

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 d'habitants (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>

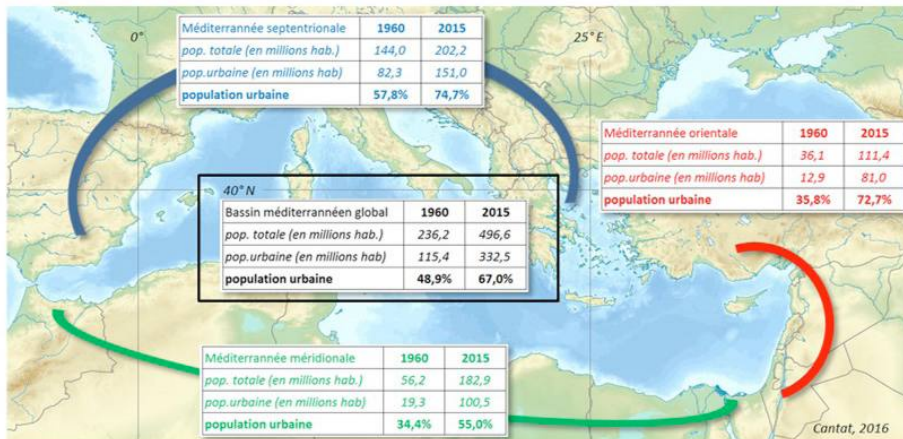


Figure 1. L'évolution de la population totale et urbaine dans le Bassin méditerranéen entre 1960 et 2015. Source : Banque Mondiale. <https://donnees.banquemondiale.org>

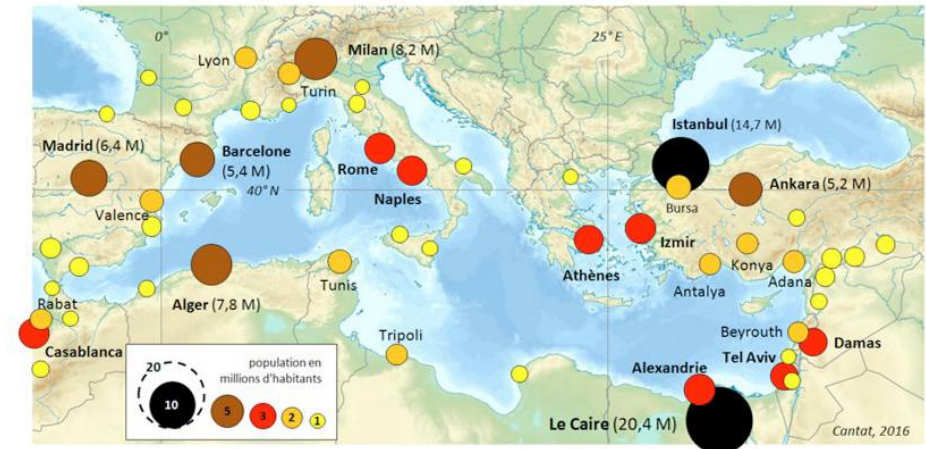


Figure 2. Aires urbaines supérieures à 1 million d'habitants dans le Bassin méditerranéen en 2015. Sources : PopulationData.net

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

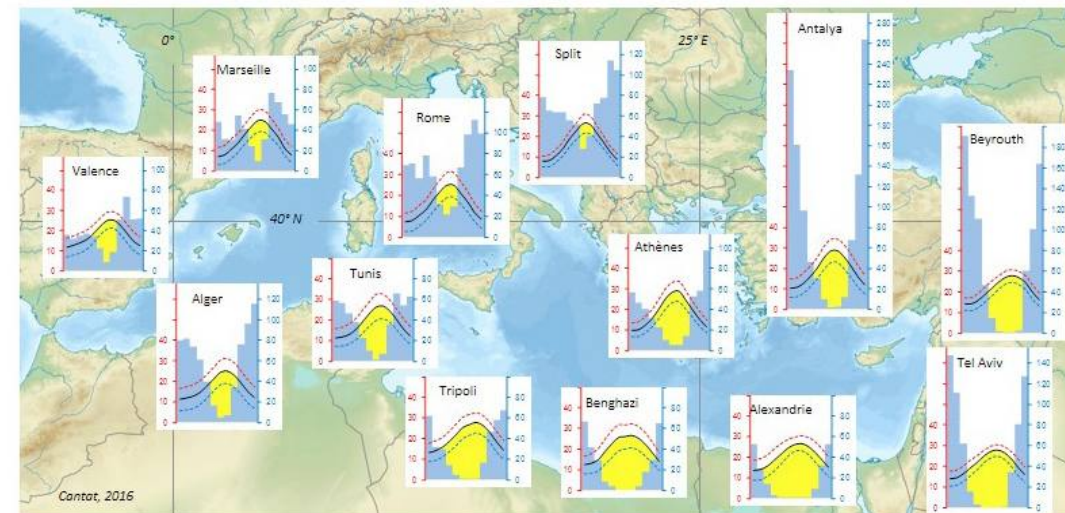


Figure 3. La diversité des climats autour de la Mer Méditerranée (période actuelle). Diagrammes ombrothermiques de plusieurs sites littoraux. Sources : climatebase ; weatherbase ; climate-charts.

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 ($> 20^\circ\text{C}$) 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) !

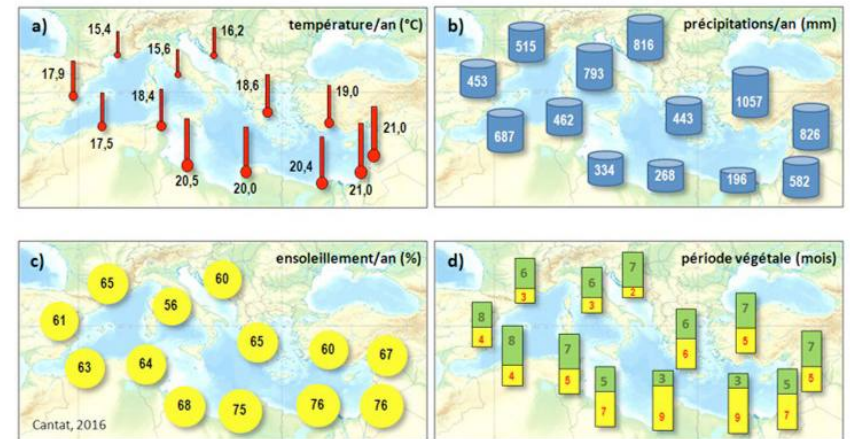
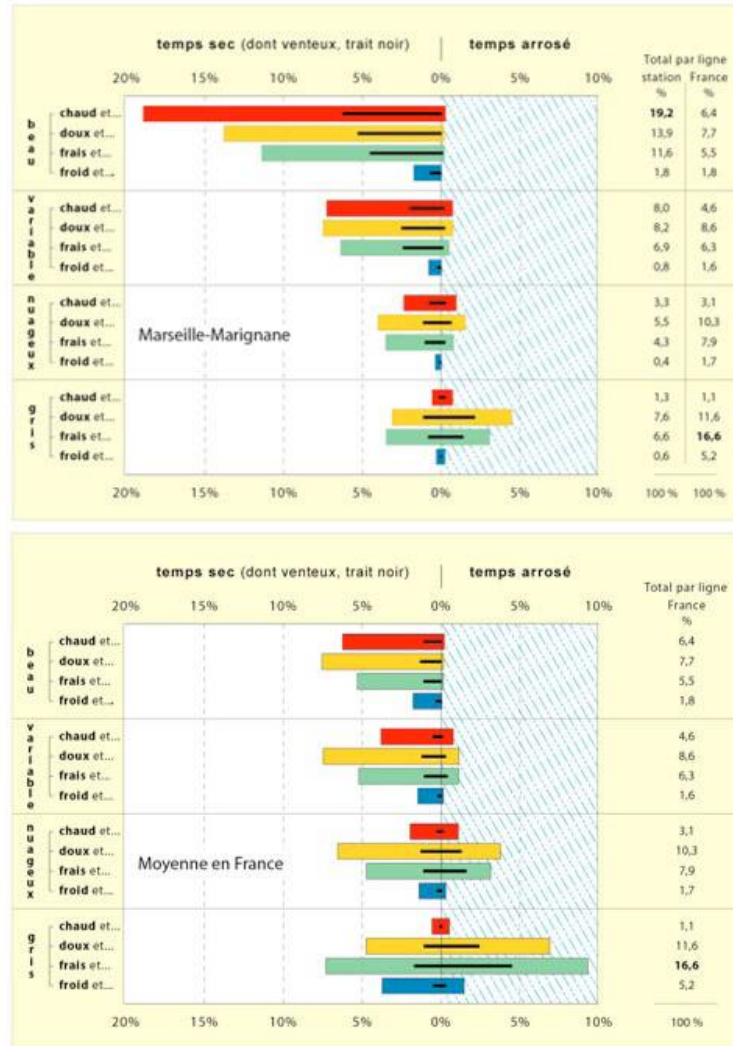


Figure 4. La diversité des climats autour de la Mer Méditerranée vue à travers les températures moyennes annuelles, les précipitations totales annuelles, la fraction d'insolation annuelle et la répartition des séquences durant la période d'activité végétale potentielle ($TM \geq 10^\circ\text{C}$) : en vert les mois dont le profil bioclimatique est ≥ 2 (soit $P \geq 2T$). 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%

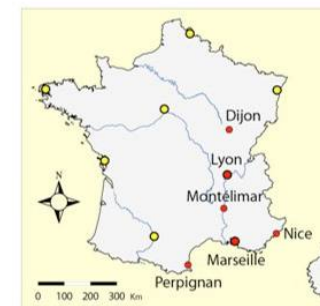


Tableau 3. Pourcentage de jours par an sur la période 1991-2010 et localisation des stations.

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.

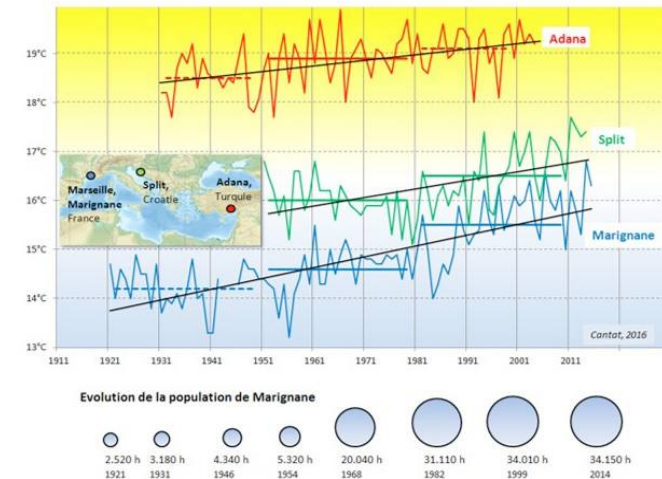


Figure 6. Evolution de la température moyenne annuelle dans le Bassin méditerranéen entre 1921 et 2015. Valeurs vraies, moyennes successives sur 20 ou 30 ans et tendance linéaire. Sources : traitement de données ECA&D (European Climate Assessment & Dataset) et évolution de la population de la ville de 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).

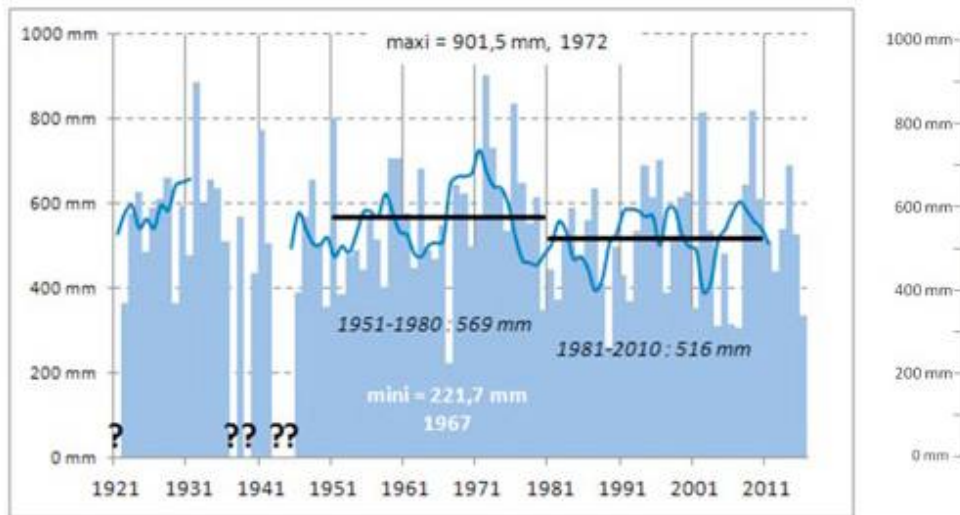


Figure 8. Evolution des précipitations totales annuelles à Marseille-Marignane (à gauche) et répartition fréquentielle (à droite) sur la période 1921-2016. Valeurs vraies (bâtons), moyenne mobile d'ordre 5 (courbe) et normales climatique (trait horizontale). Les « ? » représentent les années incomplètes.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

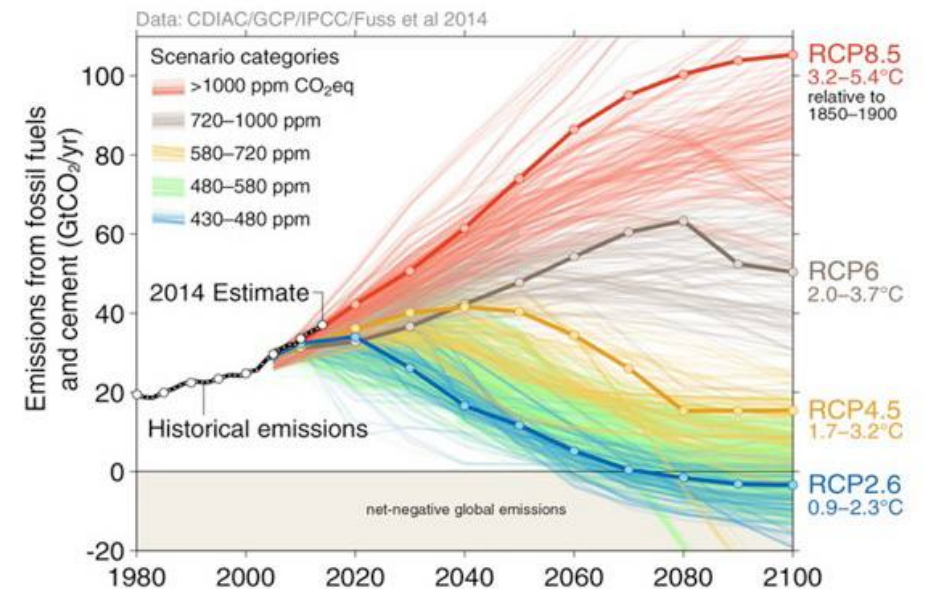


Figure 9. Différents scénarios d'émissions de combustibles fossiles et RCP. Sources : GIEC 2013

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.

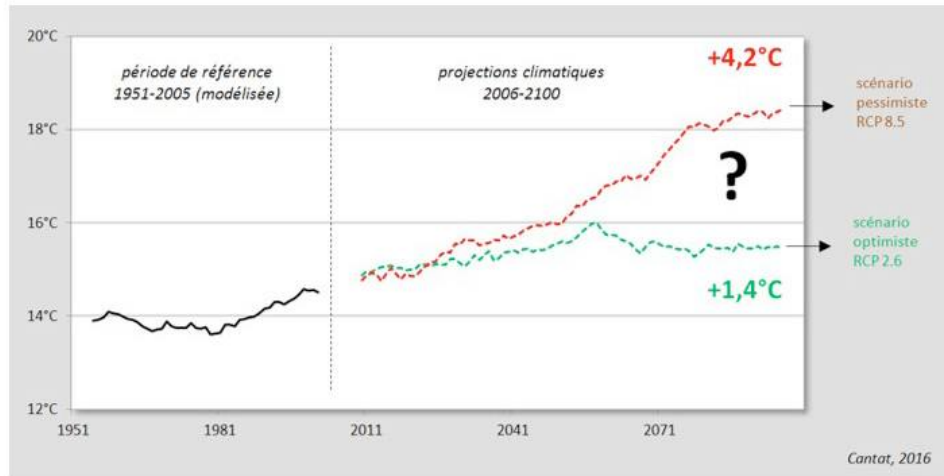


Figure 10. Evolution de la température moyenne annuelle dans la région de Marseille. Données modélisées sur la période de référence actuelle (1951-2005) et pour le futur jusqu'en 2100 selon deux scénarios contrastés : RCP 2.6 et RCP 8.5. Lissage par moyenne mobile chevauchante sur un pas de 9 ans. Sources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

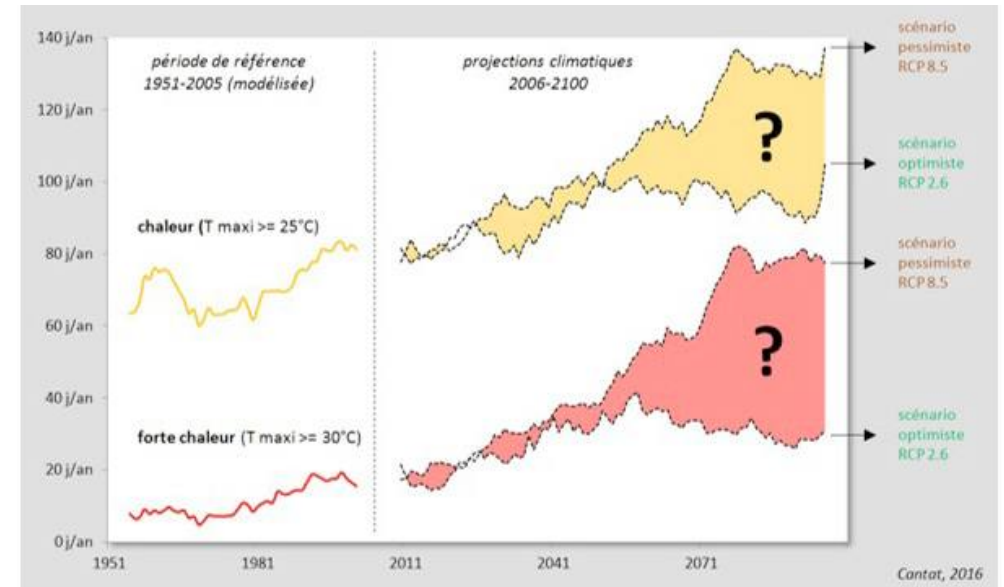


Figure 11. Evolution du nombre de jours de chaleur et de forte chaleur dans la région de Marseille. Données modélisées sur la période de référence actuelle (1951-2005) et pour le futur jusqu'en 2100 selon deux scénarios contrastés : RCP 2.6 et RCP 8.5. Lissage par moyenne mobile chevauchante sur un pas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

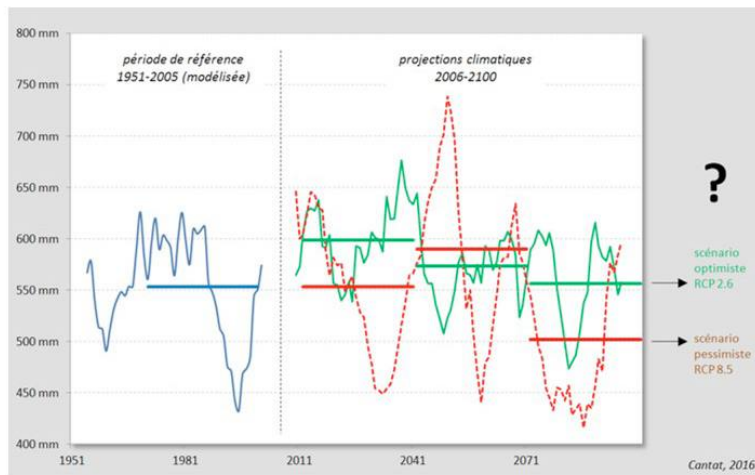


Figure 12. Evolution des cumuls annuels de précipitations dans la région de Marseille. Données modélisées sur la période de référence actuelle (1951-2005) et pour le futur jusqu'en 2100 selon deux scénarios contrastés : RCP 2.6 et RCP 8.5. Lissage par moyenne mobile chevauchante sur un pas de 9 ans.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