

La Méditerranée est un « hot-spot » du changement climatique et ses conséquences sont déjà observées sur différents écosystèmes tels que les littoraux, les massifs forestiers, etc. et en villes méditerranéennes. Ces dernières, par leurs configurations spatiales et géographiques - proximité du littoral, forte demande en eau, climat favorisant les sécheresses estivales et les événements météorologiques extrêmes comme les pluies intenses - et par leur croissance, sont considérées comme des milieux particulièrement vulnérables. Les conséquences des variations climatiques en Méditerranée suscitent l'intérêt scientifique dans le cadre de nombreux projets (Mistral, MC3, etc.) et cet ouvrage des Impromptus consacré au thème général « Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée » met en exergue les évolutions possibles du climat en région méditerranéenne mais également les impacts déjà observés sur le littoral et au sein des massifs forestiers. Une part conséquente de cet ouvrage est consacrée aux villes méditerranéennes afin de mettre en évidence que l'imbrication des échelles spatiales et temporelles et sa compréhension sont indispensables pour comprendre les phénomènes aux échelles urbaines. Il est intéressant et nécessaire de développer des modèles, instrumentations et mesures capables de simuler les phénomènes climatiques locaux. Ces démarches aux échelles locales urbaines peuvent être les prémices de méthodes d'adaptation à l'évolution du climat notamment à court et à moyen terme.



#03
LES IMPROMPTUS DU LPED

Editeurs scientifiques : Elodie Briche, Olivier Cantat et Pierre Carrega

A Gérard Beltrando

Homage to Gérard Beltrando

Gérard est mort trop tôt.

Ce 28 janvier il n'avait que 59 ans. Il était un méditerranéen, et pas seulement par son accent, dont le paradoxe de sa carrière est qu'après avoir fait des études de mécanique il s'est tourné vers la géographie, faisant sa thèse à Aix en Provence, sous la direction d'Annick Douguédroit. Ainsi, d'abord non-géographe il est devenu l'un des plus géographes de nous tous !

Il était un Chercheur très reconnu : je n'énumérerai pas en détail ses travaux de climatologie allant de l'échelle synoptique (Afrique tropicale) à celle de la topoclimatologie, avec en particulier les études effectuées avec ses étudiants sur le gel dans le vignoble champenois (réalisant des simulations audacieuses sur les écoulements d'air froid bloqué par un hypothétique remblai pour le TGV), sur la pollution atmosphérique en ville, sur les risques liés ou non au changement climatique, sur la vulnérabilité, etc.

Il était un Enseignant : il a formé de nombreux étudiants, dont certains jusqu'à la thèse de doctorat, et qui ont fait, font ou feront carrière à leur tour. Sa parole était écoutée dans son université Paris-Diderot, mais aussi à l'étranger, en particulier en Roumanie et en Tunisie. Ses ouvrages, comme le dictionnaire du climat (en collaboration avec L. Chemery) ou « Les climats. Processus, variabilité et risques » ont été largement répandus et renommés.

Il était un diffuseur. Par sa participation à des conférences, mais aussi l'organisation de colloques, ses articles, ses ouvrages, ses contrats, comme par exemple avec Egide (Tunisie, Roumanie) ou le Comité interprofessionnel des vins de Champagne, il a fait connaître ses idées, et contribué à montrer l'intérêt de la climatologie appliquée.

Il était un responsable : très impliqué aussi dans les structures administratives, et dans la gestion qu'il n'appréciait pas outre mesure mais qu'il savait obligatoire, il a sacrifié beaucoup de temps et d'énergie dans son université, son Ecole Doctorale, le Master « Géographie et –sciences des territoires », dans l'AIC (Association Internationale de Climatologie) dont il a été trésorier de 2006 à 2012, et il venait de devenir Président de la commission « climat et société » à laquelle il m'avait succédé en 2013.

Il était un engagé. Bourreau de travail (regardez l'heure à laquelle il envoyait certains e-mails), il en a probablement trop fait... Clairvoyant en terme de stratégie et de vision à long terme, il s'impliquait pour ses étudiants dont le sort le préoccupait, et qu'il poussait à percer et à se faire connaître.

Même s'il avait pris récemment quelque distance avec l'activité syndicale, cette dernière l'a durablement mobilisé par souci des autres et non par carriérisme.

Il était enfin un Homme. Exigeant pour lui comme pour les autres, auxquels il s'intéressait sincèrement, parfois jusqu'au dévouement. Il était un homme de confiance, courageux, qui ne se plaignait jamais malgré ses maladies et prenait la vie avec philosophie et une certaine résignation : « il faut bien vivre ! » me répétait-il. Ce qui ne l'empêchait pas d'avoir le sens de l'humour, d'être aimable et même drôle.

C'était un Ami.

Pierre CARREGA

Les impromptus du LPED

Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée

Editeurs scientifiques

Elodie Briche, Olivier Cantat et Pierre Carrega

Éléments de catalogage

Briche E., Cantat O., Carrega P. 2017

Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée

Les Impromptus du LPED n°3

Laboratoire Population-Environnement-Développement,

UMR 151 (AMU - IRD), Marseille, 161 p

ISBN 979-10-96763-04-7

EAN 9791096763047

Creative Commons - BY - NC - SA

www.lped.fr

Réalisation graphique

Laëtitia Cordier et Amélie Salmon

Illustration de couverture

Santorin de Granick

Comité d'organisation des Journées de Climatologie 2016

Co-organisé par le CNFG (Comité National Français de Géographie – Commission « Climat et Société ») et MC3 (Mediterranean Cities and Climate Change, programme A* MIDEX n° ANR-11-IDEX-0001-02)

Elodie Briche (MC3), Olivier Cantat (CNFG), Jérémy Garniaux (MC3), Federica Gatta (MC3), Hervé Levite (CMI), Hubert Mazurek (MC3), Debra Pereira (MC3), Amélie Salmon (LPED)

Comité scientifique des Journées de Climatologie 2016

Gérard Beltrando, Elodie Briche, Olivier Cantat et Pierre Carrega

Editeurs scientifiques

Elodie Briche, Olivier Cantat et Pierre Carrega

Révision des textes

Pierre Carrega et Olivier Cantat

Préface ————— 14

16 **Changement climatique en Méditerranée**

Repères démographiques et présentation climatique actuelle et future pour le monde méditerranéen
par Olivier Cantat et Elodie Briche

Le concept de «Time of emergence» appliqué aux températures maximales d'été sur le bassin méditerranéen
par Albin Ullmann

48 **Impact du changement climatique**

Evaluation de la sensibilité littorale à l'érosion en France méditerranéenne dans un contexte de changement climatique
par Asimina Mavromatidi et Elodie Briche

Rôle des variables climatiques dans une approche de modélisation de l'impact du changement climatique sur la distribution de trois espèces végétales dans le Mercantour (Alpes franco-italiennes)
par Matthieu Vignal et Julien Andrieu

Aléas climatiques et développement économique dans les villages du Massif Central méditerranéen
par Fabrice Grégoire

108 **Villes méditerranéennes et changement climatique**

Les climats urbains et le changement climatique
par Pierre Carrega

Analyse morphologique d'une ville méditerranéenne à partir des bases de données urbaines et des outils SIG pour préparer la cartographie et la mesure des températures en période d'ilots de chaleur urbain
par Sébastien Bridier

Aspects topoclimatiques de Bizerte (Nord Est de la Tunisie): îlot de chaleur et brises thermiques
par Salem Daech et Sami Charfi

PREFACE

Les journées de la Commission « Climat et Société » du Comité National Français de Géographie offrent chaque année une opportunité aux doctorants mais également aux chercheurs plus confirmés de présenter leurs travaux de recherche en climatologie. Ces journées 2016 ont été l'occasion d'un partenariat avec le réseau MC3 « *Mediterranean Cities and Climate Change* » sur le thème : « Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée » ; elles se sont déroulées à la Villa Valmer à Marseille, prêtée par la ville de Marseille, grâce à la bienveillance d'Hervé Levite (CMI-Banque Mondiale).

Ces « Journées » ont été l'occasion d'échanges et de réflexions avec des exposés « lourds » sur quelques sous thèmes majeurs, dans le but de faire une mise au point assez exhaustive sur le sujet et quelques interventions plus « légères mais « pointues » par de jeunes collègues ou doctorants, portant sur leurs travaux et position de thèse. Cette formule constitue ainsi un lieu de rencontre et une opportunité de diffusion de leurs idées et travaux en climatologie.

Cette année, trois sous-thèmes ont été développés : **Prospective du Changement climatique et adaptation en Méditerranée, Impacts environnementaux et sociétaux du changement climatique en Méditerranée et Villes méditerranéennes et changement climatique** et des articles en relation avec ces thèmes alimentent ce numéro des Impromptus.

La journée dédiée au sous-thème Villes méditerranéennes et changement climatique a été l'occasion de réaliser une table-ronde organisée avec les partenaires du programme de recherche MC3 qui rassemble des organismes du pourtour méditerranéen

- institutions de recherche, observatoires, structures opérationnelles... -, dédiés d'une part à la conception, la planification ou la gestion urbaine, d'autre part à la mesure et à l'étude du climat et de ses variations, spécifiquement en milieu urbain. Les partenaires méditerranéens et spécialistes du climat ainsi que les géographes climatologues, membres de la commission « Climat et Société » ont pu nourrir la réflexion concernant le changement climatique en villes méditerranéennes.

Cet ouvrage rassemble neuf contributions issues de ces journées et permettent de mettre en avant les principales problématiques liées à la variabilité et au changement climatiques et leurs conséquences en Méditerranée.

Les deux premières contributions donnent un aperçu détaillé des évolutions possibles du climat en Méditerranée afin de donner une prospective du changement climatique en Méditerranée, le second insistant davantage sur la notion de « *time of emergence* ».

Les trois contributions suivantes évoquent les impacts possibles du changement climatique en Méditerranée. Le premier article traite d'un indice de sensibilité côtière afin de mettre en évidence les franges littorales les plus sujettes au risque d'érosion dans un contexte de changement climatique et de hausse de niveau marin. Le second montre le rôle des variables climatiques dans la distribution d'espèces végétales du Mercantour au sein d'une modélisation. Le dernier évoque les aléas climatiques dans les villages du massif central méditerranéen et leurs conséquences sur les activités économiques.

Les quatre contributions suivantes permettent de développer le thème « villes méditerranéennes et changement climatique ». Le premier article développe un panorama

des spécificités méditerranéennes et surtout du climat urbain en villes méditerranéennes. Les deux contributions suivantes traitent de la température et de l'îlot de chaleur urbain à Marseille en montrant l'importance de s'intéresser à la morphologie urbaine et aux réseaux de mesures intra-urbains. Le dernier article présente une analyse des aspects topoclimatiques de Bizerte en Tunisie à partir de différentes données et méthodologies telles que les mesures itinérantes, l'analyse d'images satellites.

Elodie Briche, Olivier Cantat et Pierre Carrega.

Repères démographiques et présentation climatique actuelle et future pour le monde méditerranéen

Olivier Cantat

Laboratoire Géophen, UMR 6554 CNRS
Université de Caen Normandie
olivier.cantat@unicaen.fr

Elodie Briche

Aix Marseille Université, IRD, LPED
3, place Victor Hugo, 13331 - Marseille Cedex 3,
France
elodie.briche@univ-amu.fr

Climat

Démographie

Variabilité

Le développement urbain est rapide et important dans les pays des façades orientale et méridionale du bassin méditerranéen. Associé à un climat présentant de longues séquences de temps calmes et clairs favorables à l'expression des facteurs géographiques locaux sur les basses couches de l'atmosphère, la climatologie urbaine devient un enjeu scientifique majeur pour les autorités. Le changement climatique est une source d'inquiétude supplémentaire car il renforce les contraintes de chaleur et de sécheresse, particulièrement dans les villes qui n'ont pas le temps d'adapter leurs équipements à cette nouvelle donne climatique.

Urban development is rapid and important in the countries of the eastern and southern frontiers of the Mediterranean basin. Associated with a climate with long sequences of calm and clear weathers favorable to the expression of local geographical factors on the lower layers of the atmosphere, urban climatology becomes a major scientific challenge for the authorities. Climate change is a source of additional concern because it reinforces the heat and drought constraints, particularly in cities that do not have the time to adapt their equipment to this new climatic situation.

Dans cet article, nous avons souhaité présenter brièvement les principaux éléments du contexte démographique et du cadre climatique qui donnent toute son originalité au domaine méditerranéen. Pour être concis, l'essentiel des informations est synthétisé sous la forme de cartes, graphiques et tableaux, accompagnés d'un commentaire synthétique. La plupart des thèmes abordés renvoie à des développements plus approfondis dans la suite de ce numéro des Impromptus.

Changement climatique en Méditerranée

I. Démographie et relations ville/climat dans le bassin méditerranéen

I.1. Contexte démographique

Durant les cinquante-six dernières années (1960-2015), la population autour du bassin méditerranéen a plus que doublé, passant de 236 à près de 497 millions d'habitants (figure 1). Cette augmentation globale s'accompagne d'une plus grande concentration dans les villes, la proportion de citadins passant de 48,9% à 67,0%. Cette croissance urbaine est particulièrement marquée dans les pays de la façade orientale (+36%) de cette mer intérieure, comparativement à sa façade méridionale (+21%) et plus encore à sa façade septentrionale (+17%).

À l'échelle des pays (tableau 1), c'est la Turquie qui compte aujourd'hui le plus de citadins (57,4 millions), devant la France (53,4), l'Italie

(41,9) et l'Espagne (37,1), peu devant l'Égypte (31,3), l'Algérie (28,1) et le Maroc (20,6). Cet instantané masque des évolutions distinctes, entre celle des pays occidentaux dont la position relative est en recul (particulièrement pour l'Italie, l'Espagne et la Grèce) et celle des pays méridionaux et orientaux en progression (notamment pour la Turquie, l'Algérie et la Syrie, avec des coefficients multiplicateurs de 6 à 8).

Une partie importante de cet accroissement de la population se concentre dans de grandes unités urbaines dont le nombre s'est multiplié au cours des dernières décennies (figure 2). En 2015, vingt-six villes dépassaient 2 millions d'habitants, dont sept excédaient 5 millions d'habitants (Milan, Alger, Madrid, Barcelone et Ankara) et deux 10 millions (Le Caire et Istanbul).

Pays	1960	Pays	2015	évol.
1 Italie	29.618	1 Turquie	57.426	x 6.5
2 France	29.025	2 France	53.447	x 1.8
3 Espagne	17.359	3 Italie	41.953	x 1.4
4 Égypte	10.288	4 Égypte	39.348	x 3.8
5 Turquie	8.817	5 Espagne	37.135	x 2.1
6 Grèce	4.666	6 Algérie	28.163	x 8.2
7 Maroc	3.575	7 Maroc	20.627	x 5.8
8 Algérie	3.449	8 Syrie	10.731	x 6.3
9 Syrie	1.699	9 Grèce	8.443	x 1.8
10 Israël	1.628	10 Israël	7.710	x 4.7
11 Tunisie	1.604	11 Tunisie	7.442	x 4.6

Tableau 1. Total de la population urbaine (en millions d'habitants) dans plusieurs pays méditerranéens en 1960 et en 2015. Source : Banque Mondiale. <https://donnees.banquemondiale.org>

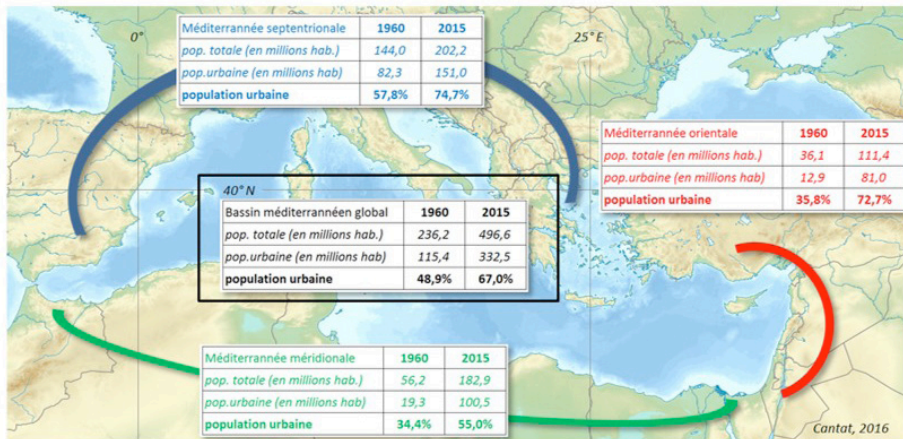


Figure 1. L'évolution de la population totale et urbaine dans le Bassin méditerranéen entre 1960 et 2015. Source : Banque Mondiale. <https://donnees.banquemondiale.org>

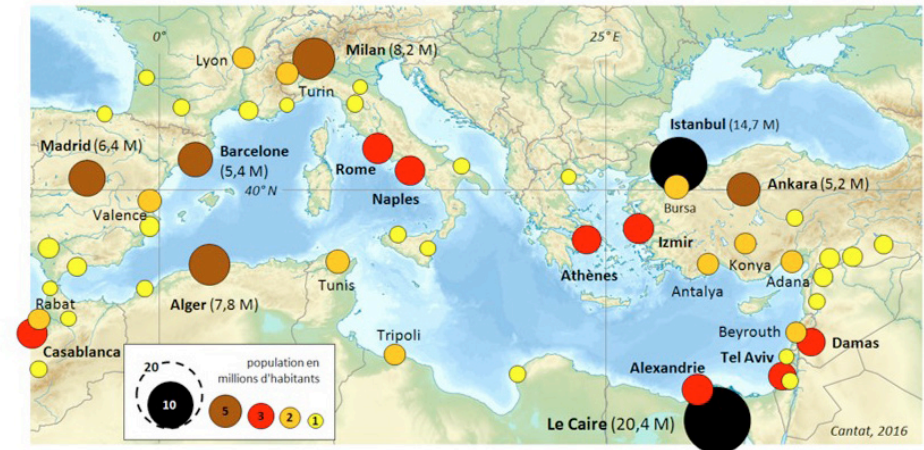


Figure 2. Aires urbaines supérieures à 1 million d'habitants dans le Bassin méditerranéen en 2015. Sources : PopulationData.net

II. Le contexte climatique actuel du bassin méditerranéen

I.2. Relations ville/climat

Outre les nombreux problèmes humains inhérents au développement rapide des villes, ce constat démographique explique aussi l'intérêt croissant que portent les pays du monde méditerranéen pour les études de climatologie urbaine. C'est ici d'autant plus prégnant que les facteurs de prédispositions aux influences de l'urbanisation sur le climat de la ville sont forts en raison de la fréquence élevée des temps clairs et calmes propices à la manifestation des facteurs géographiques locaux sur les basses couches de l'atmosphère. Entre avril et septembre, ce type de temps très fréquent favorise le développement d'un îlot de chaleur urbain nocturne (ICU). En période de forte chaleur cela renforce les contraintes sanitaires pour la population, avec la nuit des températures qui ont du mal à s'abaisser sous le seuil de récupération physiologique (environ 23°C, valeur qui se rapproche du concept de « nuit tropicale » : température minimale ≥ 20°C). De jour, les conséquences de la ville sur les températures de l'air sont plus complexes à définir car l'environnement rural est bien souvent dépourvu d'eau (sols desséchés

et végétation rare ou en dormance). Cette caractéristique limite les effets rafraîchissants de l'évapotranspiration et des ombrages naturels, caractéristiques qui en dehors du climat méditerranéen différencient souvent le climat du cœur de la ville de celui de la campagne.

En fonction du contexte géographique régional, les régions méditerranéennes ne sont pas toutes sensibles de la même façon aux effets de l'urbanisation sur le climat local. Durant la période où domine la subsidence de l'air, les secteurs les plus abrités du vent et des entrées maritimes porteuses de nuages bas sont logiquement plus affectés. Ainsi, sur le littoral méditerranéen français, les situations favorables à la formation d'un îlot de chaleur urbain oscillent d'avril à septembre entre moins d'un jour sur trois sur la partie occidentale (Perpignan) et plus d'un jour sur deux dans sa partie orientale (Nice). Avec 40%, le cas de Marseille est intermédiaire car si la clarté du ciel y est plus grande qu'à Nice, en revanche le vent limite les occurrences de simultanéité des deux conditions *sine qua non* à la formation de l'îlot de chaleur (tableau 2).

Vent : force moyenne < 4 m/s
Etat du ciel : fraction d'insolation ≥ 66%

Jours favorables ICU : concomitance des deux conditions précédentes

Sources : Météo-France.

	domaine méditerranéen français		
	ouest	centre	est
	Perpignan	Marseille	Nice
jours vent assez faible	52%	51%	73%
jours ciel assez clair	50%	70%	63%
jours favorables ICU	27%	40%	52%

Tableau 2. Pourcentage de jours d'avril à septembre sur la période 1991-2010.

Le point commun des climats de tous les pays qui bordent le bassin méditerranéen est un fort ensoleillement et une tendance chaude, composée par un été très chaud et un hiver doux. Sa particularité est d'avoir une saison sèche durant la période chaude, alors que les précipitations sont plutôt regroupées en automne ou en hiver (figure 3). Cette unité climatique est liée aux effets du balancement saisonnier des centres d'action barométriques, avec en été la « remontée » des anticyclones subtropicaux (synonyme de « beau temps ») et en hiver la « descente » des dépressions subpolaires (synonyme de « temps perturbé », parfois de violents abats pluviométriques et d'inondations). Cette position d'interface entre les latitudes moyennes et les latitudes subtropicales est la cause d'un climat à la double appartenance climatique saisonnière :

une période automnale et hivernale avec l'intrusion possible de mécanismes propres aux climats « tempérés » (passages frontaux accompagnés d'instabilité, de coups de froid possibles en hiver), et une période printanière et surtout estivale où le recouvrement par les hautes pressions dynamiques d'origine tropicale impose sécheresse, forte insolation et chaleur marquée durant plusieurs mois. Sur le littoral, les brises marines peuvent tempérer les fortes chaleurs de l'été mais elles ne sont pas très « efficaces » en raison de la température élevée des eaux de surface (couramment de 22 à 28°C). En dehors des plaines côtières où se concentrent une grande partie de la population et des activités, les reliefs bordiers bénéficient de la décroissance de température avec l'altitude (environ 6°C de

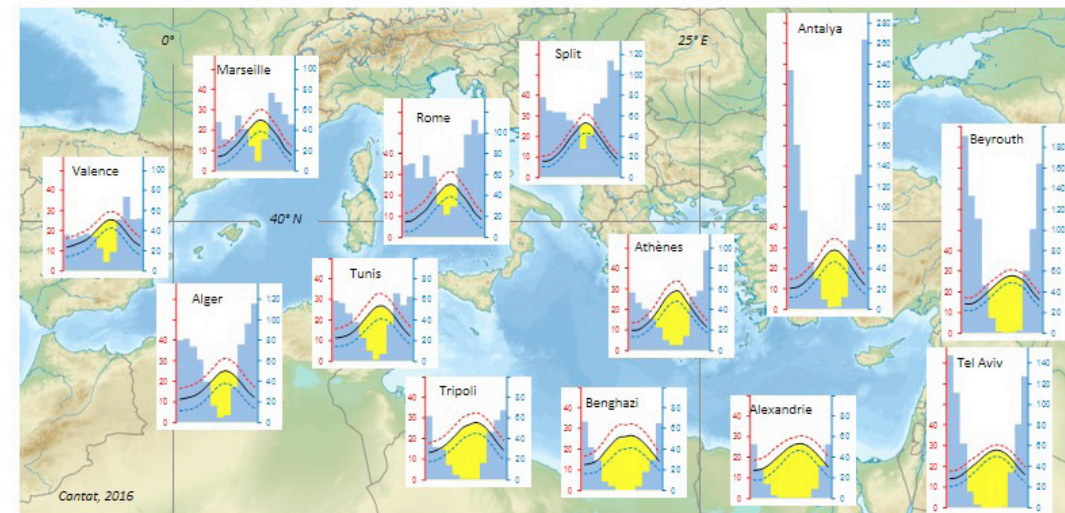


Figure 3. La diversité des climats autour de la Mer Méditerranée (période actuelle). Diagrammes ombrothermiques de plusieurs sites littoraux. Sources : climatebase ; weatherbase ; climate-charts.

moins par 1000 m) et de précipitations plus abondantes.

De part sa position géographique centrale dans le bassin, le climat d'Athènes peut être pris comme référence. La température moyenne annuelle voisine de 18°C et des pluies inférieures à 500 mm expriment le caractère chaud du climat et la faiblesse des précipitations, sans pour autant être indigentes. En partant de la relation $P \leq 2T$ (où P=Précipitations et T=Températures), Athènes enregistre un équilibre parfait entre mois secs (d'avril à septembre) et mois humides (d'octobre à mars). La fraction annuelle d'insolation atteint 65%, avec un soleil omniprésent durant la période estivale du fait de la subsidence de l'air (12 heures par jour entre de juin à août). Toutefois, ces caractères moyens masquent le caractère au jour le jour parfois excessif du climat méditerranéen : à Athènes, le froid et la neige, certes temporaires, ne sont pas inconnus en hiver (coulées polaires), tout comme les canicules sont fréquentes en été et les abats pluviométriques parfois très violents en automne...

Derrière ces principaux caractères communs, une certaine variété apparaît toutefois en fonction de la position autour du bassin et des facteurs géographiques régionaux (figure 4 abc). La frange sud du bassin est naturellement plus chaude (> 20°C) et plus sèches (< 300 mm), notamment sur les côtes libyennes et égyptiennes pour lesquelles nous sommes aux limites du concept de climat méditerranéen (influences tropicales sèches très marquées). A l'est de la Méditerranée, quand la subsidence estivale disparaît, les reliefs côtiers qui interceptent les flux en

provenance de la mer agissent comme des révélateurs de l'humidité atmosphérique. C'est le cas en Turquie (Antalya, 1057 mm), au Liban (Beyrouth, 826 mm) et dans une moindre mesure en Israël (Tel Aviv, 582 mm). Plus à l'Ouest du bassin, les reliefs aggravent également les précipitations et réduisent l'intensité et la durée de la période sèche : ce phénomène est très net dans les Balkans et sur la côte dalmate (Split, 816 mm), et à un degré moindre au pied des montagnes de l'Atlas (Alger, 687 mm). Pour les secteurs peu soumis aux effets du relief, les diagrammes ombrothermiques présentent une allure plus équilibrée, avec des précipitations voisines de 500 mm par an. Les températures présentent une valeur croissante du nord-ouest du bassin (15,4°C à Marseille) au sud-est (21,0°C à Alexandrie et Tel-Aviv), en relation avec une continentalité croissante et les effets d'une latitude plus basse (soleil plus haut). Cette continentalité plus marquée d'ouest en est imposent des mois très secs (≤ 20 mm) plus nombreux pour une latitude comparable : 1 mois à Valence, 2 à Rome, 4 à Antalya et 5 à Beyrouth. Plus au sud, sur la côte africaine, cette même durée passe de 3 à 8 mois entre Alger et Alexandrie.

L'association de ces conditions climatiques chaudes et sèches une grande partie de l'année entraîne une plus ou moins longue période de repos végétal (figure 4 d). Sa durée varie de 2 à 3 mois de la France à la Croatie (Marseille et Split), atteint 5 à 6 mois plus à l'est, des côtes grecques à la Turquie (Athènes et Antalya), et 4 à 5 mois de l'Espagne au Maghreb (Valence, Alger, Tunis). De la Lybie à l'Egypte, la contrainte hydrique est telle que la saison végétative se limite à seulement 3 mois (repos de 9 mois) !

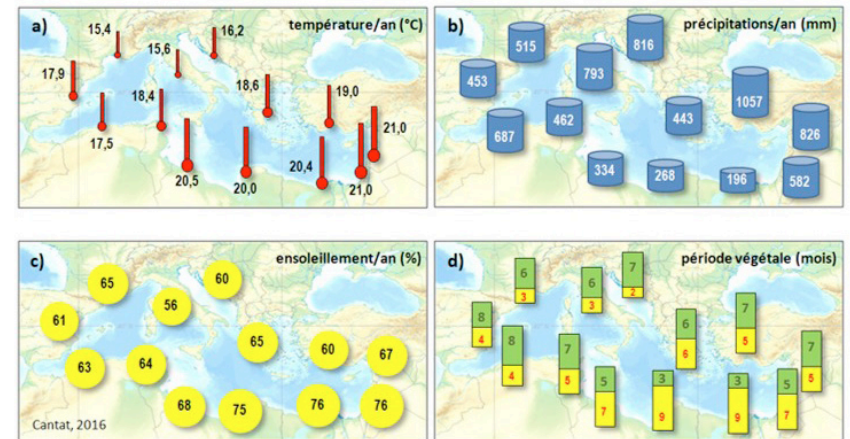
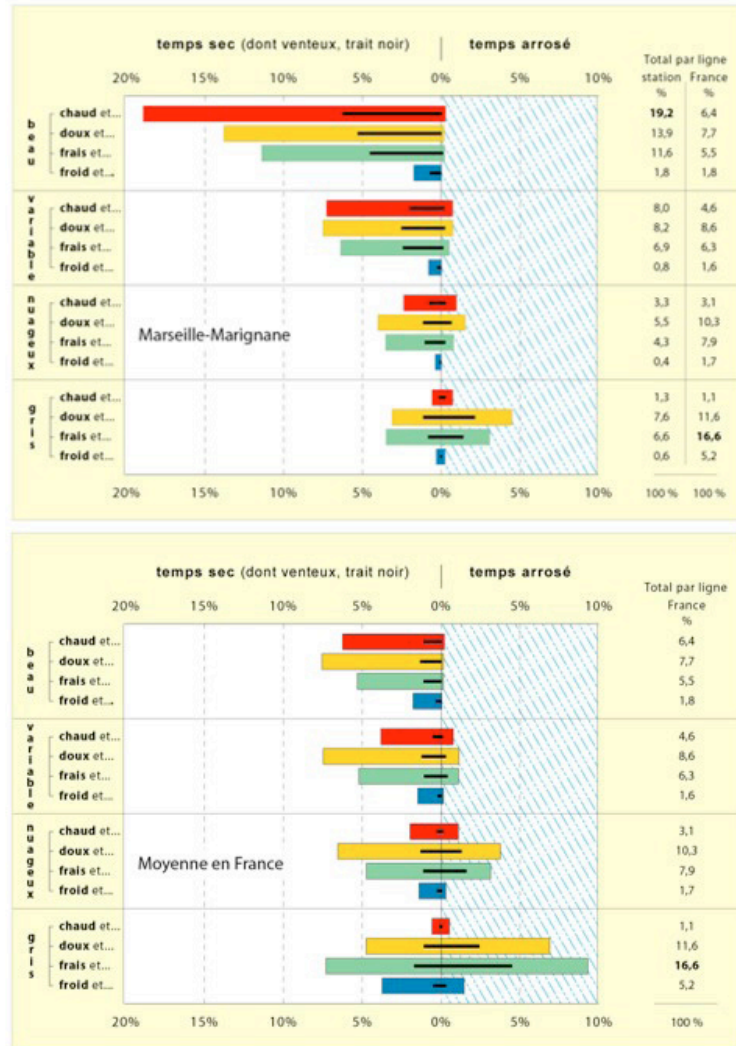


Figure 4. La diversité des climats autour de la Mer Méditerranée vue à travers les températures moyennes annuelles, les précipitations totales annuelles, la fraction d'insolation annuelle et la répartition des séquences durant la période d'activité végétale potentielle (TM >= 10°C) : en vert les mois dont le profil bioclimatique est >= 2 (soit P >= 2T). Sources : climatebase ; weatherbase ; climate-charts.

A l'échelle de la France, la fréquence des types de temps fait bien ressortir les caractères majeurs de ce climat dominé par les conditions anticycloniques. A Marseille-Marignane (figure 5), le beau temps sec se rencontre ainsi près d'un jour sur deux sur l'ensemble de l'année ($\approx 46\%$), alors que pour la moyenne nationale il dépasse à peine un jour sur cinq ($\approx 21\%$). En été, le beau temps sec et chaud représente 60% des journées, contre seulement 20% sur l'ensemble du pays. A *contrario*, les temps pluvieux sont rares en Méditerranée avec seulement un jour sur sept ($\approx 14\%$), contre près d'un jour sur trois pour les huit postes de référence français ($\approx 30,1\%$). Au final, c'est la combinaison « beau-chaud-sec » qui est la plus fréquente à Marseille sur l'ensemble de l'année ($\approx 19\%$), alors qu'à l'échelle du pays il s'agit du type « gris-frais-arrosé » ($\approx 9\%$).



Au sein d'un même secteur géographique, des nuances locales du climat apparaissent également, au gré principalement des variétés du contexte topographique. Ainsi, à Nice dont le site est protégé par une arrière-côte montagneuse, on observe une fréquence de jours venteux beaucoup plus faible qu'à Marseille où, au débouché du sillon rhodanien, le Mistral trouve un terrain propice à son établissement (35,4% de jours venteux à Marseille contre 19,3% à Nice). En contrepartie, ce couloir venteux explique aussi un ensoleillement plus durable qu'à Nice car l'accélération du vent et la subsidence/diffuence en basse vallée du Rhône favorisent le dégagement du ciel (46,5% de jours très ensoleillés à Marseille contre 40,3% à Nice).

Le tableau 3 exprime plus largement la diversité de ce climat sur la façade méditerranéenne française (entre Perpignan et Nice) et sa dégradation latitudinale le long d'un axe remontant de la vallée du Rhône à la vallée de la Saône (de Montélimar à Dijon). Montélimar apparaît comme la limite Nord du climat méditerranéen. Au-delà, l'ambiance se modifie rapidement avec la diminution des indicateurs habituels de ce type de climat (chaleur, sécheresse et ensoleillement) et l'augmentation concomitante des journées grises et pluvieuses, sous de plus faibles températures.

	domaine méditerranéen "pur"			dégradation du climat Montélimar	changement de climat axe Rhône/Saône		France
	ouest Perpignan	centre Marseille	est Nice		Lyon	Dijon	
jours venteux	37%	35%	19%	29%	18%	17%	25%
jours pluvieux	15%	15%	17%	21%	28%	31%	30%
jours chauds	31%	32%	31%	24%	20%	13%	15%
jours froids	2%	4%	0%	9%	14%	18%	10%
jours ensoleillés	34%	47%	40%	31%	23%	20%	21%
jours gris	21%	16%	18%	24%	34%	38%	35%

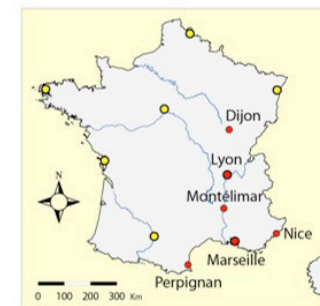


Tableau 3. Pourcentage de jours par an sur la période 1991-2010 et localisation des stations.

Jours venteux : force moyenne ≥ 5 m/s
 Jours pluvieux : cumul ≥ 1 mm
 Jours chauds : T° moyenne $\geq 20^{\circ}\text{C}$
 Jours froids : T° moyenne $< 4^{\circ}\text{C}$
 Jours très ensoleillés : fraction d'insolation $\geq 80\%$
 Jours gris : fraction d'insolation $< 20\%$

France : moyenne de Brest, La Rochelle, Lille, Lyon-Bron, Marseille-Marignane, Orléans, Strasbourg et Toulouse (points jaunes sur la carte).

Sources : Météo-France.

Figure 5. Les types de temps à Marseille-Marignane et en France. Fréquence journalière par an sur la période 1991-2010. France : moyenne Brest, La Rochelle, Lille, Lyon-Bron, Marseille-Marignane, Orléans, Strasbourg et Toulouse. Sources : Météo-France (Cantat, 2015).

III. L'évolution du climat dans le bassin méditerranéen

Cette vision statique du climat, servant de base à toute analyse des atouts et des contraintes d'un espace géographique, est maintenant à compléter par la prise en compte de sa variabilité interannuelle. Cette caractéristique est notamment essentielle pour les précipitations. Déjà peu copieuses en temps « normal », leur indigence devient certaines années une véritable cause d'inquiétude pour l'approvisionnement en eau dans les villes, et plus largement pour le fonctionnement des écosystèmes. Sur ces irrégularités d'une année à l'autre vient se greffer une évolution possible du climat, que seule une très longue série de données permet de mettre en évidence. Une modification de la variabilité et/ou l'apparition d'une tendance à la hausse ou la baisse d'un paramètre du climat durant plusieurs décennies successives est la marque d'un changement climatique. Le réchauffement actuel entre dans la catégorie des changements climatiques ; pour les précipitations le signal semble moins prononcé mais tendrait vers une diminution des apports.

période de recouvrement des mesures pour les trois stations (1951-2004), les années « extrêmes » sont généralement communes aux trois sites mais d'intensités variables ; quelquefois elles sont non synchrones, en raison des facteurs dynamiques qui les génèrent. Ainsi, 1956 est globalement froide mais le déficit est beaucoup plus marqué sur la partie occidentale du bassin qu'en Turquie (-1,7°C à Marignane, -1,0°C à Split et -0,6°C à Adana). Autre cas de figure, en 1997 l'anomalie est inversée à l'échelle du bassin : négative en Turquie (-0,9°C à Adana), positive en France (+1,4°C à Marseille) et quasi nulle en position centrale (+0,1°C à Split). En somme, il n'y a pas de règle commune à l'ensemble du bassin.

L'analyse des moyennes annuelles fait apparaître une hausse sensible, de l'ordre de 1°C au cours des trois dernières normales climatiques à Split et Adana. Pour Marignane, le réchauffement serait même plus important, de l'ordre de 2°C. Cet excédent de réchauffement serait probablement causé par le développement de l'aéroport de Marseille et l'englobement progressif de la station météorologique par les constructions dans les années 1960¹ (figure 7). Ce grignotage des terrains « naturels » par la ville contribuerait à la formation d'un léger effet d'îlot de chaleur urbain se superposant à l'évolution générale. La croissance de la population de la commune de Marignane est révélatrice de cette mutation paysagère rapide, passant du statut de petite ville de la périphérie de Marseille jusque dans les années 1950 (≈ 5.000 habitants) à celui de ville moyenne dans les années 1960 (≈ 20.000 habitants), avant de stabiliser sa croissance depuis une trentaine d'années à un peu plus de 30.000

habitants. Cet exemple souligne pour les espaces en urbanisation rapide la difficulté de séparer le réchauffement d'échelle globale des effets locaux liés à des modifications du

bilan d'énergie par substitution des surfaces naturelles en matériaux de construction et revêtements divers.

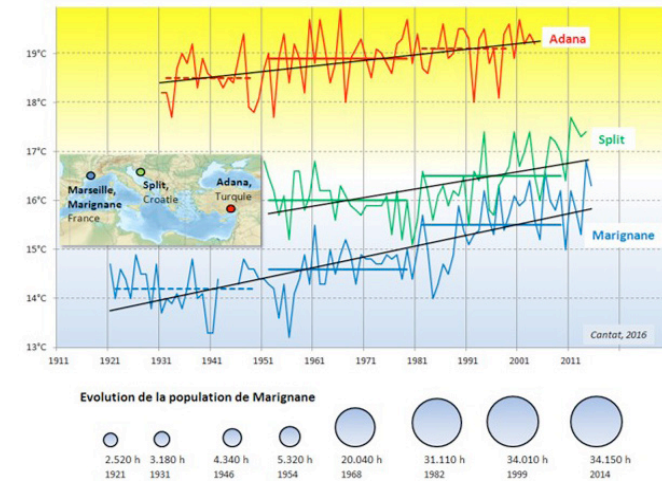


Figure 6. Evolution de la température moyenne annuelle dans le Bassin méditerranéen entre 1921 et 2015. Valeurs vraies, moyennes successives sur 20 ou 30 ans et tendance linéaire. Sources : traitement de données ECA&D (European Climate Assessment & Dataset) et évolution de la population de la ville de Marignane entre 1921 et 2014. Sources : Ldh/EHESS/Cassini jusqu'en 1999 puis Insee à partir de 2006.

III.1. L'évolution contemporaine des températures et des précipitations

La variabilité et l'évolution contemporaine des températures sur le bassin méditerranéen seront caractérisées à l'aide de trois stations situées en France, en Croatie et en Turquie.

Le tracé « en dents de scie » des courbes reflète la succession aléatoire d'années chaudes et d'années froides (figure 6). Sur la



Figure 7. Localisation de Marignane dans la région de Marseille (à gauche) et 10 positions successives des stations météorologiques entre 1921 et 2015 (droite). Sources : Nostromoweb, Google Earth, Météo-France.

¹ En raison de différentes contraintes de service et environnementales, la station de Marignane a d'ailleurs été déplacée à dix reprises en un peu moins de cent ans de mesures (voir les différents points sur la carte).

Pour les précipitations, les données enregistrées en quasi continu sur la période 1921-2016 à Marignane traduisent la grande variabilité des apports d'une année à l'autre (figure 8). L'analyse fréquentielle dénote une variabilité marquée puisque l'espace interquartile (une année sur deux) est voisin de 200 mm. La chronique des précipitations depuis 1921 dessine, elle, des « hauts » et des « bas » sans réelle cyclicité. Toutefois, la tendance générale semble être à une légère réduction des cumuls, avec une perte d'environ 10% entre les Normales 1951-1980 (569 mm) et 1981-2010 (516 mm).

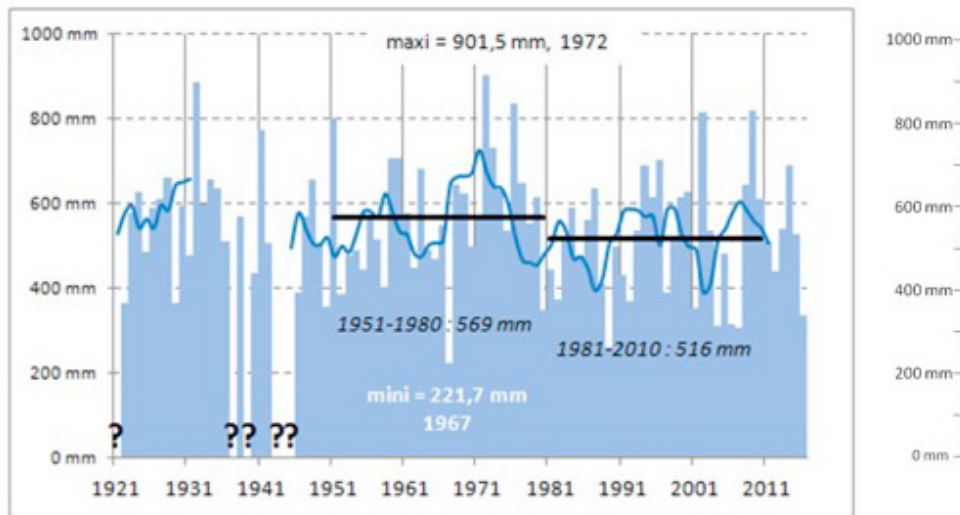


Figure 8. Evolution des précipitations totales annuelles à Marseille-Marignane (à gauche) et répartition fréquentielle (à droite) sur la période 1921-2016. Valeurs vraies (bâtons), moyenne mobile d'ordre 5 (courbe) et normales climatique (trait horizontale). Les « ? » représentent les années incomplètes. Sources : Météo-France

III.2. L'évolution future des températures et des précipitations dans la région de Marseille

Concernant le futur, les modèles climatiques à fines résolutions spatiale et temporelle permettent aujourd'hui de différencier jusqu'à l'échelle régionale, voire locale, les évolutions climatiques et envisager leurs impacts potentiels. Ces projections sont par ailleurs fournies pour plusieurs scénarios d'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (GES) établis d'après les travaux

du GIEC (figure 9), ce qui permet de chercher des solutions d'adaptation à des niveaux différents.

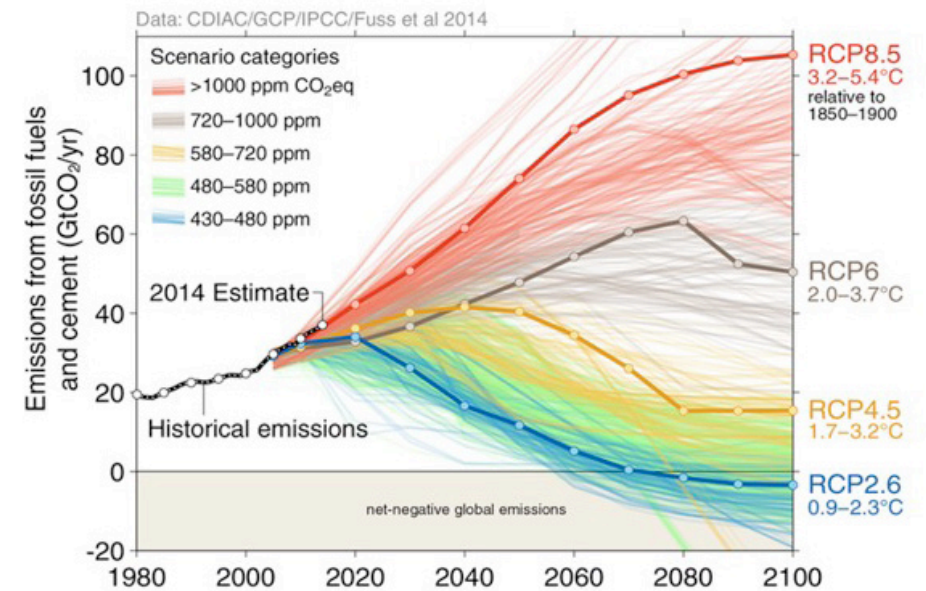


Figure 9. Différents scénarios d'émissions de combustibles fossiles et RCP. Sources : GIEC 2013

Les graphiques suivants (figures 10 et 11) sont réalisés pour un point de grille sélectionné dans la région de Marseille, sur la période 1951-2100 et selon deux types de scénarios d'émission de GES². Le scénario « pessimiste » RCP («Representative Concentration Pathway») 8.5 traduit une absence de politique internationale pour la réduction des GES, alors que le scénario « optimiste » RCP 2.6 se cale sur les préconisations de la COP 21 de Paris, en 2015 (limitation du réchauffement dans une plage de 1,5 à 2°C). Pour faire mieux ressortir les grandes tendances, les courbes ont été tracées à partir de moyennes mobiles chevauchantes sur un pas de neuf ans, ce qui lisse un peu en contrepartie la

variabilité climatique interannuelle. Dans l'optique du scénario « optimiste », le réchauffement se poursuivrait jusque vers 2050, avant de se stabiliser autour de +1,4°C vers la fin du 21ème siècle, comparativement à la période actuelle (figure 10 et tableau 4). Cette évolution traduit l'inertie du système climatique qui prolongerait un temps les effets des GES, alors même que la teneur de ceux-ci aurait été amenée à un niveau inférieur à l'actuel. Pour le scénario « pessimiste », l'augmentation serait dans un premier temps légèrement supérieure à celle du scénario précédent, puis après 2050 les écarts se creuseraient franchement pour atteindre +4,2°C à l'horizon lointain 2071-2100.

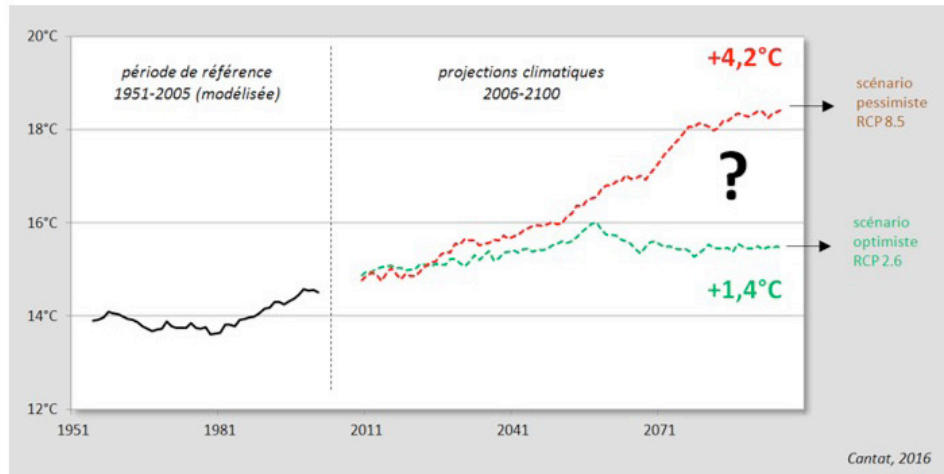


Figure 10. Evolution de la température moyenne annuelle dans la région de Marseille. Données modélisées sur la période de référence actuelle (1951-2005) et pour le futur jusqu'en 2100 selon deux scénarios contrastés : RCP 2.6 et RCP 8.5. Lissage par moyenne mobile chevauchante sur un pas de 9 ans. Sources : DRIAS www.drias-climat.fr

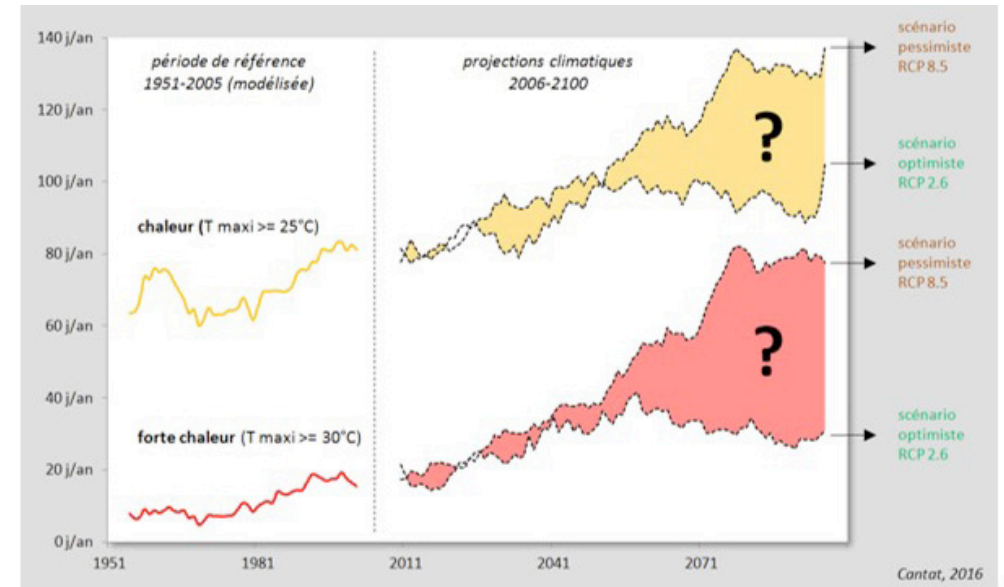


Figure 11. Evolution du nombre de jours de chaleur et de forte chaleur dans la région de Marseille. Données modélisées sur la période de référence actuelle (1951-2005) et pour le futur jusqu'en 2100 selon deux scénarios contrastés : RCP 2.6 et RCP 8.5. Lissage par moyenne mobile chevauchante sur un pas de 9 ans. Sources : DRIAS www.drias-climat.fr

La fréquence des jours de chaleur (maximum $\geq 25^{\circ}\text{C}$) et de forte chaleur (maximum $\geq 30^{\circ}\text{C}$) suivrait logiquement la même évolution générale (figure 11 et tableau 4). Pour le scénario « optimiste », on observe une augmentation moyenne de 10 à 20 jours jusque vers 2050, puis une stabilisation, voire une légère décroissance par la suite. Pour

le scénario « pessimiste », après la période charnière correspondant à la moitié du 21ème siècle, le nombre de jours de forte chaleur (77,3 jours $\geq 30^{\circ}\text{C}$) serait alors comparable à l'actuelle fréquence des jours de simple chaleur (71,2 jours $\geq 25^{\circ}\text{C}$).

	temp. moyenne (en °C)		jours chaleur (T maxi $\geq 25^{\circ}\text{C}$)		jours forte chaleur (T maxi $\geq 30^{\circ}\text{C}$)	
	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
1971-2000	14.0		71.2		12.8	
2041-2070	15.6	16.4	97.0	107.7	34.0	47.6
2071-2100	15.4	18.2	97.3	135.5	30.1	77.3

Tableau 4. Moyenne annuelle de température, du nombre de jours de chaleur et de forte chaleur dans la région de Marseille. Période actuelle et deux scénarios GIEC / horizon moyen et lointain.

Sources : DRIAS www.drias-climat.fr

² Les données ont été extraites du site DRIAS, *les futurs du climat*, à partir du modèle Aladin Climat corrigé QQ (simulation CNRM-2014, producteur Météo-France).

Concernant les précipitations, le signal d'ensemble sur le long terme est plus complexe à déterminer en raison de la forte variabilité interannuelle qui prévaut sur ce paramètre et de tendances contraires possibles d'une décennie à une autre (figure 12).

et il est marqué par une diminution forte des cumuls pour l'horizon lointain.

Dans une ambiance plus chaude d'environ 4°C et avec une moyenne de 500 mm par an, ce déficit en eau d'environ 10% serait une véritable contrainte pour les écosystèmes et l'approvisionnement en eau de la population.

Pour le scénario « optimiste » (courbe et traits verts), après une augmentation des cumuls d'environ 10% sur l'horizon proche, il semblerait que nous reviendrions à des valeurs sensiblement équivalentes à la période actuelle, dans le cadre d'une variabilité interannuelle de même amplitude. Le scénario « pessimiste » (courbe et traits rouges) est lui plus tranché. Il met principalement en évidence de grandes fluctuations pluriannuelles dépassant les valeurs de la variabilité actuelle

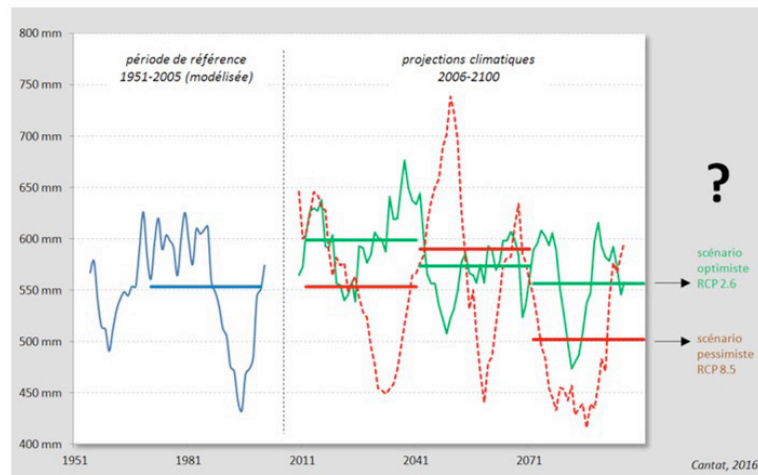


Figure 12. Evolution des cumuls annuels de précipitations dans la région de Marseille. Données modélisées sur la période de référence actuelle (1951-2005) et pour le futur jusqu'en 2100 selon deux scénarios contrastés : RCP 2.6 et RCP 8.5. Lissage par moyenne mobile chevauchante sur un pas de 9 ans. Sources : DRIAS www.drias-climat.fr

Beltrando G., 2004 : *Les climats. Processus, variabilité et risques*. Ed. Armand Colin, 261p.

Besancenot J.-P., 2001 : *Climat et santé*. PUF, 127 p.

Besancenot J.-P., 2002 : Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environnement, Risques et Santé*, 4, 229-240.

Bessemoulin P., 1980 : Urbanisation et Météorologie. *La Météorologie*, 23, 51-67.

Cantat O., Savouret E., 2015 : A catalog of "weather types" in metropolitan France. *Climatologie*. <http://dx.doi.org/10.4267/climatologie.584>

Cantat O., 2015 : *Etude de climatologie physionomique et appliquée. Proposition méthodologique pour une approche globale et objective des types de temps en France métropolitaine*. HDR, vol.3, Université Paris-Diderot, 262p.

Carrega P., 1994 : *Topoclimatologie et Habitat*. Thèse de Doctorat, Revue de géographie du Laboratoire d'analyse spatiale Raoul Bachelard, n°35 et 36, Université Sophia Antipolis de Nice, 408p.

Chandler T., 1970 : Urban climatology. Inventory and prospect. WMO, *Technical Note*, 108, 1-14.

CSTB, 2006. : Climat urbain: de l'évolution des villes au changement climatique. <http://www.cstb.fr/fileadmin/documents/publicationsScientifiques/doc00004338.pdf>

Escourrou G., 1981 : *Climat et Environnement*. Les facteurs locaux du climat. Paris, Masson, 184p.

Escourrou G., 1991 : *Le climat et la ville*. Ed. Nathan Université, 191p.

GIEC, 2013 : *Climate change 2013: The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.Uno-pHA9qSo>

Jouzel J, Ouzeau G, Deque M, Jouini M, Planton S, Vautard R., 2014 : *Le climat de la France au XXI^e siècle (Volume 4), Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre mer*. Rapports de la Direction générale de l'Énergie et du Climat, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 62p.

Lamarre D., Pagney P., 2000 : *Climats et sociétés*. Armand Colin, coll. U, 272 p.

Lozato-Giotard J.-P., 1990 : Méditerranée et tourisme. Masson, 216p.

ONERC, 2010 : *Villes et adaptation au changement climatique*. 158p.
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_ville_et_adaptation.pdf

Oke T.R., 1973 : City size and urban heat island. *Atmospheric Environment*, Oxford, England, 7, 769-779.

Pagney P., 1994 : *Les climats de la Terre*. Ed. Masson, Paris, 167p.

Stewart I. D., Oke T. R., 2012 : Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological*, 12. <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

Vigneau J.-P., 2000 : *Géoclimatologie*. Ed. Ellipses, Universités, 334p.

Yoshino M. M., 1975 : *Climate in a small area*. University of Tokyo Press, 549 p.

Sites internet :

Atlas des populations et pays du monde. <https://www.populationdata.net/>

Drias, les futurs du climat, projections climatiques pour l'adaptation de nos sociétés. <http://www.drias-climat.fr/>

ECAD : Home European Climate Assessment & Dataset. <http://eca.knmi.nl/>

Insee - Institut national de la statistique et des études économiques. <https://www.insee.fr/fr/accueil>

La banque mondiale. <http://www.banquemondiale.org/>

Publithèque. Espace de commande de données publiques. <https://publithèque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp>

Températures maximales estivales

Méditerranée

Le concept de «Time of emergence» appliqué aux températures maximales d'été sur le bassin méditerranéen

Albin Ullmann

Centre de Recherches de Climatologie,
UMR 6282 Biogéosciences
Département de Géographie, Université de Bourgogne
albin.ullmann@u-bourgogne.fr

Le concept de «Time of emergence» appliqué aux températures maximales d'été sur le bassin méditerranéen

Dans le contexte de l'adaptation des sociétés au changement climatique se pose la question du moment à partir duquel la tendance au réchauffement deviendra significative par rapport à la variabilité naturelle du climat. C'est le concept de «time of emergence» (Toe). Dans cette étude, ce moment est défini à partir des températures maximales estivales moyennes sur le bassin méditerranéen, selon une trajectoire probable de forte augmentation des gaz à effet de serre (RCP 8,5). La cartographie obtenue montre que la période se situe autour de 2040-2050 sur le bassin oriental et de 2060-2070 sur le bassin occidental. Parallèlement, sur l'ensemble de la rive nord, les jours très chauds pourraient devenir de plus en plus fréquents en été.

The time at which the signal of climate change emerges from the noise of natural climate variability is called "time of emergence". This time is analyzed here based on summertime mean maximum temperature in the Mediterranean basin for RCP 8.5 scenario. This time would be around 2040-2050 (2060-2070) in the eastern (western) basin. In the whole northern Mediterranean basin, the 90th percentile of summertime maximum temperature could increase almost twice faster than the 10th percentile of summertime maximum temperature for the period 2006-2100.

Changement climatique en Méditerranée

Introduction

Le bassin méditerranéen est une zone de transition majeure entre le climat tropical et le climat des moyennes latitudes. Il est considéré dans le dernier rapport du GIEC comme un « hot spot » du changement climatique en raison de la rapidité des changements d'ores et déjà observés (IPCC, 2013). La question du moment à partir duquel l'homme aura définitivement impacté le climat, sans que celui-ci ne revienne jamais à un état moyen initial, est souvent au cœur des débats puisqu'elle conditionne les stratégies d'adaptation. La notion de « time of emergence » (Toe) permet d'appréhender cette partie du questionnement sur le changement climatique. En effet, grâce aux modèles climatiques, il est possible de simuler la variabilité du climat sous l'effet des forçages naturels uniquement et de la comparer à celle simulée au 21^{ème} siècle pour différentes trajectoires de forçages anthropiques. Il devient donc possible d'estimer un moment, ou plutôt une période, à partir de laquelle le changement climatique d'origine anthropique aura définitivement fait basculer les conditions climatiques dans un nouvel état moyen. Cette information sur le changement climatique est particulièrement importante en termes de communication et peut favoriser l'action auprès des décideurs, notamment pour la gestion des risques climatiques. Ainsi, après avoir présenté les données et la méthode, cette étude propose d'estimer le « time of emergence » dans le bassin méditerranéen et de répondre en partie à trois questions : « où », « quand » et « comment » le changement climatique va-t-il définitivement impacter les températures maximales en été ?

I. Données et méthodes

Les données et méthodes sont analysées sur la période de mai à août uniquement (quatre mois consécutifs dénommés « été » dans le texte).

I.1. Les données

Les températures maximales quotidiennes des réanalyses ERA-Interim (résolution 1,5° ; Berrisford *et al.*, 2011) de l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) sont utilisées sur la période 1979-2005 entre [-15°O ; 40°E] et [25°N ; 55°N] pour établir une comparaison avec les températures simulées.

L'analyse du signal du changement climatique est réalisée à partir des simulations pour la trajectoire RCP 8,5 (Representative Concentration Pathways) établies par Moss *et al.* (2010) et par Meinshausen *et al.* (2011). Ce scénario correspond à +8,5 W/m² produisant une augmentation de 5°C en moyenne d'ici à 2100. Cette trajectoire (figure 1, trait et surface en rouge) est privilégiée car les émissions en gaz à effet de serre mesurés depuis plusieurs années suivent très clairement ce scénario (Peters *et al.*, 2013).

Pour appréhender la variabilité naturelle du climat simulé, les expériences « pre-industrial control » (Pi control) sont utilisées. Il s'agit de simulations faites avec les valeurs de concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre, en aérosols et en ozone équivalentes à celles de 1850, en incluant les oscillations naturelles du forçage solaire. Les simulations « historiques » sont également utilisées sur la

une comparaison avec les réanalyses ERA-Interim (simulations réalisées avec l'évolution observée de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre ainsi que des forçages naturels). Cette étude repose sur dix modèles : programme CMIP5 – Coupled

Intercomparaison Project Phase 5 (tableau 1 et figure 1). Pour faciliter les comparaisons entre les simulations et les réanalyses, les températures simulées par les modèles ont été interpolées à la même résolution de 1,5°.

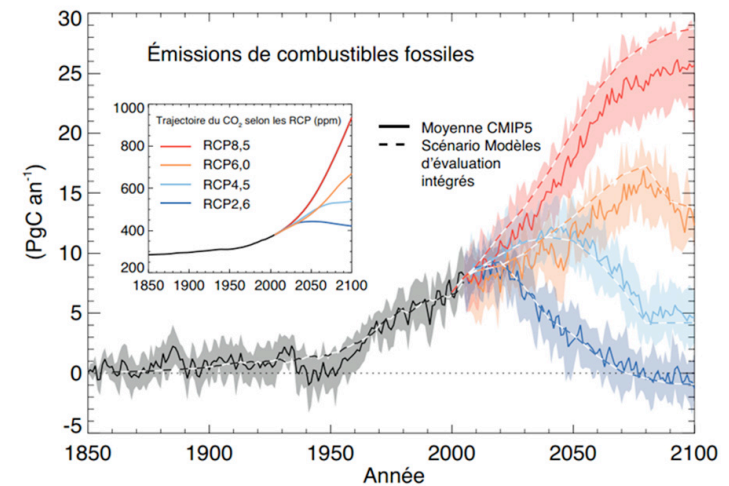


Figure 1. Emissions de combustibles fossiles, d'après le 5^{ème} rapport du GIEC (source : IPCC, 2013).

Organismes	Modèles
Australian Community Climate and Earth-System Simulator (ACCESS)	ACCESS-G
Beijin Normal University (BNU)	BNU-ESM
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)	CNRM-CM5
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)	CSIRO-mk3.6.0
Institute for Numerical Mathematics (INM), Russian Academy of Sciences	INM-CM4
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)	IPSL-CM5-MR
Center of Climate System Research - Tokyo (CCSR)	MIROC5
Max Planck Institute (MPI) for Meteorology, Germany	MPI-ESM-LR
Meteorological Research Institute (MRI), Japan	MRI-CGCM3
National Oceanic and Atmospheric Administration - USA (NOAA)	GFDL-ESM2G

Tableau 1. Modèles CMIP5 utilisés dans cette étude et l'institution d'origine

I.2. La méthode

Il n'existe pas de définition ou de métrique unique du « time of emergence ». Cette notion dépend du choix des variables, des échelles de temps et d'espace, de la référence à partir de laquelle le changement est mesuré et du seuil à partir duquel la notion d'émergence est définie (Kirtman et al. 2013). Estimer le Toe d'un signal climatique nécessite l'estimation du signal du changement climatique (S) et de la variabilité naturelle du climat, ou « bruit » (B). Ce « bruit » se produit en l'absence de forçages externes et intègre les processus intrinsèques de l'atmosphère, de l'océan et du couplage océan-atmosphère (Madden, 1976 ; Feldstein 2000 ; Deser et al. 2012). Le Toe est défini comme le moment (année, décennie) à partir duquel le rapport signal / bruit (S/B) dépasse définitivement un certain seuil (1 ou 2).

Dans cette étude, le signal et le bruit de la température maximale en Méditerranée sont calculés pour chaque été, pour chaque modèle et en chaque point de grille. Le Toe sera l'année à partir de laquelle ce signal dépassera définitivement la variabilité naturelle, en prenant comme critère la valeur de température estivale moyenne + 2 fois l'écart type « naturel » établi sur la période pré industrielle.

Chaque été, les percentiles 90% et 10% ainsi que le coefficient d'asymétrie sont extraits à partir des températures quotidiennes maximales. Une régression linéaire est calculée pour chacun de ces indicateurs statistiques sur la période 2006-2100 afin d'analyser comment la distribution estivale des températures maximales pourrait évoluer au 21^{ème} siècle selon la trajectoire RCP 8,5.

II. Résultats

2.1. Températures maximales observées et simulées sur la période 1979-2005

La figure 2 présente les températures maximales estivales moyennes calculées sur la période 1979-2005 pour ERA-Interim (figure 2a) et la moyenne multi-modèles des simulations historiques pour la même période (figure 2b). La géographie des températures autour du bassin méditerranéen est quasi similaire entre les réanalyses et les modèles. Un léger biais chaud est observé sur la

rive sud du bassin oriental (figure 2c) mais aucune anomalie entre les réanalyses et les simulations n'est statistiquement significative selon un test de Student. Les modèles numériques simulent donc de façon robuste les températures estivales moyennes autour du bassin méditerranéen.

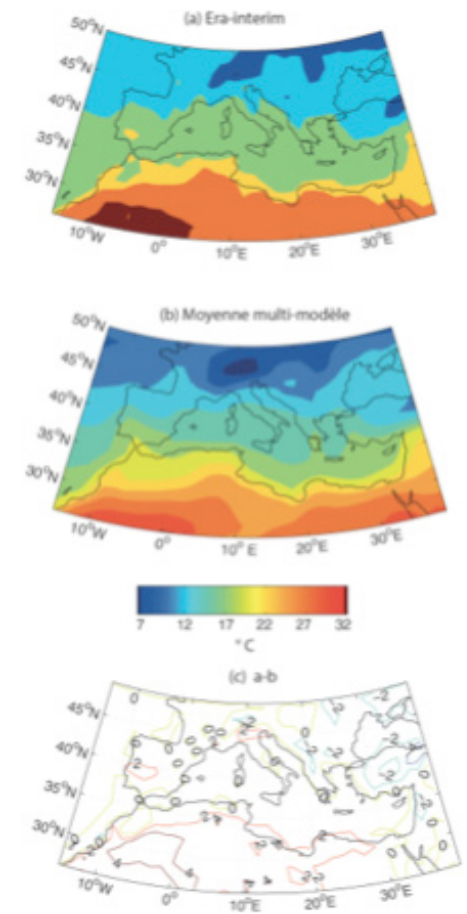


Figure 2. (a) Températures maximales estivales (mai-août) moyennes sur la période 1979-2005 (ERA-Interim). (b) Moyenne multi-modèle des températures maximales estivales (mai-août) moyennes sur la période 1979-2005 (run historique). (c) a-b.

II.2. Time of emergence

A partir de la comparaison de la situation actuelle et celle projetée par les modèles selon une trajectoire RCP 8,5, une géographie des Toe se dessine autour du bassin méditerranéen. Elle permet d'apporter des réponses aux questions du « quand » et « où » la modification définitive du climat pour le siècle en cours s'opérera (figure 3). Il apparaît clairement que sur le bassin oriental des températures maximales estivales moyennes devraient définitivement dépasser la variabilité naturelle du climat aux alentours de 2025-2035. Ces valeurs sont plus tardives d'environ vingt ans sur le bassin ouest, pour lequel le Toe apparaît aux alentours de 2045-2055. De plus, le signal du réchauffement devrait émerger sur la partie sud du bassin oriental au moins dix ans avant la partie nord.

Ces résultats semblent cohérents avec les travaux de Hertig et Jacobeit (2008) qui projettent un réchauffement des températures estivales en Méditerranée plus rapide sur le bassin est que sur le bassin ouest. En été, la configuration barométrique à large échelle

favorise le passage des vents provenant du nord de l'Afrique et du Sahara vers la partie centrale et est de la Méditerranée, y provoquant un réchauffement plus rapide qu'ailleurs (Maheras et Kutiel, 1999 ; Xoplaki et al., 2003). Comme le Sahara devrait se réchauffer de manière importante au cours du 21ème siècle (Hawkins et Sutton, 2012), l'apport d'air chaud en été pourrait devenir de plus en plus intense en Méditerranée centrale et sur l'ensemble du bassin est, favorisant le dépassement de la variabilité naturelle des températures maximales en été plus précocement que sur le bassin ouest. Il est intéressant de noter qu'à l'ouest, les tendances des températures maximales estivales moyennes de la rive sud (Maroc, Algérie, Tunisie) ne devraient pas émerger de la variabilité naturelle du climat avant celles de la rive nord. Cependant, certains secteurs pourraient avoir un Toe légèrement plus précoce comme notamment la péninsule ibérique et le sud de l'Adriatique, avec des échéances aux alentours de 2035-2040. En termes de variabilité inter-modèles, quinze ans en moyenne séparent le modèle au Toe le plus précoce du modèle au Toe le plus tardif.

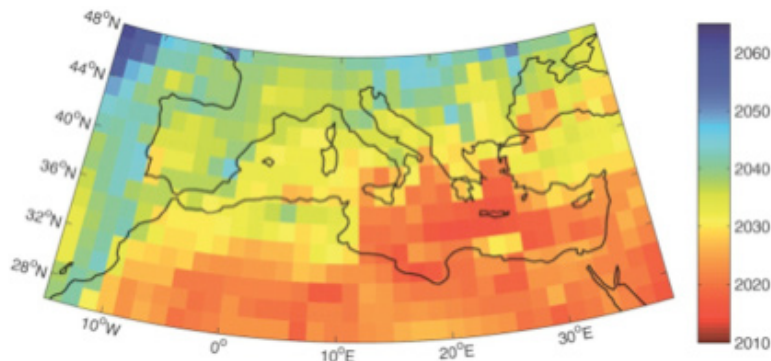


Figure 3. Time of emergence des températures maximales estivales (mai-août) moyennes. Valeur moyenne multi-modèle, scénario RCP 8,5.

II.3. Distribution des températures maximales quotidiennes en été de 2006-2100

Afin d'appréhender « comment » le changement climatique pourrait impacter les températures maximales en été en Méditerranée, la figure 4 présente les tendances des percentiles 10 (P10), percentiles 90 (P90) et de l'espace inter-percentile (P90-P10) des températures estivales de 2006 à 2100. Les P10 et P90 augmentent partout dans le bassin méditerranéen. Cependant, sur la rive nord, les P90 augmentent presque deux fois plus vite que les P10. En d'autres termes, les températures maximales les plus hautes s'y réchauffent deux fois plus vite que les températures maximales les plus basses.

Dans le reste du bassin, les P10 et P90 se réchauffent à la même vitesse, témoignant d'un glissement de l'ensemble de la distribution des températures maximales vers un état moyen plus chaud.

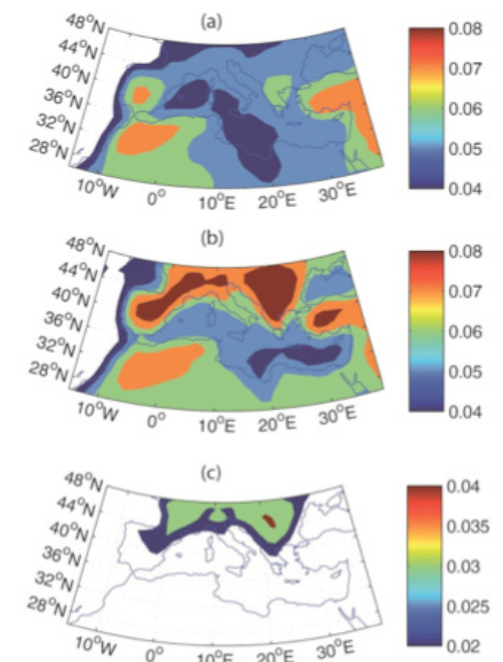


Figure 4. Tendence linéaire du percentile 10 (a), percentile 90 (b) et de l'espace inter-percentile (P90-P10) (c) des températures maximales quotidiennes en été sur la période 2006-2100. Les résultats sont tracés seulement si 2/3 des modèles montrent une tendance significative (test en T de Student, à 90%).

Conclusion

La figure 5 montre la tendance du coefficient d'asymétrie calculé sur la période 2006-2100. Appliquée aux températures quotidiennes maximales en été, il indique que les jours très chauds deviennent de plus en plus fréquents. En cohérence avec les résultats de la figure 4, la valeur du coefficient d'asymétrie baisse significativement sur l'ensemble de la rive nord du bassin méditerranéen. Cette tendance indique que les étés sur ce secteur pourraient connaître des jours très chauds de plus en plus fréquents par rapport aux jours avec des températures maximales plus clémentes. Cette tendance indique également que la variabilité quotidienne des températures

maximales en été pourrait devenir de plus en plus marquée sur la rive nord du bassin méditerranéen. En d'autres termes, ce secteur pourrait connaître une « extrémisation » des températures maximales en été.

Le concept de « time of emergence » est défini comme la période (année, décennie) à partir de laquelle le signal du changement climatique dépassera définitivement la variabilité naturelle du climat. D'après ce critère, il est possible d'estimer un moment à partir duquel les actions anthropiques auront définitivement modifié l'état moyen « naturel » du climat. Concernant les températures maximales estivales moyennes sur le bassin méditerranéen, pour une trajectoire RCP 8,5, le changement définitif d'état moyen devrait être plus précoce dans la partie orientale (aux alentours de 2040-2050) que dans la partie occidentale (aux alentours de 2060-2070). Sur la rive nord du bassin méditerranéen, le réchauffement des températures maximales les plus fortes pourrait être presque deux fois plus rapide que celui des températures maximales les moins chaudes. Ainsi, la distribution des températures quotidiennes maximales en été serait marquée par des jours très chauds de plus en plus fréquents. Certes, comme tous les indices climatiques issus de la statistique appliquée aux simulations numériques du climat, la robustesse de la notion de « time of emergence » peut être discutée et améliorée. Cependant, il faut garder à l'esprit qu'elle doit être considérée comme un indicateur d'une période (une décennie par exemple) et non pas comme une date précise. Néanmoins, cette échéance a le mérite de rendre beaucoup moins abstraite la notion de changement climatique anthropique face aux fluctuations naturelles du climat ce qui peut favoriser l'action auprès des décideurs en proposant un « point de non-retour » du changement climatique. En ce sens, la notion de « time of emergence » est un bon outil de communication sur la question du changement climatique.

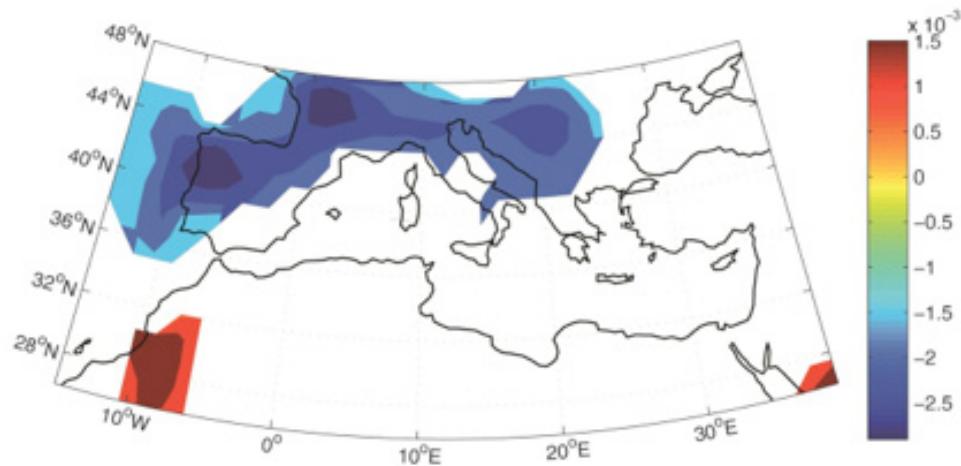


Figure 5. Tendence linéaire du coefficient d'asymétrie des températures maximales quotidiennes en été sur la période 2006-2100. Les résultats sont tracés seulement si 2/3 des modèles montrent une tendance significative (test en T de Student, à 90%).

Berrisford P., Kallberg P., Kobayashi S., Dee D., Uppala S., Simmons A.J., Poli P., Sato H., 2009 : Atmospheric conservation properties in ERA-Interim. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 1381-1399.

Deser C., Phillips A., Bourdette V., Teng H., 2012 : Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. *Climate Dynamics*, 38, 527-546.

Feldstein SB., 2000 : The timescale, power spectra, and climate noise properties of teleconnection patterns. *Journal of Climate*, 13, 4430-4440.

Peters G., Andrew R., Boden T., Canadell J., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M., Wilson C., 2013 : The challenge to keep global warming below 2°C. *Nature Climate Change*, 3, 4-6.

Hawkins E., Sutton R., 2012 : *Time of emergence of climate signals*. *Geophysical Research Letters*, Vol 39, L01702, doi:10.1029/2011GL050087, 2012.

Hertig E., Jacobeit J., 2008 : Downscaling future climate change: Temperature scenarios for the Mediterranean area. *Global and Planetary Change*, 63, 127-131.

IPCC, 2013 : Climate Change 2013 : the Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A. et al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535p.

Kirtman B., Power S.B., Adedoyin J.A., Boer G.J., Bojariu R., Camilloni I., Doblas-Reyes F.J. et al., 2013 : *Near-term climate change: projections and predictability*. dans Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A. et al. (eds) *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 953-1028.

Madden RA., 1976 : Estimates of the natural variability of time-averaged sea-level pressure. *Monthly Weather Review*, 104, 942-952.

Maheras P., Kutiel H., 1999 : Spatial and temporal variations in the temperature regime in the Mediterranean and their relationship with circulation; 1860-1990. *International Journal of Climatology*, 19, 1697-1715.

Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K., Daniel J.S., Kainuma M.L.T., Lamarque J.F., Matsumoto K., Montzka S.A., Raper S.C.B., Riahi K., Thomson A., Velders G.J.M., van Vuuren D.P.P., 2011 : The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climate Change* 109, 213-241.

Moss, R. H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., Van Vuuren D.P., Carter T.R. et al., 2010 : The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756.

Xoplaki E., Gonzales-Rouco J.F., Luterbacher J., Wanner H., 2003 : Mediterranean summer air temperature variability and its connection to the large-scale atmospheric circulation and SSTs. *Climate dynamics*, 20, 723-739.

Erosion

Elévation du niveau de la mer

Evaluation de la sensibilité littorale à l'érosion en France méditerranéenne dans un contexte de changement climatique



Asimina Mavromatidi

Aix Marseille Université, IRD, LPED
3, place Victor Hugo, 13331 – Marseille Cedex 3,
France
semimavr@gmail.com



Elodie Briche

Aix Marseille Université, IRD, LPED
3, place Victor Hugo, 13331 – Marseille Cedex 3,
France
elodie.briche@univ-amu.fr

MC3- Mediterranean Cities and Climate Change,
projet financé par les Investissements d'Avenir A*MIDEX

Indice de sensibilité côtière

Système d'information géographique (SIG)

Un tiers de la population française se concentre sur les zones côtières méditerranéennes (Eurostat, 2012), qui accueillent de grands centres urbains ainsi que des activités telles que le tourisme. Or, les villes densément peuplées du littoral méditerranéen français sont confrontées à des risques notamment en raison de l'élévation du niveau de la mer qui devrait augmenter entre 7 et 12 cm au cours du 21ème siècle (Gualdi et al., 2013). L'objectif principal de ce travail est donc de déterminer les zones côtières les plus sensibles à l'érosion à partir d'un indice de sensibilité (ISC) qui repose sur 6 variables : la géomorphologie, la pente côtière, l'élévation relative du niveau de mer, le changement du littoral, l'amplitude moyenne de la marée et la hauteur de vague significative (Shaw et al., 1998). Cette étude est réalisée à l'échelle régionale pour la France méditerranéenne à partir de données gratuites et/ou libres. La cartographie issue de nos travaux montre que 45,7 % de la zone d'étude appartient à la catégorie de sensibilité très élevée. Cette étude donne un aperçu de la sensibilité littorale à l'érosion en France méditerranéenne afin de mieux anticiper les changements à venir et les intégrer dans les aménagements des villes méditerranéennes.

A third of the French population is concentrated in the Mediterranean coastal areas (Eurostat, 2012) that host large urban centers, as well as activities such as tourism. The densely populated cities in the French Mediterranean coast face particular risks because of an anticipated sea level rise, that is expected to increase between 7 to 12 cm in the 21st century (Gualdi et al., 2013). The main objective of this work is to determine the most sensitive to erosion coastal regions from a Sensitivity Index (CSI) based on six variables: geomorphology, coastal slope, sea-level rise, shoreline displacement, mean tidal range and significant wave height (Shaw et al., 1998). This study was conducted at the regional level of Mediterranean France from free and / or open data. The outcome of our work shows that 45.7% of the study area belongs to the very high sensitivity category. This study provides an overview of sensitivity to coastal erosion in Mediterranean France in order to better anticipate to future changes and incorporate them into the amenities of the Mediterranean cities.

Impact du changement climatique

Introduction

Les effets du changement climatique sont déjà perceptibles et une des conséquences observée en Méditerranée est la hausse du niveau marin, principalement due à la dilatation thermique de l'océan qui se réchauffe et à la fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires (NOAA, 2016, ONERC, 2015, GIEC, 2013). Le littoral français méditerranéen présente des enjeux forts tels que la démographie, l'urbanisation, les activités socio-économiques mais aussi l'environnement. Plus les zones côtières sont attractives et aménagées, plus leur sensibilité aux risques côtiers (érosion, inondation) s'aggrave du fait notamment de leur artificialisation. Les villes méditerranéennes, par leurs configurations spatiales et géographiques (proximité du littoral, forte dépendance à la ressource en eau, climat favorisant les sécheresses estivales et les événements météorologiques extrêmes, comme les pluies intenses) et par leur croissance, sont considérées comme des milieux particulièrement sensibles, "hot-spot" du changement climatique³ (GIEC, 2013). L'urbanisation du littoral méditerranéen a en effet progressé de façon spectaculaire, avec actuellement un taux d'urbanisation de près de 65%, qui pourrait augmenter jusqu'à 75% en 2025 (Plan bleu, 2015).

Une élévation anticipée du niveau de la mer devrait accélérer la dynamique côtière (NOAA, 2016 ; GIEC, 2013). Pour la Méditerranée, Marcos et Tsimplis (2008) montrent, à partir des données marégraphiques couvrant l'ensemble du XXe siècle, que pour la première moitié du siècle, le taux d'élévation est compris entre 0,12 et 0,15 ± 0,01 cm/an, ce

qui correspond au même ordre de grandeur que celui observé à l'échelle du globe. Pour la seconde moitié du XXe siècle (1960- 2000), ils indiquent un taux d'élévation plus faible en Méditerranée qu'en moyenne globale, et en particulier plus faible que celui observé sur la côte Atlantique, compris entre + 0,15 ± 0,04 cm/an et + 0,03 ± 0,03 cm/an (Fenoglio-Marc 2001 ; Somot et al., 2006). Calafat et Gomis (2009), en utilisant des données altimétriques et à l'aide de techniques d'interpolation, estiment le taux d'élévation de la mer Méditerranée à +0,06 ± 0,01 cm/an sur la période 1961-2000, un chiffre plus élevé que celui donné par Marcos et Tsimplis (2008). Selon Letetrel (2009), le taux de variation du niveau de la mer, estimé à partir de données du marégraphe de Marseille, est de +0,11 ± 0,01 cm/an (1885-2007). Finalement, les taux exacts d'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale mais aussi régionale présents et futurs sont incertains.

Le risque provenant du croisement d'un aléa naturel et d'une vulnérabilité dans un secteur à fort enjeu, la France méditerranéenne est considérée comme très exposée au risque d'érosion côtière, en raison de la présence de zones industrielles, d'espaces à haute valeur écologique et cela en conjonction avec le développement urbain sur son littoral entre 1975 et 1990 (Sabatier, 2001; Samat, 2007 ; Suanez, 1997 ; Certain, 2002 ; Durand, 1998). Il est donc nécessaire d'examiner les alternatives possibles pour la planification et le développement urbain durable (EM-DAT, 2012) afin d'augmenter la capacité d'adaptation dans le contexte de changement climatique (Houghton et al.,

2001). La première étape réside généralement dans la compréhension et la détermination des régions et des zones urbanisées sensibles à une élévation potentielle du niveau de la mer. En effet, déterminer les franges littorales sensibles à l'érosion, dans le cas d'une élévation potentielle du niveau de la mer, permet d'identifier les zones où il faudra probablement penser ou repenser les aménagements urbains littoraux. Diverses approches existent, sous la forme d'indices, et ont été proposées afin de prédire le processus physique de la zone côtière sous l'influence de l'élévation potentielle du niveau de la mer aux échelles nationales et régionales (Karymbalis et Gaki-Papanastassiou, 2008 ; Diez et al., 2007 ; Pendleton et al., 2004 ; Thieler et Hammar-Klose, 1999 ; Shaw et al., 1998 ; Gornitz, 1991). Une première tentative de créer un indice de vulnérabilité du littoral au changement climatique – l'indice de vulnérabilité côtier, comme une mesure relative de la sensibilité physique du système à l'effet de l'élévation du niveau de la mer – a été proposé par Gornitz et Kanciruk (1989) en ce qui concerne les inondations et la sensibilité à l'érosion (Jeftic et al., 1992). Cet indice a été largement utilisé pour évaluer la sensibilité des côtes en Grèce (Karymbalis et Gaki-Papanastassiou, 2008), au Brésil (Szlafsztein et Sterr, 2007), en Europe (Doukakis, 2005), en Inde (Diez et al., 2007), en Argentine (Diez et al., 2007), au Canada (Shaw et al., 1998) et aux Etats-Unis (Pendleton et al., 2004, Thieler et Hammar-Klose, 1999).

Notre étude a donc pour objectif l'évaluation de la sensibilité littorale à l'érosion en France Méditerranéenne dans un contexte de changement climatique, en utilisant au maximum des données gratuites, voire

libres. Elle est réalisée à partir de l'indice de sensibilité côtière (ISC) (Shaw et al., 1998). La cartographie résultante permet de déterminer quel paramètre de l'indice influe le plus sur la sensibilité à l'érosion mais également de régionaliser la frange littorale en cinq catégories de sensibilité (de très faible à très élevée). Le résultat de cet indice permet de réfléchir à l'adaptation côtière au changement climatique grâce à l'identification non seulement de l'ampleur mais aussi de la cause du problème. Cette étude amorce également un discours critique quant à une utilisation plus fréquente des données ouvertes, afin d'examiner leur potentiel dans les études des effets du changement climatique et des adaptations possibles.

³ Une région est qualifiée de « hot-spot » du changement climatique lorsque les effets attendus de ce changement sont particulièrement marqués ou bien que ses impacts sur l'environnement ou différents secteurs d'activité risquent d'être très prononcés. La Méditerranée cumule ces deux caractéristiques.
Source : CNRS, Météo-France. <http://www2.cnrs.fr/sites/communiqu/fichier/mediterranee.pdf>

I. Données et méthodes

I.1 Zone d'étude

La zone d'étude (figure 1) comprend la côte méditerranéenne française (1703 km). Elle est principalement rocheuse à l'Est, avec une séquence de petites baies et des promontoires. Dans cette région, les problèmes d'érosion existent depuis 1961 (Pranzini et Williams, 2013) où les efforts pour l'alimentation artificielle des plages ont été mis en place afin de résoudre le problème (Cannes). Les cailloux, dans les plages comme Cannes et Nice, ont été remplacés à plusieurs reprises au cours des trente dernières années et, aujourd'hui, le niveau de la plage est généralement

sous contrôle (Pranzini et Williams, 2013). La côte est sédimentaire à l'Ouest (Golfe du Lion), avec également la présence de grandes zones humides (Camargue et les lagunes de Languedoc-Roussillon). Au voisinage de la frontière espagnole, la côte est à nouveau rocheuse, avec une succession de baies et de promontoires. Toute la façade méditerranéenne française a été fortement aménagée par l'homme avec notamment dans les dernières décennies une pression anthropique très élevée due à une urbanisation extrême et à l'aménagement de ports, marinas, aéroports, digues plages privées (Bellan - Santini et al., 1994).

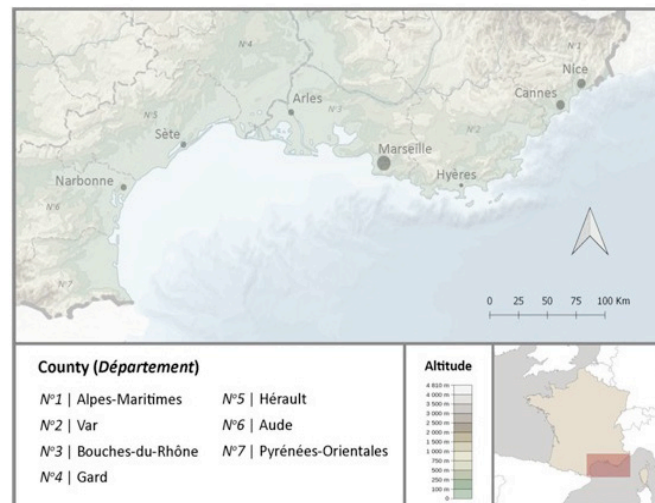


Figure 1. Situation géographique et topographique de la zone d'étude. Source des données cartographiques: INSEE (2012), la NASA STRM (2014), Amante et Eakins NGDC ETOPO1 (2009), modifié par les auteurs.

I.2. L'indice de sensibilité côtière (ISC)

L'Indice de Sensibilité Côtière (ISC) - proposé par Shaw et al. (1998) a été appliqué à la zone d'étude à partir de bases de données de terrain et topographiques existantes (tableau 1), ainsi qu'à partir d'informations géo-environnementales. L'ISC est calculé comme la racine carrée du produit de six variables, lesquelles sont classées en catégories de sensibilité à l'érosion (de 1= Très Faible à 5 Très Élevée), et divisées par leur nombre total (équation 1) :

Équation 1. Formule de calcul de l'ISC

$$(CSI) = \sqrt{\frac{(a * b * c * d * e * f)}{6}}$$

Où:

(a) : la géomorphologie exprime l'érodabilité relative combinée avec les différents types de relief côtier. Les données ont été obtenues à partir de photographies aériennes récentes, d'images Google Earth et de cartes géologiques nationales à l'échelle 1 : 50 000, qui comprennent l'identification, l'enregistrement et la cartographie des reliefs côtiers, mais également les formations géologiques. Le classement de la côte en 5 classes de sensibilité dépend du comportement futur des reliefs côtiers, de leur lithologie dans une élévation potentielle du niveau de la mer.

(b) : la pente côtière, permet d'identifier la sensibilité relative à l'inondation et la rapidité potentielle du retrait littoral : les côtes en pente douce devraient reculer plus vite que les côtes

rocheuses et escarpées (Pilkey et Davis, 1987). La pente côtière est généralement calculée en utilisant le modèle numérique de terrain (MNT) de la zone. Le MNT utilisé est le SRTM à 90 m et les données SRTM, fournies par le consortium pour l'information spatiale (CGIAR-CSI), ont été traitées pour combler les lacunes de données.

(c) : le taux d'élévation relative du niveau de la mer est acquis à partir de l'augmentation (ou diminution) du niveau moyen annuel de l'eau au fil du temps, évalué aux stations marégraphiques le long de la côte, lorsque les données sont disponibles. Cette variable est la combinaison de l'élévation globale du niveau de la mer et de l'isostasie locale et/ou des mouvements de terrain tectoniques. Dans les zones qui s'affaissent et où l'élévation du niveau de la mer augmente, le risque d'inondation est plus élevé. En Méditerranée, nous avons deux types d'observations du niveau de la mer moyen : les mesures locales avec les marégraphes depuis la fin du XIXe siècle, et l'altimétrie par satellite, disponible depuis 1992 (Gualdi et al, 2013). Les données altimétriques par satellite fournissent des mesures précises de la région au niveau local pour un intervalle de temps limité. Dans le cas de la Méditerranée, cet intervalle est de 20 ans. La tendance d'élévation du niveau de la mer en Europe a été obtenue à partir de la base de mesures satellitaires (1992-2013) de l'Agence européenne pour l'environnement (2014).

(d) : le taux d'érosion / accrétion du littoral tente d'évaluer la tendance historique des changements côtiers. L'érosion du rivage où les taux d'accrétion d'une zone côtière peuvent être obtenus par l'observation comparative de photographies aériennes ou d'images satellites multi-temporelles. Le

changement du littoral est une des variables plus complexes parce que la tendance varie considérablement dans le temps (Pendleton *et al.*, 2010). Le taux d'érosion ou d'accrétion du littoral a été dérivé en utilisant de photographies aériennes d'échelle 1 : 68 244 de 1977 et d'images *Google Earth* de 2015. Après la numérisation des côtes de deux périodes différentes, elles ont été superposées afin de détecter les changements du littoral pendant la période 1977-2015.

(e) : l'amplitude moyenne de la marée participe aux risques d'inondation permanente et/ou épisodique. Pour le calcul de cette variable spécifique, les mesures marégraphiques peuvent être utilisées. En général, la Méditerranée est associée à de faibles marées. Cependant, elles génèrent une variation moyenne d'environ 40 centimètres (SHOM, 2016).

et (f) : la hauteur de vague significative moyenne est utilisée comme un indicateur de l'énergie des vagues qui contrôle le budget des sédiments côtiers. Les données moyennes de la hauteur de vague peuvent être obtenues à partir des résultats de simulation de vagues le long du rivage. Les côtes qui reçoivent une grande quantité d'énergie de vagues sont considérées à haut risque, contrairement aux côtes protégées des vagues. Les données ont été obtenues par la base nationale de données de mesure de vague CANDHIS (collaboration entre le port de Nantes St Nazaire, École Centrale de Nantes et CEREMA).

relative du niveau de la mer, amplitude des marées et hauteur significative des vagues). Les variables géologiques décrivent les caractéristiques physiques de la côte et représentent la résistance à l'érosion relative du littoral, sa sensibilité aux inondations et la tendance à long terme de l'érosion. Les variables de processus physiques sont celles relatives aux aléas susceptibles d'engendrer des inondations sur une section particulière de la côte au fil des heures, voire des siècles. Les variables géologiques et physiques sont aussi bien quantitatives que qualitatives (Karymbalis et Gaki-Papanastassiou, 2008).

L'indice comporte cinq classes reposant sur la combinaison des différentes variables prises en compte (Pendleton *et al.*, 2004) et correspondent à des catégories de sensibilité (tableau 1).

Paramètres	Classes de sensibilité côtière					Description / Source
	Très faible Classe 1	Faible Classe 2	Moderée Classe 3	Elevée Classe 4	Très élevée Classe 5	
a	Rochers, côtes aménagées artificiellement	Falaises moyennes, côtes dentelées	Falaises basses, plaines alluviales	Plages de galets	deltas, plages	Images de Google Earth et cartes géologiques nationales (1 : 50 000) (http://portail.cnageology.org)
b (%)	> 12	12 - 9	9 - 6	6 - 3	< 3	SRTM par le Consortium pour l'information spatiale (CGIAR-CSI) (résolution de 90m à l'équateur, et en tuiles de 5° x 5° mosaïquées).
c (mm/an)	< 1,8	1,8 - 2,5	2,5 - 3,0	3,0 - 3,4	> 3,4	La tendance au niveau de la mer absolue dans les mers européennes sur la base de mesures satellitaires (1992-2013) par l'Agence européenne pour l'environnement (EEA), 2014
d (m/an)	> 2,0	1,0 - 2,0	-1,0 - 1,0	-2,0 - -1,0	< -2,0	érosion /accrétion taux littoraux, obtenus par des photographies aériennes d'échelle 1 : 68,244 de 1977 et de <i>Google Earth</i> de 2015. Base de données: http://www.geoportail.gouv.fr
e (m)	> 6,0	4,0 - 6,0	2,0 - 4,0	1,0 - 2,0	< 1,0	Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM), 2016
f (m)	< 0,55	0,55 - 0,85	0,85 - 1,05	1,05 - 1,25	> 1,25	Base nationale de données de mesure de vague - CANDHIS (collaboration entre le port de Nantes St Nazaire, Ecole Centrale de Nantes et CEREMA).

Tableau 1. Classification des paramètres de l'Indice de Sensibilité Côtière (ISC) à partir des cinq catégories de sensibilité côtière de Pendleton *et al.* (2004) et les sources de données.

II. Résultats

1.3. Mise en place de la classification de l'ISC par la méthode des valeurs

La classification des valeurs de l'ISC a été réalisée avec la méthode des valeurs Z - *Z-normalisation* des scores (équation 2). Cette méthode a l'avantage de définir plus facilement la classe moyenne, puisque toutes les valeurs des paramètres de l'indice sont exprimées par le biais de leur distance par rapport à la valeur moyenne.

$$(Z) = \frac{(x - \mu)}{sd}$$

Équation 2. Z- normalisation des scores

Où: (x) : valeurs des paramètres initiales ; (μ) : la valeur moyenne des valeurs des paramètres ; (sd) : l'écart type des valeurs des paramètres

L'ISC contribue à l'identification des paramètres qui affectent plus l'évolution côtière (figure 2). Les valeurs de l'ISC calculées le long du littoral de la France Méditerranéenne varient entre 1,82 et 23,72. Les valeurs sont spatialement orientées en ayant une limite relativement stricte : le sud de notre zone d'étude concentre les valeurs avec une très grande sensibilité à l'érosion, par rapport à l'est où les niveaux de sensibilité sont modérés à faibles. Une grande partie de la côte de la zone d'étude, d'une longueur de 747,7 km (45,7%), est classée comme ayant une très grande sensibilité (figure 3) due à la pente régionale faible, la sensibilité des reliefs côtiers, la lithologie très érodable et l'amplitude

moyenne de la marée. Cette zone comprend la quasi-totalité de la région de Languedoc-Roussillon, ainsi que la partie Ouest de la région Provence-Alpes-Côte-D'azur (PACA), et plus précisément le département des Bouches-du-Rhône. Certaines zones plus petites de sensibilité très grande sont situées dans la région du Var, sur la ville d'Hyères et dans la région des Alpes- Maritimes (villes de Cannes et de Nice). Respectivement 4,6%, c'est-à-dire une longueur totale de 75,3 km sont classés comme ayant une sensibilité grande (La Londe-les-Maures) et 13,4% (correspondant à une longueur de côte de 219,2 km) sont désignés comme de sensibilité modérée (Cassis, La Ciotat, Saint-Cyr-sur-

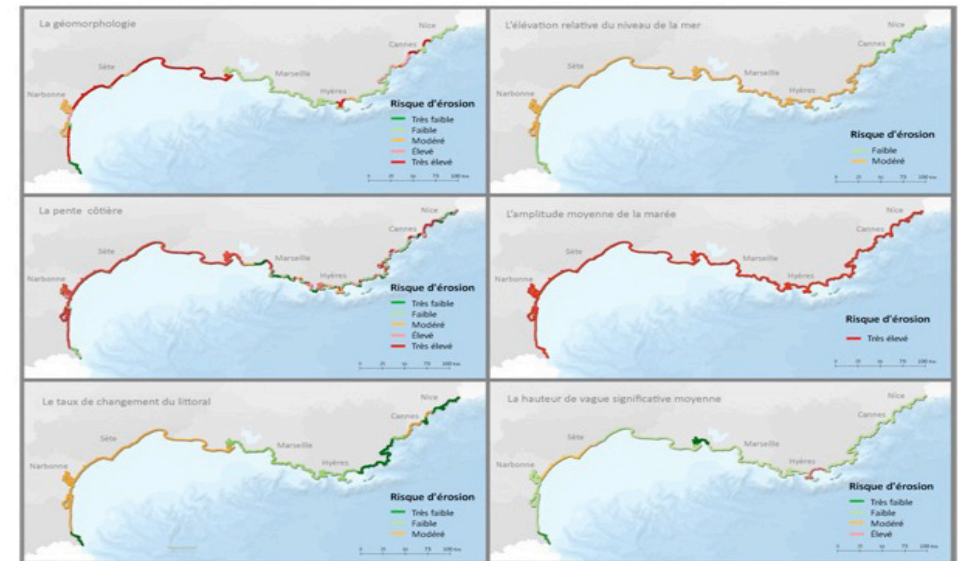


Figure 2. Risque d'érosion pour chaque paramètre de l'indice de la sensibilité côtière
Source des données cartographiques: INSEE, Amante et Eakins NGDC ETOPO1 (2009), modifié par les auteurs.

Mer, Bandol, Sanary-sur-Mer, Six-Fours-les-Plages). Le pourcentage de sensibilité faible équivaut à 30,1% (492,7 km) et comprend les régions à l'ouest de Marseille (Port-Saint-Louis-du-Rhône, Fos-sur-Mer, Port-de-Bouc, Martigues, Sausset-les-Pins, Carry-le-Rouet), ainsi que les régions entre Hyères et Cannes (Le Lavandou, Saint-Tropez, Fréjus). Enfin, 6,2% (correspondant à 101,33 km du littoral) ont été caractérisés comme de sensibilité très faible à l'Est de Nice (Èze) et dans une partie proche de la frontière italienne (Menton).

En matière d'implications socio-économiques liées à la hausse anticipée du niveau de la mer, la plupart des zones urbaines sont concentrées dans les segments côtiers ayant une très grande (catégorie 5) et une grande (catégorie 4) sensibilité (Figure 3). Cela se produit principalement en raison du fait que de nombreuses villes en France ont été développées dans des endroits avec de longues plages de sable fin qui ont attiré des touristes de toute l'Europe. Ces zones, cependant, sont sujettes à l'érosion en raison de leurs segments côtiers (alluviaux). De plus, les interventions anthropiques sur la plage sous forme de ports, digues, etc. aggravent les phénomènes d'érosion. Afin d'avoir une information à l'échelle départementale, le tableau 2 présente le pourcentage côtier de chaque département qui appartient à chaque catégorie de la sensibilité des côtes (de 1 = très faible à 5 = très élevé). On peut observer que le département le plus vulnérable physiquement est l'Hérault : il se caractérise

par des niveaux très élevés de sensibilité côtière à l'érosion⁴ (classe 5 de 100%), tandis que l'Aude et les Pyrénées-Orientales suivent avec 90,43% et 62,5%. Cela se produit lorsque la pente régionale est faible, et lorsqu'il existe une sensibilité des reliefs côtiers avec principalement une lithologie très érodable.

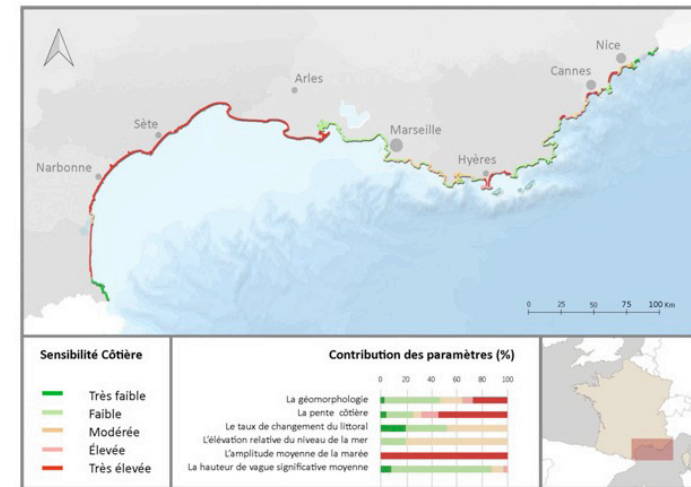


Figure 3. Indice de Sensibilité Côtière (ISC) de la France Méditerranéenne
Source des données cartographiques: INSEE, Amante et Eakins NGDC ETOPO1 (2009), modifié par les auteurs.

Région	Département	Catégories de sensibilité (%)				
		Très Faible Classe 1	Faible Classe 2	Modérée Classe 3	Élevée Classe 4	Très Élevée Classe 5
Languedoc-Roussillon	Pyrénées-Orientales	37,5	0	0	0	62,5
	Aude	0	0	9,57	0	90,43
	Hérault	0	0	0	0	100
	Gard	0	0	0	0	100
Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA)	Bouches-du-Rhône	0	47,27	13,62	0	39,11
	Var	0	43,66	23,7	22,58	10,06
	Alpes Maritimes	36,47	28,84	9,77	0	24,92

Tableau 2. Catégories et pourcentages d'ISC du littoral de chaque département

⁴ Le département du Gard n'est pas caractérisé comme le plus vulnérable car il ne dispose que d'une municipalité côtière

Conclusion

Bien que l'élévation du niveau de la mer ne soit pas le seul facteur de changement du littoral, elle pourrait modifier radicalement les conditions de vie et la prospérité des communautés côtières dans les décennies à venir. Cela pourrait entraîner une série d'impacts qui ont été évalués de diverses manières. Les évaluations intégrées, à partir d'indices empiriques, les plus utiles aux décideurs politiques, sont moins développées. Pour estimer la sensibilité des zones côtières à une élévation potentielle du niveau de la mer, l'élaboration d'indicateurs (expressions mathématiques), pour quantifier la sensibilité côtière est indispensable. Parmi les indicateurs empiriques, le plus souvent utilisé est l'indice de sensibilité des zones côtières (ISC) qui évalue les caractéristiques géomorphologiques et océanographiques des zones côtières. L'estimation de cet indicateur pour la côte méditerranéenne française a montré que près de la moitié de sa longueur totale appartient à la catégorie de risque très élevé, tandis que le reste de la côte est caractérisée par la sensibilité faible et modérée. Ces résultats rendent impérative la nécessité d'études centrées sur les zones particulièrement sensibles de France méditerranéenne côtière à une échelle plus détaillée, au moins pour les zones avec des valeurs élevées de l'ISC qui se caractérisent par des activités socio-économiques importantes (zones urbaines, terres agricoles, côtes exploitées touristiquement) mais aussi par des côtes écologiquement importantes, comme les zones humides côtières.

Dans la présente étude, la recherche appliquée a été volontairement menée à l'échelle régionale en raison de la disponibilité des données nécessaires à l'analyse. Bien que l'utilisation de données ouvertes « *open*

data » permette de nouvelles approches et analyses, il faut toutefois toujours faire preuve de prudence et de recul quant à ces données d'un nouveau genre en matière de précision, d'exhaustivité ou de formalisme. De plus, tous les facteurs n'étaient pas disponibles en « *open data* » et un travail de cohérence spatiale et temporelle a été réalisé au préalable. Cette étude contribue en effet à la réflexion sur les villes littorales méditerranéennes dans le but de prioriser les efforts visant à améliorer la résilience naturelle de la côte, mais aussi à s'adapter au changement climatique en réfléchissant à des aménagements durables prenant en compte les variables qui contribuent le plus à la sensibilité côtière.

Le développement d'une base de données SIG spatiale, qui recueille et élabore les variables impliquées dans le calcul de l'indice à différentes échelles, est considéré comme nécessaire. En outre, de nouveaux paramètres pourraient être mis en œuvre dans la procédure afin d'aider les planificateurs à mettre en évidence les municipalités côtières sensibles. L'ISC pourrait être renouvelé et élargi afin d'intégrer de nouvelles données disponibles, telles que les données d'altitude, des ondes de tempête, de budget des sédiments. En outre, étant donné que la sensibilité de la côte est affectée par les hommes dans une large mesure, de nouvelles variables tenant compte des actions anthropiques, telles que les structures de contrôle de plage (épaves et digues), les utilisations des terres (routes, bâtiments, services publics), pourraient également être mises en œuvre. Enfin, la précision de la méthode peut être améliorée avec l'attribution de poids à certaines variables.

Bellan-Santini, D., Lacaze, J.C., Poizat, C., 1994 : Les biocénoses marines et littorales de Méditerranée, synthèse, menaces et perspectives. *Patrimoine Naturels*, 19, pp. 1-246.

Calafat, F.M. & Gomis, D. (2009) : Reconstruction of Mediterranean Sea level fields for the period 1945-2000. *Global Planet. Change*, 66 (3-4), 225-234.

Certain R., (2002) : *Morphodynamique d'une côte sableuse micro-tidale à barres : le golfe du Lion (Languedoc-Roussillon)*. Thèse, Université de Perpignan, France, 189p.

Diez, P.G., Perillo, G.M.E. & Piccolo, C.M. (2007) : Vulnerability to sea-level rise on the coast of the Buenos Aires Province. *Journal Coastal Research*, 23, 19-126.

Doukakis, E. (2005) : Coastal vulnerability and sensitivity parameters. *European Water*, 2005, 11, 3-7.

Durand P., (1998). Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès plage à Saint Cyprien (Roussillon, France), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, 155-166.

EEA. 2006 : *The Changing Faces of Europe's Coastal Areas*. European Environment Agency, Copenhagen.

EM-DAT, 2012 : *The OFDA/CRED International Disaster Database*. Université Catholique de Louvain, Brussels (Belgium).

Eurostat, 2012 : Products Statistics in Focus. Nearly half of the population of EU countries with a sea border is located in coastal regions - Issue number 47/2009. Available in: <http://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-statistics-in-focus/-/KS-SF-09-047>

Fenoglio-Marc, L. 2001 : Analysis and representation of regional sea-level variability from altimetry and atmospheric-oceanic data. *Geophysical Journal International*, 145, 1-18.

GIEC / IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013 : Summary for policy-makers. In *Climate change: The physical science basis*. Available at: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf [Last access 9/2015].

Gornitz, V. & Kanciruk, P., 1989 : Assessment of global coastal hazards from sea-level rise: Coastal Zone'89. In *Proceedings of Sixth Symposium on Coastal and Ocean Management*, ASCE, Charleston, South Carolina, 1345-1359.

Gornitz, V., 1991 : Global coastal hazards from future sea-level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (Global and Planetary Change Section), 89, 379-398.

Gornitz, V.M., Daniels, R.C., White, T.W. & Birdwell, K.R., 1994 : The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast. *Journal of Coastal Research Special Issue*, 12, 327-338.

Gualdi, S. et al., 2013 : **Future Climate Projections. Chapter 3. Volume 1:** Air, Sea and Precipitation and Water. *Regional Assessment of Climate Change in the Mediterranean*. Antonio Navarra and Laurence Tubiana Editors.

Houghton JT et al. (eds), 2001 : *The scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. *Climate Change*, Cambridge University Press, 525-582.

Jeftic, L., Milliman, J. & Sestini, G., 1992 : *Climatic Change and the Mediterranean*. UNEP, 645p.

Karymbalis, E. & Gaki-Papanastassiou, K., 2008 : Geomorphological study of the river Peneus, Kalama, Evinos and Mornos (in greek). *Proceedings of the 4th National Conference for Management and Improvement of Coastal Zones*. Edition of the Laboratory for Harbour Works, NTUA, 86-94.

Letetrel C., 2009 : **The Marseille tide gauge** : recovery and analysis of high frequency sea level data from 1885. Final report for MedCLIVAR - Exchange Grant 1928.

Marcos, M. & Tsimplis, M.N., 2008 : *Coastal sea-level trends in Southern Europe*. *Geophysical Journal International*, 175, 70-82.

A -National Centers for Environmental Information, 2016 : *State of the Climate: Global Analysis for February*. Published online March 2016, retrieved on May 10, 2016 from <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201602>.

Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique – ONERC, 2015 : *Le littoral dans le contexte du changement climatique*. Rapport au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris.

Pendleton, E.A., Thieler, E.R. & Williams, S.J., 2004 : *Coastal vulnerability assessment of Cape Hattaras National Seashore (CAHA) to sea-level rise*. USGS Open File Report 1064.

Plan bleu, 2015 : *Climate risk management tools: Towards a multi-scale coastal risk index for the Mediterranean*. http://planbleu.org/sites/default/files/publications/notes28_en.pdf / Accessed 04.07.2016.

Pilkey OH, Davis TW, 1987 : An analysis of coastal recession models: North Carolina coast. In: Nummedal D, Pilkey OH, Howard JD (eds) *Sea-level fluctuation and coastal evolution*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) *Special Publication*, 41, Tulsa, Oklahoma, pp 59–68

Pranzini, E. and Williams, A., 2013 : *Coastal Erosion and Protection in Europe*. London:Routledge

Sabatier F., 2001 : *Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du Delta du Rhône*. Thèse, Université Aix-Marseille III, France, 273p.

Samat S., 2007 : *Impact des aménagements en enrochement sur la morphogénèse côtière : quelques cas dans le Golfe du Lion*. Thèse, Université Aix-Marseille III, France, 341p..

Suarez S., 1997 : *Dynamiques sédimentaires récentes et actuelles de la frange littorale du delta du Rhône*. Thèse, Université Aix-Marseille III, France, 284p.

Shaw J., Taylor R.B., Forbes D.L., Ruz M.H., Solomon S., 1998 : Sensitivity of the Canadian Coast to Sea-Level Rise. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 505, 114

Somot, S., Sevault, F., Déqué, M., 2006 : Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the 21st century using a high-resolution ocean circulation model. *Clim. Dyn.*, 27 (7–8), 851–879. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-006-0167-z>

Szlafsztein, C. & Sterr, H., 2007 : A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil. *J. Coast. Conserv.*, 11, 53-66.

Thieler, E.R. & Hammar-Klose, E.S., 1999 : *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise*, U.S. Atlantic Coast, U.S. Geological Survey, Open-File Report, 99-593.

Mercantour

Modélisation

Biogéographie

Rôle des variables climatiques dans une approche de modélisation de l'impact du changement climatique sur la distribution de trois espèces végétales dans le Mercantour (Alpes franco-italiennes)

Matthieu Vignal, Julien Andrieu

Université Nice Sophia Antipolis (UMR ESPACE)
98, bd E. Herriot, 06204 Nice Cedex
Matthieu.VIGNAL@unice.fr ; Julien.ANDRIEU@unice.fr

Rôle des variables climatiques dans une approche de modélisation de l'impact du changement climatique sur la distribution de trois espèces végétales dans le Mercantour (Alpes franco-italiennes)

Le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) fait état de nombreuses conséquences sur la biodiversité terrestre induite par l'élévation des températures. La démarche modélisatrice spatialement explicite est une façon d'établir des prévisions et d'aller au-delà de l'observation de terrain en s'émancipant des contraintes de celle-ci. Les modèles dynamiques, et les données climatiques à basse résolution spatiale, permettent de mettre en place des modèles capables de formaliser les modifications des aires de distribution des espèces végétales par la simulation des processus biologiques de ces dernières. Or, ce type de modèle ne permet pas, encore, d'établir des anticipations probables des aires de distribution futures des espèces végétales. Afin d'accorder un crédit plus important à ce type de modèle, l'objectif de cette étude est d'estimer le poids des variables climatiques dans cette approche modélisatrice. La méthode mise en place consiste, dans un premier temps, à produire des simulations cartographiques d'aires de distribution résultant de la variation des paramètres des variables climatiques. La seconde étape, analyse statistiquement ces résultats pour estimer le poids des variables climatiques. Les résultats amènent à se questionner sur l'utilisation des indices de synthèse au sein de ce type de démarche modélisatrice.

The last IPCC report (Intergovernmental Panel on Climate Change) presents numerous consequences of temperature elevations on terrestrial biodiversity. Spatial modeling is a way to forecast and to go beyond field observation by emancipating constraints thereof. Dynamic models and climate data with low spatial resolution, allow to develop models capable of formalizing the changes of plant species distribution by the simulation of their biological processes. However, this model does not still allow to establish the probable anticipations of future plant species distribution. To validate this model, the aim of this study is to estimate the weight of climate variables. The method involves, firstly, at produce cartographic simulations of distribution areas resulting from changes in climatic variables settings. The second step statistically analyzes these results to estimate the weight of climate variables. The results raise the question of the use of synthetic index.

Tests de sensibilité

Impact du changement climatique

Introduction

L'histoire de la vie sur terre est marquée par plusieurs extinctions massives dont l'une des causes principales est le changement climatique (Raup et Sepkoski, 1982). Ces changements climatiques, trop rapides, ne permettent pas aux espèces de s'adapter ou de migrer (Ramstein, 2015). Les experts du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) s'accordent à dire qu'aujourd'hui, l'homme et ses activités sont à l'origine d'un changement climatique plus rapide que les précédents, dont l'impact sur la biodiversité est à étudier (GIEC, 2014). Les Hotspots de biodiversité⁵ reconnus au niveau mondial, tel que le Bassin Méditerranéen (Myers et al, 2000), sont concernés par cette menace. Il en va de même pour les foyers de diversité en plantes dont font partie les Alpes (WWF et IUCN, 1997). Ce territoire présente de nombreux outils territoriaux permettant de protéger les espèces végétales et l'intégrité de leurs milieux. Ces outils de protection s'avèrent nécessaires mais leur efficacité face à une telle menace est à questionner. En effet, les espèces végétales dans les Alpes du Sud, sont principalement distribuées à travers le gradient bioclimatique altitudinal (Ozenda, 1985). L'évolution des températures va alors modifier la localisation géographique des seuils bioclimatiques tels que ceux de la limite létale ou des limites de l'optimum écologique, et ce, pour une espèce étudiée comme pour toutes les espèces qui sont en interaction avec celle-ci (Lenoir et al, 2008 ; Cassaza et al, 2010). Il est donc nécessaire d'étudier, d'une part, les capacités de propagation et de survie au-delà de l'aire de distribution actuelle, et d'autre part, les processus de stérilité et de mortalité (Lemée, 1978).

Au sein des nombreuses études de l'impact du changement climatique sur la biodiversité, la démarche modélisatrice spatialement explicite représente un domaine actif. C'est un outil de recherche qui permet, en outre, de s'émanciper des contraintes du terrain et d'aller au-delà des simples observations grâce à la formalisation de prédictions (Wainwright et Mulligan, 2004). Ces modèles dynamiques sont, entre autres, permis par la disponibilité de données climatiques sur des échelles globales ou macro régionales et des longues échelles temporelles. Toutefois, ces données présentent un inconvénient majeur : une mauvaise résolution spatiale. Les modèles non dynamiques postulent qu'il existe une étroite concordance entre les aires de distribution et les habitats dans l'espace et dans le temps. Ainsi, le fonctionnement de ces modèles repose sur l'application de règles de décalage de la niche écologique pour déterminer, à partir d'une « aire de distribution actuelle », des « aires de distribution futures potentielles » (Coudun, 2005 ; Garbolino, 2012). Or, selon Guisan et Thuiller (2005), cette démarche est limitée par des verrous scientifiques et la recherche doit désormais intégrer les facteurs biotiques et les processus de migration au sein de modélisations dynamiques.

Les cartes climatiques à fine résolution spatiale permettent de mettre en place, de façon plus optimale, des modèles dynamiques qui possèdent pour objectifs de formaliser la modification des aires de distribution (Vignal et Andrieu, 2016). Les modifications des aires de distribution sont le résultat de processus biologiques qui s'établissent à l'échelle des populations et qui sont régis

par des variations climatiques locales. Dans ce type de modèles, les aires de distribution actuelles sont modifiées au fil du changement climatique, à condition que les processus biotiques (mortalité et dissémination des graines) le permettent (Vignal et Andrieu, 2016). En effet, le modèle permet de simuler la production, la dispersion et la germination des graines, mais également la mortalité des espèces végétales (Vignal et Andrieu, 2016). Il apparaît d'une part, que les résultats des simulations ne présentent pas de grandes contradictions avec ceux issus des modèles non dynamiques et, d'autre part, que les simulations selon un scénario de climat stable génèrent, après une dizaine d'années, des aires de distribution significativement stables (Vignal et Andrieu, 2016). Ces résultats témoignent de la relative robustesse de l'outil.

Cependant, les paramétrages fondés sur la littérature, sans confrontation au terrain, sont une limite forte dans la fiabilité des résultats. Dès lors, ce type d'outil ne permet pas encore d'établir des anticipations probables des aires de distribution des espèces végétales. Afin d'accorder un crédit plus important aux sorties de ce modèle, la caractérisation du comportement de ce dernier, et notamment du rôle des variables climatiques, s'avère nécessaire. Le format de cet article ne permet pas de décrire de façon complète la méthode de modélisation, déjà publiée par ailleurs (Vignal et Andrieu, 2016), seul l'objectif de cette publication, à savoir estimer le rôle des variables climatiques sur les modifications des aires de distribution futures potentielles des espèces végétales étudiées, sera ici développé.

⁵ Un point chaud ou hotspot de biodiversité est une zone géographique contenant au moins 1 500 espèces végétales endémiques mais qui a déjà perdu au moins 70 % des espèces présentes dans leur état original. 34 points chauds de la biodiversité sont identifiés. Site du Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 22 décembre 2010 (mis à jour le 25 janvier 2016). <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Qu-est-ce-qu-un-point-chaud-de-la.html>

I. Site d'étude et espèces

I.1. Site d'étude

Le site d'étude, dans les Alpes du Sud franco-italiennes (figure 1) entre 300 et 3 200 m, est caractérisé par le contact entre le climat méditerranéen et le climat semi-continentale dans le Piémont Italien et, bien évidemment, un large étagement altitudinal des milieux de part et d'autre de ce contact. La topographie est très escarpée, tant depuis la mer jusqu'aux sommets du massif de l'Argentera-Mercantour, que de ces derniers à la plaine du Pô, ce qui crée un étagement altitudinal de forte amplitude dans un espace géographique restreint. Cette configuration biogéographique justifie l'intérêt de ce site pour une étude des aires de distribution et de leurs possibles modifications. La juxtaposition en une courte distance de trois types de climat (alpin,

continental et méditerranéen), associée à une grande diversité géologique, est responsable d'une grande richesse spécifique (Alexandre et Génin, 2011). Les évolutions tectoniques, les changements climatiques depuis le Tertiaire, et plus récemment l'hétérogénéité du paysage sont d'autres facteurs expliquant cette biodiversité (Thompson, 2005).

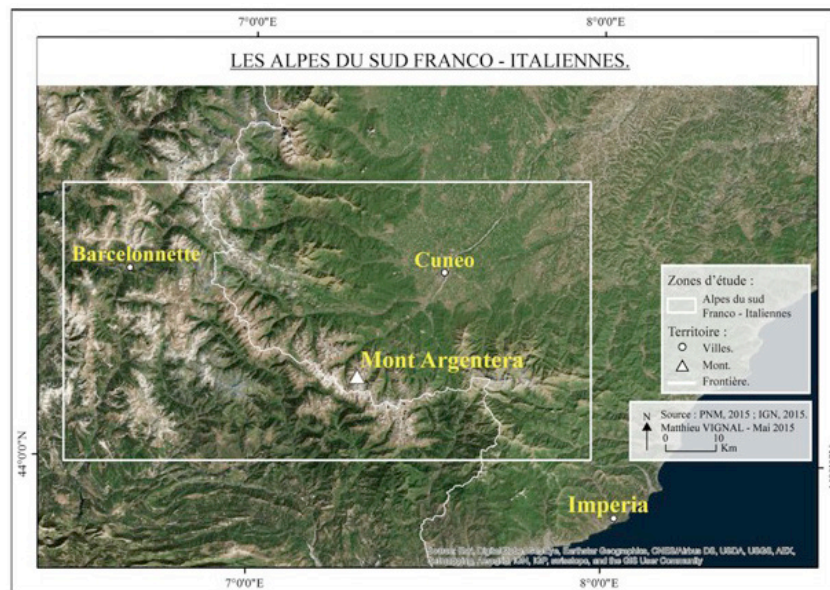


Figure 1. Zone d'étude.

I.2. Espèces

Trois espèces sont étudiées. Ce nombre se justifie par la volonté de modéliser avec précision les processus régissant les dynamiques de ces populations. Les espèces qui feront l'objet de cette étude sont :

Dryas octopetala L., 1753 (figure 2) ; (Dryade à huit pétales)

Pinus cembra L., 1753 (figure 3) ; (Pin cembro)

Pinus uncinata Mill. ex Mirb., 1805 (figure 4). (Pin à crochets)

Le choix s'est porté sur ces espèces car les limites de leurs aires de distribution, dans le massif Argentera-Mercantour, sont clairement expliquées par des seuils climatiques. En effet, *Dryas octopetala* est une espèce définie comme arctico-alpine, cependant, les relevés

SILENE montrent une distribution de 1 400 à 2 700 mètres ; *Pinus cembra* et *Pinus uncinata* sont des espèces sub-alpines, et les relevés SILENE montrent des distributions respectivement de 1 300 à 2 500 mètres, et de 1 400 à 2 400 mètres. De plus, leurs modes de dissémination des graines diffèrent (anémochores, barochores et ornithochores)⁶.



Figure 2. Dryade à huit pétales. *Dryas octopetala* L., 1753 (Remaud, 2012).



Figure 3. Pin cembro. *Pinus cembra* L. 1753 (Barthelemy, 2014).



Figure 4. Pin à crochets. *Pinus uncinata* Mill. Ex Mirb., 1805 (Bigou, 2013).

⁶ Anémochore : dissémination par dispersion par le vent
Barochore : dissémination sous l'effet de leurs propres poids, par gravité.
Ornithochore : dissémination par les oiseaux.

II. Données

II.1. Données floristiques

Les relevés botaniques proviennent de la base de données SILENE Flore. Cette base de données – présente sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et la région Occitanie – est gérée par le Conservatoire botanique national de Porquerolles et le Conservatoire botanique national Alpin. Les relevés proviennent de l'activité de ces conservatoires botaniques et de leurs organismes partenaires (parc nationaux, office national des forêts, etc.) mais également des botanistes amateurs et des recherches universitaires. Les Conservatoires assurent le formatage informatique et la validation taxonomique avant de les diffuser sur SILENE Flore. Les relevés présents sur cette base de données ont été réalisés entre 1860 et 2016. Il convient de préciser que la fin du XIXe siècle et la période 1985/1986 présentent un faible nombre de relevés botaniques. Ils fournissent la base de connaissance ponctuelle des présences des trois espèces.

II.2. Données écologiques

II.2.1. Données brutes

Les données écologiques brutes se composent de données climatiques, topographiques et écologiques.

D'abord, les données climatiques brutes sont issues du modèle de circulation générale ALADIN-Climat du CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques). Ce modèle possède une résolution spatiale de 12 km sur le Sud-Est de la France. ALADIN-Climat propose des simulations du climat futur selon divers scénarios d'évolution socio-économique et démographique. À chacun des scénarios sont associées des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'intensité différente.

Le scénario retenu est le scénario SRES⁷ A1B qui prévoit un doublement des émissions d'ici 2050 puis une stabilisation de ces derniers. Il repose sur l'hypothèse d'abord, d'une croissance économique très rapide, ensuite, de l'évolution puis de la régression de la population mondiale, et enfin, de l'apparition rapide de nouvelles technologies permettant, entre autres, une utilisation équilibrée des différentes ressources énergétiques (GIEC, 2007). C'est un scénario qualifié d'intermédiaire ou « d'équilibre », il n'est ni le plus pessimiste, ni le plus optimiste⁸.

L'objet de cet article portant sur le test d'un outil capable de simuler les processus biologiques des espèces végétales, ont été simulées ici des variations thermiques d'amplitudes supérieures aux différences entre l'actuel et les scénarios ou entre les différents scénarios. Pour cette raison, à cette étape, le choix du scénario de référence importe peu. Les résultats du modèle ne pouvant être considérés, pour le moment, comme des simulations des conséquences du changement climatique sur la distribution spatiale des espèces végétales, il n'a pas été jugé utile de sélectionner différents scénarios climatiques. En revanche, l'objectif final est bien, une fois que l'outil sera considéré satisfaisant, de lancer des simulations selon les différents scénarios les plus récents RCP, en mettant en valeur le plus vraisemblable.

Les données sur les directions et les forces des vents proviennent de la station de Millefont⁹, elles ont été récoltées à 12 h UTC (14 heures légales) et à 03 h UTC (5 heures légales) des mois de mai à août pour l'année 2014 (Météo France¹⁰). Ensuite, les données topographiques sont dérivées d'un MNT créé *ad hoc* par la concaténation de MNT de l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN¹¹) et du Géoportale nazionale (GN¹²). Enfin, les données géologiques proviennent du programme international de surveillance géologique OneGeology.

II.2.2. Données climatiques insérées dans le modèle

La première variable climatique insérée dans le modèle est un indice qui a été élaboré pour synthétiser la quantité importante de variables écologiques. Cet indice permet d'évaluer la probabilité de chaque pixel à être potentiellement occupé par une espèce. Il prend en compte des variables climatiques, géologiques et topographiques séparément tout en permettant la prise en compte de la compensation entre facteurs. Chaque facteur retenu est rééquilibré entre 0 – les seuils létaux – et 1 – l'optimum – (Vignal et Andrieu, 2016). Une pondération est établie en fonction d'un calcul d'analyse fréquentielle qui permet d'établir l'efficacité des différentes variables écologiques par le quotient de la variance entre les échantillons et la variance générale (Godron, 2012).

Ensuite, les températures minimales actuelles et futures des mois de juin et de septembre se sont avérées essentielles, elles conditionneraient l'entrée et la sortie en période végétative des espèces étudiées. Ainsi, des températures trop froides entraîneraient l'activation du processus de mortalité infantile. Enfin, des données sur le vent sont intégrées notamment grâce à l'utilisation d'une rose des vents qui expliquerait le processus de dissémination des graines.

⁷ Second Report on Emission Scenario.

⁸ Nous sommes conscients, devant un avenir aussi incertain, que les différents scénarios du GIEC sont équiprobables (GIEC, 2007). À ce titre, il est recommandé d'utiliser un éventail de scénarios permettant de réduire l'incertitude concernant l'élévation des températures (GIEC, 2007). Nous sommes également conscients que les scénarios SRES du GIEC ont depuis été remplacés par les scénarios RCP (GIEC, 2014) qui font référence à l'évolution du forçage radiatif (le scénario RCP 6.0 étant celui qui se rapproche du scénario SRES A1B). Ces derniers n'ont pas été utilisés dans cette étude, car celle-ci repose sur la création antérieure de cartes climatiques sur les températures minimales et maximales moyennes mensuelles à une résolution de 90 mètres d'après le scénario SRES A1B. Devant la charge de travail que représentait la création de nouvelles cartes climatiques, il a été décidé de conserver les anciens scénarios.

⁹ Station 06153400 de MILLEFONTS-NIVOSE (alt. : 2430m ; lat. : 44,118°N ; long. : 7,192°E), econde Report on Emission Scenario.

¹⁰ <http://www.meteofrance.com/accueil>

¹¹ <http://professionnels.ign.fr/>

¹² <http://www.pcn.minambiente.it/GN/fr/>

III. Méthode

Dans le but d'estimer le rôle des variables climatiques, la méthode se décompose en deux étapes. La première étape consiste à produire des simulations cartographiques d'aires de distribution résultant de la variation des paramètres des variables climatiques. La seconde étape analyse statistiquement ces résultats pour évaluer le poids des variables climatiques.

III.1. Tests de sensibilité des variables climatiques

Différentes méthodes permettent d'attester la validité d'un modèle, et donc de développer les connaissances sur le comportement de ce dernier (Edmonds et Meyer, 2013). Il peut s'agir de décomposer le modèle, de lancer le modèle dans des conditions différentes ou encore de réaliser des tests de sensibilités des paramètres (Edmonds et Meyer, 2013). Cette dernière méthode consiste à faire varier séparément les paramètres pour, par la suite, comparer les résultats à une simulation de référence afin de mettre en évidence les changements majeurs (Edmonds et Meyer, 2013). Au contraire des deux premières méthodes décrites ci-dessus – dont l'objectif est de caractériser le comportement général du modèle – la méthode « tests de sensibilité » sélectionnée est centrée sur le rôle de chacune des variables présentes dans le modèle. En ce sens, cette méthode est adaptée à l'évaluation du rôle des variables climatiques puisqu'elle permet d'attribuer un poids à chacune d'entre elles.

Ainsi, la première étape de la méthode consiste, d'abord, à réaliser une simulation

de référence. Les paramétrages des variables climatiques de cette simulation de référence sont mentionnés dans le tableau 2 (voir en partie 4.3.). Ils sont issus pour la biologie des espèces d'un ensemble de ressources bibliographiques, que ce soit un ouvrage (Rameau et al, 1999) ou des articles scientifiques (Fourchy, 1968 ; Wada, 1999 ; Theurillat et Guisan, 2001 ; Karlsdottir et Aradottir, 2006 ; Brodbeck et Gugerli, 2011 ; Viglas et al, 2013). Le volet climatique de cette simulation est paramétré en fonction du scénario A1B (GIEC, 2007).

Ensuite, ont été testés différents paramétrages dont les résultats sont comparés à ceux de la simulation de référence. Sur chaque paramètre climatique ont été testées deux variations significativement différentes : une variation dite minimale (Mn) et une dite maximale (Mx). Les valeurs de ces paramétrages sont visibles dans le tableau 1 (Mn et Mx). Ce sont dix simulations qui ont été réalisées, représentant des paramétrages climatiques différents. Encore une fois, il convient de rappeler que ceux-ci ne sont pas à considérer comme des « scénarios » au sens courant de la climatologie, mais bien comme des tests méthodologiques. De plus, les « scénarios » climatiques utilisés dans les différentes simulations sont, dans cette étude, mentionnés en tant qu'intervalles de température. L'utilisation d'une température moyenne est à proscrire, car elle ne rend pas compte de l'hétérogénéité spatiale des températures sur la zone étudiée (figure 5).

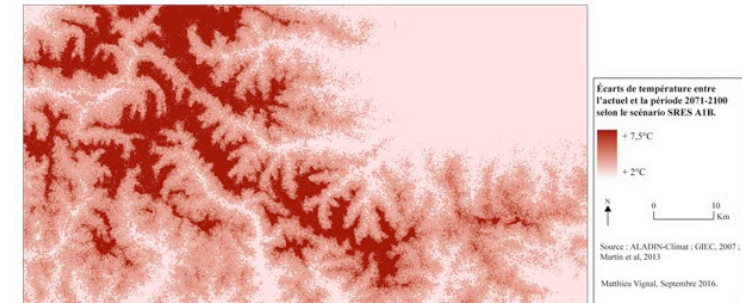


Figure 5. Écarts entre les températures minimales moyennes actuelles du mois de juin (selon la période de référence 1961-1990), et celles de la période 2071-2100 selon le scénario SRES A1B du GIEC. Données obtenues par downscaling statistique du modèle ALADIN-Climat (Martin et al, 2013).

Ainsi, les deux premières simulations établissent une élévation des températures du mois de juin comprise, respectivement, entre +0,6°C et +1,8°C (Mn), et entre +5°C et +14°C (Mx) par rapport aux températures actuelles. Cette variable, dans le modèle, conditionne la phase d'entrée en période végétative des espèces alpines limitées par le froid assez tard dans le printemps. Les simulations trois et quatre mettent en place une élévation des températures du mois de septembre, phase de sortie de période végétative, comprise, respectivement entre +0,6°C et +1,2°C (Mn), et entre +5°C et +10°C (Mx), par rapport aux températures actuelles.

Ensuite, la simulation cinq mets en place des conditions climatiques plus contraignantes pour les espèces végétales par rapport à la simulation de référence. L'indice de viabilité est augmenté de 5 (Mn), soit en équivalent température, une augmentation de 1°C par rapport aux conditions climatiques actuelles. La simulation six, établit des conditions

climatiques plus clémentes pour les espèces végétales, l'indice de viabilité est augmenté de 25 (Mx), soit en équivalent température, une augmentation comprise entre 5 et 7°C, selon la localisation, par rapport aux conditions climatiques actuelles.

Il convient de rappeler que l'augmentation de l'indice de viabilité correspondrait, en quelque sorte, en plus de l'augmentation des températures, à une réduction des autres contraintes écologiques, qu'elles soient topographiques ou géologiques. Nous sommes conscients que la modification de la géologie ou de l'altitude en une centaine d'années est un scénario improbable, c'est pourquoi nous tenons à rappeler, une nouvelle fois, le caractère méthodologique de ces simulations.

Enfin, les simulations sept, huit, neuf et dix concernent des modifications de direction et de force du vent. La simulation sept correspond à un vent de sud dominant, au contraire de la

simulation huit qui correspond à un vent d'est dominant. La simulation neuf correspond à un vent faible, capable de déplacer les graines de 200 mètres à 2 kilomètres (Mn) selon l'espèce (tableau 1), et la simulation dix, correspond à un vent fort, capable de déplacer les graines jusqu'à 4 kilomètres (Mx) du lieu où elles ont été produites.

Paramètres	Dryas octopetala			Pinus cembra			Pinus uncinata		
	Rf	Mn	Mx	Rf	Mn	Mx	Rf	Mn	Mx
Simulations									
Force du vent (pixel)	10	1	20	*	*	*	2	10	20
Direction vent sud (%)	12,5	45,1	6	12,5	45,1	6	12,5	45,1	6
Direction vent nord-est (%)	6	13,6	12,5	6	13,6	12,5	6	13,6	12,5
Direction vent est (%)	5,8	6,5	45,1	5,8	6,5	45,1	5,8	6,5	45,1
Direction vent sud-est (%)	3,8	6,5	13,6	3,8	6,5	13,6	3,8	6,5	13,6
Direction vent nord (%)	45,1	12,5	6,5	45,1	12,5	6,5	45,1	12,5	6,5
Direction vent sud-ouest (%)	13,6	6	6,5	13,6	6	6,5	13,6	6	6,5
Direction vent ouest (%)	6,5	6	6	6,5	6	6	6,5	6	6
Direction vent nord-ouest (%)	6,5	3,8	3,8	6,5	3,8	3,8	6,5	3,8	3,8
Température de juin (°C)	[+2,3 ; +7,5]	[+0,6 ; +1,8]	[+5 ; +14]	[+2,3 ; +7,5]	[+0,6 ; +1,8]	[+5 ; +14]	[+2,3 ; +7,5]	[+0,6 ; +1,8]	[+5 ; +14]
Température de septembre (°C)	[+1,9 ; +5]	[+0,6 ; +1,2]	[+5 ; +10]	[+1,9 ; +5]	[+0,6 ; +1,2]	[+5 ; +10]	[+1,9 ; +5]	[+0,6 ; +1,2]	[+5 ; +10]
Indice de viabilité (indice)	+ 10	+ 5	+ 25	+ 10	+ 5	+ 25	+ 10	+ 5	+ 25

Tableau 1. Paramétrages sélectionnés pour la réalisation des tests de sensibilité. Le caractère « * » signifie que le paramètre ne s'applique pas pour l'espèce végétale, en raison de chorologie différente. Les valeurs mentionnées pour les températures de juin et de septembre ainsi que pour l'indice de viabilité sont comparées aux valeurs actuelles. Le caractère Rf correspond à la simulation de référence. Le caractère Mn correspond aux premières variations des différents paramètres. Le caractère Mx, aux deuxième variations des différents paramètres.

La première étape se termine par l'analyse des superficies et formes des aires de distribution. Pour ce faire, le modèle propose différentes sorties. Dans un premier temps, sont analysés des indices quantitatifs et spatiaux, permettant de comparer chaque sortie à la simulation dite de référence. L'indice de correspondance quantitative (C.Q.) est une simple comparaison entre le nombre de pixels – de l'aire de distribution – dans les résultats de la simulation, et ce même nombre dans les simulations de références (cf. figure 6). L'indice de correspondance spatiale (C.S.) est le coefficient de similarité « Simil » (Voiron-Canicio, 2006). Il est issu de la division entre l'intersection des deux aires de distribution et l'union de ces dernières (figure 7).

Dans un second temps, le modèle permet l'exportation des résultats dans un format pris en compte par les logiciels d'analyses d'images et les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG). Ces derniers permettent d'établir des cartes de comparaison entre les simulations afin de localiser spatialement les changements.

$$C.Q. = \frac{\text{Aire de distribution simulée}}{\text{Aire de distribution de la situation de référence}}$$

Figure 6. Formule de l'indice de correspondance quantitative (C.Q.).

$$\text{Simil (A, B)} = \frac{\text{aire intersection (A, B)}}{\text{Aire union (A, B)}}$$

Figure 7. Formule du coefficient de similarité « Simil » (C.S.).

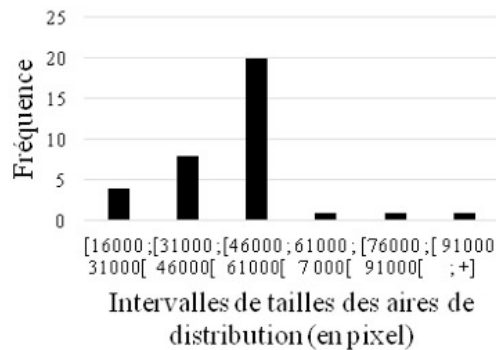
III.2. Évaluation du poids des variables climatiques

La seconde étape de la méthode concerne l'estimation du poids des variables climatiques dans le modèle. Elle s'appuie sur une méthode d'évaluation statistique applicable aux différentes espèces étudiées.

Les onze simulations réalisées sur les trois espèces étudiées permettent d'obtenir une série statistique comprenant près de 31 modalités. L'aire de distribution moyenne est calculée à partir des résultats de la simulation de référence. Le calcul d'une aire de distribution moyenne aux trois espèces étudiées est permis par leurs présences communes à l'étage subalpin. L'observation des fréquences de distribution

permet de considérer que les tailles des aires de distribution sont – relativement – symétriquement distribuées autour de la moyenne (figure 8).

Dès lors, il peut être considéré que, selon toute vraisemblance, une grande quantité de simulations permettrait de supposer que la distribution suivrait une loi normale.



L'écart-type (σ) permet de résumer la distribution des différentes modalités (Gregory, 1963). D'après la loi normale, près de 68,3% des modalités sont comprises entre $+1\sigma$ et -1σ ; près de 95,48% des modalités sont comprises entre $+2\sigma$ et -2σ et, près de 99,7% des modalités sont comprises entre $+3\sigma$ et -3σ (Gregory, 1963).

L'impact de la variation d'un paramètre climatique est d'autant plus important, que la taille de l'aire de distribution qui en résulte est éloignée de l'aire moyenne.

Ainsi, le résultat d'une simulation qui est compris dans l'intervalle $[-1\sigma ; +1\sigma]$ indique que le paramètre établi pour la variable climatique sélectionnée n'est pas à l'origine d'une modification significative de l'aire de distribution (figure 9). Au contraire, le résultat d'une simulation qui est compris dans l'intervalle $[-3\sigma ; -2\sigma]$ ou $[+2\sigma ; +3\sigma]$ indique que le paramètre établi engendre des modifications très significatives de l'aire de distribution (figure 9). Dès lors, un code à trois valeurs permet de caractériser, de manière simplifiée, le poids des variables climatiques sur les résultats du modèle. D'abord, la valeur 1 caractérise un poids faible, elle est affectée aux simulations dont le résultat est compris dans l'intervalle $[-1\sigma ; +1\sigma]$. Ensuite, la valeur 2 définit un poids moyen, elle est affectée aux

simulations dont le résultat est compris dans les intervalles $[-2\sigma ; -1\sigma]$ ou $[+1\sigma ; +2\sigma]$. Enfin, la valeur 3 caractérise un poids fort, elle est affectée aux simulations dont le résultat est compris dans les intervalles $[-3\sigma ; -2\sigma]$ ou $[+2\sigma ; +3\sigma]$ (cf. figure 9).

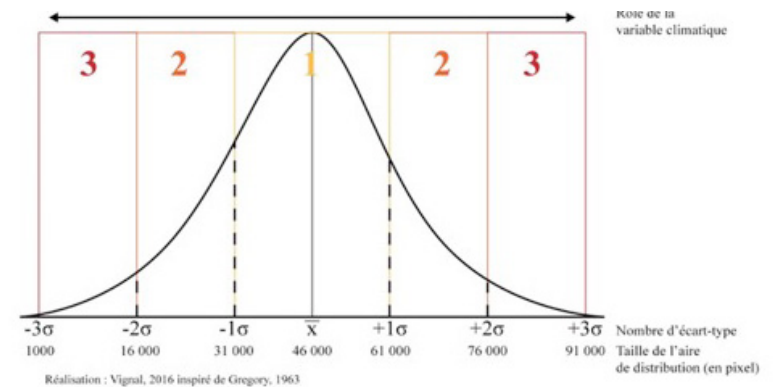


Figure 8. Distribution de la taille des aires de distribution issues des différentes simulations réalisées.

Figure 9. Justification de la mise en place d'un code à trois valeurs.

IV. Résultats

IV.1. La simulation de référence

La simulation de référence, c'est-à-dire la modélisation de l'impact du changement climatique indique que les aires de distribution de ces trois espèces se retrouveraient, en 2100, plus en altitude et plus au nord (figure 10). Les superficies de disparition de l'espèce en limite chaude d'aire de distribution seraient, selon ce paramétrage, supérieures à celles de l'apparition de l'espèce en limite froide d'aire de distribution. Les aires devraient se réduire de 33 % pour *Dryas octopetala*, 29% pour *Pinus cembra* et 27% pour *Pinus*

uncinata. La distance de réduction moyenne entre les limites d'aires actuelles et futures est de 550 m, 565 m et 655 m en 75 ans, pour respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata*. La distance de propagation moyenne est de 1,5 km, 850 m et 280 m en 75 ans, pour respectivement *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata*.

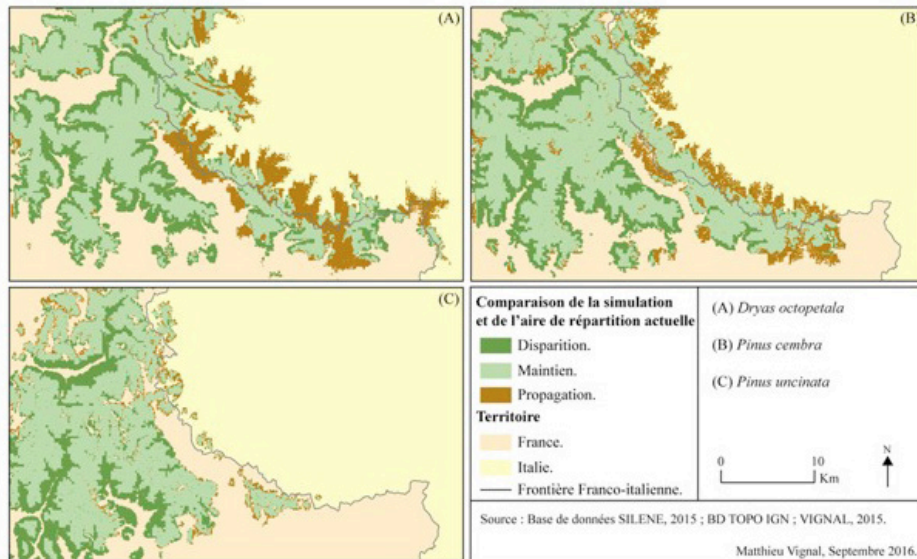


Figure 10. Comparaison de la simulation de référence et des aires de distribution actuelles des trois espèces étudiées.

IV.2. Variations des paramètres climatiques

IV.2.1. La température

La variation de la température du mois de juin est à l'origine de modifications mineures des aires de distribution. En effet, une augmentation des températures, comprises entre +0,6°C et +1,8°C (Mn) par rapport aux températures actuelles, est à l'origine d'une réduction, par rapport à la simulation de référence, des aires de distribution de 0,5%, 4,8% et 1,1% pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata* (figure 11). A contrario, une augmentation des températures comprises entre +5°C et +14°C (Mx) par rapport aux températures actuelles est à l'origine d'une augmentation des aires de distribution de 0,1%, 0,3% et 0,1% pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus uncinata*, et *Pinus cembra*.

Les aires de distribution résultantes de ces simulations se retrouveraient, en 2100, plus en altitude et plus au nord, en comparaison avec les aires de distribution actuelles (figure 11). Les zones d'extensions des aires de distribution de *Dryas octopetala* et *Pinus cembra*, se situent essentiellement côté italien (figure 11 DO et PC). Ceci pourrait être le résultat d'un biais méthodologique. En effet, l'absence de points d'observation en Italie pourrait être à l'origine d'une sous-estimation qui serait corrigée dans le temps par la simulation. L'interprétation est sensiblement la même pour les résultats des simulations qui porte sur la variation de la température du mois de septembre.

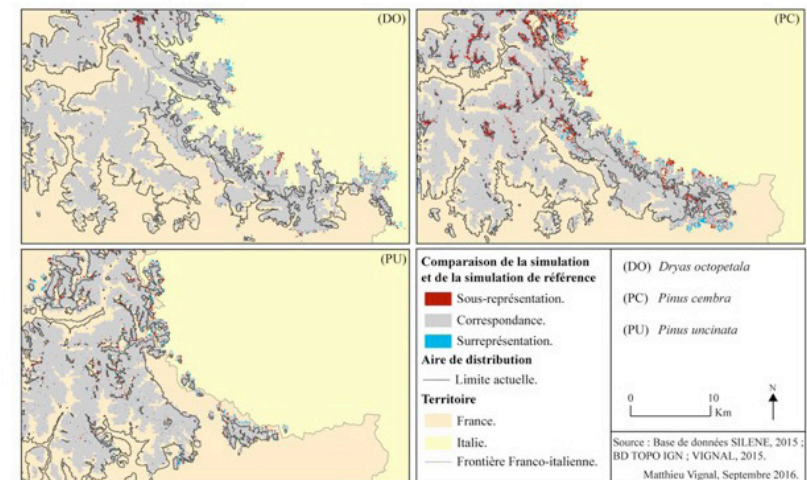


Figure 11. Variation de la température du mois de juin (Mn), comparaison à la simulation de référence. (DO) C.Q. de 0,99 et C.S. de 0,88. (PC) C.Q. de 0,95 et C.S. de 0,9. (PU) C.Q. de 0,99 et C.S. de 0,92.

La variation de la température du mois de septembre entraîne des résultats relativement identiques aux simulations précédemment évoquées. Une augmentation des températures comprises entre +0,6°C et +1,2°C (Mn), par rapport aux températures actuelles, est à l'origine d'une réduction des aires de distribution de 0,6%, 7,7% et 2% pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata* (figure 12). Les modifications des aires de distribution sont mineures pour une élévation des températures comprises entre +5°C et +10°C (Mx) par rapport aux températures actuelles. Les aires de distribution augmentent de 0,1%, 1% et 0,1% pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata*. Ainsi, les espaces sous-représentés dans les figures 11 et 12 sont les milieux qui ne peuvent

être colonisés par les espèces pour une augmentation des températures de l'ordre de 1°C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$). Cependant, une augmentation des températures de 4°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) permet à ces espèces de coloniser ces milieux. Or, une augmentation encore plus importante, de l'ordre de 8°C ($\pm 4^\circ\text{C}$), est à l'origine d'une relative stabilité des aires de distribution, en comparaison aux modifications entraînées par une augmentation des températures de 4°C ($\pm 2^\circ\text{C}$).

L'explication réside dans le fait que, dans le modèle, les températures du mois de juin et de septembre agissent uniquement sur le processus de mortalité infantile. À la suite de l'augmentation des températures de 4°C, les espèces ont déjà colonisé la majeure partie de leurs aires de viabilité,

une augmentation supplémentaire n'est pas à l'origine de nouveaux milieux colonisables pour l'espèce, puisque ces variables climatiques ne conditionnent pas le processus de germination dans le modèle. Au vu des modifications des aires de distribution, *Pinus cembra* est l'espèce dont les jeunes pousses semblent être les plus sensibles aux températures froides. Ainsi, l'augmentation des températures lui permet d'étendre son aire de distribution d'une manière plus conséquente que *Dryas octopetala* et *Pinus uncinata*.

IV.2.2. L'indice de viabilité

La variation de l'indice de viabilité permet d'observer des modifications importantes des aires de distribution des espèces végétales étudiées. La diminution de l'indice de viabilité (Mn), par rapport à la simulation de référence, se traduit par la mise en place de conditions écologiques futures plus rudes pour les espèces végétales. Dès lors, les résultats présentent des réductions des aires de distribution, par rapport à la simulation de référence, de 66 %, 45,6 % et 42,4 % pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata* (figure 13). Les aires de distribution résultant de ces simulations, sont localisées, par rapport aux aires de distribution actuelles, plus en altitude et plus au nord (figure 13). Il en résulte une fragmentation de ces dernières, particulièrement pour *Dryas octopetala* (figure 13 DO).

augmentations des aires de distribution, par rapport à la simulation de référence, de 120 %, 55,8 % et 37,4 % pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra*, et *Pinus uncinata* (cf. figure 14). Les aires de distribution résultant de ces simulations, sont localisées, en plus de leurs concordances spatiales avec les aires de distribution actuelles, plus au sud et distribuées sur un gradient altitudinal plus important (figure 14).

La variation de l'indice de viabilité est ainsi à l'origine de modifications très significatives des aires de distribution. L'explication réside dans le rôle de cet indice dans le modèle. Ce dernier permet d'évaluer la probabilité de chaque pixel à être potentiellement occupé par une espèce. Une augmentation de l'indice engendre une augmentation de la probabilité du pixel à être occupé par l'espèce étudiée. Ainsi, des milieux autrefois peu adaptés, peuvent désormais réunir les conditions écologiques nécessaires à la présence potentielle des espèces étudiées. Les espèces peuvent alors coloniser l'espace d'étude de manière plus conséquente en fonction d'une part, de leur capacité de propagation, et d'autre part, de leur amplitude écologique (les interactions biotiques, notamment la compétition interspécifique, n'étant pas insérées dans ces simulations). Ces deux derniers facteurs, propres aux caractéristiques internes des espèces, expliquent les différences conséquentes entre les résultats des trois simulations (figure 14).

Inversement, l'augmentation de l'indice de viabilité (Mx) a pour effet de mettre en place des conditions écologiques plus clémentes pour les espèces végétales étudiées. Ainsi, les résultats des simulations exposent des

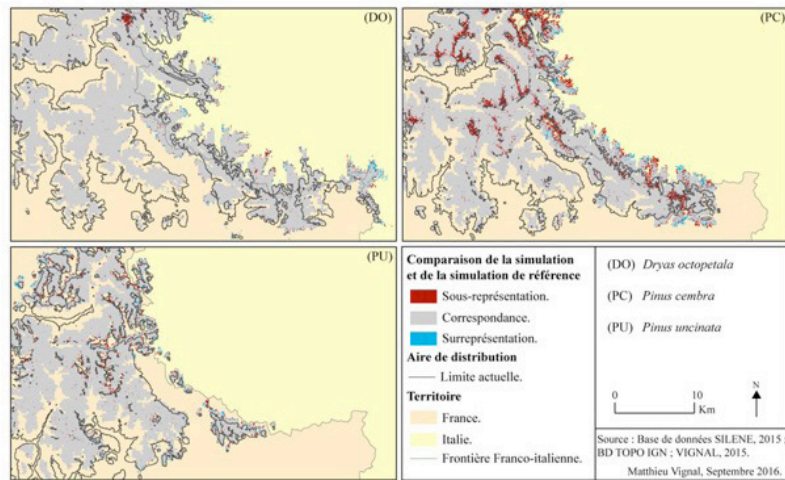


Figure 12. Variation la température du mois de septembre (Mn), comparaison à la simulation de référence. (DO) C.Q. de 0,99 et C.S. de 0,88. (PC) C.Q. de 0,92 et C.S. de 0,88. (PU) C.Q. de 0,98 et C.S. de 0,91.

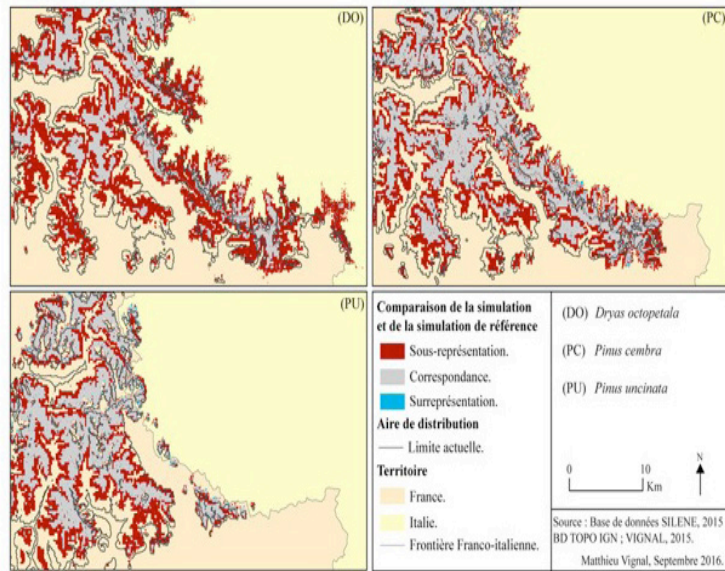


Figure 13. Variation de l'indice de viabilité (Mn), comparaison du résultat à la simulation de référence. (DO) C.Q. de 0,34 et C.S. de 0,34. (B) C.Q. de 0,54 et C.S. de 0,52. (C) C.Q. de 0,58 et C.S. de 0,55..

4.2.3. Le vent et les espèces anémochores

Dans cette partie, sont présentés les résultats concernant la variation de la force et de la direction du vent. *De facto*, seules les espèces ayant une chorologie anémochore (*Dryas octopetala* et *Pinus uncinata*) sont abordées.

La variation du paramètre qui conditionne la force du vent est à l'origine de modifications importantes au sein des aires de distribution. Pour *Dryas octopetala*, un vent faible entraîne une réduction de 45 % de son aire de distribution (figure 15 DO - 1). Le changement climatique est alors trop rapide pour son mode de dissémination qui ne lui permet pas de se propager. En comparaison à l'aire de distribution actuelle, aucune propagation notamment vers l'Italie n'est observée (cf. figure 15 DO - 1). Pour *Pinus uncinata*, un vent important est à l'origine d'une augmentation de 26,8 % de son aire de distribution, notamment au-delà de la frontière

italienne, soit une distance de propagation moyenne de 1,8 km en 75 ans (figure 15 PU - 1). Cette capacité de propagation importante lui permet de coloniser des milieux, autrefois inaccessibles, notamment ceux des sommets du massif Argentera-Mercantour. La comparaison avec l'aire de distribution actuelle permet de visualiser cette propagation (figure 15 PU - 1).

La variation du paramètre qui conditionne la direction du vent permet d'observer des résultats qui diffèrent peu de ceux de la simulation de référence. En effet, l'aire de distribution de *Dryas octopetala* a augmenté de 0,7 % (figure 15 DO - 2), et celle de *Pinus uncinata*, diminué de 0,1 %. C'est un vent d'est qui a été paramétré pour cette simulation, l'augmentation de l'aire de distribution de *Dryas octopetala* se fait donc en direction de l'ouest, et les distances de propagation moyenne sont de 1,6 km et 290 m en 75 ans, pour respectivement *Dryas octopetala* et *Pinus uncinata*.

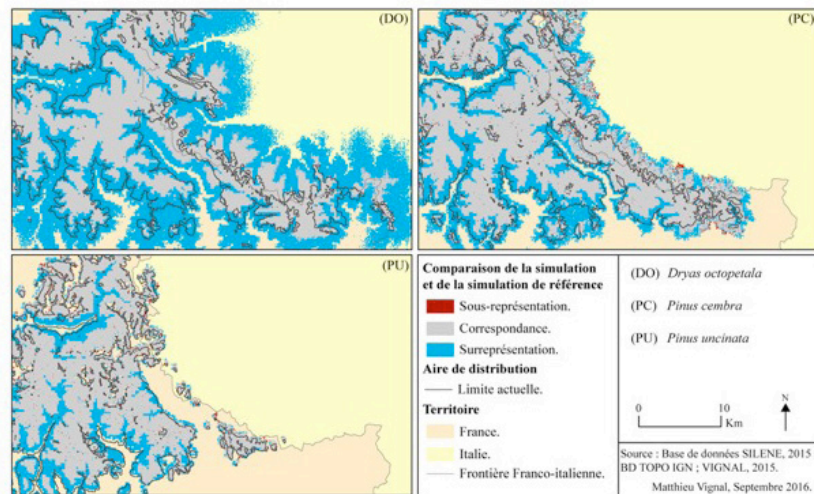


Figure 14. Variation de l'indice de viabilité (Mx), comparaison du résultat à la simulation de référence. (DO) C.Q. de 2,19 et C.S. de 0,46. (PC) C.Q. de 1,56 et C.S. de 0,62. (PU) C.Q. de 1,37 et C.S. de 0,69.

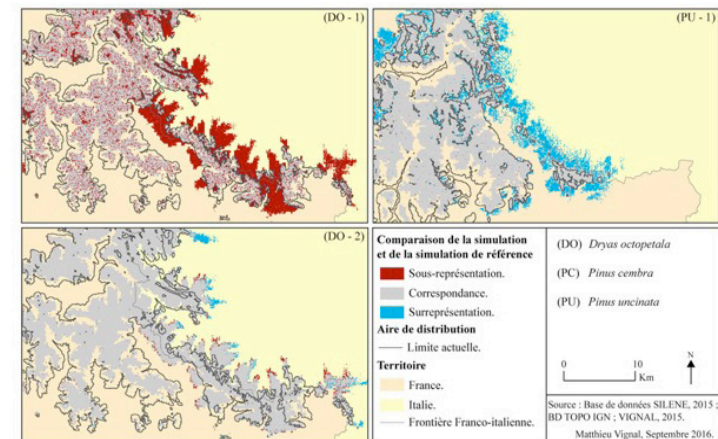


Figure 15. Variation de la force du vent (1) et la direction du vent (2), comparaison à la simulation de référence. (DO - 1) C.Q. de 0,55 et C.S. de 0,51. (DO - 2) C.Q. de 1,27 et C.S. de 0,77. (PU - 1) C.Q. de 1,01 et C.S. de 0,87.

V. Discussion

4.3. Poids des variables climatiques

Les différentes simulations permettent de hiérarchiser les variables climatiques en fonction de leurs poids dans cette approche de modélisation de l'impact du changement climatique sur les aires de distribution des trois espèces étudiées.

Les résultats montrent que seule une variable possède un poids important sur les résultats du modèle, il s'agit de l'indice de viabilité (tableau 2). Ce résultat n'a rien de surprenant dans le sens où l'indice de viabilité synthétise l'ensemble des conditions écologiques de la zone d'étude. Une variation de cet indice simule des modifications importantes des milieux présents dans la zone étudiée. Ce résultat questionne alors l'utilisation d'indice dans une approche modélisatrice de l'impact du changement climatique. En effet, les résultats dépendent de manière trop

importante de l'indice et de ses variations. Dès lors, il apparaît judicieux de limiter l'utilisation de ce type d'indice, ou du moins, de limiter le poids de ce dernier dans le modèle, notamment par l'utilisation d'une multitude d'indices. Cette sensibilité des modèles dynamiques aux variables implémentés dans le modèle et à leurs paramétrages est mentionnée par Bommel (2009). Il précise, ainsi, la nécessité de la phase exploratoire d'un modèle (sensibilité et robustesse) qui, à terme, entraîne souvent un retour sur la conception du modèle.

D'après la méthode employée, les autres variables climatiques possèdent uniquement un poids faible sur les résultats du modèle, à l'exception de la force du vent pour *Dryas octopetala* qui possède un poids relativement important sur les résultats. Cela s'explique par sa chorologie (anémochore), le vent étant son vecteur principal de propagation.

Les tests de sensibilité des paramètres climatiques réalisés dans cette étude consistent à faire varier les paramètres, un seul à la fois. La variation de l'ensemble des paramètres climatiques à chaque nouveau paramétrage pourrait être à l'origine de résultats différents de ceux exposés dans cette étude. Le modèle possède un nombre important de variables climatiques, et donc une infinité de combinaisons possibles de paramétrages. La réalisation de tels tests permettrait de connaître toutes les possibilités qu'offre le modèle et ainsi, de comprendre au mieux son comportement, ainsi que le poids des variables climatiques dans les résultats de ce dernier. Or, caractériser l'ensemble de ces possibilités nécessite des moyens techniques conséquents.

La méthode mise en place pour estimer le poids des variables climatiques pourrait être appliquée à chaque espèce afin de faire ressortir leurs particularités. La méthode consisterait, pour chaque espèce, à prendre en compte les résultats des simulations et de considérer la moyenne de ces dernières. Or, dans cette étude, seulement onze simulations – par espèce – ont été réalisées, ne permettant pas de justifier statistiquement une telle méthode.

Les résultats de cette étude permettent de révéler le poids important de l'indice de viabilité dans le modèle. Celui-ci conditionne, à lui seul, les résultats du modèle. Il possède un poids important sur les résultats car il conditionne à la fois les processus de production et germination des graines mais également le processus de mortalité. Soit trois processus majeurs du modèle au contraire de la température ou du vent qui conditionnent,

uniquement, un processus (respectivement, le processus de mortalité infantile et le processus de dissémination). Bien que son principal avantage soit de réduire le nombre de variables implémentées dans le modèle, il apparaît nécessaire de limiter l'utilisation de tels indices afin de redistribuer le poids important de ce dernier au sein d'un ensemble de variables.

Il convient de préciser, de nouveau, que les résultats présentés dans cette étude ont uniquement pour objectif d'estimer le poids des variables climatiques. Le modèle ne représente pas encore un outil d'anticipation probable des conséquences du changement climatique sur les aires de distribution des espèces végétales. À travers ces différentes simulations, le modèle a montré une certaine robustesse dans la mesure où la variation des paramètres engendre les résultats escomptés, ce qui témoigne d'une bonne connaissance du comportement du modèle et permet ainsi de lui accorder un crédit plus important (Edmonds et Meyer, 2013). Néanmoins, les variables en entrée du modèle doivent être retravaillées afin d'équilibrer les poids entre ces dernières. Bien entendu, la calibration du modèle doit également reposer sur des observations de terrain. En effet, cet article présente l'une des premières étapes d'une recherche scientifique plus ambitieuse dont l'objectif, à terme, est de produire un outil original, appliqué et reproductible de modélisation, donc d'anticipation de l'impact du changement climatique sur les aires de distribution des espèces végétales.

Simulations	Variables climatiques	<i>Dryas octopetala</i>	<i>Pinus cembra</i>	<i>Pinus uncinata</i>
1	Température juin	1	1	1
2	Température juin	1	1	1
3	Température septembre	1	1	1
4	Température septembre	1	1	1
5	Indice de viabilité	2	2	2
6	Indice de viabilité	3	2	1
7	Direction vent	1	1	1
8	Direction vent	1	1	1
9	Force vent	2	*	1
10	Force vent	1	*	1

Tableau 2. Poids des variables climatiques dans une approche modélisatrice de l'impact du changement climatique sur les aires de distribution des trois espèces étudiées. Évaluation selon un code à trois valeurs.

Conclusion

Les méthodes de descente d'échelles statistiques par régression environnementale permettent d'obtenir des données climatiques à fine échelle spatiale. Ces dernières s'avèrent très utiles dans la formalisation d'un modèle original capable de simuler les processus biologiques (production, dissémination, germination, mortalité) des espèces végétales. Au sein de ce type de modèle, le rôle des variables climatiques peut être détaillé par l'intermédiaire de tests de sensibilité appliqués à ces paramètres. Ces derniers ont révélé le poids important des indices synthétiques dans ce type de démarche modélisatrice. En effet, les résultats dépendent de manière trop importante de l'indice de viabilité et de ses variations. Dès lors, il apparaît judicieux de limiter l'utilisation de ce type d'indice, ou du moins de limiter le poids de ces derniers dans le modèle, notamment par l'utilisation d'une multitude d'indices ou de variables. Il est prévu de poursuivre l'étude en intégrant au modèle les observations de terrain sur la population (variation dans l'espace de la densité et des pyramides des âges) et les processus biotiques (production de graine, survie). Ce qui est ici modélisé est, une étape de plus dans la question des parts respectives de la migration et de l'adaptation/accommodation des plantes face au réchauffement climatique. De plus en plus d'études révèlent une adaptation supérieure aux premières prévisions ce qui, à l'heure actuelle apparaît comme une bonne chose en termes de protection de la biodiversité. Cependant au

fur et à mesure que la température augmente sans migration conséquente des espèces, c'est la dette climatique de celles-ci qui augmente (Bertrand, 2011). Si cette tendance se confirme, c'est alors un effet latent de celle-ci que la géographie devra chercher à anticiper.

Alexandre F., Genin A., 2011 : *Géographie de la végétation terrestre ; Modèles hérités, perspectives, concepts et méthodes*. Edition Armand Colin, 302p.

Bertrand R., Lenoir J., Piedallu C., Riofrio-Dillon G., De Ruffray P., Vidal C., Pierrat J. C. & Gegout J. C., 2011 : Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, 479, 517-520.

Bommel P., 2009 : *Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèles multi-agents adaptée à la gestion des ressources renouvelables*. Informatique, I2S, Université Montpellier 2, 312p.

Brodbeck S., Gugerli F., 2010 : Sombre sentinelle des chemins : Un roi dans les Alpes, 33-37.

Casazza G., Zappa E., Mariotti M. G., Medail F., Minuto L., 2010 : Distribution pattern and richness of endemic plant species in Maritime and Ligurian alps. *Boll. Mus. Ist Biol. Univ. Genova*, 72.

Coudun C., 2005 : *Approche quantitative de la réponse écologique des espèces végétales forestières à l'échelle de la France*. Ecology, environment, ENGREF AgroParisTech, 129p.

Edmonds B., Meyer R., 2013 : *Simulating Social Complexity*. Springer, 754p.

Fourhcy P., 1968 : Notes sur le Pin cembro (*Pinus cembra* L.) dans les Alpes françaises. *Revue Forestière Française*, 2, 77 – 94.

Garbolino E., 2012 : Modélisation de la répartition future de la végétation en Corse. InfoDFCI. CEMAGREF éditions, 65, 1p.

GIEC, 2007 : Changements Climatiques 2007 : *Rapport de Synthèse*. IPCC, Geneva, Switzerland, 104p.

GIEC, 2014 : Changements climatiques 2014 : *Rapport de synthèse*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.

Godron M., 2012 : *Ecologie et évolution du monde vivant*. Editions de l'Harmattan, 609p.

Gregory S., 1963 : *Statistical Methods and the Geographer*. Longman Group United, 256p.

Guisan A., Thuiller W., 2005 : Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993-1009.

Karlsdottir L., Aradotti A., 2006 : Propagation of *Dryas octopetala* L. and *Alchemilla alpina* L. by direct seeding and planting of stem cuttings. *Icel. Agric. Sci.*, 19, 25-32.

Lemee G., 1978 : *Précis d'écologie végétale*. Masson, 304p.

Lenoir J., Gegout J.-C., Marquet P. A., Ruffray P., Brisse H., 2008 : A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320, 1768-1771.

Martin N., Carrega P., Adnes C., 2013 : Downscaling statistique des températures et des précipitations 2071-2100 du modèle ALADIN-Climat pour les scénarios A1B, A2 et B1 dans les Alpes-Maritimes. *Actes du XXVIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Cotonu, Bénin, 8p.

Myers N., Mittermeier A. R., Mittermeier G. C., Fonseca A. B. G., Kent J., 2000 : Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858.

Ozenda P., 1985 : *La végétation de la chaîne alpine dans l'espace montagnard européen*. Masson, 321p.

Rameau J.-C., Mansion D., Dume G., 1999 : *Flore forestière française Tome 2, Montagne*. Institut Pour Le Développement Forestier, 2421p.

Ramstein G., 2015 : *Voyage à travers les climats de la terre*. Odile Jacob sciences, 342p.

Raup M. D., Sepkoski J. J., 1982 : Mass extinctions in the Marine Fossil Record. *Science*, 215, 4539, 1501-1503.

Theurillat J.-P., Guisan A., 2001 : *Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps : A review*. Kluwer Academic Publishers, 33p.

Thompson J., 2005 : *Plant evolution in the mediterranean*. Oxford university press, 304p.

Viglas J. N., Brown C. D., Johnstone J. F., 2013 : Age and size effects on seed productivity of northern black spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 43, 534-543.

Vignal M., Andrieu J., 2016 : Modélisation de l'impact du changement climatique sur trois aires de distribution végétales dans le Mercantour. En attente de publication aux ouvrages PUPS, 21p.

Voiron-canicio C., 2006 : *Modélisation spatio-morphologique de l'urbanisation du littoral languedocien*. UMR Espace, 15p.

Wada N., 1999 : *Factors affecting the seed-setting success of Dryas octopetala in front of Broggerbreen (Brogger Glacier) in the high Arctic, Ny-Alesund, Svalbard.* Norsk-Polarinstitut, 8p.

Wainwright J., Mulligan M., 2004 : *Environmental modelling, finding simplicity in complexity.* John Wiley & Sons, Ltd, 408p.

WWF, IUCN, 1997 : *Centres of Plant Diversity: a guide and strategy for their conservation.* Cambridge, World Wide Fund for Nature and IUCN, 368p.

Climat rigoureux

Moyenne montagne

Aléas climatiques et développement économique dans les villages du Massif Central

Fabrice Grégoire

Isthme EVS, UMR 5600
6, rue Basse des Rives
42023 Saint-Étienne cedex 02
Fabrice.Gregoire@orange.fr

Massif Central

Les montagnes du versant méditerranéen du Massif Central sont soumises aux aléas climatiques classiques de cette région (excès de précipitations, saisons tranchées). Viennent s'ajouter à ces attributs deux caractéristiques propres au milieu montagnard : un hiver long, des amas de neige parfois importants et un relief contrasté, entre des plateaux correspondant à une pénéplaine hercynienne soulevée, et des vallées profondément encaissées favorisant les inversions thermiques et l'accélération des eaux. Pourtant, ces montagnes, aujourd'hui quasi désertes, ont été habitées pendant des siècles, parfois même surchargées. Ce peuplement n'est pas uniquement dû au caractère refuge de ces hauteurs mais à un certain nombre d'atouts pour qu'une société rurale équilibrée s'y développe : l'eau, la possibilité de cultiver et d'y produire de tout.

Massif Central mountains of mediterranean slope are under the influence of climatic aleas, heavy rains, contrasted seasons. More, as two characteristics of mountains, a long winter, important snow cover and contrast between hercynian plateau and deep valleys accelerating the rate of water flowing. However, these mountains are for centuries widely full of people, sometimes overcrowded. This settlement is not only here for these heights are a shelter, but for a number of assets to develop there a balanced rural society, the water, the opportunity to grow and produce everything.

Développement rural

Impact du changement climatique

Introduction

Le Plateau ardéchois, de plus en plus souvent appelé aujourd'hui Montagne ardéchoise a été longtemps, à l'instar du reste du Massif Central, vu comme une zone refuge pour les activités économiques et l'implantation des sociétés. Voilà ce qui était enseigné dans les écoles il y a soixante ans, comme si ce bout de territoire ne pouvait se comprendre qu'à défaut. Dans les premières pages de la *Revue du Vivarais*, les personnes occupant le plateau à la fin du XIXe siècle sont considérées comme des habitants d'une autre planète, sans cesse soumis aux caprices du ciel. A cette époque, pour les Ardéchois résidant entre Aubenas et Privas, il semble que seules les bêtes sauvages et les Pagels (paysans des hautes terres) sont capables de vivre « là-haut ».

Ce regard a évidemment évolué au cours des années récentes. Pour retracer cette évolution, nous avons consulté des documents à caractère historique, la *Revue du Vivarais* elle-même, source à la fois pour des documents de première main et pour des compilations ou relectures de documents plus anciens (Compoix, Estimes, Cartulaires). Nous les avons complétés par des dépouillements d'archives municipales (Montselgues, Lanarce) et d'autres ouvrages.

Nous avons confronté ces documents, d'une part à notre impression du temps vécu du Plateau Ardéchois et, d'autre part, aux données climatologiques d'aujourd'hui, qui ne sont pas forcément très différentes de celles des siècles récents, du XVe à l'actuel.

I. Des conditions climatiques fortes

Le climat de la bordure sud-orientale du Massif Central a fait l'objet de nombreuses communications, nous n'en retiendrons que les principaux traits (Paul, 1968 ; Grégoire, 2011).

La région d'études est la partie haute de l'Ardèche (figure 1), comprise entre Saint-Agrève et la Cévenne Ardéchoise d'une part, et les plateaux bas de l'Ardèche et la Lozère, d'autre part. Les villages de plateau sont situés à des altitudes qui vont de 1000 mètres pour Montselgues, à 1320 mètres à Lachamp-Raphaël, plus haut village d'Ardèche.

L'expression de carrefour climatique, largement employée, parfois galvaudée, se prête pourtant à ce coin de Massif Central : les perturbations océaniques arrivent aisément jusqu'ici, les masses d'air méditerranéennes également, le tout étant fortement sous l'influence du gradient montagnard. Nous sommes entre 1000 et 1500 mètres et, si le versant atlantique est progressif, le versant méditerranéen est très abrupt, passant de 1500 à 250 mètres (Aubenas) en une vingtaine de kilomètres.



Figure 1. Carte de localisation générale.

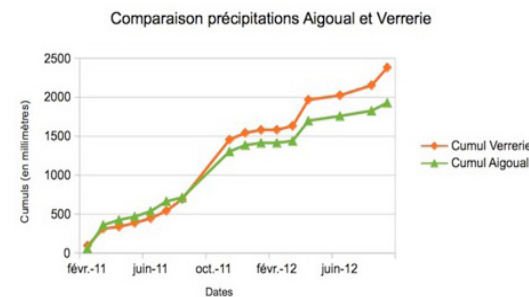


Figure 2. Précipitations relevées à la Verrerie et au Mont Aigoual (Source F. Grégoire).

Tout cela a plusieurs conséquences :

- des abats d'eau importants sur les reliefs (figure 2) : ici sont enregistrées des valeurs proches ou supérieures à celles de l'Aigoual, soit plus de 2000 mm par an (Grégoire, 2011) ;
- un régime de précipitations la plupart du temps typiquement méditerranéen, avec une saison déficitaire en été et des précipitations abondantes, voire très abondantes, en automne (Molinie, 2012) ;
- un hiver long, marqué par la neige, qui peut représenter, y compris lors des années récentes, des cumuls d'épaisseur très importants, de l'ordre de cinq à sept mètres. L'enneigement est certes irrégulier, comme il convient en moyenne montagne. De plus,

la Burle, le vent du Nord, élément auquel les populations sont le plus sensibles, peut transformer rapidement une chute de neige de quatre centimètres d'épaisseur en congères de deux mètres de hauteur (figure 3) ;
 - des phénomènes d'inversion thermique marqués : le site de Sagne Redonde, un cratère de maar, est le prototype de « trous à froid » (TAF) où les températures minimales peuvent être inférieures de plusieurs degrés à celles qui sont relevées à proximité, sur le plateau (figure 4). Ce phénomène est récurrent et doit se reproduire dans la plupart des reliefs en creux, fréquents sur cette topographie. On ne peut « rêver » aléas plus marqués. La

montagne aujourd'hui est quasiment déserte, il n'est pas rare de trouver des communes où la densité de population est inférieure à quatre habitants au kilomètre carré. De nouveaux arrivants, installés à partir des années 2000, n'ont pas résisté aux rigueurs de l'hiver 2009-2010 et ont émigré vers des lieux plus hospitaliers. Pourtant, il y avait, au recensement de 1861, de cinq à dix fois plus d'habitants, faisant de ce pays l'un des espaces ruraux les plus peuplés d'Europe.

Si on ne peut nier que la Montagne ait servi de refuge, notamment aux protestants après la chute de Privas en 1629 (figure 5), la permanence du peuplement appelle d'autres questions. Se peut-il que, malgré ces conditions rigoureuses, cette Montagne ait eu suffisamment d'attraits pour fixer une population parmi les plus denses du Royaume à la fin du XVIII^e siècle ?

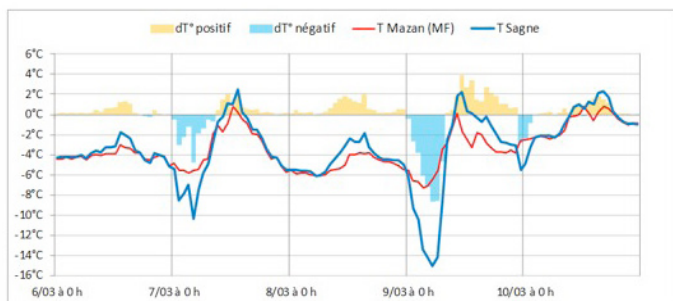


Figure 3. La station de la Verrerie sous la neige (Photo F. Grégoire).



Figure 5. Plan du siège de Privas (Sources Archives départementales de l'Ardèche)

Figure 4. Accentuation des inversions thermiques à Sagne Redonde par rapport à la station Météo-France de Mazan. Exemple du 6 au 10 mars 2016 (Source Météo-France et F. Grégoire).



II. Un peuplement ancien de plus en plus fort jusqu'au milieu du XIXe siècle

Les débuts du peuplement du Massif Central sont encore un sujet de débat. Jusque récemment, les archéologues considéraient qu'il n'y a personne « là-haut », c'est-à-dire sur les hautes terres, avant la fin du Néolithique (Encyclopédie Bonneton, 2003). Depuis les années 1990, les premières traces d'implantation des populations ne cessent de reculer dans le temps (Daugas et Raynal, 1989). On se trouve alors devant un schéma d'implantation classique qui, sans doute décalé, ne se démarque que peu de la manière dont le reste de la France a été occupée.

Les travaux des historiens laissent apparaître, dès le Moyen-Age, un peuplement dense qui semble en accord avec les potentialités du lieu et du climat (figure 6). Mais c'est surtout au XVe et au XVIIe siècle que la « Montagne », terme consacré par l'usage, après les temps troublés de la Guerre de Cent ans puis des Guerres de Religion, va trouver un nouvel équilibre dont vont témoigner la multitude de compoix dressés au XVIIe siècle (Schneltzer, 1962). Ces inventaires ont été précédés d'un autre document à visée fiscale, les Estimes de

1464 (Régné, 1923). Neutres, car non chargés de jugements *a priori*, ces documents nous permettent d'avoir une « photographie » de la Montagne à ces moments.

L'image présentée par les Estimes et les Compoix est celle d'un pays vivant aussi bien que possible. Un des villages des alentours des Vans, Gravières, à la limite de notre zone d'études, présente une espérance de vie supérieure de dix ans à la moyenne nationale française de l'époque. Montselgues, sur le plateau, montre une utilisation rationnelle de l'espace rural qui suggère un bon équilibre entre la pression démographique et la ressource. Les diverses sources historiques, les compoix en premier lieu, laissent l'impression qu'il n'y a pas de personnes inemployées ou trop miséreuses. Il n'en sera pas de même au début du XIXe siècle où le village de Cros-de-Géorand comptera le tiers de ses habitants comme nécessiteux. Il faut bien voir que, à ce moment, ce pays est en surplus démographique. On verra même l'espérance de vie décroître depuis la fin du XVIIIe siècle (Bozon, 1961). C'est



Figure 6. Habitat traditionnel des hauts plateaux ardéchois (XIIe-XIIIe siècle) (Revue du Vivarais).



Figure 7. Grange de la Verrerie d'Astet (XIIe-XXe siècle) (Drone F. Grégoire).

à ce moment que va s'installer l'émigration, d'abord temporaire, puis locale, surtout initiée par les femmes, enfin définitive à partir de la Seconde Guerre mondiale.

Un article, proposé en conclusion de l'étude des Estimes de 1464 (Revue du Vivarais), essaie d'imaginer ce que pouvaient être les conditions de vie sur la Montagne (Régné, 1925). Il en arrive à la conclusion que cela devait ressembler à la Bretagne, un pays certes pauvre, mais qui possède suffisamment de ressources pour vivre plus que pour survivre (figure 7). Ajoutons, pour bien connaître les deux régions, que le climat de la Montagne ardéchoise offre bien plus de conditions ensoleillées que l'intérieur de la Bretagne.

Après la période misérabiliste correspondant aux débuts de la *Revue du Vivarais*, sortent plusieurs articles qui présentent une autre vision du Pagel, homme fier, à la vie sociale développée. L'image de la Montagne que nous avons au travers des travaux d'historiens et de géographes est largement issue du tableau qu'elle présente au milieu du XIXe siècle, celle d'un milieu surchargé d'hommes depuis la fin du XVIIIe siècle (Bozon, 1961).

La question est alors de savoir comment de telles sociétés peuvent se développer dans un environnement aussi rude et aussi contraint ?

III . Un milieu paradoxalement favorable

Il peut sembler étrange de dire que la Montagne est un pays favorable mais, dans l'optique d'une agriculture classique, elle mérite ce qualificatif malgré ou peut-être à cause des conditions climatiques rigoureuses.

Tout d'abord, il y a de l'eau, élément précieux, indispensable pour une économie rurale. Elle est abondante, surabondante même, mais elle demande à être gérée. La géologie cristalline limite le stockage naturel, l'irrégularité méditerranéenne faisant le reste de la difficulté à avoir une eau disponible en tous temps. Cela explique, à côté de béalières¹³ généralement récentes (*Revue du Vivarais*, 1994), la profusion de retenues qui ont été à l'origine de nombreuses tourbières. Nous n'avons pas de date précise pour le début de ces aménagements, seulement des hypothèses. Les conditions climatiques n'ayant pas beaucoup varié depuis les débuts du néolithique¹⁴, notre hypothèse est que ces aménagements ont dû accompagner le peuplement du plateau depuis longtemps. Malheureusement, les archéologues ne se sont que récemment intéressés à ce secteur et il y a fort peu d'opérations d'archéologie préventive à 1300 mètres d'altitude !

Ensuite, le plateau peut produire de tout (figure 8). Les températures, si elles peuvent être basses l'hiver, permettent de nombreuses cultures, y compris de celles qui sont réputées sensibles au gel. Au village du Béage, à 1200 mètres d'altitude, il y a un lieu-dit qui s'appelle *la vigne*. Loin de l'image d'Epinal d'un espace complémentaire à celui des vallées et réservé à l'élevage, le plateau est exportateur net de

céréales. Dans la quasi-totalité des cas il s'agit du seigle, que l'on trouve en abondance dans les sondages effectués dans les tourbières (Dendeviel, Thèse en cours).

La dernière grande famine connue date de 1709, essentiellement due à un gel qui se prolongea au printemps (*Revue du Vivarais*). Après cette date, on note des disettes mais on ne retrouve pas ce caractère catastrophique. Il y a toujours de quoi se nourrir, le châtaignier est là pour fournir « le pain du pauvre ». Ajoutons que, autre catastrophe potentielle, la

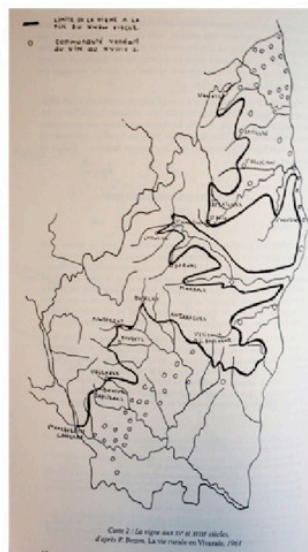


Figure 8. Limite de la vigne aux temps modernes en Ardèche (Source *Revue du Vivarais*).

peste de 1720, apparue à Marseille, épargne beaucoup de villages.

Le climat n'est pas non plus défavorable à la croissance du bois, au contraire. Si les terres des abbayes ont été assez rapidement déboisées jusqu'au XIII^e siècle¹⁵, dès la publication de la Grande Ordonnance de 1681, les grandes hêtraies sapinières envoient leurs bois jusqu'au port de Marseille. On conçoit mieux l'activité que cela peut représenter, sachant que les ensembles les plus productifs sont situés le plus en altitude. L'eau est là aussi importante : on met le bois à flotter dès qu'on le peut, et ce à partir de 1000 mètres d'altitude.

Ces activités s'appuient sur un dense réseau de communication (figure 9), la Montagne étant traversée de sentiers, routes, chemins muletiers (Brechon, 2000). C'est tout sauf une citadelle assiégée.

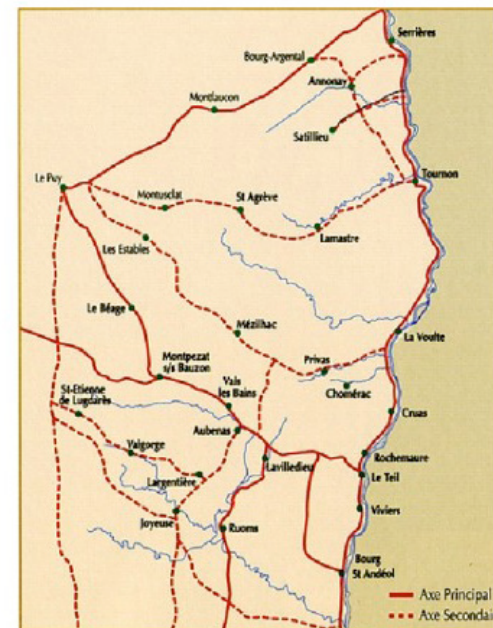


Figure 9. Réseau routier vivarois antique et du très haut Moyen-Age (d'après Franck Brechon).

¹³ Canal construit à partir de la rivière, formant une déviation et un cours d'eau secondaire

¹⁴ Parfois plus chaudes, parfois plus froides : les plus récentes reconstitutions ne laissent pas envisager des écarts supérieurs à un degré centigrade.

¹⁵ Soumises par des textes qui ont encore force de loi aujourd'hui à l'affouage

Conclusion

Enfin, deux facteurs viennent se rajouter à ces éléments favorables.

C'est d'abord la tourbe (figure 10). Pour qu'un pays se développe, il lui faut de l'énergie. Sur le plateau, la forêt a été largement entamée par les paysans dès les XI^e et XIII^e siècles (Cahier du Chanoine Therme, 1^{ère} moitié XX^e siècle). Les forêts monastiques sont jalousement préservées à des fins de production. C'est donc la tourbe qui va fournir l'essentiel des moyens de chauffage car elle se prête bien à la combustion en feux ouverts. La dynamique de turfigenèse est forte : un même site peut fournir une masse utilisable tous les trente ou cinquante ans (Bielawski, 1892), ce sont en général les retenues collinaires qui vont accueillir ces tourbières, que ce soit la volonté des sociétés ou non, le débat n'est pas tranché. Comme dans toutes les régions, la tourbe est discrète, elle voyage peu, mais elle est toujours présente, la plupart du temps sous le nom de « motte ».



Figure 10. Tourbière de Sagne Redonde et fosses d'exploitation (Drone F. Grégoire).

C'est ensuite le vin. Cultivé de nos jours dans le sud de l'Ardèche, il montait très certainement beaucoup plus haut dans les montagnes qu'aujourd'hui (Bertrand, 1982). Nombreuses sont les traces dans la toponymie. Il est avéré par exemple à Montselgues.

Ce vin est, sous l'Ancien Régime, une monnaie d'échange et de paiement de l'impôt. Il ne titre pas douze ou treize degrés comme aujourd'hui, il est beaucoup plus léger. Il est largement diffusé, grâce aux foires qui servent d'intermédiaire entre la Montagne Ardéchoise et les secteurs de forte production situés plus bas en altitude. On pourrait dire que, au XVII^e siècle, le vin, au rebours du sens habituel de l'écoulement de l'eau, irrigue largement le plateau. Le Pagel en consomme régulièrement lors des fêtes et le dimanche.

Le climat est inhospitalier, comme en témoignent les archives municipales de Montselgues et Lanarce qui regorgent de notations sur les ponts emportés trop fréquemment par les crues. Mais les hommes s'y sont bien adaptés, notamment en se regroupant en hameaux. Cet équilibre s'est concrétisé au Moyen-Age, au moment où le plateau est encore peu peuplé, et au XVI^e et XVII^e siècle, malgré les Guerres de Religion. Les protestants par exemple y vivent relativement bien. C'est le moment où les villages se couvrent de maisons plus grandes que ce qui se faisait auparavant. Les auteurs qui ont dépouillé, dans la lignée de Jacques Schneltzer, les compoix du XVII^e siècle, en viennent à se poser la question du bonheur : ces gens étaient-ils heureux ? Il est difficile de le dire, le bonheur est une notion subjective, la Montagne n'est pas pour autant ce lieu où les hommes se terrent, c'est avant tout un espace où les hommes vivent pleinement.

L'enseignement majeur de cette étude est qu'il n'y a pas de déterminisme pour l'établissement des sociétés et que, surtout, nous avons beaucoup de mal à imaginer ce qu'est un environnement favorable pour une économie rurale. Celui de la Montagne l'est, jusqu'à l'avènement de la société actuelle, mais elle a mis longtemps avant de rendre ses derniers habitants : il a fallu attendre, un peu comme partout, les années 1970.

La Revue du Vivarais publie son premier numéro en 1893. Nous avons dépouillé les articles depuis cette date jusqu'en 2014, aux Archives Départementales de l'Ardèche.

Cahiers du Chanoine Jean-Baptiste Therme, Evêché de Viviers, numérisés par Mémoire d'Ardèche et du Temps Présent, Médiathèque Jean Ferrat, Aubenas. La plupart de ces cahiers n'est pas datée.

Comptes-rendus des délibérations des Conseils Municipaux de Montselgues et Lanarce depuis 1820.

Ardèche, 2003 : *Encyclopédie Bonneton*, 320p.

Bertrand AJC, 1982 : La vigne en Vivarais vers la fin du moyen-âge, *Revue du Vivarais*, T. LXXXVI, 212-224.

Bielawski, J.B.M, 1892 : *Les tourbières et le tourbe*, Ed. Mont-Louis, Clermont-Ferrand, 194p.

Bozon P., 1961 : La vie rurale en Vivarais, Etude géographique, Imprimeries réunies, Valence, 8, 635p.

Brechon F., 2000 : *Réseau routier et Organisation de l'Espace en Vivarais et sur ses marges au Moyen-Age*, Thèse de doctorat d'Histoire, Université Lumière-Lyon 2, 4 vol., 1368p.

Dendeviel J.-M. : *Paléoenvironnements et Géoarchéologie du plateau volcanique du Béage, dans le Velay oriental (haute Ardèche, Massif Central, France) : co-évolution entre sociétés et milieux au cours des sept derniers millénaires*, Thèse en cours.

Daugas J.-P., Raynal J.-P., 1989 : Quelques étapes du peuplement du Massif Central français dans leur contexte paléoclimatique et paléogéographique. Variations des paléomilieux et peuplement préhistorique. *Colloque du Comité français de l'Union internationale pour l'étude du Quaternaire (INQUA). Cahiers du Quaternaire*, 13. Textes réunis par Henri Laville. Talence, France. CNRS, 67-95. <halshs-00004078>

Grégoire F., 2011 : Les tourbières ardéchoises : des contraintes climatiques très variables. Actes du Colloque « *Regards sur les tourbières des vallées alluviales, les peupleraies et le pâturage* » tenu à naturAgora-Laon du 22 au 24 septembre 2010, 195-200.

Molinie G. et al., 2012 : Le régime de pluie d'une région montagneuse méditerranéenne : analyse statistique à faible pas de temps, *Actes du XXVe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie tenu à Grenoble*, 553-559.

Paul P., 1968 : Le Climat du Vivarais, *Monographie de la Météorologie Nationale*, 65.

Regne J. : La situation économique du Vivarais en 1464, d'après les Estimes, in : *La Revue du Vivarais*, 1923-1925, T XXX à XXXII.

Schneltzer J., 1962 : Evocation d'un paysage à la fin du XVIe siècle Montselgues, d'après le Compoix Terrier de 1640, *Revue du Vivarais*, T. LXVI, 54-66

Thibon, R., 1994 : Vivre à Beyssac, paroisse de Saint-Jean Chazorne, aux siècles passés, *Revue du Vivarais*, T. XCVIII, 191-233 et 245-271.

Climat urbain

Les principales caractéristiques des climats urbains sont rappelées, en insistant sur les aspects méditerranéens, et sur la confusion fréquente sur les niveaux d'îlots de chaleur urbains (ICU), ainsi que sur les différents modes de mesure. Le futur et les adaptations au réchauffement sont évoqués.

Main features of urban climates are reminded, particularly concerning mediterranean aspects, insisting on frequent confusion of urban heat island (UHI) height levels and on technical aspects of measurements. Future periods and adaptation to warming are evocated.

Les climats urbains et le changement climatique

Pierre Carrega

Université de Nice-Sophia Antipolis (France) Faculté des Sciences - UMR
ESPACE
carrega@unice.fr

Note de l'éditeur : l'article proposé par Pierre Carrega reprend sous forme condensée les points essentiels de son exposé présenté en introduction de la Table ronde sur le thème « Villes méditerranéennes et changement climatique » qu'il animait avec Elodie Briche.

Ilot de chaleur urbain (ICU)

Futur

Villes méditerranéennes et
changement climatique

Introduction

On constate à l'évidence depuis quelques années un actuel renouveau d'intérêt pour le climat urbain, pour plusieurs raisons :

L'évolution mondiale du rapport population urbaine / population rurale est rapide : entre 1960 et 2015, la proportion de citadins est passée de 33,6% à 53,9% (site Banque Mondiale, 2016), or l'écart entre les conditions de vie en ville par rapport à celles de la campagne s'accroît, d'autant plus que la taille des agglomérations augmente.

La prise de conscience que le climat urbain s'impose par la notion de confort, mais aussi de contrainte, comme l'ont montré notamment les travaux de l'Institut de veille sanitaire sur le rôle de l'îlot de chaleur urbain dans la surmortalité observée durant les vagues de chaleur (site InVS). La plus forte certitude concernant le changement climatique, la hausse des températures, impose une réflexion et des mesures en particulier dans les domaines énergétique et hydrique sur l'environnement urbain.

Le climat urbain qui est (difficilement) mesuré en ville à l'extérieur, n'est pas celui de l'intérieur d'un logement, celui que supportent ses habitants... Par exemple, lors de vagues de chaleur, la température d'un appartement continue de monter même si ce n'est plus le cas à l'extérieur.

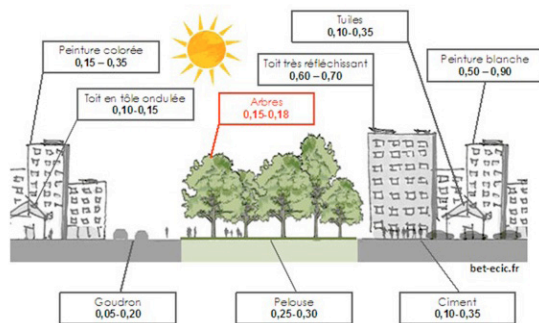


Figure 1. Albédo des matériaux urbains ; Source : ECIC, 2014 (<http://bet-ecic.fr/ladaptation-au-changement-climatique-et-le-phenomene-d-ilot-de-chaleur-urbain-consequences-sur-les-batiments/>).

I. Rappel : les spécificités du climat urbain

I.1. Par rapport à la campagne environnante, la ville est :

- plus chaude, surtout à partir de l'après midi et surtout la nuit ;
- moins humide (faible évapotranspiration réelle, ETR), avec des « sols » à surface sèche dès que la pluie a cessé ;
- moins ventilée (sauf Venturi locaux) ;
- soumise à de multiples réflexions radiatives.

I.2. Causes :

Elles résident d'abord dans l'omniprésence de surfaces minérales et artificialisées qui agissent sur l'albédo (réflexion du rayonnement solaire visible), sur le stockage de chaleur selon la conductivité, la chaleur spécifique des matériaux. Le refroidissement est amoindri par la réduction de la consommation de chaleur latente (par l'ETR) du fait de la faiblesse des surfaces végétalisées, et du manque d'eau estival en Méditerranée (figures 1 et 2).

La ville est aussi concernée par des émissions de chaleur anthropique provenant de sources diverses : chauffage domestique, activités industrielles, véhicules en circulation...). Les écoulements d'air sont perturbés par l'accroissement de la rugosité de

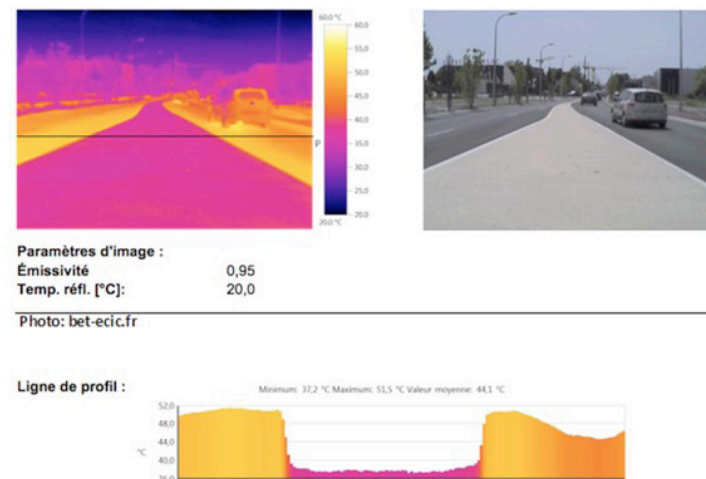


Figure 2. Variation des températures de surface suivant les matériaux et leurs couleurs : près de 12°C d'écart entre les deux couleurs d'enrobés ... Source : ECIC 2014 (<http://bet-ecic.fr/ladaptation-au-changement-climatique-et-le-phenomene-d-ilot-de-chaleur-urbain-consequences-sur-les-batiments/>).

surface, et plus généralement, la géométrie tridimensionnelle accentuée des villes modifie les phénomènes de rayonnement et d'écoulement d'air (obstacle ou canalisation, ombre ou exposition, etc). Enfin paradoxalement si, comme on l'a vu plus haut, la ville reçoit de la chaleur anthropique, les particules micrométriques qu'elle émet (chauffages, transports en particulier) contribuent à « éteindre » le rayonnement solaire.

Il en résulte la notion d'îlot de Chaleur Urbain (ICU), très complexe dans le détail, avec des nuances temporelles et spatiales.

I.3. L'ICU : attention aux multiples approches et aux confusions !

Très souvent le terme d'ICU est utilisé avec un sens différent, car il est appliqué à des niveaux surfaciques divers. On mesure en effet différents îlots de chaleur, selon leur niveau : La surface du sol (solide ou liquide) dont les températures de surface sont déduites à partir du rayonnement infra-rouge (IR) émis par la surface et mesuré par un radiomètre,

modulé par un coefficient d'émissivité. L'instrumentation varie depuis le « pistolet » IR jusqu'aux mesures satellitaires diverses, en passant par les radiomètres IR embarqués à faible altitude sur des drones, ballons, hélicoptères, avions...

L'air à 2 m au-dessus du sol peut-être considéré comme l'élément le plus mesuré (malgré les difficultés) et le plus riche en information puisqu'il concerne le milieu dans lequel évoluent les êtres humains dans la rue. La mesure peut être fixe (stations météorologiques permanentes ou provisoires) ; ou itinérante (à pied, à vélo, en véhicules automobiles...).

Enfin l'air au-dessus de la ville est plus ou moins affecté par la chaleur urbaine et la turbulence liée aux écoulements perturbés par l'irrégularité des surfaces des toits. Pour détecter température et mouvements, on peut avoir recours à divers instruments comme les ballons équilibrés (Constant Level Balloon) pour un niveau donné de pression de l'air (donc d'altitude) suivi aux théodolite et télémètre une fois lâchés ; les ballons captifs mesurant température et humidité ; les ballons de radiosondages.

II. Les spécificités «du» climat urbain méditerranéen

II.1. Caractéristiques générales.

Les villes méditerranéennes bénéficient d'une prédominance des ciels clairs (63% de fraction d'insolation annuelle à Marseille) et (sauf cas particulier) des calmes synoptiques (en marge des flux perturbés zonaux) ce qui accentue les phénomènes radiatifs, conditions favorables à l'expression des facteurs géographiques locaux sur le climat (topographie, occupation du sol, présence d'une ville). Les contrastes terre / mer, et montagnes / vallées génèrent des différences de températures, donc de pression de l'air, qui déclenchent des écoulements compensatoires : les littoraux et les pentes sont sous le règne des brises thermiques dominantes (figure 3). Ces brises sont en général peu rapides (quelques mètres/seconde) et apportent une faible ventilation qui disperse mal la pollution

atmosphérique. Cette dernière est recyclée avec les alternances de vents de direction opposée (changements en matinée et le soir), mais la brise de mer a l'avantage d'être un apport frais sur le littoral, le jour, en été. Les contrastes ville-campagnes sont généralement moins forts de jour par rapport aux milieux non méditerranéens, car il y a souvent peu de végétation autour des villes, transpirant peu (voir plus haut), et roches ainsi que sols nus abondent, d'où des contrastes atténués. L'architecture, ancienne et moderne, emploie des matériaux clairs, les immeubles anciens sont hauts et étroits, ce qui favorise le drainage d'air chaud vers le haut, tandis que les rues étroites sont une bonne partie de la journée à l'abri du rayonnement solaire (fraîcheur estivale des vieilles villes). Enfin la rareté de l'eau (l'été étant une saison



Figure 3. Les villes méditerranéennes entre littoral et montagne : l'exemple de Nice. Rôle écrasant de la topographie, et variations spatiales du vent (ici brise de mer). Image Google.

sèche) est la règle, et doit être prise en compte, y compris pour les « coulées vertes » qui, au pire ne sont pas concevables durablement, et au mieux, ont un coût non négligeable. Ainsi, les villes méditerranéennes sont soumises à une forte vulnérabilité, par leurs fortes densités de population souvent en bord de mer, par les crues flash et urbaines qui les menacent et inversement, par le manque d'eau estival.

II.2. Masse de la ville et effets de paroi : les échelles

Les ICU varient dans l'espace et le temps : ils sont plus prononcés par temps radiatif (sans nuages) et sans vent (figure 4).

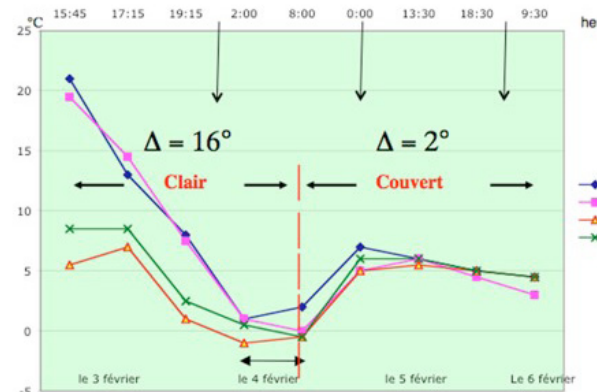
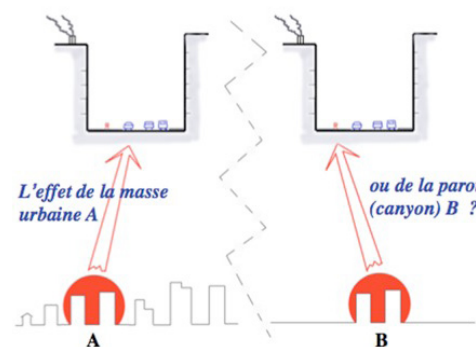


Figure 4. Températures de la surface des murs extérieurs d'une maison selon leur orientation et la nébulosité, du 3 au 6 février 2005 près de Nice.



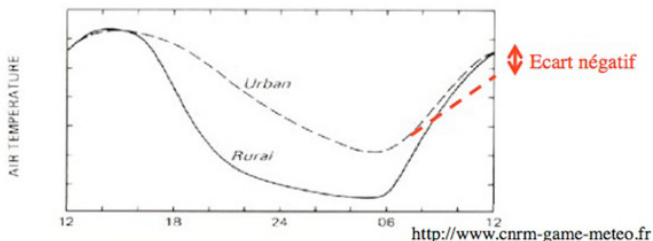
Les écarts thermiques au sein d'une ville sont innombrables, et leurs origines multiples mélangent les échelles : **fait-il plus chaud dans une rue à cause de la masse urbaine prise dans son intégralité ou bien est-ce lié aux effets très locaux de parois du canyon** (auquel cas un village-rue aurait les mêmes effets), ou les deux (figure 5) ?

Figure 5. De la ville au quartier et à la maison : encore les échelles ...

II.3. Les variations temporelles de l'ICU, qui est souvent négatif en matinée

Les ICU peuvent être clairement négatifs, et donc se convertir en îlots de fraîcheur (figure 6).

Figure 6. Îlot de chaleur et îlot de fraîcheur urbain (adapté d'après <http://www.cnrn-game-meteo.fr/spip.php?article197>)



Surtout en région méditerranéenne, le comportement thermique des campagnes souvent pierreuses, et arides l'été, n'est pas éloigné de celui de la ville. Cette dernière se réchauffe plus lentement le matin avec l'ombre des bâtiments. En figure 7, on distingue un déficit de température à Nice-centre dépassant en moyenne 2° vers 10 h du matin au printemps et en été.

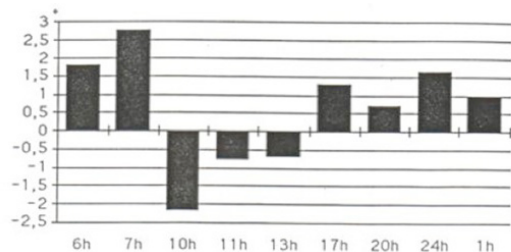
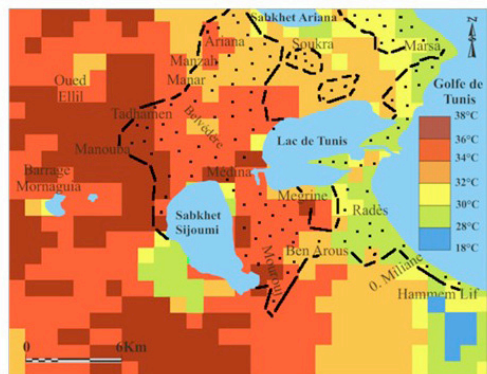


Figure 7. Ecart mesuré de température entre centre-ville de Nice et station rurale (moyenne 80 relevés) entre janvier et juin. Source : Carrega, 1992.

L'ICU considéré en **surface**, est peu visible, voire absent même dans une ville surchauffée en été comme Tunis, durant le jour : la campagne environnante est par endroits nettement plus chaude en surface, que la ville (figure 8) :

Figure 8. Champ thermique de surface diurne dans l'agglomération de Tunis par temps radiatif à partir d'une scène NOAA-AVHRR datée du 16/05/2005 à 13h TU. En pointillés : limites de la forte urbanisation. D'après Charfi, 2012 modifié.



Par contre on constate un fort ICU de **surface** la nuit à Tunis (figure 9) :

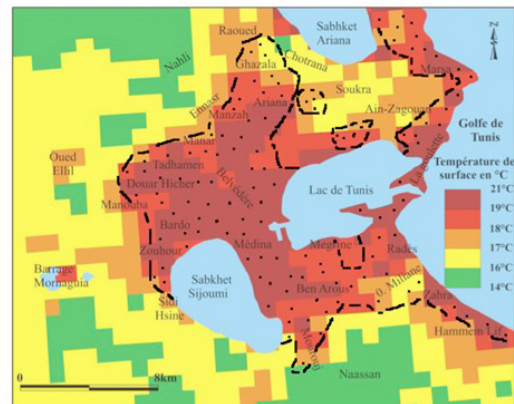


Figure 9. Champ thermique de surface nocturne dans l'agglomération de Tunis par temps radiatif à partir d'une scène NOAA-AVHRR datée du 04/06/2001 à 1h26 TU. En pointillés : limites de la forte urbanisation. D'après Charfi, 2012 modifié.

Toujours la nuit, l'ICU est marqué dans l'**air à 2m/sol** à Tunis (figure 10) :

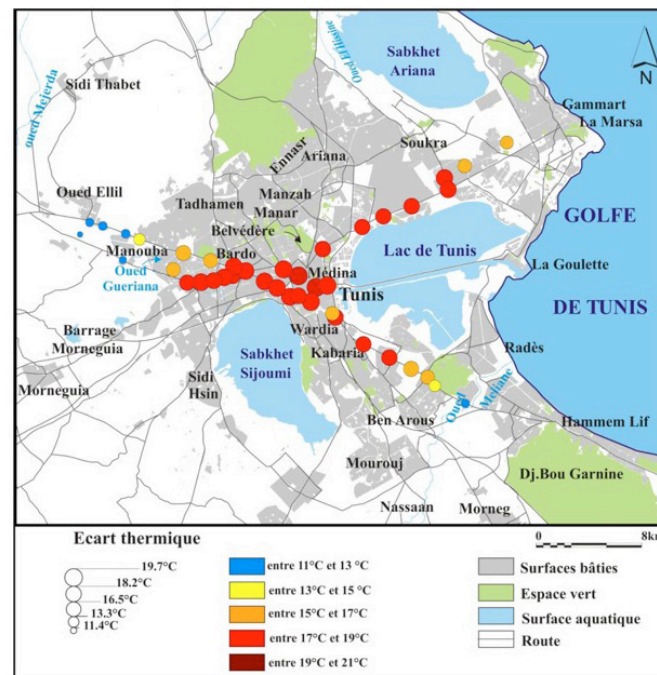
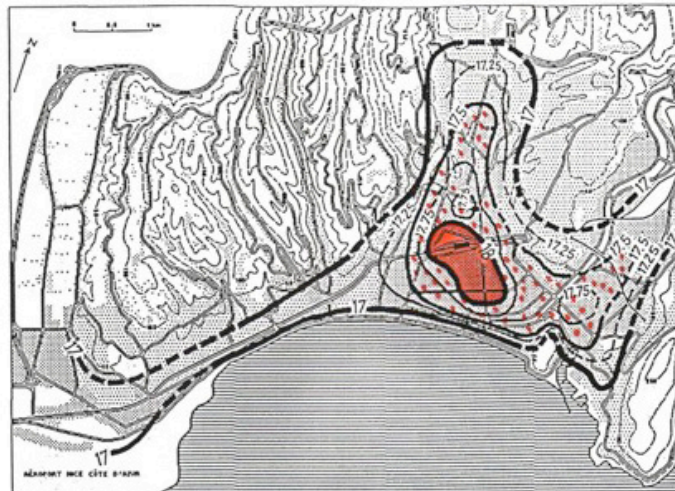
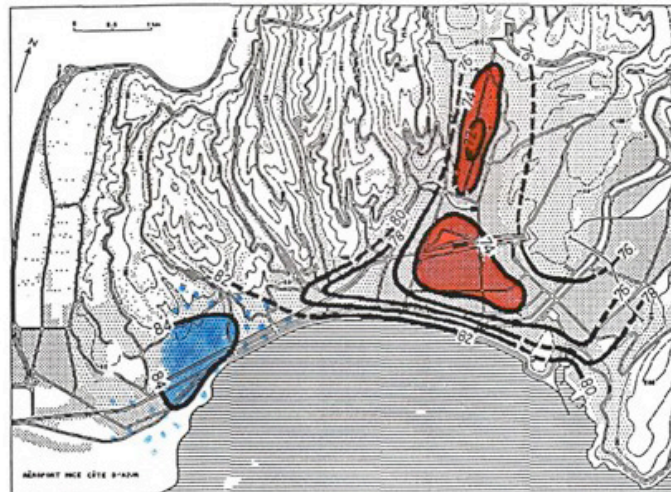


Figure 10. Spatialisation de la température de l'air à Tunis le 31/5/2007 à 1h55mn TU par mesures itinérantes.

L'ICU dans l'air à 2m/sol ne s'observe que le soir à Nice (figure 11) :



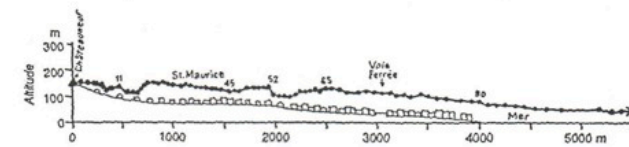
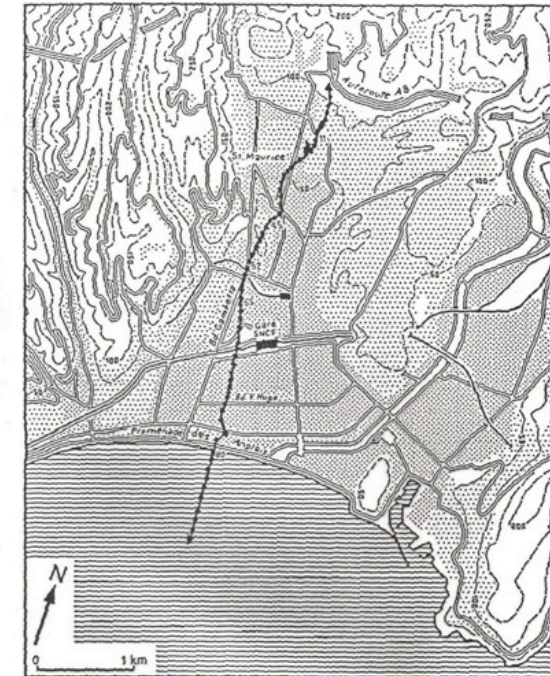
Moyenne des températures (°C) à 20h00, du 28 avril au 11 mai 1986.



Moyenne des humidités relatives (%) à 20h00, du 28 avril au 11 mai 1986.

Figure 11. L'îlot de chaleur urbain niçois en début de soirée au printemps, mais aussi îlot de sécheresse (faible humidité relative). (Moyennes de 24 points de mesures instantanées sur 14 jours consécutifs).

A troisième niveau de mesure, au-dessus des toits de la ville, on note l'absence d'ICU à Nice (figure 12) :



Trajectoire de C.L.B. du 3 août 1985 (6h55) à Nice.

Figure 12. Parcours d'un ballon équilibré (à niveau de pression constant) au-dessus de Nice, par brise de terre résiduelle en tout début de journée, l'été.

Les forces en présence sont inégales : la chaleur dégagée par la ville est laminée par l'écoulement relativement froid attaché à la brise de terre : le vent lié au contraste terre-mer et au relief est assez puissant pour empêcher toute constitution de dôme chaud au-dessus de la ville, d'où le tracé rectiligne en plan et en profil du ballon lâché depuis les collines du nord de la ville.

II.4. Les variations spatiales à fine échelle de la pollution atmosphérique.

La topographie, la plus ou moins forte urbanisation et le trafic routier (destructeur de l'ozone par le monoxyde d'azote) combinent leurs effets pour produire une forte hétérogénéité de la concentration d'ozone dans l'air urbain et péri-urbain.

On note ainsi les fortes concentrations au bord de mer et secondairement sur les collines. Le centre ville à fort trafic, ainsi que les alentours du port (gaz des bateaux) sont moins affectés par l'ozone.

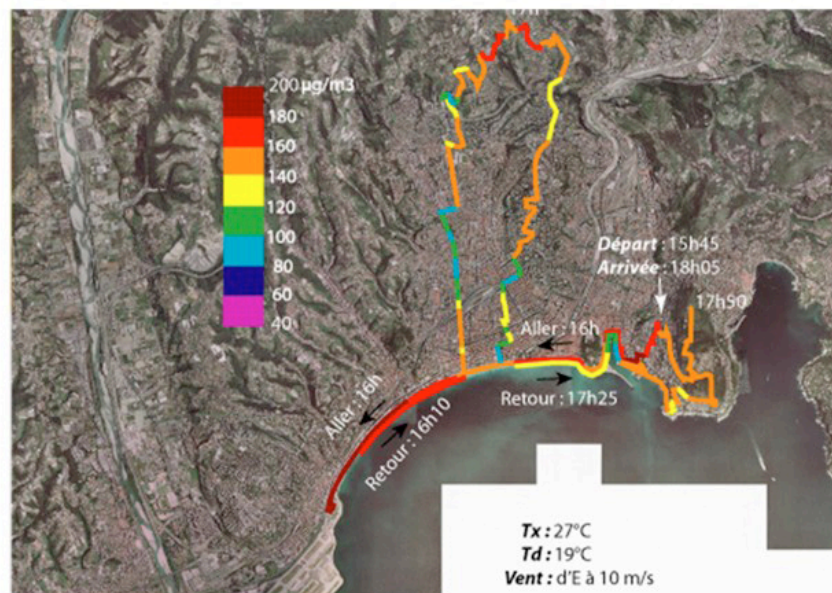


Figure 13. L'ozone : en mer et sur les collines hors secteurs fortement urbanisés. Mesures itinérantes à vélo le 13 septembre 2006. Nicolas Martin, 2008.

Conclusion

Les climats urbains résultent de la superposition au climat local d'une sorte de greffon anthropisé, caractérisé par le minéral, une géométrie propre, un rythme de vie particulier, dont l'effet le plus tangible est l'ICU. En topographie complexe ou en milieu contrasté (littoral), l'IC n'est pas seulement urbain mais aussi topo-climatique (littoral chaud l'hiver, et frais l'été en Méditerranée). L'ICU doit toujours être évoqué avec précision quant à son niveau : surface, air dans la ville, air au-dessus des toits ? milieux dont l'approche s'effectue à l'aide de techniques très différentes.

Il en résulte des caractéristiques fortes du climat urbain, comme la difficulté de trouver des sites corrects de mesures en ville, ce qui oblige à être moins exigeant quant aux protocoles et aux conditions de mesure par rapport à l'environnement rural. On insistera sur l'ambiguïté du terme d'ICU : est-il lié à la masse de la ville ou s'agit-il d'un effet de paroi

? Évidemment les deux...

L'inertie thermique urbaine (décalages temporels des températures minimales et maximales) et la plus faible amplitude thermique en ville sont des constantes. A un îlot de fraîcheur en matinée, surtout l'été succède un îlot de chaleur en fin d'après-midi et la nuit, avec une intensité dépendant à la fois du phénomène urbain et du contexte topographique : IC « U » plus fort en hiver à Nice encadré par les advections froides de la brise de montagne, et en bordure d'une mer relativement chaude.

L'air de la ville a une humidité relative nettement moins importante que celui de la campagne surtout en été, l'après-midi, et le vent est dans l'ensemble plus faible en ville (rugosité).

Insistons enfin sur l'intérêt de modéliser à fine échelle (à partir de mesures ou de modèles physiques) !

Pour le futur : atouts et handicaps dans le monde méditerranéen...

Atouts	Handicaps
Beaucoup de surfaces blanches	Peu d'espaces verts
	Environnement sec l'été
Axes de pénétration de la brise	Approvisionnement en eau
Brise de terre nocturne si relief	Conception des immeubles peu axée sur la gestion de la chaleur (sauf vieux quartiers)
Bon approvisionnement en eau pour les villes proches de reliefs comme Nice	Tension de vapeur d'eau en hausse (pénibilité)

Pour s'adapter, JOUER sur :

- comportements-apprentissage : ne pas ouvrir fenêtres durablement l'été pour « faire entrer de l'air » mais brasser (ventilateur), etc.
- maisons/immeubles : isolation, conception (évacuation air chaud par « cheminée »),
- quartiers : dessin, orientation axes de circulation brise,
- espaces verts : fraîcheur par l'ombre et la chaleur latente d'évaporation. Accroître densité arbres feuillus (si eau disponible !).

Banque Mondiale, 2015 : <http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.RUR.TOTL.ZS>

CARREGA P., 1992 : *Topoclimatologie et habitat*. Thèse Doctorat d'Etat, ronéo, Nice, 475 p. + annexes. Publiée en 1994 dans la Revue d'Analyse Spatiale, Nice, 35, et 36. 408 p.

CARREGA P., 2014 : Le climat urbain de Nice en milieu géographique contrasté : synthèse par approche inductive. *Climatologie*, 10, 9-36.

CHARFI S., 2012 : *Le comportement spatio-temporel de la température dans l'agglomération de Tunis*. Thèse de doctorat. 310p., Tunis et Nice.

CNRM UMR 3589 : Ilot de chaleur urbain (<http://www.cnrm-game-meteo.fr/spip.php?article197>)

ECIC, 2014 : L'adaptation au changement climatique et le phénomène d'îlot de chaleur urbain : conséquences sur les bâtiments. Ecic, 25 mars 2014. Adaptation au Changement Climatique, Environnement. <http://bet-ecic.fr/ladaptation-au-changement-climatique-et-le-phenomene-dilot-de-chaleur-urbain-consequences-sur-les-batiments/>

InVS : <http://www.invs.sante.fr/Dossiers-thematiques/Environnement-et-sante/Climat-et-sante/Chaleur-et-sante/Publications>

MARTIN N., 2008 : La pollution par l'ozone, et la climatologie dans un espace méditerranéen : les Alpes-Maritimes. Thèse de doctorat. 279 p., Nice.

Analyse morphologique d'une ville méditerranéenne à partir des bases de données urbaines (BDU) et des outils SIG pour préparer la cartographie et la mesure des températures en période d'îlot de chaleur urbain (ICU)

Sébastien Bridier

Aix Marseille Université, LPED
3, place Victor Hugo, 13331 - Marseille Cedex 3,
France
sebastien.bridier@univ-amu.fr

LCZ

Canyon urbain

Marseille

L'objectif de cette étude est de préparer une campagne de mesures sur l'ensemble de la commune de Marseille en cartographiant, à partir du traitement de plusieurs couches de données numériques, les secteurs les plus favorables à la survenue d'îlots de chaleur urbains durant les situations atmosphériques favorables. Nous avons traité les couches : bâtiment, cadastre, voirie, végétation et Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour produire des indicateurs spatiaux similaires à ceux proposés dans la méthode des LCZ «Local Climate Zone» ainsi qu'un autre indicateur plus détaillé pour identifier les canyons urbains.

The objective of this study is to prepare a measurement campaign throughout the city of Marseille by mapping, from the treatment of multiple layers of digital data, the most favorable to the occurrence of urban heat island of sectors during favorable weather conditions. We treated the layers: building cadastre, roads, vegetation and terrain to produce spatial indicators similar to those proposed in the method of LCZ «Local Climate Zone» and one more detailed indicator to identify urban canyons.

Villes méditerranéennes et
changement climatique

Introduction

Cette étude repose sur l'hypothèse que durant les situations météorologiques radiatives, le climat urbain, et notamment la distribution des températures, est conditionné par les caractéristiques locales de la surface urbaine, à cause des interactions localisées entre le rayonnement solaire incident et celle-ci. Ce conditionnement est permis par la stabilité de la situation atmosphérique dite radiative (vent et nébulosité faibles ou nuls) qui limite le brassage horizontal et vertical dans la masse d'air. Il en résulte une variation spatiale et temporelle de la distribution des températures entre les différents secteurs de l'espace urbanisé.

Nous allons voir dans cet article comment exploiter les SIG et les bases de données urbaines (BDU) pour réaliser une spatialisation de différents indicateurs permettant de caractériser la mise en place et le maintien du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU).

La littérature scientifique a montré le lien très fort existant localement entre le relief, l'occupation du sol, la géométrie du bâti et des rues, la présence de la végétation et la distribution spatiale et temporelle des températures (Carrega, 1994, Stewart et Oke, 2012). Il est donc possible, à partir de l'analyse de données génériques (occupation du sol, MNT) et de la BDU de Marseille (couches SIG

cadastre, bâti, voirie, végétation, MNT/MNE) de cartographier les facteurs locaux de la distribution théorique des températures.

En climatologie la question de l'échelle est primordiale. Yoshino (1975), comme Stewart et Oke, ou Carrega ont montré qu'il existe un système d'échelles emboîtées qui permet de caractériser le phénomène selon son extension spatiale, son maintien dans le temps et son homogénéité dans les dimensions horizontale, verticale et temporelle (tableau 1).

Le climat urbain peut se définir comme une altération locale du climat régional. Il n'y a pas de climat typiquement urbain mais une modification du climat régional, dans l'espace urbanisé. La modification peut porter sur les températures, l'humidité, le vent, les précipitations, la nébulosité et la qualité de l'air. Cependant, c'est le choix de l'échelle qui va définir la nature et l'intensité de l'altération climatique observée. On peut détecter l'effet de l'espace urbanisé à l'échelle topoclimatique (100 m à 10 km) car la nature de la surface change entre l'espace urbanisé et les espaces naturels, agricoles ou aquatiques situés à proximité. Mais il est aussi possible d'observer des variations à l'échelle microclimatique (1 cm à 100 m) entre des secteurs présentant des variations de densité et de type de construction, de forme urbaine,

d'exposition, d'usage des espaces, de présence de végétation et d'eau en surface. De plus, puisqu'il s'agit principalement de l'interaction entre le rayonnement solaire et la « surface », la position du soleil dans le ciel va elle aussi contribuer à des variations temporelles conséquentes dans la journée (heure) et dans l'année (saison)¹⁶.

Le but étant de couvrir l'ensemble de la commune à une échelle microclimatique, nous verrons ici comment tracer les grandes tendances de la structure thermique d'une ville (échelle topoclimatique), puis comment préciser les variations plus fines à l'échelle du quartier et de la parcelle (échelle microclimatique).

D'un point de vue strictement physique, on considère que le système atmosphérique tire uniquement son énergie du rayonnement solaire incident, par l'intermédiaire de l'exposition directe de la surface terrestre. Toute variation dans l'apport d'énergie se fait sentir et se traduit par des variations des caractéristiques atmosphériques (températures, humidité, vent, précipitation, pression). à échelle macroclimatique, des mécanismes de régulation et d'inertie contribuent à temporiser ces fluctuations (rotation du globe, présence de masse d'eau, transport d'énergie par les courants marins, stockage de l'énergie par effet de serre). Localement, les variations d'interaction entre le rayonnement solaire incident et la « surface » sont sous le même type d'influences. Lors des situations radiatives la stabilité favorise l'expression climatique des influences locales, alors que les situations perturbées engendrent l'homogénéisation des couches atmosphériques proches du sol.

Le rayonnement solaire disponible se distribue de manière équivalente à l'échelle locale lors des épisodes radiatifs. Les variations locales sont donc uniquement dues à des variations de nature et de forme de la « surface », tandis que les variations temporelles sont essentiellement sous l'influence de la date et de l'heure.

Bien que la méthode présentée dans cette étude ait été appliquée à différents types d'espaces urbains (départements de la région parisienne (75, 92, 92, 93), Lyon, grandes villes du Languedoc, Beyrouth), les villes bordant la mer Méditerranée présentent pour un grand nombre des caractéristiques particulières, à savoir d'être adossées à la fois sur le littoral et sur le relief. Dans le cas de Marseille, la ville est tournée vers la mer (évolution historique et activité économique) mais s'est aussi étendue dans les terres vers le nord-est et l'est, puisque le littoral est fermé au nord et au sud par des reliefs conséquents (massif de l'Estaque au nord, massif des Calanques au sud) (figure 1). Le relief est découpé par des vallées qui jouent un rôle important comme limites naturelles, puis comme axes de communication et comme source de force motrice hydraulique. L'ensemble de ces facteurs contribue à une extension spatiale de la ville qui n'est pas isotrope, ainsi qu'à une sectorisation et une fragmentation importante marquée dans le paysage.

On retiendra donc que cette ville est construite sur un site de vallées et de collines, encadrées par des massifs montagneux. La distribution de l'occupation du sol est grossièrement concentrique avec une diminution progressive de la densité construite et une présence croissante de la végétation en allant du

Echelles du climat	Echelles horizontales	Echelles verticales	Echelle temporelles
Microclimat	1 cm à 100 m	1 cm à 10 m	0,1 s à 10 s
Climat local	100 m à 10 km	10 cm à 1 km	10 s à 3 h
Mésoclimat	1 km à 200 km	1 m à 1 km	3 h à 27 h
Macroclimat	200 km à 50000 km	1 m à 10 km	27 h à 10 j

Tableau 1. Système d'échelle proposé par Yoshino, 1975.

¹⁶ La hauteur et l'azimut du Soleil dans le ciel sont liés à des données astronomiques déterminées par les lois de la trigonométrie sphérique. Elles dépendent de l'heure solaire (angle horaire), du jour de l'année (déclinaison solaire), et de la latitude.

I. Méthodes et données

centre vers la périphérie. Les espaces plats sont construits et utilisés en totalité, alors que les reliefs et les pentes sont moins densément occupés. De larges espaces naturels sont situés en périphérie sur les massifs environnants. Ainsi, le centre ville apparaît globalement très fermé et minéral, alors que la périphérie est très ouverte et végétale. On peut donc s'attendre à une distribution concentrique des températures (ICU) mais l'effet de la mer, ainsi que celui des brises thermiques, peut altérer cette distribution théorique. Toutefois, au sein de cette organisation générale, il existe des variations locales de la température dues à la présence de végétation et à la diversité de la forme urbaine, notamment dans les quartiers en rénovation au centre, ou en construction en périphérie.

Nous ne développerons pas ici la variation temporelle de l'ICU même si c'est un des éléments permettant de définir le phénomène (gradient thermique entre centre et périphérie, et effet de stockage différant la baisse des températures durant la nuit dans les secteurs les plus chauds (Kastendeuch et al, 2010). Le but est ici d'analyser la distribution des températures en période d'ICU sur l'étendue d'une grande ville méditerranéenne française. Or les représentations statiques d'un phénomène dynamique (variations horaires significatives des températures) posent des problèmes sur une cartographie simple.

I.1. Les facteurs principaux

Concernant la variation spatiale de l'ICU, nous allons analyser le relief, l'occupation du sol, la présence de la végétation et de l'eau en surface et la géométrie des structures bâties, en passant de l'échelle topoclimatique à l'échelle microclimatique. Il existe simultanément des effets à l'échelle du territoire urbanisé et de sa périphérie, et des effets très locaux à l'échelle de l'îlot morphologique et de la rue.

Les facteurs principaux se manifestent à l'échelle topoclimatique. Ils concernent la structure de l'espace (relation terre/eau, relief, occupation du sol). Ils définissent grossièrement les grandes tendances de la variation spatiale des températures entre la ville et sa périphérie.

Le **premier facteur** reconnu de la variation des températures est la répartition terre/eau, pour des questions de vitesse de réchauffement et de chaleur spécifique des

matériaux. En effet la terre change rapidement de température sous l'action du rayonnement solaire direct alors que les masses d'eau sont plus stables thermiquement à cause de la chaleur spécifique de l'eau qui est plus élevée (eau : 4,18 kJ/kg/°C ; béton 0,84 kJ/kg/°C).

Le **deuxième facteur** reconnu est la distribution du relief, à cause des effets d'orientation et d'inclinaison entre la surface et le rayonnement solaire direct. Pour une ville méditerranéenne en bord de mer, adossée au relief, la combinaison du contraste terre/mer et des effets d'exposition différentielle dans le relief constitue une grande part des caractéristiques du climat local de jour comme de nuit (gradient thermique, brises de compensation et gravitaire¹⁷).

Le **troisième facteur** reconnu est la nature de l'occupation du sol. Les différences entre les structures et les matériaux présents à la « surface » occasionnent des différences dans l'albédo (fraction du rayonnement incident visible reflété), donc dans l'absorption éventuelle de l'énergie solaire.

La chaleur spécifique des matériaux est là encore différente selon que les matériaux soient naturels ou artificiels. Enfin, la présence/absence d'eau évaporable (végétation, plan d'eau) contribue à une restitution de l'énergie absorbée sous forme de flux de chaleur latente (évaporation accompagnée d'une baisse des températures) ou de flux de chaleur sensible (échauffement perceptible de la surface pour dissiper l'énergie absorbée).

¹⁷ **Brises de compensation** : mouvements d'air horizontaux résultants d'un gradient de pression induit par un gradient de température local. Ces phénomènes ont lieu le jour et la nuit.

Brises gravitaire : mouvements d'air horizontaux résultant de l'effondrement vertical de la masse d'air en contact avec le sol. Ces phénomènes ont lieu durant la nuit et au lever du jour jusqu'à ce que le soleil commence à réchauffer la surface.

1.2. Les facteurs secondaires

Les facteurs secondaires, mais très importants à l'échelle de l'individu, se manifestent à l'échelle microclimatique. Ils concernent la géométrie des espaces construits et la distribution de la végétation.

1.3. Les données

En termes de méthode, les SIG font référence pour à la fois organiser, analyser, traiter et produire les données utilisées pour l'étude climatologique. Cette étude se fonde aussi bien sur des données au format vectoriel (occupation du sol, cadastre, bâti, voirie, végétation, MNT/MNE par photogrammétrie ou LIDAR) que raster (images satellites, MNT par radar). L'ensemble de ces données est disponible pour le grand public (Shuttle Radar Thematic Mission - SRTM-, LANDSAT, CORINE LANDCOVER) ou dans le cadre de convention avec les collectivités locales (ville de Marseille, Marseille Provence Métropole - MPM -, Base de Données Altitudes - BD Alti - de l'IGN, et du Centre Régional de l'Information Géographique - CRIGE - PACA.

Les facteurs principaux sont étudiés à l'échelle topoclimatique à partir de données génériques. Il est aussi possible de réaliser ces traitements à partir de la BDU de la ville de Marseille et de MPM.

II. Traitements

II.1. Le premier et le second facteurs : le rapport terre/eau et le relief

Le rapport terre/mer et le relief peuvent être visualisés dans une même figure (figure 1). On utilise aussi bien des données génériques SRTM ou la BD Alti de l'IGN pour cartographier le relief, les pentes et les expositions. Le contraste terre/mer favorise la mise en place de brises de compensation s'établissant sur des distances assez importantes – de plusieurs dizaines de kilomètres – selon des interactions avec l'arrière pays et les Alpes du sud, alors que les vallées canalisent localement les brises de compensation et gravitaires (programme ESCOMPTE, 2001, Durand et Cros, 2004; Pigeon, 2007). On distingue donc les grands éléments du relief, soit le massif de l'Etoile au nord, le Garlaban à l'est, Marseilleveyre et les

Calanques au sud. Trois vallées découpent ce relief : les Aygaldes au nord, le Jarret vers le nord-est et l'Huveaune vers l'est. Les effets d'exposition des versants élevés et bien orientés favorisent des gradients thermiques importants, occasionnant la mise en place des brises thermiques de compensation le long des vallées (figure 1).

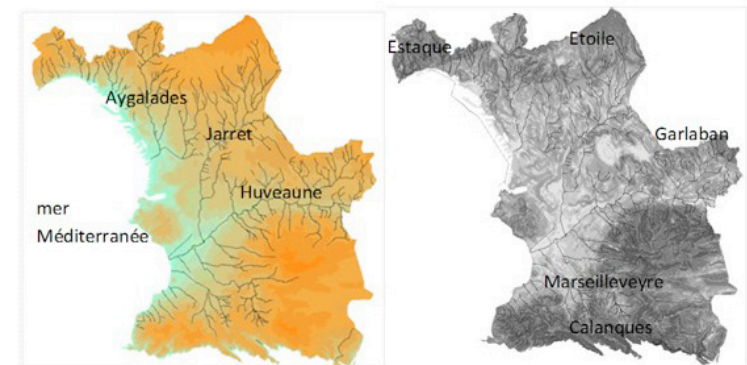


Figure 1. Réseau hydrographique, distribution des altitudes, et distribution des pentes. (sources : SRTM à 90m, BD Topo IGN - traitements S.Bridier)

II.2. Le troisième facteur : l'occupation du sol

La ville est née au bord de la mer Méditerranée sur le site grec correspondant au Vieux Port et au quartier du Panier. Elle est longtemps restée confinée dans ses murs puis s'est étendue progressivement à partir de la fin du Moyen âge, puis à la Renaissance et à l'ère industrielle (Roncayolo, 1996). Elle couvre actuellement 242 km² mais comporte encore de grands espaces naturels protégés sur les massifs. Les données CORINE LANDCOVER 2012 (CLC 12) (figure 2) permettent de visualiser la distribution de l'occupation du sol. Le tissu urbain continu (trait noir) est limité au centre de la ville alors que le tissu urbain discontinu (aplat rouge) constitue l'essentiel de la surface de la commune avec les espaces naturels (aplat vert). Il y a cependant de grandes surfaces industrielles et d'activité (port autonome, gares, usines et espaces de stockage du port, zones d'activité). On verra avec les données de la BDU qu'il est possible

de définir très précisément l'extension des zones les plus densément construites et de les caractériser avec beaucoup de détails. La classification CLC 12 permet aussi de connaître la nature des matériaux et notamment de faire la part entre l'artificiel et les espaces végétalisés, susceptibles de capter le rayonnement incident, de le refléter, de chauffer ou d'évaporer.

II.3. Les facteurs secondaires

Les facteurs secondaires sont étudiés à l'échelle microclimatique à partir des données de la BDU. On utilise les couches cadastre, bâti, voirie, végétation, MNT et MNE. Alors que les facteurs principaux permettent de dégrossir la structure thermique moyenne de la ville, l'approche microclimatique va approfondir au niveau local la distribution des facteurs influençant la distribution des températures. L'extension spatiale reste identique, il ne s'agit pas de zoomer sur un

quartier mais bien d'augmenter la résolution sur tout le territoire communal. Pour se donner un ordre d'idée la couche occupation du sol de CORINE LANDCOVER comporte 187 objets en 44 postes, entre type artificiel, agricole, naturel et eau de surface. La couche « bâti » comporte quant à elle plus de 300 000 objets (bâtiments). Le MNT est constitué de 676 000 points courants et 70 000 points sommets bâti et 128 000 points façades. La couche cadastre comporte 118 000 parcelles qui sont regroupés en 25 000 îlots morphologiques. La couche végétation comporte 12 000 objet (arbres, bosquet, espaces verts, pelouse). L'ensemble de ces données a été traité pour cartographier différents indices spatiaux.

Selon les travaux récents faisant autorités (Stewart et Oke, 2012), il est possible d'identifier différents types de zones climatiques (LCZ ou «Local Climate Zone») dans l'espace urbain. Les auteurs proposent 10 indicateurs permettant de classer les espaces dans 17 types de LCZ, dont 10 pour

l'espace urbain (5 indicateurs liés à la géométrie et 5 aux caractéristiques de la surface). Un bon exemple de mise en application de ces indicateurs est présenté par la carte interactive de l'IAU (<http://carto.iau-idf.fr/webapps/imu/>). Nous avons construit certains des indicateurs proposés par la méthode des LCZ et nous en proposons de nouveaux.

II.4. Le taux de construction

La cartographie du taux de construction par îlot (figure 3) permet de localiser les secteurs les plus densément construits au centre et la diminution progressive de la densité vers la périphérie. Sur le zoom, on remarque que le centre est très dense et que le Jarret constitue une limite à l'est au delà de laquelle les densités diminuent significativement.

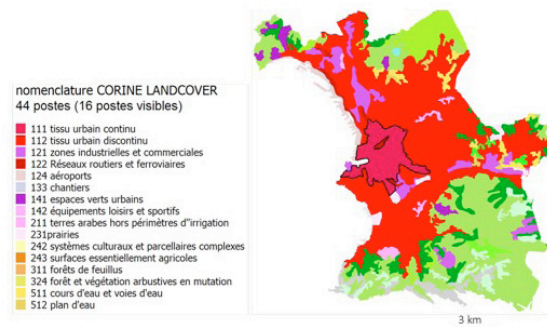


Figure 2. Occupation du sol selon CLC 2012 (tissu urbain continu cerné en noir). (Sources : Corine Landcover 2012)

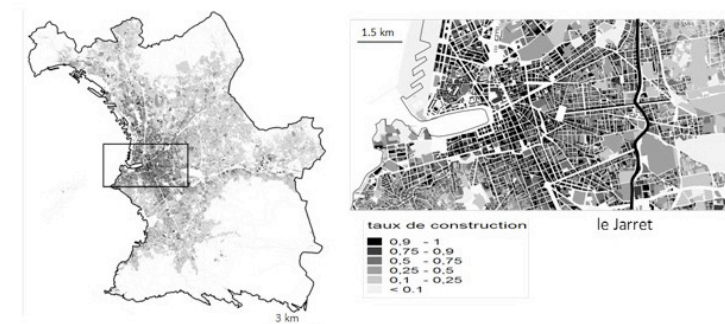


Figure 3. Taux de construction par îlot. (sources : cadastre et bâti de la BD Topo IGN - traitements S. Bridier)

II.5. Les cœurs d'îlots

Il est aussi possible d'analyser la distribution du vide. On s'intéresse alors aux cœurs d'îlot. Cet espace est délimité par les bâtiments formant la façade de la rue (dans la figure 4 les cœurs d'îlot sont en gris).

L'ouverture du tissu urbain est un indicateur aussi important que son remplissage. La structure des centres anciens des villes méditerranéennes est souvent très fermée. La fermeture empêche le soleil d'entrer dans le maillage urbain et donc d'échauffer façades et voiries. En déterminant la surface et la forme des espaces vides, il est possible d'identifier les espaces susceptibles de piéger le rayonnement. On distingue les puits de lumières, les cours, les cœurs d'îlot et les îlots ouverts.

Le fait que les immeubles forment une continuité affecte à la fois la rue et le cœur d'îlot.

Au niveau de la rue la continuité de la façade constitue le canyon urbain, lieu théorique où le captage et le piégeage sont les plus importants, et qui seront associés avec une restitution différée de l'énergie stockée.

Au niveau du cœur d'îlot, le fait que cette partie soit totalement fermée, partiellement ou totalement ouverte, détermine à la fois la captation, le piégeage et la restitution de l'énergie solaire, mais aussi la ventilation. La construction de cet indicateur ouvre donc des pistes pour la compréhension du confort à l'échelle de l'îlot et de la parcelle.

Figure 4. Répartition des cœurs d'îlot dans différents quartiers de la ville. (Sources : cadastre et bâti de la BD Topo IGN - traitements S. Bridier)

Une carte à l'échelle de la commune ne présente pas d'intérêt particulier, par contre, en zoomant, il est possible d'identifier des variations intéressantes. On peut remarquer que dans les quartiers de l'hyper centre (Belsunce) les cœurs d'îlot sont très petits, voire absents. Sur le quartier de la Plaine, les cœurs d'îlot sont fermés mais suffisamment étendus pour occuper plus de surface que les bâtiments. Au delà, dans le quartier de la Blancarde, les cœurs d'îlot ne sont plus fermés et représentent une majorité de la surface des îlots.



II.6. Les agrégats ou «cluster» de bâti

Pour travailler sur la continuité du bâti, nous avons créé un indicateur « agrégat de bâti » (figure 5). Il est construit en calculant la taille des clusters de bâtiments mitoyens. En fixant un seuil de taille, on peut identifier les secteurs les plus compacts. Les tronçons de voirie bordant ces gros clusters sont considérés comme des rues canyons, les plus susceptibles de capter, piéger et chauffer.



Figure 5. Distribution spatiale des agrégats de bâti (Marseille, centre ville, Vieux port et La Plaine). (Sources : cadastre et bâti de la BD Topo IGN - traitements S. Bridier)

Conclusion

Les différents traitements présentés peuvent être mis en œuvre à partir des outils SIG et des bases de données disponibles (générique ou BDU). Ils ont été réalisés depuis 2011 sur plusieurs villes et départements et mettent toujours en évidence les mêmes structures spatiales, que ce soit à l'échelle d'une commune, d'une agglomération ou d'un département. Alors qu'il est possible de rentrer dans des calculs très détaillés, il ressort que les couches comme le bâti, le cadastre, la voirie, la végétation et le MNT/MNE sont largement suffisantes pour cartographier en tout point d'une agglomération les facteurs de l'échauffement en période d'ICU.

L'objectif de ces traitements est à la fois de disposer d'éléments pour comprendre la répartition des températures dans un milieu urbain très hétérogène, mais aussi de pouvoir caractériser les sites susceptibles d'être équipés avec des capteurs météorologiques. Le milieu urbain est en effet trop complexe pour pouvoir être équipé selon les règles standards de l'Organisation Météorologique Mondiale. Il faut donc, à défaut de disposer d'un site idéal, être en mesure de comprendre les influences locales exercées sur les capteurs et pouvoir décider en conscience de l'emplacement des instruments de mesures.

II.7. La végétation accessible ou captive

Si on considère maintenant la végétation, on peut ajouter aux indicateurs de base – comme le taux de végétation par parcelle ou par îlot – un indicateur sur la présence de la végétation au niveau de la voirie mais aussi au niveau des cœurs d'îlot. On dispose alors d'une information sur la végétation accessible et la végétation captive. Un traitement par SIG (figure 6) permet de distinguer les surfaces de végétation en milieu ouvert (espace public, rue) ou en milieu fermé (cœurs d'îlot).



Quartier du centre ville : Belsunce (végétation en vert)



Quartier de la Plaine (végétation en vert)



Quartier de la Blancarde (végétation en vert)

III. Résultats

L'ensemble des indicateurs se recoupe assez logiquement. Les taux de surface construite sont associés avec les limites du type 111 de CLC 12 (tissu urbain continu). De même avec la répartition des agrégats bâtis de plus de 25 individus par cluster. La présence de la végétation augmente avec la distance au centre et, plus en détail, la végétation du centre est souvent dans l'espace public car les cœurs d'îlots sont très étroits ; dans la proche périphérie la végétation est plus captive à l'intérieur des îlots, alors qu'en périphérie plus lointaine elle est plus fréquente sur l'espace public ou devient accessible du fait de l'ouverture totale des îlots.

Seule l'interface SIG permet d'exploiter au mieux le résultat de tels traitements car il permet à la fois d'avoir une vue d'ensemble, mais aussi d'avoir une vue détaillée en tout point de l'espace étudié.

D'autres calculs encore plus fins ont été réalisés à partir de ces données, comme le bilan d'énergie radiative sur les façades et les toitures, la caractérisation des rues canyons (hauteur, largeur, orientation, exposition) pour chaque brin du réseau routier disponible, le système de brise thermique tenant compte des pentes et des rues. Au delà de l'approche théorique, seules les mesures peuvent venir confirmer les hypothèses liant l'espace géographique et les températures de l'air.

Figure 6. Répartition de la végétation dans les rues et les cœurs d'îlots dans différents quartiers de la ville. (Sources : cadastre, bâti et végétation de la BD Topo IGN - traitements S. Bridier)

Carrega P., 1994 : *Topoclimatologie et habitat. Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée*. In *Revue de Géographie du laboratoire d'analyse spatiale Raoul Blanchard*, 408p.

Durand P. et Cros B., 2004 : Le programme ESCOMPTE. *La Météorologie*, 44,16-27

Kastendeuch Pierre P., Najjar G., Lacarrere P. et Colin J., 2010 : Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. *Climatologie*, 7, 21-37.

Pigeon G., 2007 : *Les échanges sol-atmosphère en zone urbaine : projet CLU-ESCOMPTE et CAPITOU*. Thèse Université Paul Sabatier Toulouse III, 172p.

Stewart I. D. and Oke T. R., 2012 : Local climate zones for urban temperature studies, *Bulletin of the American Meteorological*, 12. <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

Roncayolo M., 1996 : *Marseille : les territoires du temps*. Paris, Éd. locales de France

Yoshino M., 1975 : *Climate in a small area*. Tokyo univ. Press, 549p.

Topoclimat

Mesures itinérantes

Aspect topoclimatiques de Bizerte (NE de la Tunisie) : Ilot de chaleur urbain et brises thermiques

Salem Dahech et Sami Charfi

Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines
Laboratoire SYFACTE, route de l'aéroport km 5, 3023 Sfax,
Tunisie
salem.dahech@gmail.com ; charfisami_geo@yahoo.fr

Cette étude portant sur la brise littorale et l'îlot de chaleur urbain (ICU) à Bizerte (au NE de la Tunisie) montre que la périphérie rurale est plus fraîche la nuit que le centre de Bizerte, par temps radiatifs (clair et calme). Un ICU d'intensité modérée, ne dépassant pas 5,5°C, est enregistré sous abri à 2 mètres au-dessus du sol. L'aérodrome est très influencée, notamment en été, par les facteurs géographiques locaux : effets de la mer, du lac et de la topographie. Par temps calme, à l'aérodrome, la brise commence à souffler du Lac de Bizerte vers 9 h (heure solaire) en été, sa vitesse avoisine 3 m/s. La brise de mer rejoint la station de l'Institut National de la Météorologie (INM) entre midi et 13 heures et atteint 7 m/s vers 17 h. Dans la zone de la Corniche, au nord de l'agglomération, la brise de mer se déclenche le matin entre 8 et 9 h et se couche le soir vers 21 h. Le soir, une faible brise d'amont s'écoule sur le versant oriental de Jbel Ennadhour.

This study on the coastal breeze and the Urban Heat Island (UHI) in Bizerte (North East Tunisia) shows that the rural surroundings are cooler at night than the center of Bizerte in radiative weather (clear and calm). A UHI of a moderate intensity, not exceeding 5.5°C, is recorded in the shade at 2 meters above the ground. Aerology is highly influenced, especially in summer, by local geographical factors such as the effect of the sea, the lake and topography. In calm weather, at the aerodrome, the breeze starts blowing from the Lake of Bizerte at 9 pm (solar time) in summer; its speed is around 3 m/s. The coastal breeze reaches the National Institute of Meteorology Station (NIM) between noon and 1pm and reaches 7 m/s at 5 pm. In the Corniche area, north of the town, the coastal breeze is triggered in the morning between 8 am and 9 am and sets in the evening around 8 pm and 9 pm. At night, a light mountain breeze flows on the eastern slope of Jebel Ennadhour.

Villes méditerranéennes et changement climatique

Introduction

La ville est souvent plus chaude que la campagne voisine, notamment durant la nuit, à l'exception de certaines villes oasis très végétalisées autour des zones arides ; elle forme un « îlot de chaleur urbain » (ICU) (Oke, 1973 ; Escourrou, 1990). De même, la terre est plus chaude que la mer le jour, et inversement la nuit. Ces contrastes thermiques sont plus élevés lors des situations de calme atmosphérique où la différence de température peut atteindre 8°C, gradient horizontal suffisant pour engendrer des vents locaux, comme la brise littorale (Escourrou, 1982 ; Simpson, 1994). A titre d'exemple, selon Djen (1992), parmi les conséquences de l'expansion urbaine, Shanghai – mégalopole qui a vu sa surface urbanisée doubler entre 1950 et 1980 – a enregistré une hausse de 0,7°C de l'écart entre la température minimale du centre-ville et celle de sa campagne, une diminution de la vitesse du vent de 3,2 à 2,9 m/s, une hausse du pourcentage du rayonnement diffus de 47 à 59% et une faible diminution de l'humidité relative. Les exemples de ce genre ne manquent pas. Par ailleurs, les villes enregistrent des concentrations de polluants atmosphériques 5 à 25 fois plus élevées qu'à la campagne (Liébard et De Herde, 2005). La chaleur excédentaire engendrée par la ville, particulièrement en été, n'est pas sans incidences sur la santé humaine et sur la consommation en énergie électrique dédiée à la climatisation (Fung et al., 2006 ; Tzoulas et al., 2007). En outre, durant les événements caniculaires, il a été montré dans plusieurs villes, notamment aux États Unis, que les quartiers denses, occupés par une population vulnérable, correspondaient à des îlots de chaleur et à la fois à des « îlots de décès » (Johnson et Wilson, 2009).

Cependant, durant la journée, nous pouvons constater que la ville est plus fraîche que la campagne, dans les zones semi-arides (Lazzarini, et al., 2013; Rasul et al., 2015).

En Méditerranée, les situations radiatives (temps clair et calme) dominant en été, laissant apparaître un gradient thermique terre/mer et ville/campagne, d'où l'apparition des brises thermiques et de l'ICU, comme à Bizerte au nord-est tunisien (figure 1A). Ces deux phénomènes sont les principales manifestations climatiques à l'échelle topoclimatique, soit une extension d'une dizaine de kilomètres (Choisnet et Cloppet, 2016). Toutefois, les mesures météorologiques en ville sont difficiles à réaliser en raison de divers facteurs, tels que l'effet de masque, l'effet de parois et le dégagement ponctuel de la chaleur issue des moteurs (véhicules, climatiseurs...), qui peuvent fausser certains résultats notamment au niveau de la température. A ces facteurs s'ajoute la complexité de l'espace urbain dont les caractéristiques (végétation, densité et hauteur du bâti, matériaux de construction, couleurs...) varient d'un quartier à l'autre (Carrega, 2013).

En Tunisie, le réchauffement estival – scénario prévu par la plupart des modèles climatiques (IPCC, 2007 et 2013) – pourrait aggraver les effets néfastes sur la santé humaine et le milieu naturel, ainsi que la consommation d'énergie (Johnson et Wilson, 2009). La compréhension de l'ICU, de la brise et des diverses ambiances bioclimatiques dans la ville est requise pour développer des stratégies d'adaptation et d'atténuation adéquates. Grâce à la recherche en topoclimatologie, des mesures

dans les domaines de l'aménagement et de l'environnement pourraient ainsi être révisées ou instaurées.

Dans le présent travail, nous souhaitons évaluer la variation temporelle des températures enregistrées à la station de l'Institut National de la Météorologie (INM) dans un premier temps. Puis étudier la variabilité spatio-temporelle de la brise et de l'ICU dans l'agglomération de Bizerte dans un second temps.

I. Zone d'étude, méthodes et données

L'agglomération de Bizerte se caractérise par son étalement spatial, sa topographie contrastée et un tissu urbain diversifié et complexe. Ces conditions agissent fortement sur l'écoulement des brises thermiques et la répartition spatiale des températures. En effet, la partie densément bâtie occupe la partie centrale de la ville et une frange littorale, étroite par endroit. Elle s'étend sur 15 km environ, allant de Menzel Jmil au sud, à la Corniche au nord. L'agglomération abrite environ 350 000 habitants. La partie la plus dense correspond à la délégation de Bizerte Nord (environ 75 000 habitants), soit une densité de l'ordre de 1 600 habitants/km² (INS, 2015; figure 1B et C). Les zones végétalisées occupent les

collines qui bordent l'agglomération, culminant à environ 200 m : nous distinguons la forêt de Ennadhour au nord-ouest et celle de Jbel Rmel au sud. En outre, des terres agricoles dominent dans la partie occidentale (figure 1C; figure 2A). Au cœur de cette dernière, à proximité du lac de Bizerte, nous trouvons la station météorologique de l'INM sise dans l'aérodrome de la base aérienne Sidi Ahmed, à environ 9 km du centre-ville de Bizerte et de la Méditerranée. Les données de cette station ne permettent pas de caractériser le climat local de l'agglomération de Bizerte, à l'image des stations situées en milieu rural (Carrega, 1994).

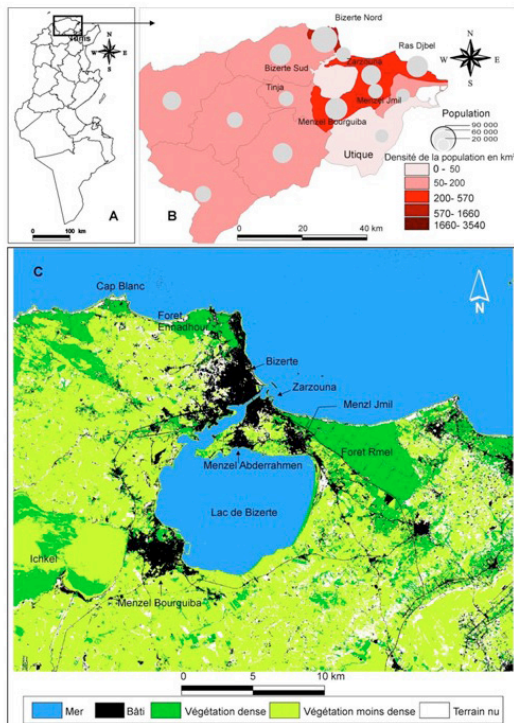


Figure 1. Localisation (A), population (B) et occupation du sol (C) à Bizerte. (données INS 2015 pour B et C déduite à partir d'une image Landsat 8 datée du 4 août 2016).

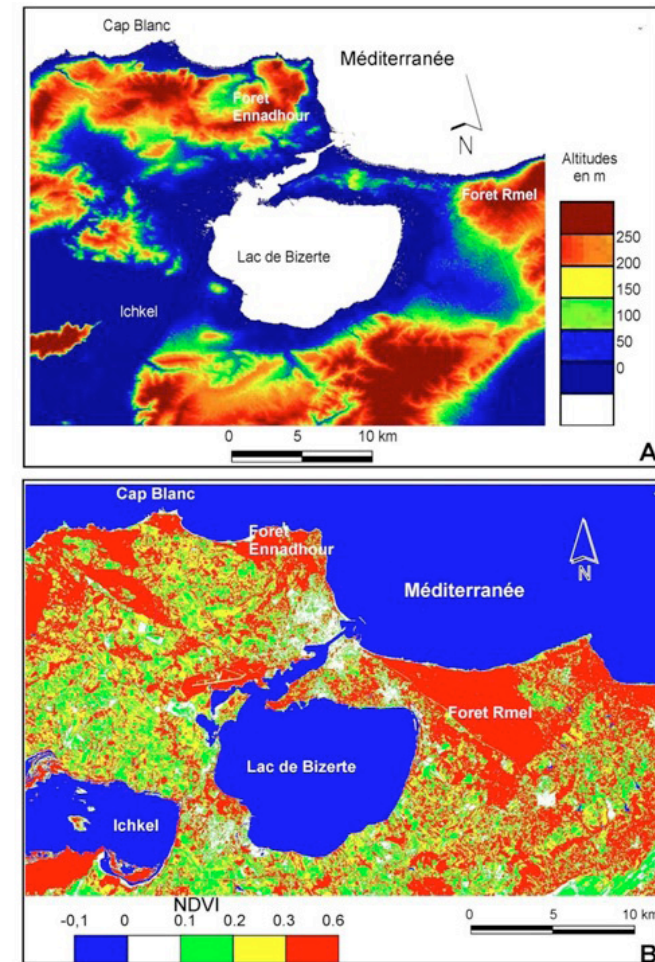


Figure 2. Topographie (A) et Indice de végétation normalisé (NDVI, B) (« A » issue d'un modèle numérique de terrain à 30m de résolution déduit des données ASTER et « B » calculé à partir d'une image Landsat 8 datée du 4 août 2016).

Pour vérifier cette hypothèse, outre les données météorologiques concernant la température et le vent de la station de Bizerte fournies par l'INM, nous avons installé en 2012 une station Davis Instrument (Vantage Pro 2) au nord de l'agglomération, à quelques mètres de la mer. Celle-ci mesure la température, l'humidité, la vitesse et la direction du vent à un pas de temps de 5 mn. Ces données donnent

une idée précise sur le fonctionnement des brises thermiques. Malheureusement, l'écart thermique entre cette station expérimentale et celle de l'INM pouvant renseigner sur l'intensité de l'ICU et sa variabilité temporelle n'a pas pu être calculé en raison d'une panne au niveau du thermomètre. En revanche, l'imagerie issue de l'Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer

(ASTER) et les mesures itinérantes, ont permis de suivre la variabilité spatio-temporelle du champ thermique nocturne, respectivement en surface et à 2 mètres au-dessus du sol.

L'image ASTER a été prise le 15 mai 2016, par temps radiatif (le ciel est totalement clair lors de la prise de vue), à 22h22 (heure locale), soit environ quatre heures après le coucher du soleil, durée suffisante pour faire apparaître un éventuel ICU en surface (Gallo *et al.*, 1993). Les 5 bandes TIR (8,25-11,65 μ m) sont sélectionnées ; leur résolution spatiale est de l'ordre de 90 m (Abram *et al.*, 2008). Après la correction géométrique de l'image (projection UTM, Datum WGS84), les températures de surface ont été déduites en appliquant la formule *Multi-Channel Sea-Surface Temperature (MCSST)* développée par Matsunga (1996) (Charfi et Dahech, 2013). Les résultats obtenus ont été vérifiés en les croisant aux mesures issues des NOAA-AVHRR et au modèle *Global Forecast System (GFS)*. Le 15 mai 2016, la thermographie ASTER-TIR a ainsi mesuré environ 20°C à 22h22 sur la mer ; c'est-à-dire un résultat cohérent en se référant aux données ci-dessus.

Les variations spatiales des températures de surface mesurées par satellite, par temps clair en phase nocturne, ne sont pas très éloignées de celles des températures de l'air (à 2 m au-dessus de la surface) et sont tributaires de l'occupation du sol et de son degré d'humidité (Rao, 1972 ; Voogt *et al.*, 1998 ; Quattrochi and Luvall, 1999 ; Friedl, 2002 ; Chudnovsky *et al.*, 2004). Par type de temps radiatif, la canopée urbaine est susceptible de modifier significativement les caractéristiques thermiques des basses

couches de l'atmosphère avec lesquelles elle est en contact. Cette dernière est influencée par sa base par le type d'occupation et latéralement par les murs des bâtiments (Kastendeuch *et al.*, 2010). C'est pour cette raison que nous avons analysé, à partir d'une image ASTER-TIR, la variabilité spatiale des températures de surfaces à Bizerte et ses environs comme étant un des facteurs déterminants des variations du champ thermique de l'air. Ce dernier a été cerné en recourant aux mesures itinérantes. Cette technique est couramment utilisée pour spatialiser les températures de l'air (Carrega, 1994). Elle a pour apport de pallier l'absence d'information sur le climat urbain de Bizerte puisque la seule station est située en zone rurale. Une campagne de mesure a été effectuée le 5 août 2016 par temps radiatif entre minuit et 01h30. Les mesures ont été réalisées par un thermo-hygromètre portable de type *Testo 400* ayant une réponse rapide de l'ordre de 10 secondes et une précision de l'ordre du dixième de degré Celsius pour la température et du dixième de pourcent pour l'humidité relative. La sonde a été placée en dehors du véhicule à 1,5 m du sol et à 0,5 m de l'habitacle. Les mesures étaient continues, la voiture roulait à une vitesse quasi constante de 30 km/h (trafic fluide), de façon que la sonde soit ventilée.

Durant cet intervalle de temps, le ciel était totalement dégagé, une très faible brise de terre dont la vitesse était inférieure à 1 m/s soufflait à l'aéroport où des températures de l'air de l'ordre de 22°C étaient stables entre 0 et 2 h. Ces conditions sont propices pour l'apparition d'un ICU intense (Cantat, 2004). 43 mesures de la température et de l'humidité relative ont été relevées couvrant la

quasi-totalité de l'agglomération et choisies en fonction de l'hétérogénéité de l'occupation du sol (figure 3).

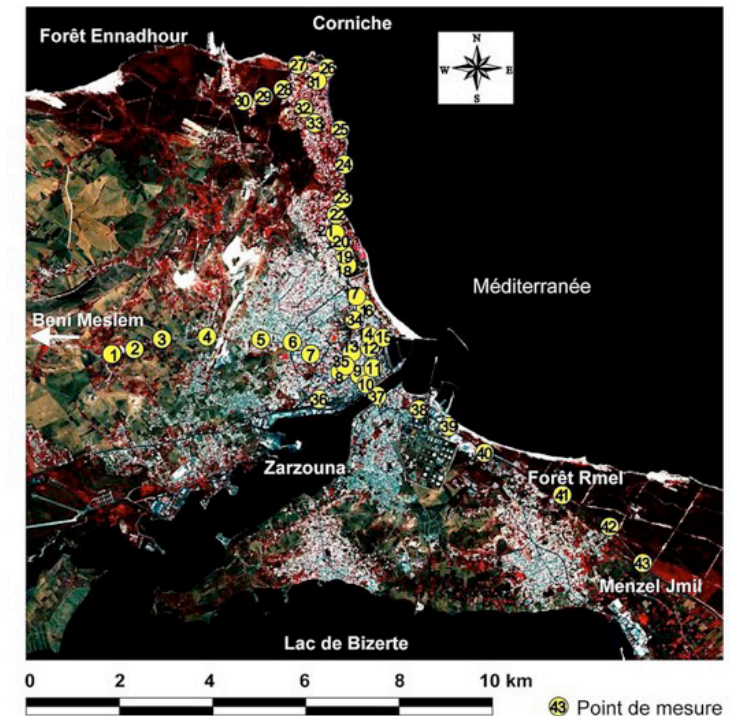


Figure 3. Les points des mesures itinérantes réalisées le 5 août 2016 entre minuit et 1h30 (fond, composition colorée fausses couleur infrarouge d'une scène Landsat 8 datée du 4 août 2016).

II. Organisation spatiale du champ thermique nocturne par temps radiatif

Nous avons jugé utile, d'abord de transformer les valeurs d'humidité relative en tension de vapeur d'eau à partir du calcul de la température de rosée (td). Ensuite, nous avons neutralisé l'évolution nocturne de la température en calculant de nouvelles séries d'écart par rapport à la référence urbaine. Le site de mesure urbain de référence¹⁸ est situé en plein centre-ville (point 17). Celui rural, distant d'environ 5km à vol d'oiseau, correspond à une zone agricole sur la route de Beni Meslem à l'ouest de l'agglomération (point 2). Enfin, une cartographie ponctuelle, utilisant la variable visuelle taille et valeur, à la fois, a été adoptée pour matérialiser l'écart thermique par rapport au point de référence.

Pour étudier les caractéristiques de la brise nous utilisons les données météorologiques issues de la station météorologique fixe expérimentale installée dans la zone de la Corniche, en plus de celles fournies par l'INM enregistrées à l'aérodrome. Ces dernières, après l'utilisation d'un ensemble de filtres, renseignent sur la fréquence mensuelle de la brise littorale. Les critères de sélection sont ceux avancés par Dahech et al., (2012) inspirés des travaux de Neumann et Mahrer (1997), Simpson (1994), Planchon (1997), Borne et al., (1998) et Dahech et al., (2005). Après avoir écarté les jours pluvieux, dépressionnaires et venteux (ne garder que les jours où les précipitations sont absentes, la pression est supérieure à 1007 hPa et la vitesse du vent maximal instantané est inférieure à 12 m/s), nous avons retenu les jours où le vent souffle des secteurs venant de la mer (les quadrants nord et est) durant la journée et du secteur continental (quadrant ouest et nord-ouest)

pendant la nuit. Nous avons gardé les jours où la brise de mer et celle de terre alternent. Les données météorologiques utilisées dans ce travail couvrent la période 1974-2013. Leur fiabilité a été vérifiée en examinant les données lacunaires et les erreurs aléatoires qui portent sur la cohérence entre les paramètres météorologiques et la cohérence temporelle des données. Les données relatives à l'espace, comme la répartition spatiale du bâti, la masse végétale, le milieu environnant des mesures, sont déduites à partir de l'image satellitaire Landsat 8 datée du 4 août 2016 et de captures d'écran Google Earth prises durant l'été 2016.

II.1. Organisation spatiale du champ thermique nocturne de surface par temps radiatif

L'image ASTER-TIR du 15 mai 2016 montre un champ thermique de surface hétérogène avec l'apparition de plusieurs îlots relativement chauds. Les températures de surface varient de 11 à 21°C (figure 4). Les plus élevées sont enregistrées au niveau de la mer et des principaux noyaux chauds occupent les quartiers populaires au nord-ouest du centre-ville (Bévèdere, Elhana...), la Médina, la ville européenne, Jarzouna au sud. Les surfaces les plus fraîches correspondent aux forêts de Rmel et Ennadhour, respectivement au sud et au nord-ouest de l'agglomération et à la zone agricole à l'ouest de l'agglomération. Les îlots de chaleur les plus importants ne

sont pas compacts. En effet, au niveau du centre-ville, apparaît une forte hétérogénéité thermique : certaines surfaces sont fraîches. Elles correspondent aux parcs urbains, aux complexes sportifs (15 octobre et Elbosyri), ainsi que la zone touristique et certains terrains non occupés. Des noyaux chauds plus petits sont décelés au sud-ouest de l'agglomération dans la zone industrielle, à Kharrouba, et près de la côte nord-est le long de la Corniche. En milieu urbain, les différences de la thermographie entre l'habitat pavillonnaire, d'une part, et l'habitat populaire d'autre part sont nettes. En effet, des îlots de chaleurs, relativement moins intenses, couvrent les quartiers résidentiels à habitat pavillonnaire telles que Zkak-Ezzouz et Sammadia. Les quartiers populaires denses enregistrent 2°C de plus que les zones

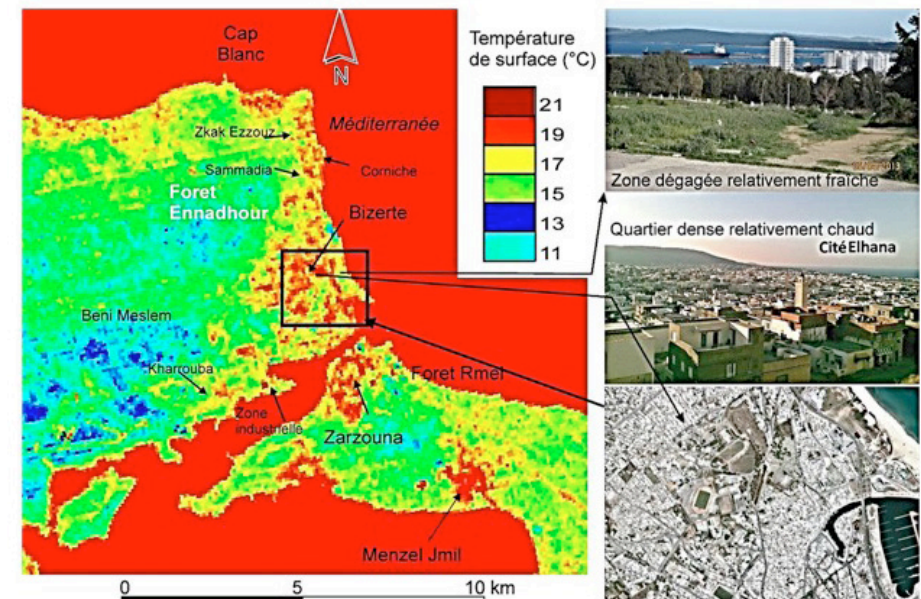


Figure 4. Champ thermique en surface d'après l'image ASTER-TIR prise le 15 mai 2016 à 22h22 (Source des images à droite de la carte, Google Earth).

¹⁸ Selon la formule $T_x - T_0$ avec T_x = mesure à un point x et T_0 = mesure au point de référence urbaine.

à occupation mixte. Cet écart s'explique vraisemblablement par leurs tissus très serrés et très peu végétalisés. A la périphérie de l'agglomération, les zones fraîches sont mieux individualisées et plus homogènes. Elles correspondent à un paysage forestier. L'écart thermique ville-campagne de surface s'explique essentiellement par la hausse des flux de chaleur sensible par rapport aux flux de chaleur latente et par la rareté des surfaces évaporantes dans les quartiers denses. Conséquemment, le substrat urbain restitue une quantité de chaleur sensible plus élevée la nuit (Oke, 1973).

II.2. Organisation spatiale de la température de l'air à Bizerte et dans ses environs

Afin de parvenir à une meilleure connaissance du champ thermique urbain, une campagne de mesure itinérante a été organisée pendant la saison estivale le 5 août 2016 à 00 h par type de temps radiatif. L'examen des mesures itinérantes nocturnes à 2 m au-dessus du sol (43 points de mesure : figure 5) montre des variations des valeurs de température à Bizerte et ses environs la nuit et l'existence d'un îlot de chaleur sur les zones densément urbanisées. La disparité spatiale des températures dans l'espace intra-urbain est modérée ($\approx 1,2^\circ\text{C}$). Un îlot de chaleur relativement fort occupe la zone centrale densément urbanisée : la Médina, la ville européenne, les quartiers nord (Errawebi, Errouki...), Bizerte sud et Jarzouna. L'écart maximal par rapport à la campagne environnante atteint $5,2^\circ\text{C}$.

Une individualisation nette de la masse urbaine est observée par rapport aux

espaces ruraux, mais plus difficilement une opposition de quartiers. A l'échelle de la zone agglomérée, les écarts restent inférieurs à 2°C mais parfois très expressifs. En effet, les espaces végétalisés et régulièrement arrosés constituent des îlots de fraîcheur en baissant la température d'environ $1,8^\circ\text{C}$, comme c'est le cas du point de mesure 19, bordée de part et d'autre par la végétation, où nous avons enregistré $24,5^\circ\text{C}$ contre $25,7^\circ\text{C}$ au niveau du point de mesure 22, situé dans un tissu urbain dense. Vers le nord, la mer paraît aussi comme un facteur de discrimination thermique en agissant par sa forte inertie thermique. C'est pour cette raison que la température augmente à $25,2^\circ\text{C}$ au niveau de la corniche de Bizerte (P23, figure 5).

Vers l'ouest et le sud, la baisse de la température s'effectue d'une manière progressive. À l'extrême ouest (route de Beni Meslem: P1 et P2), la topographie, caractérisée par un réseau hydrographique important, est très favorable à l'installation des inversions thermiques par refroidissement radiatif et l'écoulement d'air froid (brise de vallée) en provenance des monts de Jbel Ennadour. Au sud, la forêt de Rmel (P41, P42, P43) correspond à un vrai îlot de fraîcheur en baissant la température de plus de 4°C par rapport au centre-ville.

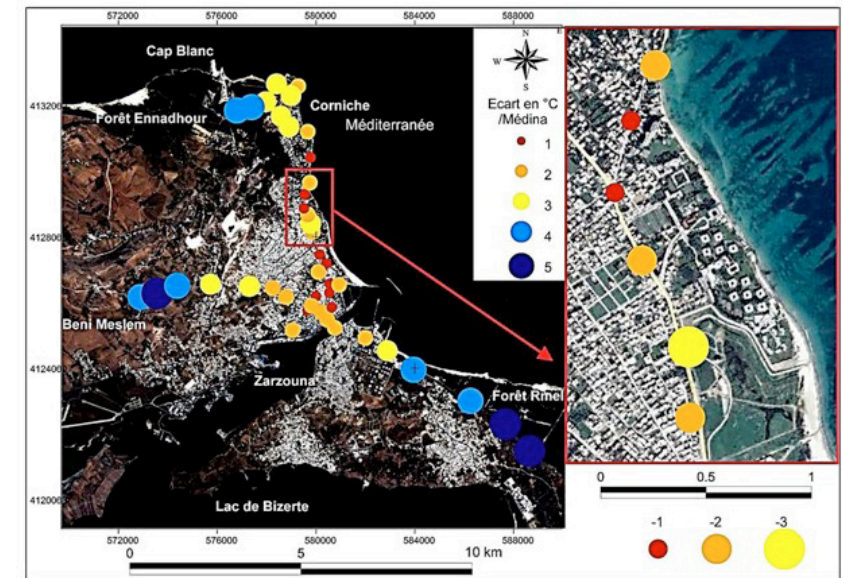


Figure 5 : Variation spatiale des températures de l'air nocturnes dans l'agglomération de Bizerte (mesures itinérantes par temps radiatif le 5 août 2016; fond, composition colorée fausses couleurs infrarouge d'une scène Landsat 8 datée du 4 août 2016 et image Google Earth à droite).

L'analyse du champ hygrométrique permet de confirmer nos déductions concernant les éléments d'explications des disparités spatiales de températures (figure 6). En fait, le secteur ouest, le plus froid, (route de Beni Meslem) est plus sec que le reste de l'agglomération, confirmant outre le refroidissement radiatif, les apports d'air allogène continental par le biais de la brise d'amont qui s'écoule sur le versant de Jbel Ennadour vers la ville de Bizerte.

L'écart maximal d'humidité absolue – exprimé par la température de rosée (td en $^\circ\text{C}$) par rapport à la référence urbaine – atteint $3,9^\circ\text{C}$. Le sud, est également sec avec un écart de td, par rapport au centre-ville plus faible, de l'ordre de $2,9^\circ\text{C}$. Il s'agit d'un isthme

séparant le lac de Bizerte et la mer, occupant le versant ouest de Jbel Hakima (250m). Il est constitué d'une plaine parsemée de dunes occupées par la forêt de Rmel, propice à une forte consommation de chaleur latente et des terrains labourés favorables au refroidissement radiatif et à l'installation des inversions thermiques (P41, P42, P43). Le même écart d'humidité a été enregistré à l'extrême nord au niveau du point de mesure (P2), situé sur le versant est de Jbel Ennadhour, occupé lui aussi par une forêt dense. L'air froid et sec à caractère continental provient vraisemblablement de la brise d'amont. Près de la côte, l'humidité augmente sensiblement sous l'effet de la mer, comme c'est le cas des points (P22, P23, P24). Au niveau de la zone urbaine (point de mesure P7, P8, P12,

III. Caractéristique de la brise de mer à Bizerte

P13, P14), la température de rosée reste relativement élevée à cause de la proximité de la mer, d'une part, et du faible brassage de l'air, d'autre part. Il est édifiant de souligner enfin que le passage à travers les parcs urbains à Bizerte n'a pas été accompagné d'un changement sensible au niveau de l'hygrométrie à cause de la faible densité de la biomasse végétale et l'absence d'une pelouse régulièrement arrosée, comme c'est le cas de la *Place du 14 janvier* (P9, P10).

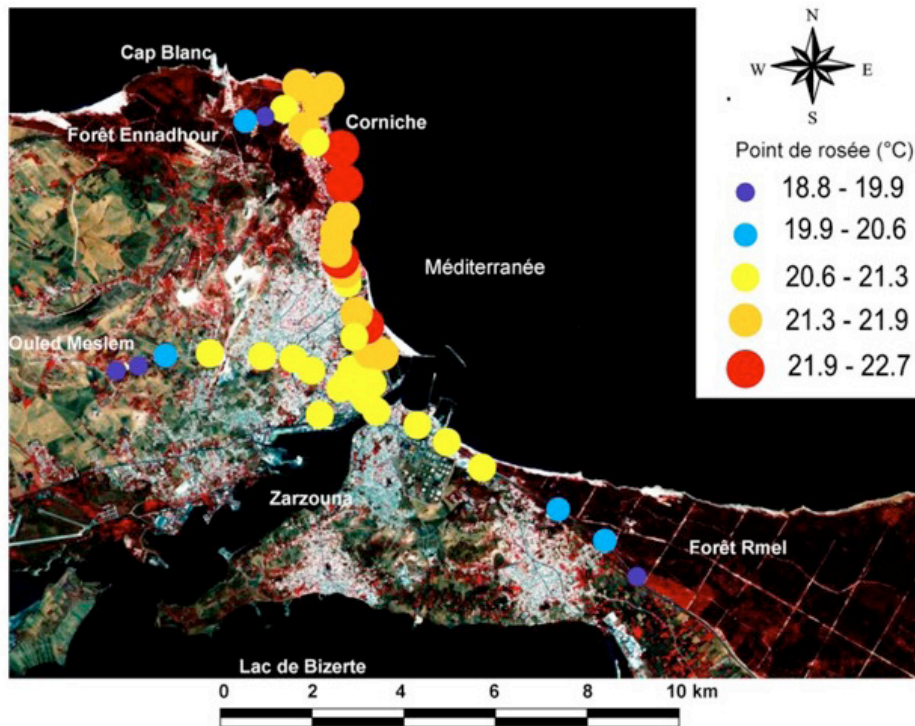


Figure 6 : Variation spatiale de la température de rosée nocturne dans l'agglomération de Bizerte (mesures itinérantes par temps radiatif le 5 août 2016 ; fond, composition colorée fausses couleurs infrarouge d'une scène Landsat 8 datée du 4 août 2016).

III.1. Fréquence mensuelle, direction et vitesse à l'aéroport

La brise littorale est plus fréquente en été, saison durant laquelle elle est observée durant plus de deux tiers des journées. C'est un phénomène de « beau temps » car un vent synoptique fort aurait pour effet de brasser l'air et d'estomper les contrastes thermiques entre la mer et la terre. En effet, d'après Fonstère (1934), la brise de mer est plus fréquente dans les régions ensoleillées où le vent synoptique est faible comme sur les marges de la Méditerranée. Sa fréquence augmente durant la saison offrant les conditions précitées propices à son déclenchement. A Bizerte, la situation de marais barométrique est plus fréquente en été. En hiver, une brise de mer le jour, alternant avec une brise de terre la nuit, devient moins fréquente : sa fréquence est alors de l'ordre de 20%. Durant cette saison froide, les vents forts, dépassant 8 m/s, sont relativement fréquents. Il s'agit d'une région parmi les plus ventées en Tunisie où le vent synoptique s'impose (Dahech et al., 2012).

La figure 7 représente la fréquence mensuelle moyenne de la brise de mer à Bizerte entre 1974 et 2013, en utilisant les filtres détaillés dans la partie méthode.

Les roses de vent relevées à 15 h et à 3 h (vitesse et direction), élaborées à partir de données enregistrées entre 1974 et 2013 durant les mois de juin, juillet et août, donnent une idée sur la fréquence élevée du phénomène en été (figure 8 à gauche). Le pourcentage des vents soufflant de la mer à 15 h à une vitesse modérée avoisine 70% à Bizerte. Il souffle soit du quadrant septentrional, soit du quadrant oriental. Cette direction est proche de la perpendiculaire à la côte.

La brise nocturne est de faible vitesse ; elle ne dépasse pas 3 m/s. Elle souffle globalement vers la mer comme le montre la rose de vent de 3 h (figure 8 à droite). Sa trajectoire est influencée par la topographie : elle longe les basses plaines et les vallées sises à l'ouest de la station météorologique de la base aérienne

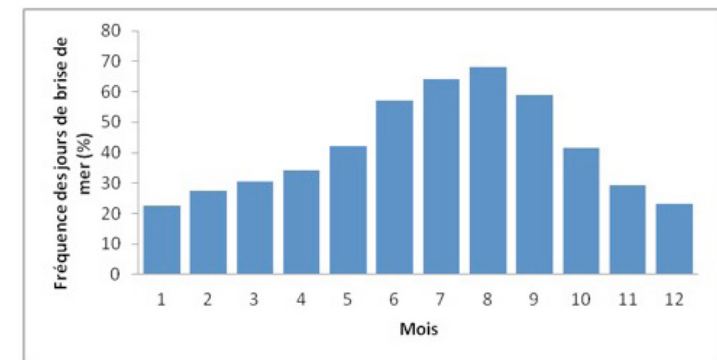


Figure 7 : Fréquence mensuelle (%) des jours de brise de mer (données INM, période 1974-2013).

Sidi Ahmed. Cette station est implantée à 1 km au nord du lac de Bizerte. Comme conséquence, d'une part, la brise de terre peut souffler vers le lac (vent de N à NO) ou vers la mer (O à OSO). D'autre part, puisque la station est située à 9 km du trait de côte, la brise de mer est précédée par une légère brise

venant du lac situé au sud-est ; sa vitesse est souvent inférieure à 4 m/s, comme le montre la rose de vent à 9 h (figure 9). Cette brise de lac n'est observée que par temps calme, soit environ 25% des situations de brise en été

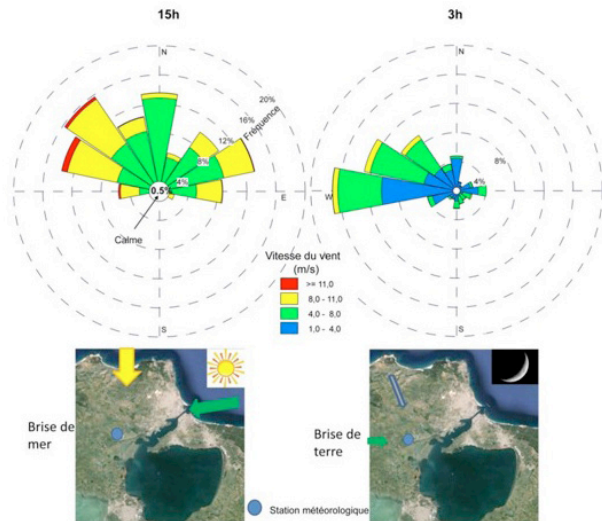
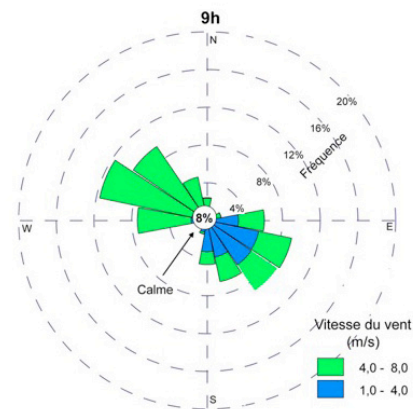


Figure 8. Roses de vent par tranches de vitesse enregistré à 3h et 15h dans la station de Bizerte, durant les mois de juin, juillet et août entre 1974 et 2013 (données INM).

Figure 9 : Roses de vent par tranches de vitesse enregistré à 9h dans la station de Bizerte, durant les mois de juin juillet et août entre 1974 et 2013 (données INM ; les vents forts et très forts ont été éliminés, ils représentent 13%).



III.2. Caractéristique de la brise près de la mer d'après les données de la station fixe

La station météorologique expérimentale fixe Davis Instrument, installée à quelques dizaines de mètres de la mer, donne une idée sur la circulation de la brise de mer dans la délégation de Bizerte Nord, celle la plus dense de l'agglomération. Les anémogrammes issus de cette station montrent que plusieurs jours de brise de mer peuvent se succéder, formant des séquences dont la longueur peut atteindre 12 jours de suite. Ces graphiques montrent également les horaires précis de lever et de coucher de la brise, puisque un pas de temps fin de 5 minutes a été choisi lors de l'installation de la station.

D'après l'exemple de l'épisode ci-dessous, allant du 20 au 22 août 2012, la brise se lève vers 8h30, soit environ trois heures après le lever du soleil, et se couche vers 21h, soit environ deux heures après le coucher du soleil. De ce fait, sa durée au mois d'août avoisine 13 heures par jour. Elle atteint sa vitesse maximale, qui frôle 7 m/s, vers 15 h. A cette heure-ci, elle souffle perpendiculairement au trait de côte, donc du secteur oriental (figure 10).

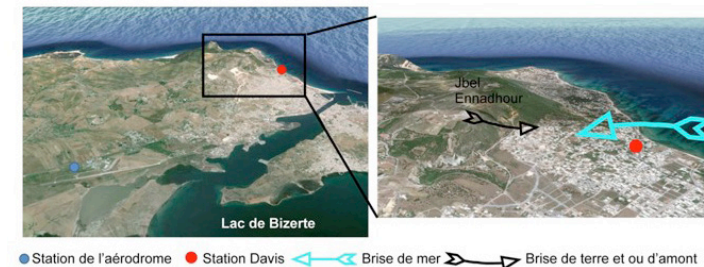
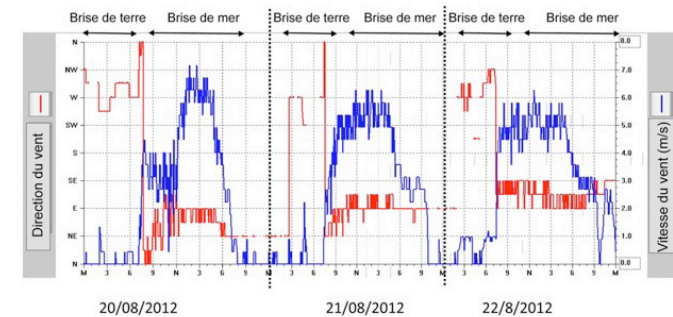


Figure 10. Anémogrammes montrant l'alternance entre brise de mer et brise de terre l'été à Bizerte (données issues de la station Davis installée à quelques mètres de la mer au nord de l'agglomération du 20 au 22 août 2012).

Conclusion

Après le coucher de la brise et une période de calme qui peut durer jusqu'à 3 heures, la brise de terre et/ou d'amont se déclenche. Sa vitesse est faible et vient de l'ouest au nord-ouest. Elle correspondait probablement à un air frais qui s'écoule sur le versant oriental de Jbel Ennadhour culminant à environ 200 m d'altitude.

Cependant, le 22 août 2012, à l'aérodrome Sidi Ahmed, la situation est différente. Comme mentionné plus haut, cette station se situe à 9 km de la mer, d'où la brise de mer ne parvient que vers midi. Cette brise de mer est précédée et succédée par une légère brise soufflant du lac de Bizerte soit du secteur sud-est (figure 11).

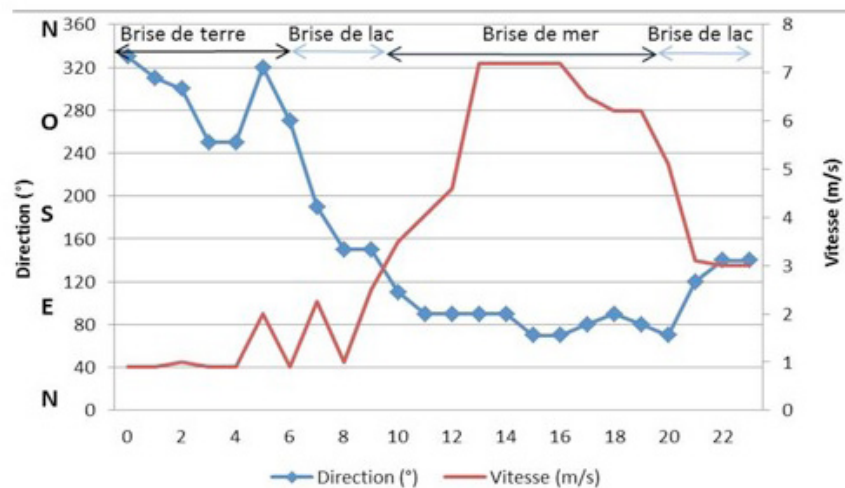


Figure 11. Anémogramme montrant l'alternance entre brise de mer, brise de lac et brise de terre l'été à Bizerte à partir de l'exemple du 22 août 2012 (données issues de la station de l'aérodrome Sidi Ahmed, INM).

A l'échelle de Bizerte, agglomération abritant 350 000 habitants, les températures de surface des quartiers denses sont plus élevées que celles des zones végétalisées environnantes. A l'intérieur de la zone urbanisée, des variations spatiales du champ thermique de surface s'observent quand les modes d'occupation du sol changent. Les mesures itinérantes de la température de l'air, à deux mètres au-dessus de la surface, ont révélé un ICU d'une intensité maximale modérée, d'environ 5,2°C. Cet ICU est moins important que celui mesuré à Tunis ou à Sfax, deux agglomérations de taille plus grande (Charfi, 2012; Dahech, 2013).

Les mesures du vent à l'aérodrome Sidi Ahmed, ainsi que celles réalisées dans la zone de Corniche par la station expérimentale Davis, montrent que la circulation de la brise de mer est influencée par le lac, le relief et la ville. A l'aérodrome, elle se lève du lac vers 9 h (en été), avec une vitesse de 3 m/s. La brise de mer y est relevée entre midi et 13 h (7 m/s vers 15 h), alors qu'elle est plus précoce au bord de la mer (vers 8-9 h) où alternent brise de mer, brise de terre et brise d'amont.

Les mesures réalisées jusque-là demeurent ponctuelles dans le temps et dans l'espace. Des travaux de terrain supplémentaires sont donc requis pour mieux caractériser la répartition spatiale de la brise à Bizerte car les disparités du cadre physique et de l'occupation du sol influencent fortement ce phénomène très attendu par la population en été, à cause de son effet rafraîchissant. De même, pour mieux caractériser l'ICU et étudier la variabilité de son intensité, nous souhaitons multiplier les campagnes de mesures itinérantes et surtout installer un réseau de

5 stations expérimentales fixes durant l'été 2017. Les acquis des travaux réalisés à ce jour permettraient de mieux choisir les sites de ces stations. En perspective de l'éventuelle campagne de 2017, la modélisation statistique de l'ICU et de la brise, dans un premier temps, et du confort thermique dans un second temps, semblent réalisables.

Remerciements : les auteurs tiennent à remercier vivement l'université Paris Diderot, et en particulier Malika Madelin, qui a prêté le capteur Testo 400 ; Adnen Besbes qui a participé à la campagne des mesures itinérantes et Mohamed Jebalia qui a hébergé et a pris soin de la station Davis.

Borne K., Chen D, and Nunez M., 1998 : A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast. *Int. J. Climatology*, 18, 901-914.

Cantat O., 2004 : L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 191, 2, 75-105.

Carrega P., 1994 : *Topoclimatologie et habitat. Revue d'analyse spatiale quantitative et appliquée*, 35 et 36, 408p.

Carrega P., 2013 : Le climat urbain de Nice en milieu géographique contrasté : synthèse par approche inductive. *Climatologie*, vol 10, 9-36.

Charfi S. et Dahech S., 2013 : Dynamique spatio-temporelle de la Température dans l'agglomération de Tunis. GdR 3359 MoDyS - *Rencontre jeunes chercheurs*. 21-22 novembre 2013, Université de Franche-Comté. 239-260.

Charfi S., 2012 : *Le comportement spatio-temporel de la température dans l'agglomération de Tunis*. Thèse, Université de Tunis et Université de Nice (en cotutelle), 311p.

Chudnovsky A., Ben-Dor E. and Saaroni, H., 2004 : Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. *Energy and Buildings*, 36 (11), 1063-1074.

Dahech S., 2007 : *Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique*. Thèse de doctorat de l'Université Paris VII, 309p. + annexes.

Dahech S., 2012 : Évolution de la répartition spatiale des températures de l'air et de surface dans l'agglomération de Sfax (1975-2010) et impact sur la consommation d'énergie durant la saison chaude. *Climatologie, numéro spécial Climats et changement climatique dans les villes*, 11-33.

Dahech S., 2013 : Le réchauffement contemporain en Tunisie (1960-2012) : rôle de la circulation atmosphérique et de l'urbanisation. Actes des Journées de la *Commission Climat et Société du Comité National Français de Géographie*, 14-16 mars, Epernay, 68-88.

Dahech S., Beltrando S. et Bigot S., 2005 : Utilisation des données NOAA-AVHRR dans l'étude de la brise thermique et de l'îlot de chaleur. Exemple de Sfax (SE tunisien). *Cybergeo : European Journal of Geography* article 317, <http://cybergeo.revues.org/3132> ; DOI : 10.4000/cybergeo.3132.

Dahech S., Berges J C., Beltrando G., 2012 : Localisation et dynamique du front de la brise de mer au Maghreb oriental, *Climatologie*, 9, 57-81.

Djen CS., 1992 : The urban climate of Shanghai. *Atmospheric Environment*, 26, 9-15.

Easterling, D. R., et al., 1997: Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277, 364-367.

Choisnel E. et Cloppet E., 2016 : « AGROMÉTÉOROLOGIE », *Encyclopedia Universalis* [en ligne], consulté le 9 octobre 2016. URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/agrometeorologie/>

Escourrou G., 1982 : Quelques particularités des brises maritimes. *NOROIS*, 116, 577-584.

Escourrou G., 1990 : La spécificité du climat de l'agglomération parisienne. *Revue de Géographie de Lyon*, 65, 2, 85-89.

Fontserè E., 1934 : Les "seixes" de la costa Catalana. Barcelona. *Servei met. de Catalunya. Notes d'estudi*, 5, 12 p.

Friedl MA., 2002 : Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements. *Remote Sensing of Environment* 79 (2-3), 344-354.

Fung WY, Lam KS, Hung WT, Pang SW et Lee YL., 2006 : Impact of Urban Temperature on Energy Consumption of Hong Kong. *Energy*, 31, 2623-2637.

Gallo KP., McNab AL., Karl TR., Brown JF., Hood JJ. and Tarpley JD., 1993 : The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. *Journal of Applied meteorology*, 32 (5), 899-908.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007 : *the physical science basis. Working Group 1 contribution to the fourth assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Climatic Change, summary for policymakers, technical summary and frequently asked questions*. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013 : Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 1552p.

Johnson D P and Wilson J S., 2009 : The socio-spatial dynamics of extreme urban heat events: the case of heat-related deaths in Philadelphia. *Applied geography*, 29, 419-434.

Kastendeuch P., Najjar G., Lacarrere P. et Colin J., 2010 : Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg, *Climatologie*, 7, 21-36.

Lazzarini M., Marpu PR., Ghedira H., 2013 : Temperature-land cover interactions: the inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sens. Environ.* 130, 136-152.

Liébard A et De Herde A., 2005 : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques :
Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. Le Moniteur, 776p.

Matsunaga T., 1996 : Water temperature estimation based on linear regression analysis for ASTER/TIR. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 16, 2-13.

Neumann J. et Mahrer Y., 1997 : A theoretical study of the land and sea breeze circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28, 532-542.

Oke TR., 1973: City size and heat urban island. *Atmospheric environment*, 7, 769-779.

Planchon O., 1997 : *Les climats maritimes dans le monde.* Presses Universitaires du Septentrion, 233p.

Quattrochi DA. et Luvall J.C., 1999 : Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: Methods and applications. *Landscape Ecology*, 14 (6), 577-598.

Rao PK., 1972 : Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society* 53, 647-648.

Rasul A., Balzter H. et Smith C., 2015 : Spatial variation of the daytime Surface Urban Cool Island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8. *Urban Climate*, 14 (2015) 176–186.

Simpson JE., 1994 : *Sea breeze, and local winds.* Cambridge Univ. Press: Cambridge, 234p.

Tzoulas K, Korpela K, Venn S, Yli-Pelkonen V, Kazmierczak A, Niemela J and James P., 2007 : Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 81, 167-178.

Voogt, JA. et Oke., TR., 1998 : Effects of urban surface geometry on remotely sensed surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (5), 895-920.

Site Web

INS., 2015 : Recensement de la population 2014 : www.ins.tn

Dans la même collection

1 - Autour de la fragmentation (2016)

2 - Le genre dans les recherches africanistes (2017)

Les Impromptus du LPED

Les Impromptus du LPED est une collection d'ouvrages, en accès gratuit, publiée par le Laboratoire Population-Environnement-Développement UMR 151 (IRD - AMU). Ces ouvrages accueillent des textes des chercheurs et des partenaires scientifiques du LPED. Les textes, de un ou plusieurs auteurs, de formats variables, sont soumis à l'acceptation du comité éditorial et d'un comité de lecture.

Comité éditorial des Impromptus du LPED

Magali Deschamps-Cottin

Stéphanie Dos Santos

Mélanie Favrot

Bénédicte Gastineau

Valérie Golaz

Amélie Salmon - contact : communication.lped@ird.fr