

GREC-PACA

Groupe régional d'experts sur le climat
en Provence-Alpes-Côte d'Azur

Cahier thématique du groupe de travail
« Ville »



Climat et ville : interactions et enjeux en Provence-Alpes-Côte d'Azur



Juin 2017





Ce cahier thématique a été réalisé par le Groupe régional d'experts sur le climat en Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-PACA).

Il a été coordonné par ÉLODIE BRICHE, LAURA COLLANGE et HUBERT MAZUREK du groupe MC3 – Mediterranean Cities and Climate Change (programme géré par l'Agence nationale de la recherche au titre du projet Investissements d'Avenir A*MIDEX, référence n°ANR-11-IDEX-0001-02). Ce cahier a bénéficié du soutien éditorial d'A.I.R. Climat (AURORE AUBAIL, PHILIPPE ROSSELLO).

Le projet est financé au titre de la Convention État – Région Provence-Alpes-Côte d'Azur – ADEME.

Un soin tout particulier a été apporté au choix des polices et à la mise en page dans le respect des principes d'éco-conception.

Avertissement : ce nouveau cahier thématique approfondit les notions abordées dans la première publication du GREC-PACA intitulée *Provence-Alpes-Côte d'Azur, une région face au changement climatique* : <http://www.air-climat.org/publications/la-regionpaca-face-au-changement-climatique>

Réalisation : La Sud Compagnie – Juin 2017

Crédits photos et dessins

Couverture : ©Valérie Montès / photo 1 : ©Wikimedia Commons / photo 2 : ©Philippe Rossello / photo 3 : ©Élodie Briche / photo 4 : ©Nicolas Martin / photo 5 : ©Jean-Louis Zimmermann / photo 6 : ©Philippe Rossello / photo 7 : ©Wikimedia Commons / photo 8 : ©Hubert Mazurek / photo 9 : Antoine Nicault / photo 10 : ©Philippe Rossello / photo 11 : ©Philippe Rossello / photo 12 : ©Philippe Rossello / photo 13 : ©Philippe Rossello / photo 14 : ©Hubert Mazurek / photo 15 : ©Christine Robles / photo 16 : ©Philippe Rossello / photo 17 : ©Jacques Autran / photo 18 : ©Philippe Rossello / pages intercalaires - pages 35, 41 : ©Philippe Rossello / dessins - pages 4, 11, 16, 21, 29, 32, 37, 43 : ©Freepik / page 40 : Stéphanie Arlaud (EPFL)

Table des matières

Avant-propos	4
1. Les interactions ville-climat	5
1.1. L'évolution du climat dans les villes de Provence-Alpes-Côte d'Azur	5
1.2. Mesures, instrumentations et modélisation du climat urbain en région PACA	10
1.3. Confort climatique, qualité de l'air et modélisation	13
2. Les enjeux du climat urbain	17
2.1. La contribution de l'urbain à la modification du climat	17
2.2. Impact du climat sur les milieux urbains.....	21
2.3. Les grands enjeux de l'urbain face au changement climatique	25
3. Climat et ville, la place de l'écologie	29
3.1. La nature en ville.....	29
3.2. Climat, urbanisme et construction, le rôle de la végétalisation.....	32
4. Le cadre réglementaire, de l'échelle européenne à l'échelle locale	36
4.1. Les politiques internationales et nationales.....	36
4.2. Les outils réglementaires régionaux.....	36
Conclusion	42
Pour aller plus loin	43

Avant-propos



Pour approfondir les connaissances diffusées dans la publication générale du Groupe régional d'experts sur le climat en Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-PACA), animé par A.I.R. Climat, et apporter des réponses spécifiques, le comité régional d'orientations (CRO) a constitué des groupes de travail thématiques (GTT). Ces derniers sont composés de chercheurs de toutes les disciplines et de spécialistes du climat qui contribuent à la rédaction de cahiers thématiques destinés aux décideurs et gestionnaires des territoires de la région PACA : élus, ingénieurs et techniciens des collectivités locales ou des espaces protégés ou encore des grands équipements, mais aussi responsables d'associations et d'entreprises. L'objectif est de décrypter les résultats scientifiques et les enjeux du changement climatique pour informer et sensibiliser le public visé à l'échelle régionale et locale. Par thème, une synthèse de travaux scientifiques est proposée afin d'aider les acteurs

territoriaux à évaluer les impacts du changement climatique sur leur territoire et de découvrir des innovations.

Les précédents cahiers thématiques portaient sur l'évolution du climat en PACA, les effets du changement climatique sur l'agriculture et la forêt, la mer et le littoral. De nouveaux cahiers (ressource en eau, montagne, santé...) sont en préparation.

Cette publication aborde la relation entre le climat et la ville dans ses dimensions techniques, mais aussi dans son rapport aux émissions de gaz à effet de serre (GES). La complexité des interactions entre la ville et le climat est mise en évidence par les contributeurs. Les mécanismes, les enjeux spécifiquement urbains et les moyens de lutte dont nous disposons aujourd'hui sont ici abordés en soulignant l'importance des observations et de la recherche. L'espace urbain est l'un des principaux enjeux du changement climatique car il touche aujourd'hui la majorité de la population et les mécanismes d'interactions et d'adaptation¹ sont peu connus. Comme dans les précédents cahiers, les chercheurs et experts exerçant leur métier en région PACA et dans les territoires limitrophes, apportent leurs connaissances afin de mieux cerner les problématiques en lien avec le changement climatique.



Photo 1. Nice, un exemple de ville compacte (illustration)

¹ Réduction de la vulnérabilité du territoire face aux impacts du changement climatique

1. Les interactions ville-climat

Ces dix dernières années, la croissance démographique de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur a été nettement supérieure à la moyenne nationale (près de 1 % contre 0,68 % en France métropolitaine). Ce sont surtout les zones urbaines qui se sont développées (Figure 1). Quatre des vingt premières aires urbaines françaises se trouvent en PACA (Aix-Marseille, Nice, Toulon et Avignon). Cette croissance se situe principalement sur la bordure littorale et le long des grands axes de communication, toutes au sud de la région. Aujourd'hui, 80 % des habitants de PACA vivent dans ces pôles urbains. Dans les départements des Bouches-du-Rhône, du Var et des Alpes-Maritimes, plus de 50 % de la population vit dans des villes de plus de 50 000 habitants, et la plupart sur le littoral (3 habitants sur 4 se concentrent sur 10 % du territoire selon l'INSEE). En PACA, la concentration urbaine est un fait de société qu'il est impérieux de prendre en considération lorsque l'on aborde les questions de mode de vie, de risque, d'adaptation et d'impact climatique.

Par ailleurs, l'habitat en région méditerranéenne a toujours été peu dispersé : les villages et les villes sont surtout caractérisés par un habitat compact. En PACA, cette concentration s'est renforcée jusqu'aux années 1990, avant de diminuer ensuite sous l'effet de la périurbanisation et de la déconcentration de la population vers les centres périphériques. La ville devient alors un véritable enjeu environnemental. Ainsi, la densification géographique et démographique, et l'artificialisation due à la construction de la ville, peuvent exacerber les impacts des variations

Évolution de la population par commune entre 1999 et 2010

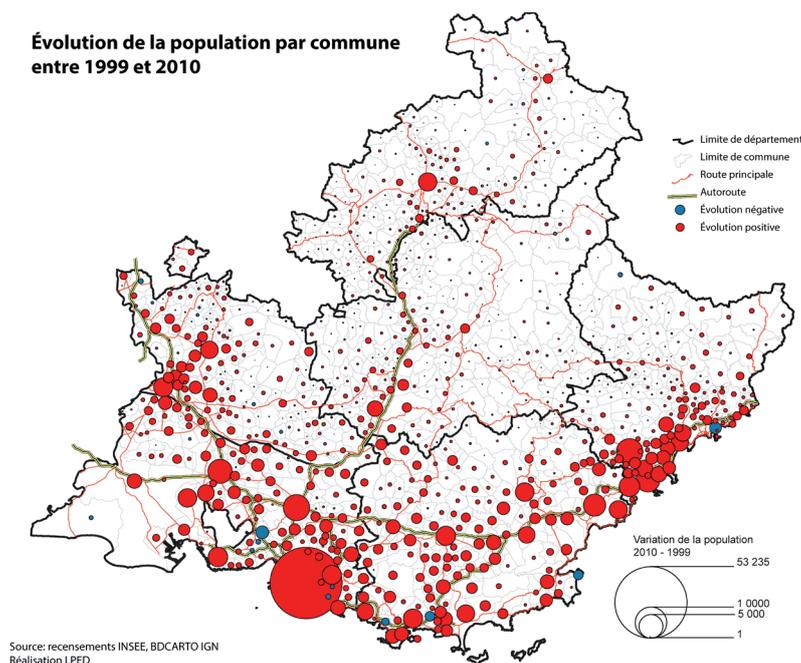


Figure 1. Évolution de la population par commune entre 1999 et 2010 (source : INSEE, BDCARTO IGN)

climatiques et créer des dynamiques naturelles particulières.

Dans un premier temps, nous tenterons de comprendre les interactions entre le climat et la ville. Nous essaierons ensuite de faire le bilan de la relation entre ville, émissions et modifications du climat afin d'envisager les impacts de ces variations sur le risque urbain. Enfin, nous verrons à quel point il est important de reconsidérer une écologie urbaine en accord avec les solutions d'atténuation² et d'adaptation en insistant sur les solutions juridiques et réglementaires.

1.1. L'évolution du climat dans les villes de Provence-Alpes-Côte d'Azur

En ville, les conséquences du changement climatique sont particulières du fait des interactions entre la surface urbaine

et la couche limite atmosphérique (Cf. Zoom 1) : la morphologie de la ville peut en effet modifier certains paramètres climatiques.

■ Évolution des températures et des phénomènes liés

En Provence-Alpes-Côte d'Azur, comme dans l'ensemble du territoire métropolitain, le changement climatique s'est déjà traduit par une hausse des températures, plus marquée depuis les années 1980. Sur la période 1959-2009, on observe une augmentation des températures annuelles d'environ 0,3°C par décennie. À l'échelle saisonnière, c'est l'été qui se réchauffe le plus avec une hausse de 0,4 à 0,6°C par décennie pour les températures minimales, maximales et moyennes.

En cohérence avec cette augmentation des températures, le nombre de journées très chaudes (température maximale supérieure à 30°C) et le nombre de nuits tropicales (température minimale supérieure à 20°C) ont augmenté. Le graphe suivant (Figure 2) montre l'évolution du nombre de nuits tropicales à l'aéroport de Nice : on passe d'une moyenne d'une quinzaine de nuits dans les années 1960 à environ 60 nuits aujourd'hui.

² Réduction des émissions de gaz à effet de serre

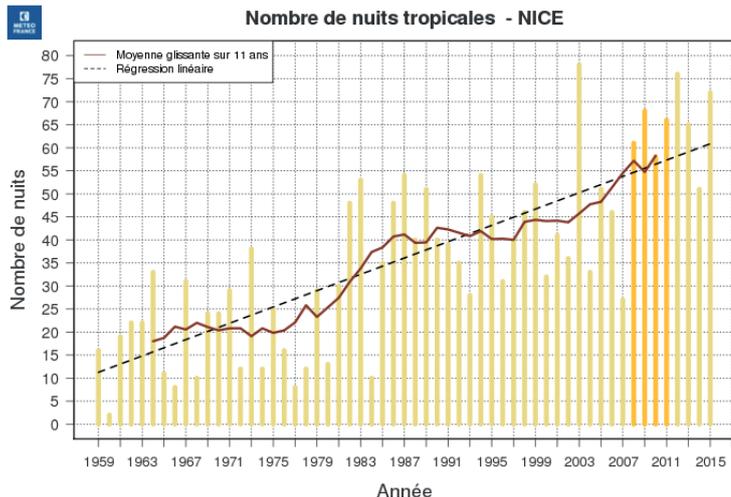


Figure 2. Nombre de nuits tropicales entre 1959 et 2015 à Nice (source : Météo-France)

Ces tendances à la hausse vont se renforcer tout au long du XXI^e siècle. Elles vont particulièrement impacter les villes de la région qui sont déjà confrontées au phénomène d'îlot de chaleur urbain³ (ICU). Avec un réchauffement global qui, selon le scénario de concentration en GES serait de l'ordre de +2,5°C à +6°C pour les températures de l'été, les centres-villes risquent de devenir étouffants,

en particulier la nuit. Dans l'hypothèse la plus pessimiste, les villes du littoral subiraient en moyenne 90 jours par an avec des températures nocturnes supérieures à 20°C. Or, plus que le pic de chaleur dans l'après-midi, c'est l'absence de fraîcheur nocturne qui procure l'inconfort le plus prononcé.

■ Évolution des précipitations

Les cumuls annuels de précipitations sont plutôt en baisse sur la période 1959-2009 en PACA. Cependant, ils présentent une très forte variabilité d'une année sur l'autre, comme l'indique le graphique d'évolution des précipitations annuelles à Toulon. Pour ne parler que des années les plus récentes, on peut observer que, si l'année 2007 a été très sèche à Toulon avec moins de la moitié du cumul annuel normal, l'année 2014 a été exceptionnellement pluvieuse avec un excédent de 70%.

Cette évolution à la baisse des précipitations (Figure 3) est sans doute un signal de changement climatique. Elle est à préciser en fonction des tendances qui ne sont pas toutes statistiquement significatives. À l'échelle saisonnière, la baisse concerne principalement l'été et l'hiver, mais très peu les autres saisons. Sur la période étudiée, le nombre de jours de fortes pluies (jours avec un cumul de précipitations > 10 mm) est stable à Aix-en-Provence et en baisse de 2 à 5 jours ailleurs.

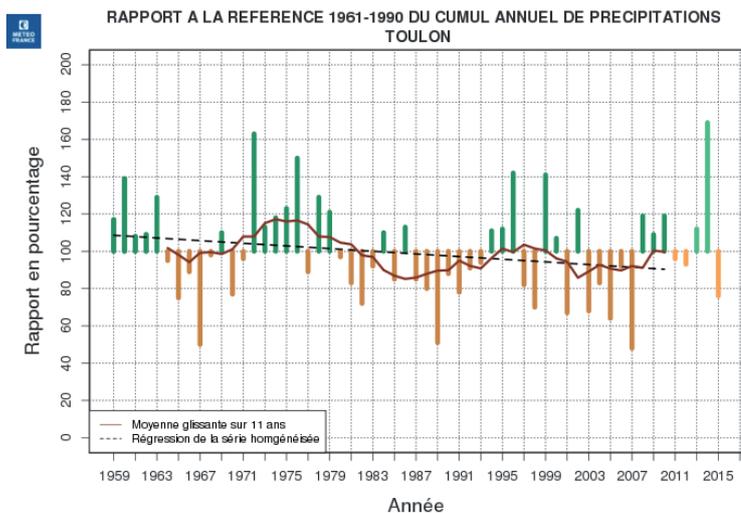


Figure 3. Rapport à la référence 1961-1990 du cumul annuel de précipitations à Toulon (source : Météo-France)

³ Différence des températures observées entre un site urbain et un site rural environnant. Lire page 25 du cahier *Climat et Changement Climatique en Provence-Alpes-Côte d'Azur*, mai 2016

L'étude de l'évolution des précipitations au cours du XXI^e siècle reste un défi majeur pour les climatologues. Néanmoins, des tendances se dessinent sur le bassin méditerranéen :

- une baisse des précipitations moyennes, à partir du milieu du XXI^e siècle, avec des périodes de sécheresse plus longues. Pour les villes de PACA, cela pourrait compliquer l'approvisionnement en eau, d'autant plus que la demande risque d'augmenter (forte attractivité de notre région) ;

■ Le climat urbain en Méditerranée : échelles et spécificités

Les villes méditerranéennes, par leur configuration spatiale et géographique (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, des "hot spots" du changement climatique.

L'analyse du climat urbain méditerranéen s'effectue à différentes échelles spatio-temporelles : celles (i) du canyon urbain⁴ ou microclimat urbain (quelques centimètres à quelques mètres ; de quelques minutes à quelques heures), (ii) du quartier ou climat local urbain (quelques kilomètres ; quelques heures à jours), (iii) de l'agglomération (plusieurs kilomètres ; jour, mois, année) ou du méso-climat urbain avec des outils et méthodes parfois encore peu utilisés, tels que la mise en place de dispositifs de mesures aux échelles microclimatiques et locales.

Les spécificités du climat urbain sont notamment : une température plus élevée que dans les zones rurales

- des épisodes méditerranéens potentiellement plus intenses à la fin du XXI^e siècle qui se traduiraient par une augmentation du nombre d'inondations urbaines dues au ruissellement sur des surfaces de plus en plus imperméabilisées.

Ces tendances restent à confirmer par le prochain lot de projections climatiques en cours de réalisation.

environnantes (surtout en fin de journée et la nuit), des vents spécifiques (brise thermique⁵ « de campagne », détectable dans les très grandes villes), la présence de pollution urbaine, une insolation affectée par les multiples effets de masques... Ces caractéristiques mettent en évidence l'îlot de chaleur urbain dont la distribution spatiale dépend essentiellement de l'occupation du sol et des paramètres météorologiques. Or, la climatologie actuelle n'est pas encore en mesure de modéliser toute la complexité des interactions ville-climat.

Ces spécificités du climat urbain méditerranéen sont dues à la prédominance des ciels clairs (sauf cas particuliers), des calmes synoptiques⁶ (phénomènes radiatifs), des contrastes terre/mer ou montagne/vallée provoquant des brises thermiques ou ville/campagne. L'architecture, ancienne et moderne, les matériaux clairs, les immeubles anciens, hauts et étroits, permettent un drainage de l'air chaud vers le haut, et les rues étroites sont à l'abri du rayonnement solaire (fraîcheur estivale, vieilles villes, etc.).

ZOOM 1

Couche limite atmosphérique en milieu urbain et qualité de l'air

La couche limite atmosphérique qui, en milieu urbain, prend le nom de couche limite urbaine (CLU), est la couche d'air sous influence de la surface. L'épaisseur de cette couche d'air est variable en fonction de l'heure de la journée et de la saison. Elle joue un rôle important dans les échanges de chaleur, d'humidité, ainsi que sur la concentration de polluants. Il est donc important de bien comprendre son fonctionnement. L'épaisseur de la CLU est produite par la présence de tourbillons d'air. Plus l'air est turbulent, plus les échanges d'énergie, de matière et de mouvement entre la surface urbaine et l'atmosphère sont favorisés et efficaces. Cette turbulence est plus ou moins importante en fonction de la présence de vent et/ou de la température de surface (qui vont caractériser la stabilité de l'atmosphère), et de la rugosité de la surface.

Plus il fait chaud et/ou plus les obstacles en surface

sont importants, plus les mouvements d'air brassent et mélangent l'air. Par exemple, en journée, la CLU possède une épaisseur supérieure à celle de la nuit car il fait plus chaud. D'une façon générale, la différence d'épaisseur de cette couche est aussi observée entre les saisons chaudes (printemps, été) et froides (automne, hiver). C'est pour cette raison, qu'en hiver, il est souvent observé deux pics de pollution dus au trafic routier (matin et soir), alors qu'en été, seul celui du matin est observé. Tôt le matin, l'épaisseur de la CLU est comparable en hiver et en été. Elle est généralement plus épaisse l'après-midi lors des belles journées ensoleillées d'été. Les polluants sont donc dilués dans un plus grand volume d'air et les capteurs de qualité de l'air mesurent de plus faibles concentrations. En milieu rural, la couche limite atmosphérique a une épaisseur moins importante car la température et la rugosité sont souvent plus faibles en milieu rural qu'en milieu urbain.

⁴ Voie urbaine dont l'encaissement entre des bâtiments provoque des difficultés en matière d'environnement

⁵ Vent local ou régional à alternance diurne qui s'établit à proximité des mers, villes et montagnes, et qui résulte des différences de températures dans les basses couches de l'atmosphère

⁶ L'adjectif synoptique évoque l'idée de « voir en un même ensemble »

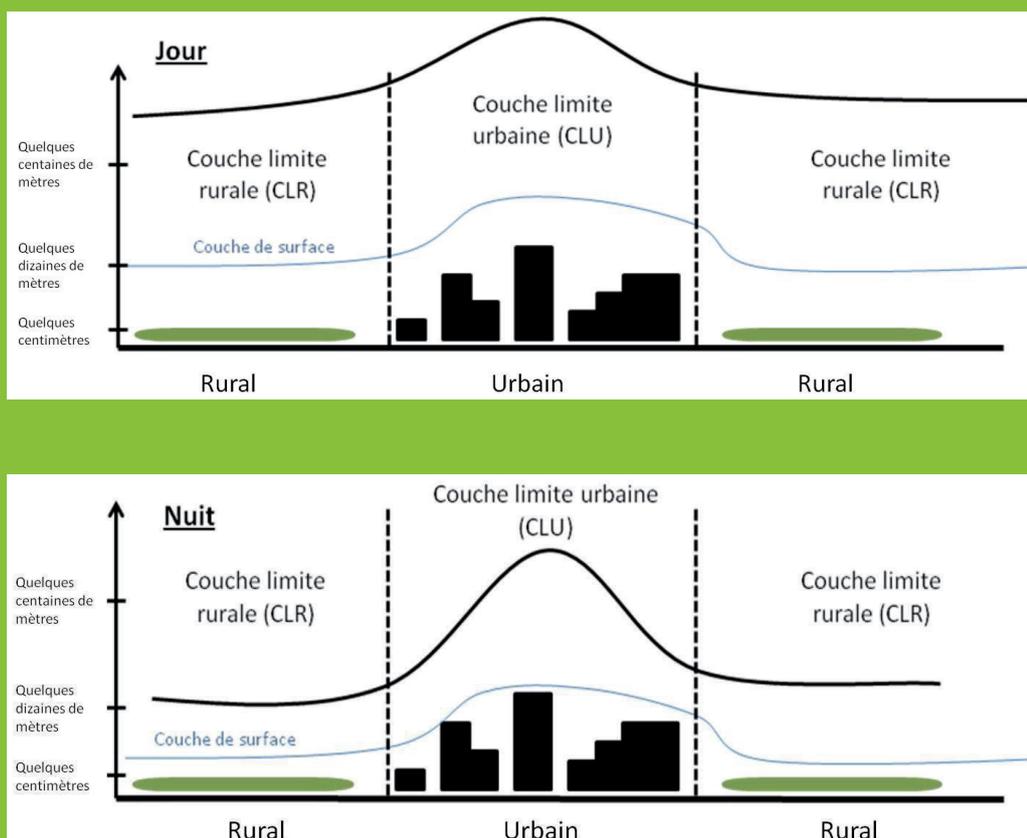


Figure 4. Représentations diurne et nocturne de la CLU (source : Hidalgo & Thomasset)

À l'intérieur de la couche limite atmosphérique (sous la courbe noire, Figure 4), on peut différencier la couche de surface, aussi appelée « canopée », qui représente le volume d'air entre les éléments rugueux. Ses propriétés sont importantes car c'est la couche d'air en contact direct avec la population au sein de laquelle la majorité des activités humaines se développent. La couche limite atmosphérique en milieu urbain est plus volumineuse le jour que la nuit.

La couche limite rurale représente la couche limite atmosphérique au niveau de l'environnement rural hors de la ville. Dans la Figure 4, le pic de la couche au niveau de la ville est plus prononcé la nuit que le jour. Ceci traduit une transition plus abrupte des propriétés (température, vent, composition chimique, etc.) entre la ville et la campagne. La différence de température entre la ville et ses alentours est ainsi appelée « îlot de chaleur urbain ».

■ La nécessité de développer les outils adaptés pour la mesure du climat urbain

En climatologie, la compréhension et l'imbrication des échelles spatiales et temporelles sont indispensables pour comprendre les phénomènes à l'échelle urbaine. Les simulations des modèles climatiques régionaux (MCR) prévoient, selon plusieurs scénarios, la fréquence et l'intensité des événements météorologiques extrêmes tels que les canicules estivales qui peuvent renforcer les ICU, et permettent de les anticiper. Toutefois, elles ne donnent pas d'éléments de réponses aux échelles locales. Ainsi, 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. Elles permettraient de reconsidérer certaines politiques en matière d'urbanisme (densification, usage

du sol ou politique énergétique), ainsi que certaines pratiques en matière d'architecture (orientation, usage de matériaux). Les aménageurs vont devoir intégrer la question climatique dans leur pratique et mettre en œuvre des solutions urbaines en Méditerranée, afin de limiter les effets néfastes du changement climatique (inconfort thermique, pollution, etc.), surtout en période estivale.

Au sein des villes méditerranéennes, des initiatives locales sont menées par différentes équipes de recherche pour mieux comprendre le climat urbain, et plus particulièrement la variabilité spatiale et temporelle de l'ICU. L'accent est mis sur les études estivales, compte tenu des caractéristiques du climat méditerranéen, mais aussi de la forte probabilité d'intensification des canicules à l'avenir.

Mesurer, comprendre et modéliser le climat aux échelles fines permet d'agir en faveur de la transformation de la ville en proposant des implantations et des structures urbaines plus réfléchies.

De nouveaux défis liés au changement climatique supposent de nouveaux modes de gestion pour la ville et appellent l'usage de données fiables à échelle fine, aussi bien pour le climat que pour le suivi des impacts. C'est à partir d'indices, tels que

l'indice humidex (mesure utilisée par les météorologues pour intégrer les effets combinés de la chaleur et de l'humidité), et d'indicateurs, indispensables pour développer un outil adapté à la complexité urbaine et à ses spécificités, qu'il est possible d'envisager une approche interdisciplinaire capable de prendre en compte la complexité des villes contemporaines à travers une coaction entre les scientifiques et les politiques.

ZOOM 2

Inventaire de quelques travaux réalisés en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

À l'échelle d'un quartier ou d'une ville, il faut pouvoir disposer d'outils permettant de quantifier les changements locaux (îlots de chaleur/fraicheur, zones de vulnérabilité ou zones protégées) afin de pouvoir en tirer parti. Actuellement, il existe des projets de développement de réseaux de mesure des concentrations de gaz à effet de serre (GES) à micro-échelle, calqués sur le modèle des réseaux de surveillance de la pollution atmosphérique, qui permettraient de disposer de mesures précises évaluant les évolutions déjà perceptibles et les impacts des aménagements.

Le LABEX OT-Med (www.otmed.fr) développe un projet de mesure et de modélisation du dioxyde de carbone (CO₂) à Marseille. Quatre stations de mesure du CO₂ fonctionnent dans le cadre de l'étude. Leur rôle est d'apporter une première estimation du forçage anthropique⁷ de CO₂ issu de la ville de Marseille et d'évaluer la représentativité de sites existants qui donneront des indications sur la faisabilité de l'approche atmosphérique.

Des outils d'inventaire des émissions de GES sont également disponibles et permettent de scénariser les évolutions envisagées en fonction des différents scénarios

à tester. Ils ont été développés par Air PACA et sont mis à jour annuellement : Emiprox (emiprox.airpaca.org) fournit l'ensemble des émissions de GES d'un territoire sur une année donnée, tandis qu'Energ'Air (energair.airpaca.org) fournit uniquement celles liées à une consommation énergétique. Les deux outils permettent de descendre de l'échelle régionale à l'échelle communale et détaillent les sources d'émissions. Ce type d'outil cadastral est très utile pour établir un diagnostic initial des émissions de GES (leur ampleur, leurs sources, etc.) sur un territoire ou une ville. Ils permettent aussi de faire un lien direct avec les émissions de polluants atmosphériques car ces derniers sont également recensés avec le même niveau de détail.

L'utilisation de modèles de dispersion 3D basés sur la CFD (Computational Fluid Dynamics) est aujourd'hui envisagée pour modéliser et étudier la dispersion des polluants atmosphériques en zones urbaines. Ce type d'outil peut être aussi utilisé pour modéliser les flux de températures entre les bâtiments afin d'identifier les ICU, voire de les anticiper dans le cadre de la construction d'un nouveau quartier.



Photo 2. Des microclimats urbains sous l'effet de l'ombre des bâtiments et de la végétation (illustration)

⁷ De façon générale, un forçage est une action qui agit sur (qui force) un système dynamique (océan, atmosphère, activités humaines) et peut perturber son état d'équilibre. Parmi les forçages anthropiques : les émissions de GES, les émissions d'aérosols, la déforestation et plus généralement la modification des surfaces végétales

1.2. Mesures, instrumentations et modélisation du climat urbain en région PACA

■ Des modélisations adaptées aux échelles urbaines ?

De nombreux pays méditerranéens s'appuient sur des organismes publics pour simuler le climat urbain à l'aide des modèles climatiques régionaux, ou utilisent l'ensemble des modèles disponibles aux échelles régionales dans Med-CORDEX⁸. En collaboration avec des services climatiques, ils peuvent aussi développer des indices, réalisés à partir de simulations climatiques, adaptés à des questions appliquées⁹. Les modèles climatiques régionaux mettent en évidence des tendances climatiques moyennes et les probables changements de variabilité interannuelle à des échelles supérieures à la dizaine de kilomètres. Ils ne permettent pas de donner des réponses à l'échelle intra-urbaine. D'autres types de modèles, plus adaptés aux échelles urbaines, affinent l'analyse dans les canyons urbains. De son côté, TEB/ISBA intégré à Méso-NH¹⁰ est performant au niveau d'un quartier et de l'agglomération.

■ Le modèle SURFEX de Météo France

SURFEX est un modèle d'échange surface-atmosphère développé par le centre de recherche de Météo-France (CNRM-GAME). Il calcule les échanges de chaleur (rayonnement, conduction, convection), l'humidité et le dioxyde de carbone entre la surface de la terre et l'atmosphère. Il comprend aussi un modèle de couche limite pour déterminer la température, le vent et l'humidité des premiers niveaux de l'atmosphère.

■ Les mesures fixes intra-urbaines en complément des réseaux nationaux et régionaux

Des mesures spécifiques en milieu urbain (photo 3) sont requises pour spatialiser les paramètres météorologiques afin de pallier l'insuffisance des enregistrements fournis par les réseaux conventionnels. Toutefois, à l'échelle d'une agglomération, ces mesures demandent une attention particulière pour le choix des points de mesure, des périodes durant lesquelles elles sont effectuées et de l'étalonnage du matériel utilisé. L'ICU, à titre d'exemple, peut être mesuré à trois niveaux principaux d'altitude, à environ 2 m de la surface et dans l'air libre.

■ Types de mesures en villes : fixes et itinérantes pour la température de l'air

Les mesures peuvent être fixes et/ou itinérantes. Les premières sont réalisées sous abri, au sein d'un réseau de stations et/ou de capteurs météorologiques. Le réseau mis en place densifie un réseau conventionnel ou enregistre des observations climatiques aux échelles micros et locales, et tient compte de paramètres précis : ICU, variabilité spatiale et temporelle des températures, etc. Lors de l'installation des instruments de mesure en ville, certaines précautions sont requises comme le dégagement du milieu, l'aération du site la journée ou encore les mesures de sécurité évitant les risques de pannes électriques, de vandalisme et de vol.



Photo 3. Dispositifs de suivi des températures et de l'humidité sous abri à Marseille dans le cadre d'une campagne de mesures estivales

⁸ Mediterranean domain of the CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) program

⁹ Exemple : <http://www.climrun.eu/>

¹⁰ Modèle couplé Town Energy Balance (TEB) / Interactions Sol Biosphère Atmosphère (ISBA), intégré au sein d'un modèle régional, dit à « méso-échelle » : le couplage affine les analyses et imbrique les échelles

Lors de mesures itinérantes, il est utile de limiter la durée des mesures (30 à 50 min au plus) pour éviter au maximum les écarts engendrés par le cycle diurne. Les déplacements peuvent se faire en voiture, à pied, mais aussi en vélo selon

les distances à parcourir. Les mesures peuvent être effectuées d'une façon continue ou d'une manière semi-itinérante (avec des arrêts) et ne pas dépasser deux minutes par point de mesure.

ZOOM 3

Inventaire de quelques travaux réalisés en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

Le projet MC3 - Mediterranean Cities and Climate Change - a engagé un programme afin d'étudier la variabilité spatio-temporelle des températures au sein des espaces publics d'un quartier marseillais en période estivale. L'objectif est de proposer un protocole rigoureux permettant la mise en place d'un réseau de 12 capteurs de type « *data-loggers* » (température et humidité) en tenant compte des facteurs morphologiques urbains et environnementaux.

En effet, ce protocole résulte d'une discrétisation basée sur une base de données spatialisée prenant en compte les principales variables qui ont une influence sur la température à l'échelle locale. Le but est de placer des capteurs au sein des différents environnements représentatifs de l'hétérogénéité de la zone d'étude.

Ce réseau, en fonctionnement durant toute la période estivale, a été complété par des mesures itinérantes diurnes et nocturnes en situations radiatives (temps clair, vents faibles), pour appréhender la variabilité des températures en milieu urbain où les gradients thermiques peuvent être importants sur de faibles distances. Ces fluctuations thermiques ont un impact sur les usages et les pratiques des espaces publics. Ainsi, en plaçant le réseau à proximité de ces espaces, il est possible d'étudier et observer conjointement les usages et les pratiques en période estivale, et d'évaluer l'impact des conditions météorologiques avec un éventuel changement des pratiques sociales. Par exemple, par temps de fortes chaleurs ou de mistral, les pratiques sont contraintes par ces conditions à différents niveaux.

La Figure 5 montre la spatialisation des relevés itinérants de températures visant à compléter un réseau fixe. L'intérêt est d'observer la variabilité spatiale et temporelle des températures en situation radiative à différents moments de la journée. Ce processus permet d'identifier les îlots de fraîcheur et de chaleur sur la zone d'étude en comparant plusieurs dates de relevés et de créneaux horaires.

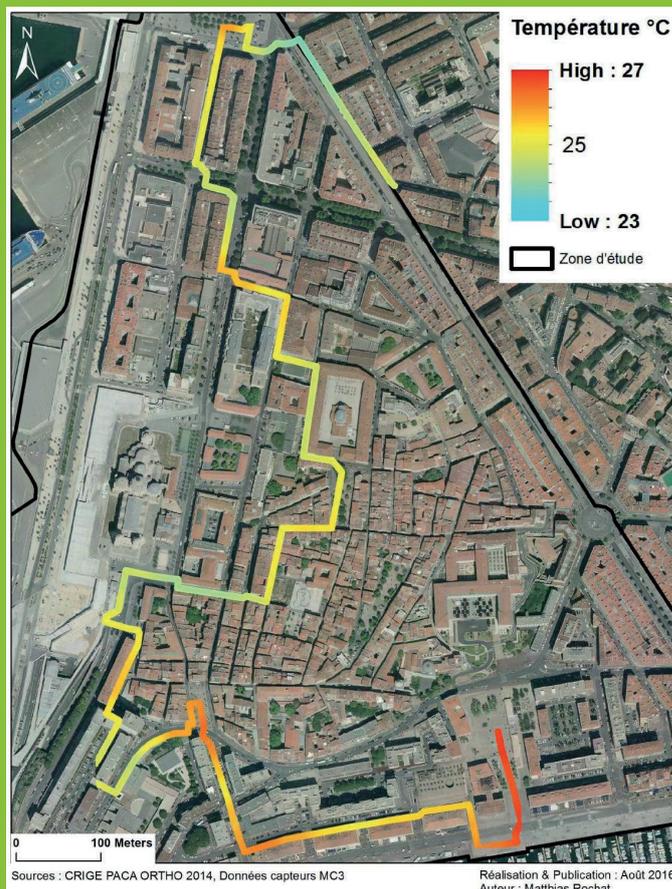
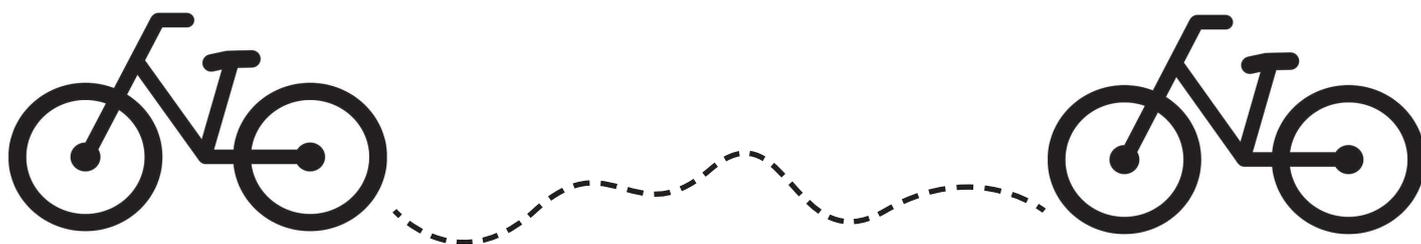


Figure 5. Températures moyennes lors de la mesure itinérante du 20/07/2016 à 13h dans le quartier du Panier à Marseille (source : Élodie Briche / CRIGE-PACA, ORTHO 2014)



■ Mesures itinérantes des températures à vélo

Les facteurs qui influencent la température sont multiples: cette variable météorologique change de valeurs sur de courtes distances au sein d'un fragment urbain. Les couleurs et les matériaux de revêtement de surface (occupation du sol), la morphologie du bâti (densité, hauteur des constructions, largeur des rues, etc.), l'orientation des avenues par rapport au soleil et aux vents dominants, l'implantation d'espaces végétalisés et de points d'eau (des simples fontaines aux miroirs d'eau) sont des éléments qui modifient les températures, car ils jouent un rôle dans les phénomènes de réflexion ou d'absorption du rayonnement solaire et dans le couple évaporation-condensation. Ainsi, des mesures itinérantes à vélo (thermomètre fixé au cintre à 1 m au-dessus du sol) ont été réalisées pour connaître les températures en ville. C'est l'un des moyens les plus efficaces pour capturer leur forte variabilité spatiale par la rapidité et la fluidité du déplacement offert par ce moyen de transport doux.

Des campagnes de mesures se sont déroulées de mai à septembre 2015 dans la ville de Nice (Figure 6), sur 54 jours (soit un jour sur deux en moyenne) et en milieu d'après-midi. L'objectif était d'enregistrer les températures maximales journalières (photo 4). Même si ce souhait paraissait difficile à satisfaire tant l'occurrence horaire et la durée du pic de température sont variables en fonction des espaces, la cartographie moyenne obtenue est assez fidèle à la réalité.

Au sein des espaces semi-urbains ou urbains, les températures oscillent entre 25,5 et 28°C avec des

variations importantes sur de courtes distances. Il peut s'agir d'un changement d'occupation du sol (passage d'un revêtement bétonné à une surface engazonnée avec une chute de 1°C en moyenne sur quelques mètres) ou de topographie. Sur un versant à forte pente, la combinaison d'une route bitumée et d'un talus blanc réfléchissant les rayons solaires peut provoquer une hausse des températures de près de 2°C. Enfin, la simple orientation des rues et le jeu des ombres portées du bâti génèrent des artères plus ou moins chaudes en fonction de la position du soleil dans le ciel (en été, vers 15h30-16h00, les rues orientées nord-sud sont bien moins exposées que celles orientées est-ouest, avec plus de 1°C de différence en moyenne).



Photo 4. Vélo et capteurs disposés pour les mesures itinérantes

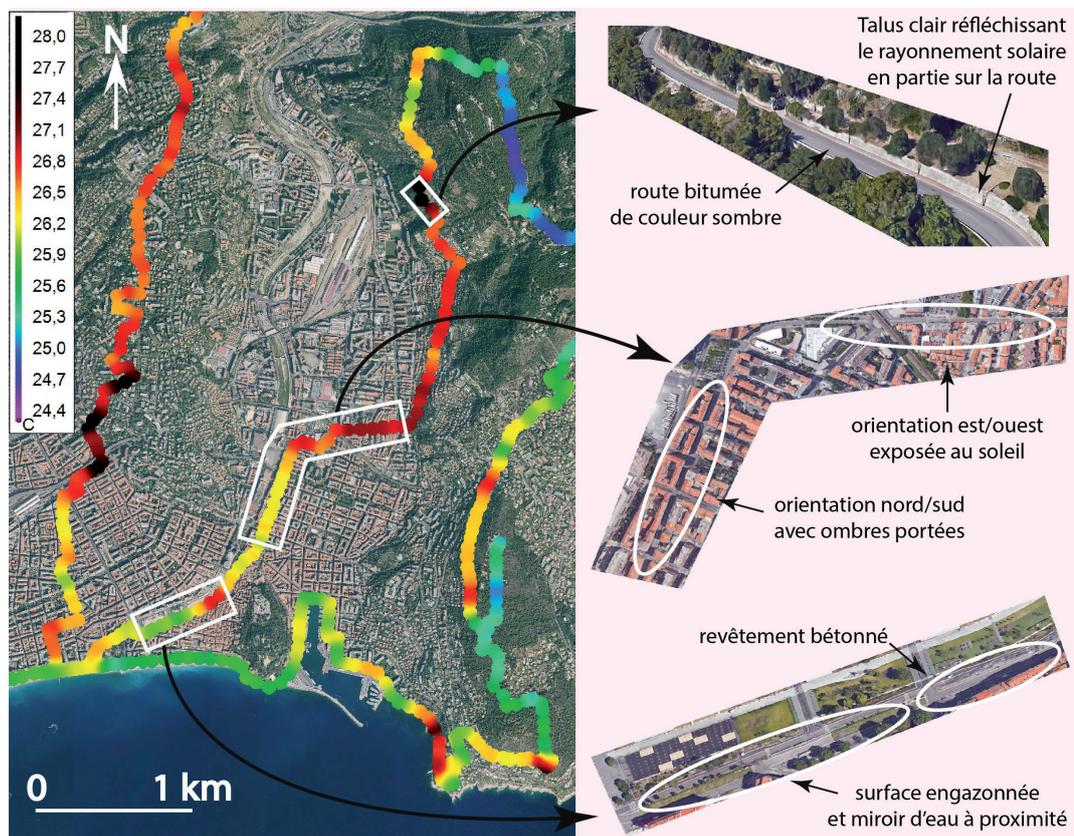


Figure 6. Cartographie et analyse des mesures itinérantes en 2015 à Nice (source : Nicolas Martin / photo aérienne et vue 3D : Google Earth)

■ Types de mesures en villes : mesure des concentrations urbaines de CO₂ et de CH₄ à Marseille

Les études sur le changement climatique analysent les variations de concentrations du dioxyde de carbone (CO₂) et du méthane (CH₄) dans l'air à l'échelle mondiale. Au niveau des centres-villes, on peut suivre ces indicateurs afin de définir les micro-variations et évaluer l'efficacité des politiques visant à limiter l'impact du changement climatique. Depuis octobre 2016, Air PACA a équipé l'une de ses stations de surveillance de la qualité de l'air (station urbaine de fond¹¹) d'un appareil

permettant de mesurer ces paramètres en parallèle des polluants atmosphériques. Cette station est située à Cinq-Avenues à Marseille (Figure 7).

Les résultats attendus permettront de relier la variation des niveaux de pollution aux variations des niveaux de GES, et de quantifier l'évolution à court, moyen et long terme au cœur de la cité par rapport aux évolutions nationales et internationales.

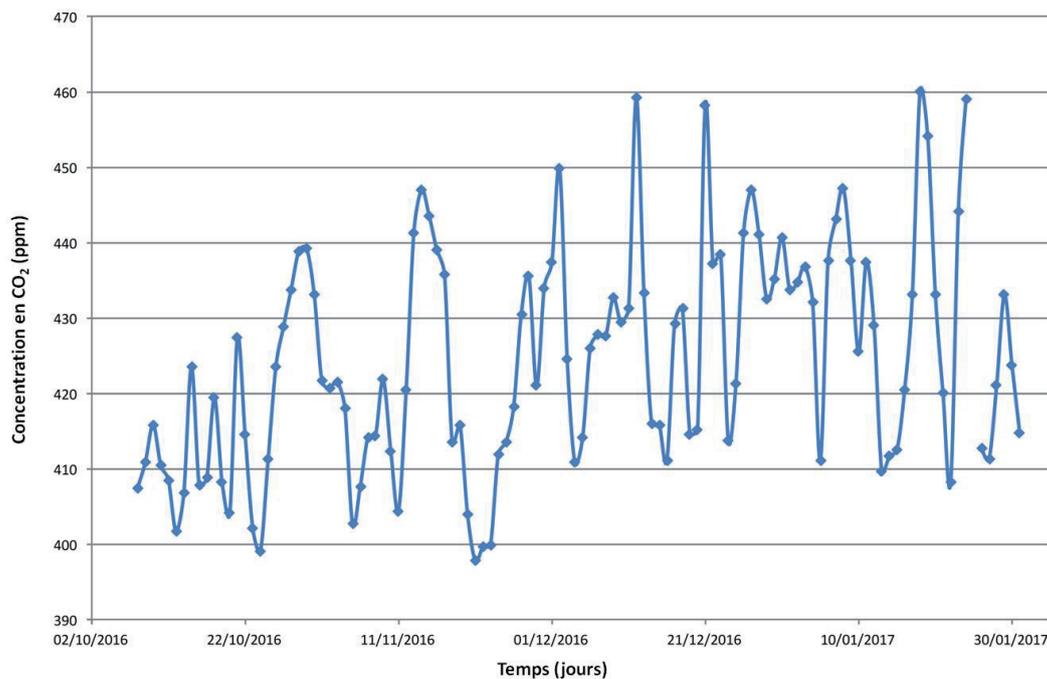


Figure 7. Concentrations en CO₂ (en ppm) en fonction du temps, octobre 2016 à janvier 2017, station Cinq-Avenues à Marseille (source : Air PACA)

1.3. Confort climatique, qualité de l'air et modélisation

■ Le microclimat en tissu ancien et le confort hygrothermique des espaces urbains

De nos jours, les travaux de recherche qui traitent de la climatologie urbaine ont permis de comprendre de façon plus précise les effets climatiques engendrés ou subis par la ville. Les études concernant l'ICU en sont des exemples manifestes. Même si ce phénomène a été mis en évidence dès le XIX^e siècle pour la ville de Londres, des études plus récentes ont permis de mieux cerner les mécanismes amplificateurs ou les actions destinées à les réduire afin d'améliorer le confort ou de minimiser les risques pour la santé. À une échelle plus restreinte, des différences climatiques peuvent être ressenties et observées selon le lieu en milieu urbain. Il s'agit de variations microclimatiques qui sont la conséquence de la diversité des formes bâties et des espaces urbains, des qualités de sol, de la présence et des caractères des végétaux, des étendues d'eau et des activités productrices de chaleur (transports, climatisation, etc.).

Il existe aujourd'hui en région PACA, comme sur l'ensemble du territoire national, de nombreuses stations météorologiques permettant de réaliser des relevés climatiques locaux. Ces stations sont localisées et disposées de façon à éviter toute influence perturbatrice d'un environnement bâti ou naturel sur le régime d'ensoleillement, l'humidité et la vitesse de l'air. Or, ce sont justement les effets de ces perturbations sur la modification du climat local qui permettent de caractériser les conditions microclimatiques des espaces aménagés. Les centres urbains sont souvent composés de tissus anciens réputés pour leur adaptation au climat. Il est donc nécessaire d'identifier et de mettre en valeur les qualités microclimatiques de ces espaces en vue de les préserver, en particulier en région méditerranéenne.

¹¹ En environnement, il existe deux types de stations : la station de fond (pas de source identifiée notable, pollution moyenne de la zone) et la station de proximité (trafic, zone industrielle, etc.)

C'est dans ce sens qu'une étude exploratoire visant à analyser les conditions hygrothermiques estivales dans le quartier du Panier à Marseille (Figure 8) a été réalisée. Il était question d'étudier l'influence des caractéristiques spatiales ainsi que celles du bâti sur les ambiances extérieures. L'objectif consistait à identifier les qualités d'ambiances singulières afin de les mettre en valeur et de les préserver. Une analyse préalable a permis de classier les espaces urbains caractéristiques

de ce tissu ancien. En fonction de l'orientation, de la largeur des rues, du gabarit des bâtiments et de la taille des places, des espaces représentatifs ont été choisis. Des mesures itinérantes pendant une journée chaude d'été ont permis d'analyser l'influence des variations spatiales sur les ambiances hygrothermiques entre les espaces urbains composant le quartier du Panier avec sa périphérie.



Figure 8. Relevés de températures (°C) sur un parcours réalisé le 25/06/2013 de 10h00 à 11h00 à Marseille : rue de la République - quartier du Panier - esplanade de la Major - Fort Saint-Jean - quai de la Mairie - place Bargemon (source : J. Autran, M.-A. Dabat)

Globalement, les mesures effectuées à différents moments de la journée (Figure 9) montrent la particularité de cette partie du centre ancien, à l'inverse de la périphérie où les espaces demeurent plus chauds que les rues et les places du quartier du Panier. Les résultats de mesures fixes, issues d'une campagne

estivale durant les mois de juillet et août, ont permis de confirmer ce dernier constat. Ainsi, pendant la journée, les rues canyon et les places du tissu ancien dense sont plus fraîches que les rues larges avoisinantes, alors que les températures de nuit restent similaires.

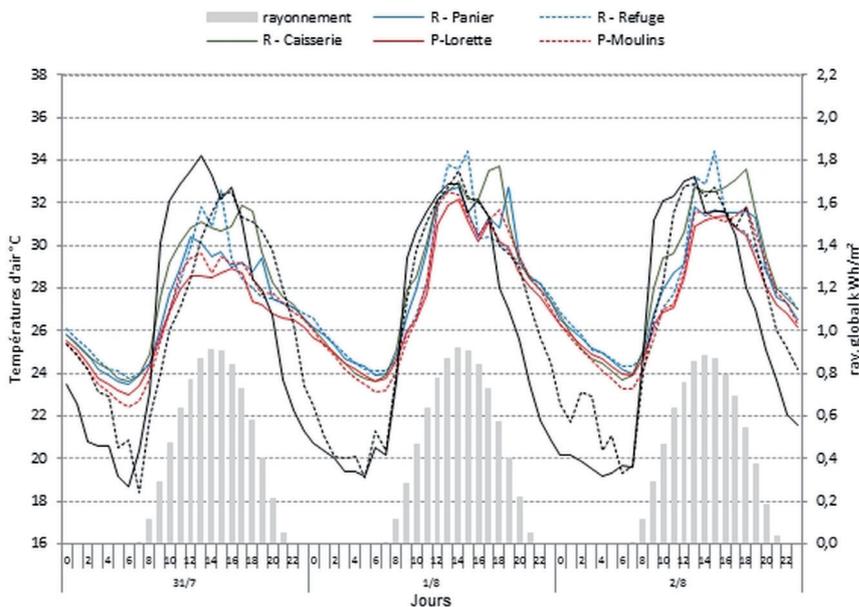


Figure 9. Profils des températures de l'air les 11, 12 et 13 août 2013 dans l'ensemble des espaces étudiés (source : M. Belmaaziz)

Par ailleurs, ces mesures montrent également que les rues canyon du tissu ancien se comportent généralement de la même manière quelle que soit leur orientation. Néanmoins, à cause de leur exposition à la brise marine, celles orientées est-ouest ont tendance à demeurer légèrement plus fraîches la nuit. La comparaison des températures de l'air enregistrées sur deux places du Panier montre aussi qu'une place plus ouverte est généralement plus chaude le jour qu'une place plus étroite. De plus, l'ombrage des arbres existants accentue ce phénomène. Même s'il ne s'agit là que de conclusions partielles, elles permettent de comprendre et de repérer des

phénomènes particuliers qui caractérisent des espaces urbains appartenant à un tissu ancien. Une analyse plus fine où seront croisés d'autres paramètres (températures de l'air, exposition aux vents et humidité) permettra de mieux comprendre leurs effets sur le comportement microclimatique des espaces considérés. Au-delà de ces conclusions et de celles émanant d'études similaires sur le microclimat en ville, se pose alors la question de leur transcription en recommandations opératoires dans les documents d'urbanisme en vue des futures propositions d'aménagement intégrant la dimension environnementale.

■ Le rôle de la pollution dans le climat urbain, mesure de la qualité de l'air et modélisation

Bien que la plupart des GES, comme le CO₂ ou le CH₄, n'ont pas d'impact sur la santé, certains composants atmosphériques (ozone ou aérosols, par exemple) ont un impact à la fois climatique et polluant (Figure 10). Même si les effets sont différents, changement climatique et pollution se rejoignent sur plusieurs points : les origines d'une partie importante des émissions sont identiques (trafic routier et maritime, chauffage urbain, industrie) et les émissions sont en forte augmentation dans un cas comme dans l'autre au niveau mondial.

La réduction des sources a donc des effets de co-bénéfices. Pourtant, la lutte contre le changement climatique et les efforts de réduction des émissions de polluants atmosphériques ne convergent pas toujours. Les exemples ne manquent pas, tels que le bonus-malus sur l'achat d'automobiles à faibles émissions de CO₂, qui ne prend pas en compte les émissions de polluants. Lors de la mise en place de nouvelles technologies de

moteurs moins polluants ou de filtration des émissions industrielles, les systèmes produisent souvent plus de CO₂. La massification de l'usage du chauffage au bois ou des agro-carburants diminue les émissions de CO₂, mais conduit à des émissions non négligeables de polluants atmosphériques.

Afin de garantir un double effet positif sur le climat et la pollution atmosphérique, la solution à privilégier est la sobriété. En effet, le fait de consommer moins d'énergie garantit une baisse d'émission globale. Cela s'applique en termes de consommation pour les véhicules, les chaudières ou l'usage des produits phytosanitaires dans l'agriculture. Il est aussi important de retenir l'interaction entre le changement climatique et la pollution atmosphérique : par exemple, l'ozone contribue au réchauffement de l'atmosphère et les particules tendent à la refroidir (Figure 11).

Indice Global par Commune 2016
Somme des indices par polluants
(NO₂, PM₁₀, O₃)

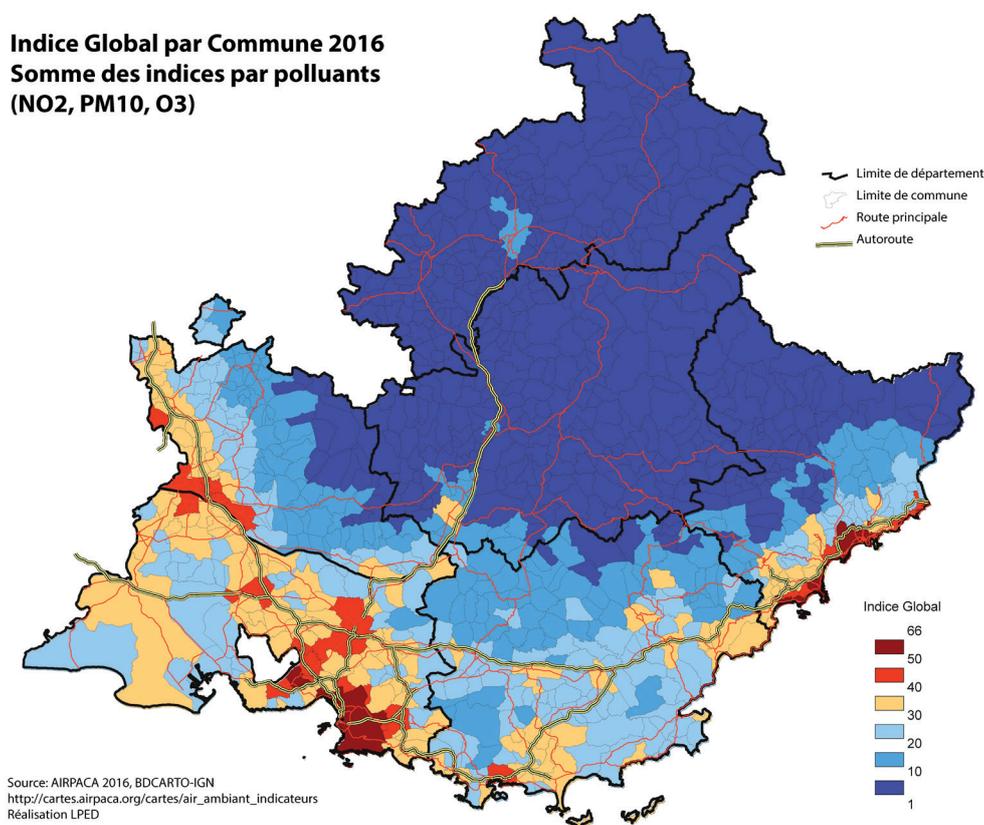


Figure 10. Indice Global par Commune¹² en 2016 (source : Air PACA, BDCARTO IGN)

¹² Indice multipolluant (PM₁₀, NO₂, O₃) agrégé à la commune

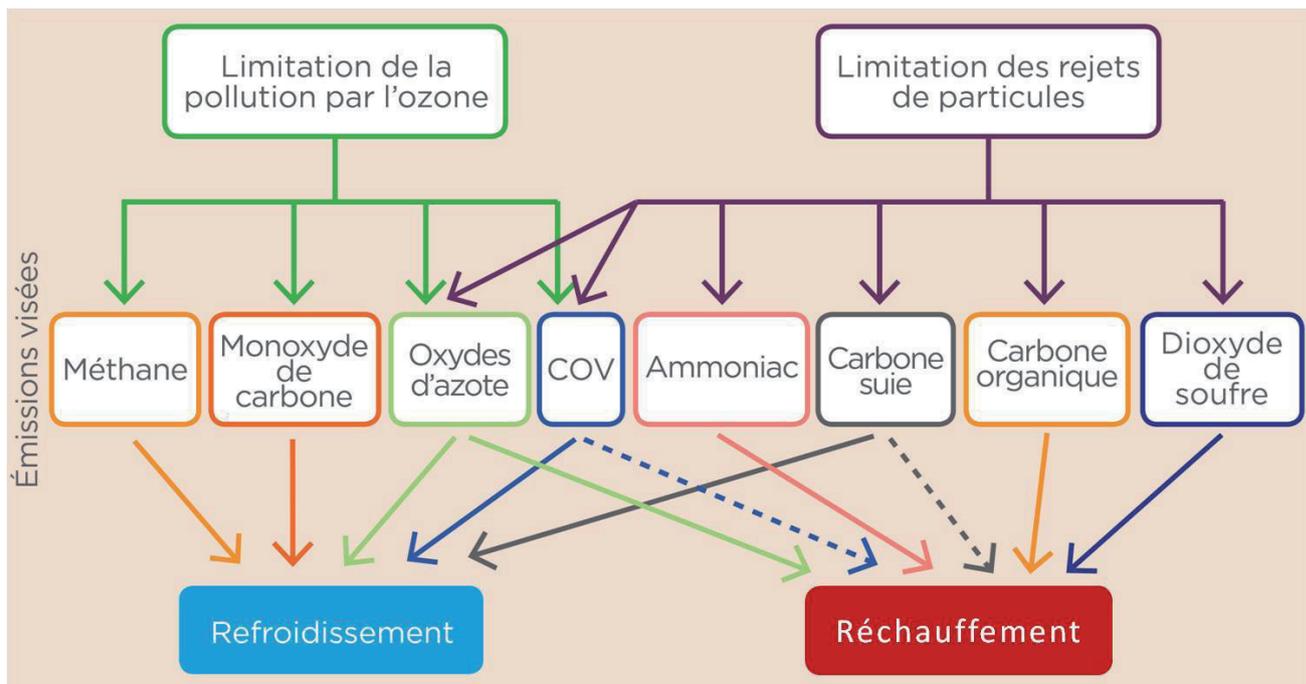


Figure 11. Impact de la lutte contre la pollution sur les émissions, avec incidence sur le climat. Les lignes en trait plein indiquent un impact connu, les lignes en pointillés un impact incertain (source : GIEC¹³)

Inversement, les modifications locales des conditions météorologiques liées au changement climatique peuvent avoir des conséquences sur l'évolution des concentrations de polluants dans l'air :

- conditions anticycloniques plus fréquentes : stagnation des polluants dans les basses couches de l'atmosphère ;
- vents plus importants : dispersion locale et/ou transport sur de grandes distances (pollution atmosphérique transfrontalière) ;
- augmentation de la température et/ou du rayonnement solaire : augmentation de la formation d'ozone à partir de ses précurseurs (CH₄, CO, NO_x, COV).

Bien qu'elle soit le plus souvent favorable à l'air et au climat, l'amélioration de l'efficacité énergétique peut aussi être à double tranchant : une meilleure isolation des logements permet de moins chauffer et de limiter le recours à la climatisation, et donc de dégager moins de CO₂ et de polluants dans l'air ambiant. Mais, si la ventilation n'est pas convenablement assurée, les concentrations intérieures de polluants sont plus élevées. En effet, le mode de vie, les matériaux de construction, de décoration, et les produits d'entretien entraînent une pollution supplémentaire à l'intérieur des bâtiments (lieux d'habitation ou de transport, écoles, établissements publics, etc.). Ces considérations illustrent bien la complexité des mécanismes opérant à l'échelle d'une ville.



¹³ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

2. Les enjeux du climat urbain

D'après les rapports du GIEC et de l'ONU-Habitat¹⁴, la ville est l'un des principaux contributeurs des émissions de GES et elle en est également la principale victime. Pour évaluer cet impact de la ville sur le climat et les effets de la variabilité climatique sur la ville, il faut considérer deux caractéristiques :

- la ville a un « métabolisme » très gourmand : alors qu'elle concentre 50 % de la population régionale de PACA, elle absorbe et rejette plus de 75 % des ressources et 75 % des effluents ;
- les ressources sont rarement produites dans la ville, ce

qui « exporte » le problème de la contribution urbaine. Il existe des enjeux directs liés au fonctionnement interne de la ville (chauffage et air conditionné, par exemple) et des enjeux indirects liés à l'approvisionnement des villes en ressources parfois éloignées (énergie, ciment, etc.) ;

- enfin, le rapport de la ville au climat conditionne la qualité de vie et la qualité environnementale. La compacité ne permet que rarement la présence de jardins ou de places vertes au sein de la ville. La relation climat-végétalisation-aménagement urbain est au centre du débat posé par l'urbanisme méditerranéen face à l'atténuation et à l'adaptation aux changements climatiques.

2.1 La contribution de l'urbain à la modification du climat

Selon le GIEC, l'un des principaux contributeurs aux émissions de GES est l'industrie et l'énergie liée à son fonctionnement.

L'industrie est peu développée sur l'ensemble de la région PACA en comparaison à la moyenne nationale. Elle est cependant très concentrée sur le couloir rhodanien et le littoral urbanisé (Aix-Marseille, Toulon, Cannes-Nice) : « 80 % des emplois industriels sont situés dans les unités urbaines de plus de 200 000 habitants, contre 37 % en France », selon l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE). L'arrière-pays ne compte que très peu d'emplois industriels, principalement concentrés à Digne-les-Bains et Gap. De plus, certains secteurs industriels contribuent largement aux émissions de GES : cokéfaction, raffinage et industrie de chimie lourde (sur le complexe de l'étang de Berre), construction de matériel de transport lourd, traitement des pollutions, industries extractives, etc.

L'Observatoire régional de l'énergie, du climat et de l'air (ORECA) publie des informations sur les consommations d'énergie qui reflètent parfaitement cette structure de l'industrie en PACA. On constate, d'une part, son importance par rapport à l'ensemble des secteurs (40 % contre 22 % au niveau national)

Consommation finale en énergie primaire par commune et part de l'énergie non résidentielle 2013

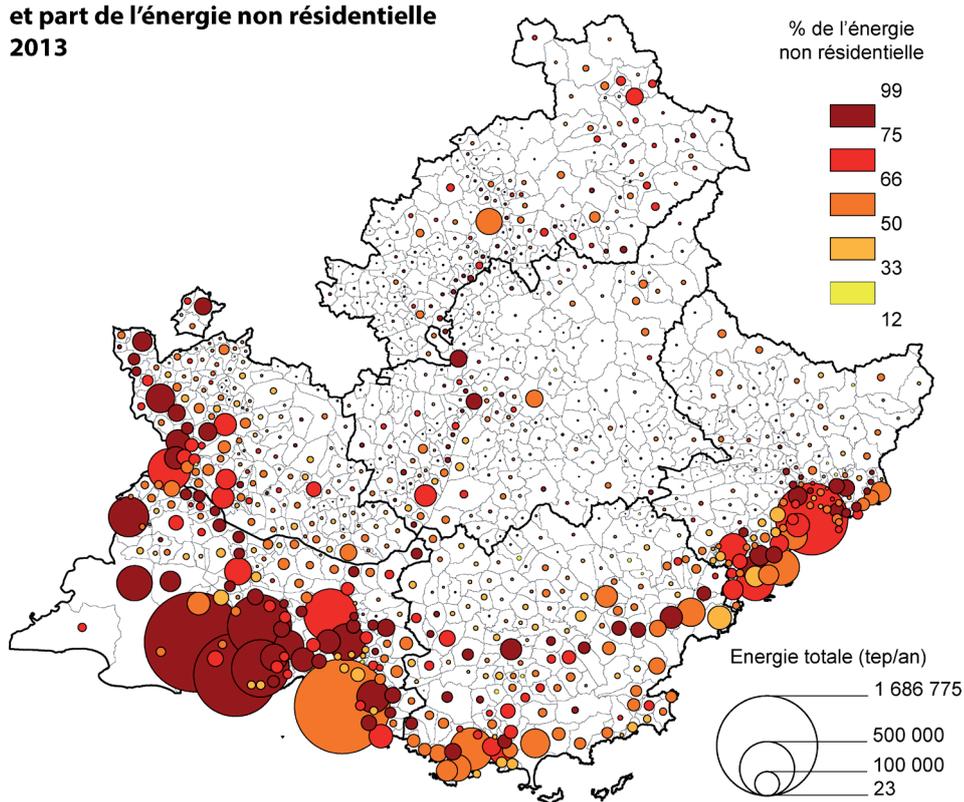


Figure 12. Consommation finale en énergie par commune et part de l'énergie non résidentielle en 2013 (source : Air PACA)

et d'autre part, la forte proportion de l'usage du charbon (11% contre 4% au niveau national). Près de deux tiers de la consommation d'énergie régionale sont ainsi liés au non-renouvelable (charbon, pétrole et gaz naturel). La carte (Figure 12) illustre cette concentration des consommations sur quelques communes urbaines du littoral.

¹⁴ Programme des Nations Unies œuvrant pour un meilleur avenir urbain

Le bilan des émissions de GES porte l'accent sur le rôle majeur de l'industrie et des transports (22 % des 33,1 millions de tonnes équivalent carbone en 2010), la concentration de l'industrie en zone urbaine et à l'ouest de la région, et sur la prédominance des produits pétroliers (27 %). Ce sont ces territoires, les plus consommateurs, qui font l'objet d'un plan climat-énergie territorial (PCET) obligatoire pour la réalisation d'une transition énergétique efficace (Cf. §4). Le solaire, l'éolien, la biomasse ou l'hydroélectrique sont des alternatives envisageables, et largement efficaces, selon les rapports de l'ORECA et de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). D'autres sont en développement telles que la pompe à chaleur marine, la géothermie en milieu urbain (expérience Euroméditerranée, par exemple), plutôt utilisées pour le chauffage domestique. L'effort de réduction de consommation par l'industrie reste encore faible aujourd'hui (6 % à l'horizon 2020).

En 2016, dans le domaine des transports, la région reste au 15^{ème} rang des régions françaises en matière d'efficacité énergétique. Certains itinéraires (autour de Vitrolles et des zones industrielles de l'étang de Berre, par exemple) consomment jusqu'à 150 g de CO₂ par km alors que les normes européennes fixent la norme à 9,5 g/km pour les voitures neuves¹⁵. Ces émissions ne dépendent pas des distances effectuées pendant les

trajets quotidiens, mais plutôt de la densité urbaine et des activités (concentration des zones commerciales et industrielles, photo 5) et de l'inefficacité des transports publics. Le modèle actuel de la localisation des plates-formes logistiques, situées en grande périphérie, n'est plus adapté à des transports de marchandises de plus en plus abondants, mais fragmentés. Par contre, en PACA, les infrastructures logistiques récentes sont plus importantes qu'au niveau national (42 % contre 33 % au niveau national selon Cluster PACA Logistique) et principalement concentrées sur les grands couloirs de transports littoraux, à l'ouest (Bouches-du-Rhône et Vaucluse dont 5 plates-formes de transport combiné), dans les périphéries des zones urbaines et à Fos-sur-Mer, ou encore dans des plates-formes diffuses comme dans le Haut-Var.

Chez les particuliers, le nombre de trajets domicile-travail a aussi significativement augmenté avec la périurbanisation et la croissance urbaine. Dans la région, l'ORECA estime à 71 000 tonnes les émissions de CO₂ pour les trajets domicile-travail sur la période 1999-2007 (soit 9 % des émissions de GES liés au transport). Des comportements qui ne changent pas, des transports publics mal adaptés et une configuration urbaine très littorale et très concentrée sont autant de facteurs qui accentuent la contribution des transports aux émissions de GES.



Photo 5. Zone commerciale, Le Pontet (Vaucluse) : des complexes de zones industrielles et commerciales, et de plate-forme logistique de transport, dont l'efficacité énergétique des transports est à reconsidérer

Le secteur résidentiel et tertiaire est le troisième à contribuer de façon soutenue aux émissions de GES et à la modification du climat. Cette contribution est liée à l'importante consommation d'énergie dans la fabrication des composants de l'habitat (ciment, acier, plastiques, etc.), à l'habitat (chauffage, air conditionné, éclairage, etc.), et aux échanges intrants et sortants effectués (énergie, fluide, déchets, etc.). La

ville joue aussi un rôle dans les effets d'accumulation et de réflexion des rayons solaires associés aux effets d'ICU, par sa structure (compacité, degré de végétalisation, hauteur des édifices, etc.) et par la composition des matériaux (pierre, ciment, vitres, type de végétaux et d'arbres, etc.). Par conséquent, les processus sont complexes, encore peu étudiés, et leur maîtrise particulièrement difficile.

¹⁵ Règlementation européenne sur les émissions de CO₂ des véhicules particuliers

Si la construction de nouveaux quartiers sous le label « éco » ou « smart » permettrait une maîtrise de ces paramètres, la rénovation ou la requalification des quartiers anciens est beaucoup plus difficile.

Enfin, face à cette évolution des émissions de GES, il faut davantage considérer l'importance du métabolisme urbain, c'est-à-dire la consommation de ressources, de matériaux, et les rejets engendrés. C'est un secteur aujourd'hui encore peu pris en compte, et pourtant en lien direct avec les changements de comportements qu'implique la vie urbaine, notamment en matière d'alimentation et de recyclage des déchets ménagers.

L'alimentation urbaine est consommatrice d'énergie et par conséquent émettrice de GES. Les comportements alimentaires se modifient de manière significative selon la taille des villes, du fait du changement de mode vie.

L'Observatoire régional de la santé (ORS) publie régulièrement des chiffres sur les comportements de consommation qui confirment les données nationales. Plus la ville est grande, plus les consommateurs privilégient les aliments préparés (plats cuisinés, conserves, surgelés, fast-food, etc.) gourmands en énergie lors de leur fabrication et leur emballage. En région PACA, cette proportion est moins importante qu'au niveau national, mais reste élevée (46,4 % des personnes ont consommé au moins une fois un plat « tout prêt » durant les quinze derniers jours contre 57,9 % au niveau national). Il faut rappeler que l'alimentation représente 40 % de notre empreinte écologique totale, qu'elle alimente 30 % des GES en France et que 30 % de la nourriture est jetée¹⁶.

Sur la problématique des déchets en PACA, la DREAL¹⁷ a publié en 2015 des chiffres clés sur les quantités :

→ CHIFFRES CLÉS **445 kg** de déchets ménagers produits par an et par habitant, soit **15% au dessus de la moyenne nationale**. La production a toutefois baissé de **30% depuis 2006**.

3,5 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés dits « non dangereux » produits en PACA chaque année : une trentaine d'installations de tri-valorisation, **17 centres de stockage de classe 2** traitant plus de **10 000 t/an**, **5 Unités d'Incinération d'Ordures Ménagères**, une vingtaine de centres de compostage et méthanisation

411 800 tonnes de déchets dangereux produits chaque année en PACA, essentiellement par l'industrie : **5 unités de traitement par incinération** : 2 centres collectifs, 1 cimenterie, 2 unités internes ; **6 centres de transit et prétraitement**

8,5 millions de tonnes de déchets inertes et du BTP, une cinquantaine d'installations de stockage de déchets inertes ISDI

En 2014, 3 567 000 tonnes de déchets dits « ménagers » ont été collectés en PACA, soit 716 kg par habitant. Plus de la moitié (457 kg) provient de déchets issus de la consommation domestique (verre, papier, ordures ménagères, dont 20 kg de nourriture gaspillée) et 85 % de ces déchets sont collectés en zone urbaine (données de l'Observatoire régional des déchets). Sous cet angle, l'importance du tri et de la valorisation des déchets, sous forme de compost, d'énergie ou de composants pour l'industrie, paraît évidente. Cependant, le tri (photo 6) et le recyclage sont moins pratiqués en PACA qu'au niveau national, 31 contre 43 kg par habitant/an (étude Éco-Emballages). Ainsi, plus de 400 kg de matériaux, avec une empreinte écologique forte (plastique, papier, production d'aliments, etc.), participent aux émissions de GES (par habitant/an).

Ces contributions s'additionnant, le bilan urbain - qui reste à

chiffrer - est en PACA nettement supérieur aux indicateurs nationaux. Cependant, il ne suffit pas de trouver des solutions pour chaque secteur, puisque les questions liées aux transports, à l'usage de l'énergie, à l'efficacité des logements et même à l'empreinte écologique sont étroitement imbriquées et interrogent la mixité fonctionnelle des villes. Cette dimension relève du domaine de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire : vivre près de son travail et des lieux d'activités et de loisirs, consommer en s'appuyant sur des filières courtes, ou encore maîtriser les flux d'énergie et de transport. Les nouvelles notions d'« écoville » ou d'« écoquartier » essaient de répondre à ces questions de manière intégrée, notamment avec l'introduction de la technologie (smart city). En France, le label « ÉcoQuartier » a impulsé une dynamique de réflexion et de réalisation sur plus de 200 initiatives, avec la volonté de voir émerger plus de 500 écoquartiers en 2018.



Photo 6. Tri sélectif

¹⁶ Actes du colloque de juin 2013 organisé par l'ARS PACA et rapport de l'ONU pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)

¹⁷ Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

En PACA, plus d'une centaine d'initiatives ont vu le jour depuis 2013 avec des dispositifs très variés (Figure 13). Sept sites sont labellisés par le dispositif de la DREAL PACA¹⁸:

- écoquartier historique à Forcalquier (04) ;
- quartier Grand Arénas à Nice (06) ;
- quartier Méridia à Nice (06) ;
- quartier La Maille II à Miramas (06) ;
- quartier du Parc des Calanques à Marseille (13) ;

- quartier Le Grand Coudoux à Coudoux (13) ;
- zone d'aménagement concerté (ZAC) Joly Jean à Avignon (84).

La plupart de ces initiatives visent à maîtriser l'étalement urbain, favorisent la mixité fonctionnelle en alliant des opérations de rénovation d'infrastructures et de logement misant sur l'efficacité énergétique. Malgré l'ampleur du phénomène, ces opérations restent très limitées et souvent expérimentales, les recherches manquant de profondeur historique pour établir un véritable diagnostic d'atténuation.

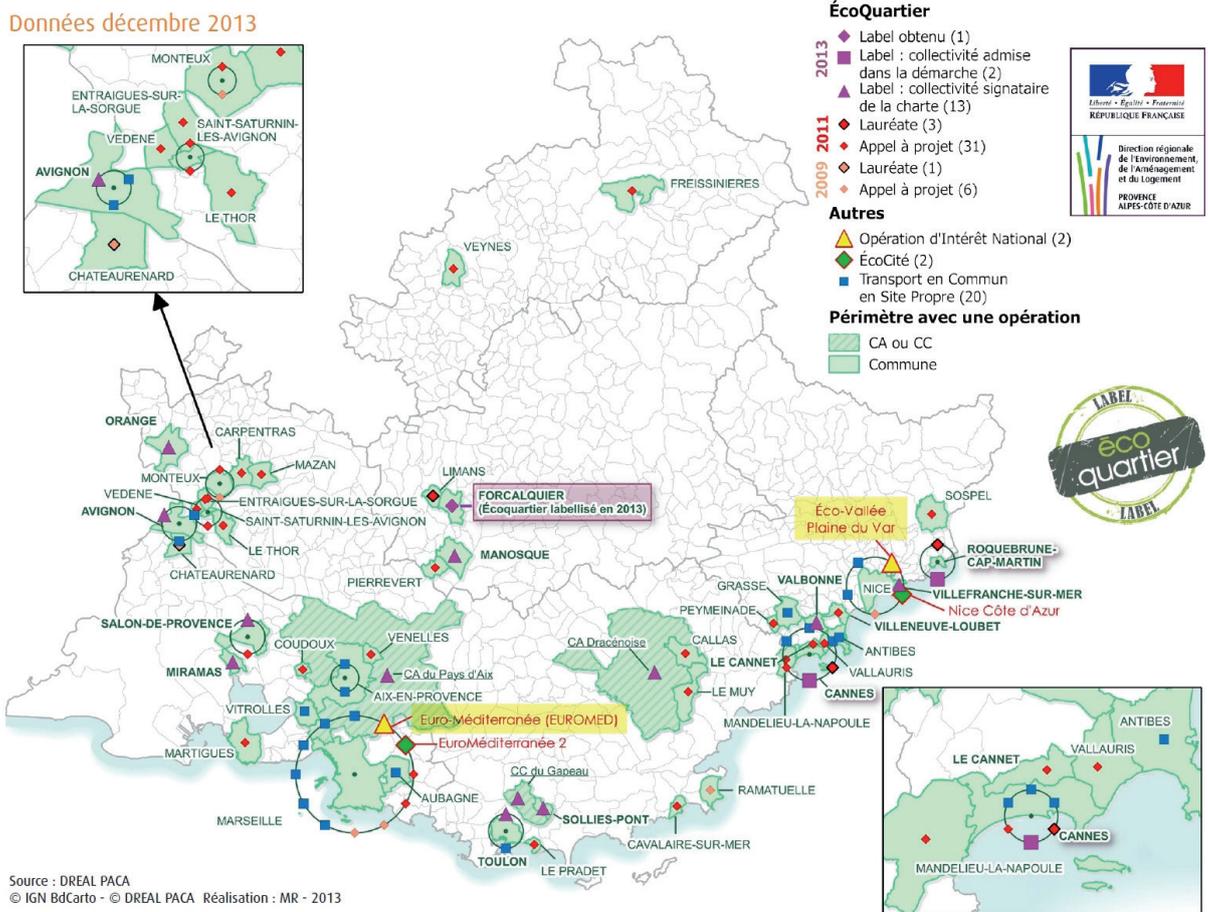


Figure 13. Plan ville durable et Opérations d'intérêt national (source : DREAL PACA, BDCARTO IGN)

Face à ce phénomène, certains paramètres sont aujourd'hui maîtrisés et d'autres nécessitent des programmes de recherche et d'évaluation plus approfondis afin d'établir des politiques et des réglementations efficaces. Ainsi, la quantification des consommations et des pertes énergétiques, ainsi que la prise en compte de l'impact des transports, font l'objet d'un suivi continu en PACA. Les organismes comme l'ONERA¹⁹, la DREAL PACA, Air PACA, etc. mesurent, quant à eux, les émissions de GES et de polluants. Ces mesures permettent d'établir des tableaux de bord

afin de dresser de véritables plans d'actions.

Toutefois, la requalification urbaine reste sujette à débat, surtout dans les quartiers anciens. L'efficacité de cette requalification dépend, en grande partie, des pratiques et des usages des habitants en matière de transport, de consommation d'énergie, et de leurs acceptations sociales et économiques. Dans un contexte d'amélioration des conditions de vie, mais aussi de pression face aux enjeux environnementaux, les pratiques entrent souvent en contradiction avec le discours et les intentions.

¹⁸ <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/les-resultats-des-sessions-de-labellisation-en-a9823.html>

¹⁹ Office national d'études et de recherches aérospatiales

2.2. Impact du climat sur les milieux urbains

L'impact des variabilités climatiques sur les villes de la région PACA relève principalement de leur position méditerranéenne, et paradoxalement, de l'absence de spécificités méditerranéennes dans leurs aménagements.

Les villes sont compactes et perdent progressivement leur caractère architectural traditionnel. Les appartements traversants, dotés de persiennes (volets marseillais ou vénitiens), sont remplacés par des modèles standards qui imposent plus de chauffage ou de climatisation. L'élargissement des voies renforce les effets des ICU, surtout lorsque celles-ci ne sont plus végétalisées. Un accroissement de la température ou des événements extrêmes, comme les canicules, peut alors faire la différence. La France est d'ailleurs mal placée en ce qui concerne l'optimisation de ses locaux d'activités, avec 124 kWh/m²/an en énergie finale²⁰ alors que l'Allemagne n'en consomme que 99, et l'Espagne 111.



Figure 14. Avec une élévation du niveau de la mer de 2 m, Arles serait pratiquement au bord de la mer (source : Google Simulation)

Par ailleurs, le régime pluviométrique méditerranéen implique des orages violents et une récurrence des inondations comme cela a été observé tout au long de l'histoire (les infrastructures des romains, par exemple). Les variabilités climatiques liées aux émissions de GES risquent de multiplier ces phénomènes dans un milieu urbain de plus en plus artificialisé. L'extension urbaine et l'imperméabilisation des sols, le non-respect des règles d'urbanisme, de l'entretien des rivières et canaux, etc. sont des facteurs anthropiques²¹ évidents qui impliquent le plus souvent des inondations torrentielles (plus que des crues de plaine), comme ce fut le cas à Vaison-la-Romaine, à Pertuis, près des fleuves côtiers du Var et à Nice. Ils laissent une empreinte très forte en milieu urbain.



Photo 7. Montée de la rue Malonat, Nice (illustration)

La position littorale des villes est également à prendre en considération face aux risques d'élévation du niveau de la mer (Figure 14), voire à des petits tsunamis. L'impact serait alors catastrophique pour les infrastructures, le tourisme et l'environnement côtier (érosion des falaises côtières). Cette remontée de la mer affecterait aussi l'écoulement des fleuves, en particulier le Rhône, provoquant des inondations en amont, dans des villes comme Arles ou Avignon.



Photo 8. La modernité impose le verre : la tour CGM, Marseille (illustration)



²⁰ Énergie au stade finale de la chaîne de transformation de l'énergie, c'est-à-dire au stade de son utilisation par le consommateur final

²¹ Relatif à l'activité humaine, qualifie tout élément provoqué directement ou indirectement par l'action de l'homme

De manière générale, « la pression démographique et l'urbanisation croissante augmentent la vulnérabilité des territoires. Le développement économique se traduit par une occupation croissante des zones à risques et par l'augmentation des dommages aux personnes, aux biens et aux activités lors de catastrophes naturelles. L'attractivité touristique complique la prise en compte des risques »²². La conjonction d'évènements extrêmes, de plus en plus nombreux et violents, couplés à une concentration urbaine de personnes et d'activités, implique de prioriser cette thématique au sein des politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique en milieu urbain. La Figure 15 illustre le nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle reconnu par commune, ce nombre reflétant indirectement la densité de population.

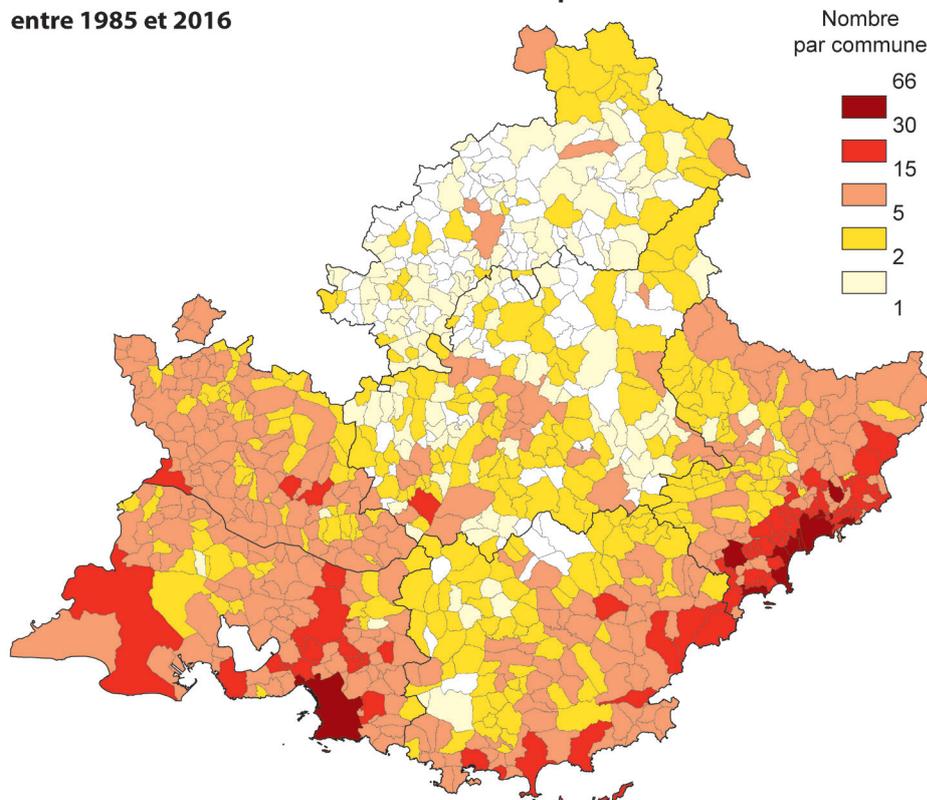
Un autre domaine reflétant l'impact du changement climatique en milieu urbain est celui de la santé. Cet aspect est aujourd'hui encore mal connu, or on sait que les canicules sont plus exacerbées en milieu urbain que rural. Durant l'épisode caniculaire d'août 2003, les dispositifs sanitaires ont observé une surmortalité nettement supérieure en milieu urbain qu'en milieu rural. Il a été démontré que la surmortalité urbaine dépendait de facteurs socio-économiques liés aux conditions de vie et en particulier à l'habitat. « La crise de cet été 2003 apparaît également comme un drame essentiellement urbain. Les chiffres pour Paris sont, à cet égard, significatifs. Les conditions du logement dans

la capitale et l'isolement des personnes âgées ont été des éléments déterminants du drame », conclut le rapport d'enquête parlementaire. Les ICU jouent évidemment un rôle fondamental dans cette combinaison canicule-mortalité-morbidité. La région PACA fut relativement épargnée lors de cet épisode, toutefois les modifications des modes de vie en région méditerranéenne introduisent des comportements qui sont de moins en moins adaptés.

D'autres impacts sur la santé, en milieu urbain, sont aujourd'hui difficilement démontrables car il existe peu d'études sur ces situations telles que la prolifération des maladies à vecteurs (dengue, typiquement liée à l'urbanisation, par exemple), l'intensification des maladies chroniques respiratoires en lien avec la pollution de l'air (particules en suspension) ou la présence plus forte de pollens (en particulier d'espèces méditerranéennes).

Dans ce contexte, les enjeux de l'environnement urbain sont étroitement dépendants des inégalités sociales et territoriales résultant de l'accessibilité à certains services environnementaux. Par conséquent, on ne peut aborder les processus de dynamiques urbaines en écartant les questions sociétales relatives aux interactions externes (politiques nationales et internationales, impact du changement climatique et global) et internes (gestion territoriale, urbanisme intégré, rôle de la fragmentation, place des services écosystémiques, etc.).

Arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle entre 1985 et 2016



Source: Base Gaspar (<http://macommune.prim.net/gaspar/index.php>)
Réalisation LPED

Figure 15. Arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle entre 1985 et 2016 (source : Base Gaspar)

²² Les risques naturels en Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2009, BRGM, DREAL

ZOOM 4

Changement climatique, villes méditerranéennes et moustiques vecteurs

Les travaux du GIEC ont rapidement souligné les possibles effets du changement climatique sur la distribution géographique des moustiques et sur le risque d'émergence et de réémergence des maladies qu'ils peuvent transmettre. En Provence-Alpes-Côte d'Azur, les zones humides abritent de longue date certaines espèces de moustiques vecteurs, tels *Anopheles*, vecteur du paludisme, et le *Culex*, vecteur du virus West Nile. Les changements climatiques pourraient provoquer une réémergence du paludisme, dont la région est indemne depuis le lendemain de la Seconde Guerre mondiale, ou bien augmenter la circulation du virus du West Nile.

Les processus sont toutefois multifactoriels. La transmission du West Nile à l'homme nécessite la présence simultanée et en densité suffisante d'oiseaux infectés, de moustiques et d'hommes dans un même territoire : une gestion éclairée des espaces naturels est la clé d'une atténuation effective du risque. Pour ce qui est du paludisme, la question des conditions économiques et sanitaires des populations humaines demeure centrale, comme le rappelle tristement la réémergence de cette maladie en Grèce au lendemain de la crise économique.

Le changement climatique favoriserait aussi l'installation et la pullulation de moustiques vecteurs jusqu'alors caractéristiques de régions plus chaudes. En région PACA (Figure 16), l'installation du moustique tigre, *Aedes albopictus*, est d'ores et déjà à l'origine de plusieurs cas autochtones de dengue et de chikungunya²³. Originaire du sud-est asiatique, *Aedes albopictus* a été observé à Menton dès 2004. Son aire de répartition s'est depuis rapidement étendue à toute la région et au-delà²⁴. Cependant, contrairement à l'idée très majoritairement répandue au sein du public, le changement climatique n'est ni le premier, ni le seul facteur à l'origine de l'installation et de la prolifération d'*Aedes albopictus* en PACA. Doté d'un mécanisme de diapause²⁵ qui lui permet de survivre pendant l'hiver sous forme d'œuf, le moustique est parfaitement adapté aux environnements tempérés. Et c'est en profitant du développement des infrastructures et des transports, dans le sillage de la mondialisation, qu'il étend son aire de répartition à la surface du globe. Ainsi, les principaux facteurs de dispersion, d'introduction et d'installation d'*Aedes albopictus* en PACA se révèlent être d'origines anthropiques directes. L'expansion urbaine et ses réseaux de circulation jouent un rôle prépondérant. Le changement climatique serait pour sa part un facteur d'aggravation.

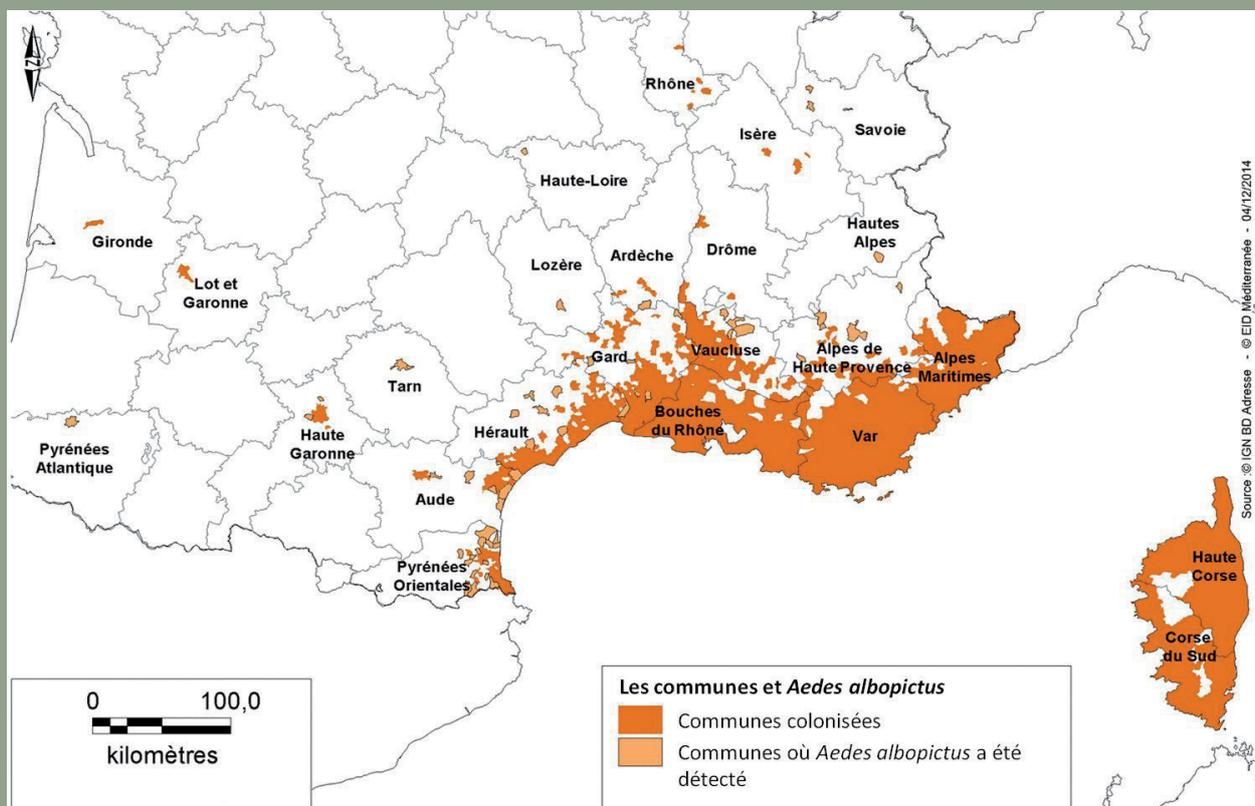


Figure 16. Communes colonisées et détections d'*Aedes albopictus* en 2014 (source : EID Méditerranée)

²³ <http://www.ars.paca.sante.fr>

²⁴ <http://www.moustiquetigre.org>

²⁵ Mécanisme de dormance qui permet aux organismes de passer la saison défavorable (hiver froid ou été aride) en état de vie ralentie. La diapause est programmée génétiquement et se déclenche en fonction de facteurs environnementaux tels que la température ou la photopériode (durée du jour)

■ Les transports, facteurs d'introduction et de dispersion

Le moustique tigre vole par lui-même sur quelques centaines de mètres tout au plus. En revanche, il est un grand voyageur accidentel ou opportuniste qui profite de l'explosion du commerce international (ses œufs, très résistants et pondus sur tout type de support, sont expédiés à travers le monde) et du développement des transports (les moustiques adultes, qui piquent pendant la journée, suivent l'homme dans tout type de véhicule : bateau, train, avion, voiture, etc.). À l'instar de l'être humain, il se déplace de plus en plus vite, de plus en plus souvent et de plus en plus loin. Le processus est particulièrement visible sur le littoral méditerranéen français où les réseaux de transport sont denses et très fréquentés.

■ Le changement climatique, facteur d'aggravation

Les effets du changement climatique ne se limitent pas à la possible augmentation des températures, mais pourraient aussi augmenter l'intensité et la fréquence d'événements météorologiques extrêmes tels les crues torrentielles caractéristiques du sud de la France. Or, une étude récente montre l'influence de ces crues sur la pullulation d'*Aedes albopictus* en zone urbaine : la mise en eau simultanée d'un grand nombre de gîtes larvaires à une période propice au développement du moustique se traduit,

la semaine suivante, par une augmentation drastique des densités de moustiques, contribuant ainsi à l'augmentation du risque vectoriel.

■ Les formes urbaines, facteurs d'installation

Le processus de colonisation d'*Aedes albopictus* est étroitement lié à son adaptation aux milieux anthropiques, au point d'être aujourd'hui considéré par les entomologistes comme un « moustique domestique ». Contrairement aux moustiques autochtones de PACA (*Aedes caspus*, *Aedes detritus*, *Culex pipiens*) qui pondent principalement leurs œufs dans les marais, les étangs et les grands bassins, *Aedes albopictus* préfère de petites quantités d'eau claire. Or, ces dernières abondent dans les espaces urbains et périurbains. Les villes fournissent aussi une forte concentration de proies (les êtres humains et leurs animaux domestiques) pour le repas sanguin des femelles en phase reproductive. Enfin, les quartiers résidentiels et leurs espaces verts sont des lieux de prédilection pour l'installation d'*Aedes albopictus*, lui offrant de l'ombrage pour son repos et du nectar de plantes pour ses repas. Le moustique tigre affectionne tout particulièrement les jardins parsemés de récipients d'eau (soucoupes, vasques, récupérateurs d'eau de pluie, etc.) et à la végétation touffue. Les bâtiments eux-mêmes peuvent être favorables à la présence du moustique tigre en constituant des « gîtes structurels » (terrasses sur plot, toits végétalisés, gouttières, etc.).



Photo 9. Balcons végétalisés en ville (illustration)

2.3. Les grands enjeux de l'urbain face au changement climatique

Du fait des impacts possibles du changement climatique et des événements extrêmes, la ville est face à des enjeux qui concernent à la fois la maîtrise de sa croissance, mais aussi de sa fragmentation sociale et spatiale :

- la croissance urbaine non maîtrisée et le phénomène de l'étalement urbain et périurbain ;
- la forte augmentation de la mobilité des populations en inadéquation avec l'évolution des réseaux, des flux et des fonctions urbaines ;
- un urbanisme toujours peu adapté aux enjeux environnementaux (en particulier face aux défis du changement climatique) ;
- des tendances à la fragmentation de l'espace dont les conséquences sont encore peu étudiées.

■ Étalement ou densification ?

L'un des premiers enjeux concerne l'utilisation de l'espace, c'est-à-dire la limite de la croissance urbaine comme facteur de soutenabilité. Il dépend d'un choix politique important : étalement ou densification du tissu urbain. Il est nécessaire dans ce sens de connaître :

- les options possibles et les influences prévisibles de l'étalement et de la densification sur les catastrophes naturelles et humaines, incluant, dans le cas des villes de PACA, la question de la gestion du littoral²⁶ ;
- les alternatives envisageables en termes de gestion et d'économie de l'espace pour une optimisation des réseaux et des ressources ;
- une maîtrise des flux, en particulier de l'eau, à la fois

dans son approvisionnement (question fondamentale en Méditerranée) et son évacuation (impermeabilisation des sols, systèmes de collecte et de rejets, impact sur les écosystèmes marins, etc.). On peut également penser aux déchets, et particulièrement à la nécessité du recyclage des déchets contaminés des sites industriels ayant une implication forte dans les problèmes de santé des populations ;

- la réduction de la consommation d'énergie en matière de gestion des espaces collectifs et de proximité, les différents usages des énergies renouvelables, ainsi que les influences des modèles climatiques et des formes urbaines sur l'optimisation des ressources énergétiques.

■ Réduire la mobilité ou densifier les transports ?

Les mobilités participent de manière très significative au changement climatique, et sont, elles-mêmes, dépendantes de l'étalement et de la forme urbaine. Les enjeux sont ainsi de deux natures :

- l'optimisation des déplacements par la structuration (regroupement, concentration) des lieux de vie (habitats, commerces, loisirs, etc.), en relation avec les lieux d'activités (services, industries, zones d'activités, etc.) et de production ou de consommation. Ce sont les enjeux de l'agriculture périurbaine (agriculture de proximité et permaculture), de l'architecture verte et de l'empreinte écologique liés à notre consommation ;
- la réduction des nuisances et des pollutions par la rationalisation des transports, c'est-à-dire une diminution des distances, des transports plus efficaces en énergie, voire des transports sans énergie polluante (bicyclette, photo 10).



Photo 10. Mobilité douce

²⁶ Lire cahier thématique *La mer et le littoral de Provence-Alpes-Côte d'Azur face au changement climatique*, 2017

■ Un urbanisme technique ou écosystémique ?

La ville, permanente et durable, est le produit d'une construction de plusieurs centaines d'années toujours visible aujourd'hui. De même, les choix effectués en matière de pratiques urbaines (bâti, relation bâti-infrastructure, type de logements, densité, etc.) auront encore un impact dans un siècle. Les acteurs ont donc une grande responsabilité vis-à-vis des décisions qu'ils prendront pour demain. Ces choix s'orientent aujourd'hui vers deux options (non nécessairement incompatibles) :

- la première conception relève d'une course à la maîtrise technologique du « tout urbain » face à la nature. Ce sont les villes « zéro carbone », de type Abu Dhabi, Masdar City, Dubaï²⁷, etc. qui basent leur durabilité sur une réduction des émissions de carbone, en misant sur la maîtrise du thermique, de l'énergétique, des transports ou des déchets ;

- la seconde est une réponse à l'échec prévisible de cette modernité. Il s'agit de privilégier la préservation du capital naturel (patrimoine bâti et non bâti) par le moyen de services écosystémiques, au sein d'une démarche soutenable, associée à une notion de « bien vivre ensemble » qui implique des mécanismes de démocratie participative. Ce sont les corridors écologiques, les trames vertes et bleues, la réhabilitation de l'existant et l'économie de la matière, les écoquartiers, etc. Cette réponse nécessite une reconsidération de l'organisation de l'espace urbain et la revalorisation des espaces à caractère naturel. L'Éco-Vallée de la Plaine du Var en est un exemple (Figure 17).

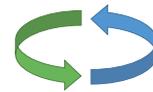


Figure 17. Éco-Vallée de la Plaine du Var, Nice (source : Mairie de Nice)

Ces deux options ne sont pourtant pas contradictoires. Elles nécessitent toutefois de faire des choix, notamment politiques, afin d'introduire la « transition urbaine » :

- l'analyse des politiques et de leurs impacts en termes d'environnement. Dans le domaine des politiques nationales, on peut penser au plan climat-énergie territorial (PCET) du Grenelle de l'environnement, qui offre un cadre pour les collectivités, mais aussi aux pratiques des normes haute qualité environnementale (HQE) dans des contextes de rénovation urbaine ;

- au sein de ces pratiques urbaines, les choix énergétiques sont fondamentaux, non seulement pour la réduction d'une consommation énergivore, mais aussi pour limiter les effets des îlots de chaleur. Le choix des matériaux, la structuration de l'espace et l'utilisation de dispositifs « absorbants » participent à et conditionnent l'amélioration du cadre de vie, et réduisent la contribution anthropique au changement climatique. Aujourd'hui, peu d'expériences existent en Méditerranée : il est nécessaire de développer des programmes interdisciplinaires pour comprendre et modéliser le fonctionnement climatique et énergétique de la ville ;

²⁷ Modèles très prisés aujourd'hui dans les pays de la rive sud de la Méditerranée

■ le cadre de vie est aussi influencé par l'intégration d'une démarche paysagère au sein des nouvelles pratiques de l'urbanisme et par des actions de conservation et de valorisation des patrimoines naturels dans ou en bordure de la ville. On peut alors citer l'exemple du Parc national des Calanques à Marseille. Les politiques de trames vertes et bleues ou d'écoquartiers peuvent également générer des villes à deux vitesses et introduire, parfois, plus d'inégalité sociale ;

■ ce cadre de vie est aussi influencé par les modalités de traitement des friches industrielles et des résidus que ces industries ont générés. L'industrie lourde fait de moins en moins partie du paysage urbain (en PACA en particulier), ce qui engendre des actions en termes de reconversion territoriale et d'atténuation environnementale. Le projet de reconversion par une trame verte d'une zone fortement industrialisée telle que la vallée de l'Huveaune illustre ces actions (Figure 18).

Vallée de l'Huveaune Mosaïque paysagère - Vert

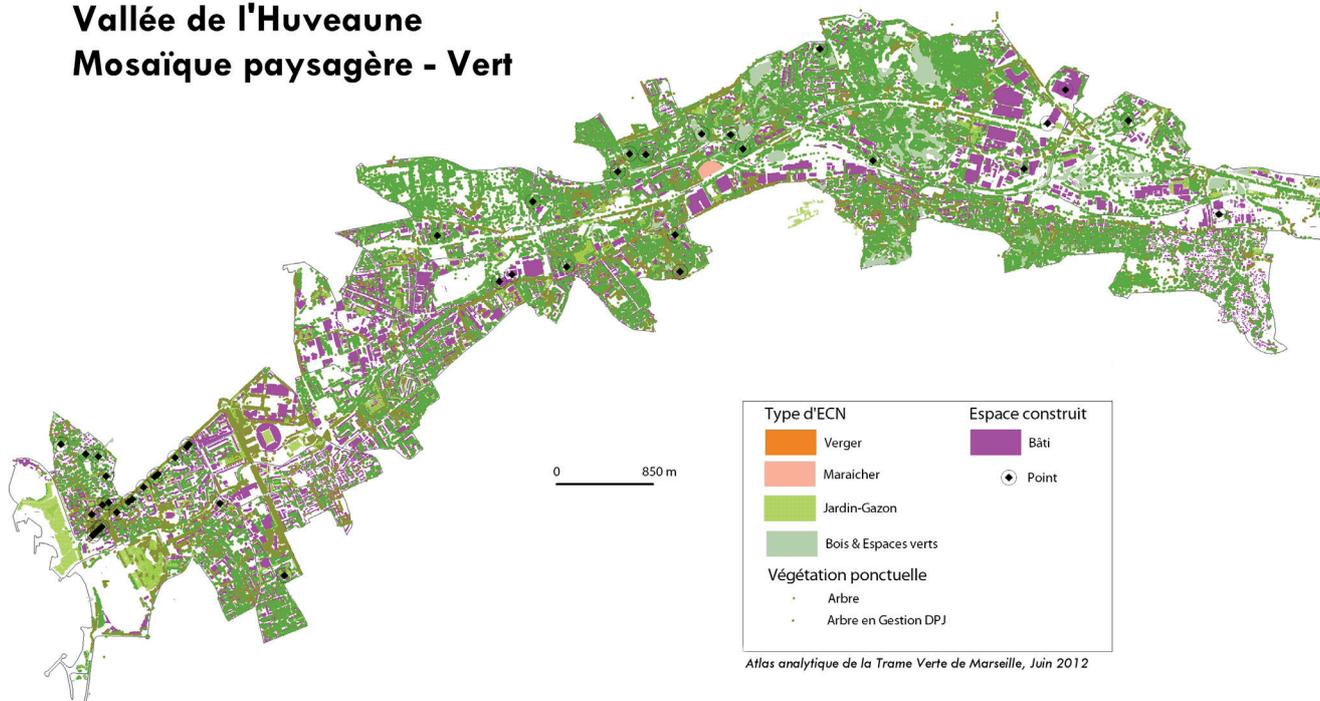


Figure 18. Vallée de l'Huveaune, atlas analytique de la trame verte de Marseille, juin 2012 - ECN : espaces à caractère naturel (source : programme PIRVE)

■ Fragmentations ou continuités ?

La fragmentation de l'espace urbain est une donnée qui nécessite une évaluation en lien avec les enjeux environnementaux. Cette fragmentation de l'espace peut être néfaste en termes de mobilité et de maîtrise des flux (fermeture de résidences), d'inégalités sociales et environnementales (ségrégation par l'habitat, gentrification²⁸, etc.) avec toutes les implications que ces phénomènes peuvent engendrer sur l'environnement. Pourtant, elle peut également jouer un rôle dans le maintien de la biodiversité (Cf. §3) et aider à la régulation climatique.

La fragmentation intervient dans :

- les mobilités et la maîtrise des flux ;
- la ségrégation environnementale et spatiale : inégalité d'accès aux services, habitat, gentrification, etc. ;
- la biodiversité : trames vertes, couloirs, espaces à caractère de nature, espaces protégés, etc. ;
- la régulation climatique : ouverture, fermeture, barrières, etc.

Ces recherches nécessitent un dialogue permanent avec les acteurs qui font et défont la ville de manière à mieux comprendre leurs actions et leurs impacts. La collaboration avec les collectivités territoriales est, en ce sens, impérative afin d'inclure leurs réponses dans les scénarios scientifiques. L'analyse des politiques, au travers des projets d'aménagement (SCOT, chartes, etc.), des plans locaux d'urbanisme (PLU) ou plans locaux d'habitat (PLH), est une donnée incontournable, tout comme le sont les nouvelles normes d'urbanisme et les mouvements citoyens.

Aujourd'hui, l'urbanisme soutenable, surtout en Méditerranée, est encore limité. Les champs de recherche sont donc largement ouverts. Il manque des valeurs de référence et des mesures de tendance qui permettraient de situer la gestion d'une ville dans un contexte particulier. La construction d'indicateurs est un domaine de recherche qu'il ne faut pas négliger et qui aide à construire les relations entre recherche et politique. Cette construction ne peut se faire que par une compilation d'expériences méditerranéennes de manière à rechercher à la fois les facteurs de diversité et de spécificité. Les observatoires et les réseaux d'observatoires ont une place tout à fait fondamentale au sein de ce dispositif de recherche.

²⁸ Tendance à l'embourgeoisement d'un quartier populaire

3. Climat et ville, la place de l'écologie

Les enjeux du changement climatique replacent l'écologie au cœur de l'espace urbain. Les villes méditerranéennes abritent une riche et fragile biodiversité qui subit de fortes contraintes : urbanisation galopante, pollution de l'air, inondations, etc. La hausse de la température de l'air, le caractère minéral

(photo 11) et la structure des villes, les aménagements, etc. renforcent les ICU. Les espaces naturels peuvent limiter les effets du changement climatique et rendre de précieux services. La ville de demain passera par de nouvelles pratiques de gestion multi-échelles.



Photo 11. Le caractère minéral de la ville (Marseille)

3.1. La nature en ville

La ville n'est appréhendée d'un point de vue écologique que depuis à peine deux décennies. Les diverses études scientifiques montrent qu'elle présente une biodiversité composite résultant de processus et de perturbations hétérogènes (climat, aménagement, pratiques de gestion, modes d'occupation et d'utilisation des sols actuels et passés, etc.). La nature en ville est soumise à une succession de changements plus ou moins brutaux sur le temps court et le temps long. La succession de ces changements s'accompagne en effet d'une dynamique continue qu'il s'agit de mesurer par des suivis (observatoires), de renseigner par des approches historiques (paysages passés, images diachroniques, collections, mémoires des activités sociales, etc.) et enfin de modéliser. Les processus observés dans le temps long (climat) questionnent alors les processus du temps court (gestion des espaces à caractère de nature, formes urbaines, bâti, fermetures et inaccessibilités, etc.).

Par ailleurs, la connaissance du fonctionnement de la biodiversité en milieu urbain nécessite des approches

spatiales à échelles fines (quartiers, rues, espaces à caractère de nature, etc.). Ces processus sont analysés au regard des formes d'urbanisation résultant de l'histoire d'occupation des sols, de l'aménagement urbain et des pratiques de gestion des espaces publics et privés, en portant l'attention aux espaces urbains et périurbains, et aux zones rurales qui s'urbanisent sous la même impulsion.

En modifiant de nombreux facteurs abiotiques et biotiques²⁹, l'urbanisation modifie la distribution des espèces en lien avec la connectivité des paysages urbains, les possibilités d'adaptation et de mobilité des espèces, ainsi que des flux de gènes. En effet, les organismes vivants sont soumis à de nombreuses perturbations anthropiques d'origines très diverses : pollution de l'air, fragmentation des habitats, piétinement, introduction d'espèces exotiques, nourrissage, etc. qui vont agir comme un filtre en sélectionnant les organismes (à travers leur arrivée, leur installation, leur développement et leur maintien) et en créant des communautés composites et originales.

²⁹ Les facteurs abiotiques représentent l'action du non-vivant sur le vivant à l'inverse des facteurs biotiques qui représentent l'ensemble des interactions du vivant sur le vivant dans un écosystème



Photo 12. Le bord du Rhône à proximité immédiate de l'hypercentre d'Avignon (illustration)

L'introduction de nombreuses espèces, les disparitions ou les proliférations, voire les invasions, en fonction du contexte d'urbanisation, conduit souvent à une homogénéisation de la biodiversité aussi bien au niveau spécifique que fonctionnelle. En effet, elle se traduit par le remplacement d'espèces natives régionales par des espèces allochtones³⁰ ou généralistes, parfois invasives. À l'échelle de l'espèce et à l'échelle fonctionnelle (traits d'histoire de vie), l'homogénéisation biotique a des conséquences écologiques et évolutives irréversibles lorsque les patrons de similarité dans l'espace et dans le temps sont modifiés. Par exemple : remplacement des espèces autochtones par des hybrides intra ou interspécifiques, synchronisation biologique des réponses individuelles dans les communautés augmentant la vulnérabilité de ces communautés

et, d'une manière générale, diminution de la variabilité entre les communautés compromettant leur réponse aux perturbations, du potentiel des écosystèmes à résister aux invasions, de la capacité à s'adapter, etc.

En région méditerranéenne, le milieu naturel apparaît aujourd'hui relativement préservé des invasions biologiques du fait de l'absence de niches écologiques vacantes. Le changement climatique en cours peut s'avérer incompatible avec le maintien de certaines espèces qui laisseront alors des espaces et des ressources disponibles pour des espèces moins exigeantes. Cela soulève ainsi la question du potentiel invasif de certaines espèces exotiques en milieu naturel à proximité de la ville, lieu d'introduction privilégié de ces espèces.



³⁰ Exotiques : il s'agit le plus souvent d'organismes introduits par l'homme, volontairement ou accidentellement

Par ailleurs, l'urbanisation, en induisant des changements climatiques et microclimatiques (ICU, par exemple), peut avoir un impact sur la phénologie³¹ des végétaux avec pour conséquence un allongement de la disponibilité des ressources favorables aux cycles de développement des espèces (pollinisation, fructification, ressources alimentaires, etc.). Les études phénologiques à des échelles fines sont toutefois rares. Au niveau des populations, un décalage phénologique selon le gradient d'urbanisation peut conduire à un isolement reproductif et donc à une perte de connectivité due à une discontinuité temporelle. Il a également été montré que la production de biomasse végétative aérienne peut être altérée par le degré d'urbanisation et notamment par les altérations des concentrations en CO₂ et des températures.

La zone méditerranéenne a été identifiée comme l'un des "hot spots" mondiaux, en matière de biodiversité et en termes d'impacts du changement climatique. La région PACA est un territoire avec une pression d'urbanisation forte et une vulnérabilité croissante face aux changements climatiques. Ces enjeux s'observent particulièrement dans les métropoles littorales (Marseille, Nice, Toulon)

qui concentrent plus de la moitié de la population régionale. Ainsi, la ville de Marseille et son aire urbaine se hissent au troisième rang en France pour le nombre d'habitants (1,7 million), mais se caractérisent par une richesse naturelle exceptionnelle faisant l'objet de multiples mesures de protection à différentes échelles, de la parcelle en cœur d'îlot jusqu'au récent Parc national des Calanques (photo 13), premier parc national périurbain d'Europe. Les structures urbaines complexes, l'étalement important avec extension du bâti sur les contreforts des massifs naturels (sans zones agricoles tampons) placent ce territoire urbanisé dans une problématique d'urbanisation accrue des zones littorales, caractéristiques de la région PACA. Par exemple, dans la métropole d'Aix-Marseille Provence, entre 1988 et 2006, l'urbanisation a consommé 900 ha par an d'espaces agricoles et 360 ha par an d'espaces naturels. Milieux naturels, espèces végétales ou animales protégées coexistent ainsi, de manière assez atypique, au sein d'espaces urbanisés affectés par de fortes pollutions de l'air et des sols, avec une densification et un étalement de l'habitat, des pôles et friches industrielles depuis longtemps présents et des infrastructures de transports conséquentes.



Photo 13. Port de Sormiou (Parc national des Calanques)

³¹ Étude de l'apparition d'événements périodiques (annuels le plus souvent) dans le monde vivant, déterminée par les variations saisonnières du climat. C'est donc un outil de suivi de l'adaptation des végétaux aux changements climatiques

Sous l'influence actuelle de cette densification importante des espaces urbains et de la convergence des effets de l'urbanisation et du réchauffement climatique, la biodiversité intra-urbaine est au centre des réflexions menées sur la ville durable en termes de qualité environnementale et de services écosystémiques associés (limitation de la pollution, aménités vertes, etc.). Les nouvelles politiques environnementales lancées ces dernières années en France sous l'impulsion du Grenelle de l'environnement amènent à reconsidérer la place de la nature en ville. La gestion écologique des espaces verts vise à redonner à la faune et à la flore des habitats de qualité, et entraîne le développement accru de la biodiversité

ordinaire (espèces communes) dans les espaces publics, alors que la végétalisation des toits et des façades (photo 14) offre des opportunités pour créer de nouveaux écosystèmes (bâtiments à biodiversité positive) et services écosystémiques. Ces changements de cadre de vie ont des conséquences sur la perception qu'ont les citoyens de la nature en ville. Les espaces de nature ordinaire apparaissent dépréciés et difficilement valorisables, tandis que ceux aménagés et gérés, où domine une flore ornementale introduite, sont habituellement considérés comme l'un des paramètres essentiels de la qualité environnementale perçue positivement par les habitants.



Photo 14. Mur végétalisé, Aix-en-Provence

Suite au *Millenium Ecosystem Assessment* (2005), les approches de la nature en ville intègrent, de plus en plus, une évaluation fonctionnelle des services écosystémiques rendus par les espaces à caractère de nature. L'augmentation des températures en période estivale accentue l'effet d'ICU lié à une forte proportion de surfaces artificialisées et une faible présence de végétaux. L'arbre, régulant significativement le climat urbain, est placé au cœur des approches bioclimatiques.

Par exemple, l'implantation d'arbres de rues peut favoriser le climat local par des effets d'ombrage et lutter contre les pollutions atmosphériques (production d'oxygène, fixation des particules aériennes sur les feuilles). Les alignements d'arbres limitent toutefois la ventilation des rues et altèrent la qualité de l'air. Le lien entre services et adaptation des villes au réchauffement climatique par des plantations ciblées n'a encore pas fait l'objet d'études approfondies.



ZOOM 5

Partir plus loin ou rester plus longtemps : ce que nous disent les oiseaux

Les changements climatiques ont entraîné une modification des stratégies migratoires chez les oiseaux. Les destinations de migration remontent en latitude, vers le nord et le nord-ouest, comme en altitude. Certaines espèces migrent ainsi plus loin, alors que d'autres restent plus longtemps sur leur site de nidification, et parfois ne migrent plus du tout. Par exemple, une sédentarisation est observée chez le pouillot véloce ou la fauvette à tête noire. Désormais, la route migratoire de cette dernière traverse la Grande-Bretagne, où la fauvette trouve une ressource alimentaire abondante dans les mangeoires mises à disposition par les citoyens. Plutôt que de se diriger vers l'Afrique du Nord ou l'Europe du Sud, nombreux sont les individus à hiverner en Grande-Bretagne.

Le même phénomène de sédentarisation urbaine s'observe chez les étourneaux sansonnets. Depuis

quelques décennies, le nombre d'individus migrant vers le sud de l'Europe ou vers le Maghreb ne cesse de diminuer. Les individus se « réfugient » en centre-ville pour y nicher, car la présence d'îlots de chaleur et une densité urbaine élevée leur permettent de réduire la mortalité de leurs poussins et de les protéger des prédateurs. Pourtant, ce phénomène n'est pas sans conséquence sur l'avifaune³² présente : les étourneaux occupent des cavités d'arbres (ressource limitée en ville) au détriment d'autres espèces. Ainsi, le rouge queue à front blanc, de retour de sa migration transsaharienne début avril, a plus de mal à trouver une cavité où s'installer.

Cette sélection d'espèces capables de modifier leur comportement sera la cause, sur le long terme, d'un bouleversement profond des communautés d'oiseaux en ville. Cat. Tala notiemur la ignatiqua

3.2. Climat, urbanisme et construction, le rôle de la végétalisation

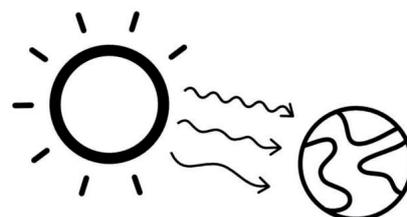
L'ICU se traduit par des températures plus élevées en ville qu'en périphérie, principalement pendant la nuit et en été. Les raisons sont :

- un albédo³³ moyen plus faible des surfaces urbaines, entraînant une plus forte absorption solaire pendant la journée ;
- la ségrégation environnementale et spatiale : inégalité d'accès aux services, habitat, gentrification, etc. ;
- le stockage de la chaleur dans un sol effusif et sa restitution nocturne ;
- une diminution de la vitesse de l'air due à la rugosité, réduisant le refroidissement par convection ;
- une raréfaction des surfaces humides, diminuant les possibilités de refroidissement par évaporation ;
- un effet de serre accru, réduisant le refroidissement par rayonnement thermique (notamment la nuit) ;
- un dégagement de chaleur dû à la consommation d'énergie (chaleur anthropogénique).

Sur la base de cette liste, il est possible d'attribuer en grande partie l'effet d'ICU au cycle thermique ayant le rayonnement solaire comme moteur (le reste est dû à la chaleur anthropogénique résultant des dépenses d'énergie, intenses en ville).

En somme, le rayonnement solaire est absorbé par les multi-surfaces de la ville (selon albédo). La chaleur, qui résulte de cette absorption, est stockée par les matériaux en général effusifs (asphalte, béton, pierre), puis est restituée la nuit. Le phénomène est aggravé par le fait que les moyens de refroidissement, à savoir les échanges par la ventilation et les échanges de chaleur latente liés à l'évaporation de l'eau, sont amoindris ou inexistantes en ville. La réponse globale à mettre en œuvre consisterait donc à « ombrer » ces surfaces urbaines sans altérer leur capacité de refroidissement nocturne par rayonnement et à restaurer un minimum le cycle de l'eau.

Quel est l'élément qui par sa seule présence peut assurer à la fois de l'ombre et un rafraîchissement par évaporation ? Il n'y en a qu'un : c'est le végétal. Il projette une ombre en fonction de la forme et la densité de son feuillage (indice de surface foliaire) et compense largement l'énergie solaire interceptée grâce au processus d'évapotranspiration. La température d'un feuillage suit de près celle de l'air et ne s'échauffe donc pas au soleil.



³² Ensemble des espèces d'oiseaux d'une région

³³ Valeur physique permettant de déterminer la quantité de lumière solaire incidente réfléchiée par une surface

■ Une question d'échelle

■ Échelle de la ville

Si l'objectif est l'ICU lui-même, à l'échelle de la ville, la végétalisation devra être aussi envisagée à cette échelle. Cela revient à quasiment offrir une deuxième peau à la ville vue du ciel. Rappelons que ce sont les surfaces horizontales qui reçoivent le plus d'énergie du soleil en été. Mais les surfaces verticales sont également exposées, notamment celles qui sont orientées vers l'ouest. La solution serait d'imaginer une superstructure (on parle de « canopée ») couvrant le sol et certains bâtiments bas, à une certaine hauteur au-dessus de la ville (à hauteur de bâti, par exemple), et capable d'accueillir des végétaux grimpants. Une telle solution mise en œuvre sur l'ensemble de la ville bouleverserait le paysage urbain.

■ Échelle du quartier

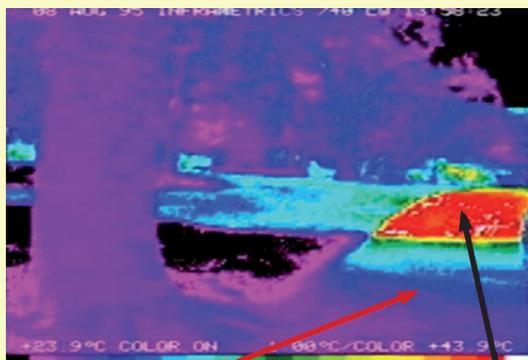
Mais l'échelle peut aussi être celle du quartier : la présence d'un parc urbain au milieu de la ville dense aurait un impact intéressant sur son voisinage immédiat (l'effet de rafraîchissement moyen n'est pas très étendu et la morphologie du bâti, plus ou moins ouverte sur le parc, a une influence sur cette extension). Dans les parcs, les arbres et les pelouses humides sont en concurrence pour limiter les températures (Figure 19).



Photo 15. Quartier de la Joliette, Marseille

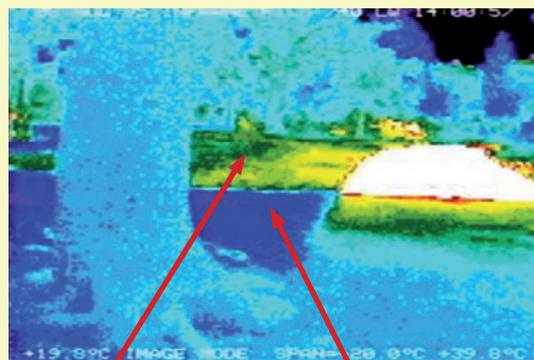
■ Échelle de la rue

C'est à l'échelle de la rue (photo 15) que la circulation et nos déplacements se font. À ce niveau, l'ombre et un contrôle climatique seront appréciés si le déplacement s'effectue à l'aide de moyens doux (à pied, vélo, roller, trottinette). L'arbre d'alignement constitue la meilleure solution lorsqu'il est de taille suffisante, car il protège à la fois le sol et les façades des bâtiments. Des plantations en pots entreposés par les riverains dans les rues étroites ont un effet microclimatique plus limité.



Allée à l'ombre : 25°C

Allée au soleil : 42°C



Pelouse au soleil : 31°C

Pelouse à l'ombre : 24°C

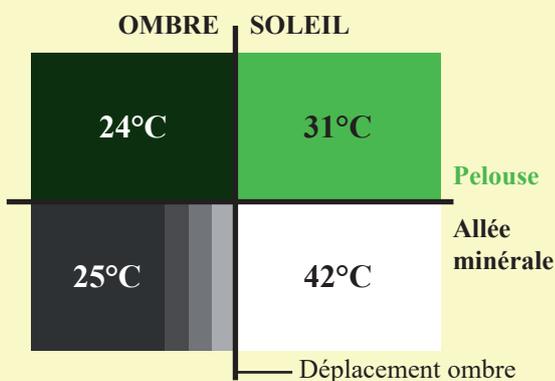


Figure 19. Comparaison par thermographie des températures de surface d'une pelouse humide et d'une allée minérale à l'ombre et au soleil dans le parc Jourdan à Aix-en-Provence : la pelouse s'échauffe beaucoup moins au soleil et sa plus faible effusivité limite l'effet de stockage thermique (source : Laboratoire ABC, ENSA-Marseille)

■ Échelle du bâtiment

Enfin, l'échelle du bâtiment habité ou pratiqué : ici l'impact ne concernera que les habitants du lieu en offrant des espaces verts suspendus (en terrasses ou en balcons) où pourraient par exemple se développer des jardins potagers. C'est déjà en soi une belle satisfaction. Un exemple est fourni par l'immeuble « 25 Verde » construit à Turin par l'architecte Luciano Pia. À Milan, Stefano Boeri a construit des tours avec des balcons arborés.

En France, il existe les réalisations d'Édouard François. À cette échelle aussi, on peut localiser les cœurs d'îlot qui, une fois végétalisés, se comportent comme des mini-parcs dont l'influence affecte les logements qui s'ouvrent sur eux. Ce principe est utilisé dans le projet de « parc habité » d'Euroméditerranée. De son côté, Jean Nouvel va construire des bâtiments couverts de végétaux avec un cœur d'îlot vert dans le quartier Saint-Just à Marseille (Figure 20).



Figure 20. Projet de logements de Jean Nouvel dans le quartier Saint-Just à Marseille : cœur d'îlot, terrasses et façades abondamment végétalisées³⁴

■ Les problèmes induits

Cette généralisation du végétal à toutes les échelles va poser des problèmes à traiter. L'entretien de ces végétaux en est un : qui en aura la charge ?

Dans cet entretien, le problème principal est la quantité d'eau à investir. Le phénomène d'évapotranspiration ne fonctionne pour le refroidissement que si les végétaux ont de l'eau à évaporer. L'utilisation de végétaux très peu gourmands en eau ne convient pas du tout, car ceux-ci donnent lieu à une faible évapotranspiration : ces végétaux sont seulement résistants au stress hydrique de l'été. Ainsi, des réseaux d'eau devront être installés sur les superstructures pour assurer des arrosages ou des brumisations automatiques.

Partant de l'hypothèse que l'évapotranspiration des arbres et des végétaux peut contribuer à baisser la température au sein des ICU en période estivale, le Grand Lyon a lancé une expérimentation pour disposer de mesures fiables afin de confirmer ce postulat et étudier quelles sont les conditions à réunir pour optimiser cet effet climatique. Cette expérimentation vise à apporter autant de ressources en eau que nécessaires à des arbres en période de forte chaleur doublée de sécheresse, espérant ainsi déclencher le phénomène d'évapotranspiration qui est naturellement stoppé lorsque l'arbre manque d'eau.

Pour améliorer la performance de rafraîchissement des végétaux à l'échelle de la rue, il est possible de faire appel à la brumisation des végétaux sur treille, comme cela a été fait à Séville en 1992. La brumisation des végétaux crée une couche d'air refroidi au-dessus de la tête des piétons sans qu'il y ait de mouillure directe. Dans ce cas, il s'agit plus d'évaporation que d'évapotranspiration.

Ainsi, la végétalisation des villes, à travers le développement, le renforcement et la valorisation des infrastructures vertes et bleues (parcs publics, coulées vertes, etc.) et de leurs services multifonctionnels, serait une réponse aux changements climatiques et permettrait la résilience des espaces urbains en diminuant leur vulnérabilité et en augmentant leurs capacités d'adaptation. De plus en plus d'initiatives émergent dans ce sens, notamment en termes de planification urbaine et de projets d'aménagement. Parallèlement à cette gestion des espaces publics, le tissu urbain est composé d'une part importante d'espaces privés (jardins privés, jardins ouvriers, etc.) dont la végétalisation (selon choix des espèces et aménagement) est fortement influencée par les conditions microclimatiques du lieu. Dans un contexte de changement climatique, les pratiques de jardinage auront tendance à évoluer vers une sélectivité des espèces et une réorganisation de l'espace (plus d'ombrage, espèces acclimatées).

³⁴ <http://projets-architecte-urbanisme.fr/jean-nouvel-logement-zac-saint-just-marseille/>



4. Le cadre réglementaire, de l'échelle européenne à l'échelle locale

De nouveaux outils de programmation, d'aménagement et de planification urbaine émergent pour développer les politiques visant l'atténuation des GES et l'adaptation au changement climatique dans les villes. Les actions publiques mises en œuvre nécessitent un

cadre réglementaire à l'échelle globale et locale pour les rendre applicables et optimiser leur efficacité. Le but est de basculer dans la transition énergétique et de favoriser le développement durable des territoires.

4.1. Les politiques internationales et nationales

Suite aux rapports successifs du GIEC, il a été prouvé et accepté, avec une forte probabilité, que les activités humaines modifient le climat. Ce constat, validé par la communauté internationale, a nourri la volonté, dès 1992 avec la signature de la Convention de Rio, de lutter contre le changement climatique. En 1997, le protocole de Kyoto est venu compléter la Convention, afin de pousser les États à agir selon leurs responsabilités nationales et leurs capacités. La Commission européenne a, dix ans plus tard, publié un livre vert (juin 2007) qui propose des actions communautaires pour favoriser le processus d'adaptation au changement climatique dans toute l'Europe. En particulier, *The 2020 energy and climate package* prévoyait de réduire de 20 % les émissions de GES, de porter à 20 % la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique européenne et de réaliser 20 % d'économies d'énergie (ensemble d'actes appelé « objectif européen des 3 fois 20 »). En 2014, une nouvelle proposition en faveur de la politique énergie-climat à l'horizon 2030 a été proposée.

En France, les programmes d'action publique se sont mis en place au cours des années 2000-2010. L'objectif est de partir d'objectifs globaux pour arriver à des actions de plus en plus locales qui ont des implications

fortes sur l'aménagement du territoire et l'urbanisme. Ce mouvement, de haut en bas, est observable dans l'élaboration des textes. La Mission interministérielle sur l'effet de serre (MIES) a élaboré en 2000 un Programme national de lutte contre le changement climatique (PNLCC). En 2005, la loi de Programmation et d'orientation de la politique énergétique (POPE) a fixé comme objectif la division par 4 des émissions de GES d'ici 2050. Les lois Grenelle, adoptées en 2009 et 2010, ont confirmé et renforcé cet objectif en engageant la France à réaliser l'objectif européen du « 3 fois 20 ». De plus, en 2004, un plan climat national a fixé un plan d'action et déterminé la mise en œuvre des engagements pris dans le cadre du Protocole de Kyoto.

Le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC), démarré en juillet 2011, renforce progressivement l'objectif d'adaptation, qui était jusque-là moins développé que celui d'atténuation, et préconise une approche intégrée de l'adaptation aux autres politiques publiques : ainsi, l'adaptation aux effets du changement climatique devra être prise en compte dans les documents d'urbanisme, mais également dans les choix de financements publics, voire privés « afin d'exclure les projets mal adaptés ».

4.2. Les outils réglementaires régionaux

À l'échelle régionale et sur l'ensemble du pays (en cours de déploiement), les schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE), co-construits par l'État et les régions, contribuent à :

- définir les objectifs régionaux en matière de maîtrise de l'énergie, afin d'atténuer les effets du changement climatique et de diviser par quatre les émissions de GES en France, conformément à l'engagement du pays, entre 1990 et 2050 ;

- fixer les orientations permettant de prévenir ou de réduire la pollution atmosphérique ou d'en atténuer les effets ;
- fixer par zones géographiques les objectifs qualitatifs et quantitatifs à atteindre en matière de valorisation du potentiel énergétique terrestre, renouvelable et de récupération.



À l'échelle locale, la loi de programmation Grenelle I traduit les engagements en matière d'urbanisme et d'aménagement du territoire. Elle instaure les plans climat territoriaux (PCT), devenus plans climat-énergie territoriaux (PCET). Ces plans fixent un cadre juridique pour la mise en place des nouveaux outils par les collectivités territoriales qui ont vocation à être opérationnels à différents échelons du territoire infranational. Ces plans sont notamment devenus obligatoires pour les collectivités de plus de 50 000 habitants dans le cadre de la loi Grenelle II. Selon l'ADEME, plus de 400 collectivités sont soumises à l'obligation légale de mettre un PCET en place. Ce dernier doit permettre aux collectivités territoriales de dégager des pistes d'action en faveur de l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.

De l'observation des différents outils a résulté que, hormis le SRCAE, seul le PCET pouvait porter une mission stratégique locale tournée vers les questions énergie-climat. En particulier, il représentait le seul outil susceptible d'aboutir à une réflexion poussée en matière d'adaptation au changement climatique, englobant la lutte contre les ICU. La loi récente (août 2015), relative à la transition énergétique pour la croissance verte, a renforcé le contenu du PCET en lui ajoutant un volet « qualité de l'air », créant ainsi le plan climat-air-énergie territorial (PCAET), ce qui a permis d'harmoniser ses objectifs avec ceux du SRCAE. De plus, le volet adaptation est légèrement renforcé par rapport à la version antérieure de l'article. Il est précisé que le programme d'actions doit désormais permettre

« d'anticiper les impacts du changement climatique ». La loi a modifié également l'articulation entre le PCAET, le schéma de cohérence territoriale (SCoT) et le plan local d'urbanisme (PLU). En effet, avant la loi sur la transition énergétique de 2015, le SCoT devait prendre en compte le PCET, ce qui faisait de ce dernier un document intermédiaire traduisant les objectifs du SRCAE pour les intégrer dans le SCoT, et par ricochet dans le PLU (le PLU étant en outre tenu au même rapport de prise en compte en l'absence de SCoT). Le SCoT, lui-même, était devenu un document dit « intégrateur », notion issue des lois Grenelle et renforcée par la loi pour l'accès au logement et un urbanisme rénové (ALUR) dans une perspective de « verdissement » des territoires.

Désormais, le PLU « prend en compte, le cas échéant, le PCAET ». Il y a donc un rapport de prise en compte plus direct entre le PLU et le PCAET, le SCoT étant amené à s'effacer dans cette nouvelle articulation. Il est également prévu que lorsqu'un PCAET est approuvé après l'approbation d'un PLU, « ce dernier doit, si nécessaire, être rendu compatible dans un délai de trois ans ».

Le SCoT est désormais juridiquement déconnecté de toute référence aux outils supérieurs de réflexion et de stratégie sur l'énergie et le climat, soit des SRCAE et du PCAET (Figure 21). En revanche, le PLU est doté d'une vocation plus affirmée à la prise en compte directe des dispositions du PCAET.

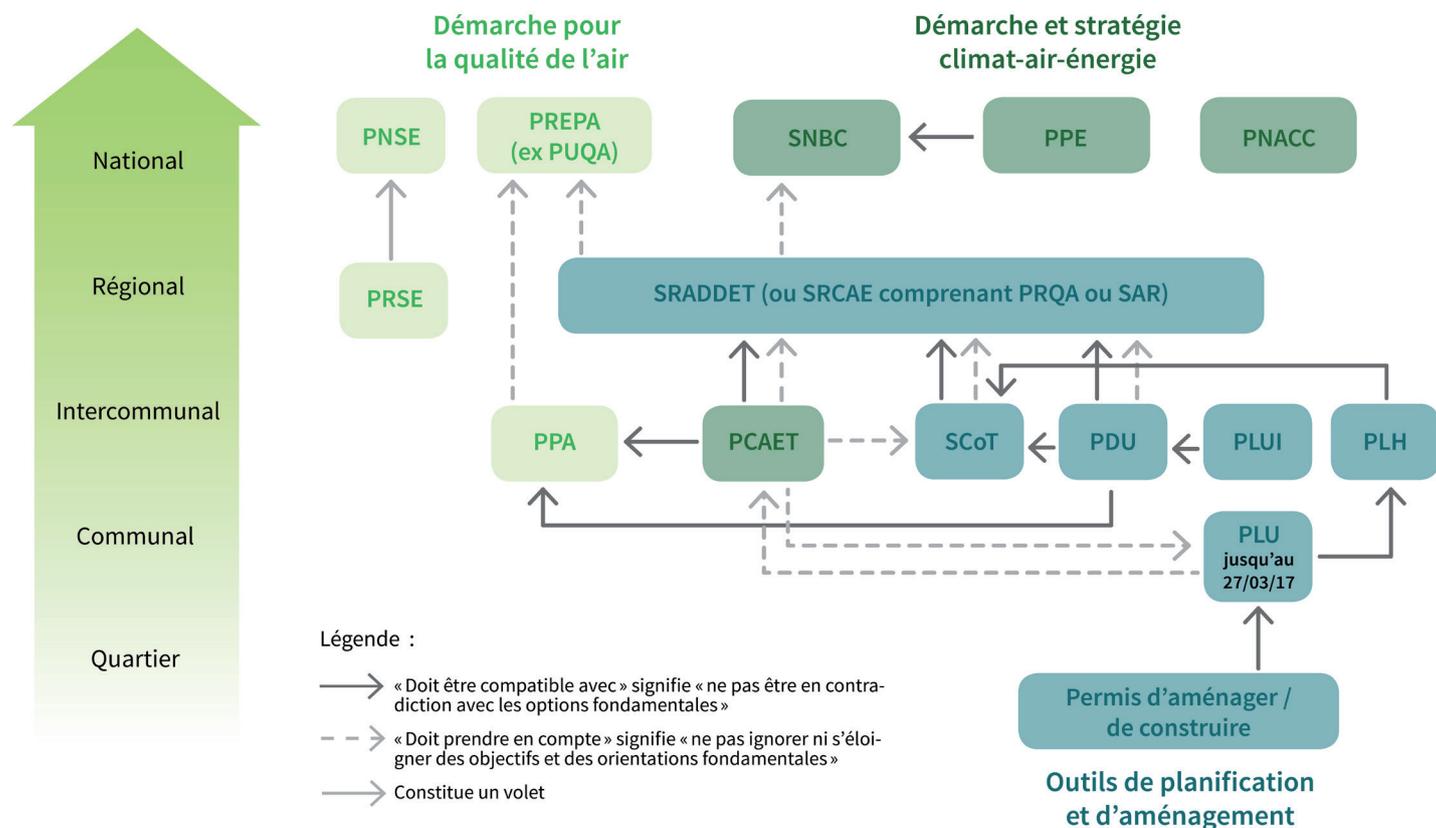


Figure 21. Outils de planification et d'aménagement (source : *Élus, l'essentiel à connaître sur les PCAET*, ADEME/État)

La loi de transition énergétique n'ayant pas modifié les articles relatifs aux missions du SCoT (Figure 22) et du PLU, ces documents ne conservent qu'une faible vocation à traiter de l'adaptation au changement climatique. Sur la question énergie-climat, ils se préoccupent plutôt d'atténuation au changement climatique : performance énergétique et énergies renouvelables, lutte contre l'étalement urbain, transports et déplacements. L'importance du PLU ne doit toutefois pas être minimisée

en matière d'énergie-climat. En effet, les opérations les plus abouties et qui se veulent exemplaires se concrétisent en réalité à l'échelle des quartiers. Les dispositions les plus concrètes et opérationnelles se trouvent ainsi dans les règlements de zones de ZAC, intégrés dans le PLU, mais surtout dans les cahiers des charges de cession de terrains (CCCT), même si, espérons-le, les réalisations vertueuses percoleront dans les mesures plus générales du PLU.

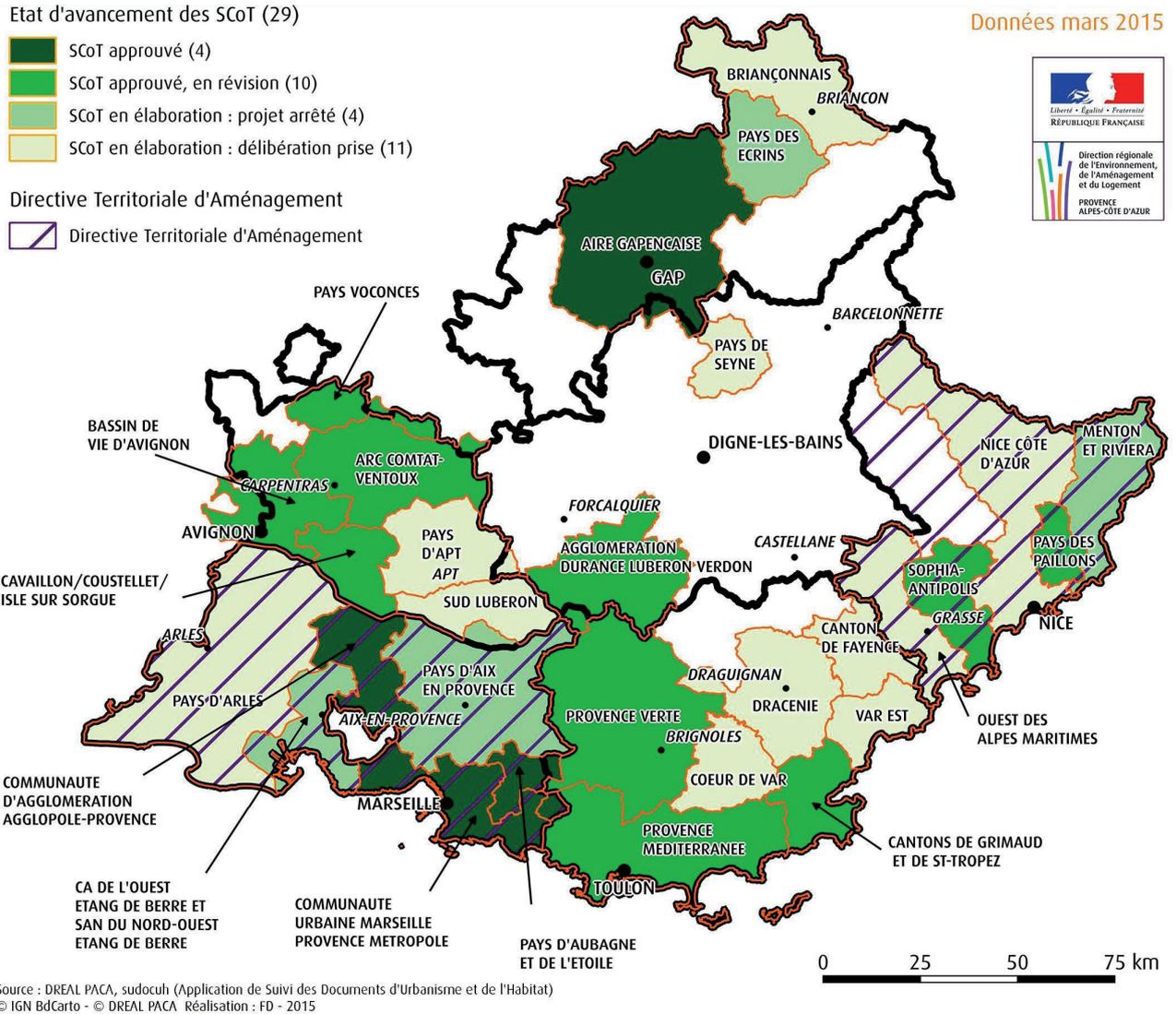


Figure 22. Schémas de cohérence territoriale et directives territoriales d'aménagement (source : DREAL PACA, sudocuh)

Ainsi, à l'échelle du quartier ou de l'opération d'aménagement, l'État a engagé un certain nombre de politiques sectorielles (appels à projet écoquartiers et écocités) qui ont conduit à développer et promouvoir les projets d'urbanisme durable. Une évaluation plus approfondie des mesures, proposées à l'échelle des opérations d'aménagement et de l'agglomération pour prendre en compte l'énergie et les problématiques climatiques, a été notamment incitée.

Un certain nombre de territoires se sont engagés depuis 2010 dans des démarches innovantes visant à prendre en compte ces problématiques nouvelles : les 12 SCoT Grenelle préfigurateurs ont fait l'objet d'un accompagnement particulier par la Direction générale de l'aménagement du logement et de la nature du MEDDE³⁵. Parmi ces territoires, les agglomérations de Lyon, Grenoble et Paris ont particulièrement travaillé sur la cartographie et la prise en compte de l'effet d'ICU dans

³⁵ Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie

les documents d'urbanisme ; l'agglomération tourangelle a mené une réflexion sur l'atteinte du facteur 4 à l'échelle du SCoT, visant à diviser par 4 le volume d'émissions de GES du territoire d'ici 2050 (par rapport à leur niveau de 1990) ; Agen a plus récemment travaillé sur son plan local d'urbanisme et intercommunalité (diagnostic climatique, performances énergétiques renforcées), tout comme Brest Métropole (PLU « facteur 4 », intégrant notamment le PCET).

À l'échelle du quartier, les outils, tels que GES OpAm, les normes et labels (RT 2012, HQE, habitat et environnement, écoquartier) ou les référentiels en urbanisme durable (Montpellier, Grenoble, Nice), ont permis l'émergence d'opérations d'aménagement emblématiques : ZAC de Bonne à Grenoble, ZAC des Hauts de Feuilly à Saint-Priest, ZAC de Beaugard à Rennes, etc.

La question des microclimats et du réchauffement en milieu urbain, dans un contexte d'adaptation au changement climatique, est toujours particulièrement absente des objectifs fixés par le droit national aux documents d'urbanisme, et n'est abordée qu'indirectement (espaces végétalisés, continuité écologique, gestion de l'eau, forme urbaine) et souvent à travers des outils de cadrage sans portée réglementaire. L'analyse des outils juridiques et de leur mise en œuvre, et

du cadre général formel du droit de l'urbanisme, n'est pas facilitée par l'évolution rapide du contexte juridique :

- loi NOTRE (Nouvelle organisation territoriale de la République) du 7 août 2015 ;
- loi de transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015 ;
- ordonnance relative à la partie législative du code de l'urbanisme du 23 septembre 2015 ;
- décret n°2015-1783 du 28 décembre 2015 relatif à la partie réglementaire du livre 1er du code de l'urbanisme et à la modernisation du contenu du PLU ;
- décret n°2016-849 du 28 juin 2016 relatif au PCAET ;
- arrêté relatif au contenu du PCAET du 6 août 2016.

Aujourd'hui, il n'existe pas d'« échelle-miracle » pour traiter les questions énergie-climat. Combiner plusieurs types d'outils incitatifs ou réglementaires, portés ou construits par des acteurs parfois différents, mais dont l'action doit être coordonnée, est probablement la meilleure stratégie à adopter.

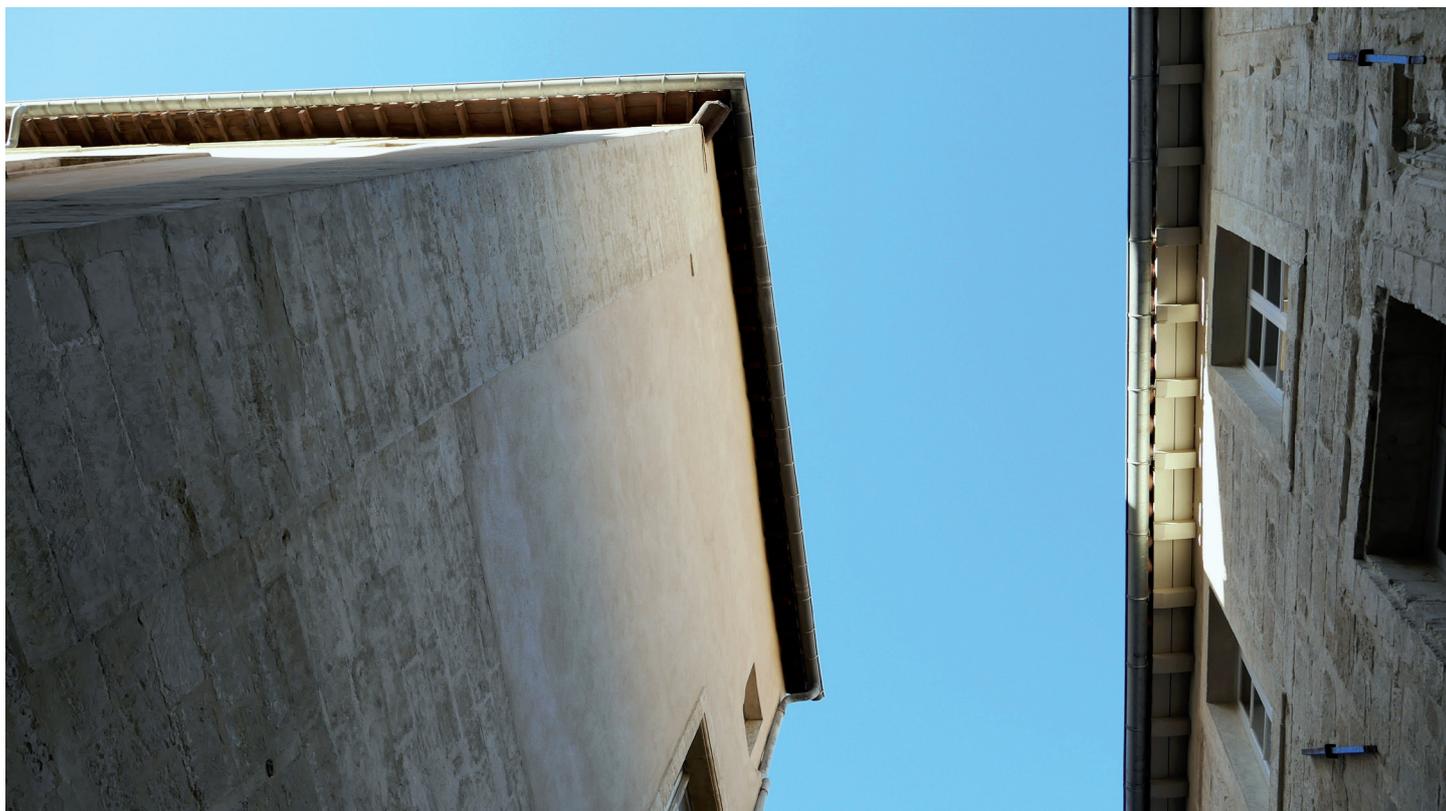


Photo 16. Formes urbaines : les rues étroites réduisent le rayonnement au niveau du sol et sur les façades (illustration)



ZOOM 6

Aménagement des quartiers et des espaces publics

Le lien entre le climat, l'architecture et la ville a toujours été pris en compte dans la conception architecturale et urbaine et ne date pas d'aujourd'hui. Vitruve, architecte du 1^{er} siècle avant J-C, décrivait de manière empirique les relations entre l'aménagement et les conditions climatiques pour construire des bâtiments et des villes salubres.



Photo 17. Place des Pistoles, Marseille : résultat de la destruction d'un îlot insalubre modifiant les conditions microclimatiques environnantes (ensoleillement des façades et des espaces publics, exposition aux vents dominants et présence végétale)

À l'heure où l'on considère que la ville doit se reconstruire sur elle-même grâce à la densification, afin d'éviter l'étalement urbain tant décrié pour ses méfaits environnementaux, la production et la transformation des tissus existants doivent faire l'objet d'une attention particulière. Au-delà des connaissances dont les scientifiques disposent, se pose alors la question de la transcription des effets de l'urbanisation (photo 17) sur le microclimat en outils de conception et de contrôle. Ces outils sont mis à disposition des architectes et des urbanistes en vue de l'adaptation aux changements climatiques et de l'atténuation des effets sur le climat (Figure 23). En 1972, la parution, dans la revue *Options Méditerranéennes* d'un article sur l'adaptation de l'architecture et de l'urbanisme au milieu méditerranéen, témoigne du souci déjà présent de fournir aux acteurs de l'aménagement des outils de conception adaptés.

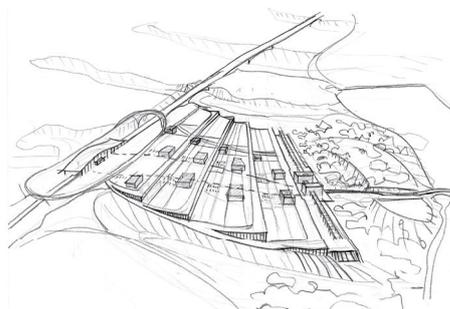
Parmi les options, une baisse des consommations d'énergie liées à l'habitat peut être envisagée par des mesures prises à plusieurs échelles d'intervention : aménagement, techniques de construction, dispositifs de production d'énergies renouvelables ou encore adoption de nouveaux comportements individuels.

La prise en compte des spécificités locales de l'habitat (types de bâti, morphologies urbaines, etc.), des modes d'habiter et du climat méditerranéen est une démarche essentielle pour atteindre ces objectifs.

L'impact de l'application des règlements d'urbanisme sur le microclimat peut être mieux contrôlé grâce à l'intégration de cette dimension environnementale. Par exemple, la réglementation des PLU doit renforcer les mesures de protection et de mise en valeur du patrimoine bâti qui portent sur la réalisation d'économies d'énergie et la mise en place de dispositifs de production d'énergies renouvelables. L'un des enjeux est alors de savoir concilier les organisations et formes urbaines et paysagères (infrastructures vertes, densification du bâti, morphologies urbaines...) avec les dispositifs constructifs ou de productions d'énergie (éolien, photovoltaïque, solaire, géothermie, etc.) compatibles avec la réalisation ou la préservation d'habitations, d'espaces publics et de paysages de qualité. En ce sens, les écoquartiers actuels ne peuvent se concevoir sans prendre en considération les interdépendances avec la ville. Les limites de la connaissance sur ces interdépendances (forme urbaine, qualité des surfaces, activités) et leur impact sur l'environnement et l'énergie conduisent à proposer des orientations plutôt que des solutions, recommandations ou règles. La poursuite de la recherche s'avère nécessaire sur la base de données quantitatives susceptibles d'améliorer les connaissances, de réaliser des diagnostics plus exhaustifs et d'affiner les outils de conception.



Figure 23. Une zone d'étude et son environnement : maquette 2D1/2 produite par QGIS2threejs [source : projet ATRE - project[s]. Fonds : BdTopo ©IGN, Ortho13 - CRIGE-PACA 2009]





Conclusion

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur se caractérise par une forte croissance urbaine et démographique, en particulier sur le littoral (phénomène de littoralisation). Les principaux axes de transport, orientés ouest-est, situés sur une frange littorale large d'à peine quelques kilomètres, renforcent cette tendance. Les préoccupations liées au changement climatique, aux variations du climat et à la multiplication des événements extrêmes concernent directement l'espace urbain qui concentre les principaux enjeux en matière d'atténuation et d'adaptation.

Nous disposons aujourd'hui d'une bonne compréhension des paramètres qui conditionnent le climat en milieu urbain (îlot de chaleur urbain, par exemple), mais nous manquons de mesures notamment à l'échelle locale. Les expériences présentées dans ce cahier thématique restent relativement isolées. Il est nécessaire de développer les mesures intra-urbaines pour comprendre la dynamique du climat en fonction de la structure urbaine. L'objectif est de trouver des solutions en matière de construction et d'urbanisme qui permettent d'atténuer les effets du changement climatique et de favoriser une meilleure qualité environnementale en ville.

En Provence-Alpes-Côte d'Azur, les secteurs de l'industrie et des transports sont les principaux contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre. Ces contributions sont néanmoins très localisées dans les aires urbaines et dans les couloirs de transports (couloir rhodanien et littoral). L'utilisation des énergies fossiles (dont le charbon) reste encore majoritaire, malgré le potentiel régional des énergies renouvelables. La concentration des transports industriels ou domestiques sur quelques zones focales a aussi un caractère aggravant. Il est alors important de mettre l'accent sur la mixité fonctionnelle des villes, de privilégier les transports doux et de consommer des produits issus des filières courtes. L'ensemble de ces pratiques limite ainsi la génération de déchets et réduit l'empreinte carbone.

En PACA, l'accentuation des événements extrêmes en lien avec le changement climatique pourrait favoriser les inondations torrentielles, les phénomènes de submersion causés par l'élévation du niveau de la mer, les glissements de terrain, les canicules... Les impacts sont aussi mesurables, mais moins maîtrisés, dans le domaine de la santé. La biodiversité se dégrade, même si nous ne connaissons pas encore les conséquences, en particulier pour les espèces qui prolifèrent. La concentration de la population sur la bande littorale multiplie également les facteurs de risque et peut accentuer les inégalités spatiales et sociales.

L'enjeu urbain face au changement climatique génère une série de questionnements et de débats (densification des espaces urbains, usage de la végétalisation, fragmentation, mixité, etc.) qui ne sont pas encore aboutis. La place de la nature en ville est également au

cœur du débat : maîtrise de la biodiversité, infrastructures vertes ou bleues, gestion du végétal, etc. Les bienfaits du végétal en ville sont mieux identifiés. Il commence à être utilisé dans la construction de nouveaux ensembles (les écoquartiers par exemple) ou de nouveaux bâtiments. Le but est de maîtriser notamment les îlots de chaleur. La reconversion des centres anciens et la construction d'un modèle urbain tendant vers une « transition urbaine durable » s'imposent.

De nombreux organismes régionaux et laboratoires de recherche participent à cette réflexion générale dans le cadre d'un dispositif législatif très complet et complexe. Ces collaborations entre chercheurs et collectivités doivent permettre de trouver rapidement des solutions viables pour l'atténuation et l'adaptation dans notre région.



Photo 18. La biodiversité doit se frayer un chemin dans les centres urbains historiques (illustration)

Pour aller plus loin

Ce cahier thématique sur les interactions et les enjeux entre climat et ville en Provence-Alpes-Côte d'Azur est destiné aux décideurs et gestionnaires de territoires (élus, ingénieurs et techniciens des collectivités locales, des espaces protégés, des grands équipements, etc.). Il constitue une première approche pour mieux appréhender les relations entre ville et climat en région PACA.

Nous encourageons vivement les lecteurs, désireux d'en savoir davantage, à se rapprocher du GREC-PACA (contacts@air-climat.org) ou du réseau MC3 (mc3.lped.fr) qui les orientera dans leurs démarches et recherches. Ils ont également la possibilité de s'adresser directement aux contributeurs de cette publication :

- **Jacques AUTRAN** (§1.3, Zoom 6), architecte, ingénieur de recherche ENSA-Marseille, unité de recherche project[s]. Contact : jacques.autran@marseille.archi.fr
- **Mohamed BELMAAZIZ** (§1.3, Zoom 6), architecte, docteur en sciences pour l'ingénieur, enseignant à l'ENSA-Marseille, unité de recherche project[s]. Contact : mohamed.belmaaziz@marseille.archi.fr
- **Yves BIDET** (§1.1), ingénieur, chef de la division Études et Climatologie de Météo-France Sud-Est, Aix-en-Provence. Contact : yves.bidet@meteo.fr
- **Élodie BRICHE** (§1.1, §1.2, Zoom 3), docteur en dynamique des milieux et risques, LPED-MC3. Contact : elodie.briche@univ-amu.fr
- **Cécilia CLAEYS** (Zoom 4), maître de conférences en sociologie, LPED, Aix-Marseille Université. Contact : cecilia.claeys@univ-amu.fr
- **Laura COLLANGE** (coordination générale), urbaniste, LPED, Aix-Marseille Université. Contact : laura.collange@univ-amu.fr
- **Magali DESCHAMPS-COTTIN** (§3.1), maître de conférences en écologie, LPED, Aix-Marseille Université. Contact : magali.deschamps-cottin@univ-amu.fr
- **Julia HIDALGO** (Zoom 1, §4.1, §4.2), chargée de recherche, LISST, CNRS/Université Toulouse Jean Jaurès. Contact : julia.hidalgo@univ-tlse2.fr
- **Jean-Louis IZARD** (§3.2), architecte, EnviroBAT-BDM, ancien professeur de l'ENSA-Marseille et ancien directeur du Laboratoire ABC. Contact : izard.jean-louis@orange.fr
- **Marie-Laure LAMBERT** (§4.1, §4.2), maître de conférences en droit, LIEU, Aix-Marseille Université. Contact : ml.lambert@univ-amu.fr
- **Marine LE LOUARN** (Zoom 5), doctorante en écologie, LPED, Aix-Marseille Université. Contact : lelouarn.marine@gmail.com

- **Nicolas MARTIN** (§1.2), maître de conférences, directeur du Master CRES (Climat, Risques, Environnement, Santé), Université de Nice Sophia-Antipolis. Contact : nicolas.martin@unice.fr
- **Hubert MAZUREK** (avant-propos, §2.1, §2.2, §2.3, conclusion), directeur de recherche, directeur du LPED et responsable du réseau MC3, Aix-Marseille Université. Contact : hubert.mazurek@univ-amu.fr
- **Valérie MONTES** (§3.1), maître de conférences en écologie, LPED, Aix-Marseille Université. Contact : valerie.montes@univ-amu.fr
- **Matthieu MOYNET** (§1.3), ingénieur référent Énergie-Climat, Air PACA. Contact : matthieu.moynet@airpaca.org
- **Christine ROBLES** (§3.1), maître de conférences en écologie, LPED, Aix-Marseille Université. Contact : christine.robles@univ-amu.fr
- **Mathias ROCHAT** (Zoom 3), stagiaire, LPED, Aix-Marseille Université.
- **Philippe ROSSELLO** (ligne éditoriale), ingénieur en analyse spatiale et prospective, GeographR/pôle métier Climat & Air du CRIGE-PACA. Contact : geographr@numericable.fr
- **Frédéric SIMARD** (Zoom 4), entomologiste médical, IRD, directeur de l'UMR IRD/CNRS/Université de Montpellier, MIVEGEC. Contact : frederic.simard@ird.fr
- **Guilhem THOMASSET** (Zoom 1), stagiaire, LISST (spécialité éco-ingénierie), CNRS/Université Toulouse Jean Jaurès.
- **Xavier VILLETARD** (§1.3, Zoom 2), directeur opérationnel, Air PACA. Contact : xavier.villetard@airpaca.org

Comment citer cette publication du GREC-PACA ?

Climat et ville : interactions et enjeux en Provence-Alpes-Côte d'Azur, Les cahiers du GREC-PACA édités par l'Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR), juin 2017, 44 pages. ISBN : 9782956006039

Pour obtenir la liste des références bibliographiques sur lesquelles s'appuie cette synthèse des connaissances, prenez contact avec le GREC-PACA : contacts@air-climat.org





L'association pour l'innovation et la recherche au service du climat, A.I.R. Climat, entend contribuer à la prise de conscience des enjeux du changement climatique, mais aussi aider à la recherche de solutions innovantes. Il s'agit d'intégrer le plus tôt possible l'énergie et le climat dans nos modes de vie et dans la façon de concevoir nos métiers et nos politiques.

contacts@air-climat.org - www.air-climat.org

ISBN 978-2-9560060-3-9



9 782956 006039