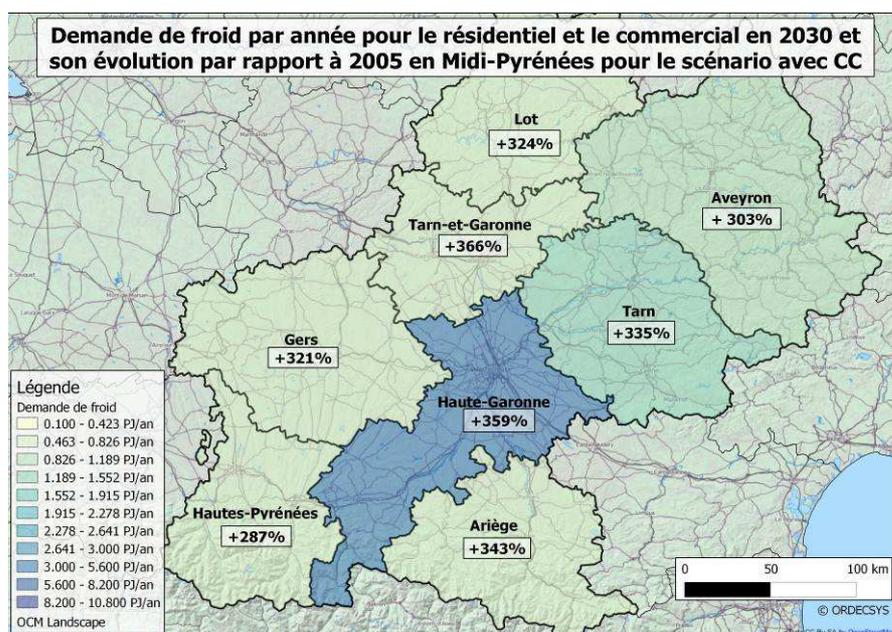


Figure 32 : Demande énergétique de froid (électrique) pour le résidentiel et le commercial pour l'année 2030 et l'augmentation de cette demande entre 2005 et 2030.

La demande de chaleur est assez élevée en 2005, notamment en Haute-Garonne où elle dépasse les 25 PJ/an [Fig.29] et elle augmente en 2030, malgré un réchauffement général en raison du changement climatique. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation générale de la population. Cependant, en Hautes-Pyrénées, la demande de chaleur enregistre une baisse [Fig.30]. En regardant plus près le comportement de la population [Fig.19], il peut être constaté que la population en Hautes-Pyrénées n'augmente que très légèrement. Pour la demande de froid, elle est très faible en 2005 [Fig.31] avec moins de 0.5 PJ/an dans la plupart des départements. En 2030, cette demande augmente très rapidement pour tripler par rapport à 2005 [Fig.32], mais en terme de valeur absolue, le maximum estimé en

Haute-Garonne reste tout de même trois fois moins important que la demande maximum de chaleur pour le même département. La demande de froid est donc assez faible, mais son augmentation très rapide en raison de l'augmentation de la population et des températures due au changement climatique.

- Emissions équivalent CO₂ :

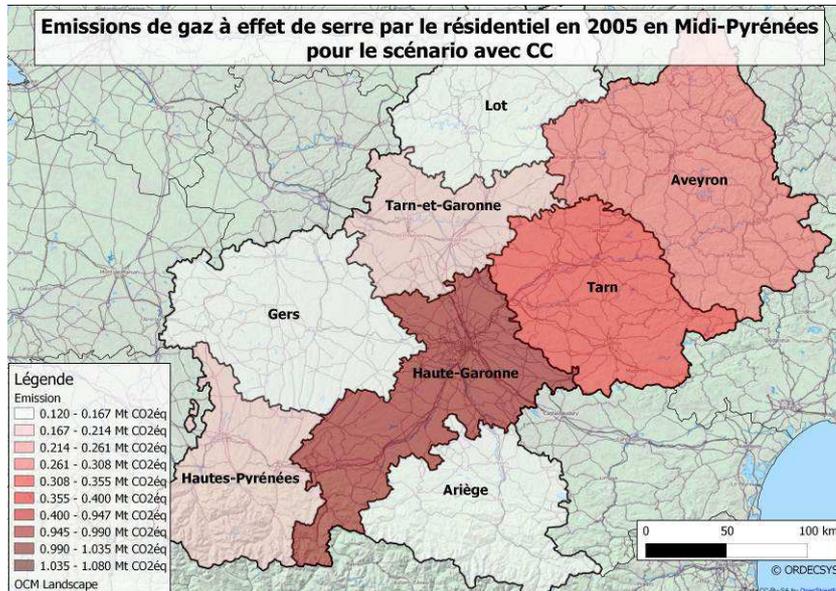


Figure 33 : Emissions des gaz à effet de serre par le résidentiel en 2005.

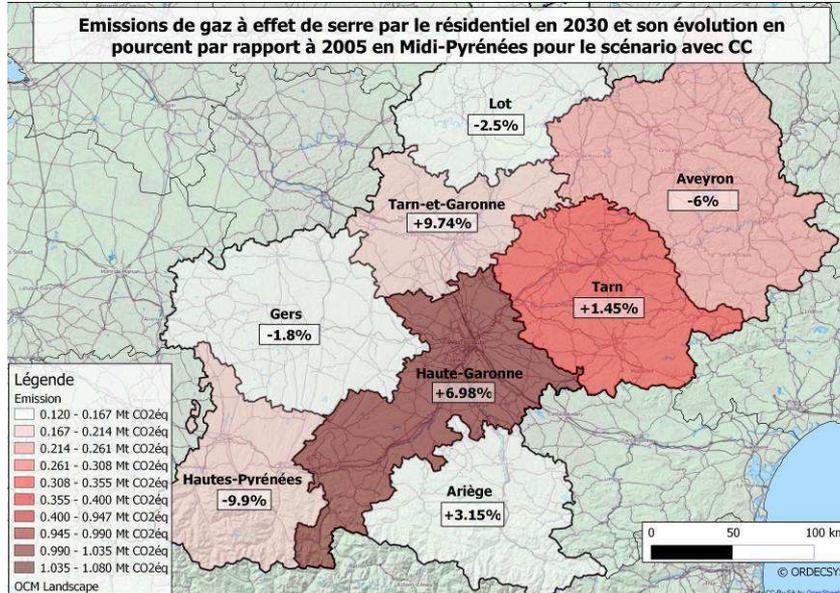


Figure 34 : Emissions de gaz à effet de serre par le résidentiel en 2030 et l'augmentation de ces émissions entre 2005 et 2030.

Les émissions de gaz à effet de serre sont très variées d'un département à l'autre [Fig.33]. Quant à son évolution en 2030 [Fig.34], les parts des émissions restent plus ou moins les mêmes. Les départements se trouvant proches des reliefs enregistrent une diminution des émissions et les départements en plaine, une augmentation de celles-ci, à l'exception de l'Ariège qui se trouve en partie sur les Pyrénées et qui enregistre une augmentation.

4.2. Données climatiques

Au final, six modèles climatiques, dont un (ARPEGE) tournant avec deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A1B et A2), avec quatre indicateurs du changement climatique (degrés-jours ; vagues de chaleur ; précipitations ; vagues de sécheresse) développés et deux variables climatiques informatives (température ; vents), pour neuf cycles et trois saisons ont été utilisés pour ce projet³⁰. Ceci fait un total de plus de 550 cartes créées.

4.2.1. Degrés-jours et températures

D'ici à l'horizon 2050, la demande de refroidissement en été augmente fortement. Bien qu'elle varie d'un modèle à l'autre [Tab.1], la demande explose fortement d'ici 2045-2050 [Fig.35, 36 et 41b (été)]. Cependant en valeur absolue, la quantité de demande est très faible en comparaison avec la demande de chauffage en hiver [Fig.37, 38 et 41b (hiver)] et durant la période intermédiaire [Fig.39, 40 et 41b (inter)]. La demande de chauffage reste, même en 2050, une grande part de la demande d'énergie par rapport à la climatisation, mais son évolution est plus lente. La demande de chauffage diminue plus lentement que la demande de refroidissement augmente [Fig.41b]. La figure 42 permet de voir la plage d'incertitude des modèles climatiques pour la question des degrés-jours.

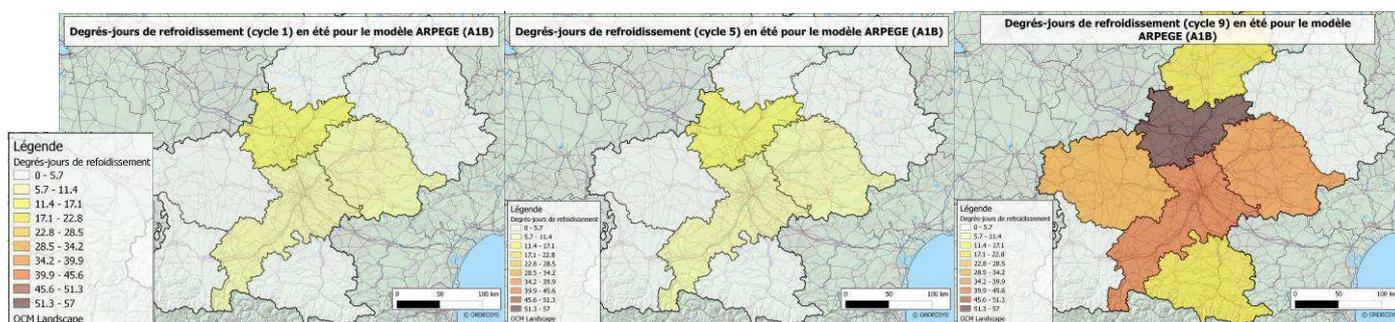


Figure 35 : Degrés-jours de refroidissement en été pour le modèle AREGE (A1B) en 2005 (cycle 1), 2025 (cycle 5) et 2045 (cycle 9). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

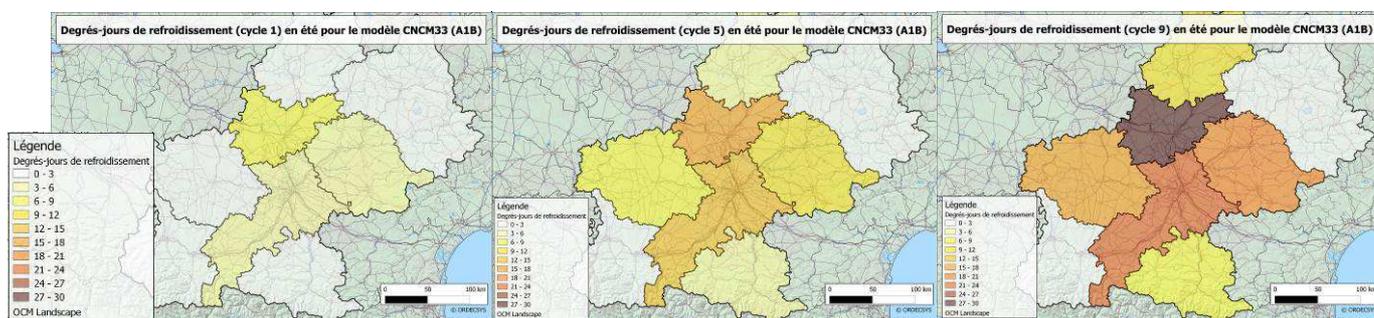


Figure 36 : Degrés-jours de refroidissement en été pour le modèle CNM33 (A1B) en 2005 (cycle 1), 2025 (cycle 5) et 2045 (cycle 9). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

³⁰ Tous les modèles n'ont pas forcément été utilisés pour toutes les variables comme par exemple les vents et la sécheresse.

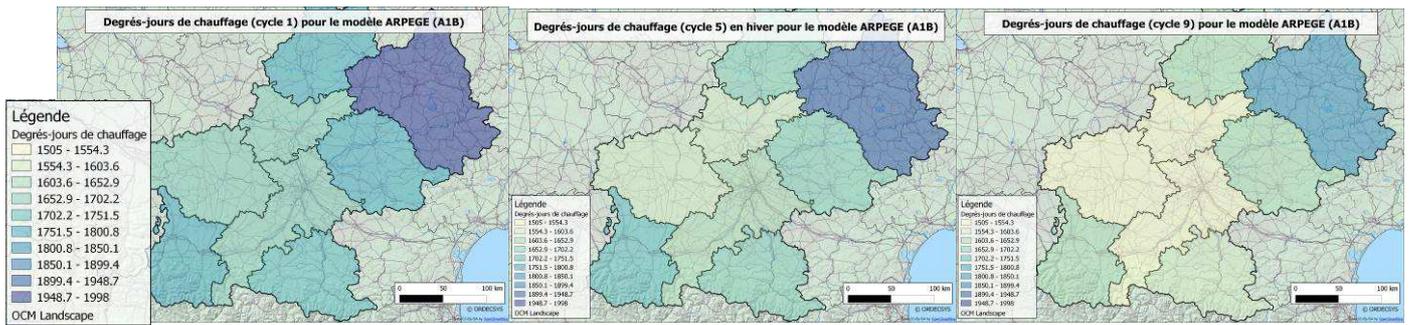


Figure 37 : Degrés-jours de chauffage en hiver pour le modèle AREGE (A1B) en 2005 (cycle 1), 2025 (cycle 5) et 2045 (cycle 9). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

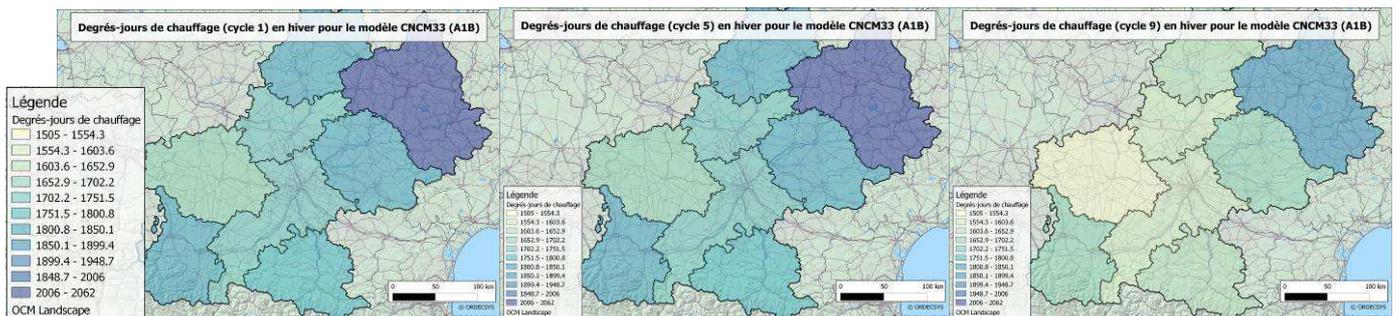


Figure 38 : Degrés-jours de chauffage en hiver pour le modèle CNM33 (A1B) en 2005 (cycle 1), 2025 (cycle 5) et 2045 (cycle 9). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

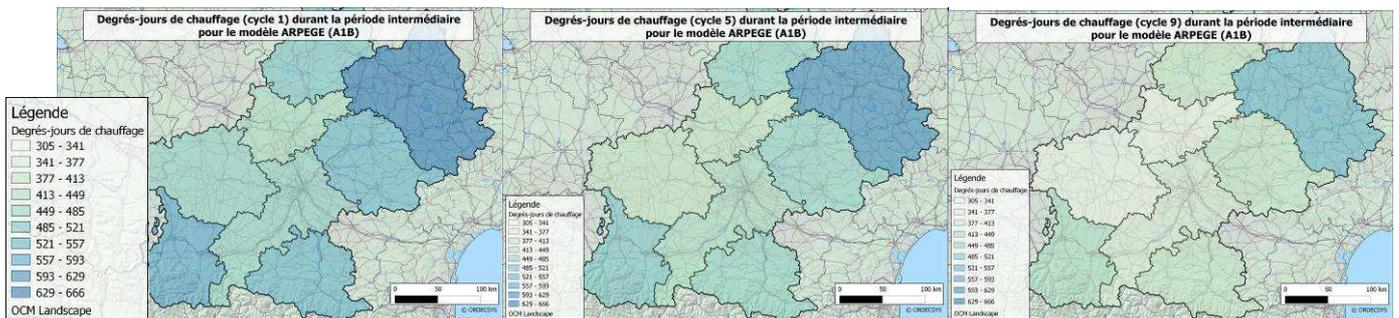


Figure 39 : Degrés-jours de chauffage pour la période intermédiaire pour le modèle ARPEGE (A1B) en 2005 (cycle 1), 2025 (cycle 5) et 2045 (cycle 9). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

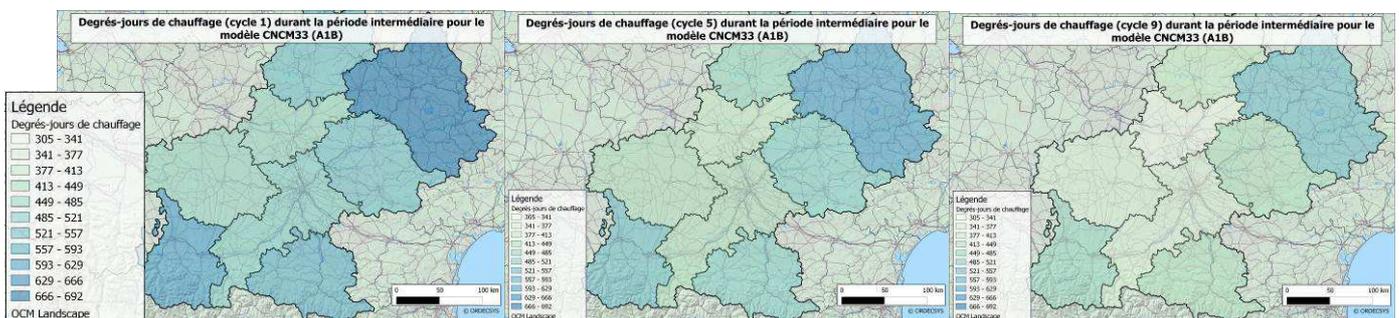


Figure 40 : Degrés-jours de chauffage pour la période intermédiaire pour le modèle CNM33 (A1B) en 2005 (cycle 1), 2025 (cycle 5) et 2045 (cycle 9). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

La température est fortement liée aux degrés-jours, mais pas forcément de manière linéaire, aspect observable principalement avec la demande de refroidissement. La température augmente légèrement entre 2035 et 2045 alors que les degrés-jours de refroidissement explosent durant cette période [Fig.26a et b]. Comme cela peut-être attendu, la demande de chauffage et de refroidissement

varient fortement en plaine alors que pour les Pyrénées et le Massif central, la demande varie plus faiblement.

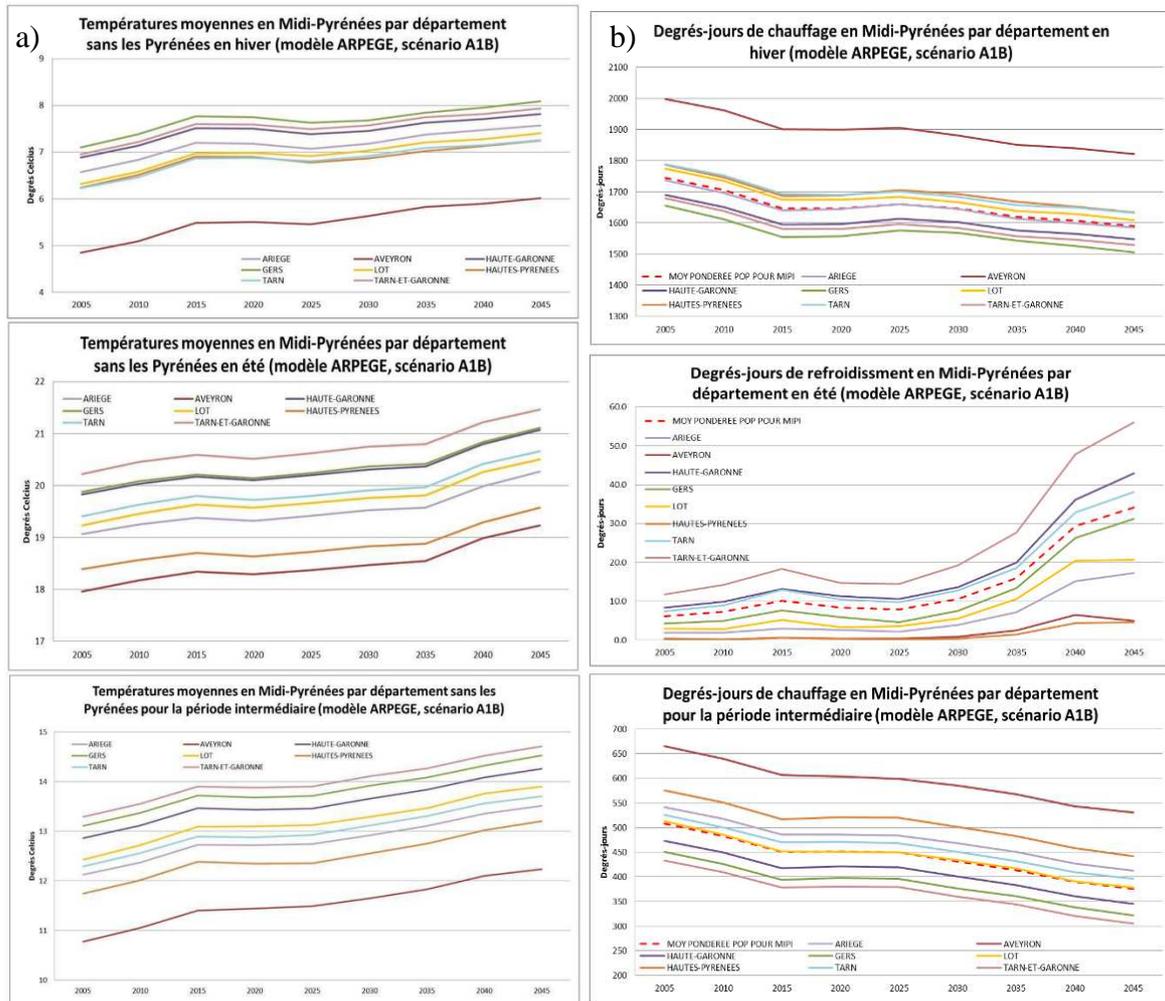


Figure 41 : En a), se trouve les graphiques des températures moyennes par saison pour le modèle ARPEGE (A1B) et en b), se trouve les graphiques des degrés-jours correspondants.

Tableau 1 : Résultats des degrés-jours moyens pondérés par la population pour les 3 saisons et les 9 cycles.

ETE (DJR)		cycle 1	cycle 2	cycle 3	cycle 4	cycle 5	cycle 6	cycle 7	cycle 8	cycle 9
A1B	ARPEGE	6.2	7.3	10.1	8.4	7.9	10.6	16.1	29.4	34.2
A2	ARPEGE	8.4	5.3	4.4	8.5	8.9	9.4	10.5	13.2	20.8
A1B	HADGEM2	5.8	6.8	11.5	10.2	7.7	17.1	24.2	32.1	41.5
A1B	IPCM4	14.0	18.2	15.2	15.5	22.1	33.5	59.0	64.0	75.7
A1B	CNCM33	3.6	4.1	6.6	9.6	9.5	11.6	13.4	15.1	17.6
A1B	DMIEH5C	5.0	9.6	8.2	9.5	11.8	10.1	18.8	26.1	28.6
A1B	MPEH5C	5.7	5.7	8.0	10.8	14.9	15.6	12.7	12.6	16.4
	<i>Moy DJR été</i>	<i>7.0</i>	<i>8.1</i>	<i>9.2</i>	<i>10.4</i>	<i>11.8</i>	<i>15.4</i>	<i>22.1</i>	<i>27.5</i>	<i>33.5</i>
INTERMEDIAIRE (DJC)		cycle 1	cycle 2	cycle 3	cycle 4	cycle 5	cycle 6	cycle 7	cycle 8	cycle 9
A1B	ARPEGE	508.0	483.0	450.3	451.8	449.3	430.9	413.4	390.2	375.1
A2	ARPEGE	509.0	483.4	476.3	453.3	444.8	438.5	423.8	425.2	405.1
A1B	HADGEM2	494.8	511.2	503.1	471.7	438.9	432.2	436.8	393.0	340.9
A1B	IPCM4	453.8	427.3	437.5	445.0	428.3	393.8	356.5	335.8	314.6
A1B	CNCM33	531.5	526.3	480.8	457.7	470.5	497.9	489.8	528.0	406.1
A1B	DMIEH5C	463.4	468.2	473.7	460.0	425.0	415.9	409.2	414.4	426.7
A1B	MPEH5C	501.9	484.0	457.9	446.6	422.8	440.5	445.8	421.7	394.9
	<i>Moy DJC interm</i>	<i>494.6</i>	<i>483.3</i>	<i>468.5</i>	<i>455.1</i>	<i>439.9</i>	<i>435.7</i>	<i>425.0</i>	<i>415.5</i>	<i>380.5</i>

HIVER (DJC)		cycle 1	cycle 2	cycle 3	cycle 4	cycle 5	cycle 6	cycle 7	cycle 8	cycle 9
A1B	ARPEGE	1744.8	1704.9	1646.2	1645.9	1660.1	1646.1	1619.0	1607.1	1589.7
A2	ARPEGE	1755.9	1740.4	1701.7	1663.1	1662.8	1651.4	1617.1	1628.3	1616.0
A1B	HADGEM2	1744.2	1707.3	1687.6	1662.3	1614.7	1588.3	1568.2	1537.7	1523.7
A1B	IPCM4	1609.5	1554.8	1567.9	1563.9	1540.7	1543.1	1558.3	1493.7	1413.1
A1B	CNCM33	1780.8	1799.3	1725.6	1738.3	1778.1	1750.3	1723.6	1689.9	1622.3
A1B	DMIEH5C	1753.8	1707.7	1682.6	1684.5	1650.2	1634.6	1620.4	1609.4	1577.9
A1B	MPEH5C	1723.7	1730.3	1733.1	1718.4	1682.0	1650.9	1630.8	1618.8	1586.3
Moy DJC hiver		1730.4	1706.4	1677.8	1668.1	1655.5	1637.8	1619.7	1597.8	1561.3

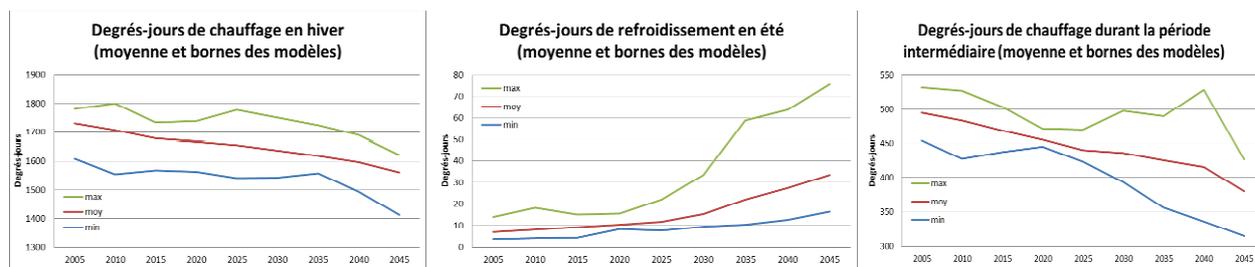


Figure 42 : Moyennes et bornes de tous les modèles climatiques utilisés pour le cas des degrés-jours.

4.2.2. Vagues de chaleur

Force est de constater que pour les vagues de chaleur, le résultat d'un modèle à l'autre peut être très variable. Cette indicateur permet principalement d'évaluer l'influence sur la centrale nucléaire de Golfech, qui semble se situer dans une zone assez propice à des vagues de chaleur plus ou moins longues [Fig.43 et 44].

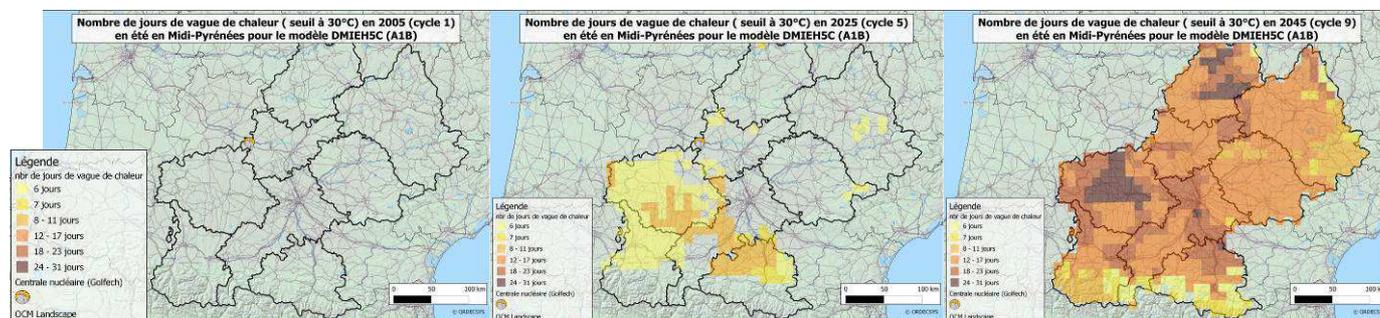


Figure 43 : Vagues de chaleur en été pour le modèle DMIEH5C (A1B) en 2005 (cycle 1), 2025 (cycle 5) et 2045 (cycle 9).
(Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

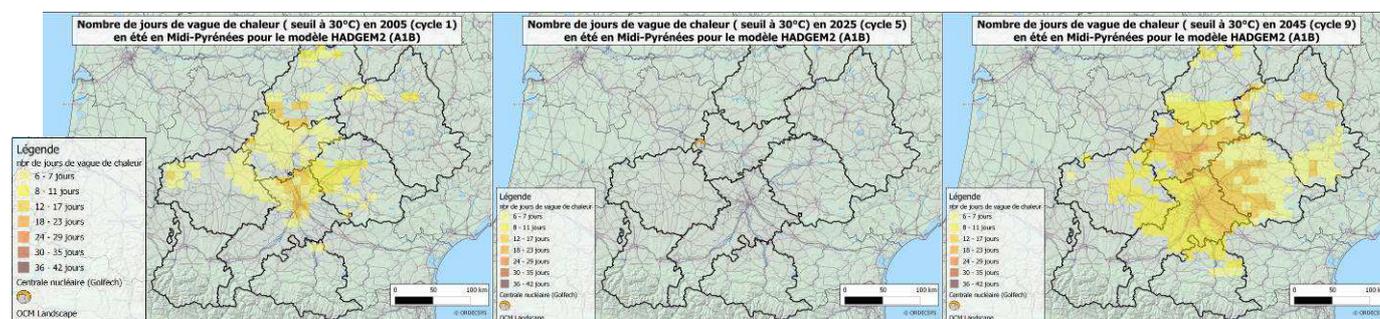


Figure 44 : Vagues de chaleur en été pour le modèle HADGEM2 (A1B) en 2005 (cycle 1), 2025 (cycle 5) et 2045 (cycle 9).
(Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

Les vagues de chaleur ont été utilisées quantitativement. Pour contrer cette forte variation d'un modèle et d'un cycle à l'autre, elles ont été calculées en prenant la valeur maximale moyenne au-dessus de la centrale nucléaire de Golfech (soit 25 jours) afin d'avoir la valeur extrême envisageable. Ceci réduisant ainsi la disponibilité de la centrale de Golfech. Cependant, ce facteur de disponibilité étant incertain, il a été introduit dans les analyses d'incertitude du modèle ETEM-AR.

4.2.3. Précipitations et vagues de sécheresse

Les données des précipitations ont été fournies sous deux formats. L'un agrégé par département et l'autre par bassin versant (cf. chapitre 3.3.).

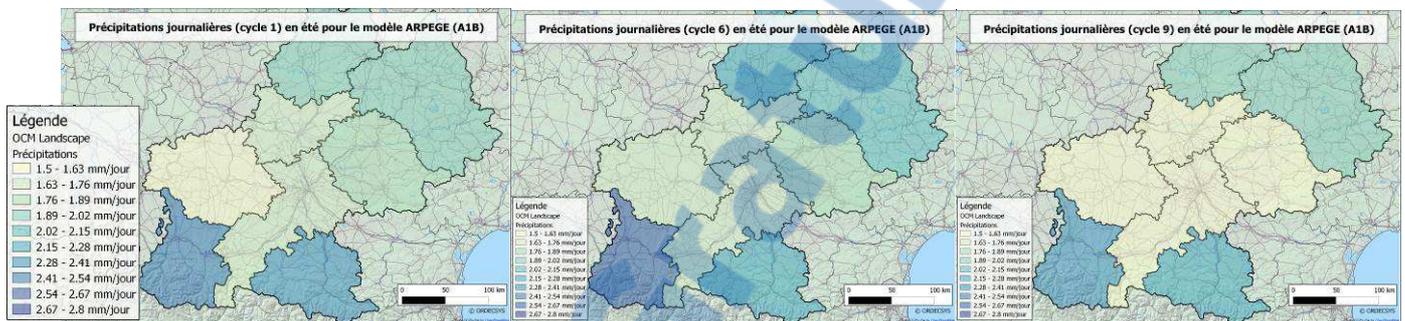


Figure 45 : Précipitations moyennes par département pour le modèle ARPEGE (A1B) en été pour le cycle 1 (2005), 5 (2025) et 9 (2045). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

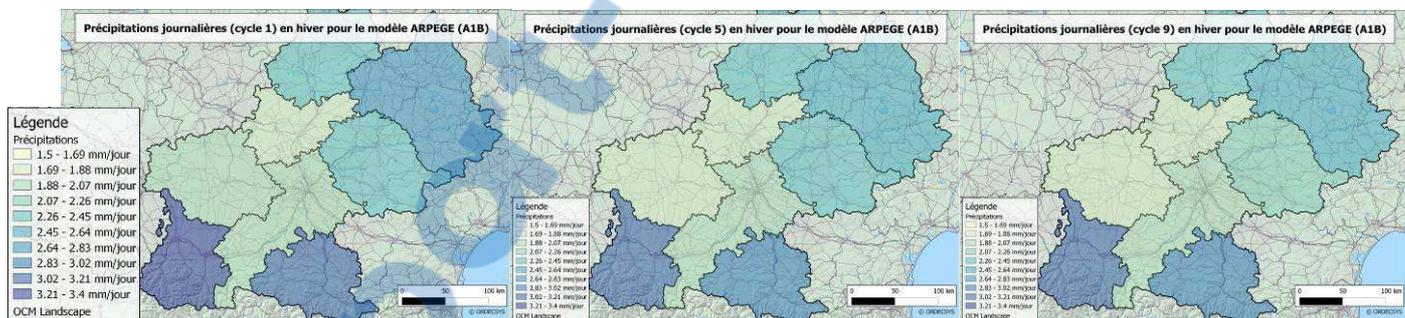


Figure 46 : Précipitations moyennes par département pour le modèle ARPEGE (A1B) en hiver pour le cycle 1 (2005), 5 (2025) et 9 (2045). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

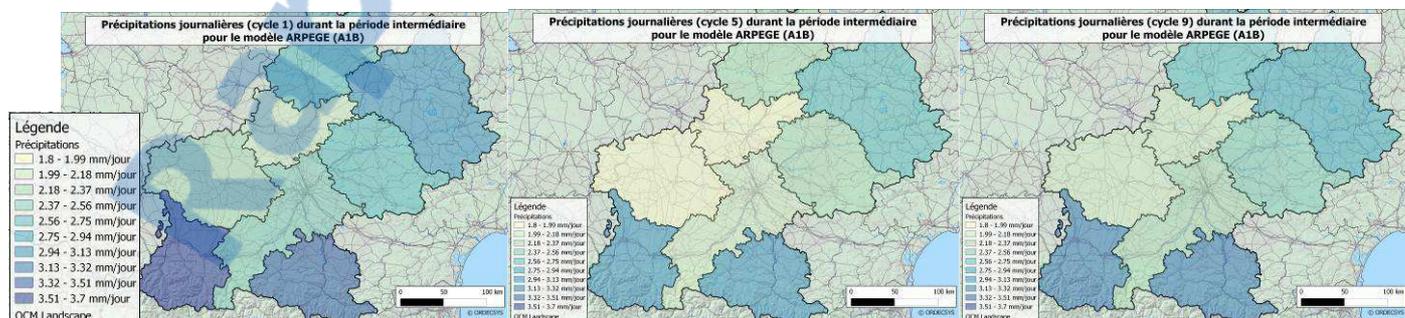


Figure 47 : Précipitations moyennes par département pour le modèle CNM33 durant la période intermédiaire pour le cycle 1 (2005), 5 (2025) et 9 (2045). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

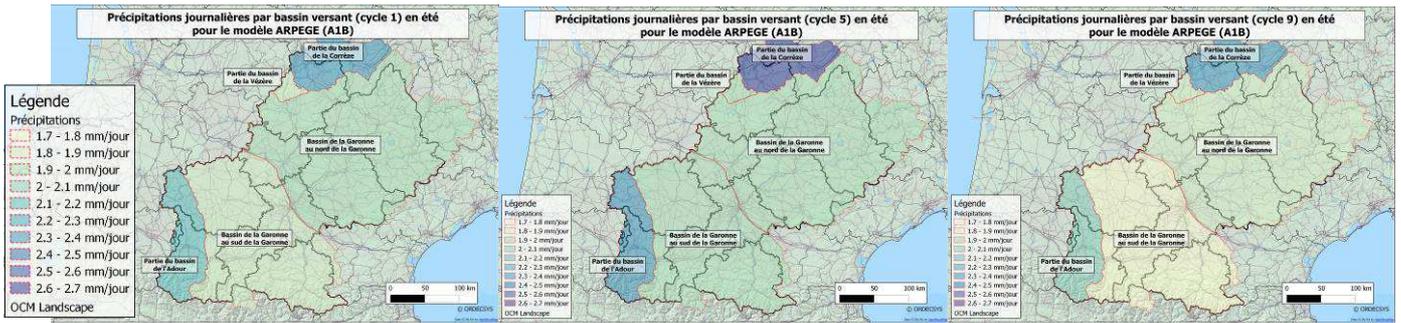


Figure 48 : Précipitations moyennes par bassin versant pour le modèle ARPEGE (A1B) en été pour le cycle 1 (2005), 5 (2025) et 9 (2045). Les résultats par bassin versant permettraient par la suite de calculer des débits de bassins. (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

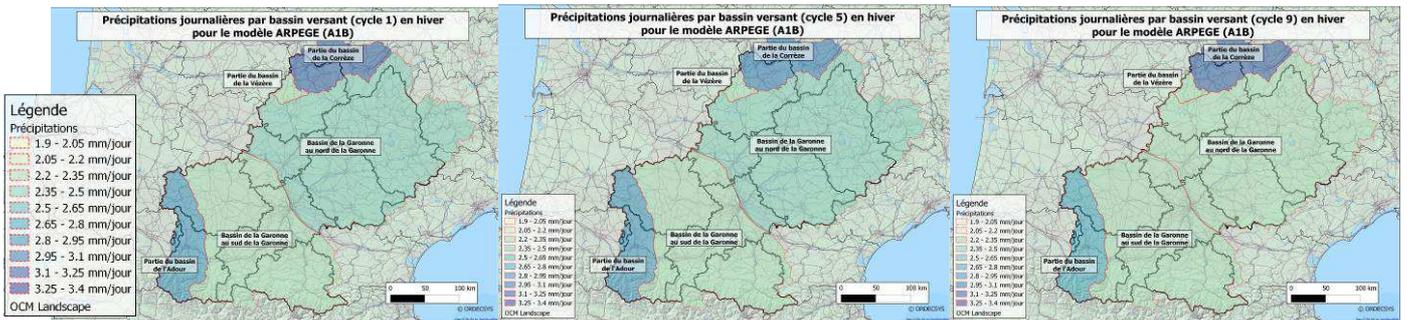


Figure 49 : Précipitations moyennes par bassin versant pour le modèle ARPEGE (A1B) en hiver pour le cycle 1 (2005), 5 (2025) et 9 (2045). Les résultats par bassin versant permettraient par la suite de calculer des débits de bassins. (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

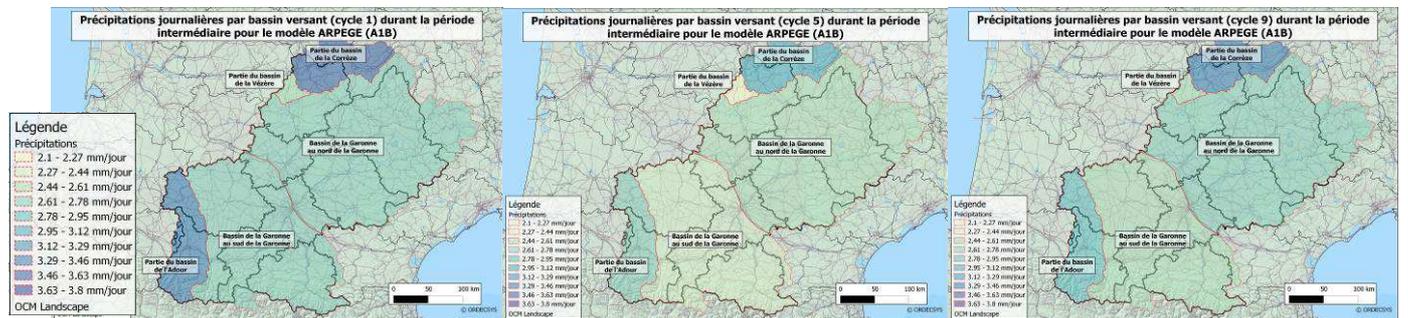


Figure 50 : Précipitations moyennes par bassin versant pour le modèle ARPEGE (A1B) durant la période intermédiaire pour le cycle 1 (2005), 5 (2025) et 9 (2045). Les résultats par bassin versant permettraient par la suite de calculer des débits de bassins. (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

De manière générale, les précipitations sont moins importantes dans la plaine entre les Pyrénées et le Massif central. Que ce soient les cartes agrégées par département ou par bassin versant, les deux montrent cette tendance. Il peut être constaté cependant, que pour les agrégations par bassin versant, qui représentent de plus grandes surfaces que les départements, il peut y avoir une perte d'information comme pour le cas de la figure 45 (cycle 1) où les départements au sud semblent ceux qui reçoivent le plus de précipitations et le cas de la figure 48 (cycle 1) où seul le bassin à l'extrémité sud-ouest reçoit plus de précipitations par rapport aux autres bassins (excepté pour le bassin tout au nord). Il est évident que plus l'agrégation est importante, moins l'information est riche. Quant à l'évolution dans le temps, il semble y avoir un assèchement, surtout marqué durant la saison d'été. Ces observations se font surtout dans la plaine. Les précipitations sur les versants des Pyrénées et du Massif central varient moins [Fig.45-50].

Les données de sécheresse donnent le nombre de jours où les précipitations ne dépassent pas 1mm/jour durant au moins 6 jours.

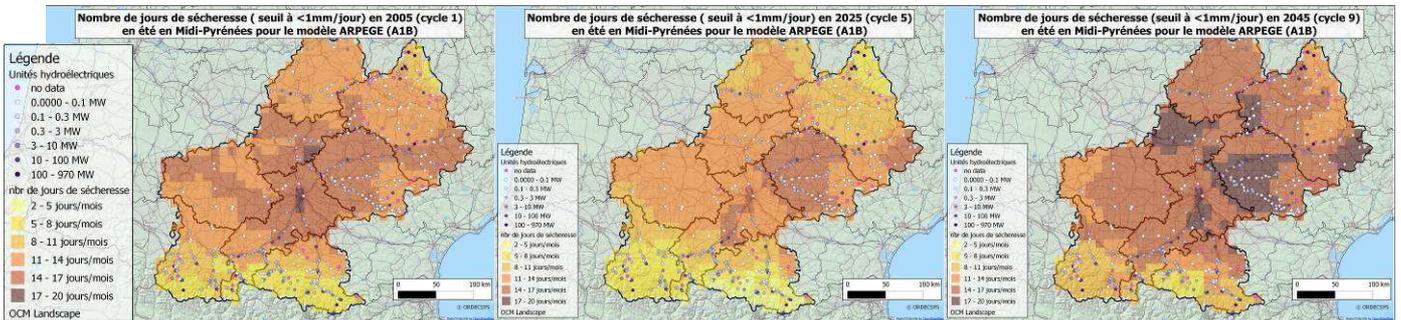


Figure 51 : Vagues de sécheresse pour le modèle ARPEGE (A1B) en été pour le cycle 1 (2005), 5 (2025) et 9 (2045). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

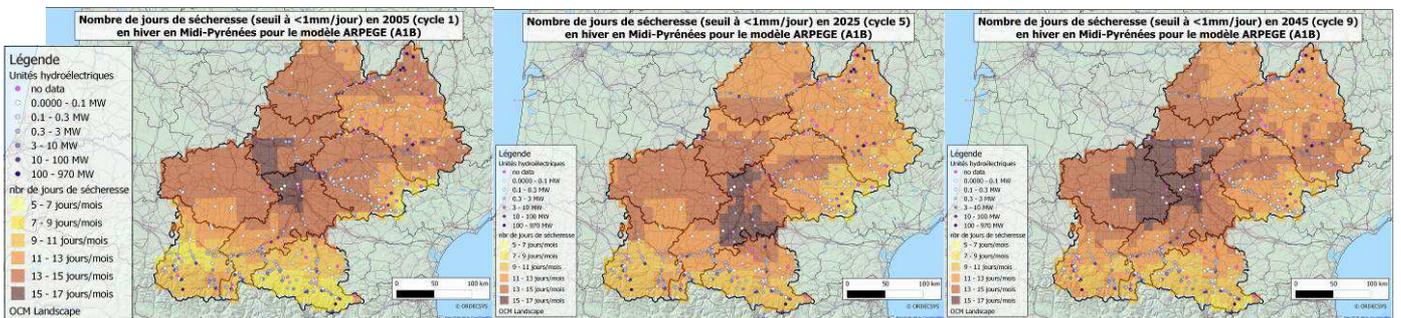


Figure 52 : Vagues de sécheresse pour le modèle ARPEGE (A1B) en hiver pour le cycle 1 (2005), 5 (2025) et 9 (2045). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

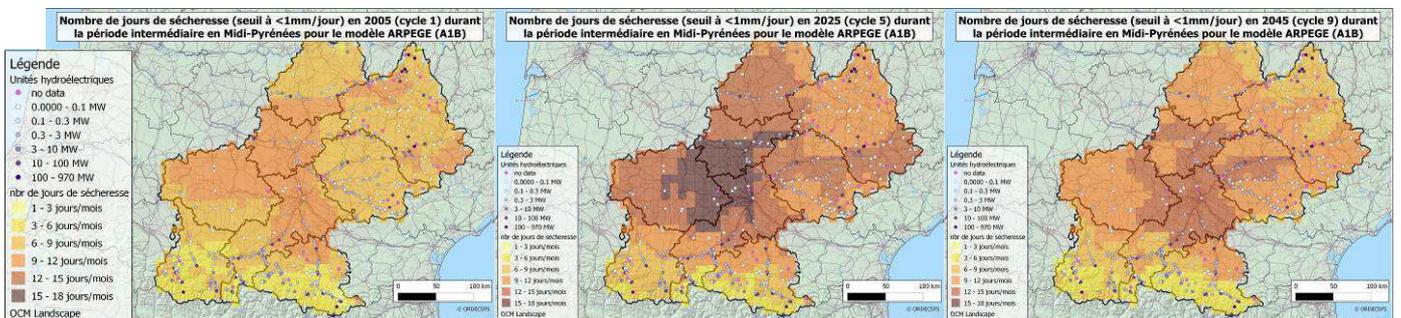


Figure 53 : Vagues de sécheresse pour le modèle ARPEGE (A1B) durant la période intermédiaire pour le cycle 1 (2005), 5 (2025) et 9 (2045). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

En observant ces cartes [Fig.51-53], il ne semble pas y avoir de tendance particulière. De manière générale, les vagues de sécheresse semblent suivre la tendance des précipitations de manière linéaire. L'agrégation des précipitations par département ou bassin versant mène à de la perte d'information comme dit avant, mais ceci est plus visible ici entre la figure 48 (cycle 9) et 51 (cycle 9), où les vagues montrent une forte sécheresse au nord de la Garonne [Fig.51], alors que l'agrégation par bassin versant montre des précipitations faibles au sud de la Garonne [Fig.48]. Il est donc pertinent de représenter les sécheresses sous forme d'interpolation plutôt que sous forme d'agrégation, car les sécheresses (surtout agricoles) ont une influence très localisée. Les précipitations peuvent être plus agrégées, car en étudiant le débit d'un cours d'eau, il faut voir ce qui se passe dans l'ensemble d'un bassin versant pour comprendre ce qu'il va se passer en aval.

4.2.4. Vents

Les vents [Fig.54] n'ont pas été introduits dans l'analyse du modèle ETEM-AR. Ce qui aurait été intéressant est la fréquence des vents violents pour estimer l'impact sur les installations du réseau de transport électrique et sur la disponibilité des installations éoliennes. Mais ne disposant que de données de vitesses de vent moyen, il n'est pas possible de calculer de manière précise le potentiel des vents violents à l'avenir.

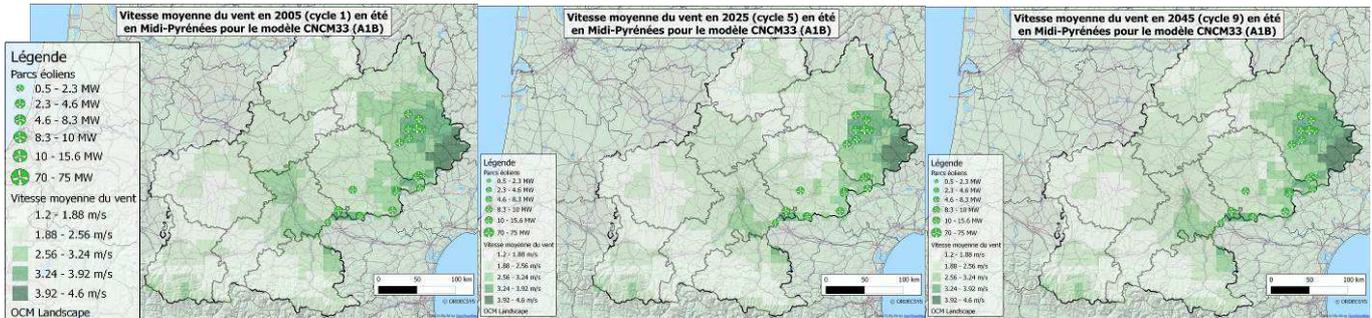


Figure 54 : Cartes de la vitesse moyenne des vents. Ces données n'ont pas été utilisées dans le cadre du projet. Ces cartes sont le résultat du modèle CNCM33 pour le cycle 1 (2005), 5 (2025) et 9 (2045). (Source : cartes créées à partir des données du CERFACS 2010)

Ces cartes peuvent tout de même appuyer la simulation faite par le modèle ETEM-AR d'un fort développement éolien dans le département de l'Aveyron, là où le vent semble souffler assez fortement.

5. ANALYSE ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, ce sont plutôt les données géomatiques qui vont être discutées et non les résultats du modèle énergétique ETEM-AR³¹ [cf. LABRIET et al. 2012]. Les possibilités, limites de certains logiciels vont être également discutées.

5.1. Données géomatiques

Un gros problème est survenu lors de la création des cartes de manière générale, c'est de pouvoir créer une symbologie compatible. Le but étant d'observer une différence spatiale des valeurs entre les différents départements, par exemple, et une différence temporelle, étant donné que le modèle ETEM-AR donne des perspectives sur 45 ans. Une grande amplitude entre les valeurs au niveau spatial et une petite différence dans l'évolution des valeurs au niveau temporelle pose des problèmes en voulant conserver la même symbologie tout au long des 45 ans, tout en gardant un nombre de classes raisonnable. Une alternative à ce problème a été développée pour les extraits du modèle ETEM-AR. Il s'agit de représenter sous forme de cartes les valeurs absolues pour 3 périodes uniquement, par exemple, sans se préoccuper des variations temporelles dans la création de la symbologie. La variation

³¹ Pour plus d'informations sur les résultats du modèle ETEM-AR, veuillez consulter le site Internet : <http://etem-ar.ordcsys.com/> ou lire le rapport du projet [LABRIET et al. 2012].

temporelle est ainsi représentée textuellement à travers des pourcentages d'évolution par rapport à une année de référence [Fig.24]. Cette alternative n'a pas été appliquée pour les données climatiques en raison des contraintes de durée du stage.

L'analyse et la création de données spatiales pour les degrés-jours aurait pu être faite de manière plus ponctuelle. Une pondération des degrés-jours avec la population aurait pu être faite plus précisément en utilisant le raster de répartition de la population [Fig.17] et en pondérant cellule par cellule l'information des degrés-jours avec celle de la population. Le problème étant que les prévisions de population n'allant que jusqu'à 2015, il était impossible de pouvoir couvrir toute la période de simulation du modèle ETEM-AR (jusqu'en 2049). Il était donc préférable d'utiliser une méthode plus grossière, mais qui a le mérite d'être homogène pour les 40 années de simulation du modèle.

Pour en venir à l'indicateur de sécheresse, l'utilisation de la sécheresse météorologique pour créer cet indicateur n'est pas la plus adaptée pour parler de débit de rivière et de besoins agricoles. Pour définir correctement l'impact sur ces deux aspects, il faudrait utiliser la sécheresse hydrologique et agricole. Ces deux sécheresses sont beaucoup plus difficiles à calculer et un modèle numérique hydraulique, prenant en compte plusieurs paramètres, comme la texture du sol, serait plus approprié pour répondre à cette question. Un modèle idéal, utilisant également les SIG est le modèle *SWAT (Soil and Water Assessment Tool)*³². Ainsi, les débits futurs des rivières pourraient être estimés avec plus de précision, ce qui permettrait d'évaluer de manière plus précise les impacts sur l'hydroélectricité. Quant à la sécheresse agricole, elle permettrait d'évaluer la future demande d'énergie pour l'irrigation et les conflits d'usage de l'eau entre agriculture et énergie.

Il a pu être constaté durant ce travail que les outils SIG permettent d'agrèger très simplement l'information géographique, comme les données climatiques agrégées par département ou par bassin versant. Il permet également très facilement d'analyser et de calculer une nouvelle information spatialement hétérogène comme l'exemple de l'évolution de la population en figure 20 et 21, ou calculer une surface de bassin versant afin d'en déduire le débit général en sortie selon les précipitations. Bien entendu, ce sont des analyses simples, mais il serait possible, de manière plus réduite, d'évaluer le potentiel photovoltaïque en connaissant l'inclinaison et l'orientation des toitures des habitations (information qu'il n'est pas évidente à récolter suivant les régions).

5.2. Problèmes rencontrés

Afin de faciliter et d'accélérer la publication de cartes sur Internet, l'application *QGIS Cloud* a été utilisée. Durant l'utilisation de cette application, elle était toujours en développement ce qui a nécessité un suivi constant afin de s'adapter aux nouvelles mises à jour. Cette application impose beaucoup de limites, notamment comme dans l'impossibilité de publier des rasters (très probablement pour limiter l'utilisation de la mémoire du serveur de *QGIS Cloud*). Il est également impossible pour le moment, du moins avec la version gratuite de l'application, d'ajouter des métadonnées lors de la publication. De nombreux problèmes de géométrie apparaissent lors du chargement des couches vectorielles sur le serveur. De plus, régulièrement, des couches avec la symbologie en format *SVG* disparaissent des projets déjà publiés, très probablement lors de la mise à jour de l'application. Cependant, il peut être

³² Pour plus d'informations sur cet outil : <http://swat.tamu.edu/>

relevé la possibilité de pouvoir publier des projets avec sa propre symbologie créée en format *SVG* et l'interface utilisateur est très simplifiée. Elle l'est peut-être trop et ne laisse que peu de flexibilité quant à l'utilisation de cette application, si ce n'est peut-être à travers le code source Python qui demande des connaissances plus avancées.

Après bien des déboires, *MapServer* a pu finalement être installé sur le serveur d'ORDECSYS. Cependant, ceci étant arrivé en fin de période de stage, cet outil n'a pas pu être exploré plus loin. Ceci constitue une alternative très intéressante à *GeoServer* étant donné qu'il permet d'implémenter des *WMS* et configure également directement des fichiers *SLD* pour la symbologie. Il est donc semblable à *GeoServer*, mais permet de créer directement des fichiers *SLD* ce qui rend plus facile la publication des cartes sur le Web à travers un *WMS Client* tel qu'*Open Layers*³³ ou *Map Bander*³⁴ [ZEDER 2009].

Le logiciel QGIS ne semble pas encore avoir d'extension très développée pour effectuer des interpolations de qualité telles que du Krigeage. Une alternative est de passer par *GRASS*, ce qui demande beaucoup plus de temps, et les outils de Krigeage ne sont pas aussi développés que ceux créés pour le logiciel *ArcGIS*.

5.2. Perspectives et améliorations

Après avoir pris du recul sur le travail effectué dans le cadre de ce stage, certaines améliorations potentielles apparaissent ainsi que les perspectives futures pouvant améliorer la qualité de ce travail.

Une première amélioration qui peut être apportée est la création de cartes interpolées correctement en passant par le logiciel *GRASS*. Ceci demanderait un certain temps de travail étant donné l'inexistence de *Model Builder* fonctionnant correctement sur *QGIS*, mais le résultat serait de meilleure qualité.

Une seconde amélioration serait de créer également pour les cartes climatiques une symbologie représentant l'évolution des situations durant les 45 ans sous forme d'étiquetage donnant le pourcentage d'évolution par rapport à une année de référence [exemple Fig.34]. Il serait également intéressant de travailler plus sur les dégradés de couleurs pour faire ressortir de manière plus intuitive l'information. Par exemple, choisir des couleurs opposées pour désigner une augmentation ou une diminution [Fig.55]. La classification mérite également d'être travaillée afin de diminuer le nombre de classes, ce qui rendrait la légende plus facilement interprétable.

Les perspectives futures de ce travail sont en premier lieu de développer un guichet cartographique propre à ORDECSYS à travers des applications telles que *QGIS MapServer*³⁵ ou *GeoServer*³⁶. Ceci offrirait la possibilité de pouvoir publier directement l'information stockée sur le serveur de la société ORDECSYS et de pouvoir personnaliser l'interface client

³³ Pour plus d'informations sur Open Layers : <http://openlayers.org/>

³⁴ Pour plus d'informations sur Map Bander : http://www.mapbender.org/Mapbender_Wiki

³⁵ Site Internet de QGIS MapServer : http://karlinapp.ethz.ch/qgis_wms/index.html

³⁶ Site Internet de GeoServer : <http://geoserver.org/display/GEOS/Welcome>

du guichet cartographique lors de la publication. Ceci demande cependant quelques développements en *JavaScript*.

Il serait également plus ordonné d'organiser les différentes couches de données dans des bases de données *PostGIS*. Ces bases de données permettent de stocker des données spatialisées et d'effectuer quelques opérations de requêtes *SQL* spatiales telles que des *buffers*.

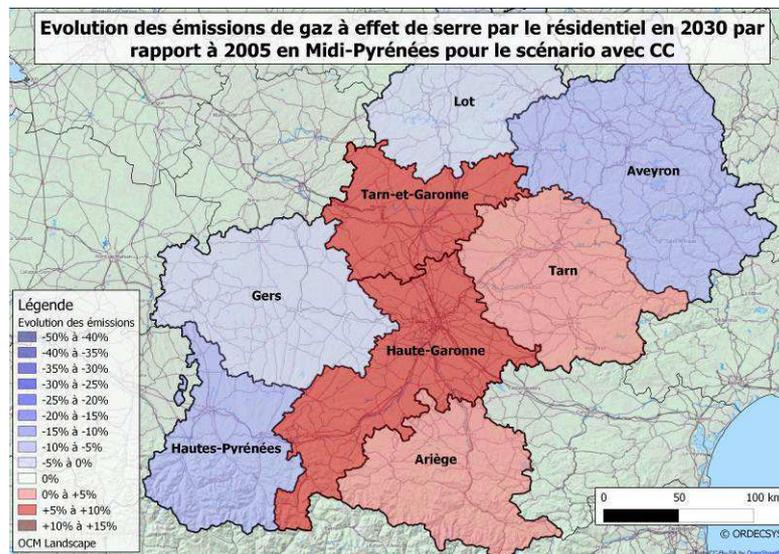


Figure 55 : Une symbologie plus adaptée permet une visualisation plus aisée.

Finalement, une perspective future concernant le traitement des données climatiques serait de calibrer toutes les données à l'année de référence du modèle d'optimisation énergétique ETEM-AR afin d'avoir une meilleure vision de l'évolution des différents modèles climatiques utilisés. Pour tous les modèles climatiques utilisés, l'année de calibrage remonte avant 2005, ce qui laisse le temps aux modèles de s'éloigner les uns des autres [PAGE 2012]. Ainsi, la simulation du modèle d'optimisation énergétique débute avec des données climatiques différentes. Ceci ne pose pas de problèmes conceptuels dans le cadre de ce projet, car seule l'évolution des variables est utilisée et non les valeurs absolues. L'évolution est indicée et c'est cela qui est pris en compte pour évaluer les impacts et les contraintes du changement climatique sur le système énergétique.

5.3. Autre

Dans le cadre de ce stage, d'autres tâches ont été accomplies en dehors de l'utilisation des systèmes d'information géographique dont la principale et l'entretien du site Internet du projet en question. Ce sont principalement des pages concernant les systèmes d'information géographique qui ont été écrites et développées. Des liens permettent d'accéder au guichet cartographique et une base de données contenant toutes les cartes créées a été développée en collaboration avec un partenaire d'ORDECSYS. Cette base de données est actuellement toujours en construction.

6. CONCLUSION

Dans le cadre de ce stage, de nombreuses tâches ont été accomplies, dont la participation à des conférences et réunions, l'acquisition de données tant sous forme de couches de données géographiques que sous forme de données climatologiques, l'entretien et le développement du site Internet du projet et le plus important, l'utilisation de l'outil SIG QGIS dans l'analyse de données et la création de cartes. L'outil SIG a été utilisé pour représenter de l'information sous forme de cartes, mais également pour créer de l'information à partir de données brutes. Cependant, l'utilisation de cet outil est restée assez superficielle dans ce dernier cas. L'outil a surtout été utilisé pour organiser, arranger à travers des découpages et des agrégations. Quelques calculs sur des rasters et des vecteurs ont été effectués au moyen de la calculatrice de raster et de la calculatrice d'édition pour vecteurs. Les données climatiques ont été en partie analysées et traitées tantôt sous le format *NetCDF*, tantôt sous *MS Excel*, tantôt sous *QGIS*. Les modèles climatiques donnant une grille de points en sortie, les outils des systèmes d'information géographique sont tout-à-fait indiqués pour traiter cette information, et de plus, il est possible par la même occasion de présenter les résultats sous une forme très parlante à travers des cartes. Ainsi, des indicateurs climatiques ont pu être facilement créés pour être intégrés au modèle ETEM-AR et ils ont pu être facilement représentés graphiquement et sous forme de cartes. Les résultats sous forme de cartes permettent de représenter géographiquement les différentes contraintes climatiques ainsi que différents paramètres liés à l'énergie comme la consommation, la demande, la production et bien d'autres. Développer cette représentation de l'hétérogénéité spatiale permet de mieux prendre en compte l'aspect de décentralisation de la production en raison de l'implantation des énergies renouvelables et d'avoir une meilleure vision des problèmes de territorialité liés à l'énergie, comme les limites d'émissions de certains gaz à effet de serre ou particules fines restreintes à certaines zones. Dans ce travail, la représentation symbolique de l'information mérite encore d'être améliorée afin d'avoir une représentation spatio-temporelle facilement interprétable sur les cartes.

A l'avenir, l'outil SIG pourrait être utilisé afin de créer plus d'informations géographiques utilisables par le modèle ETEM-AR telles que les potentiels photovoltaïques des toitures d'une ville, d'une commune voire de tout un pays, ou des zones potentiels de constructions de centrales thermiques en se basant sur plusieurs critères restrictifs. Le potentiel de cet outil dans l'analyse des systèmes énergétiques est très grand et mérite d'être approfondi afin d'offrir à ORDECSYS une compétence supplémentaire dans l'analyse des systèmes énergétiques.

L'optimum de l'utilisation des SIG est la publication de cartes interactives sur le Web à travers des clients *WMS*. Ces applications permettent aux utilisateurs d'accéder à un contenu préalablement défini par l'auteur, de manière interactive et riche en informations que simplement des images. Dans le cadre de ce projet, afin d'accélérer la publication de telles cartes, l'application *QGIS Cloud* a été utilisée avec succès dans un premier temps, mais celle-ci reste tout de même limitée et encore peu stable. Ce point pourra être fortement amélioré par la suite en passant par l'application *GeoServer* ou *MapServer* afin de créer des fichiers *WMS* et de les publier à travers un client *WMS* en libre accès. Cet aspect nécessite cependant quelques développements en *JavaScript* et *HTML*.

7. BIBLIOGRAPHIE

Introduction :

METEOFRANCE (2012) : Climat. *Site Internet*. (Consulté le 18.09.2012) :
<http://climat.meteofrance.com>

REGION MIDI-PYRENEES (2012) : Climat. *Site Internet*. (Consulté le 18.09.2012) :
<http://www.midipyrenees.fr/Climat>

Présentation des données :

ECMWF (2012) : ENSEMBLES. *Site web du projet*. (Consulté le 18.09.2012) :
<http://www.ensembles-eu.org>

HAWKINS E. et SUTTON R. (2009) : The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90 (8), 1095-1107 (2009), Washington, USA. (Consulté le 22.08.2012):
<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009BAMS2607.1>

IPCC (2007) : Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.) IPCC*, Genève, Suisse, 104 pp.

IPCC (2000) : Scénarios d'émissions. Résumé à l'intention des décideurs. Rapport spécial du Groupe de travail II du GIEC, 27 pp. (Consulté le 19.09.2012) :
<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-fr.pdf>

LAVAUD J. (2009) : L'impact du changement climatique en Midi-Pyrénées, Exemple de la chaîne des Pyrénées. *ARPE*, Toulouse, France, 78 pp.

PEINGS Y., JAMOUS M., PLANTON S., LE TREUT H. et JOUZEL J. (2012, 2^{ème} Ed.) : Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM. *Institut Pierre Simon Laplace et MétéoFrance*, Paris, France, 140 pp.

Méthodologie et marche à suivre :

BLÁZQUEZ L., BOOGEN N. et FILIPPINI M. (2012) : Residential electricity demand for Spain : new empirical evidence using aggregated data. Center for Energy Policy and Economics, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), CPE Working paper n°82, Zurich, Suisse, 25 pp. (Consulté le 24.09.2012) : <http://www.cepe.ethz.ch/publications/workingPapers/>

CERFACS (2010) : Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^{ème} siècle : les scénarii SCRATCH2010 [fichier NetCDF], Toulouse, France. (Reçu le 05.07.2012)

CERTU (2008a) : Géoréférencement et RGF93. Théorie et concepts – Fiche T2 : RGF93 et Lambert 93. Octobre 2008, Lyon, France, 6 pp. (Consulté le 20.09.2012) : http://www.certu.fr/fr/Information_g%C3%A9ographique-n32/G%C3%A9or%C3%A9f%C3%A9rencement_et_RGF93-n795/IMG/pdf/RGF93_theorie_et_concept_T2.pdf

CERTU (2008b) : Géoréférencement et RGF93. Théorie et concepts – Fiche T3 : Les projections coniques conformes 9 zones. Décembre 2008, Lyon, France, 5 pp. (Consulté le 20.09.2012) : http://www.certu.fr/fr/Information_g%C3%A9ographique-n32/G%C3%A9or%C3%A9f%C3%A9rencement_et_RGF93-n795/IMG/pdf/RGF93_theorie_et_concept_T3.pdf

CIESIN (Center for International Earth Science Information Network)/Columbia University, FAO (United Nations Food and Agriculture Programme) and CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) (2005) : Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3): Population Count Grid, Future Estimates. *Palisades*, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). (Téléchargé le 15.08.2012) : <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v3-population-count-future-estimates>

LAVAUD J. (2012) : Entretien du 28.06.2012, *ARPE*, Toulouse, France.

PAGE C. (2012) : Entretien du 27.06.2012, *CERFACS*, Toulouse, France.

SCHULZWEIDA U. et KORNBLUEH L. (2009) : CDO User's Guide – Climate Data Operators version 1.4.1. *Institut de Météorologie Max Planck*, Hambourg, Allemagne, 164 pp. (Consulté le 24.09.2012) : <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/software/cdo/cdo.pdf>

UNIDATA (2012) : NetCDF. Site Internet officiel. (Consulté le 24.09.2012) : <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>

Résultats :

CERFACS (2010) : Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^{ème} siècle : les scénarii SCRATCH2010 [fichier NetCDF], Toulouse, France. (Reçu le 05.07.2012)

CIESIN (Center for International Earth Science Information Network)/Columbia University, FAO (United Nations Food and Agriculture Programme) and CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) (2005) : Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3): Population Count Grid, Future Estimates. *Palisades*, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). (Téléchargé le 15.08.2012) : <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v3-population-count-future-estimates>

SRCAE (2011) : Schéma Régional Climat-Air-Energie en Midi-Pyrénées. Projet de schéma soumis à consultation (accepté en juin 2012), *Région Midi-Pyrénées et Préfet de la Région Midi-Pyrénées*, Toulouse, France, 98 pp. (Consulté le 04.10.2012) : http://www.territoires-durables.fr/upload/SRCAE/SRCAE_LeRapport.pdf

TOULOUSE METROPOLE (2011) : Toulouse métropole en chiffre 2011. *Communauté urbaine du grand Toulouse*, Toulouse, France, 150 pp. (Consulté le 02.10.2012) : http://www.toulouse.fr/municipalite/actualite/lire/-/journal_content/56_INSTANCE_3iH6/10128/8755939

Analyse et discussion :

LABRIET M., BAVONNEAU F. TAREL G. THENIE J. PILLOUD D., LOULOU R., HAURIE A. et VIAL J.-P. (2012) : ETEM-AR : Modéliser l'atténuation et l'adaptation du système énergétique dans un plan climat local. ORDECSYS, KanLo et ADEME, Genève, Suisse, 86 pp.

PAGE C. (2012) : Entretien du 27.06.2012, CERFACS, Toulouse, France.

ZEDER S. (2009) : QGIS mapserver – User manual. Version 1.0, ETH Zurich, Suisse, 71 pp. (Consulté le 04.10.2012) : <http://karlinapp.ethz.ch/qgismapservmanual.pdf>

Source des données sur la population :

INSEE (2010a) : Projection démographique Omphale 2010. (Consulté le 07.10.2012) : <http://www.insee.fr/fr/publications-et-services/sommaire.asp?codesage=IMET124>

INSEE (2010b) : Projection de la population 2007-2060 pour la France métropolitaine. (Consulté le 07.10.2012) : http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?ref_id=ir-projpop0760&page=irweb/projpop0760/dd/projpop0760_principaux.htm

Source des données SIG :

CERFACS (2010) : Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^{ème} siècle : les scénarii SCRATCH2010 [fichier NetCDF], Toulouse, France. (Reçu le 05.07.2012)

CIESIN (Center for International Earth Science Information Network)/Columbia University, FAO (United Nations Food and Agriculture Programme) and CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) (2005) : Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3): Population Count Grid, Future Estimates. *Palisades*, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). (Téléchargé le 15.08.2012) : <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v3-population-count-future-estimates>

8. ANNEXES

Annexe 1 : Programme sous MS-DOS afin d'automatiser la création de vagues de chaleur.

```
rem Grouper par saison pour les HDD
cd /
E:
rem aller dans les différents répertoires des modèles
set a=1
:boucle1
  cd /
  cd Damien/Documents/StageORDECSYS/Donnees/France/Adaptation/nouveau/donnees_traitees
  if %a%==1 (set dossier=CNCM33_1)
  if %a%==2 (set dossier=DMIEH5C_1)
  if %a%==3 (set dossier=HADGEM2_1)
  if %a%==4 (set dossier=IPCM4_1)
  if %a%==5 (set dossier=MPEH5C_1)
  if %a%==6 (set dossier=arpege_a1b)
  if %a%==7 (set dossier=arpege_a2)
  cd %dossier%
  rem aller dans le répertoire de tasmax
  cd tasmax
  rem Aller chercher le fichier TXnorm_seuil.nc
  copy
  "E:\Damien\Documents\StageORDECSYS\Donnees\France\Adaptation\nouveau\donnees_traitees
  \TXnorm_seuil30.nc"
  rem Calcul des vagues de chaleur
  set cycle=1
  rem Extraire la saison d'été du fichier TXnorm
  cdo selmon,6,7,8,9 TXnorm_seuil30.nc TXnorm_ETE_seuil30.nc
  :boucle2
    rem Extraire la saison d'été des fichiers tasmax_nonMG
    cdo selmon,6,7,8,9 tasmax_nonMG_c%cycle%.nc tasmax_nonMG_ETE_c%cycle%.nc
    rem enlever la variable Altitude des fichiers NetCDF
    cdo selname,tasmax tasmax_nonMG_ETE_c%cycle%.nc
    tasmax_nonMG_ETE_c%cycle%_sansALT.nc
    rem Calculer les jours des vagues de chaleur pour les températures supérieures à 30°C durant
    au moins 6 jours.
    cdo eca_hwdi,6,0 tasmax_nonMG_ETE_c%cycle%_sansALT.nc TXnorm_ETE_seuil30.nc
    wave_ETE_c%cycle%_30D.nc
    if %cycle%==9 goto fin2
    set /a cycle = cycle + 1
    goto boucle2
  :fin2
  if %a%==7 goto fin1
  set /a a = a + 1
  goto boucle1
:fin1
```

Annexe 2 : Programme en VBA afin d'automatiser le formatage et le calcul des données de degrés-jours en hiver sous MS Excel pour les exporter dans QGIS sous forme de fichier CSV.

Sub CreatHDDHIVER()

' CreatHDD Macro

' Créer une feuille avec des degrés-jours de chauffage en hiver et températures moyennes.

UNIQUEMENT POUR LES MOIS D'HIVER

' Déclarer les variables

Dim i As Double

Dim Longit As Integer

Dim j As Double

Dim c As Integer

Dim MoyenneHDD As Single

Dim SommeHDD As Single

Dim SommeHDDlist() As Single

Dim Moyennetas2 As Single

Dim Moyennetas As Single

Dim Moyennetaslist() As Single

Dim cycle As String

Dim model As String

Dim k As Integer

' Boîte de dialogue avec l'utilisateur pour qu'il introduise le nom du modèle climatique

Do

model = InputBox("Sur quel modèle voulez-vous travailler? (attention aux majuscules!)", "Choix du modèle", "ARPEGEA2")

If model <> "" Then

Exit Do

Else: MsgBox ("Veuillez entrer un nom svp!")

End If

Loop While 1 = 1

' Boîte de dialogue avec l'utilisateur pour qu'il introduise le numéro du cycle (année)

Do

cycle = InputBox("Sur quel cycle voulez-vous travailler?", "Choix du cycle", "c")

If cycle <> "" Then

Exit Do

Else: MsgBox ("Veuillez entrer un nom svp!")

End If

Loop While 1 = 1

' Remplacer les valeurs manquantes -9999 par des cases vides

*Worksheets("tas").Cells.Replace What:="-9999", Replacement:="", LookAt:=xlPart, _
SearchOrder:=xlByRows, MatchCase:=False, SearchFormat:=False, _
ReplaceFormat:=False*

' Créer une fiche (onglet) pour mettre les sommes et moyennes des HDD

Sheets.Add After:=Sheets(Sheets.Count)

Sheets(Sheets.Count).Name = model & "_HDD_HIVER_" & cycle

```

' Créer une fiche (onglet pour mettre les sommes et moyennes des tas (température)
Sheets.Add After:=Sheets(Sheets.Count)
Sheets(Sheets.Count).Name = model & "_tas_HIVER_" & cycle

' Calculer l'HDD et CDD et le mettre dans les feuilles HDD et CDD
' La grille de données (raster) est composée de 56 cellules en latitude et 50 cellules en longitude

k = 2

' Il faut premièrement parcourir chaque cellule
For i = 1 To 56
  For Longit = 1 To 50
    ' Redimensionner les listes
    ReDim SommeHDDlist(4)
    ReDim Moyennetaslist(4)
    ' Pour faire la moyenne (température) et la somme (HDD) sur les 5 ans
    For j = 0 To 4
      SommeHDD = 0
      Moyennetas = 0
      ' Pour faire la somme des 5 mois d'hiver (novembre, décembre, janvier, février, mars)
      (152 jours)
      For c = 0 To 151
        ' Mettre dans la liste Valeur toutes les valeurs qu'il faudra sommer
        SommeHDD = SommeHDD + Worksheets("HDD").Cells(i + (c * 56) + (j * 8512) + 1,
Longit + 1).Value
        ' Prendre les valeurs pour tas
        Moyennetas = Moyennetas + Worksheets("tas").Cells((i + (c * 56) + (j * 8512) + 2),
Longit + 2).Value * 0.0065789
      Next c
      ' Mettre dans la liste Somme les sommes des 5 années
      SommeHDDlist(j) = SommeHDD
      ' Il faut directement moyenner pour tas
      Moyennetaslist(j) = Moyennetas
    Next j
    'Mettre dans la variable Moyenne, la moyenne et somme des 5 années
    MoyenneHDD = Application.WorksheetFunction.Average(SommeHDDlist())
    Moyennetas2 = Application.WorksheetFunction.Average(Moyennetaslist())
    ' Mettre les coordonnées dans les variables
    Latitude = Worksheets("lat").Cells(i + 2, Longit + 1).Value
    Longitude = Worksheets("lon").Cells(i + 2, Longit + 1).Value
    ' Affecter la valeur moyennée dans les feuilles prévues à cet effet
    Worksheets(model & "_HDD_HIVER_" & cycle).Cells(k, 1).Value = Latitude
    Worksheets(model & "_HDD_HIVER_" & cycle).Cells(k, 2).Value = Longitude
    Worksheets(model & "_HDD_HIVER_" & cycle).Cells(k, 3).Value = MoyenneHDD
    Worksheets(model & "_tas_HIVER_" & cycle).Cells(k, 1).Value = Latitude
    Worksheets(model & "_tas_HIVER_" & cycle).Cells(k, 2).Value = Longitude
    Worksheets(model & "_tas_HIVER_" & cycle).Cells(k, 3).Value = Moyennetas2
    k = k + 1
  Next Longit
Next i

' Effacer les valeurs manquantes calculées

```

```

k = 2
For i = 1 To 56
  For Longit = 1 To 50
    If (Worksheets(model & "_HDD_HIVER_" & cycle).Cells(k, 3).Value) < 1 Then
      Worksheets(model & "_HDD_HIVER_" & cycle).Cells(k, 3).Value = 0
    ElseIf (Worksheets(model & "_HDD_HIVER_" & cycle).Cells(k, 3).Value) > 40000 Then
      Worksheets(model & "_HDD_HIVER_" & cycle).Cells(k, 3).Value = 0
    End If
    If (Worksheets(model & "_tas_HIVER_" & cycle).Cells(k, 3).Value) < 0 Then
      Worksheets(model & "_tas_HIVER_" & cycle).Cells(k, 3).Value = 0
    ElseIf (Worksheets(model & "_tas_HIVER_" & cycle).Cells(k, 3).Value) > 40000 Then
      Worksheets(model & "_tas_HIVER_" & cycle).Cells(k, 3).Value = 0
    End If
    k = k + 1
  Next Longit
Next i

' Définir les noms des variables
Worksheets(model & "_HDD_HIVER_" & cycle).Cells(1, 1).Value = "Lat"
Worksheets(model & "_HDD_HIVER_" & cycle).Cells(1, 2).Value = "Long"
Worksheets(model & "_HDD_HIVER_" & cycle).Cells(1, 3).Value = "HDD"

Worksheets(model & "_tas_HIVER_" & cycle).Cells(1, 1).Value = "Lat"
Worksheets(model & "_tas_HIVER_" & cycle).Cells(1, 2).Value = "Long"
Worksheets(model & "_tas_HIVER_" & cycle).Cells(1, 3).Value = "tas"

End Sub

```