

Profil climatique de la commune du Pradet



Rapport final

Novembre 2018

Mots clés

Le Pradet, Toulon-Provence-Méditerranée, climat, changement climatique, températures de l'air, précipitations, projections climatiques, Euro-Cordex, deltas, anomalies, interpolation spatiale, géostatistique, adaptation au changement climatique, vulnérabilité

Glossaire

ALADIN	Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
Cordex	Coordinated Regional Downscaling Experiment : programme international coordonnant la production de projections climatiques régionales sur l'ensemble des régions continentales du globe
Euro-Cordex	Branche européenne du projet international Cordex
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
INRA	Institut national de la recherche agronomique
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
LISDQS	Logiciel d'interpolation statistique de données quantitatives et spatiales
MNT	Modèle numérique de terrain
PACA	Provence-Alpes-Côte d'Azur
RCP	Representative Concentration Pathways
RR	Précipitations
SAFRAN	Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige
SIG	Système d'information géographique
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
STD	Écart-type
ThéMA	Théoriser et modéliser pour aménager
Tmin, Tn	Température minimale de l'air
Tmax, Tx	Température maximale de l'air
Tmoy	Température moyenne de l'air
TPM	Toulon-Provence-Méditerranée
TT	Température de l'air
WRF	Weather Research and Forecasting

Sommaire

Mots clés	2
Glossaire.....	2
Avant-propos.....	6
1. L'évolution du climat à l'échelle locale.....	8
1.1. Indicateurs locaux climatiques mesurés	8
1.1.1. Indicateurs locaux mesurés du climat présent.....	8
1.1.2. Évolution du climat à l'échelle régionale ces dernières décennies	12
1.2. Indicateurs locaux modélisés du climat présent et futur.....	13
1.2.1. Méthodologie générale pour extraire les indicateurs modélisés du climat présent et futur ...	13
1.2.2. La sélection des projections climatiques pour produire les indicateurs modélisés locaux et spatialisés	18
1.2.3. Liste des indicateurs modélisés locaux et spatialisés mis à disposition.....	20
1.2.4. Résultats des indicateurs modélisés locaux	22
1.2.5. Résultats des indicateurs modélisés spatialisés.....	30
1.2.6. Tendances climatiques futures à l'échelle régionale et élévation du niveau de la mer.....	44
2. Caractérisation de l'aménagement du territoire et des infrastructures	49
2.1. Situation de la commune du Pradet	49
2.2. Le contexte en matière d'aménagement	49
2.3. Caractérisation et évolution des zones urbaines	55
2.3.1. Occupation du sol	55
2.3.2. Démographie.....	58
2.3.3. Habitat.....	60
2.4. Réseaux humides	62
2.4.1. Adduction eau potable	62
2.4.2. Assainissement.....	63
2.4.3. Pluvial	63
2.4.4. Irrigation	64
2.5. Mobilités.....	65
2.5.1. Voies et stationnements.....	65
2.5.2. Transports urbains.....	66
2.5.3. Modes doux et alternatifs.....	66
2.5.4. Mobilité électrique	67
2.6. Énergies	67

2.6.1. Consommation d'énergies	67
2.6.2. Production d'énergies	68
2.6.3. Réseaux et distributions	69
2.7. Déchets	69
2.7.1. La collecte.....	69
2.7.2. La prévention	70
2.7.3. La valorisation	70
3. Les épisodes de canicules et les îlots de chaleur	70
3.1. Explication du phénomène d'îlot de chaleur urbain.....	71
3.1.1. Définitions.....	71
3.1.2. Explication générale de l'ICU.....	72
3.1.1. Différents niveaux d'observation de l'ICU.....	73
3.1.2. Les facteurs aggravant d'un ICU	74
3.1.1. Le Pradet : territoire de fraîcheur dans la métropole de Toulon ?.....	80
3.2. Tendances passées, présentes et futures du phénomène	81
3.2.1. Il fait de plus en plus chaud	81
3.2.2. Caractérisation de l'ICU actuel.....	82
3.2.3. Télédétection : température de surface	84
3.2.1. Réalisation d'un transect sur une journée	86
3.2.1. Impacts identifiés des canicules et du phénomène d'ICU dans un contexte de changement climatique.....	89
3.2.1. Quelles capacités d'adaptation actuelle et future de la ville du Pradet ?	90
4. Le système hydraulique, les risques hydrogéologiques et les risques littoraux	91
4.1. Un territoire déjà soumis aux risques hydrogéologiques et littoraux	92
4.1.1. Un territoire fortement concerné par les inondations et coulées de boue	92
4.1.1. Sécheresses et ressources en eau : un territoire naturellement pauvre en eau, mais sécurisé par le système Durance-Verdon.....	94
4.2. Les tendances hydroclimatiques futures et leurs impacts	95
4.2.1. Projections.....	95
4.2.2. Des aléas climatiques aux impacts potentiels	99
4.3. Analyse des impacts : les facteurs aggravants et les facteurs de résilience	101
4.3.1. Méthode d'analyse	101
4.3.2. Les impacts liés aux pluies et aux inondations	102
4.3.3. Impacts liés aux sécheresses, aux ressources en eau et aux usages	105
4.3.4. Les impacts sur le littoral : tempêtes, submersion et érosion.....	112
5. Hiérarchisation des impacts et pistes d'adaptation.....	Erreur ! Signet non défini.
5.1. Méthodologie.....	Erreur ! Signet non défini.
5.2. Résultats de la hiérarchisation des impacts	Erreur ! Signet non défini.

5.3. Quelles solutions pour l'adaptation au changement climatique ?....	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion générale	114
Bibliographie	116

Avant-propos

Dans le cadre du projet européen ADAPT, le Conseil départemental du Var élabore un document d'analyse sur la variabilité climatique d'un système urbain présélectionné, en l'occurrence le système urbain de la commune du Pradet rattachée à la métropole Toulon-Provence-Méditerranée. L'objectif est d'évaluer les risques et la vulnérabilité du territoire face au changement climatique.

Devant l'ampleur du changement climatique de l'échelle globale à locale, les acteurs territoriaux ont besoin d'évaluer le degré de vulnérabilité de leur zone d'intérêt et les principaux impacts susceptibles d'affecter ses principales composantes structurantes. Afin d'alimenter la réflexion, préparer les plans d'actions locaux et le plan d'actions commun d'adaptation au changement climatique, le profil climatique du Pradet a été commandé pour analyser le climat local, les tendances climatiques futures à différents horizons selon les scénarios socioéconomiques, le contexte urbain (aménagement, infrastructures...), le système hydraulique, les risques hydrogéologiques, la vulnérabilité du territoire, les risques et les facteurs de résilience... La volonté est d'enrichir les connaissances locales, et d'apporter des éléments de compréhension et des premières pistes d'adaptation au changement climatique pour mener une politique de développement responsable et durable.

Cette étude fournit ainsi des indicateurs climatiques locaux et spatialisés à l'échelle métropolitaine, et fait un état général des connaissances territoriales et des risques associés en vue d'accompagner les bénéficiaires dans la préparation de leurs futures actions d'adaptation et d'atténuation des gaz à effet de serre. La volonté est d'anticiper les bouleversements pour protéger les populations, préserver l'intégralité du patrimoine naturel, agricole et urbain. Dans une approche systématique, il s'avère nécessaire de mesurer les risques (sécheresse, canicule, inondation, érosion des côtes, ressource en eau, glissement de terrain...) pour en atténuer les effets indésirables à court, moyen et long terme.

De par ses caractéristiques physiques et environnementales, sa position géographique, son caractère urbain, forestier et marin, son économie locale, mais aussi les imbrications d'échelles et le changement global, la commune du Pradet est particulièrement exposée aux effets directs et indirects de l'évolution rapide du climat, comme tous les territoires du bassin méditerranéen.



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Plage de La Garonne, ©Mairie du Pradet

1. L'évolution du climat à l'échelle locale

Face au défi du changement climatique, la commune du Pradet a exprimé le besoin d'affiner les connaissances relatives au climat local présent et futur. Pour limiter les risques sur le territoire communal et apporter des réponses spécifiques, des indicateurs locaux et spatialisés sont proposés pour anticiper le climat d'aujourd'hui et de demain. Les premiers permettent de connaître le contexte climatique à l'échelle locale et les seconds à l'échelle métropolitaine.

1.1. Indicateurs locaux climatiques mesurés

Situé sur le littoral varois, Le Pradet est un territoire communal qui bénéficie d'un climat typiquement méditerranéen, avec des hivers relativement doux, une période estivale caractérisée par de faibles pluies et des températures de l'air élevées, un fort apport radiatif solaire saisonnier et annuel. Ces caractères généraux ne doivent pas masqués la variabilité interannuelle très marquée du climat méditerranéen, les extrêmes climatiques, comme les précipitations intenses, la sécheresse... La proximité immédiate de la mer a aussi une influence importante car elle tempère les températures froides en hiver et chaudes en été, et apporte une certaine humidité dont ne bénéficient pas les territoires de l'arrière-pays varois par exemple. La mer méditerranée joue ainsi un rôle majeur, notamment lors des épisodes de pluies de type « cévenol » en automne durant lesquels les conditions sont réunies (circulation atmosphérique dynamique avec fronts froids en altitude, température de la mer encore tiède pour la saison, cyclogénèse avec advection d'air chaud et humide dans les basses couches de l'atmosphère...) pour provoquer d'intenses précipitations susceptibles de générer des inondations parfois dramatiques. Il faut noter que la température de surface de la mer Méditerranée descend à 12°C minimum en hiver et grimpe plus à 25°C au cœur de l'été, ce qui explique son rôle majeur (amplitude thermique limitée en hiver et en été, humidité, contraste de la température entre les surfaces maritimes et terrestres à l'origine des brises thermiques quotidiennes, etc.). Le vent est également une variable météorologique et climatique importante à considérer. En effet, les brises marines balaien l'atmosphère de la commune, mais aussi des vents d'est ou ouest selon les conditions et flux atmosphériques.

1.1.1. Indicateurs locaux mesurés du climat présent

Pour définir les principales caractéristiques du climat actuel de la commune du Pradet, les données extraites de la publithèque de Météo-France ont été exploitées. Aucune station météo n'est implantée sur le territoire communal, mais trois stations donnent des indications locales sur le climat : Toulon¹, Hyères² et Hyères-plage³. Ces trois stations sont situées dans des contextes physico-environnementaux différents : la première est au cœur de l'espace métropolitain Toulon-Provence-Méditerranée, mais à proximité de la mer (pointe de Pipady), à environ 7,5 km du Pradet, la seconde est installée sur la base aéronautique navale d'Hyères-le-Palyvestre et la troisième au sud-est de la ville d'Hyères en périphérie de la zone urbaine, toutes deux situées à une dizaine de kilomètres de la zone d'intérêt. Comme le contexte urbain de la commune du Pradet est mixte (urbanisation en marge de la métropole, proximité de la mer, présence d'espaces verts et agricoles ...), ces trois stations météo sont relativement représentatives.

Les indicateurs climatiques suivants se concentrent sur les **températures minimales moyennes** sur la période de référence 1981-2010 (Tableau 1), pour Toulon et Hyères, soit une normale de 30 ans, et sur

¹ ID : 83137001, altitude : 23 mètres

² ID : 83069001, altitude : 2 mètres

³ ID : 83069016, altitude : 9 mètres

la période 1997-2009, à Hyères-plage, ce qui représente un historique insuffisant, mais qui a été analysé à titre indicatif (données en italique) :

Station/période	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	H	P	E	A	An
Toulon	6,2	6,3	8,2	10,1	13,6	17	19,7	19,8	16,9	14,1	9,8	7,2	6,6	10,6	18,8	13,6	12,4
Hyères	4,4	4,3	6,3	8,4	11,9	15,3	17,8	17,8	15,2	12,5	8,4	5,5	4,5	8,9	17,0	12,0	10,7
<i>Hyères-plage</i>	<i>3,6</i>	<i>3,5</i>	<i>5,6</i>	<i>8,1</i>	<i>12,2</i>	<i>15,1</i>	<i>17,1</i>	<i>17,3</i>	<i>14,3</i>	<i>11,8</i>	<i>7,2</i>	<i>4,4</i>	<i>3,8</i>	<i>8,6</i>	<i>16,5</i>	<i>11,1</i>	<i>10,1</i>

H : hiver (décembre-février) P : printemps (mars-mai) E : été (juin-août) A : automne (septembre-novembre) An : an

Tableau 1. Températures minimales moyennes de l'air en °C

Les trois stations météo présentent des valeurs moyennes de températures minimales relativement distinctes. La température moyenne annuelle à Hyères-plage est inférieure de 2,3°C sur l'année par rapport à Toulon, et l'écart entre les deux points de mesures atteint 2,8°C en novembre, ce qui est très significatif. La position des stations explique ces différences : à Toulon, l'effet de fond de l'îlot de chaleur urbain⁴ (se référer au chapitre dédié) est plus manifeste la nuit qu'à Hyères ou Hyères-plage où le refroidissement est plus intense la nuit. L'influence directe de la mer, même si la brise de terre prend régulièrement le dessus pendant la nuit, joue aussi certainement un rôle important : la station de Toulon est distante de la mer d'environ 100 m, celle d'Hyères d'environ 1,5 km et d'Hyères-plage d'environ 2,2 km. Les distances ne sont pas précises car Météo-France ne dévoile pas les localisations exactes de ses postes météo. De manière schématique, plus la distance à la mer est grande, plus la température minimale a tendance à baisser, car les surfaces maritimes se refroidissent moins vite que les surfaces terrestres, ce qui se traduit également par une amplitude thermique plus faible en bord de mer. Ces mécanismes s'illustrent également sur la commune du Pradet qui présente une zone côtière et un recul territorial qui s'étend jusqu'à près de 2,5 km à l'intérieur des terres. L'absence de station météo sur la commune du Pradet ne permet pas de définir avec précision le climat local, mais l'ordre de grandeur peut être établi en fonction de la distance à la mer. Pour rappel, les mesures de Météo-France sont standardisées et situées hors contexte strictement urbain, puisqu'une série de contraintes est respectée (capteurs installés sur un sol enherbé, distance minimale aux bâtiments les plus proches...). Vu l'historique récent et la tendance climatique actuelle, les températures d'Hyères-plage devrait être légèrement plus faibles, puisque les années entre 1981 et 1996 sont globalement plus fraîches qu'entre 1997 et 2009.

Le gel est rare à Toulon, avec à peine 1,9 jour par an principalement en janvier et février quand la température de l'eau de la mer Méditerranée est la plus froide. À Hyères, le gel est plus marqué avec 9,7 jours par an et atteint même 20,9 jours à Hyères-plage. La distance à la mer et le contexte urbain en sont la cause. Le contraste est donc saisissant entre les postes de mesures. Les températures inférieures à -5°C (historique de données toutes périodes confondues) restent exceptionnelles au niveau des trois postes. Les records de froid atteignent -9°C (1956) à Toulon et -11°C à Hyères (1985). Globalement, les records de froid mensuels sont majoritairement antérieurs à 1990. Pour Hyères-plage, vu l'historique des données, le record est plus récent (-7,3°C à Hyères-plage en 2005), mais ne doit pas être retenu comme une valeur référence.

Parmi les faits remarquables, il faut noter la température minimale moyenne en juillet et août à Toulon flirte avec les 20°C, température considérée comme « tropicale ». Cette variable est donc très sensible dans le contexte de changement climatique auquel la région est confrontée. Ces 50 dernières années, les nuits tropicales ont tendance à se multiplier sur la Côte d'Azur : à Nice, par exemple, elles ont quadruplé : dans les années 60, on comptait environ 15 nuits tropicales en moyenne par an contre 60

⁴ Concentration des activités humaines (transport, chauffage, usines...) et surfaces artificialisées absorbant plus de calories solaires (énergie restituée sous forme de rayonnement infrarouge qui réchauffe l'air la nuit) que les surfaces végétalisées...

aujourd’hui. En 2003, année de forte canicule, Nice a subi près de 80 nuits tropicales. La situation est similaire au niveau du Pradet et de la métropole Toulon-Provence-Méditerranée avec un accroissement marqué des nuits tropicales.

De manière générale, malgré les disparités et les extrêmes froids, la douceur méditerranéenne caractérise la température minimale moyenne des trois postes.

Pour les **températures maximales moyennes**, la situation est un peu plus complexe (Tableau 2). En se référant aux stations météo de Toulon et Hyères sur la période de référence 1981-2010, on constate que les températures maximales sont plus élevées à Toulon, excepté les mois de novembre à février durant lesquels les températures maximales des deux postes sont proches. Durant le printemps, l’été et le début de l’automne, les effets de l’îlot de chaleur modérés à fort de la métropole Toulon-Provence-Méditerranée sont probablement les plus significatifs, car au niveau du poste de Toulon situé à proximité de la mer, les températures sont plus élevées qu’à Hyères. Les zones urbaines doivent s’échauffer dans la journée dès le printemps et jusqu’en octobre, et ce malgré des phénomènes locaux comme les brises de mer par exemple qui pénètrent dans l’espace urbain selon leur intensité et la rugosité des surfaces bâties. En fin d’automne et en hiver, l’îlot de chaleur joue moins son rôle, dans la mesure où les surfaces urbaines et minérales s’échauffent faiblement. Durant cette période, la fraîcheur de la mer ne contribue pas à réchauffer l’atmosphère en cours de journée. Ces premières hypothèses cachent la complexité des mécanismes climatiques locaux avec l’influence des vents dominants, de la végétation (évapotranspiration par exemple), des microclimats, des vents ascendants et descendants liés au relief qui ceinture au nord la zone géographique... Pour mieux comprendre les processus locaux, il serait utile de déployer un système de mesures en zones urbaines et périurbaines, mais aussi en périphérie de la métropole afin de connaître les gradients de températures en fonction des paramètres physico-environnementaux (type de bâti, largeur des axes routiers, type de revêtement, distance des espaces verts et forestiers, rugosité, pente, distance à la mer, altitude, etc.).

Station/période	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	H	P	E	A	An
Toulon	12,9	13,5	16	18,3	22,3	26,4	29,6	29,7	25,9	21,3	16,4	13,5	13,3	18,9	28,6	21,2	20,5
Hyères	13,1	13,4	15,5	17,4	21,3	25,1	28,2	28,4	25,0	21,0	16,6	13,9	13,5	18,1	27,2	20,9	19,9
Hyères-plage	14,1	15	17,2	19,6	24,0	28,3	30,4	30,6	26,5	22,3	17,6	14,6	14,6	20,3	29,8	22,1	21,7

H : hiver (décembre-février) P : printemps (mars-mai) E : été (juin-août) A : automne (septembre-novembre) An : an

Tableau 2. Températures maximales moyennes de l’air en °C

Les mois de juillet et août sont particulièrement chauds malgré la proximité de la mer, avec des températures moyennes proches de 30°C, ce qui signifie que les valeurs maximales sont susceptibles de dépasser ce seuil avec un risque de canicule, même si la proximité de la mer modère ce dernier. À Toulon, on dénombre environ 15 jours par mois durant lesquels la température maximale dépasse 30°C, à Hyères seulement 7 jours, ce qui confirme la probable influence urbaine de Toulon et plus largement de la métropole (structure et albédo du tissu urbain dense, et présence de végétation limitée). Sur un espace plus ouvert comme à Hyères en marge de la ville, la mer, les flux venteux et la végétation des parcelles agricoles contribuent à modérer les températures excessives. Au niveau des trois postes, en juillet et août, la température maximale dépasse quasiment tous les jours les 25°C. En été, les records de chaleur dépassent les 35°C et même les 40°C à Toulon, 36°C et 42°C à Hyères, 38°C en juillet et août à Hyères-plage. À Hyères, les records de chaleur, 8 mois sur 12 sont post-2006, alors que l’historique de données étudié débute en 1959.

Pour information, les **températures moyennes** (Tableau 3) sont les suivantes :

Station/période	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	H	P	E	A	An
Toulon	9,6	9,9	12,1	14,2	18,0	21,7	24,7	24,7	21,4	17,7	13,1	10,3	9,9	14,8	23,7	17,4	16,5
Hyères	8,7	8,9	10,9	12,9	16,6	20,2	23,0	23,1	20,1	16,8	12,5	9,7	9,1	13,5	22,1	16,5	15,3
Hyères-plage	8,8	9,3	11,4	13,8	18,1	21,7	23,8	23,9	20,4	17,1	12,4	9,5	9,2	14,4	23,1	16,6	15,9

H : hiver (décembre-février) P : printemps (mars-mai) E : été (juin-août) A : automne (septembre-novembre) An : an

Tableau 3. Températures moyennes de l'air en °C

Toulon reste la station la plus chaude quelle que soit la période considérée. Même s'il faut être vigilant dans les comparaisons, compte tenu de l'historique d'Hyères-plage, les écarts entre les deux postes de la commune sont très probablement expliqués par la distance à la mer (lire commentaires sur les températures minimales et maximales).

Du côté des **précipitations**, les cumuls annuels oscillent entre 616 mm à Toulon et environ 650 mm à Hyères et Hyères-plage (Tableau 4). Sur l'est de la métropole Toulon-Provence-Méditerranée, les cumuls de précipitations moyens sont plus élevés, ce qui est confirmé par les cartes des précipitations au pas mensuel, saisonnier et annuel (se reporter au chapitre consacré à la production de cartes du climat présent et futur à haute résolution spatiale). La fréquence moins élevée du Mistral et l'humidité provenant de l'est expliquent partiellement ce gradient ouest-est. Les pluies sont irrégulières tout au long de l'année : les étés sont très secs (moins de 6 mm à Toulon en juillet), avec des périodes de sécheresse marquées (en moyenne, moins de 2 jours de pluie en juillet et août) et les mois d'octobre humides avec des cumuls moyens supérieurs à 100 mm. Les mois de novembre, décembre, janvier et avril sont également des mois relativement humides.

Station/période	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	H	P	E	A	An
Toulon	70,6	47,6	36,6	61,5	38,7	25,1	5,6	21,7	63,6	103,2	74,4	67,5	61,9	45,6	17,5	80,4	616,1
Hyères	79,1	52,6	40,7	60,4	40,6	35,8	7,5	19,3	55,4	105,4	81,3	73,9	68,5	47,2	20,9	80,7	652,0
Hyères-plage	70,7	31,1	34,0	59,0	59,5	22,8	10,6	13,5	70,0	100,8	96,4	80,7	60,9	50,8	15,6	89,1	649,1

H : hiver (décembre-février) P : printemps (mars-mai) E : été (juin-août) A : automne (septembre-novembre) An : an

Tableau 4. Cumuls moyens des précipitations en mm

L'intensité des précipitations est très inégale dans la mesure où les cumuls journaliers peuvent être supérieurs à 150 mm (record de 188 mm à Hyères-plage). Ces hauteurs de pluie susceptibles d'être atteintes en seulement quelques heures avec une rare intensité, aussi bien en automne (principalement), hiver ou printemps, augmentent considérablement le risque de ruissellement sur les surfaces imperméables et d'inondations pouvant provoquer des pertes humaines et des dégâts matériels considérables. Sur ces 50 dernières années, l'analyse de l'historique des précipitations ne signale pas d'évolution significative des cumuls annuels moyens de précipitations, même si une tendance à la baisse est enregistrée dans le Var. Sur cette même période, le signal sur les événements pluvieux extrêmes n'est pas consolidé, mais Météo-France détecte une légère augmentation de leur fréquence et de leur intensité. Les cumuls journaliers de précipitations supérieurs à 1 mm se produisent en moyenne 56 jours par an, principalement d'octobre à avril ; les cumuls supérieurs à 5 mm, 31 jours par an ; les cumuls supérieurs à 10 mm, 19 jours par an. Les orages se produisent essentiellement de mai à novembre (21 jours par an avec orages), la grêle est rare avec à peine 1 jour en moyenne par an, avec à la clé des dégâts potentiels importants (cultures par exemple), tandis que la neige tombe seulement environ 1 jour par an.

L'évapotranspiration potentielle (ETP Penman moyenne en mm), conditionnée notamment par la température de l'air, l'ensoleillement et le vent, est de l'ordre de 1255 mm par an à Toulon, quantité importante par rapport aux cumuls moyens annuels de précipitations, même s'il faut relativiser cette remarque avec le besoin en eau réel des plantes qui dépend de paramètres météorologiques comme l'humidité de l'air par exemple.

Le **vent** est également un paramètre important sur ce territoire : il souffle toute l'année avec une vitesse moyennée sur 10 mn comprise selon les mois entre 3,9 et 5 m/s à Toulon, soit 14 et 18 km/h, et 3,5 et 4,3 m/s à Hyères, soit 12,6 et 15,5 km/h. Les périodes les plus calmes se produisent de juin à septembre. Le secteur de Toulon, situé plus à l'ouest, est plus sensible au Mistral ce qui explique les écarts entre les deux postes. Ces vitesses moyennes masquent les violentes rafales de vent qui peuvent

atteindre plus de 150 km/h. À Toulon, 116,5 jours avec rafales de vent supérieures ou égales à 58 km/h sont dénombrés et 7,7 jours avec rafales de vent supérieures ou égales à 100 km/h. À Hyères, respectivement 80,1 jours et 1,6 jour, ce qui confirme que la turbulence est plus forte sur le secteur de Toulon situé à l'ouest de la métropole. D'après Météo-France, le Mistral supérieur à 10 m/s (36 km/h) souffle en moyenne 89 jours⁵ par an à Toulon (période 1981-2010). Les vents dominants les plus puissants sont de secteurs ouest à nord-ouest (Mistral). Les vents de secteurs est à sud-est, souvent porteurs d'humidité, sont également relativement fréquents. Les brises de terre (nuit) et de mer (jour) sont également très régulières, mais la force du vent est souvent relativement faible. Les brises de terre déplacent la pollution de l'air de la métropole vers la mer la nuit et le jour cette pollution revient partiellement vers les terres.

La **durée d'insolation**⁶ à Toulon est de l'ordre de 2839 heures par an sur la période 1981-2010, ce qui est une valeur remarquable. La côte varoise d'Hyères à Six-Fours-les-plages est l'un des secteurs les plus ensoleillés en France (1750 heures à Brest) et en Europe (entre 1200 à 1600 heures en Norvège). À Toulon, le nombre moyen de jours avec une **fraction d'insolation** supérieure ou égale à 80 % est de l'ordre de 167 jours par an, soit de 46 % de l'année, ce qui est très élevé.

Ce premier profil climatique du Pradet est établi à partir d'analogies avec les mesures des stations météo de Toulon, Hyères et Hyères-plage. Ces indicateurs locaux ne caractérisent pas précisément le climat de la commune, mais donnent des tendances générales, malgré les disparités spatiales enregistrées sur de courtes distances en fonction du contexte physico-environnemental des postes de référence dont l'éloignement à la mer varie. Compte tenu de la faible profondeur de l'historique de la station d'Hyères-plage, les bilans de cette station sont fragiles, mais complètent ceux de Toulon et Hyères. Même en l'absence de mesures locales, il est évident que le climat infracommunal du Pradet, en particulier les températures de l'air, diffère en fonction de la distance à la mer, de la présence des espaces forestiers et agricoles, des zones urbaines... La situation géographique intermédiaire du Pradet grossièrement à mi-chemin entre Toulon et Hyères et son contexte urbain en marge de la métropole (tissu urbain dense de relative faible étendue, quartiers résidentiels périurbains, espaces verts, terres agricoles, influence de la mer, topographie...) complexifie l'analyse des résultats, mais les principaux caractères sont définis pour mieux comprendre les enjeux liés au climat et aux phénomènes météorologiques.

1.1.2. Évolution du climat à l'échelle régionale ces dernières décennies

Selon ClimatHD⁷, en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, le nombre annuel de journées chaudes, durant lesquelles la température maximale est supérieure à 25°C, est très variable selon les années (variabilité interannuelle) et la localisation géographique : en effet, les journées les plus chaudes concernent principalement l'arrière-pays hors zones montagneuses. Le littoral est également moins exposé aux fortes chaleurs. De manière générale, depuis 1960 à l'échelle régionale, Météo-France a observé une augmentation significative du nombre de journées chaudes, soit entre 6 à 8 jours par décennie. À Cannes, par exemple, en 1960, on dénombrait 65 jours contre près de 110 aujourd'hui.

A contrario, le nombre annuel de jours de gel, même s'il est aussi très variable selon les années, a fortement diminué. Depuis 1960, le nombre de jours de gel a quasiment été divisé par deux à Cannes avec en moyenne à peine une dizaine de jours ces dix dernières années.

⁵ Moyenne calculée sur 4 postes : Orange, Istres, Marignane et Toulon.

⁶ L'insolation est l'exposition d'un objet au rayonnement solaire direct. La durée d'insolation correspond à la somme des intervalles de temps durant lesquels un objet fixe est soumis à insolation au cours d'une période donnée (Météo-France).

⁷ www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd

Sur les températures moyennes annuelles régionales, l'évolution au réchauffement est nette depuis 1960 : +0,3 °C par décennie. Les années les plus chaudes sont après 2000.

La hausse des températures est significative sur l'ensemble de la région (période de référence 1961-1990) :

- +0,1°C par décennie pour les températures minimales et +0,3°C par décennie pour les températures maximales en hiver ;
- +0,4°C par décennie pour les températures minimales et entre +0,4°C et +0,6°C par décennie pour les températures maximales en été. L'été caniculaire de 2003 est le plus chaud. Il est suivi par les étés 2015, 2017 et 2018.

Le signal sur les précipitations est moins évident, avec toutefois une tendance régionale à la baisse des cumuls moyens au printemps et en été depuis 1960. Le régime des précipitations est surtout caractérisé par la forte variabilité interannuelle toutes saisons confondues. Les deux dernières années illustrent parfaitement ce phénomène : absence de pluie en octobre 2017 (sécheresse très marquée), cumul mensuel 2,5 fois supérieur à la moyenne de la période de référence (1959-2017) en octobre 2018.

Ces quelques indicateurs montrent que le climat évolue sous l'effet du changement climatique mis en évidence par les différents rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) à l'échelle globale et les publications du GREC-SUD⁸ à l'échelle régionale.

1.2. Indicateurs locaux modélisés du climat présent et futur

Pour compléter l'approche et apporter des indicateurs sur le climat présent et futur en fonction des horizons et des scénarios socio-économiques, des indicateurs locaux et spatialisés modélisés sont proposés. Sur le territoire du Pradet, aucun poste météo disposant d'un long historique de données standardisées n'est disponible, ce qui explique pourquoi les stations de Toulon, Hyères et dans une moindre mesure Hyères-plage (historique peu profond) ont été sélectionnées pour caractériser le climat de la commune.

Pour fournir des indicateurs climatiques, il est également possible de s'appuyer sur la géostatistique et la modélisation. En effet, des modèles climatiques régionaux fournissent des estimations à l'échelle régionale et locale sur le climat passé, présent et futur. Ces modèles simulent le fonctionnement de l'atmosphère et permettent de connaître les principales caractéristiques climatiques d'un territoire donné.

1.2.1. Méthodologie générale pour extraire les indicateurs modélisés du climat présent et futur

Pour anticiper le climat futur, il est possible d'accéder aux simulations climatiques de modèles à basse résolution spatiale qui sont de l'ordre de 50 à 300 km. Ces modèles atmosphériques couplés à d'autres modèles représentant les océans, la végétation, le cycle du carbone, la biogéochimie marine, la chimie atmosphérique ou encore les calottes glaciaires, fournissent des « scénarios climatiques globaux ». Cette échelle (ou résolution) spatiale ne donne qu'une tendance générale qui ne permet pas de se projeter à l'échelle très locale (parcelle, par exemple). Ce constat est d'autant plus frappant dans les territoires où le relief est accidenté. Pour faciliter la prise de décision et adapter les activités (tourisme, agriculture, préservation de la biodiversité, gestion des paysages et des forêts...), il est important de disposer d'indicateurs climatiques susceptibles d'améliorer la connaissance du climat présent et futur.

⁸ www.grec-sud.fr

Pour affiner la résolution spatiale des scénarios climatiques globaux, il est nécessaire d'appliquer des méthodes de régionalisation, appelées aussi méthodes de « descente d'échelle » ou de « désagrégation spatiale » (Figure 1). Deux méthodes de régionalisation sont utilisées : la désagrégation statistique et la désagrégation dynamique.

Pour la désagrégation statistique, on suppose que le climat régional résulte des caractéristiques à grande échelle et des propriétés locales (variables explicatives) comme la topographie par exemple. La méthode prend ainsi en compte d'une manière plus fine les variables locales et permet de corriger les résultats des simulations en les calibrant aux observations. Parmi les méthodes de régionalisation statistique, on peut citer les fonctions de transfert (deltas ou anomalies, biais, réseaux de neurones...), les analogues (type de temps), les quantiles (quantile-quantile, régression quantile...) et les générateurs stochastiques de climat (LARS, WGEN...). D'une manière générale, l'utilisateur crée de nouvelles séries climatiques futures en se basant sur les séries observées et les sorties du modèle de climat. Cette méthode présente l'avantage d'être peu coûteuse en temps de calcul. La désagrégation dynamique consiste plutôt à « résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional ». Pour appliquer cette méthode plus complexe et contraignante, il est nécessaire d'utiliser un modèle climatique à maille variable ou un modèle à aire limitée (modèle régional) forcé par un modèle de grande échelle (échelle plus précise). Ces modèles régionaux fonctionnent à des résolutions de 10 à 50 km. Il est également possible de combiner les approches statistiques et dynamiques (méthodes statistico-dynamiques).

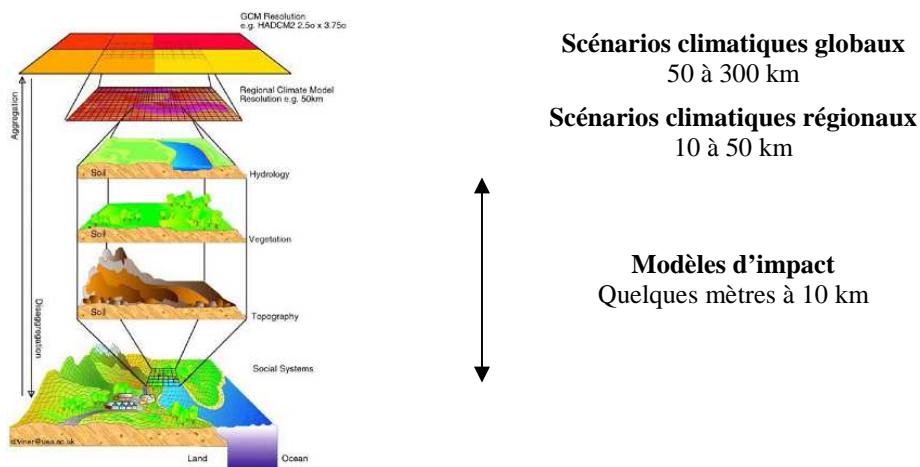


Figure 1. Les étapes de la désagrégation spatiale (source : SRU)

Pour la régionalisation des projections des scénarios climatiques globaux, une cinquantaine de modèles régionaux a été utilisée pour analyser les travaux du 5^{ème} et dernier rapport du GIEC (AR5). En France, deux modèles sont développés par la communauté scientifique : ALADIN (Météo-France) et Weather Research and Forecasting (Institut Pierre Simon Laplace). Les sorties des deux modèles régionaux basées sur les derniers scénarios d'émissions (Representative Concentration Pathway) sont disponibles sur le portail DRIAS⁹ depuis août 2014. Ces simulations succèdent aux projections climatiques basées sur les scénarios de référence Second Report on Emission Scenario (SRES déclinés de A1 à B2) et prennent le relais des données SCAMPEI issues des modèles Aladin-Climat et LMDZ développés respectivement par Météo-France et l'IPSL, et de la méthode statistique des régimes de temps SCRATCH08 mise en œuvre par le CERFACS. Les données actualisées fournies sous forme d'une grille de points géolocalisés sont mises à disposition à une échelle spatiale de 8 km qui correspond à la grille de calcul régulière de SAFRAN, un « système d'analyse à méso-échelle de

⁹ www.drias-climat.fr/

variables atmosphériques près de la surface ». L'échelle spatiale proposée à 8 km devient intéressante pour produire le profil climatique, notamment le climat futur, des territoires ne présentant pas de relief accidenté. En effet, en montagne, par exemple, les fonds de vallée et les sommets se confondent, l'ubac et l'adret sont indifférenciés... Pour remédier à ce problème, il est possible d'affiner les résultats des modèles régionaux en utilisant des modèles d'impact ou d'adaptation locaux. La résolution spatiale finale est variable selon le modèle (de quelques mètres à 10 km), mais elle est généralement de l'ordre d'un kilomètre.

Des programmes, comme Coordinated Regional Downscaling Experiment¹⁰ (Cordex), se penchent également sur la régionalisation des simulations climatiques et présentent l'inter-comparaison des résultats « à petite échelle sur des domaines limités ». L'ambition est de « renforcer la coordination des initiatives de réduction d'échelle » des projections climatiques à l'échelle régionale.

La branche européenne du projet international Cordex créé en 2009 s'appelle Euro-Cordex. Ce dernier vise « la coordination et la production de projections climatiques régionales pour l'ensemble des régions du globe ». Il est soutenu par le Programme mondial de recherche sur le climat¹¹. Son objectif est de fournir :

- un cadre pour l'évaluation des modèles et des projections climatiques ;
- une interface pour les utilisateurs de simulations climatiques réalisant des études d'impact, d'adaptation au changement climatique ou d'atténuation des gaz à effet de serre.

Euro-Cordex propose un ensemble de simulations climatiques basées sur des « modèles incluant des descentes d'échelle statistiques et dynamiques, forcés par les modèles globaux utilisés dans le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) » (Coupled Model Intercomparison Project¹², Phase 5). Les données Euro-Cordex sont exploitées dans le rapport national de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC) et mises à disposition des utilisateurs sur le portail DRIAS qui offre une approche multi-modèles.

Quel est l'intérêt de l'approche multi-modèles ? Elle permet notamment de prendre en compte les incertitudes scientifiques et techniques liées aux connaissances et donc au fonctionnement interne des modèles climatiques, aux futurs choix socio-économiques des sociétés (scénarios d'émissions des gaz à effet de serre), à la variabilité naturelle du climat, mais aussi à l'incertitude spécifique des méthodes de désagrégation (la descente d'échelle). L'usage des données permet ainsi de mettre en évidence les percentiles¹³.

Le portail DRIAS donne accès aux « scénarios climatiques régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnements » réalisés dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL¹⁴, CERFACS¹⁵, CNRM¹⁶-GAME). Il met également à disposition les simulations climatiques du XXI^{ème} siècle en Europe à haute résolution spatiale issues du projet Euro-Cordex, coordonné par une équipe allemande, qui mobilise plus de vingt organismes européens de recherche. Les résultats des deux scénarios socio-économiques (RCP 4.5 et 8.5) sont disponibles sur le portail. Le nombre de modèles varie selon les scénarios économiques (Figure 2). Les résultats des modèles climatiques régionaux couvrent la période 1971-2100.

¹⁰ www.cordex.org/

¹¹ www.wcrp-climate.org/

¹² cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/

¹³ Paramètres de distribution statistique : 25 %, 50 %, 75 % sur le portail DRIAS

¹⁴ Institut Pierre Simon Laplace

¹⁵ Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique

¹⁶ Centre national de recherches météorologiques

Scenario	Producteur	GCM	RCM	pr	tas	tas min	tas max
RCP4.5 10 modèles	SMHI	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA4	✓	✓	✓	✓
	CLMcom	CNRM-CM5	CCLM4-8-17	✓	✓	✓	✓
	DMI	ICHEC-EC-EARTH	HIRHAM5	✓	✓	✗	✗
	SMHI	ICHEC-EC-EARTH	RCA4	✓	✓	✓	✓
	IPSL	IPSL-IPSL-CM5A-MR	WRF331F	✓	✓	✓	✓
	KNMI	MetEir-ECEARTH	RACM022E	✓	✓	✓	✓
	SMHI	MOHC-HadGEM2-ES	RCA4	✓	✓	✓	✓
	CLMcom	MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	✓	✓	✓	✓
	CSC	MPI-ESM-LR	REMO019	✓	✓	✓	✓
	CNRM	CNRM-CM5	CNRM-ALADIN53	✓	✓	✓	✓
RCP8.5 11 modèles	SMHI	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA4	✓	✓	✓	✓
	DMI	ICHEC-EC-EARTH	HIRHAM5	✓	✓	✗	✗
	SMHI	ICHEC-EC-EARTH	RCA4	✓	✓	✓	✓
	SMHI	IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCA4	✓	✓	✓	✓
	IPSL	IPSL-IPSL-CM5A-MR	WRF331F	✓	✓	✓	✓
	KNMI	MetEir-ECEARTH	RACM022E	✓	✓	✓	✓
	SMHI	MOHC-HadGEM2-ES	RCA4	✓	✓	✓	✓
	CLMcom	MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	✓	✓	✓	✓
	CSC	MPI-ESM-LR	REMO019	✓	✓	✓	✓
	SMHI	MPI-M-MPI-ESM-LR	RCA4	✓	✓	✓	✓
	CNRM	CNRM-CM5	CNRM-ALADIN53	✓	✓	✓	✓

Figure 2. Producteurs, modèles et paramètres climatiques¹⁷ des modèles Euro-Cordex disponibles sur le portail DRIAS (source : portail DRIAS)

Le portail DRIAS propose ainsi les simulations climatiques Euro-Cordex provenant de 10 modèles pour le scénario socio-économique RCP 4.5 (intermédiaire) et 11 modèles pour le scénario RCP 8.5 (pessimiste). Les producteurs fournissent un ou des modèle(s) de climat régional (RCM), contrôlé(s) en bordure par un ou des modèle(s) de climat globaux (GCM). Les résultats des scénarios 2.6 et 6.0 sont exclus de la base de données. Compte tenu des engagements actuels des États et de la mise en œuvre effective des politiques d'atténuation des gaz à effet de serre à l'échelle mondiale, le scénario socio-économique RCP 2.6 est considéré, sauf diminution massive des émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau international, comme utopique par la communauté scientifique. À noter : le récent rapport spécial 1.5°C du GIEC, capable de limiter significativement les impacts du changement climatique à l'échelle mondiale et de préserver les basses terres insulaires du Pacifique par exemple, s'appuie sur un scénario socio-économique encore plus optimiste que le RCP 2.6...

Le portail DRIAS fournit les données, mais aussi un service d'accompagnement pour étudier l'impact du changement climatique et aider les décideurs à prendre des mesures d'adaptation. Il « simplifie l'accès et l'utilisation d'informations relatives aux projections climatiques régionalisées », facilite le lien entre les utilisateurs et les chercheurs, contribue à valoriser le travail de recherche et à harmoniser les productions des différents groupes de modélisation. Sa création résulte de l'application du Plan national d'adaptation au changement climatique (2011) décidé par le Ministère du développement durable (MEDDE), les laboratoires de modélisation climatique français et Météo-France. L'ONERC a également contribué à sa création. Les informations climatiques sont téléchargeables sous forme de données numériques (grille régulière de points géolocalisés distants de 8 km), d'indices climatiques ou de cartes interactives (Figure 3). Dans le catalogue, les simulations climatiques atmosphériques et les indices corrigés par rapport aux observations selon les différents scénarios de GES (SRES et RCP) sont accessibles. Les données brutes (non corrigées) ne sont pas accessibles sur le portail DRIAS et nécessitent une demande spécifique, sauf pour l'Outre-mer.

¹⁷ Pr : précipitations / tas : température moyenne de l'air / tas min : température minimale moyenne de l'air / tas max : température maximale moyenne de l'air

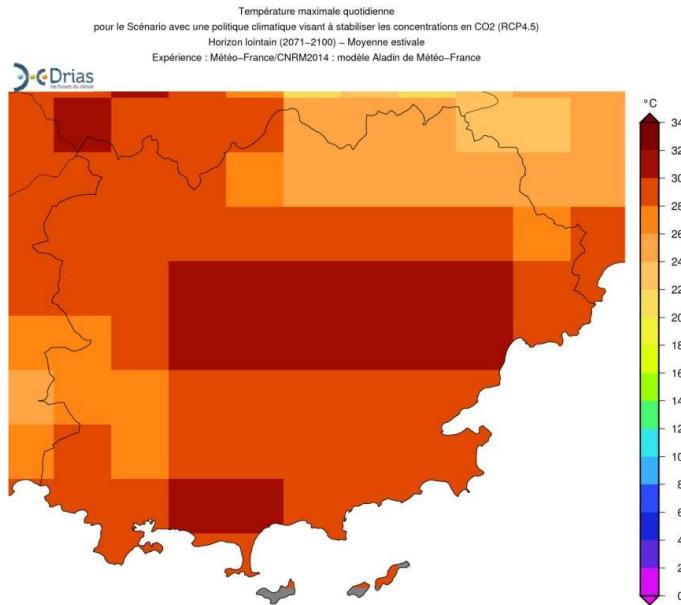


Figure 3. Exemple de carte interactive mise à disposition sur le portail DRIAS (mailles de 8 km correspondant aux données corrigées par rapport aux observations)

Les Special Report on Emissions Scenarios (SRES) correspondent aux anciens scénarios d'émissions A1 à B2 publiés en 2001 et 2007 et les Representative Concentration Pathways (RCP) aux scénarios d'émissions du 5^{ème} rapport (AR5) du GIEC de 2013. Quatre scénarios de référence (RCP) de l'évolution du forçage radiatif¹⁸, relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère au cours du XXI^{ème} siècle, existent : RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5 (Figure 4 et Tableau 5). Le premier implique une réduction d'émissions de GES par la communauté internationale (scénario optimiste), tandis que le dernier correspond à l'évolution des émissions actuelles jusqu'à la fin du siècle si rien n'est fait pour les réduire (scénario pessimiste). Les scénarios RCP 4.5 et 6.0 sont des scénarios intermédiaires.

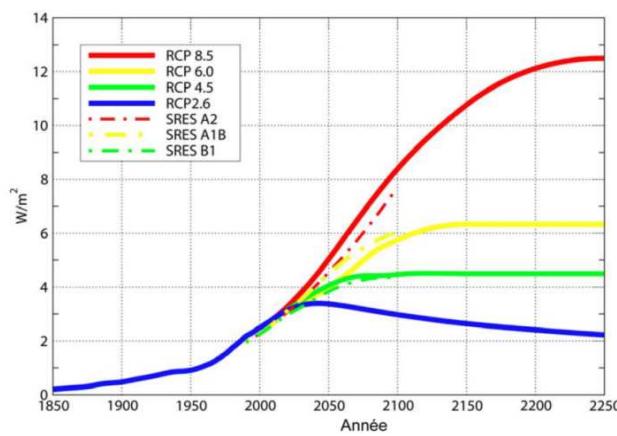


Figure 4. Évolution du bilan radiatif (ou forçage radiatif) de la Terre en W/m²
 (© CNRM / IPSL / CERFACS)

¹⁸ Le forçage radiatif correspond à un changement du bilan radiatif (différence entre le rayonnement incident ou entrant et le rayonnement sortant) au sommet de la troposphère. Ce changement provient d'un des facteurs d'évolution du climat (concentration des gaz à effet de serre, par exemple)

Les trajectoires des RCP sont assez proches jusqu'en 2040, puis divergent assez fortement selon les scénarios à partir de 2050, soit proche de la fin de la période d'étude. L'incertitude sur le climat futur selon les scénarios RCP, et donc la différence entre eux sont surtout significatives dans la seconde partie du XXI^{ème} siècle. Dans la première partie, les sorties de modèles tous scénarios confondus apportent des réponses qui convergent relativement.

Nom	Forçage radiatif	Concentration (ppm)	Trajectoire
RCP 2.6	pic à ~3W.m ⁻² avant 2100, puis déclin	pic ~490 eq-CO ₂ avant 2100, puis déclin	pic puis déclin
RCP 4.5	~4,5W.m ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	stabilisation sans dépassement
RCP 6.0	~6W.m ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	stabilisation sans dépassement
RCP 8.5	>8,5W.m ⁻² en 2100	> 1370 eq-CO ₂ en 2100	croissante

Tableau 5. Les principales caractéristiques des scénarios RCP¹⁹

Sur le portail DRIAS, la période de référence, soit la période sur laquelle les modèles s'appuient pour estimer les anomalies est 1950-2005 pour ALADIN-Climat/CNRM2014 (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5), 1971-2005 pour WRF/IPSL2014 (RCP 4.5, RCP 8.5), 1971-2005 pour les modèles Euro-Cordex (RCP 4.5, RCP 8.5). La période de projection est 2006-2100. Les données brutes des modèles régionaux sont corrigées par la méthode quantile-quantile, donc par rapport aux observations. Comme mentionné, les simulations sont disponibles à l'échelle journalière à une résolution spatiale de 8 km (réanalyse SAFRAN). Les paramètres sont analysés par pas de 300 m d'altitude, puis interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km). D'un point de vue général, il est important d'apprécier l'évolution du climat sur un territoire à partir d'une série de points de grille et non d'un seul, car cela pose un problème de « bruit lié à la variabilité du climat ». Pour limiter ce bruit, il convient de moyenner les valeurs de plusieurs points de grille (moyenne spatiale) afin de lisser le signal et de prendre en compte le voisinage. Selon le service d'accompagnement du portail DRIAS, il est également préférable de travailler sur un pas temporel suffisamment long (saison, semestre, année...), puisque la variabilité naturelle du climat et celle induite par les scénarios RCP peuvent être assez grandes à un pas de temps plus court.

En complément des données ALADIN-Climat et WRF, une dizaine de simulations Euro-Cordex corrigées par réanalyse SAFRAN sont donc mises à disposition sur le portail DRIAS. Ce sont ces dernières qui ont été privilégiées pour l'étude.

Le climat futur ces prochaines décennies, hors variabilité naturelle, dépendra des modes de consommation et de vie de la population mondiale qui, d'après les démographes, atteindra un palier en 2050 avec près de 10 milliards d'individus contre 7,5 milliards aujourd'hui.

1.2.2. La sélection des projections climatiques pour produire les indicateurs modélisés locaux et spatialisés

Pour cette étude prospective du climat sur le territoire de la commune du Pradet, les tendances des projections climatiques des modèles régionaux convergent de manière relative jusqu'en 2040-2050, ce qui se traduit par des incertitudes plus limitées, mais elles divergent dans la seconde moitié du siècle. Pour enrichir l'analyse et suivre une approche multi-modèles, il a été décidé d'utiliser l'ensemble des simulations issues des modèles Euro-Cordex. Comme souligné précédemment, deux scénarios socio-économiques sont disponibles sur le portail DRIAS : RCP 4.5 et RCP 8.5.

¹⁹ eq-CO₂ : abréviation pour équivalent CO₂ = concentration de CO₂ équivalente à la totalité des gaz à effet de serre en termes de forçage radiatif

Deux types d'indicateurs modélisés sont proposés dans cette étude :

- indicateurs locaux calculés à partir d'une sélection de points de grille communs à l'ensemble des modèles Euro-Cordex ;
- indicateurs spatialisés calculés à partir de données météorologiques mensuelles (observations locales) et des sorties de modèles Euro-Cordex.

Pour l'ensemble des indicateurs modélisés, la période de référence est 1996-2015, soit une normale de 20 ans. Cette période a été sélectionnée afin de s'appuyer sur un climat de référence récent et d'étudier l'évolution du climat à partir du climat actuel. Pourquoi une normale de 20 ans et non de 30 ans, durée préconisée pour calculer une normale optimale ? Les indicateurs spatialisés sont construits à partir d'un jeu de données météorologiques observées (stations météo) sur 20 ans et des sorties de modèles climatiques régionaux. Le coût des données météorologiques a imposé ce choix. Une normale se calcule idéalement à partir d'un jeu de données de 30 ans, mais une période de 20 ans est déjà considérée par les climatologues comme une période significative, surtout sur des moyennes calculées. Pour information, dans le cadre de cette étude, des tests ont montré que les écarts sur les valeurs des températures saisonnières moyennes des projections climatiques sur 20 et 30 ans, par exemple, sont inférieurs ou égaux à maximum 0,15°C, ce qui est limité compte tenu des incertitudes liées à la modélisation du climat.

Pour les scénarios RCP, la période de référence des modèles Euro-Cordex s'étend de 1971-2005 et diffère donc de la période de référence des observations locales (1996-2015). Pour la cohérence des données de base, les moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des modèles Euro-Cordex ont été recalculées sur la période de référence 1996-2015. Pour le calcul des moyennes, comme la période de référence des scénarios RCP est 1971-2005, il a été nécessaire d'extraire les données de 1996 à 2005 et de compléter l'historique avec les données de la période de projection 2006-2015. Pour ces dernières, le lot de données est issu du scénario intermédiaire RCP 4.5. Remarque : sur les premières années du XXI^{ème} siècle, le choix du scénario importe peu, car les résultats des sorties de modèle sont très proches d'après le service d'accompagnement du portail DRIAS. De plus, le lissage du signal sur la période de 20 ans limite l'influence des données issue de la période de projection.

Pour la période de référence (1996-2015), les données quotidiennes ont été extraites pour calculer les indicateurs des températures de l'air (°C) et des précipitations (mm) à partir des points de grille qui couvrent le périmètre d'étude. Pour apprécier l'écart entre la période de référence et les horizons futurs, selon le type d'indicateurs, deux à trois horizons sont proposés :

- indicateurs locaux : 2026-2045 (horizon 2035), 2046-2065 (2055), 2076-2095 (2085) ;
- indicateurs spatialisés : 2026-2045 (2035), 2046-2065 (2055).

Ce choix s'explique par les contraintes financières et techniques du projet. Les indicateurs spatialisés nécessitent en effet de lourds calculs. Cela dit, ces horizons à court et moyen termes (respectivement 2035 et 2055) sont ceux qui comportent le moins d'incertitudes scientifiques et sont à une échelle de temps à portée des politiques d'aménagement et d'adaptation ambitieuses sur 50 ans, ce qui permet de sensibiliser les élus en place et les équipes techniques (collectivités, réserves, syndicats...).

À l'échelle régionale, voici un exemple d'extraction des points de grille des modèles Euro-Cordex fournis par points distants de 8 km (Figure 5) :

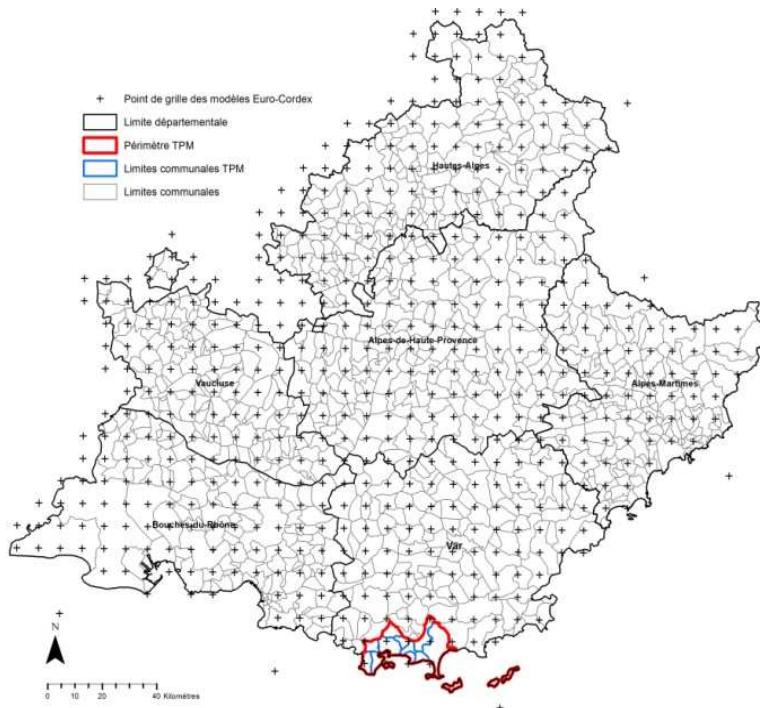


Figure 5. Points de grille des modèles Euro-Cordex à l'échelle régionale et de la métropole Toulon-Provence-Méditerranée (contour rouge)

Les points de grille distants de 8 km qui couvrent la commune du Pradet et la métropole Toulon-Provence-Méditerranée sont peu nombreux, mais suffisants pour calculer des indicateurs climatiques.

1.2.3. Liste des indicateurs modélisés locaux et spatialisés mis à disposition

Pour répondre aux besoins des acteurs locaux du territoire, une série d'indicateurs locaux et spatialisés du climat présent et futur est fournie :

- à l'échelle de la commune du Pradet pour les indicateurs modélisés locaux ;
- à l'échelle métropolitaine de Toulon-Provence-Méditerranée pour les indicateurs modélisés spatialisés.

1.2.3.4. Liste des indicateurs modélisés locaux

Pour calculer les indicateurs modélisés locaux et lisser le signal en prenant en compte le voisinage, une sélection de points de grille a été réalisée : 3249, 3251, 3252, 3392 à 3397. Par horizon futur et RCP, les percentiles et/ou la médiane des valeurs simulées par les différents modèles climatiques régionaux Euro-Cordex ont été privilégiés.

Par horizon futur et RCP, les indicateurs suivants sont proposés :

- températures minimales (Tn), maximales (Tx) et moyennes de l'air (°C), horizons 2035, 2055 et 2085, RCP 4.5 et 8.5, quartiles 1, 2 (médiane) et 3 ;
- cumuls des précipitations (mm), horizons 2035, 2055 et 2085, RCP 4.5 et 8.5, quartiles 1, 2 (médiane) et 3 ;
- deltas moyens (°C) des températures minimales, maximales et moyennes de l'air aux horizons 2035, 2055 et 2085 par rapport à la période de référence (1996-2015), RCP 4.5 et 8.5, quartiles 1, 2 et 3 ;

- deltas moyens (%) des cumuls de précipitations aux horizons 2035, 2055 et 2085 par rapport à la période de référence (1996-2015), RCP 4.5 et 8.5, quartiles 1, 2 et 3 ;
- nombre de nuits tropicales par an ($T_n > 20^\circ\text{C}$) ;
- nombre de jours de gel par an ($T_n \leq 0^\circ\text{C}$) ;
- extrême froid de T_n (10^{ème} centile, °C) ;
- nombre de vagues de froid ($T_n <$ de plus de 5°C par rapport à la normale pendant au moins 5 jours consécutifs) ;
- nombre de journées d'été par an ($T_{\text{max}} > 25^\circ\text{C}$) ;
- nombre de jours sans dégel par an ($T_x \leq 0^\circ\text{C}$) ;
- extrême chaud de T_x (90^{ème} centile, °C) ;
- nombre de vagues de chaleur ($T_x >$ de plus de 5°C par rapport à la normale pendant au moins 5 jours consécutifs) ;
- nombre de jours anormalement chauds ($T_x >$ de plus de 5°C par rapport à la normale) ;
- nombre de jours de pluie par an (cumul $\geq 1 \text{ mm}$) ;
- nombre de jours par an où cumul de $RR \geq 20 \text{ mm}$.

1.2.3.5. Liste des indicateurs modélisés spatialisés

Par horizon futur et RCP, la médiane des valeurs simulées par les différents modèles climatiques régionaux Euro-Cordex a été utilisée pour produire les indicateurs modélisés spatialisés. Cette méthode permet de mettre en évidence la valeur seuil pour laquelle 50 % des valeurs de la distribution sont plus élevées. Au total, 340 cartes sont délivrées. La liste des indicateurs spatialisés mise à disposition est la suivante :

- ✚ pour les températures minimales, maximales et moyennes de l'air :
 - cartographie des moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des températures minimales, maximales et moyennes sur la période 1996-2015 ;
 - cartographie des moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des températures minimales, maximales et moyennes sur la période 2026-2045 : RCP 4.5 et RCP 8.5 des modèles Euro-Cordex ;
 - cartographie des moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des températures minimales, maximales et moyennes sur la période 2046-2065 : RCP 4.5 et RCP 8.5 des modèles Euro-Cordex
- ✚ pour les précipitations :
 - cartographie des moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des précipitations sur la période 1996-2015
 - cartographie des moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des précipitations sur la période 2026-2045 : RCP 4.5 et RCP 8.5 des modèles Euro-Cordex
 - cartographie des moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des précipitations sur la période 2046-2065 : RCP 4.5 et RCP 8.5 des modèles Euro-Cordex.

Les cartes des températures de l'air sont produites à une résolution spatiale de 100 mètres et les cartes des précipitations à une échelle spatiale de 1000 mètres. Pour les températures de l'air, il était possible de travailler à une résolution spatiale plus fine (25 mètres, par exemple) avec à la clé des résultats satisfaisants, mais la volonté était de fournir les meilleurs indicateurs possibles et donc de trouver un compromis entre qualité et échelle spatiale.

Important : les cartes du climat présent et futur ne mettent pas en évidence les îlots de chaleur urbains (ICU) de la métropole TPM. Pour obtenir ce type de cartographie, il faudrait notamment :

- un réseau dense de stations urbaines, du centre vers la périphérie de l'espace métropolitain, représentatives des différents environnements urbains en fonction de la largeur et l'orientation des rues, la hauteur et l'orientation du bâti, le type de revêtement, la distance aux espaces verts et à la mer, etc.
- une occupation du sol à très haute résolution spatiale mettant en évidence les différents environnements urbains.

Vu la localisation des stations météo au sein du périmètre de la métropole TPM, seule la station de Toulon peut ponctuellement ou régulièrement témoigner du phénomène d'ICU, mais la proximité avec la mer limite son intérêt pour ce type d'exercice. Il conviendrait de lancer au moins une campagne de mesures temporaire sur une saison estivale pour mieux évaluer le phénomène de l'ICU au sein de la métropole et de la commune du Pradet qui se situe en marge de la zone densément urbanisée.

Les contraintes limitent cette étude du climat présent et futur à quatre variables : températures minimales, températures maximales, températures moyennes et précipitations. La méthode générale de spatialisation n'a pas été mise en œuvre pour d'autres paramètres climatiques. Elle a été testée lors de précédentes études pour l'humidité, par exemple, mais la fiabilité des résultats était faible.

1.2.4. Résultats des indicateurs modélisés locaux

Les résultats sont déclinés par variables climatiques. Ils mettent en évidence les résultats médians et les percentiles (quartiles et centiles).

1.2.4.1. Températures minimales de l'air

D'après les modèles Euro-Cordex, les températures minimales moyennes de l'air vont sensiblement évoluer sur le territoire de la commune du Pradet (Figure 6, **Annexe 1**). De manière générale, en se référant aux médianes, les températures minimales vont augmenter, tout particulièrement en été, avec une hausse oscillant entre +0,8°C et +3,8°C en fonction des horizons futurs et des RCP. Au printemps, la hausse sera plus limitée, mais atteindra jusqu'à 2,6°C. Les quartiles mettent en évidence les incertitudes liées aux sorties des différents modèles. Si on se réfère au Q3, c'est-à-dire la valeur à laquelle 25 % des sorties de modèles climatiques sont supérieures ou égales, l'augmentation des températures minimales atteindra près de 2,7°C en 2055 et 4,7°C en 2085. Les Q1 mettent en évidence *a contrario* une hausse plus modeste, mais toutefois significative. La différence entre les valeurs de Q1 et Q3 (écart interquartile) est parfois importante, notamment pour le RCP 8.5, ce qui se traduit par une dispersion, soit une incertitude relativement élevée liée aux différents résultats. En d'autres termes, les modèles climatiques produisent des résultats contrastés selon le pas de temps. Ainsi, la médiane des valeurs des sorties de modèles prend tout son sens. Si les émissions de gaz à effet de serre suivent le scénario pessimiste (RCP 8.5), la hausse des températures minimales de l'air sera très forte et il sera difficile de limiter les effets du changement climatique sur des échéances si proches. Cette évolution des températures minimales affectera, par exemple, la phénologie des arbres et des cultures, et donc le cycle végétatif avec un dépérissement probable de certaines espèces. La seule voie à suivre est le scénario RCP 4.5, même si les effets seraient sévères, en particulier à l'horizon 2085. Pour rappel, environ 5°C séparent une période glaciaire et interglaciaire, ce qui donne une indication sur l'ampleur du changement climatique en moins d'un siècle.



Interreg
MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



ADAPT

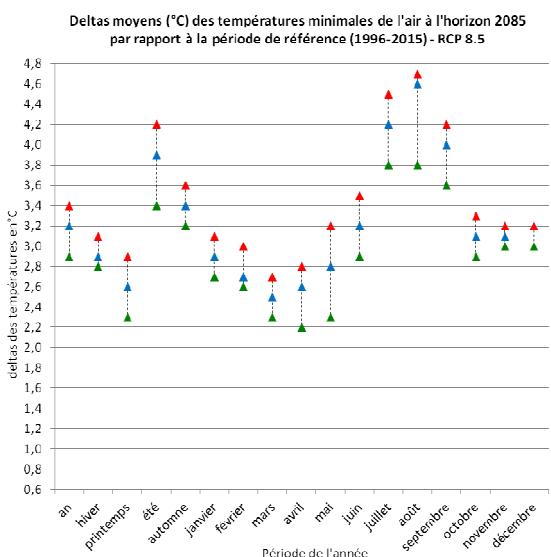
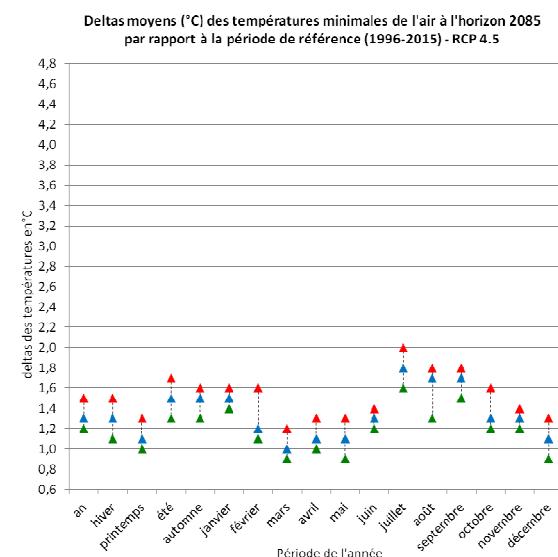
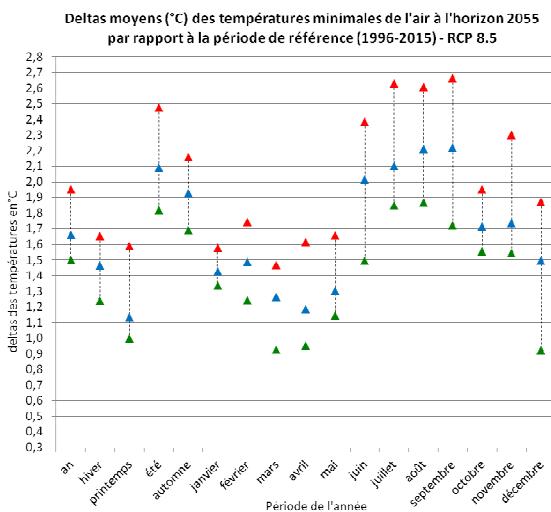
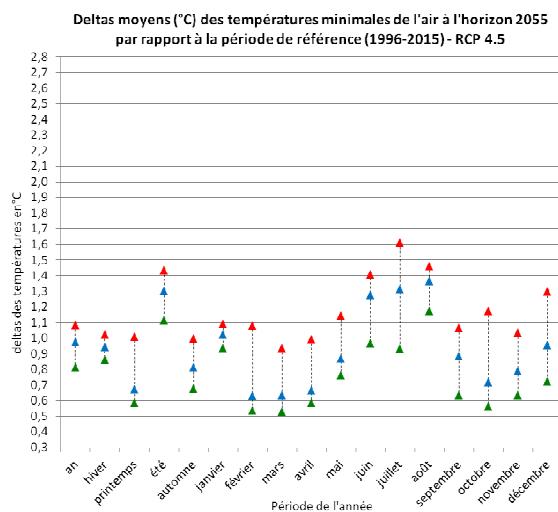
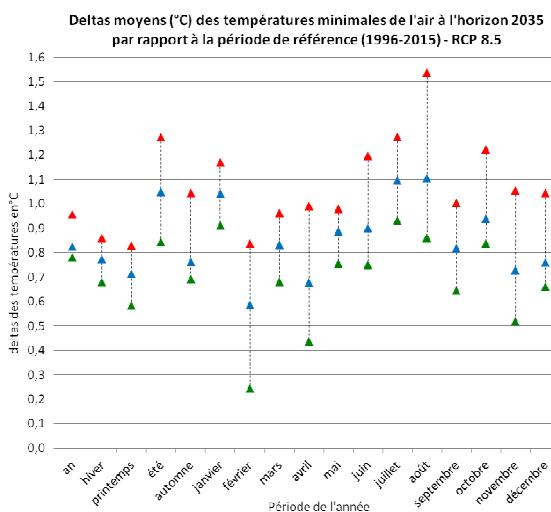
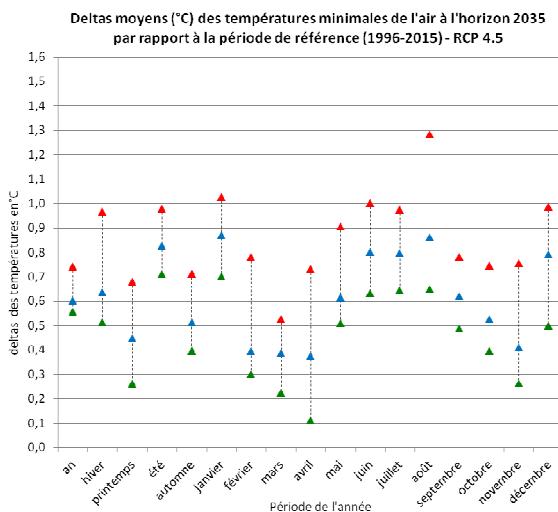


Figure 6. Deltas moyens des températures minimales de l'air selon les horizons futurs et les scénarios socio-économiques au Pradet (Q1 : quartile 1 / med : médiane - Q2 / Q3 : quartile 3)

Pour mieux appréhender l'évolution du climat aux horizons 2035, 2055 et 2085, quatre indicateurs locaux climatiques au pas annuel sont également fournis (Tableau 6) :

Température minimale moyenne (Tn) en °C	Valeur médiane des modèles Euro-Cordex, RCP 4.5						
Période	référence (1996-2015)	2035, RCP 4.5	2035, RCP 8.5	2055, RCP 4.5	2055, RCP 8.5	2085, RCP 4.5	2085, RCP 8.5
Nombre de nuits tropicales par an (Tn > 20°C)	28,6	39,2	44,8	47,4	61,7	53,6	89,2
Nombre de jours de gel par an (Tn <= 0°C)	7,6	5,0	5,3	4,5	3,1	3,0	0,9
Extrême froid de Tn (10 ^{ème} centile, °C)	3,4	4,0	4,2	4,3	5,1	4,8	6,6
Nombre de vagues de froid (Tn < de plus de 5°C par rapport à la normale pendant au moins 5 jours consécutifs	1,1	0,2	0	0	0	0,1	0

Tableau 6. Évolution d'indicateurs climatiques basés sur les températures minimales au pas annuel au Pradet

Le nombre de nuits tropicales triple en cas de scénario pessimiste, ce qui aura un impact certain sur le confort des habitants, le nombre de jours de gel baisse significativement et les températures les plus froides sont moins marquées.

1.2.4.2. Températures maximales de l'air

Les températures maximales moyennes de l'air vont également sensiblement évoluer au Pradet. De manière générale, les températures maximales vont augmenter (Figure 7, **Annexe 2**), surtout en été et en hiver, mais aussi automne aux horizons 2055 et 2085 (RCP 8.5). Les températures estivales vont augmenter, en fonction des horizons futurs et des RCP, de +0,6°C à +3,9°C et les températures hivernales de +0,7°C à +2,8°C, en référence à la valeur médiane des sorties de modèles climatiques. Comme pour les températures minimales, l'écart interquartile montre une dispersion des résultats. Selon le pas de temps, l'horizon futur et le RCP, cette dispersion est très variable. Les modèles climatiques produisent ainsi des résultats contrastés, d'où une incertitude, mais des tendances fortes. Durant les mois d'été (saison météorologique de juin à août) et le mois de septembre, par exemple, l'augmentation des températures maximales sera proche de 4,3°C ou s'approchera même +5°C, ce qui provoquera des périodes de chaleur intense (canicules). Cette hausse des températures maximales combinée à une faible pluviométrie (ou nulle) se traduira par un état de sécheresse marqué avec des effets sur l'évapotranspiration, l'état racinaire des arbres, la santé des plantes, le risque incendies, la phénologie... Les périodes printanière et automnale connaîtront aussi une hausse significative des températures maximales moyennes.



Interreg
MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



ADAPT



Figure 7. Deltas moyens des températures maximales de l'air selon les horizons futurs et les scénarios socio-économiques au Pradet (Q1 : quartile 1 / med : médiane - Q2 / Q3 : quartile 3)

Une série d'indicateurs locaux climatiques au pas annuel est également fournie aux horizons 2035, 2055 et 2085 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

Température maximale moyenne (Tx) en °C	Valeur médiane des modèles Euro-Cordex, RCP 4.5						
Période	référence (1996-2015)	2035, RCP 4.5	2035, RCP 8.5	2055, RCP 4.5	2055, RCP 8.5	2085, RCP 4.5	2085, RCP 8.5
Nombre de journées d'été par an : Tmax > 25°C	84,4	94,3	97,9	101,1	110,6	104,9	127,7
Nombre de jours sans dégel par an (Tx <= 0°C)	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Extrême chaud de Tx (90ème centile, °C)	28,5	29,1	29,4	29,6	30,5	30,2	32,8
Nombre de vagues de chaleur (Tx > de plus de 5°C par rapport à la normale pendant au moins 5 jours consécutifs)	0	2,1	2,3	2,7	8,2	6	37,7
Nombre de jours anormalement chauds (Tx > de plus de 5°C par rapport à la normale)	8,7 ²⁰	26,8	24,7	34	45,6	48,8	100,9

Tableau 7. Évolution d'indicateurs climatiques basés sur les températures minimales au pas annuel au Pradet

Entre la période de référence et l'horizon 2085, RCP 8.5, Le Pradet connaîtra 40 journées d'été supplémentaires avec un impact sur la vie locale des habitants et les habitudes des touristes, par exemple. Quant aux températures les plus chaudes, elles gagneront plus de 4°C. Le nombre de vagues de chaleur croîtra, de manière très alarmante à l'horizon 2085, RCP 8.5. Après 2050, l'été 2003 caniculaire ne serait plus exceptionnel. Il est même susceptible de devenir frais. Les records des températures maximales seront susceptibles de dépasser 45°C, même en bord de mer.

1.2.4.3. Températures moyennes de l'air

En toute logique, vu les résultats sur les températures minimales et maximales, les températures moyennes de l'air vont globalement augmenter avec parfois de fortes hausses selon les horizons et les RCP (Figure 8, **Annexe 3**). Toutes les saisons et les mois sont concernés par cette élévation des températures, en particulier l'été et l'hiver tous horizons et scénarios confondus, mais aussi l'automne (septembre) à l'horizon 2055, RCP 8.5, et 2085. Compte tenu de la dispersion (bruit), la médiane reste un bon indicateur pour évaluer la hausse des températures. Si ces résultats se confirment, les effets du changement climatique provoqueront des bouleversements considérables et contraindront, par exemple, les agriculteurs à adapter leurs pratiques agricoles. Certaines cultures seront déconseillées pour éviter les pertes chroniques. L'évolution des températures sera rapide, ce qui signifie que le changement climatique s'accélérera et s'amplifiera à l'échelle locale, mais aussi à l'échelle globale si les pays et les sociétés ne mettent pas tout en œuvre pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Suivre le scénario RCP 4.5 semble la seule voie raisonnable (ou mieux tendre vers le scénario 2.6 aujourd'hui considéré comme utopiste) pour limiter les effets du changement climatique. Cette hausse généralisée des températures jouera un rôle sur le bilan et les transferts d'énergie à la surface du sol et dans l'atmosphère, ce qui contribuera au renforcement probable des événements extrêmes, comme les canicules et les sécheresses par exemple.

²⁰ Cette valeur est calculée sur la période 1976-2005



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

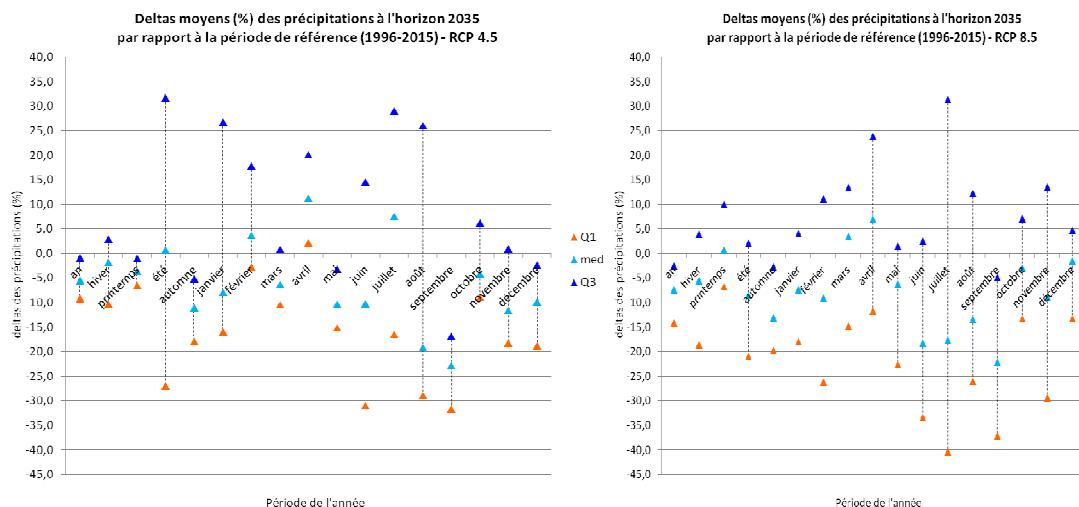


Figure 8. Deltas moyens des températures moyennes de l'air selon les horizons futurs et les scénarios socio-économiques au Pradet (Q1 : quartile 1 / med : médiane - Q2 / Q3 : quartile 3)

1.2.4.4. Cumuls moyens de précipitations

Si on se réfère aux médianes (Figure 9,

Annexe 4), les précipitations vont globalement légèrement diminuer : pour les cumuls annuels, entre -5 % et -10 %. Certains mois connaîtront toutefois une hausse qui est à relativiser : en juillet, selon le RCP 4.5, par exemple, les cumuls de précipitations vont augmenter de +7,5 %, mais, compte tenu des faibles cumuls à cette période de l'année, cette augmentation serait toute relative, même si elle serait précieuse durant la saison chaude. À l'horizon 2055, les résultats indiquent une augmentation des précipitations en automne, et plus particulièrement en octobre. De plus, la dispersion des résultats, illustrée par un important écart interquartile, montre combien les incertitudes sont fortes sur les précipitations. Les quartiles 1 et 3 mettent en perspective des situations très différentes. La baisse des cumuls de précipitations est susceptible d'être très importante, en particulier en été (-50 à -60 %). Inversement, l'augmentation serait significative selon les périodes. Le risque majeur mis en évidence par les scientifiques serait la répétition des périodes de sécheresse qui serait plus fréquente qu'aujourd'hui. Les années et saisons sèches seraient en effet plus nombreuses et leur succession affecterait durablement les sols, le débit des cours d'eau et le niveau des nappes phréatiques, même si des périodes plus humides viennent s'intercaler. Le risque incendie se manifesterait avec la probable multiplication des grands incendies ravageurs difficilement contrôlables, surtout dans les zones périurbaines où le mitage est développé. L'habitat deviendrait extrêmement vulnérable et les destructions massives. La variabilité interannuelle sera aussi un élément déterminant : les sécheresses couplées aux fortes températures de l'air imposeront des mesures d'adaptation et de restrictions.





Interreg
MARITTIMO-IT FR-MARITIME



ADAPT

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

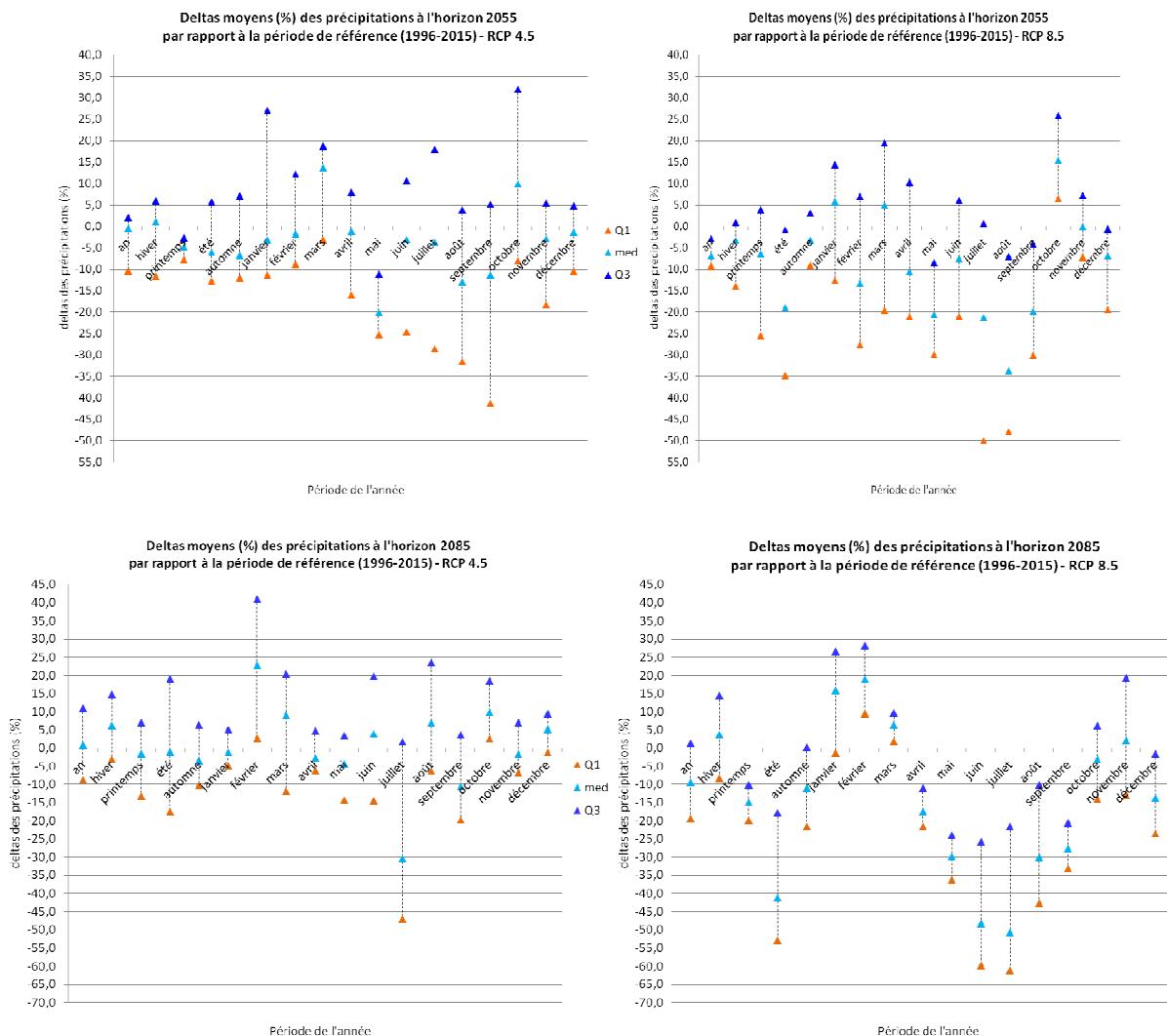


Figure 9. Deltas moyens des précipitations selon les horizons futurs et les scénarios socio-économiques (Q1 : quartile 1 / med : médiane - Q2 / Q3 : quartile 3)

Une série d'indicateurs locaux climatiques au pas annuel est également fournie aux horizons 2035, 2055 et 2085 (Tableau 8)

Cumuls moyens des précipitations (RR) en mm		Valeur médiane des modèles Euro-Cordex, RCP 4.5						
Période	référence (1996-2015)	2035, RCP 4.5	2035, RCP 8.5	2055, RCP 4.5	2055, RCP 8.5	2085, RCP 4.5	2085, RCP 8.5	
Nombre de jours de pluie par an (cumul ≥ 1 mm)	68,6	65,4	64,0	65,0	63,8	66,2	60,2	
Nombre de jours par an où le cumul de RR ≥ 20 mm	11,6	10,1	10,3	10,6	9,9	11,1	10,2	

Tableau 8. Évolution d'indicateurs climatiques basés sur les précipitations au pas annuel au Pradet

À l'avenir, le nombre de jours où le cumul de pluie dépassera 20 mm sera relativement stable, tout comme le nombre global de pluie, avec tout de même une légère tendance à la baisse.

1.2.4.4. Bilan

Les graphiques et les indicateurs sur les températures de l'air et les précipitations mettent en évidence l'augmentation générale des températures minimales, maximales et moyennes de l'air, avec des deltas (ou anomalies) hétérogènes selon les pas de temps et les RCP. Le signal est plus incertain sur les précipitations, même si une tendance à la baisse se dessine. Si les émissions de GES à l'échelle mondiale, mais aussi régionale et locale, ne diminuent pas à court terme, le climat méditerranéen du Pradet sera renforcé avec des températures de l'air plus élevées et un régime pluviométrique plus chaotique. Les besoins en froid des plantes, par exemple, ne seront plus assurés comme aujourd'hui (même si le climat d'aujourd'hui a déjà un impact sur la végétation), ce qui perturbera la phénologie. Les étés similaires à l'année 2003 deviendront réguliers, voire frais. Une augmentation de +2°C (médiane) des températures maximales estivales à l'horizon 2055, par exemple, signifie que la température aura progressé d'environ +4°C depuis le début de l'ère industrielle. L'été débordera sur mai et début octobre, l'hiver sera plus court et les limites des intersaisons plus floues. En près de 150 ans, le bouleversement serait considérable. La situation serait encore plus grave si le scénario RCP 8.5 se réalisait. Avec des augmentations pouvant atteindre près 5°C, le climat serait bouleversé. À ce stade, les scientifiques ont encore du mal à évaluer les conséquences sur la biodiversité terrestre et marine, la forêt, les ressources en eau... Avec le RCP 8.5, les concentrations de dioxyde de carbone seraient considérables dans l'atmosphère, ce qui renforcerait l'acidification de la mer. Ce phénomène aurait un impact sur les ressources halieutiques, les écosystèmes marins, les coquilles calcaires des huîtres et des moules qui seraient agressées par l'effet corrosif...

Les incertitudes relatives au climat de demain sont encore grandes, mais les résultats de cette étude permettent de prendre conscience de l'ampleur du changement climatique qui accentuerait la vulnérabilité la commune du Pradet et les territoires limitrophes. La gestion des pratiques forestières, agricoles et touristiques permettra de limiter les impacts et les risques (incendies, par exemple), mais la faiblesse des ressources en eau accentuera probablement les difficultés lors des périodes critiques. La variabilité interannuelle naturelle du climat jouera aussi un rôle majeur avec l'alternance d'années humides ou sèches. Le climat tendra vers une répétition des événements extrêmes comme les canicules. Les risques de pluie torrentielles seront aussi élevés qu'aujourd'hui, voire davantage, dans la mesure où l'énergie dans l'atmosphère serait potentiellement plus élevée.

1.2.5. Résultats des indicateurs modélisés spatialisés

L'échelle spatiale de 8 km des points de grille des modèles Euro-Cordex est suffisante pour donner des tendances générales à l'échelle d'un territoire, mais elle reste insuffisante pour différencier la répartition des variables climatiques à échelle fine. Pour produire des indicateurs à haute résolution spatiale, une méthode complémentaire à la modélisation a été développée pour cette étude et appliquée pour caractériser le climat présent et futur.

Une série d'indicateurs modélisés spatiaux ont été produits pour l'aide à la décision de l'échelle locale à métropolitaine. Ils se déclinent sous forme de cartes du climat présent et futur à fine échelle spatiale couvrant l'ensemble de la métropole Toulon-Provence-Méditerranée à laquelle est rattaché le territoire du Pradet. Ces données ont pour principale vocation d'enrichir les systèmes d'information géographique (SIG) territoriaux afin d'affiner la connaissance des microclimats locaux, compléter les bases de données (bâti, forêt, agriculture...), alimenter le débat sur les mesures d'adaptation au changement climatique, renforcer la communication et la concertation entre les acteurs territoriaux (décideurs, gestionnaires, services techniques, citoyens, etc.)... Ces cartes sont précieuses en 2D ou 3D.

Avant de présenter des exemples de cartes du climat présent et futur, une description méthodologique utile à la compréhension du calcul des indicateurs spatialisés est présentée ci-après.

1.2.5.1. Quelles techniques pour produire les indicateurs modélisés spatialisés ?

De nombreuses études scientifiques et techniques concernent la connaissance du climat dans les domaines de l'agriculture, la forêt, le tourisme, l'écologie, etc., mais les résultats permettent rarement de définir le climat à fine échelle spatiale. Elles visent généralement à mettre en relation des variables d'intérêt et des paramètres climatiques afin d'expliquer le stress d'une culture ou la résistance d'une espèce forestière, par exemple.

Les stations météorologiques et les relevés des observateurs fournissent des informations locales (températures, précipitations, humidité, vent, etc.) représentatives d'un environnement qui subit des contraintes physiques et environnementales particulières : flux, altitude, orientation, pente, rayonnement, encasement, proximité de la forêt ou de la mer... La dimension locale est intrinsèque à chaque relevé. Sur le long terme, ces données géolocalisées, définies par des coordonnées géographiques, permettent de caractériser un climat à une échelle temporelle. Les stations météorologiques de Météo-France, par exemple, réparties sur tout le territoire régional et national, répondent parfaitement à cette problématique.

La modélisation, d'un point de vue général, apporte une dimension spatiale en deux ou trois dimensions qui permet d'estimer en tout point de l'espace la valeur d'une variable quelconque à l'échelle globale, régionale ou locale. La qualité des estimations dépend des données d'entrée, des algorithmes développés et de la chaîne de traitement mise en œuvre. La modélisation a donc le mérite de produire des estimations spatialisées ou locales par extraction de données, à une échelle temporelle donnée. C'est le cas des indicateurs modélisés locaux présentés en amont. La résolution spatiale reste cependant un écueil, même si les données sont corrigées ou ajustées par rapport aux observations (le nombre de mesures locales de référence diffère selon la densité du réseau de stations météo) : en effet, les données issues du portail DRIAS, par exemple, fournissent des estimations selon une grille de points distants de 8 km, ce qui signifie qu'une valeur « corrigée » de température de l'air ou de précipitations reste toutefois une moyenne sur une surface de 64 km² (8 x 8 km). Malgré les limites d'usage, cette contrainte peut s'avérer acceptable selon l'échelle spatiale considérée et le profil du territoire (absence de relief structurant sur la zone d'intérêt, par exemple), ce qui est le cas de la commune du Pradet. En revanche, la question est plus épineuse dès que le terrain devient plus accidenté présentant une morphologie plus complexe.

En complément des mesures locales et de la modélisation, les techniques géostatistiques donnent la possibilité de spatialiser des données locales en prenant en compte des variables explicatives dérivées du modèle numérique de terrain (MNT), de l'occupation de surface, de variables biophysiques (indice foliaire ou indice de végétation par exemple)... À partir d'une série de données locales et de variables explicatives, ces techniques permettent d'estimer en tout point de l'espace une valeur en fonction du poids de chaque variable explicative.

Pour cartographier à haute résolution spatiale le climat présent et futur, les mesures locales, la géostatistique et les projections climatiques (Euro-Cordex) issues des nouveaux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP) mises à disposition sur le portail DRIAS ont été combinées dans cette étude.

1.2.5.2. Principe de caractérisation du climat présent et futur du Pradet à fine échelle spatiale

Pour cartographier le climat futur du territoire du Pradet et par extension de la métropole Toulon-Provence-Méditerranée (TPM), la méthodologie générale mise en application dans cette étude vise à caractériser le climat présent (1996-2015) à haute résolution spatiale et d'appliquer des deltas (ou anomalies) issus des sorties de modèles régionaux en fonction des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre RCP aux horizons 2026-2045 (2035) et 2046-2065 (2055). Dans cette logique, on suppose que le climat futur à l'échelle locale répondra aux mêmes mécanismes qu'aujourd'hui (effet d'altitude, d'orientation, de pente, de rugosité, d'encaissement, de distance à la mer...) et que les relations entre petite et grande échelle seront conservées dans le temps. Ce postulat est acceptable dans la mesure où les arguments contraires ne sont pas démontrés jusqu'ici. Cette démarche se situe dans la catégorie des méthodes de régionalisation statistiques du type « deltas » ou « anomalies ». Par anomalies, on entend les différences ou écarts constatés entre les sorties de modèles régionaux sur une période de référence donnée et les sorties de ces mêmes modèles sur une période ultérieure équivalente à la durée de la période de référence.

Pour cartographier le climat futur à haute résolution spatiale, on « perturbe » le climat présent en appliquant les anomalies aux valeurs de la période de référence qui sont estimées en tout point de l'espace à l'aide d'une méthode géostatistique éprouvée. Cette méthode géostatistique spatialise les mesures locales (points correspondant aux stations météo) en prenant en compte des variables physico-environnementales qui expliquent la répartition spatiale des paramètres climatiques. Ces variables explicatives doivent conserver leur pertinence dans le temps, ce qui exclut d'entrée un certain nombre de variables. L'occupation de surface, par exemple, est une variable qui a une influence sur la répartition spatiale des températures de l'air, mais comme elle évolue dans le temps (urbanisation, recul ou extension des espaces agricoles ou forestiers, etc.), la variable n'est ici pas sélectionnée pour cartographier le climat présent. Dans le cas contraire, les résultats futurs seraient faussés car l'occupation de surface va évoluer.

Par ailleurs, cette méthode de régionalisation statistique ne prend pas en compte la dynamique de l'atmosphère sur toute sa colonne. Les valeurs des paramètres climatiques sont estimées au niveau des capteurs météorologiques (2 m de hauteur pour les températures de l'air par exemple).

Pour appliquer la méthode des anomalies décrite ci-dessus, il est essentiel de déterminer le plus finement possible le climat d'aujourd'hui. C'est une étape déterminante qui conditionne la qualité des résultats.

1.2.5.3. Méthodologie générale pour cartographier le climat présent

Pour mener cette étude prospective du climat et caractériser le climat présent, le logiciel LISDQS, développé par le laboratoire ThéMA de l'université de Franche-Comté et le CNRS, a été utilisé par GeographR qui détient une licence (n°L12326-01) depuis 2013. Ce logiciel permet de « rassembler, gérer et traiter l'ensemble des informations nécessaires au fonctionnement des interpolations ». Il réunit dans un même outil l'ensemble des procédures nécessaires à l'interpolation, répond aux besoins de la recherche (facteurs structurants des éléments du climat par exemple) et facilite la production de cartes. LISDQS est utilisé dans de nombreux domaines : agroclimatologie, énergie, chimie de l'atmosphère, sciences de la Terre... Des travaux académiques à différents niveaux d'échelle ont été conduits : pluviométrie du bassin amazonien ; climatologie de la France : base « Cybergéo » ; biogéographie au Svalbard ; prospective climatique (Alpes du Sud, métropole Aix-Marseille-Provence)...

LISDQS privilégie deux directions pour améliorer les estimations : la recherche de prédicteurs efficaces et la mise au point d'une technique d'interpolation spatiale innovante. Les données de base à intégrer dans LISDQS sont les mesures locales (météo, polluants...) et le modèle numérique de terrain (MNT) dont sont dérivés l'altitude, la pente, l'orientation des versants, la rugosité, le rayonnement global théorique, l'encaissement, les formes topographiques, le cosinus et le sinus des versants... En option, selon le type d'étude, il est possible de prendre en compte de nombreuses variables explicatives comme l'occupation du sol, l'indice de végétation normalisé (NDVI), l'indice foliaire (LAI), le cadastre d'émissions, les émissions linéaires, les distances euclidiennes (à la forêt, à la ville, à la mer), la densité de la population, la densité du bâti...

Pour cartographier le climat présent, il était nécessaire d'acquérir une série de données climatiques sur une période de référence d'au moins 20 ans sur l'ensemble du périmètre d'étude. Les principaux producteurs régionaux de données (Météo-France, CIRAME, Inra) ont été consultés. Compte tenu des archives disponibles et de la densité du réseau de stations, le choix de Météo-France s'est imposé. Pour bénéficier d'un nombre suffisant de stations locales pour l'interpolation spatiale et d'une longue série de données continue, mais aussi pour limiter les dépenses liées à l'achat des archives météo, un historique de 20 ans de données mensuelles a été commandé pour l'ensemble des stations de la région afin de construire des indicateurs robustes. La série de données concerne les températures minimales de l'air (Tmin), les températures maximales de l'air (Tmax) et le cumul de précipitations (RR), soit 3 paramètres climatiques. Les températures moyennes (Tmoy) sont calculées de la manière suivante : $(T_{\text{min}} + T_{\text{max}}) / 2$. Les températures sont exprimées en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) et les précipitations en millimètres (mm). Faute de convention avec Météo-France, l'acquisition de données journalières sur n stations x 7305 jours x n paramètres n'était pas envisageable.

Pour cette étude prospective, toutes les valeurs de températures de l'air et de précipitations des 140 stations météorologiques, en service (ou non sur certaines périodes) de décembre 1995 à novembre 2015, ont été commandées à Météo-France. Les historiques commencent en décembre 1995 afin de prendre en compte l'hiver météorologique de 1996 (décembre 1995 à février 1996). Pour information, les données brutes acquises ne peuvent pas être cédées à un tiers, selon les termes de la convention qui lie Météo-France et GeographR.

Pour les cartes du climat présent, les moyennes saisonnières et annuelles sont calculées à partir des données mensuelles. Tous les paramètres météorologiques ne sont pas disponibles pour le lot de stations et les archives sur la période de référence ne sont pas complètes. Les moyennes sont calculées sur un nombre suffisant de points (stations météo) pour appliquer la méthode géostatistique : 84 stations pour les moyennes de la température de l'air et 133 stations pour les cumuls de précipitations. Le nombre de points pris en compte dans LISDQS peut donc varier en fonction des archives. La Figure 10 indique la localisation des stations météo.

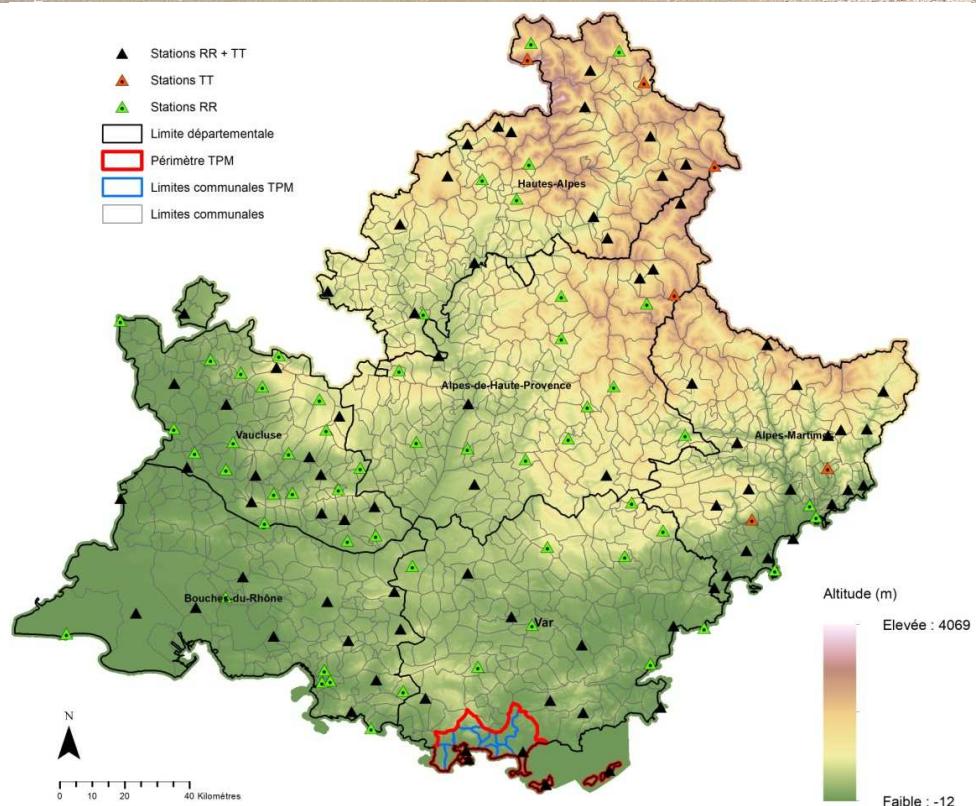
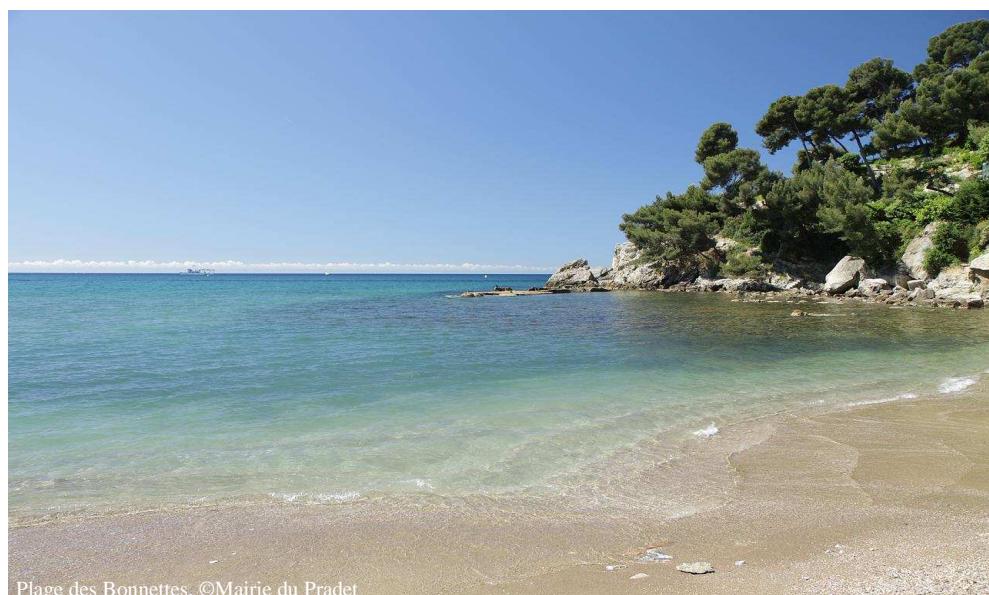


Figure 10. Le réseau de stations météorologiques utilisé pour l'interpolation spatiale

Sur le territoire de la métropole TPM, cinq stations de Météo-France effectuent quotidiennement des mesures, mais aucune sur la commune du Pradet (Figure 11).

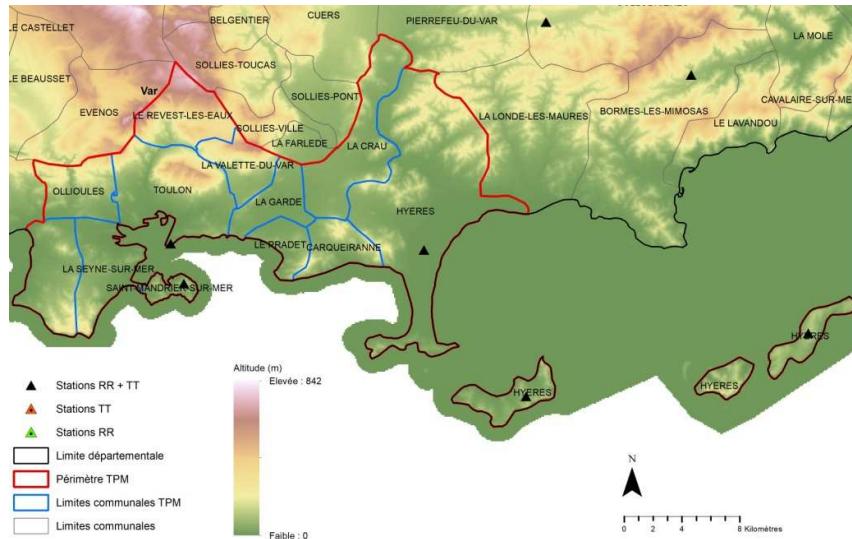


Figure 11. Le réseau de stations météorologiques utilisé à l'échelle de la métropole Toulon-Provence-Méditerranée

Cette étude prospective climatique inclut donc l'ensemble des 12 communes de la Toulon-Provence-Méditerranée. Ce périmètre permet d'assurer une continuité territoriale pour l'analyse du climat local et donne la possibilité d'ouvrir le dialogue avec les communes adhérentes afin de mettre en place des pistes d'adaptation collectives et concertées.

Il faut toutefois différencier le territoire métropolitain de TPM et le périmètre d'étude effectif. En effet, pour caractériser le climat à haute résolution spatiale, identifier les variables²¹ qui expliquent la répartition spatiale des températures de l'air et des précipitations, le périmètre d'étude comprend bien toute la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Par moyenne saisonnière, on entend la moyenne saisonnière météorologique définie par Météo-France :

- hiver : décembre à février ;
- printemps : mars à mai ;
- été : juin à août ;
- automne : septembre à novembre.

Les données locales sont introduites dans LISDQS pour être interpolées en fonction de l'influence de variables physico-environnementales, appelées « variables explicatives ».

Pour identifier les facteurs qui expliquent la répartition spatiale des moyennes de températures de l'air et de précipitations, des variables dérivées du modèle numérique de terrain²² (MNT) de l'Institut national d'information géographique et forestière (IGN) ont été intégrées à LISDQS (Figure 12). Les variables explicatives pour déterminer le climat de référence auquel sont ajoutés les deltas (ou anomalies) sont issues du MNT :

- latitude (en mètres)
- longitude (en mètres)
- altitude (en mètres)

²¹ Altitude, latitude, longitude, pente, orientation, encaissement...

²² BD ALTI® 75 m, IGN, rééchantillonnée à 100 m pour les températures et 1000 m pour les précipitations

- pente : valeur d'inclinaison par rapport à l'horizontale (0°) du plan de régression obtenu à partir du polynôme de degré 1 des altitudes contenues dans chaque fenêtre. Les valeurs s'échelonnent théoriquement de 0 à 90°
 - rugosité topographique : indicateur des irrégularités du relief (nulle en présence de plat ou sur un versant rectiligne). Elle est donnée par l'écart-type des altitudes par rapport au plan de régression
 - encaissement/surélévation topographique : moyenne arithmétique des altitudes à l'intérieur de chaque fenêtre
 - amplitude verticale des reliefs émergents
 - amplitude verticale des creux
 - volume : somme des profondeurs des creux calculée pour tous les pixels situés à la perpendiculaire entre les deux crêtes adjacentes
 - orientation des versants : évolue de 0 à 360°
 - sinus des versants : décomposition de l'orientation des versants (variation O-E)
 - cosinus des versants : décomposition de l'orientation des versants (variation N-S)
 - rayonnement global théorique : calculé pour l'équinoxe, situation moyenne, intermédiaire entre les solstices, en tenant compte des masques topographiques jusqu'à 5 km autour de chaque point.

Toutes les couches d'information sont projetées en Lambert-93, RGF-1993 (exemples de cartes de variables explicatives, Figure 12) :

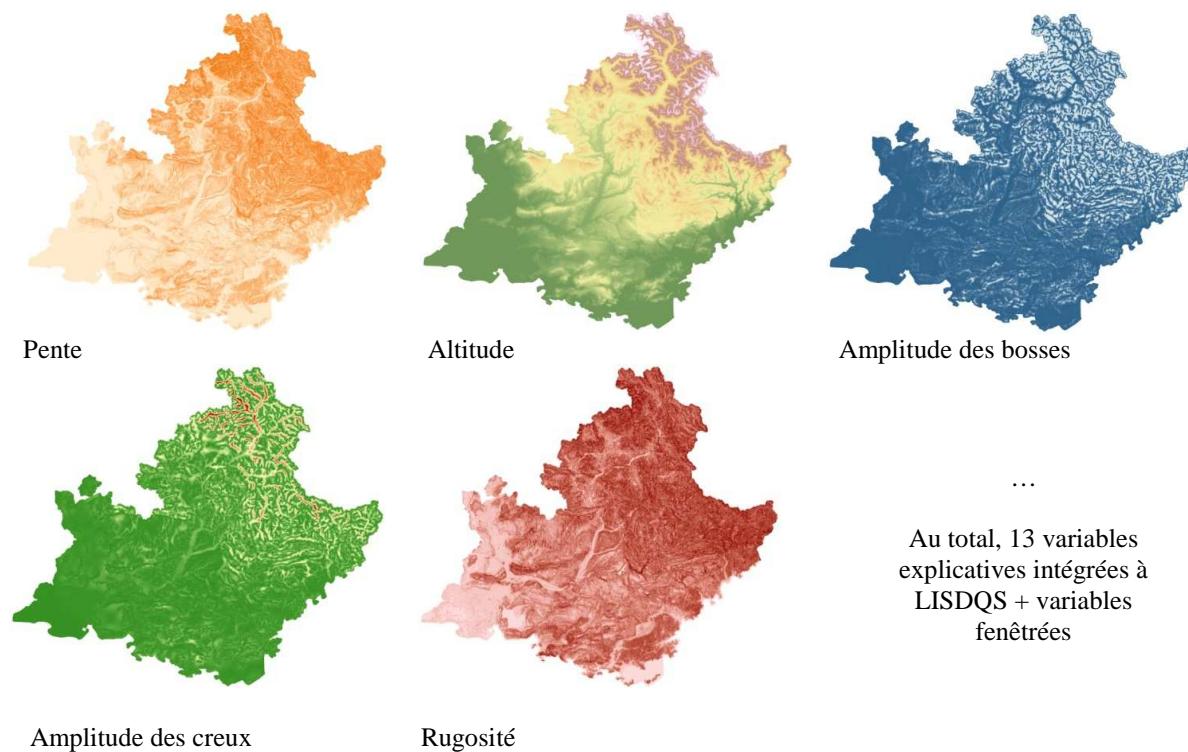


Figure 12. Exemples de variables explicatives intégrées à LISDQS à 100 m de résolution spatiale

Ces variables sont automatiquement générées par LISDQS à partir du MNT. Des tests ont été réalisés à partir de différentes fenêtres (Annexe 5) qui sont utilisées pour identifier les meilleurs régresseurs et

la régression multiple. Pour limiter les ruptures spatiales aux frontières du périmètre d'étude, la grille de référence déborde des limites administratives régionales.

1.2.5.4. Méthodologie générale pour cartographier le climat futur

À partir du climat présent défini à partir de la méthode géostatistique utilisant les données météorologiques des stations de Météo-France et les variables explicatives, il est possible d'appliquer les simulations des modèles climatiques Euro-Cordex. En effet, à partir des points de grille qui fournissent une donnée ponctuelle, des techniques permettent de spatialiser les indicateurs modélisés locaux.

L'une des solutions pour spatialiser les données est de convertir les valeurs ponctuelles en mailles (format raster), comme si les valeurs des points étaient reproduites sur une grille maillée régulière. La représentation est sous forme de pixels (Figure 3, par exemple). Mais pour spatialiser la donnée d'une manière plus homogène et régulière (sans rupture brutale) et obtenir une valeur en tout point de l'espace du périmètre d'étude pour les températures de l'air et les précipitations, la méthode d'interpolation spatiale par voisin naturel est ici appliquée (Figure 13). Pour estimer une valeur par interpolation, la technique définit le sous-ensemble d'échantillons en entrée le plus proche d'un point et applique à ce dernier une pondération sur la base de surfaces proportionnelles²³. Avec une grille de points régulière, cet outil de spatialisation fournit des résultats proches du krigage ordinaire qui a tendance à lisser les valeurs des points et à réduire le poids des sommets. Mais les résultats des deux techniques sont proches et, dans ce cas de figure, peuvent être utilisés indifféremment. L'objectif est de produire une cartographie générale des anomalies entre les climats présent et présent issus des modèles climatiques régionaux Euro-Cordex. Compte tenu de la localisation des points de grille du périmètre d'étude régional, l'application de la méthode par voisin naturel a nécessité de créer des points de grille supplémentaires (en mer par exemple) hors des limites administratives régionales, afin d'assurer la continuité spatiale aux marges du territoire régional et de couvrir les îles d'Hyères. La valeur de ces points est considérée équivalente à celle des points de grille les plus proches. Cette technique n'a pas d'impact significatif sur les résultats infrarégionaux.

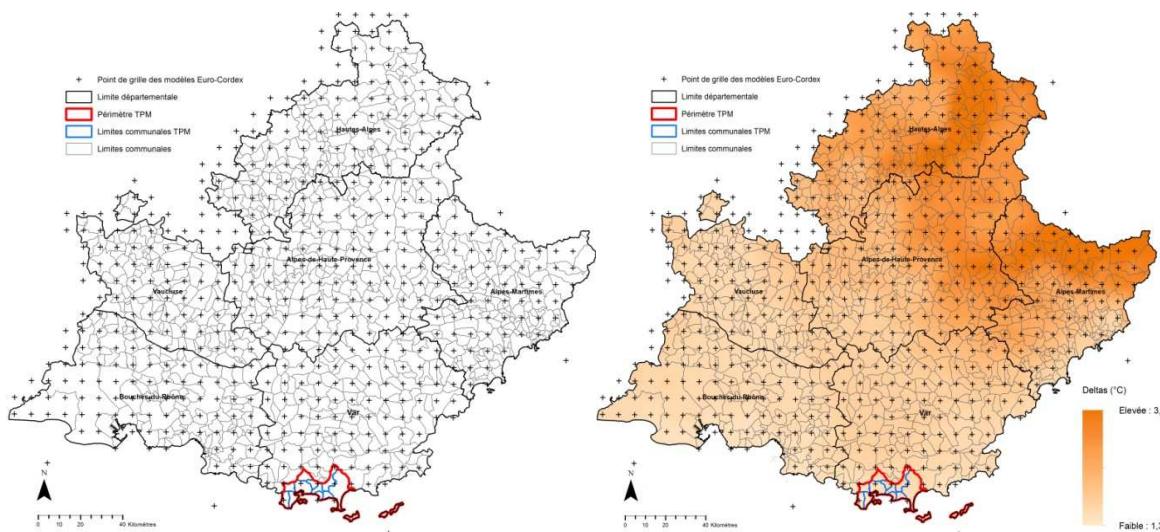


Figure 13. Interpolation spatiale par voisin naturel des deltas ou anomalies (°C) des températures maximales moyennes en hiver du scénario RCP 8.5 issus des points de grille des

²³ Sibson R., 1981, "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation", in *Interpolating multivariate Data* (chapter 2), 21-36, John Wiley & Sons, New York (1981)

modèles Euro-Cordex (médiane des résultats inter-modèles) entre 1996-2015 et 2046-2065 à l'échelle régionale

La cartographie du climat présent (période de référence) à fine échelle spatiale, réalisée à l'aide de LISDQS à partir des observations locales et des variables explicatives physico-environnementales, est bien différenciée de la cartographie du climat présent provenant des modèles Euro-Cordex, puisque les résultats du climat « réel » et du climat modélisé ne peuvent pas être comparés. Ce sont des représentations distinctes de par leurs méthodes de calcul et de production, mais aussi leur échelle spatiale. Seules les anomalies spatialisées des modèles Euro-Cordex, constatées entre la période de référence et les horizons futurs, sont appliquées aux données générées par LISDQS qui fournit la cartographie du climat présent de référence par pas de temps. Il faut donc bien distinguer les deux jeux de données.

1.2.5.5. Exemples de cartes de températures de l'air

Les cartes suivantes sont proposées en 2D et 3D (Figure 14 à Figure 17). Pour les températures de l'air, le visuel 3D sur l'ensemble du territoire métropolitain permet de mieux comprendre la répartition spatiale des variables climatiques et de discriminer plus finement les zones chaudes/froides, et offre également un potentiel de communication supérieur.

Une zone tampon de 100 m a été appliquée au-delà des limites administratives pour assurer la continuité spatiale des champs thermiques. Les valeurs de températures de l'air sont uniquement pertinentes sur les surfaces terrestres, faute de données météo en mer. À savoir : dans le périmètre de la métropole TPM, sur la période de référence (1996-2015), les résidus entre les températures de l'air observées et estimées provenant de la validation croisée sont globalement faibles à très faibles, ce qui signifie que l'indice de confiance est élevé. Pour les cartes du climat futur, la médiane des valeurs estimées par les modèles climatiques régionaux Euro-Cordex a été privilégiée.

De manière générale, les cartes de la température de l'air mettent en évidence selon la période les déterminants de la différenciation spatiale du champ thermique : altitude du relief, distance à la mer, température de fond de l'urbanisation dense et des activités humaines, insularité... La « symbolologie » peut être adaptée pour lisser ou au contraire différencier les températures estimées : étirement des valeurs, bornes des classes, palette de couleurs...

Malgré le manque de mesures urbaines (réseau ni dense, ni représentatif), une décroissance de la température est constatée du cœur urbain de la métropole vers la périphérie, tout particulièrement pour les températures minimales. Les contours généraux de l'ICU sont ainsi visibles selon le pas de temps considéré.

La commune du Pradet est dans un contexte urbain intermédiaire entre l'ICU caractérisé par une urbanisation dense et une zone relativement plus fraîche où les effets de la ville a moins d'impact. L'ouest de la commune est ainsi plus chaud que l'est. Ce constat montre combien le territoire communal est vulnérable, surtout d'avril à octobre d'ici 2055, voire 2035 selon scénario d'émissions des GES, dans la mesure où la politique d'urbanisation locale déterminera le point de basculement en lien avec le réchauffement du climat. Les zones de relief souvent moins construites et couvertes de végétation, du moins partiellement, sont des îlots de relative fraîcheur.

La dynamique de l'atmosphère sur les températures minimales et maximales de l'air est également mise en évidence sur les cartes qu'il convient d'étudier au cas par cas en fonction des besoins et des objectifs... Sur les températures maximales, la turbulence de l'air causée par l'apport d'énergie solaire, les brises, par exemple, a des effets sur la répartition spatiale.

Il faut également noter l'importante amplitude thermique sur le territoire métropolitain : jusqu'à environ 6°C entre les îles d'Hyères et le Mont Caume situé à 804 m d'altitude. Les îles de Porquerolles et de Port-Cros présentent un caractère climatique atypique, probablement accentué par l'approche géostatistique et le fenêtrage qui limite probablement l'influence de la mer.

➤ Températures minimales moyennes de l'air au mois de janvier par horizon

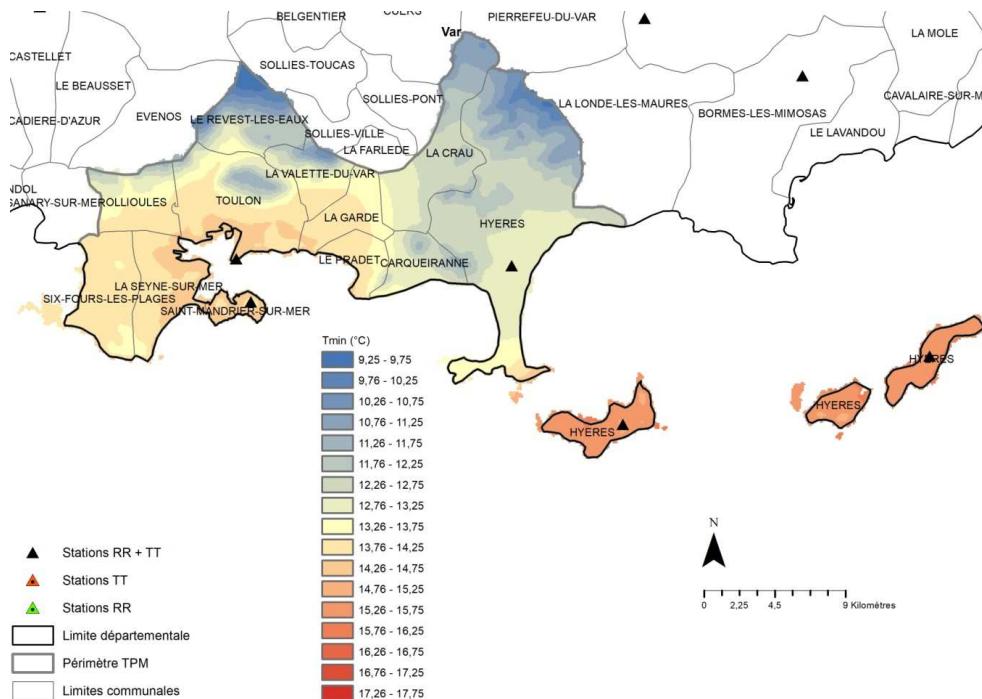


Figure 14. Température minimale de l'air moyenne en octobre, période 1996-2015
 (source : GeographR)



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME



Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

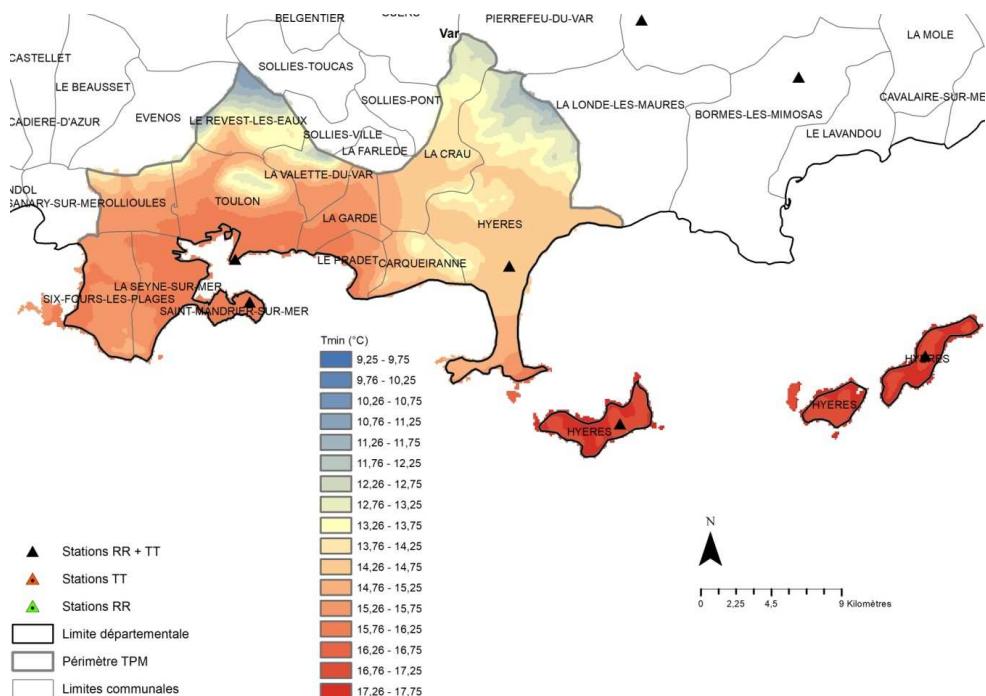


Figure 15. Température minimale de l'air moyenne en octobre, horizon 2046-2065, RCP 8.5
(source : GeographR)

➤ Températures maximales moyennes de l'air en été (juin-août) par horizon

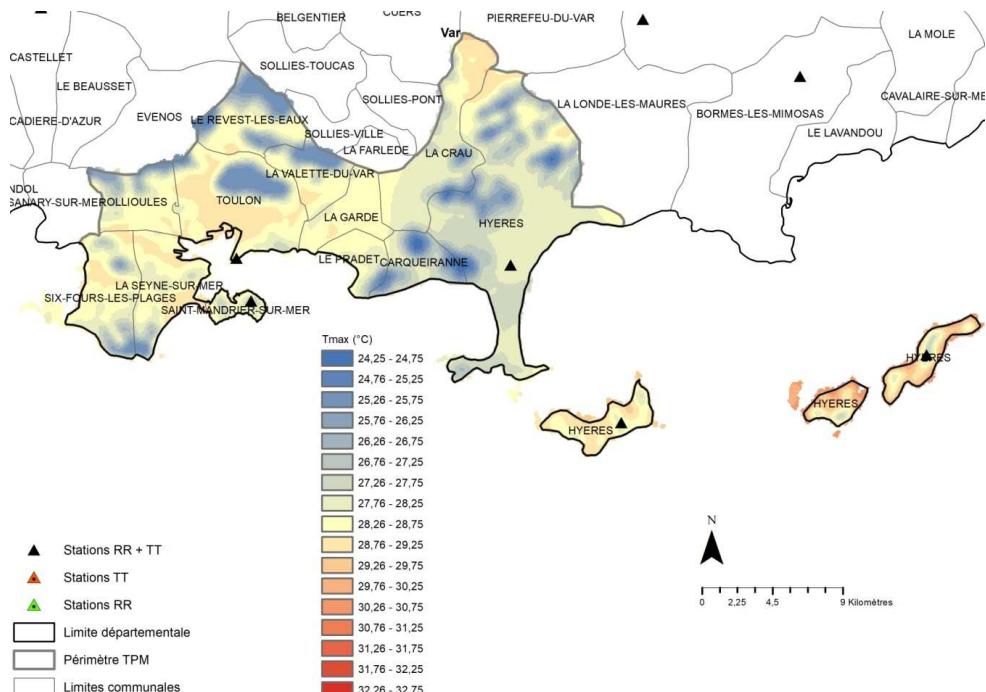


Figure 16. Température maximale de l'air moyenne en été, période 1996-2015
(source : GeographR)

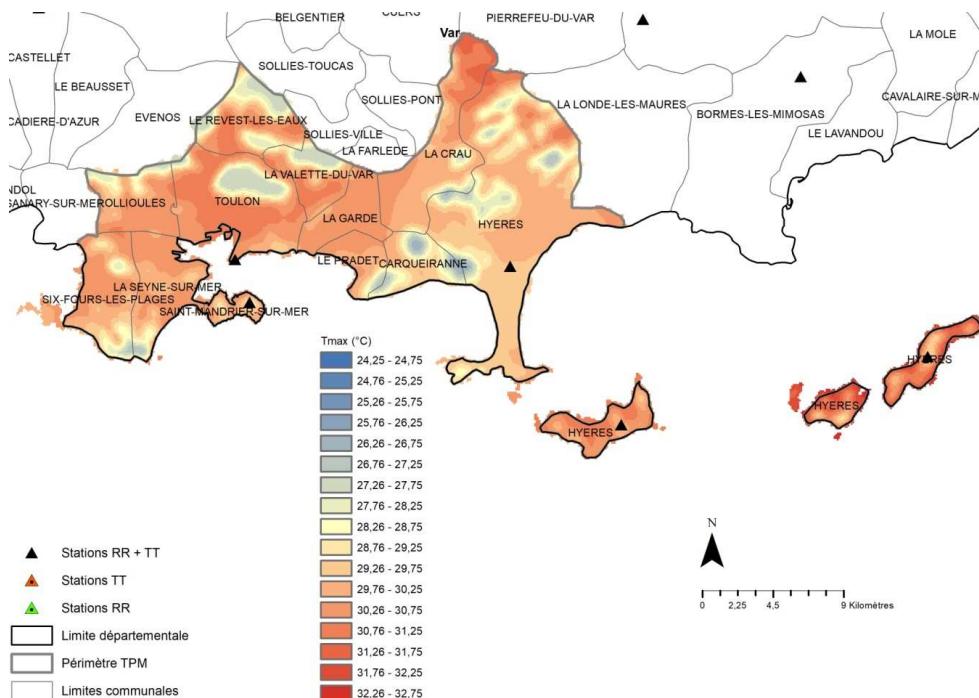


Figure 17. Température maximale de l'air moyenne en été, horizon 2046-2065, RCP 8.5
(source : GeographR)

Chaque carte disponible est à analyser au cas par cas. Il n'est pas question ici de détailler tous les résultats. Les tendances locales sont données au niveau des indicateurs locaux. La remarque est la même pour les précipitations.

Pour exemple aussi, une carte de la température maximale moyenne (Figure 18) à l'échelle de la métropole TPM en 3D (relief avec échelle des hauteurs légèrement augmentée), îles de Porquerolles et de Port-Cros exclues) :

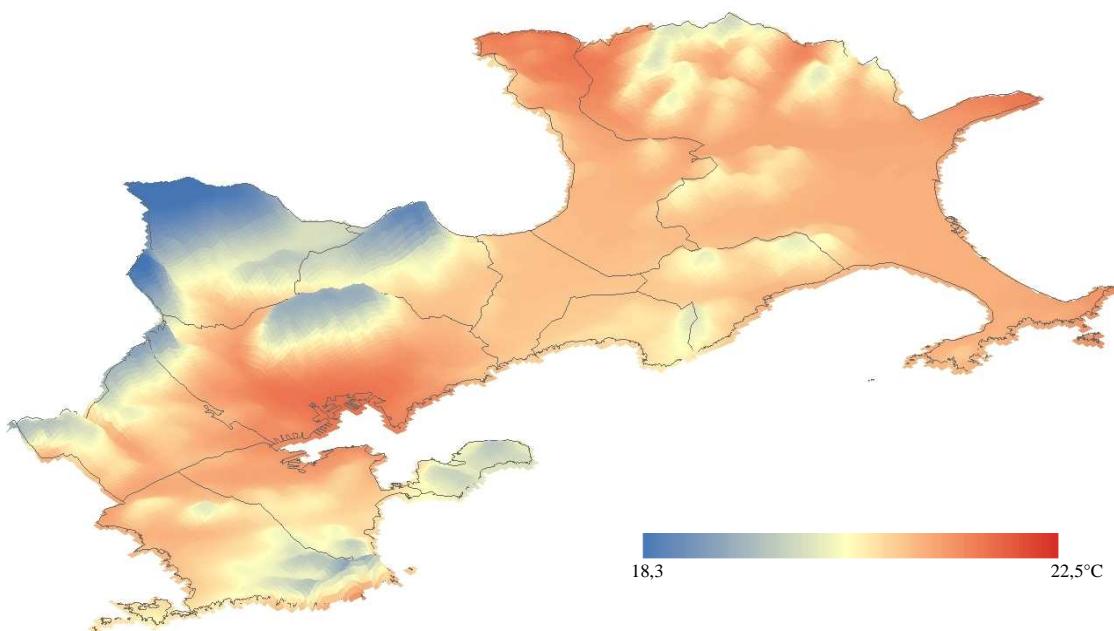


Figure 18. Température maximale moyenne annuelle, période 2026-2045, RCP 4.5
(source : GeographR)

1.2.5.6. Exemples de cartes de cumuls de précipitations

Une série de cumuls de précipitations est présentée ici à titre indicatif (Figure 19 à Figure 22). Une zone tampon de 1000 m a été appliquée au-delà des limites administratives pour assurer la continuité spatiale des champs pluviométriques.

Comme pour les températures de l'air, dans le périmètre de la métropole TPM, sur la période de référence (1996-2015), les résidus entre les cumuls de précipitations observés et estimés issus de la validation croisée sont globalement faibles, ce qui signifie que l'indice de confiance est élevé. Comme pour les températures, pour le climat futur, la médiane des valeurs estimées par les modèles climatiques régionaux Euro-Cordex a été exploitée.

De manière générale, les précipitations sont davantage régies par un gradient ouest-est que par l'altitude, même si les cumuls annuels moyens mettent en évidence un gradient altitudinal. En effet, les cumuls de précipitations les plus faibles se situent entre Six-Fours-les-Plages et Toulon, et les plus importantes vers Hyères. La commune du Pradet, comme pour les températures de l'air, est dans une situation intermédiaire. Comme le signal du changement climatique pour les précipitations est moins marqué que sur les températures de l'air en fonction des horizons futurs et des RCP, il est difficile de tirer des conclusions générales, même si des tendances se dessinent : la saison estivale deviendrait plus sèche par exemple. Il convient d'analyser chaque carte par horizon et RCP.

➤ Cumul mensuel moyen des précipitations au mois de mars par horizon

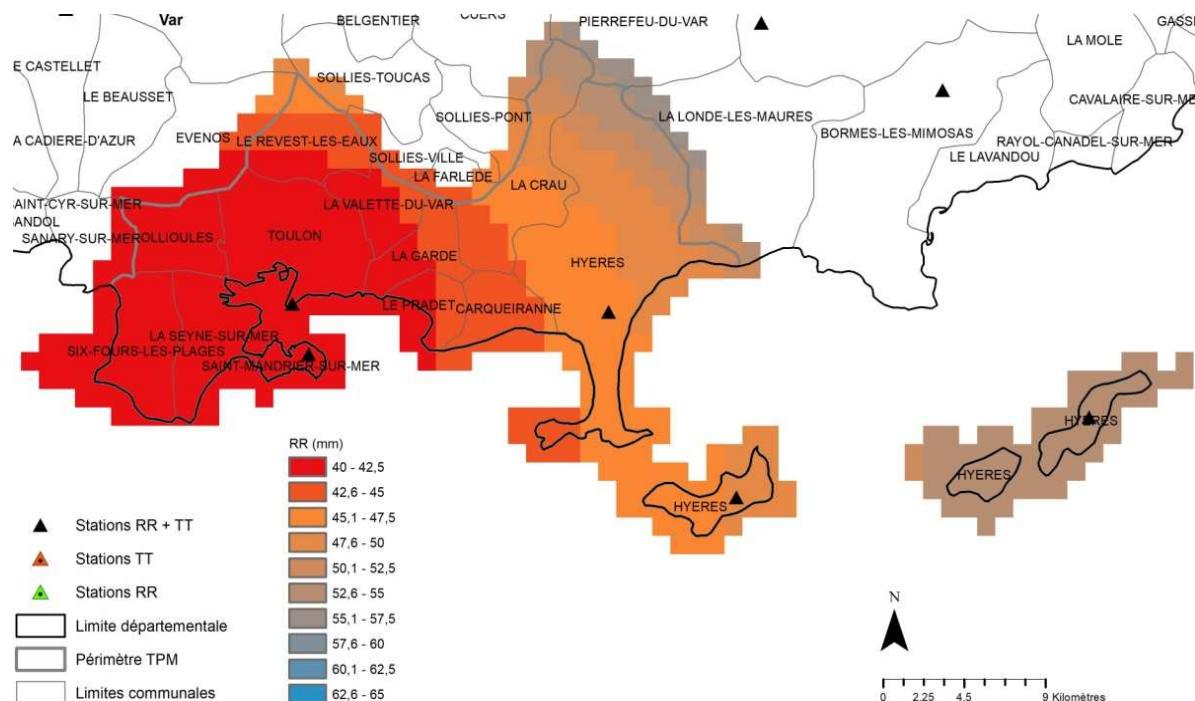


Figure 19. Cumul moyen mensuel des précipitations en mars, période 1996-2015
(source : GeographR)

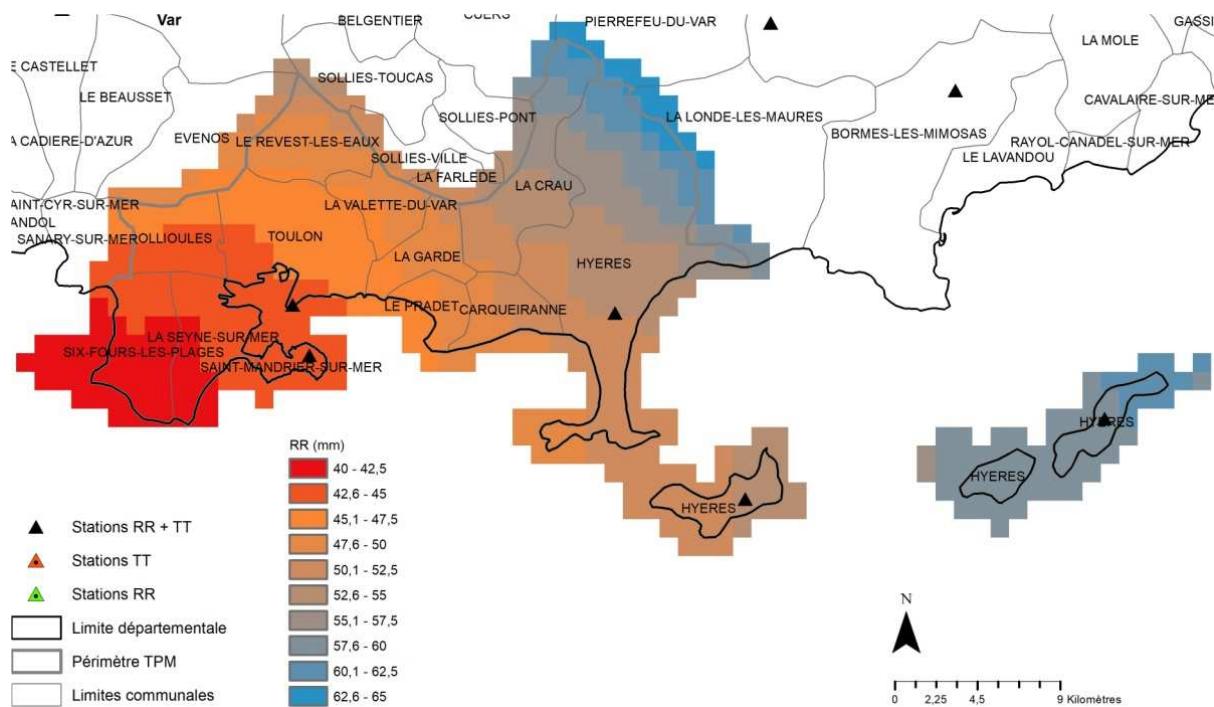


Figure 20. Cumul moyen mensuel des précipitations en mars, horizon 2046-2065, RCP 4.5
(source : GeographR)

➤ Cumul annuel moyen des précipitations par horizon

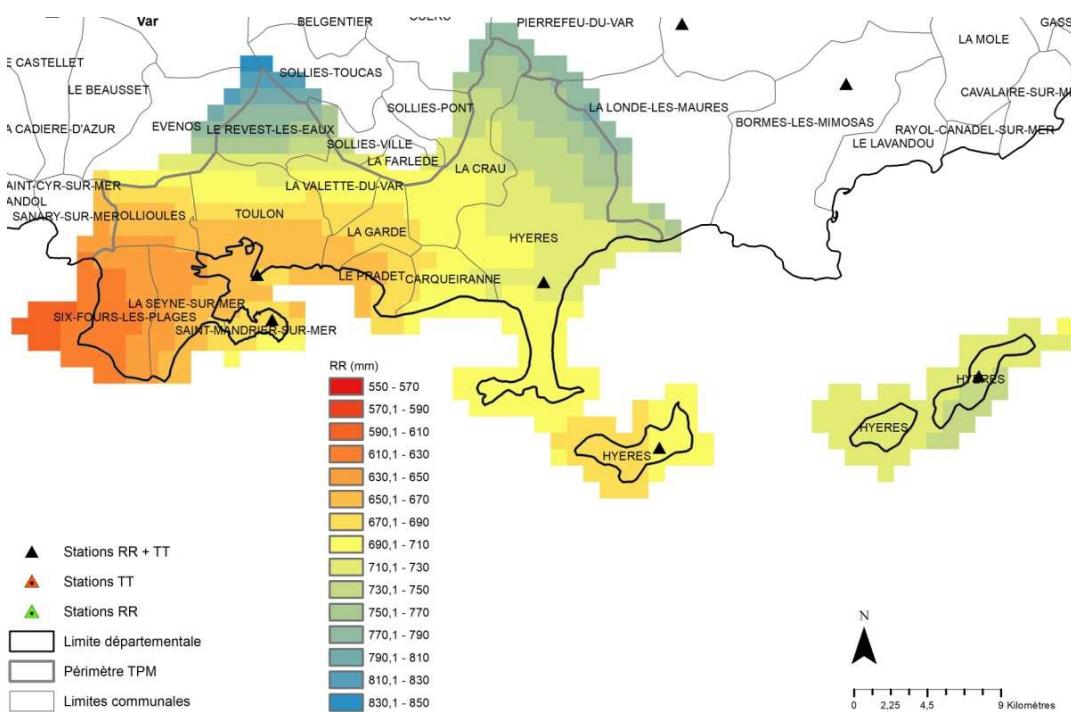


Figure 21. Cumul annuel moyen des précipitations, période 1996-2015
(source : GeographR)

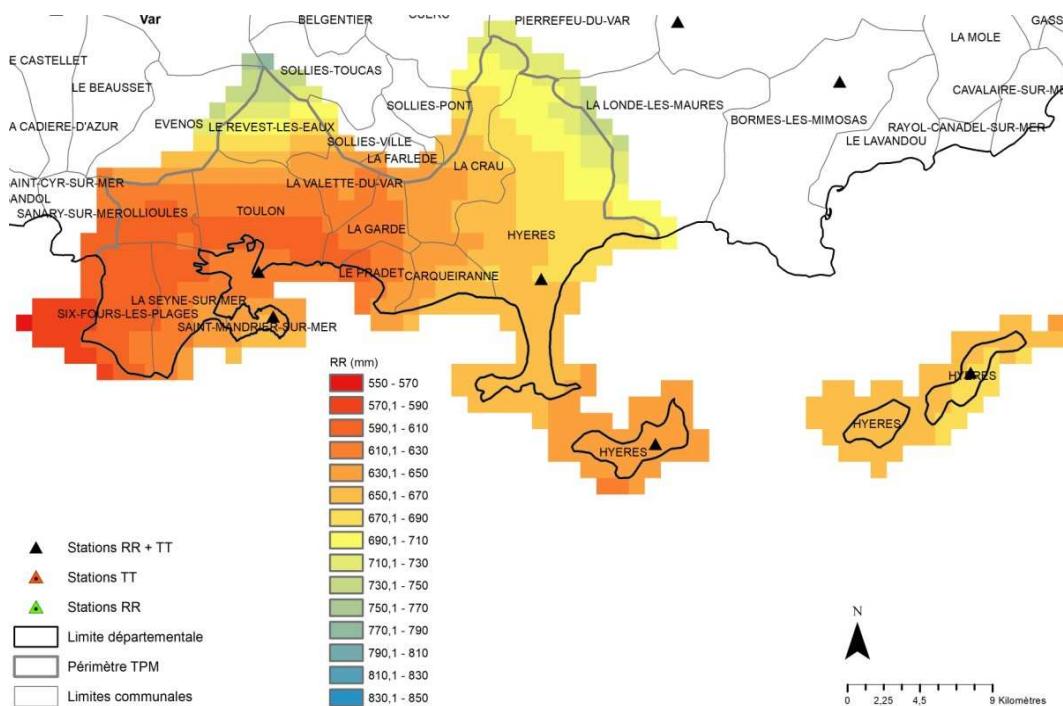


Figure 22. Cumul annuel moyen des précipitations, horizon 2026-2045, RCP 8.5
(source : GeographR)

1.2.6. Tendances climatiques futures à l'échelle régionale et élévation du niveau de la mer

Pour compléter les indicateurs locaux et mieux comprendre le contexte régional dans lequel la commune du Pradet se situera, une sélection d'indicateurs régionaux est proposée. Ces résultats sont extraits du portail ClimatHD.

D'après le modèle climatique régional Aladin utilisé par Météo-France pour produire les indicateurs suivants, la hausse de la **température** de l'air minimale, maximale et moyenne sera généralisée à l'échelle régionale jusqu'en 2050, quel que soit le scénario socio-économique considéré. Après 2050, l'évolution de la température diffère selon le scénario RCP : seul le scénario RCP 2.6 stabilise les températures. Pour le scénario RCP 8.5 le plus pessimiste (sans politique climatique), le réchauffement est susceptible d'atteindre +5°C d'ici la fin du XXI^{ème} siècle.

La température moyenne annuelle, par exemple, illustre cette évolution (Figure 23) :

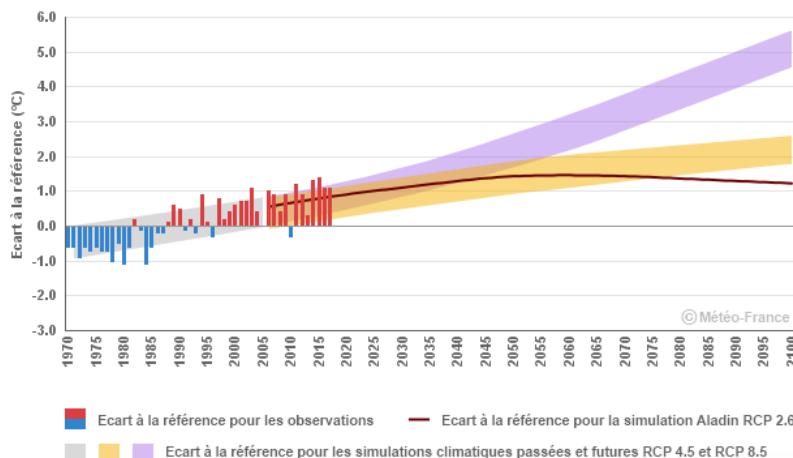


Figure 23. Température moyenne annuelle en région Provence-Alpes-Côte d'Azur : écart à la référence 1976-2005 : observations (stations météo) et simulations climatiques pour 3 scénarios d'évolution RCP 2.6, 4.5 et 8.5 (source : Météo-France)

Le constat est le même pour la température moyenne hivernale (Figure 24) avec une hausse pouvant atteindre 4 à 5°C en 2100 :

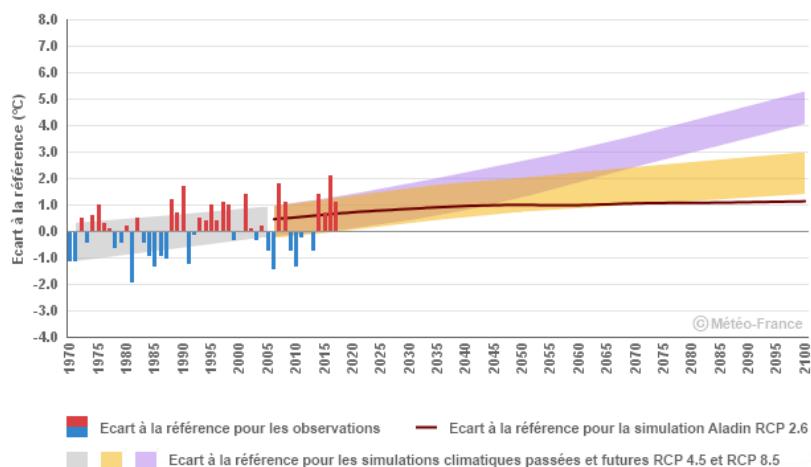


Figure 24. Température moyenne hivernale en région Provence-Alpes-Côte d'Azur : écart à la référence 1976-2005 : observations (stations météo) et simulations climatiques pour 3 scénarios d'évolution RCP 2.6, 4.5 et 8.5 (source : Météo-France)

La hausse est encore plus significative pendant la période estivale (Figure 25). Selon le RCP 8.5, elle dépasserait les +6°C, ce qui est considérable :

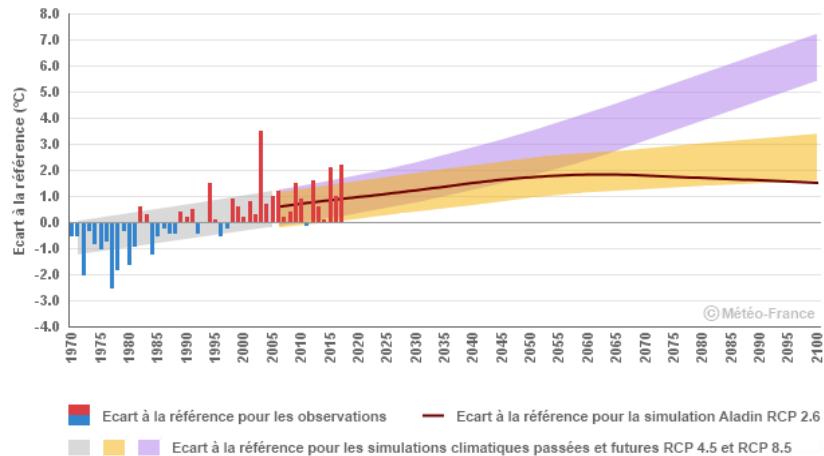


Figure 25. Température moyenne estivale en région Provence-Alpes-Côte d'Azur : écart à la référence 1976-2005 : observations (stations météo) et simulations climatiques pour 3 scénarios d'évolution RCP 2.6, 4.5 et 8.5 (source : Météo-France)

La hausse de la température sera effective sur les températures minimales et maximales. En été, le réchauffement devrait provoquer une augmentation significative des journées chaudes (supérieures ou égales à 25°C) à l'échelle régionale : la région connaîtrait plus de 140 journées chaudes selon le scénario RCP 8.5 à la fin du siècle contre environ 80 sur la période 1976-2005, soit une augmentation de 52 jours. D'ici 2100, le gel reculerait de 12 jours par an en plaine par rapport à la période 1976-2005 selon le scénario RCP 4.5 et 19 jours selon le RCP 8.5.

Pour les **précipitations**, le signal du changement climatique n'est pas très marqué (Figure 26) :

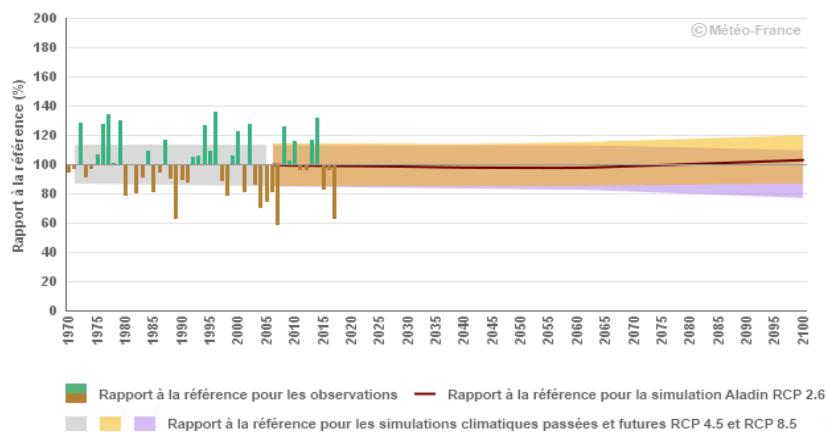


Figure 26. Cumul annuel des précipitations en région Provence-Alpes-Côte d'Azur : rapport à la référence 1976-2005 : observations (stations météo) et simulations climatiques pour 3 scénarios d'évolution RCP 2.6, 4.5 et 8.5 (source : Météo-France)

Ainsi, à l'avenir, les précipitations annuelles évolueront peu à l'échelle régionale, mais ce constat masque les contrastes saisonniers et la variabilité interannuelle qui caractérisera encore le climat méditerranéen de toute la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Cette variabilité est exprimée au niveau des observations avec une succession d'années et/ou de périodes sèches et humides. En hiver, à l'échelle régionale, les cumuls de précipitations moyens devraient se maintenir jusqu'à la fin du siècle. Par contre, en été, ils diminueront selon le RCP 8.5 après 2050 (Figure 27). Les étés les plus secs seraient ainsi encore plus marqués qu'aujourd'hui. Avec la combinaison des fortes des températures

maximales de l'air, l'évapotranspiration des végétaux serait encore plus intense et les ressources en eau seraient affectées.

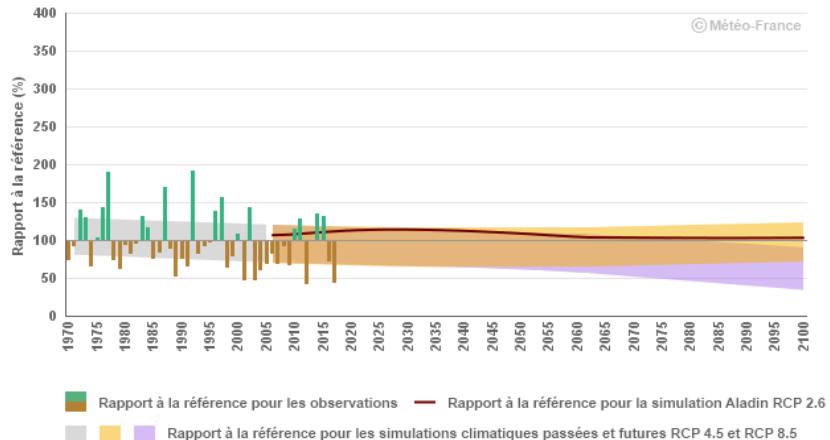


Figure 27. Cumul estival des précipitations en région Provence-Alpes-Côte d'Azur : rapport à la référence 1976-2005 : observations (stations météo) et simulations climatiques pour 3 scénarios d'évolution RCP 2.6, 4.5 et 8.5 (source : Météo-France)

L'assèchement estival serait ainsi accentué, mais ce phénomène serait généralisé toutes saisons confondues, selon Météo-France, avec un allongement de la période de sol sec qui toucherait notamment la végétation et les cultures non irriguées. L'allongement moyen de la période de sol sec varierait entre 2 et 4 mois en fonction des scénarios socio-économiques. L'humidité moyenne du sol en fin de siècle « pourrait correspondre aux situations sèches extrêmes d'aujourd'hui » (Figure 28).

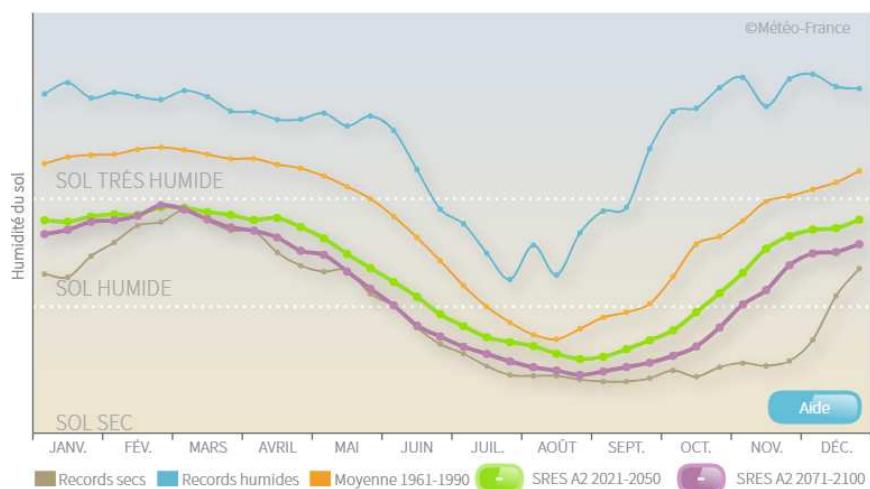


Figure 28. Comparaison du cycle annuel d'humidité du sol en Provence-Alpes-Côte d'Azur entre la période de référence climatique (1961-1990) et les horizons temporels proches (2021-2050) et lointains (2071-2100) au cours du XXI^{ème} siècle (scénario pessimiste)

Parmi les indicateurs climatiques régionaux qui précisent quelle sera la situation climatique générale dans laquelle s'inscrit la commune du Pradet et la métropole TPM à l'avenir, il est important de souligner que les **besoins en climatisation** augmenteraient jusqu'en 2050, tous scénarios confondus. Dans la seconde moitié du siècle, les tendances diffèrent. Selon le scénario le plus pessimiste, les

degrés-jour annuels de climatisation seraient plus que triplés à fin du siècle par rapport à aujourd’hui (Figure 29).

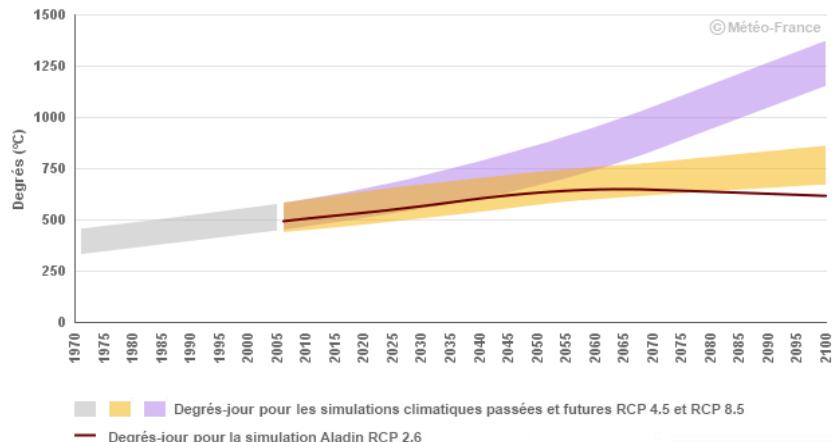


Figure 29. Évolution des degrés-jour annuels de climatisation en Provence-Alpes-Côte d’Azur

À l’inverse, les besoins en chauffage diminuerait quel que soit le scénario. Selon le RCP 8.5, la baisse serait d’environ 4 % par décennie jusqu’en 2100.

Concernant l’**élévation du niveau de la mer**, la problématique est également majeure²⁴. La hausse du niveau des mers est principalement causée par la dilatation des océans résultant de l’augmentation de la température de l’eau, mais aussi de la fonte des calottes glaciaires. En Méditerranée, la température de la mer a augmenté ces 30 dernières décennies. Aux îles Medes en Catalogne, par exemple, la température de l’eau augmente de +0,04°C par an depuis les années 1970 et l’élévation du niveau de la mer est de l’ordre 2,6 mm par an à Marseille. D’ici 2100, la température de la mer est susceptible d’augmenter de +4°C et la salinité de 0,5 à 0,9 PSU²⁵ en fonction des émissions de gaz à effet de serre et donc des scénarios socioéconomiques. L’effet de dilatation thermique provoquerait seul une hausse du niveau de la mer Méditerranée de 45 à 60 cm. Combiné à la fonte des glaces, le niveau de la mer Méditerranée s’élèverait de 55 cm selon le scénario RCP 4.5 et 80 cm selon le RCP 8.5 à la fin du siècle, avec un fort impact sur l’érosion des plages sableuses (avec disparition possible selon la configuration physique) et rocheuses. Mais, d’après les scientifiques, les incertitudes relatives à l’accélération de la fonte des calottes du Groenland et de l’Antarctique sont encore nombreuses. Les chercheurs n’excluent pas une élévation de plusieurs mètres du niveau de la mer, ce qui aurait des répercussions considérables sur le littoral du Pradet et de la métropole TPM, notamment au niveau de la presqu’île de Giens.

En définitive, l’évolution du climat au Pradet, comme dans toute la région, s’avèrera problématique avec une augmentation généralisée des températures et une tendance à la baisse des précipitations en été, une multiplication des événements extrêmes (canicules, sécheresse...). La proximité de la mer modèrera la température par rapport à l’arrière-pays, mais la hausse sera malgré tout très significative avec des effets sur les écosystèmes marins et terrestres, la vie quotidienne des Pradétants, les ressources en eau, l’agriculture, la forêt, le tourisme... Tout doit être mis en œuvre à l’échelle locale et globale pour éviter le scénario socio-économique le plus pessimiste (RCP 8.5) afin d’éviter un bouleversement climatique sans précédent en l’espace d’un siècle. L’élévation du niveau de la mer liée

²⁴ *La mer et le littoral de Provence-Alpes-Côte d’Azur face au changement climatique*, Les cahiers du GREC-PACA édités par l’Association pour l’innovation et la recherche au service du climat (AIR), mai 2017, 48 pages. ISBN : 9782956006046

²⁵ 1 psu : 1 g de sel par kg d’eau de mer

à la dilatation de la mer et la fonte des glaces reste une problématique grave qui nécessite une surveillance permanente.

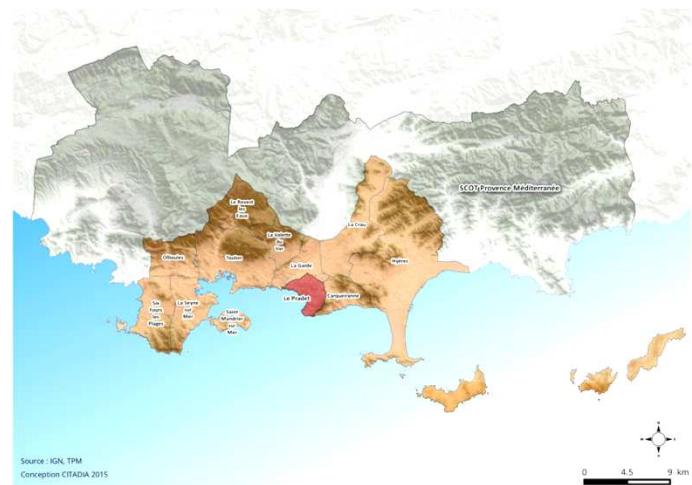
2. Caractérisation de l'aménagement du territoire et des infrastructures

2.1. Situation de la commune du Pradet

Le Pradet est une commune littorale située à environ dix kilomètres à l'est de Toulon et 13 km à l'ouest d'Hyères. Elle est limitrophe avec la commune de La Garde au nord et la commune de Carqueiranne à l'est. La superficie du territoire communal est de 997 ha.

La composition de l'espace communal est notamment marquée par :

- au nord : la plaine humide de l'Eygoutier, dénommée « Le Plan » ;
- au sud : un linéaire de 7 km de côtes composé d'éléments variés (plages, falaises, criques...) ;
- à l'est, le massif forestier de la Colle Noire.



Dans cet environnement, deux principaux pôles d'urbanisation présentent des différences marquées dans leurs morphologies :

- > le centre, village-rue autour duquel se sont réalisées les extensions ;
- > le pôle Garonne-Oursinières.

2.2. Le contexte en matière d'aménagement

Une commune littorale et maritime

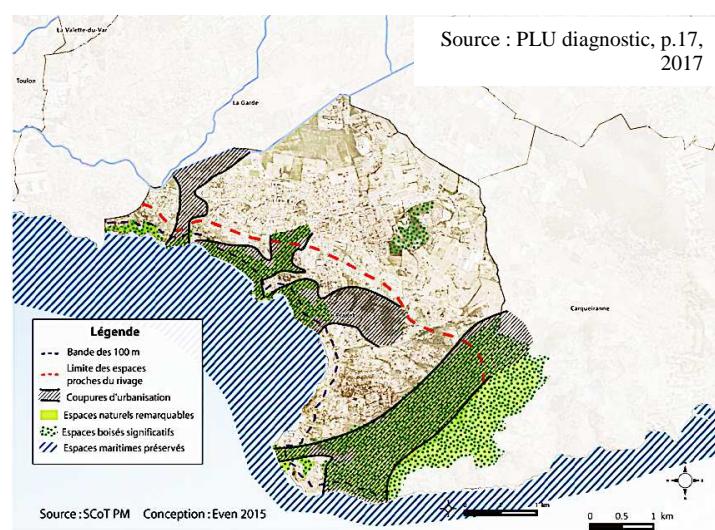
> Loi littorale

Aux termes des articles L.121-21 du code de l'urbanisme, « pour déterminer la capacité d'accueil des espaces urbanisés ou à urbaniser, les documents d'urbanisme doivent tenir compte :

1/ de la préservation des espaces et milieux mentionnés à l'article L. 121-23 ;

2/ de la protection des espaces nécessaires au maintien ou au développement des activités agricoles, pastorales, forestières et maritimes ;

3/ des conditions de fréquentation par le public des espaces naturels, du rivage et





Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

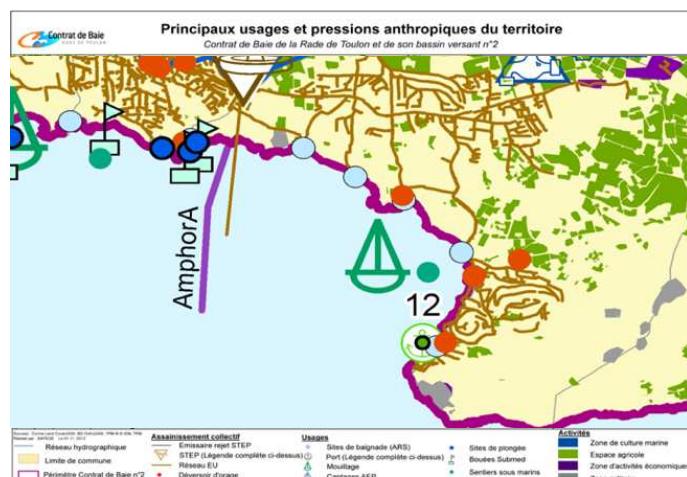
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



des équipements qui y sont liés.

Dans les espaces urbanisés, ces dispositions ne font pas obstacle à la réalisation des opérations de rénovation des quartiers ou de réhabilitation de l'habitat existant, ainsi qu'à l'amélioration, l'extension ou la reconstruction des constructions existantes. ». En outre, le plan local d'urbanisme doit prévoir des espaces naturels présentant le caractère d'une coupure d'urbanisation.

Les dispositions de la loi littorale entendent contribuer à la protection de la bande côtière face aux aléas climatiques. Sa révision inscrite dans le projet de Loi Elan vise à renforcer sa capacité à agir face aux risques d'érosion et de submersion. Il s'agirait principalement d'octroyer aux collectivités des outils juridiques novateurs : bail réel immobilier littoral (BRILi), zones d'activité résiliente et temporaire (ZART), stratégie locale de gestion du trait de côte.



> Parc National de Port-Cros

La commune fait partie intégrante du Parc national de Port-Cros. À dominante marine, celui-ci représente 700 ha de terres émergées et 1288 ha de surfaces marines. Il comprend les îles de Port-Cros, de Bagaud, l'îlot de la Gabinière et du Rascas et Le Pradet.

Le parc s'organise autour de l'île de Port-Cros et de Porquerolles, et prend en compte l'aire maritime adjacente qui englobe la commune du Pradet qui fait aussi partie de l'aire optimale d'adhésion. Les restrictions spécifiques à la protection de l'aire maritime concernent principalement les activités de pêche et chasse en mer.

Les préconisations de la charte applicables au Pradet en lien avec les enjeux d'adaptation au changement climatique sont :

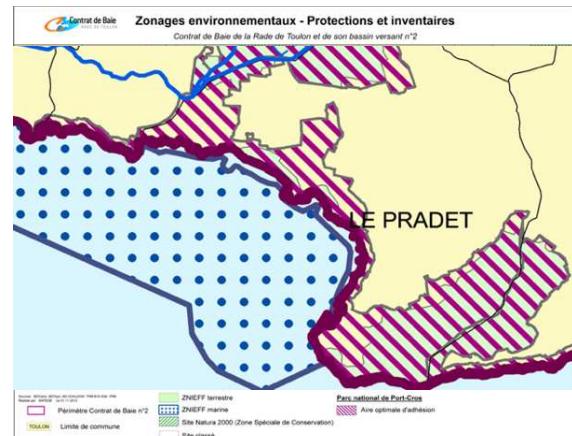
- mettre en place des coupures agricoles et des coupures de combustibles qui concilient les fonctions de prévention contre les incendies et de maintien de la biodiversité ;
- requalifier la façade maritime (prise en compte des risques littoraux) ;
- repenser la manière d'habiter le territoire, en particulier le littoral, en prenant en compte les risques naturels littoraux, qui pourraient être aggravés par les effets du changement climatique ;
- anticiper les besoins de circulation des espèces migratrices par des corridors écologiques tenant compte du changement climatique.

> Contrat de Baie (2013-2018)

Le Contrat de Baie a pour objectif de planifier et mettre en œuvre un programme d'actions en faveur de la qualité des milieux aquatiques. Il décline les objectifs du SDAGE à l'échelle du bassin versant. Un suivi est réalisé à partir d'un tableau de bord. Toutefois, les objectifs du Contrat de Baie n'ont pas de portée juridique.

Les éléments ont été synthétisés pour formuler 4 enjeux et 10 objectifs :

- amélioration de la qualité des eaux ;
- gestion durable des ressources et des milieux pour le maintien des usages ;
- amélioration du fonctionnement naturel des écosystèmes aquatiques ;
- maintien d'une animation qui associe durablement les acteurs du territoire.



Une commune de l'aire métropolitaine

> SCOT Provence Méditerranée

Le Pradet fait partie des 31 communes qui constituent le Syndicat Mixte du Schéma de Cohérence Territoriale Provence Méditerranée (SM du SCOT PM) approuvé par délibération le 16 octobre 2009 et qui fait actuellement l'objet d'une révision afin d'être adapté aux exigences du Grenelle et de la loi ALUR. Le PADD, en cours d'élaboration en date de juin 2018, poursuit et approfondit les orientations initiales du SCOT. Les grands défis relevés sont de 4 types :

- ✓ **les défis environnementaux** : la maîtrise de la consommation de l'espace – la préservation du capital naturel et agricole – la mobilisation et la gestion économe et durable des ressources – la réduction des pollutions et de l'impact des activités humaines – **Une réponse affirmée aux défis climatiques et énergétiques** ;
- ✓ **les défis liés au fonctionnement et à l'équilibre du territoire** : la maîtrise du développement – l'amélioration des déplacements – la limitation du phénomène de périurbanisation – le renforcement des centralités urbaines et villageoises – l'équilibre entre **préservation et valorisation du territoire et du littoral en particulier** ;
- ✓ **les défis sociaux** : la réponse aux besoins de logements – la promotion d'un cadre de vie urbain de qualité – la mise en valeur du patrimoine bâti et urbain et des entrées de ville – la valorisation de la diversité géographique des lieux – la réduction des risques et leur prise en compte dans les projets d'aménagement ;
- ✓ **les défis économiques** : le rayonnement métropolitain de l'aire toulonnaise – la performance de l'activité économique ainsi que l'équilibre de l'offre commerciale.

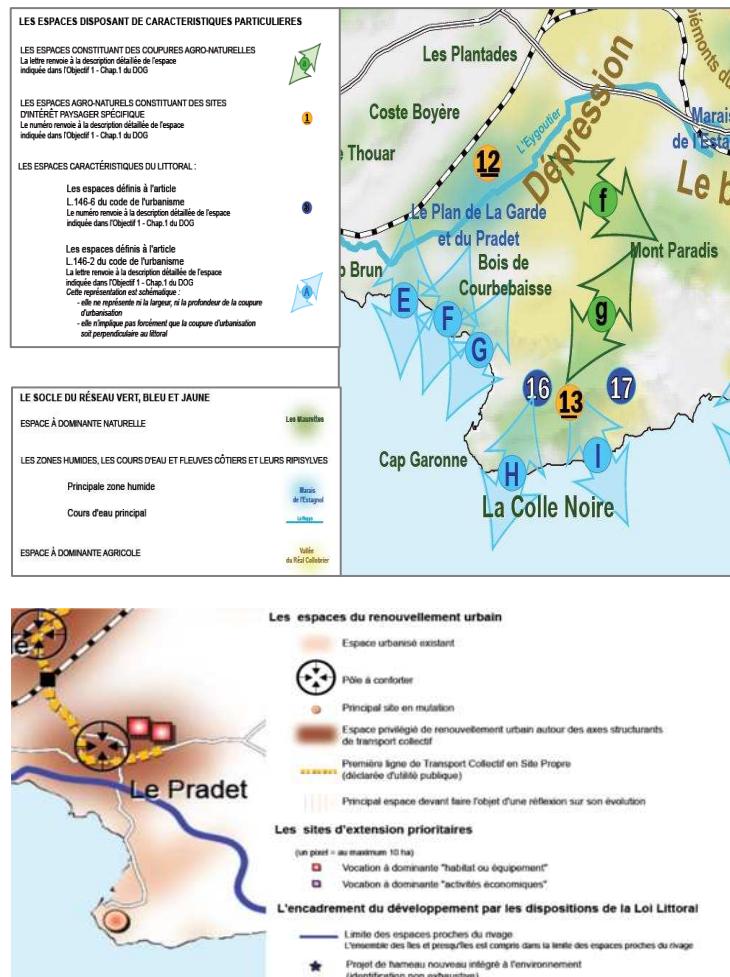
L'ensemble des défis relevés en bleu sont directement liés aux enjeux d'adaptation au changement climatique en matière de gestion des risques liés aux extrêmes météorologiques, de qualité de vie urbaine (îlot de chaleur, pollution atmosphérique, ressource en eau), à la gestion du littoral en matière d'érosion du trait de côte et du risque de submersion, ou encore la capacité de résilience des espaces naturels et agricoles et *in fine* la performance de l'activité économique.

Dans le PADD, on retrouve explicitement les enjeux d'adaptation dans les objectifs stratégiques déclinant les défis listés ci-dessous :

- fixer les axes de développement – développer les grandes filières économiques – valoriser les activités agricoles : « adapter les productions et les pratiques aux conséquences du changement climatique et aux enjeux environnementaux ».
- améliorer le cadre de vie et devenir un territoire du « bien-être » ; relever le défi de la transition énergétique : « la vulnérabilité et de l'adaptation du territoire au changement climatique et à l'énergie ».

Sur la commune du Pradet, le SCoT de 2009 identifie 5 secteurs à enjeux :

- « Batterie de Cap Garonne / CAPCA - CEFCA » : un site d'extension en activités ou site en mutations ;
 - « La Grenouille » : quartier d'extension prioritaire de l'aire toulonnaise ;
 - le « Plan de la Garde » et l'Eygoutier comme zone humide et cour d'eau à forte valeur écologique et paysagère ;
 - la plaine agricole le long de la RD559 comme coupure agro-naturelles
 - l'espace de la « Fleuride », le « Bois de Courbebaisse », le massif de la Colle Noire comme coupure d'urbanisation à préserver.



Le schéma de l'accueil du développement futur - extrait
Source : SCoT PM

Plan de Déplacement Urbain

Le PDU métropolitain de 2006 portait sur 5 priorités stratégiques. Son évaluation permet d'en dresser le bilan suivant par objectifs :

1. des transports en commun efficaces et attractifs dont un schéma ferroviaire métropolitain :

- ✓ bus urbain – réseau Mistral / 90 % de la population habite à moins de 400 m d'un arrêt de bus / tarification stable depuis 2005 / 30 % des arrêts accessibles au PMR ;
- ✓ bus interurbain Varlib' / 228 lignes affectées aux transports réguliers, scolaires ou à la demande. 58 % des varois sont situés à moins de 300 m d'un arrêt du réseau départemental ;
- ✓ trains express régionaux (TER) : la gare de Toulon s'inscrit comme un vrai rôle de pôle d'échange multimodal ;



2. une gestion hiérarchisée du stationnement au service du report modal :

- ✓ la mise en place de mesures de gestion de l'offre qui se caractérisent de deux façons : tarification + zones bleues et zones bleues + gratuité. La commune du Pradet s'appuie sur la seconde offre ;
- ✓ la mise en place des parkings relais (P+R) et des parcs de rabattement en faveur du covoiturage ;



3. une qualité de ville retrouvée pour les modes doux :

- ✓ des aménagements vélo pour faciliter un usage quotidien : 240 km de pistes et bandes cyclables, ainsi qu'une aide à l'achat d'un vélo à assistance électrique (VAE) ;
- ✓ des aménagements piétons dans les coeurs de ville pour pacifier le centre-ville et sécuriser les abords des écoles, notamment avec l'aménagement de zones 30 ;



4. des aménagements pour la voiture en harmonie avec les autres modes qui se traduit essentiellement par la création du tunnel de traversée de la ville de

Toulon, ainsi qu'un plan de modération des vitesses de circulation. Cela se traduit principalement sur la commune du Pradet par le déploiement de la zone 30 en centre-ville ;



5. Des règles nouvelles pour la logistique urbaine.

Territorialisation des actions du PDU 2015-2025 - extrait
Source : PDU 2015-2025



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Le Pradet est particulièrement concerné par :

- le développement de zones de circulation apaisées dans le centre-ville et la centralité secondaire de Garonne ;
- la mise en place d'un réseau de proximité (20 minutes et plus) du Réseau de bus Mistral (liaison plus efficace vers le cœur d'agglomération Hyérois) ;
- la hiérarchisation du réseau routier, des voies de liaisons intercommunales aux voies de liaisons inter-quartiers et de dessertes locales. A titre d'exemple ;
- le boulevard de Lattre de Tassigny constitue une liaison inter-quartier dont la sécurité et les modes actifs doivent être améliorés ;
- la requalification du chemin de la Foux entre Le Pradet et La Garde
- l'aménagement de la piste cyclable et l'amélioration du réseau Nord-Sud.



2.3. Caractérisation et évolution des zones urbaines

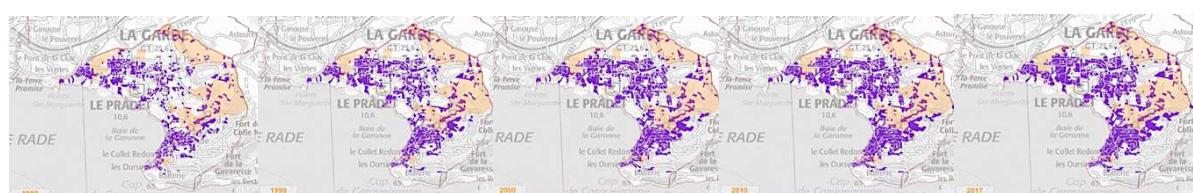
2.3.1. Occupation du sol

Évolution passée et à venir des espaces urbanisés

La commune du Pradet a vu évoluer son occupation du sol et sa population principalement entre 1960 et 2000, la faisant passer d'une structure villageoise à une petite ville distendue. Elle connaît depuis une dizaine d'années une stabilisation de surface urbanisée et de sa population.

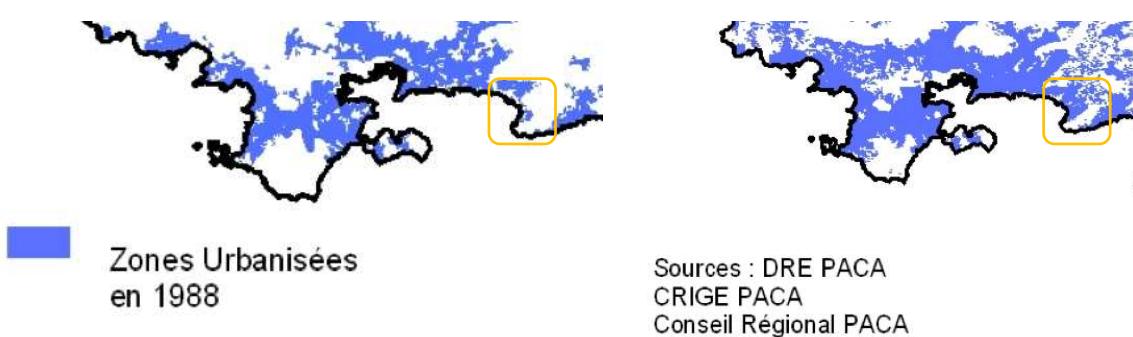


Photo comparative : territoire du Pradet en 1960 et implantation bâtie en décembre 2017
(source : Géoportail, novembre 2018)



Évolution de la tache urbaine de 1980 à 2017
(source : diagnostic agricole – ZAP Pradet, CA 83, p. 7-14, mai 2018)

Les travaux prospectifs, menés par le Département du Var en 2010, prévoyaient une croissance de l'évolution des espaces urbanisés se traduisant par une extension vers le Nord avec une emprise sur les espaces agricoles de la plaine de la Garde. Cependant l'évolution des réglementations nationales et locales accentuent la protection des espaces agricoles et une limitation de l'étalement urbain.



Perspective d'évolution des espaces urbanisé à horizon 2030 –
(source : synthèse atelier « Quel Var en 2030 ? – Gestion raisonnée de l'espace », p. 9, 2010)



Interreg
MARITTIMO-IT FR-MARITIME

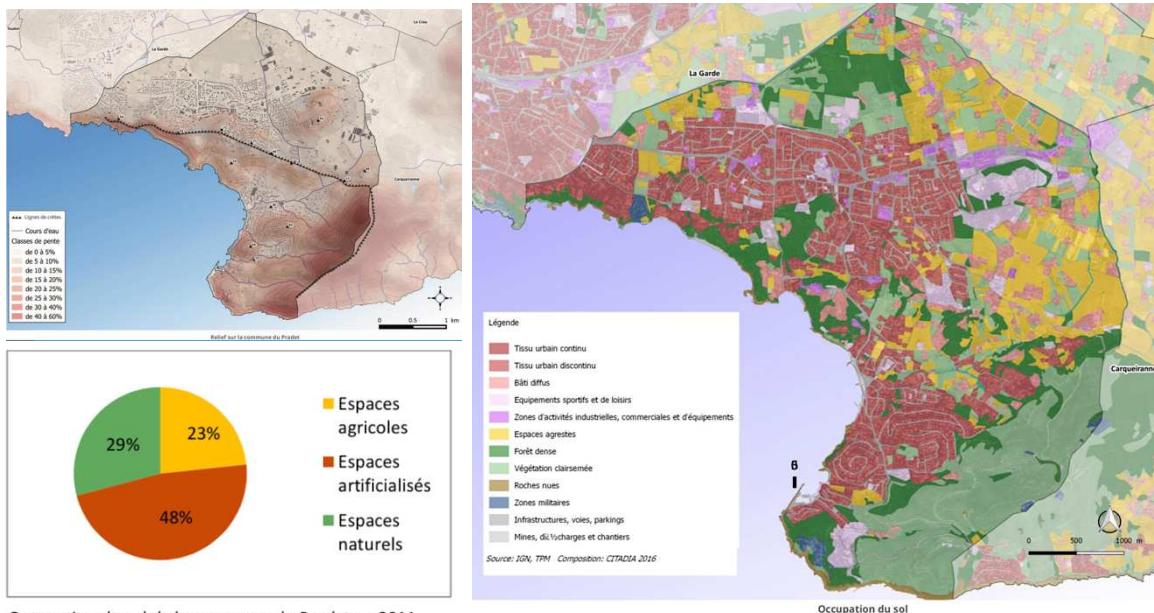


Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Une artificialisation maîtrisée et un pourcentage de terre agricole élevé

Aujourd’hui, la commune du Pradet reste dotée d’une topographie hétérogène qui se caractérise par une occupation des sols relativement équilibrée entre les espaces agrestes et forestiers. De part une pression urbaine métropolitaine forte, les perspectives de croissance des zones urbanisées à terme reste à envisager.

L’entrecroisement des espaces naturels, agricoles et forestiers avec les zones d’habitation et espaces urbains doivent éveiller une vigilance particulière face aux risques associés aux effets du changement climatique dont en particulier les risques d’incendies et inondations.

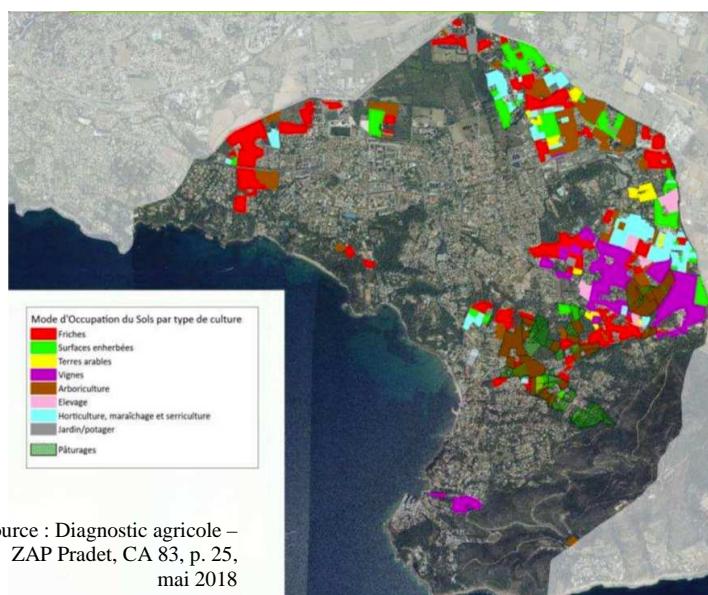


Topographie et occupation du sol du Pradet en 2011 (source : diagnostic du PLU, 2017)

État des surfaces agricoles

Depuis 1972 la commune du Pradet a vu ses surfaces agricoles diminuer de 60 % en passant de 426 ha à 180 ha en 2017. La pression urbaine a transformé les espaces agricoles en fractionnant et morcelant les parcelles d’exploitation induisant des problématiques d’exploitation comme l’accès, le conflit de voisinage.

L’économie agricole a connu une forte chute entre 1988 et 2010, avec la disparition de 18 exploitations et le



passage de 21 à 11 équivalents temps plein sur la même période.

État des surfaces agricoles

Depuis 1972 la commune du Pradet a vu ses surfaces agricoles diminuer de 60 % en passant de 426 ha à 180 ha en 2017. La pression urbaine a transformé les espaces agricoles en fractionnant et morcelant les parcelles d'exploitation induisant des problématiques d'exploitation comme l'accès, le conflit de voisinage.

L'économie agricole a connu une forte chute entre 1988 et 2010, avec la disparition de 18 exploitations et le passage de 21 à 11 équivalents temps plein sur la même période.

Un projet de zone agricole protégée a été lancé en 2018. Celui-ci vise à la préservation des terres agricoles en limitant la pression et spéculation foncière, ainsi que la lutte contre l'enrichissement des terres.

L'accès à la ressource en eau est un enjeu décisif au maintien et à la qualité des espaces agricoles existants et à développer. À ce jour, le réseau d'irrigation et la ressource mobilisée via la Société du Canal de Provence (SCP) assure une qualité d'approvisionnement suffisante. Les orientations identifiées en préfiguration de la ZAP entendent renforcer la capacité d'irrigation, en particulier pour la remise en cultures des espaces délaissés situés à l'ouest de la commune. **Afin de sécuriser la vocation agricole de ces espaces, il conviendra d'évaluer leur vulnérabilité aux effets locaux du changement climatique dont en particulier les périodes de sécheresse et de canicule. Aussi, le choix et les modes de cultures devront tenir compte des évolutions météorologiques attendues.**

Espaces forestiers et naturels

La commune du Pradet est concernée par des boisements littoraux méditerranéens principalement situés sur le massif de la Colle Noire dont 152 ha sur le Pradet. Ce massif est constitué d'une large palette d'essences arborées (pins d'Alep, pins maritime, chênes-lièges, chênes verts...), arbustives (arbousiers, pistachiers lenticques...) et herbacées. La diversité de ce massif est élevée avec 160 espèces floristiques dont une vingtaine d'orchidées. Le massif de la Colle Noire constitue l'unique réservoir de biodiversité boisé de la commune.

En partie littorale, une végétation spécifique se développe, elle est adaptée aux fortes teneurs en sel.

La zone humide de la plaine de la Garde et reprend les zones agricoles du nord-est et les anciennes restanques du massif de la Colle Noire.

Le ruisseau de la Règue et trois vallons parcourant le massif de la Colle Noire sont identifiés comme corridor écologique par le SCOT et le SRCE.



Interreg



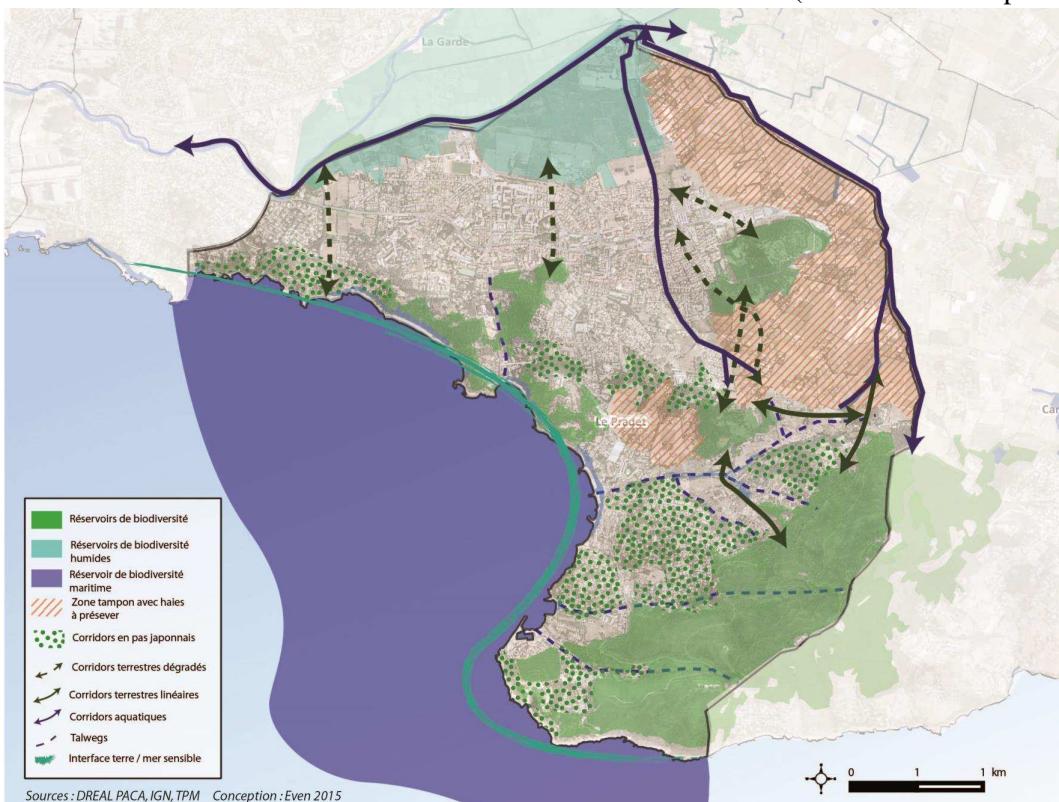
MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Vue du Pradet

(source : www.le-pradet.fr)



Trame verte et bleue sur la commune du Pradet

(source : Diagnostic PLU, p.64, 2017)

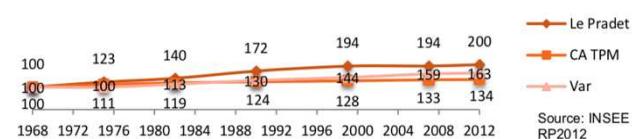
2.3.2. Démographie

Évolution de la population

Le Pradet comptait 11319 habitants en 2013 (INSEE). La commune a connu une augmentation démographique ininterrompue depuis 1968, où l'on recensait 5658 habitants. Durant la dernière période intercensitaire (2007-2012), la population a gagné 338 habitants.



Évolution des populations comparée sur une base d'indice 100





Interreg
MARITTIMO-IT FR-MARITIME



Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



La croissance démographique a toutefois été irrégulière :

- des périodes de forte croissance : 1982 et 1990 (2,6 %) ;
- une quasi-stabilisation depuis 1999, avec une croissance nulle sur la période 1999-2007, et une reprise légère à 0,6 % sur les 5 dernières années.

La perspective de variation démographique à horizon 2030 est comprise entre -0,25 % et + 0,5 %.

Caractéristique de la population

Une population vieillissante

En 2012, Le Pradet comptait 29,6 % d'habitants de moins de 30 ans, 38,1 % de 30-59 ans, et 32,3 % de 60 ans et plus.

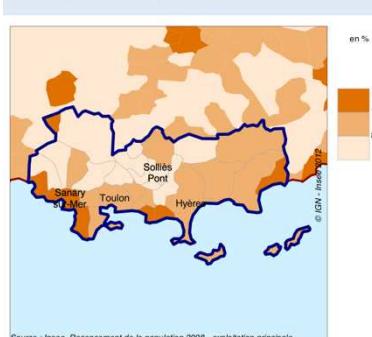
Cette répartition a évolué depuis 2007, avec une diminution de la part des 30-44 ans et une augmentation de la part des 45-59 ans. Plus légèrement, la part des 0-14 a diminué, tandis que la part des 60 ans et plus a augmenté.

Répartition des classes d'âge en 2012



Source : INSEE, RP 2012

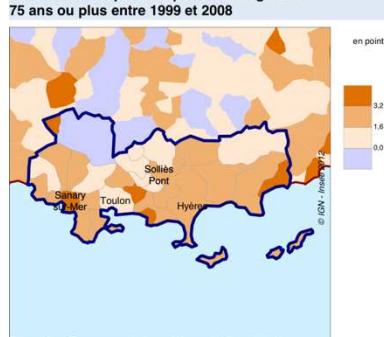
Part des personnes âgées de 75 ans ou plus en 2008



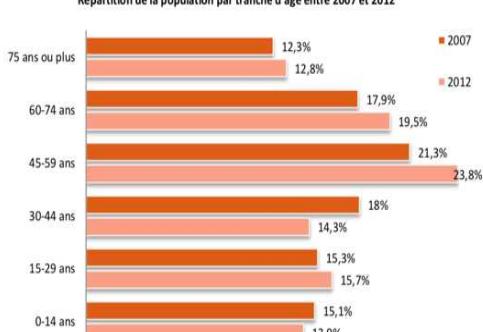
Par rapport à la répartition départementale et intercommunale, la population du Pradet a une part de 45-59 ans bien supérieure, ainsi qu'une part de 60 ans et plus légèrement supérieure, tandis que les moins de 45 ans sont globalement moins nombreux que dans la moyenne du Var et de la communauté d'agglomération.

Ces évolutions traduisent un vieillissement progressif de la population qui se traduit par 32,7 % des ménages composé d'une seule personne et 10,7 % d'inactifs retraités. Une proportion au-dessus de celle constaté à l'échelle métropolitaine et départementale.

Evolution de la part des personnes âgées de 75 ans ou plus entre 1999 et 2008



Répartition de la population par tranche d'âge entre 2007 et 2012



Source : INSEE, RP 2007 et 2012

Source Diagnostic PLU 2017, P.30



Les populations séniors présentent une vulnérabilité face à l'exposition aux fortes chaleurs. La tendance observée et attendue en matière d'occurrence et d'intensité implique une vigilance



Interreg
MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



La part des actifs en augmentation et mobile

60,9 % de la population active dispose d'un emploi. On remarque par ailleurs une forte augmentation du nombre d'agriculteurs exploitants qui passe de 19 à 51 %.

68 % des actifs travaillent hors de leur commune de résidence et sont liés aux bassins d'emplois toulonnais et hyérois. Cela se traduit par un taux d'équipement en véhicule personnel motorisé importante avec 90 % des ménages équipés. Malgré une amélioration de l'offre de mobilité sur la métropole, la dépendance à la voiture individuelle reste forte.

Moyen de transport pour se rendre sur leur lieu d'emploi



Source : INSEE, RP2012

Lieu de travail des actifs en 2012



Source : INSEE, RP2012

Source portait territoire TPM, INSEE PLU 2012, P.11

2.3.3. Habitat

Un parc de logement stagnant et majoritairement occupé par des propriétaires

Avec 6242 logements en 2012, la croissance du parc est tombée à 0,3 % entre 2007 et 2012, faisant du Pradet une des communes métropolitaines les moins actives en production de logements neufs. Le parc de logement est équilibré entre maisons et appartements, et la part des propriétaires occupants est majoritaire. Le parc social, en très légère augmentation, représente 8,5 % de l'offre en 2012. Le parc compte également 12 % de résidence secondaire en 2012 contre 20 % en 1982.

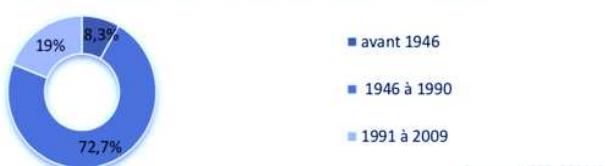
Des logements relativement récents et de grandes tailles

Seuls 8,3 % des logements datent d'avant 1946. Les logements de 4 pièces et plus constituent 60 % des résidences principales, alors même que les personnes seules ou en couple constituent 60 % des ménages. Cela met en exergue une inadéquation ménage/logement, même si 30 % du parc est composé de 3 pièces.



Le parc social, en date de janvier 2014, se compose de 494 logements soit 9,6 % des résidences principales. Aussi, 127 logements devront être réalisés dans la décennie à venir pour atteindre l'objectif inscrit au PLH métropolitain. Par ailleurs, la structure de l'offre est là aussi non appropriée à la structure actuelle et à venir des ménages.

Période de construction des résidences principales en 2012



Source : INSEE, RP2012

Les orientations du PLH 2010-216

Les objectifs sur le territoire du Pradet sont les suivants :

- répondre à un objectif de croissance mesurée : continuer à percevoir Le Pradet comme un « village » ;
- faciliter l'accès au logement, pour tous : accroître l'offre en logements et l'adapter, favoriser les parcours résidentiels et la mixité, répondre aux besoins locaux en logements locatifs sociaux ;
- limiter la consommation d'espace pour préserver l'identité ;

- préserver et valoriser le capital naturel et agricole de la ceinture verte, jaune et bleue du Pradet : préserver et valoriser le « poumon vert » (agriculture locale, les espaces naturels, espaces soumis au risque d'inondation, etc.) ;
- privilégier le renouvellement urbain, des extensions maitrisées et respectueuses de l'environnement ;
- limiter la consommation d'espace en maitrisant la réalisation d'extensions urbaines dans la continuité du bâti existant ;
- prendre en compte la loi Littoral.

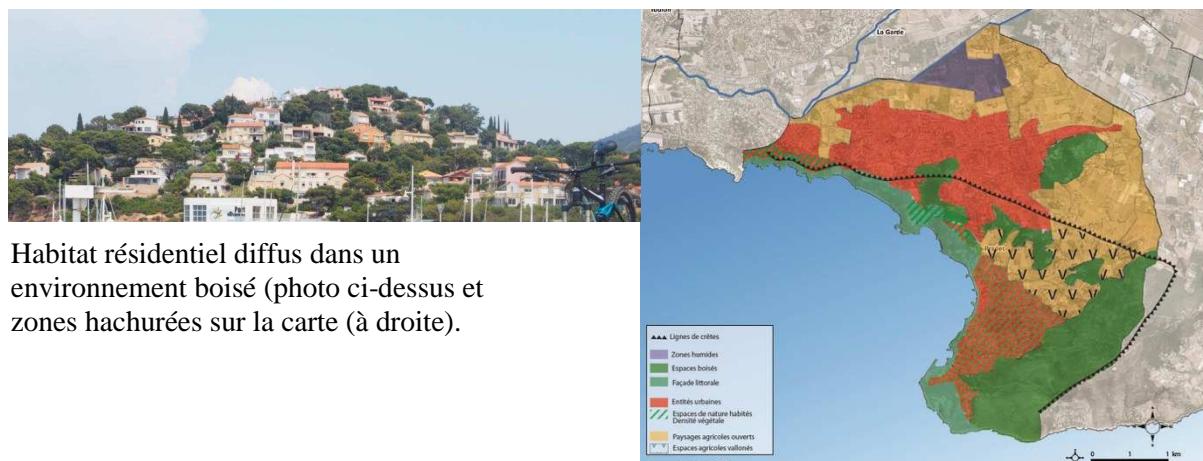
L'objectif sur 6 ans est de proposer 500 constructions neuves sur l'ensemble du territoire communal, dont 321 logements sociaux en production neuve et 45 en logements conventionnés.

Sur la commune du Pradet, 50 % des logements disposent d'une surface habitable comprise entre 60 et 100 m². 28 % sont supérieurs à 100 m².

86 % de l'ensemble du parc est habité en résidence principale. Le taux de logement collectif est de 46 %.

Des constructions de faible densité entremêlées d'espaces de nature

Le secteur au sud-ouest de Garonne-Oursinières présente un habitat résidentiel diffus qui s'insère dans des espaces de nature boisés. Outre la problématique paysagère, cela se veut un facteur de risque d'incendie et d'exposition des populations et des habitations aux feux de forêt non maitrisés.



La composition du parc bâti, ses modes de conception et son intégration dans l'espace urbain et naturel, combinés à la nature des ménages occupants et son évolution, mettent en lumière une possible vulnérabilité à venir face aux incidences locales du changement climatique. Le syndicat d'énergie, dans son édito du RPQS de 2016, a constaté une baisse de la demande d'énergie pour les besoins en chauffage, en lien avec la douceur climatique automnale et hivernale. *A contrario* les besoins en climatisation sont croissants et peuvent, selon les cas, être supérieurs aux besoins en chauffage, alors que les populations sont vieillissantes. Si on tient compte de l'évolution du prix de l'énergie et en particulier de l'électricité, il est envisageable de voir la part du budget des ménages dédiée à l'énergie fortement augmenté à terme. Cela peut devenir une cause de croissance du taux de ménages en situation de précarité énergétique ou alors s'exposant à des conditions d'habitat affectant leur santé.



2.4. Réseaux humides

2.4.1. Adduction eau potable

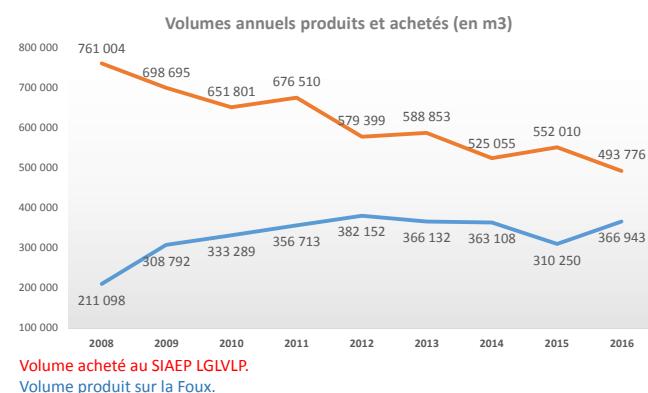
La commune du Pradet dispose de ressources propres pour son approvisionnement en eau potable, le captage de La Foux (nappe souterraine), et d'une unité de production du même nom, d'une capacité de 2 376 m³/j. Il est à noter qu'en 2017, cette ressource n'était pas autorisée administrativement, la protection de la ressource étant en instruction auprès des services de la préfecture.

La production annuelle de la station de la Foux a produit 450 039 m³. On relève une hausse de production de 27 % par rapport à l'année 2016 afin de permettre une baisse des achats d'eau. Cette ressource ne couvrant qu'entre 30 et 45 % des besoins, le complément est fourni par le Syndicat Intercommunal La Valette La Garde Le Pradet (SIAEP).

Le réseau représente 82 km de canalisation.

Son taux de renouvellement est de 0,2 % par an. Le rendement du réseau est de 82 % et l'indice linéaire de perte s'élève à 4,7 m³/km/j.

Il est à noter que la commune ne dispose pas d'un schéma directeur d'adduction d'eau potable.



2.4.2. Assainissement

Le service d'assainissement collectif et non collectif est une compétence métropolitaine depuis le 1^{er} janvier 2009. L'assainissement collectif comprend la collecte, le transport et le traitement des eaux usées, et l'évacuation des boues d'épuration. L'assainissement non collectif : il s'agit du contrôle des systèmes d'assainissement individuels et de la détermination des zonages de périmètres entre l'assainissement collectif et non collectif. Le mode de gestion de la commune du Pradet est un affermage avec Veolia comme opérateur actuel et ce jusqu'en avril 2020.

Concernant le service collectif : la commune du Pradet concentre 5185 abonnés avec une hausse de 1,5 % depuis 2015. Le réseau se compose de 40 320 ML en gravitaire et 3428 en refoulement, connecté à 8 postes de prélèvement. Environ 10 % du réseau bénéficie d'un curage chaque année. Les eaux collectées sont rabattues sur la station de traitement mutualisé Amphor1 d'une capacité de 106 600 équivalent-habitants (EH) pour un volume entrant de 4 507 327 m³. Son activité génère 1944 tonnes de boues qui sont valorisées à 75 % en incinération et le reste en compostage. On note que la valeur de l'indice de connaissance et de gestion du patrimoine est de 29 sur 100.

Concernant le SPANC, le projet de zonage intercommunal, prévu dans le cadre de l'établissement du schéma directeur d'assainissement, a été approuvé par le Conseil communautaire en juin 2016.

2.4.3. Pluvial

En 2010, la commune du Pradet a entrepris la réalisation d'un schéma directeur d'assainissement des eaux pluviales. Les écoulements pluviaux sur la commune du Pradet peuvent être divisés en 2 sous-ensembles en fonction de leur exutoire :

- les bassins-versants dont les eaux de ruissellement s'écoulent directement vers la mer. Ces bassins concernent les secteurs suivants : Garonne, Oursinières, Bonnettes ;
- les autres bassins versants s'écoulant vers le ruisseau de l'Eygoutier (centre-ville, Artaude, Esquirol)

Comportement aux fortes précipitations et corrections

Le SDAEP a mis en évidence les points de vulnérabilités suivants :

- lors des fortes pluies, la plupart des réseaux se dirigeant vers l'Eygoutier sont saturés notamment sur leur partie aval du fait des très faibles pentes à l'approche de la plaine ;
- certains réseaux comme celui du centre-ville sont très insuffisants. Les écoulements se propagent en surface sur l'avenue Gabriel Péri et l'avenue de la 1^{ère} DFL, puis s'écoulent en partie par le parc Cravéro. Certains

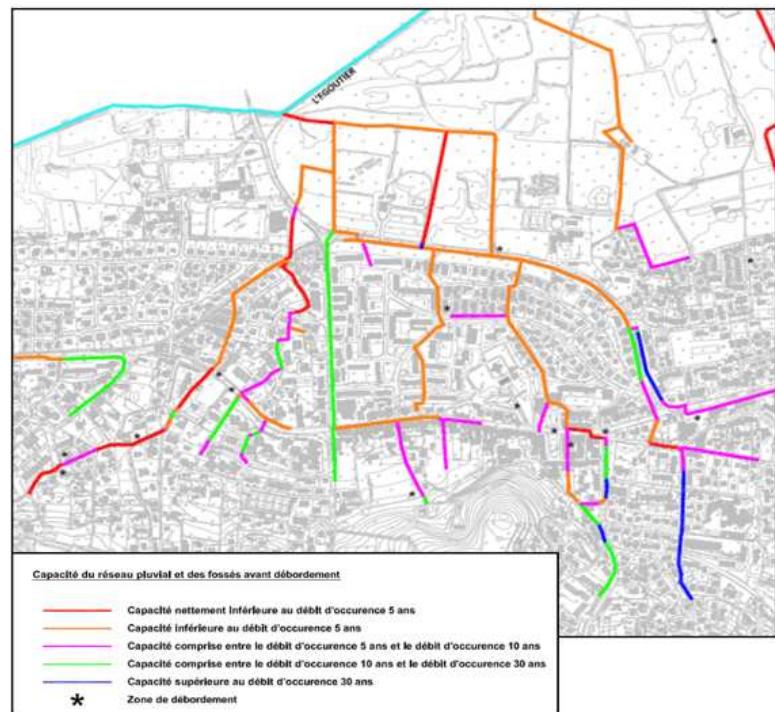


Figure: Capacité du réseau pluvial du bassin versant « Centre Ville – Avenue Le Leap »

commerces sont inondés de façon récurrente.

Pour rechercher les solutions d'amélioration, le SDAEP propose plusieurs solutions innovantes à envisager en complément des solutions plus classiques comme par exemple :

- o l'infiltration déjà pratiquée près du complexe sportif de la Batie ;
- o le ruissellement de surface maîtrisée : face aux très lourdes dépenses, un écoulement de surface maîtrisé qui ne crée aucun dommage est une alternative à la pose de gros collecteurs ;
- o la rétention des eaux en amont par des bassins de rétention ;
- o la régulation des eaux par des chaussées réservoirs.

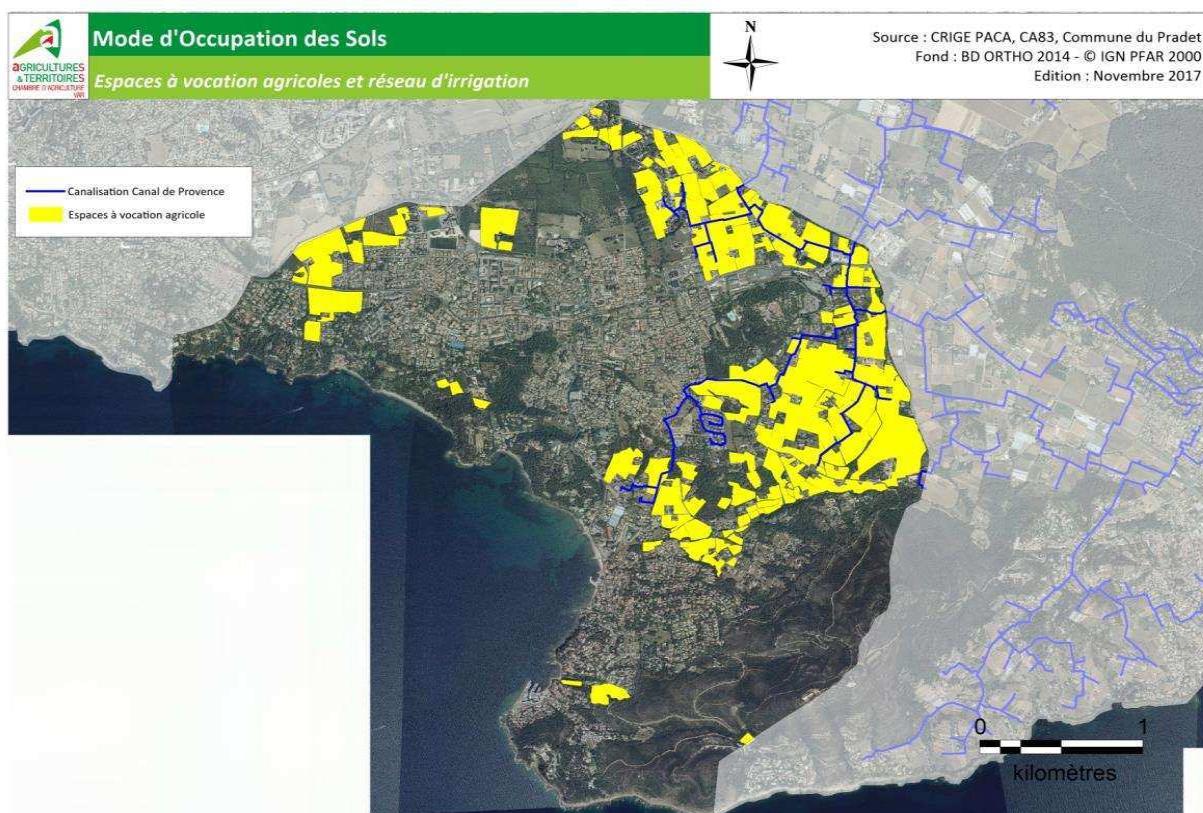
L'ensemble des préconisations inscrites au SDAEP représente un investissement de dix millions d'euros dont les 2/3 doivent être envisagés comme prioritaires afin de résoudre les problèmes d'inondation les plus prégnants.

Le SDAEP considère 3 zones (littorale, urbaine, forestière) sur lesquelles il est nécessaire de procéder à la régulation des eaux en y appliquant les principes de régulation et rétention des ruissellements des futures urbanisations, le contrôle des exutoires vers la mer, la stabilisation des sols érodables sur le massif de la Colle Noire.

2.4.4. Irrigation

Le réseau d'irrigation bénéficie d'apports en eau du canal de Provence permettant une sécurisation d'approvisionnement. Cela permet de conserver une diversité des cultures. L'accès et la préservation de cette ressource doit être consolidés et confortés afin à la fois de répondre aux besoins futurs des exploitations et de permettre un renforcement de la dynamique agricole sur la commune.

L'étude de zone agricole protégée met en évidence l'enjeu de non-enrichissement d'espaces agricoles délaissés. Cela passe notamment par l'analyse d'opportunité d'une extension du réseau du canal de Provence sur l'ouest du territoire.



2.5. Mobilités

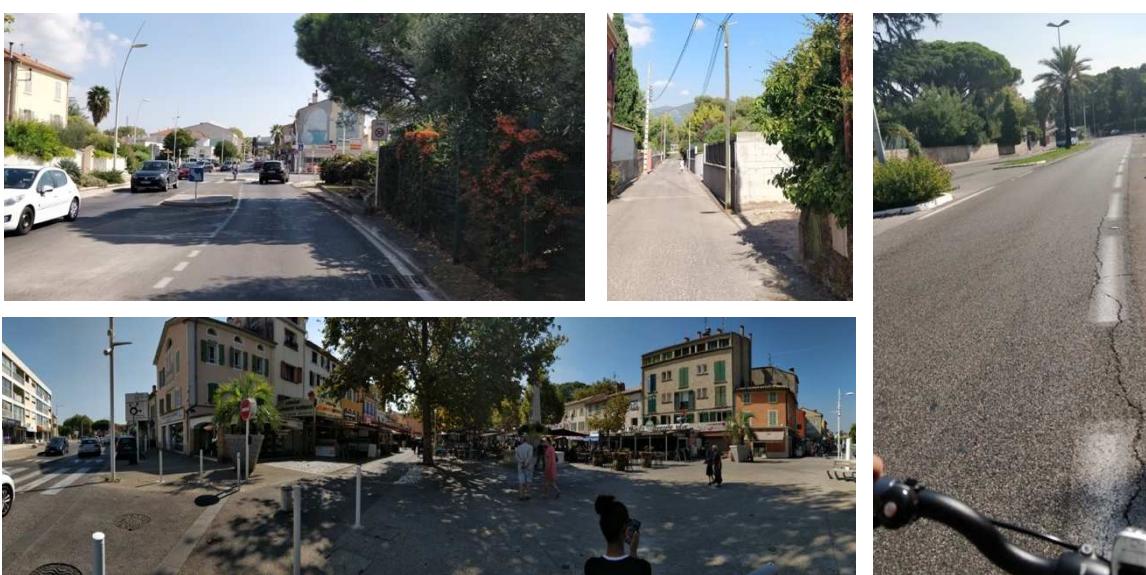
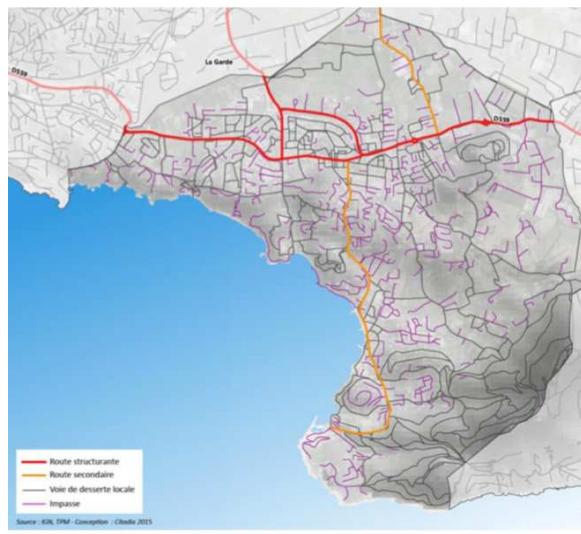
2.5.1. Voiries et stationnements

La commune est traversée par un axe ouest-est par la RD 559 qui relie Toulon à Hyères autour de laquelle la ville s'est organisée. Cette route est fortement passante, avec un pic d'usage lors de la période estivale (environ 18 000 uvp/jour).

Le maillage secondaire relie le centre-ville du Pradet aux communes contiguës situées au nord, à la commune de La Garde, mais aussi aux quartiers situés au sud dont les quartiers littoraux, notamment le port des Oursinières.

Un réseau tertiaire peu perméable est impacté par la géomorphologie accidentée du territoire. Finissant généralement en impasse, il est peu mobilisable pour les modes de transport doux.

La voiture occupe une place importante et le stationnement associé est conséquent avec 1240 places au centre-ville et tout un réseau de stationnement en linéaire dans les rues.





Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



La grande majorité des revêtements de voirie et espaces publics sont en enrobé bitumineux de couleur noir. Ce matériau dispose d'une grande résistance, mais aussi d'une forte capacité de captation et d'accumulation thermique favorisant les phénomènes d'îlots de chaleur urbains.

2.5.2. Transports urbains

Le réseau Mistral / mettre à porter une offre de transport importante

Le Pradet se situe à la croisée d'une offre de mobilité importante. Les bus urbains permettent de desservir la gare multimodale et l'aéroport de Toulon ; les gares SNCF et routière (Varlib) de la Garde et d'Hyères.



La ligne 39 est l'axe direct reliant les gares de Toulon à Hyères. La Ligne 23 vient soutenir la mobilité entre Hyères et Toulon, et double la desserte vers les gares SNCF. Leur fréquence de 30 minutes sur une amplitude de service allant de 5h30 à 20h en fait un service performant. Les lignes 91 et 92 permettent une desserte en direction de la gare SNCF de la Garde. La Ligne 91 est la seule desserte en TC reliant le centre-ville du Pradet et les Oursinières. Avec une fréquence d'une heure et des coupures de service entre midi et deux, ces lignes sont peu attractives et forcent un usage de la voiture pour le secteur sud-est de la commune.



2.5.3. Modes doux et alternatifs



L'usage du vélo est attractif dans sa liaison centre Pradet-Toulon qui présente une continuité cyclable de grande qualité. La voie cyclable du littoral permet de relier Toulon de manière totalement sécurisée. La circulation cyclable en dehors de cet axe se fait sur la voirie routière sans aménagement spécifique. Le stationnement pour vélo est quasi inexistant hormis sur le parvis de la mairie.

La mobilité piétonne au centre-ville n'est pas facilitée par les aménagements routiers dont les ronds-points. Par contre, le bord de mer présente des portions piétonnes empruntant le sentier du littoral, ainsi que les aménagements de plaisance.

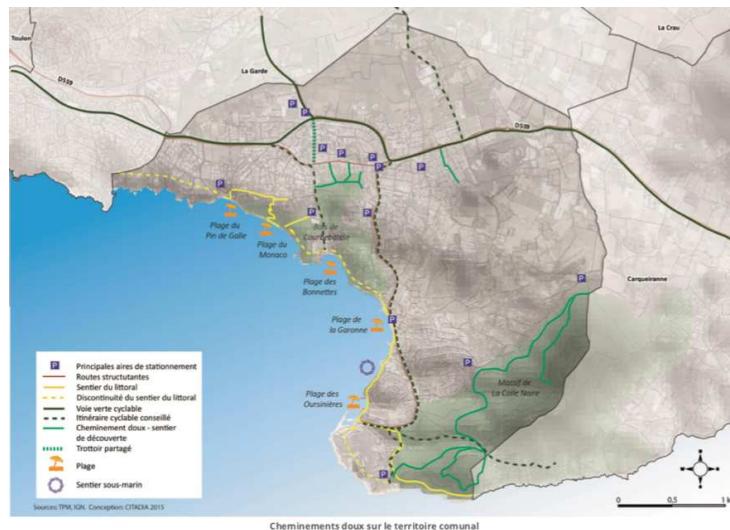
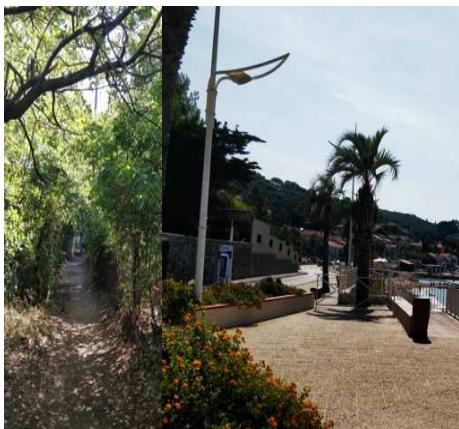


Interreg
MARITTIMO-IT FR-MARITIME



ADAPT

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

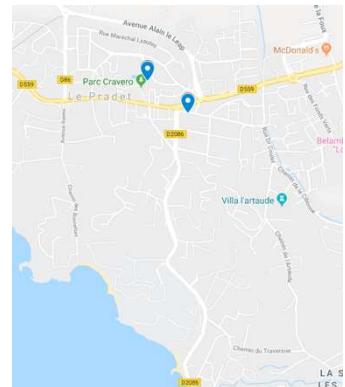


2.5.4. Mobilité électrique

Smart IRVE 83 : le projet Smart Irve 83, intégré au programme régional Flexgrid, consiste à créer une infrastructure de recharge pour véhicules électriques couvrant la totalité du département du Var. Le réseau sera composé à terme de 120 bornes de recharge accélérées (22 kVA par borne, 2 points de recharge par borne) raccordées au réseau ENEDIS, et associé à un logiciel qui permettra de suivre l'usage et le fonctionnement opérationnel des différentes bornes :

www.moovelecvar.rios-infos.com

La commune du Pradet est dotée de 2 bornes IRVE, qui permet la recharge simultanée de 4 véhicules. Elles sont implantées en proximité de la mairie et sur le parking situé au croisement en la rue René Cassin et Paulin David. Des emplacements de parking réservés ont été matérialisés au sol.



2.6. Énergies

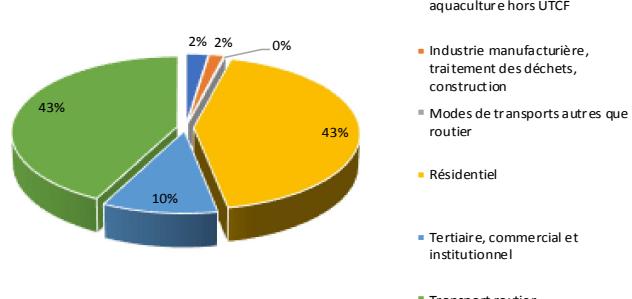
Les données ci-dessous sont extraites de la base de données CIGALE - Observatoire Régional de l'Énergie, du Climat et de l'Air (ORECA) Provence-Alpes-Côte d'Azur / inventaire AtmoSud, année, 2015 et 2016.

2.6.1. Consommation d'énergies

Consommation par secteur d'activité

En 2016, les différentes activités présentent sur le territoire du Pradet ont consommé 11 KTep d'énergies finales, soit 129 GWh. Le résidentiel-tertiaire représente les deux premières sources de consommation d'énergies finales. Le secteur des transports tient une place tout aussi

Pradet
Consommation d'énergie / activité (%)

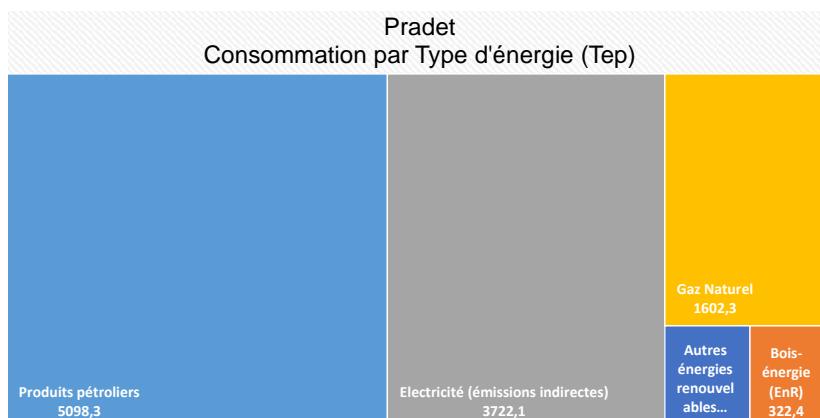


importante avec 43 % des consommations. Moins d'1 % des consommations de ce secteur sont représentées par de l'électricité destiné au transport ferroviaire.

Les secteurs de l'industrie et de l'agriculture tiennent une place peu significative sur le territoire. De manière globale, le profil de consommation du Pradet est assez proche de celui de TPM.

Consommation par type énergie

Les produits pétroliers représentent 46 % du type d'énergie consommée. Cela est essentiellement dû à la part du transport relativement importante des usages. L'électricité contribue à 34 % notamment à destination des usages résidentiels et tertiaires. Le gaz naturel est quant à lui peu mobilisé à hauteur 14 %.

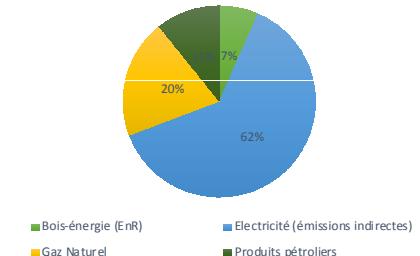


> Zoom sur le résidentiel

Ces consommations couvrent à 47 % des besoins de chauffage, 31 % des besoins spécifiques d'électricité et 22 % de l'eau chaude.

L'électricité est le vecteur énergétique majoritaire. Il couvre aussi bien les besoins de chaleur, de froid que les usages domestiques. 45 % des logements utilisent l'électricité en énergie de base servant au chauffage.

Pradet / résidentiel - consommation (Tep)

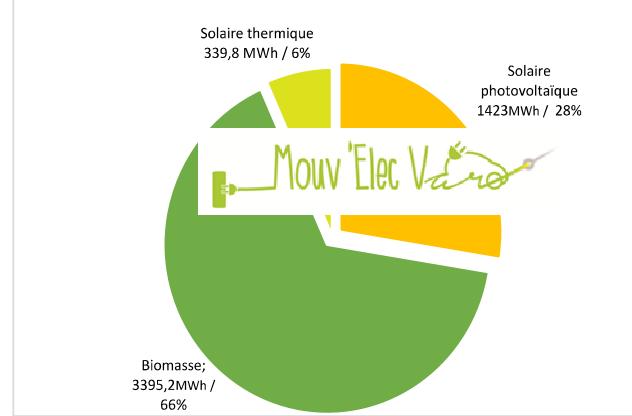


2.6.2. Production d'énergies

La production renouvelable du territoire est aujourd'hui majoritairement assurée par les installations individuelles de chauffage au bois.

On note une forte croissance de la production photovoltaïque qui a été multipliée par 4,5 entre 2012 et 2015 (322 MWh/an). On dénombre 93 installations raccordées au réseau BT dont la

Pradet - production d'énergies renouvelables par filière



puissance est inférieure à 36 kVA et une seule installation supérieure directement raccordé au réseau HTA.

Le solaire thermique n'a connu quasi aucune progression sur la même période.

Il est à noter que la base de données ne permet pas d'identifier l'aérothermie dans les systèmes EnR. Or ces systèmes sont significativement répandus sur le territoire du Pradet.

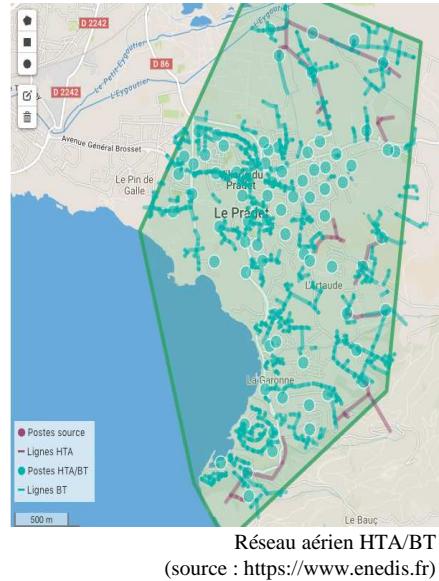
Sur ces bases, le taux de couverture des consommations du territoire par les énergies renouvelables est estimé à 4 % en 2015.

2.6.3. Réseaux et distributions

Réseau Électrique BT

La commune du Pradet a délégué la concession du réseau électrique HTA et BT au Syndicat mixte de l'énergie des communes du Var. Le rapport de contrôle concession électricité 2014 met en avant la conformité du réseau du Pradet aux normes du décret qualité. Par contre, il est stipulé que « les événements climatiques locaux violents influent directement sur la localisation et le nombre de clients coupés ». Le départ HTA et son réseau de distribution qui alimente la commune du Pradet sont considérés comme vulnérables aux aléas extrêmes.

Le réseau se compose d'environ 80 postes de transformation qui alimentent un ensemble de 650 sections de lignes basse tension aériennes. La densité du réseau aérien induit une vulnérabilité accrue aux événements météorologiques extrêmes.



En 2014, 22 % des coupures longues HTA sont liés à des coups de foudre et 13 % des causes de coupures longues sur le réseau BT sont liées aux inondations et à l'effort anormal par tempête de vent ou de pluie.

Réseau Gaz de ville

La commune du Pradet est alimentée en gaz de ville par le distributeur GRDF. Quatre secteurs sont alimentés : Pradet centre, sud, nord et ouest. En 2017, cela totalise 1654 points de livraison qui consomment 21 700 MWh de gaz de ville.

2.7. Déchets

2.7.1. La collecte

La particularité de la CA TPM est la diversité des modalités d'exploitations selon les villes. La collecte est faite par un prestataire privé ou en interne « régie ». Parfois, pour optimiser la collecte sélective, les deux se font simultanément. Le prestataire collecte une partie et le reste se fait en régie. L'opérateur privé pour la commune du Pradet est la société Onyx Méditerranée selon les modalités ci-dessous.

La population desservie par le service de collecte sur le Pradet est de 10 217 résidents. On retrouve différents modes de collecte : en PAP pour les OMR et encombrants, en apport volontaire pour les recyclables et en déchetterie pour les déchets spécifiques. Les apports sont limités à 1 m³/jour sur la commune du Pradet.

Communes CA-TPM	Professionnels		Particuliers et assimilés							
	Régie/ Presta	Fréquence collecte	Régie/ Prestataire collecte en PAP (Marché d'exploitation)			Fréquence collecte				
	CS (carton)	OM.r et OMa	CS (PC/BP)*	Encombrants	Déchets verts	OMr et OMA	CS	Encombrants	Déchets verts	
Le Pradet	Régie	C1 à C3	Presta	Presta	Presta + petite régie	x	C2 secteur A C3 secteur B C4 secteur C	C 0,5 C1 verre pro- été	C 1 sur rdv	x

2.7.2. La prévention

Au-delà du recyclage et de la valorisation, la gestion durable des déchets ménagers et assimilés passe désormais par une politique active de prévention selon l'article 194-VII de la loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010. C'est par ailleurs la principale mesure du Grenelle II visant la prévention et la réduction des déchets à la source. Entrée en vigueur en août 2015, la loi de la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (TECV) prévoit un renforcement significatif des obligations en matière de réduction à la source et de valorisation.

Conformément, aux exigences de cette loi, la CA TPM, par le biais du SITTOMAT, a défini un plan d'action et met en œuvre une politique visant à réduire la quantité des déchets ménagers. C'est devenu une priorité pour toute collectivité compétente en gestion des déchets ménagers. Cela se traduit par :

- o distribution des composteurs individuels aux ménages ;
- o distribution des sacs de pré-collecte ;
- o des guides du tri fournis ;
- o la distribution des sacs de pré-collecte aux nouveaux arrivants ;
- o la distribution des autocollants « STOP PUB » ;
- o le déploiement d'ambassadeurs du tri.

2.7.3. La valorisation

Les OMr sont valorisées au sein d'un incinérateur qui permet une production d'énergie transformée en électricité ou en vapeur. L'électricité est réinjectée en majeure partie dans le réseau ENEDIS et utilisée pour alimenter l'UVE, ainsi que les bâtiments du SITTOMAT. La vapeur d'eau est transformée en énergie thermique pour les réseaux de chaleur.

Perspectives : afin d'atteindre les objectifs fixés par la loi TEPCV, TPM a défini une feuille de route à horizon 2020 qui prévoit la relance des ambassadeurs, la mise aux normes des déchèteries, l'extension du compostage dans les copropriétés, l'extension de la redevance spéciale, la collecte des biodéchets ou encore étudier la faisabilité d'une ressourcerie.



3. Les épisodes de canicules et les îlots de chaleur

3.1. Explication du phénomène d'îlot de chaleur urbain

3.1.1. Définitions

Pour mieux comprendre les phénomènes d'îlot de chaleur urbain (ICU), il faut connaître les trois définitions suivantes :

- **îlot de chaleur urbain (ICU)** : il s'agit d'un « phénomène atmosphérique très localisé, dynamique, dont le cycle est rapide et continu. La chaleur emmagasinée, pendant la journée, dans la ville minérale, est restituée la nuit. Ce phénomène empêche le refroidissement de l'air en ville la nuit et ce, en permanence. L'îlot de chaleur urbain se caractérise par le delta de températures constaté entre le centre-ville et sa périphérie à un même moment » (AGAM 2018) ;
- **vague de chaleur** : Météo-France parle de « vague de chaleur » lorsqu'on observe « des températures anormalement élevées pendant plusieurs jours consécutifs. Il n'existe pas de définition universelle du phénomène : les niveaux de température et la durée de l'épisode qui permettent de le caractériser varient, selon les régions du monde notamment et les domaines considérés (caractérisation d'un point de vue climatologique, activité de recherche, dispositif de vigilance météorologique) » (Météo-France).

« Ainsi, pour qualifier un événement de "vague de chaleur", Météo-France s'appuie sur les données de l'indicateur thermique national (une moyenne de 30 stations régulièrement réparties sur le territoire) disponibles depuis 1947. Les climatologues observent un pic de chaleur, correspondant au dépassement d'une température moyenne très élevée sur la France (valeur franchie statistiquement une fois tous les 200 jours). Ils calculent ensuite la durée de l'événement à partir d'une valeur seuil, caractérisant le début et la fin de l'épisode. » (Météo-France) ;

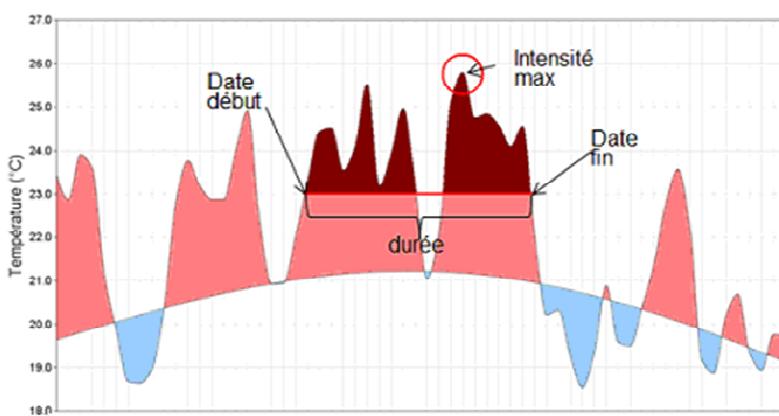


Figure 30. Caractérisation d'une vague de chaleur à partir de l'indicateur thermique quotidien sur la France en durée (date de début et de fin), intensité max et sévérité (partie marron de la courbe de température), © Météo-France

- **canicule** : « épisode de températures élevées, de jour comme de nuit, sur une période prolongée. Dans le cadre de la vigilance météorologique, on tient en effet compte du caractère exceptionnel des températures nocturnes. Quand celles-ci sont élevées pendant

plusieurs jours consécutifs, le risque de mortalité augmente chez les personnes fragiles. Comme le grand froid, la canicule représente un danger pour la santé. » (Météo-France).

3.1.2. Explication générale de l'ICU

Comme le rappelle le cahier « ville » du GREC-SUD (2017) : « 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 ». Les épisodes de forte chaleur font partie du panel d’aléas auxquels les villes méditerranéennes sont exposées.

Ce cahier précise que les spécificités du climat urbain sont caractérisées par une température plus élevée que dans les zones rurales environnantes (surtout en fin de journée et la nuit), des vents spécifiques, la présence de pollution urbaine, une insolation affectée par les ombres portées, des zones de fraîcheur, etc.

À cela s’ajoutent des caractéristiques particulières aux villes méditerranéennes, avec des contrastes terre/mer ou montagne/vallée provoquant des brises thermiques et des microclimats spécifiques. Par ailleurs, l’architecture des villes du Sud joue un rôle non négligeable avec notamment des matériaux clairs et des immeubles anciens hauts et étroits permettant un drainage de l’air chaud vers le haut. Quant aux rues étroites des centres-villes provençaux, elles sont à l’abri du rayonnement solaire (fraîcheur estivale, petites rues ombragées des vieilles villes, etc.). Enfin, les périphéries pavillonnaires étendues incitent à une utilisation de la voiture individuelle plus importante qu’ailleurs, source de pollution.

Toutes ces caractéristiques particulières mettent en évidence l’îlot de chaleur urbain, soit l’écart de température observé entre les milieux urbains et les zones rurales environnantes (Guigère, 2009). Le mécanisme est le suivant : durant la journée, le centre urbain est source de chaleur importante (chauffage, climatisation, moteurs), à cela s’ajoute un phénomène d’amplification du fait de la pollution atmosphérique. Enfin, l’inertie thermique de la ville est plus importante du fait de sa matérialité particulière : elle capte plus de chaleur que dans les milieux plus végétaux où l’évapotranspiration permet une meilleure régulation thermique. Il en résulte que la nuit, la température baisse moins vite que dans la périphérie et la campagne, c’est aussi à ce moment que l’intensité du phénomène d’ICU, soit l’écart de température entre la ville et la campagne environnante, est le plus important.

Les observations déjà effectuées ont montré que cette différence entre milieux urbains et milieux périphériques ruraux peut aller jusqu’à 12°C (Guigère, 2009) et serait en moyenne de 2°C dans l’hémisphère nord (Taha, 1997). Il s’agit donc d’un effet amplificateur des changements climatiques qui entraîne toute une série de conséquences néfastes, par exemple, sur la santé, les réseaux urbains (énergie, transport) et sur le fonctionnement socio-économique de la ville dans son ensemble.

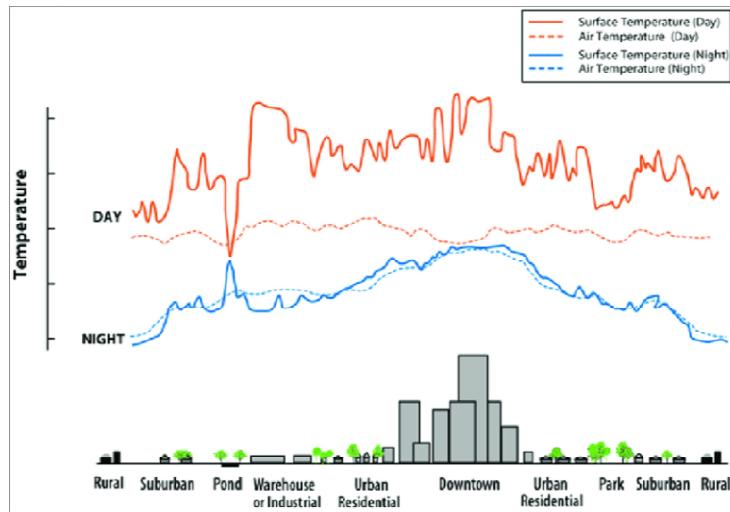


Figure 31. Illustration du phénomène d'ICU
 (source EPA, UHI Basics, 2008 à partir de Voogt, 2000)

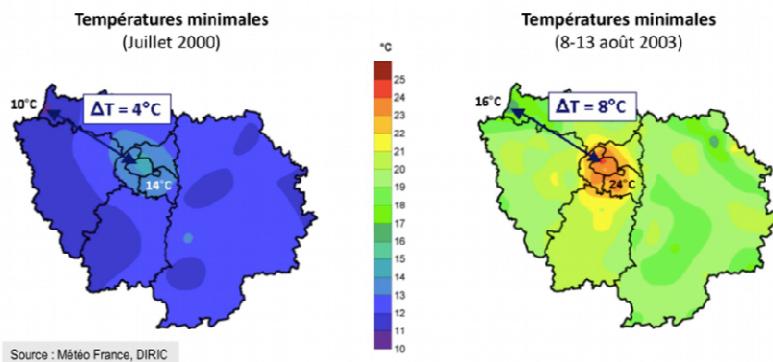


Figure 32. Exemple du phénomène d'ICU sur Paris (Météo-France, DRIC)

3.1.1. Différents niveaux d'observation de l'ICU

Différentes échelles concernent l'ICU. Oke (2004) distingue trois observations :

- la surface du sol : la température concerne les rayons infrarouges émis et réfléchis par les surfaces. La télédétection ainsi que des relevés directs avec des caméras thermiques permettent par exemple de l'observer ;
- la canopée urbaine : c'est la couche d'air entre le sol et le toit du bâti. L'échelle d'étude est infra-urbaine (dizaine de mètres de hauteur). Elle concerne donc la masse d'air dans laquelle nous nous déplaçons ;
- la couche limite urbaine : elle correspond à la couche d'air qui se superpose à la couche de canopée urbaine. Ici l'observation est plus « macro » et s'étale sur un dôme allant à plusieurs centaines de mètres.

Dans cette étude, nous nous sommes particulièrement intéressés aux deux premières échelles.

3.1.2. Les facteurs aggravant d'un ICU

Deux équations expliquent l'ICU : le bilan radiatif et le bilan énergétique (Annexe 7). **Le bilan radiatif** est le premier aspect à comprendre. La surface de la terre reçoit de l'énergie du soleil, mesurée en watt par m^2 . Cette énergie est en partie renvoyée vers l'espace et une autre partie est captée sous différentes formes. Schématiquement, le bilan radiatif est la différence entre l'énergie solaire captée sur Terre et renvoyée dans l'espace. Ce bilan radiatif est une source d'énergie et donc de chaleur.

Ces rayonnements solaires sont :

- diminués de l'effet albédo : la quantité de rayonnement solaire réfléchie par la surface terrestre est appelée « albédo » ou « facteur de réflexion ». Plus une surface absorbe le rayonnement, plus elle chauffe. Les objets noirs, tels que l'asphalte, ont un albédo faible et absorbent une grande partie du rayonnement solaire d'où une température de surface élevée ;
- diminués de l'énergie que la Terre renvoie vers l'atmosphère ;
- augmentés des ondes envoyées de l'atmosphère vers la Terre (effet de serre qui nous permet d'avoir une terre pour le moment à 15°C au lieu de -18°C).

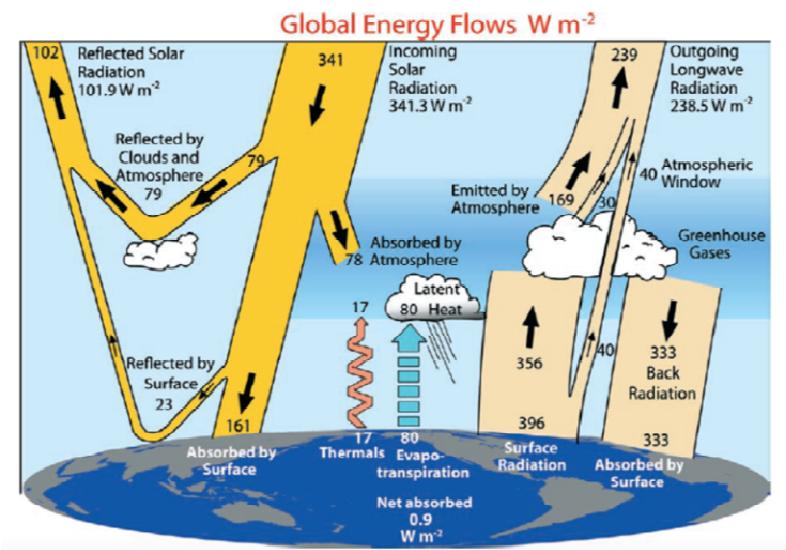


Figure 33. Schéma du bilan radiatif global annuel moyen de la Terre (Trenberth et al. 2009)

Cette « énergie solaire » produit de la chaleur à laquelle s'ajoute la chaleur des énergies d'origine anthropique. Elle est restituée ou intégrée dans le milieu urbain par différents flux de circulation ou de stockage.

Pour comprendre cela, il faut maintenant s'intéresser au **bilan énergétique** en milieu urbain. Il est augmenté par un ensemble de facteurs comme :

- le bilan radiatif augmenté par la surface de radiation plus importante du fait de l'existence de « canyons urbains » ;
- un stock de chaleur plus élevé car l'albédo des matériaux est généralement faible en milieu urbain ;
- l'apport de chaleur d'origine anthropique : climatisation, électricité, transport, chauffage, etc. ;
- une relativement faible évacuation de chaleur latente par évapotranspiration des végétaux : ces derniers étant par définition moins nombreux en milieu urbain ;
- une relativement faible évacuation de chaleur par flux sensible (la morphologie urbaine crée une circulation d'air particulière).

Ces différentes dynamiques sont principalement liées à 4 causes d'origines urbaines (Roux, 2014) sur lesquelles il est donc nécessaire de travailler (cf. chapitre 5 sur les actions) :

- la morphologie urbaine ;
- le choix des matériaux ;
- la faible végétalisation ;
- les activités humaines.

La problématique de la morphologie urbaine

Oke (1981) démontre qu'il existe une relation forte entre intensité de l'ICU et « aspect ratio », c'est-à-dire le rapport entre hauteur des bâtiments et largeur des rues. **Un premier facteur est en effet que les canyons urbains** jouent un rôle important dans le réchauffement de la zone du fait des perturbations qu'ils entraînent sur le rayonnement radiatif (Figure 34). Les canyons urbains correspondent à des rues bordées par des bâtiments de plusieurs étages (photo ci-dessous).



Exemple de canyon urbain, boulevard de Strasbourg à Toulon

Schématiquement, il y a une absorption et une réémission radiative de la chaleur de surface en surface (rebonds) qu'il n'y aurait pas sur une surface plane. La hauteur, la largeur du canyon et l'orientation

par rapport au soleil sont des données qui vont influencer le « piège radiatif » du canyon urbain. Nous avons vu par exemple dans le transect que les rues resserrées, quasiment toujours à l'ombre de la vieille ville constituent davantage un îlot de fraîcheur.



Centre-ville de Toulon

La notion du « piège radiatif », où la chaleur demeure emprisonnée en raison du jeu successif d'absorption et de réémission des rayons infrarouges par les différentes surfaces du canyon est bien schématisée dans la Figure 34 (Catherine Dubois, 2014).



Figure 34. Illustration du piège radiatif des canyons urbains (Catherine Dubois, 2014)

Une autre contribution de la morphologie urbaine est celle de la perturbation des flux d'air. En effet, la chaleur est piégée dans la canopée urbaine au milieu des canyons urbains et ne s'échappe que lentement vers les couches plus élevées de l'atmosphère comparativement aux surfaces planes, ce qu'on appelle la rugosité de la ville est plus importante que celle de la campagne. Les mouvements d'air sont par conséquent perturbés par les bâtiments et empêchent le bon écoulement de la chaleur vers l'extérieur de la ville.

L'impact des matériaux

L'albédo des matériaux est un enjeu important. Il correspond au phénomène de réflexion d'une surface exposée à la lumière. C'est le rapport de l'énergie solaire réfléchie d'une surface et de son énergie reçue (Parmentier, 2010). Ainsi en fonction des matériaux, une surface a une propriété optique et thermique qui favorise la rétention de chaleur. C'est cette propriété optique qui va influer sur le stockage de la chaleur issue du rayonnement solaire direct, et ainsi sur la température des surfaces, et enfin sur le phénomène d'ICU.

L'albédo est une grandeur comprise entre 0 (pour une surface absorbant la totalité de la lumière incidente : corps noir) et 1 (pour une surface réfléchissant la totalité de la lumière incidente). Nos villes ont un albédo moyen de 0,15 à 0,30. Une augmentation à 0,3 ou 0,4 peut aboutir à des réductions de températures importantes, de l'ordre de plusieurs degrés.



Figure 35. Les albédos urbains (source : Huang and Taha, 1990)

Nous résumons dans la liste ci-dessous des exemples de surfaces différentes lors des mesures effectuées à Toulon et au Pradet (Cf. récit du transect). Elles sont cohérentes avec les albédos relevés dans la littérature :

- meuble urbain du port : 64°C ;
- acier voiture : 64°C ;
- bitume frais noir : 63°C ;
- bitume route : 52°C ;
- dalles, place de la Liberté : grisée 43°C, blanche 37°C ;
- mur en crépis : 39°C ;
- mur avec parure mélange de pierre : 33°C ;
- herbe, place de la liberté : 32°C.

Matériaux	Couleur	Utilisation	Albédo retenu
Dalles, pavés	Gris clair-beige	Espaces publics	0,45
Bois	Marron-gris clair	Espaces publics	0,35
Béton	Gris	Espaces publics	0,25
Sol nu, terre	Brun	Surfaces naturelles	0,2
Béton bitumineux	Gris-noir	Espaces publics	0,15
Sable	Brun clair	Espaces publics	0,15
Béton revêtu	Gris-noir	Toits terrasse	0,1
Asphalte	Noir	Espace public	0,05
Enduits Superficiels	Noir	Espace public	0,05

Classe de matériaux et albédos correspondants

Figure 36. Matériaux et albédos²⁶ (source : Grand Lyon)

Or, dans les milieux urbains, les albédos sont généralement faibles. Il en résulte un stockage de chaleur important la journée qui va être réémis la nuit. C'est notamment pourquoi la différence de température entre le milieu urbain et le milieu rural est plus importante la nuit : les matériaux réémettent la chaleur emmagasinée la journée.

La consommation d'énergie

Les flux anthropiques sont importants dans les zones urbaines denses. Toute consommation d'énergie génère en effet de la chaleur. Ainsi, la consommation d'énergie dans les transports, pour l'industrie, pour le chauffage en hiver et la climatisation l'été, pour la lumière et les technologies numériques et domestiques (appareils électroménagers) et enfin tout simplement par le métabolisme humain ajoute de la chaleur en plus du rayonnement solaire. Plus on se situe dans une zone densément peuplée, équipée en machines (auto, bus, TIC, etc.), particulièrement dans les pays de l'OCDE, et plus cet apport de chaleur anthropique est important. Atténuer les gaz à effet de serre au centre-ville est aussi une mesure de lutte contre les ICU.

Flux sensible / convectif

La chaleur sensible est la quantité de chaleur qui est échangée entre plusieurs corps. Elle est « sensible » dans la mesure où le transfert thermique a lieu sans changement de phase (liquéfaction, vaporisation, condensation) du corps en question bien que la température change. « Le flux de chaleur sensible échangé entre la surface terrestre et l'atmosphère correspond à la quantité de chaleur échangée par conduction. Il correspond en moyenne à 30 watts/m² et contribue à chauffer les basses couches de l'atmosphère depuis la surface terrestre. Les masses d'air, chauffées, deviennent plus légères et s'élèvent (convection) vers les hautes couches troposphériques. » (CNRS).

En milieu urbain, il s'agit de l'élément majoritaire du bilan énergétique. Les surfaces artificielles atteignent des températures de surface élevées et provoquent une dynamique énergétique entre la surface et l'air, puis l'air et les couches supérieures de l'atmosphère. C'est pour cela que la chaleur de surface influence la chaleur de la canopée urbaine (échelle du quartier) qui elle-même influe sur la couche limite urbaine (échelle de la métropole).

Un élément important de l'ICU est la formation d'un dôme urbain. L'air chaud urbain va générer des flux « montants » : l'air chaud de la ville s'élève car il est plus léger. Si le vent est relativement fort (> 3 m/s), cette couche d'air chaud est évacuée (panache urbain) vers la campagne ; mais si le vent est faible (< 3 m/s), des cellules convectives se forment (dôme urbain) dans la couche limite urbaine (Mestayer, 1998). Ce phénomène favorise la stagnation d'un air chaud en ville, d'autant plus que la morphologie urbaine tend à réduire la vitesse du vent qui permet l'évacuation des polluants. En l'absence de vent (Figure 37), le phénomène provoque donc un phénomène de « dôme urbain » où la chaleur redescend moins, mais aussi où les polluants stagnent.

²⁶https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/voirie/referentiel-espaces-publics/20091201_gl_referentiel_espaces_publics_thematique_lutte_contre_ilots_chaleur_urbains.pdf

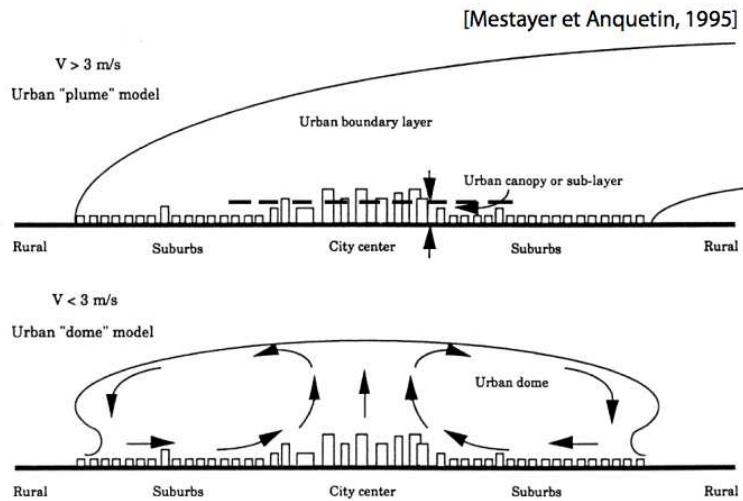


Figure 37. Illustration du panache et du dôme urbain (source : Mestayer et Anquetin, 1995)

Flux de chaleur latent faible par manque d'eau et d'évapotranspiration

À l'inverse de la chaleur sensible, le flux de chaleur latent est un transfert d'énergie entre deux corps qui provoque un changement d'état : l'énergie nécessaire pour qu'une eau à 100°C s'évapore. On appelle ce flux évapotranspiration car il correspond à l'évaporation de l'eau dans l'environnement (sol, feuilles, eau libre) et à la transpiration foliaire (Luquet dans Kotchi, 2004).

En milieu urbain, le flux de chaleur latent dépend principalement de l'évapotranspiration des zones végétales. En milieu végétal, l'évapotranspiration engendre un effet de refroidissement de l'air. Comme les zones végétales sont peu nombreuses du fait du cantonnement de la nature aux parcs et de l'artificialisation des sols qui ne permet pas le stock d'eau de pluie dans les sols, il en résulte que le flux de chaleur latente est diminué.

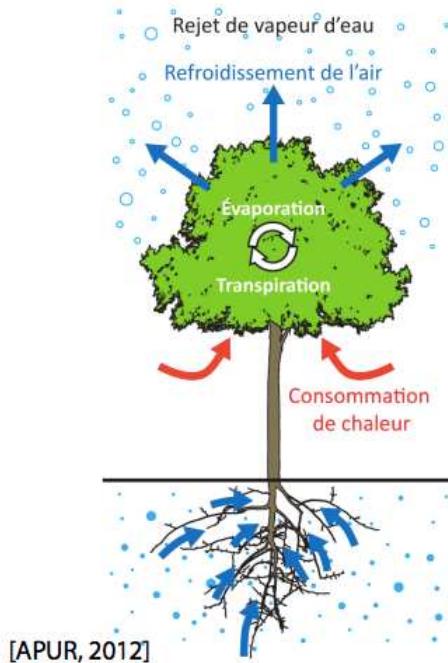


Figure 38. Représentation graphique de l'évapotranspiration (APUR 2012)

Par conséquent, en journée et en ville, le déficit en eau pour le flux de chaleur latente associé à l'excédent du flux de chaleur sensible (transmise du sol à l'atmosphère) engendre un réchauffement de l'air urbain à partir du milieu de la journée.

3.1.1. Le Pradet : territoire de fraîcheur dans la métropole de Toulon ?

Passer du centre-ville de Toulon au Pradet, c'est aller d'une zone dense à revenu relativement faible vers des zones pavillonnaires plus aisées où la végétation et les plages de la côte sont plus fortement présentes. Le Pradet a ainsi une place particulière dans la métropole de Toulon. En effet cette commune principalement pavillonnaire, au bord de la mer, et fortement végétalisée par rapport au centre de la métropole.

Située entre des zones agricoles, le massif de la Colle Noire, les plages, et entourée de zones arborées qui pénètrent dans la commune (Bois de Courbebaisse), Le Pradet est une ville « verte » assez cohérente avec l'aspect champêtre de son nom : Pradet signifiant « petit pré ».

Cette qualité de vie se traduit par une activité touristique balnéaire locale, et se traduit également dans la stratégie d'urbanisme de la commune qui est plutôt dans une dynamique de sanctuarisation des différentes zones naturelles (cf. SCOT).

La Figure 39 illustre le passage du centre-ville très dense à une zone plus pavillonnaire avec des espaces boisés le long du littoral autour du Fort Cap Brun jusqu'au Pradet. On distingue alors un territoire composé majoritairement de maisons (zones rouge clair) alternant avec une zone boisée au cœur de la commune (entre le « haut » de la ville et les plages du « bas »).

Le Pradet est *a priori* en dehors de l'ICU dont « l'épicentre » se situe sur le centre-ville de Toulon. En effet, la commune du Pradet cumule plusieurs facteurs qui devraient être sources de régulation thermique comparativement au cœur de la métropole :

- l'évacuation de l'air n'est pas trop gênée par la morphologie de la ville ;
- la proximité avec la mer assure une thermorégulation au moins des quartiers du bas (port des Oursinières, etc.) ;
- il existe peu de réels canyons urbains qui se comporteraient comme des « pièges radiatifs » à part éventuellement l'avenue de la Première Division Française Libre, avant la mairie ;
- la présence de parcs et de bois permet une évapotranspiration (flux latent) non négligeable.

En revanche, on constate au sein même du Pradet un cœur urbain autour de la D559 qui traverse la ville : plus urbanisé et dont les surfaces sont plus imperméabilisées que les quartiers pavillonnaires bordant les plages et les collines de la Colle Noire.

La densité des zones végétalisées et la situation du Pradet nous conduit à penser que la commune se situe à l'extérieur ou dans la limite de l'ICU toulonnais. Nous allons chercher à vérifier cela dans la partie suivante en utilisant les résultats des travaux réalisés par GeographR en partie 1, en comparant les températures entre stations météorologiques du territoire toulonnais et enfin par la réalisation d'une « balade urbaine » le 9 Août 2018 lors d'une alerte canicule pendant laquelle des mesures de température de l'air et de la surface des matériaux ont été réalisées par nos soins.

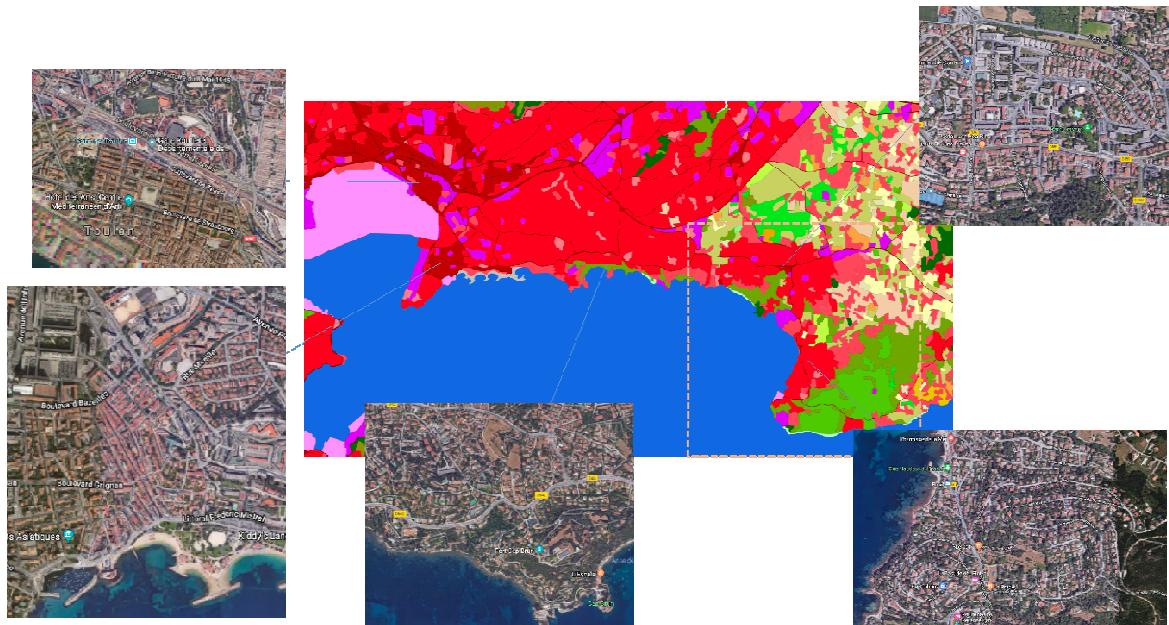


Figure 39. Du centre-ville dense au Pradet pavillonnaire
(Source : OCSOL CRIGE-PACA 2014, Google Earth)

3.2. Tendances passées, présentes et futures du phénomène

3.2.1. Il fait de plus en plus chaud

Les vagues de chaleur en France ont tendance à être plus fréquentes, elles augmentent en nombre et en durée.

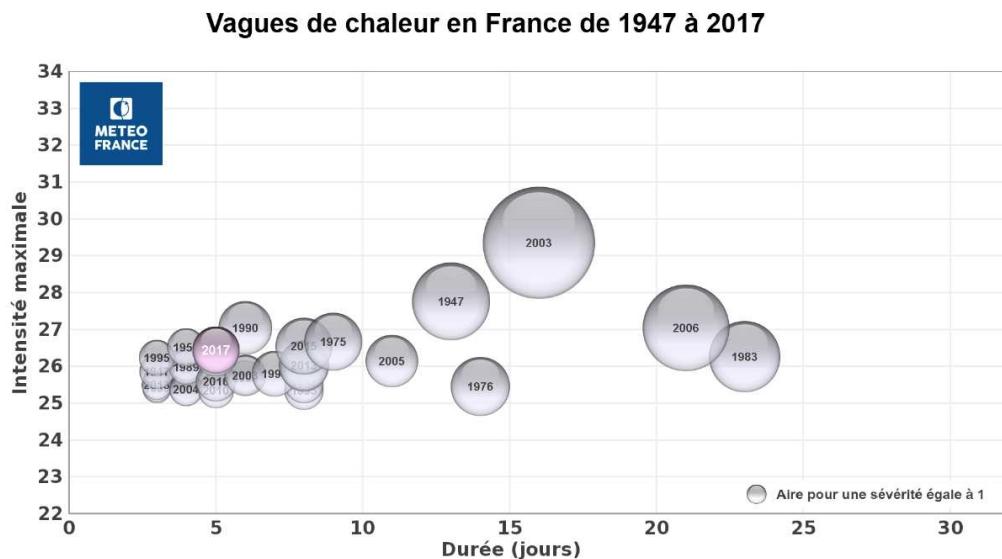


Figure 40. Évolution des vagues de chaleur en France 1947-2017 (source : Météo-France)

Ce phénomène dénote une tendance déjà observée à l'échelle nationale d'un réchauffement global. Les tendances des températures moyennes des villes sont par conséquent en augmentation : pour illustrer, on peut considérer que le climat d'Alger sera celui de Marseille dès 2050 (AGAM, 2018).

Il fait donc globalement plus chaud et les futurs climatiques que nous avons observés en volet 1 tendent à montrer que la commune du Pradet et la métropole de Toulon n'échapperont pas à cette réalité : en effet, la ville méditerranéenne est un espace sensible à cet aléa. Ainsi, les vagues de chaleur seront plus nombreuses et chaudes, elles donnent lieu à des canicules amplifiées en ville par l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU).

3.2.2. Caractérisation de l'ICU actuel

Les cartes des températures réalisées par le bureau d'études GeographR montre l'ICU toulonnais (température de fond) et le positionnement du Pradet. Toulon et son centre-ville dense sont dans une zone dont la Tmax (température maximale) de l'air moyenne entre 1996-2015 se situe dans une échelle de 29,26 à 29,75°C et le Pradet dans une zone de 1°C de moins (28,26-28,75°C) pour la partie la plus urbanisée. On observe également (en cohérence avec les observations lors de nos relevés *in situ*) que plus on se dirige vers le port des Oursinières, plus les zones de température moyenne sont fraîches. En effet, cet indicateur descend même de -3 à -4°C dans les zones pavillonnaires en bordure des collines boisées (Colle Noire).

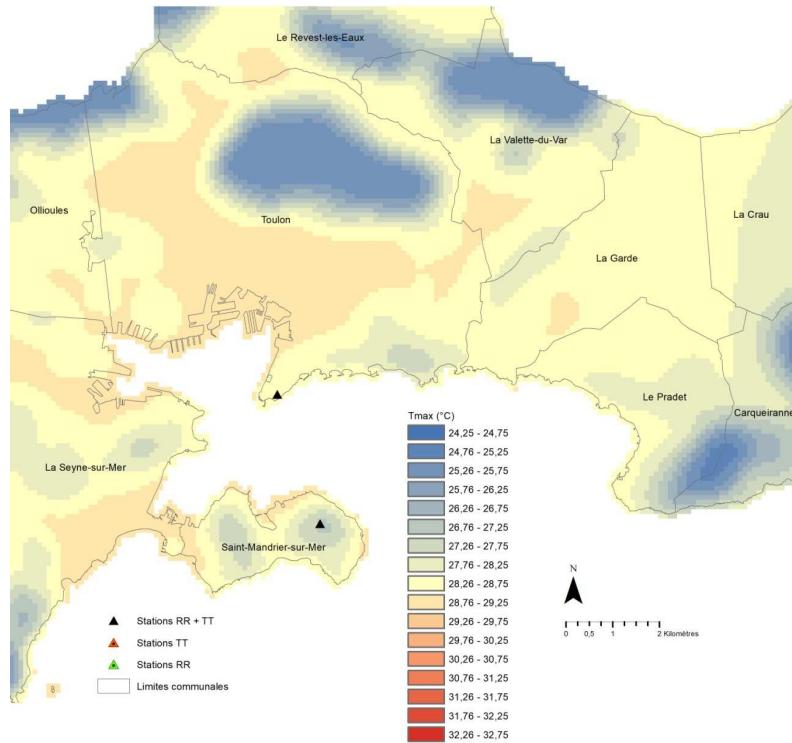


Figure 41. Température maximale moyenne de l'air en été : 1996-2015
 (Source : GeographR, 2018)

La dynamique demeure la même dans un scénario pessimiste de réchauffement climatique RCP 8.5, avec cependant une température moyenne du cœur de l'ICU qui passe de 29°C-29,75°C à 31,26-31,75°C, soit +2°C en moyenne pour les mois d'été d'ici la moitié du siècle.

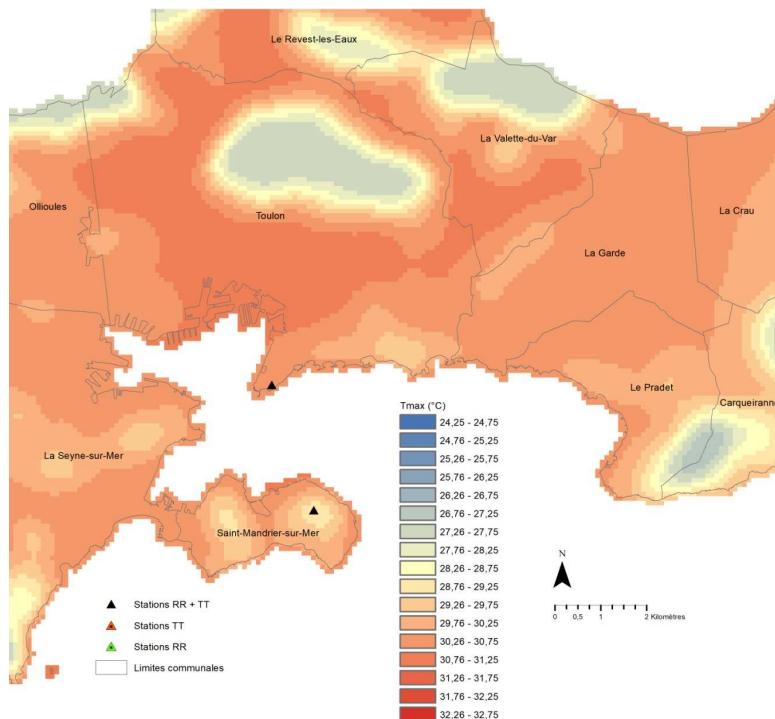


Figure 42. Température maximale moyenne de l'air en été : 2046-2055, RCP 8.5

(GeographR, 2018)

Comparer les différentes stations du territoire pour caractériser l'ICU est peu concluant du fait que les stations Météo-France sont situées quasiment à équidistance du Pradet (Toulon au Cap Cénet et Hyères à l'aérodrome, Cf. partie I) et qu'elles sont soumises à des microclimats assez spécifiques (Cap Cénet face à la mer typiquement).

En revanche, à l'échelle métropolitaine il y a un intérêt. La comparaison des températures minimales et maximales des deux stations de Toulon (située au Cap Cénet) et d'Hyères (aérodrome), une située en milieu rurale et l'autre en milieu urbain, au mois d'août 2018 donne en effet deux informations sur l'existence du phénomène d'ICU :

- 1) en août 2018, la température minimale de Toulon est quasiment systématiquement au-dessus de celle de la station d'Hyères. En moyenne, la température minimale de Toulon est ainsi de +1,55°C par rapport à celle la station d'Hyères. Un record de +4,8°C est observé le 12 août 2018. Il y a donc une descente de température moindre la nuit sur la station de Toulon par rapport à Hyères, ce qui est cohérent avec l'explication du phénomène d'ICU où l'énergie thermique cumulée en ville se dégage la nuit et donc la température de l'air ambiant descend moins ;
- 2) la température maximale est en revanche plus élevée à Hyères en journée. La station de Toulon ne dépasse celle de Hyères que 5 jours sur le mois d'Août 2018 ;

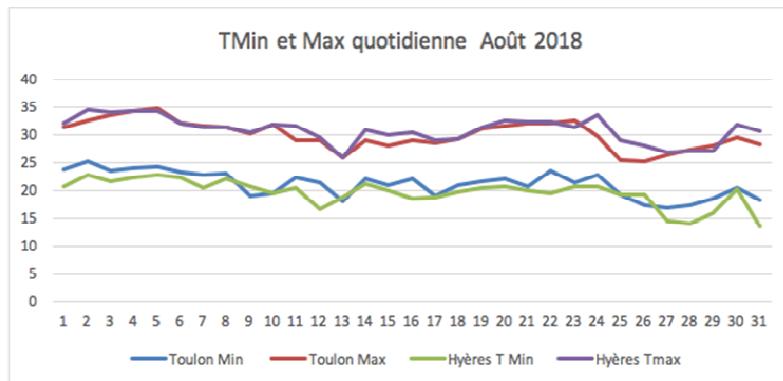


Figure 43. Tmin et Tmax des stations Météo-France d'Hyères et de Toulon
(source : Météo-France)

3.2.3. Télédétection : température de surface

Nous complétons cette analyse de l'ICU à l'échelle métropolitaine par l'utilisation de la télédétection. Il est en effet possible de produire une carte de la **température de surface** à partir du canal infrarouge des images satellites Landsat. Très intéressante pour obtenir une vision spatialisée des zones les plus susceptibles d'être vulnérable au phénomène de surchauffe urbaine.

Il est recommandé avant d'interpréter cette carte de ne pas perdre de vue les points de vigilance suivants :

- comme vu précédemment, la température de surface est un des facteurs explicatifs de l'ICU. La morphologie (canyon urbain) et les flux d'air contribuent parmi d'autres paramètres à la formation d'un ICU ;
- l'image Landsat 8 utilisée n'a pas subi de correction atmosphérique « consistant à soustraire du signal mesuré au capteur celui induit par les effets de l'atmosphère en termes de processus d'absorption et de diffusion dus au gaz tel que l'ozone, les aérosols et la vapeur d'eau » (Berthé, UQAM, 2013). Dit autrement, ces gaz altèrent le signal des surfaces reçus par les capteurs du satellite. Les corriger aboutit à une température de surface plus élevée et plus proche de la réalité (Berthé, 2013) ;
- l'image Landsat 8 utilisée date du 6 août 2018 entre 10h16 et 10h19, en pleine canicule, au cours d'une journée où la qualité de l'air était qualifiée de « médiocre » par AtmoSud et sans couverture nuageuse (2 %).

À l'échelle de la métropole Toulonnaise, à 10h15 le 06 Août 2018, la carte des températures de surface montre que :

- les températures de surfaces sont élevées dans les zones commerciales (centre commercial du Var-Ikea le long de l'A57 et la ZI de la Seyne-sur-Mer à la sortie de l'A50), indiquées en cercles noirs pointillés (Figure 44) ;
- elles sont également élevées dans les zones agricoles avec serre ;
- enfin les zones urbaines denses, comme les centres-villes, mais aussi les zones pavillonnaires très imperméabilisées, ont déjà accumulé beaucoup de chaleur ;
- le rôle des zones naturelles comme zone de rafraîchissement est démontré. En effet, le Mont Faron, Colle Noire, les forêts autour du Col du Serre, ainsi que les zones boisées proches du littoral présentent globalement les valeurs les plus faibles.

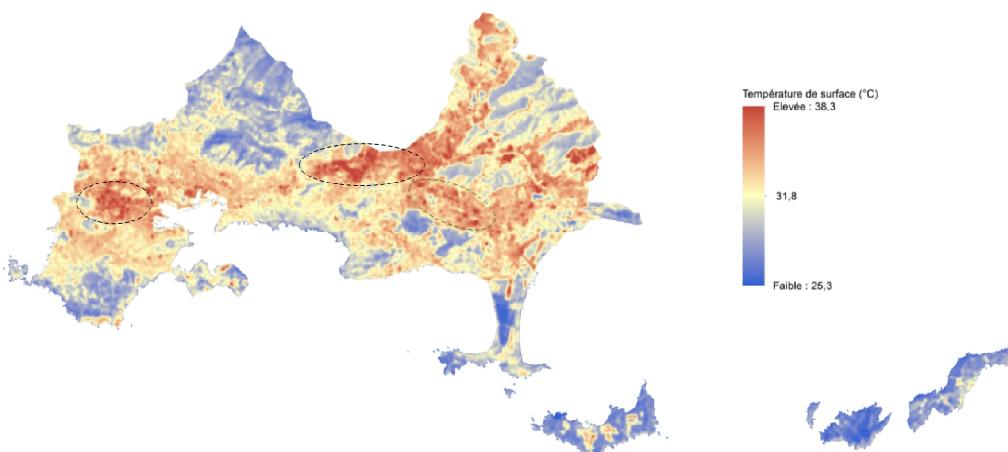


Figure 44. Température de surface le 6 août 2018 (source : GeographR)

Un zoom de la même image satellitaire (les codes couleurs de températures ont changé) sur le Pradet nous aide à déterminer quelles sont les zones susceptibles de souffrir le plus des canicules et de

l'accumulation de chaleur. Sans surprise, ce sont les zones au nord de la commune, plus denses et urbanisées, notamment la zone commerciale à la sortie Est de la ville et les zones pavillonnaires autour du groupe scolaire Charles Sandro.

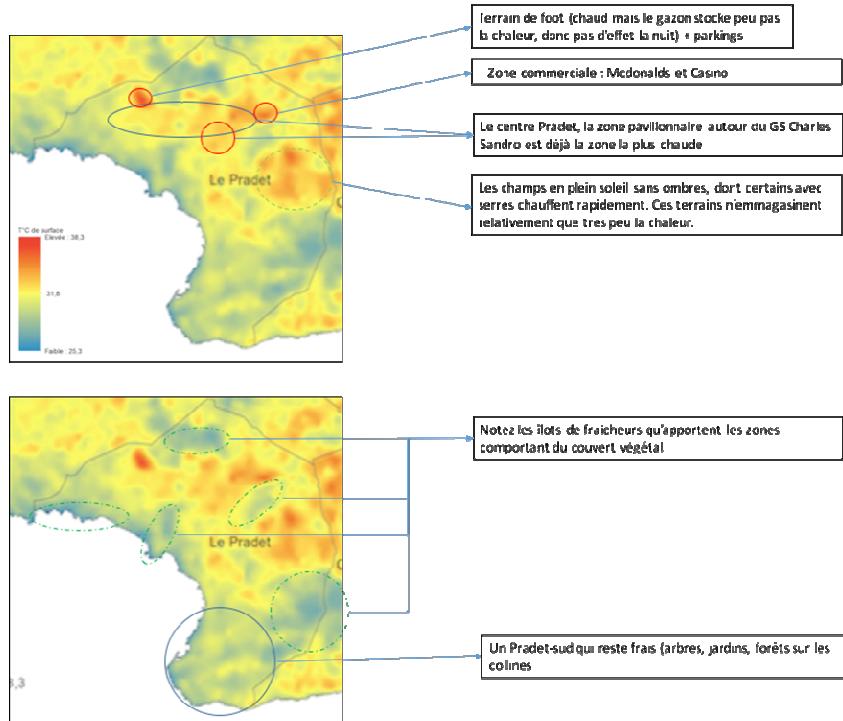


Figure 45. Identification des points chauds et frais à partir de la température de surface le 6 août 2018 (source : GeographR)

3.2.1. Réalisation d'un transect sur une journée

Enfin, devant les faibles données *in situ* disponibles, nous avions proposé de réaliser un transect, une « balade urbaine », munis d'un appareil de mesures de la température qui permettrait de se rendre compte très concrètement des écarts de températures entre les différentes ambiances urbaines de la métropole de Toulon.

La mesure de la température a été réalisée par :

- un Datalogger température (°C) utilisé dans l'industrie agroalimentaire notamment pour le respect de la chaîne du froid (+/-0,5°C) ;
- un Thermoflash Evolution pour la température de surface (+/- 0,25°C à une distance de moins de 5 cm) ;
- un capteur IGRENESS pour mesurer l'humidité et la température. Cet appareil étant normalement utilisé dans des hangars, nous avons fait le choix de faire des relevés par « points » à l'abri de brise. Les mesures d'humidité sont cohérentes avec les sensations ressenties durant le parcours.

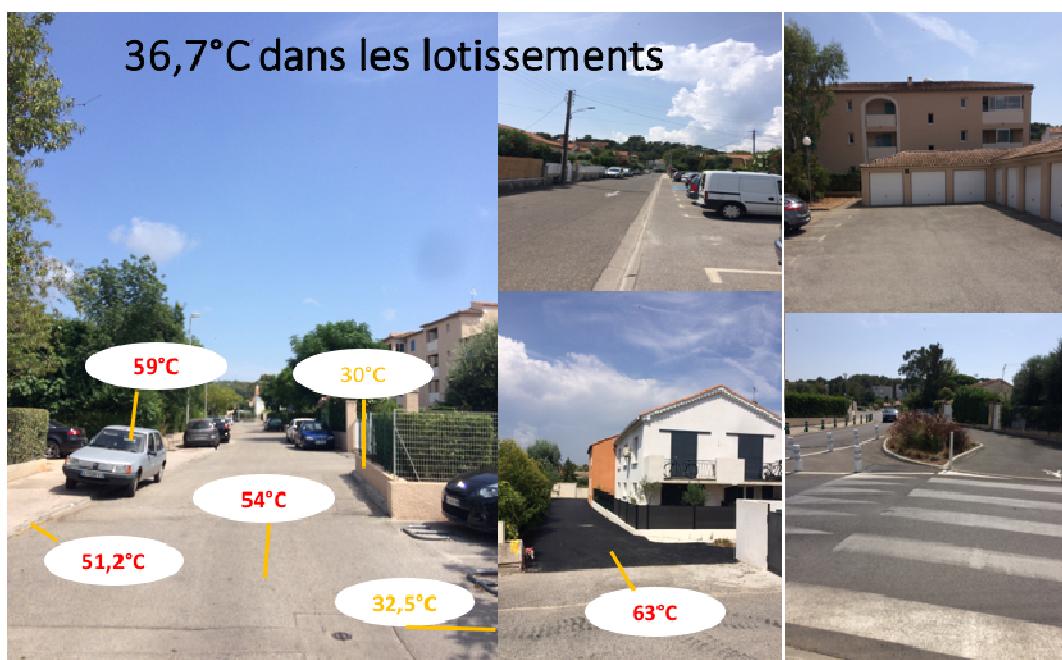
Le Datalogger était situé dans le filet extérieur du sac à dos, régulièrement pris à la main pour vérifier les températures. Le déroulé du transect est disponible en annexe. Voici les principaux résultats.

Les informations principales que nous tirons de cet exercice sont que :

- les îlots de fraîcheur sont réels et peuvent apporter jusqu'à 4°C de moins que dans les rues adjacentes (cas de la fontaine de la Mairie du Pradet ci-dessous), ainsi que les zones ombragées (cas d'un platane le long du port de Toulon prêt de la CCI) ;



- le choix des surfaces est déterminant, les écarts peuvent aller jusqu'à 20°C de différence à quelques centimètres près ;
- le mobilier urbain doit être pensé jusque dans ces moindres détails (abribus, surface du mobilier urbain du port, revêtement des bâtiments) ;
- Les zones pavillonnaires ne sont pas nécessairement moins chaudes en journée : la forte imperméabilisation des sols et l'absence d'ombre au-delà des jardins privés en font des fournaises ;





Interreg

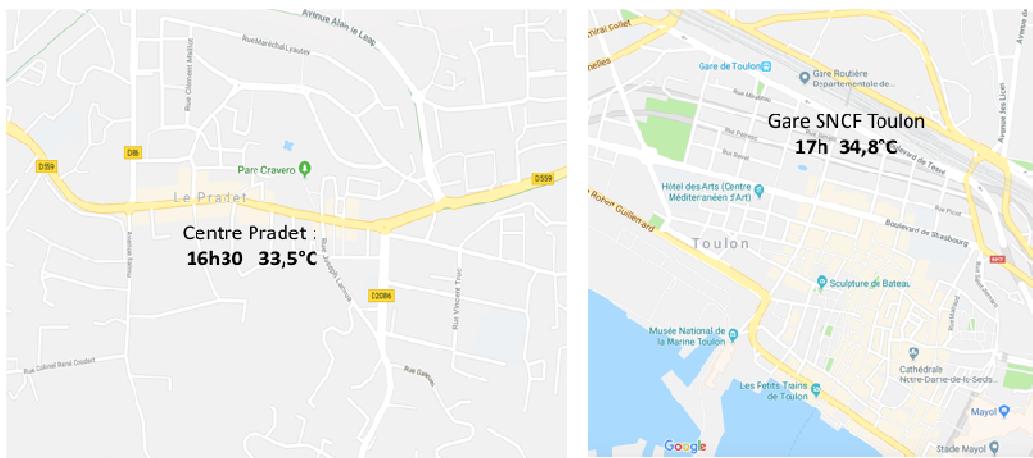


MARITTIMO-IT FR-MARITIME

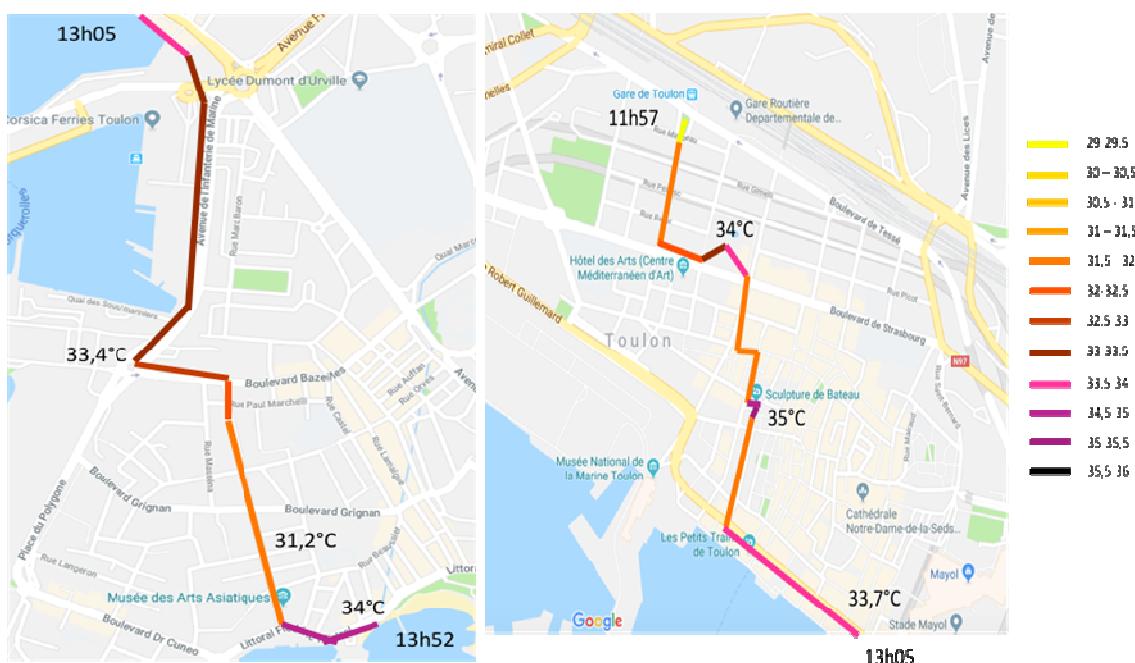
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



- nous avons enregistré entre le centre-ville de Toulon et le Pradet environ +1,5°C en fin de journée. Il aurait été intéressant de faire le test très tôt le matin où les écarts doivent être plus importants ;



- au sein même du Pradet, l'avenue principale est plus chaude (+3,5°C mesurés) que la partie « basse » de la ville en bord de mer.



3.2.1. Impacts identifiés des canicules et du phénomène d'ICU dans un contexte de changement climatique

L'évolution à la hausse de la température moyenne, du nombre de canicules, et de la longueur de ces dernières entraîneraient une aggravation des impacts listés ci-dessous.

Dégradation du confort thermique dans le bâti et les espaces publics : la hausse projetée des températures et la multiplication des épisodes de canicule soulèvent la question du confort thermique dans le bâti et les espaces publics. Lors de fortes chaleurs, le confort thermique dépend fortement des caractéristiques de l'urbanisme et du bâti. L'effet d'îlots de chaleur urbains (ICU) (élévation localisée de température par rapport à la moyenne régionale) peut avoir des conséquences sur la qualité et le rythme de vie, domestique et au travail.

Dans le cas de la commune du Pradet cette réalité sera plus vraie pour les quartiers situés autour de la D559. Il pourrait également y avoir un impact sur le tourisme avec des sorties et une restauration sur des plages horaires plus tardives comme le pratique déjà certains pays chauds.

Certains bâtiments publics devront être rénovés/isolés et peut être même dotés de systèmes de production de froids. Les bâtiments tels que les EPHAD, les groupes scolaires, devront sans doute également faire l'objet de rénovation afin de prendre en compte cette problématique.

Enfin, la hausse des températures et des canicules en particulier risque d'entraîner un développement important en équipement de climatisation par les ménages, entraînant encore plus de surchauffe urbaine d'une part et de pics de consommation estivaux d'autres part.

Réseau de transport terrestre : dégradation des infrastructures et du service en lien avec les vagues de chaleur

La hausse de fréquence et d'intensité des canicules entraînerait des détériorations sur les infrastructures des réseaux de transport ferrés et routiers. Sur le réseau ferré, les fortes températures sont à l'origine d'un phénomène de dilatation du métal des rails (déformation) et des caténaires en cuivre (baisse de transmission du courant, risque de toucher les trains et de provoquer une panne) ainsi que de problèmes de signalisation (court-circuit). Sur le réseau routier, les fortes températures peuvent provoquer un ramollissement du bitume à l'origine de la création de nids de poule et d'ornières qui dégradent les routes. Par ailleurs, les moteurs mal entretenus sont plus rapidement en surchauffe : les vieux véhicules ou les véhicules mal entretenus tombent en panne (13 % d'appels en août suite aux pannes auto en août dernier).

La voirie du Pradet et en particulier le réseau des routes secondaires peuvent être potentiellement plus touchés, nécessitant des budgets de voiries supplémentaires de la part des autorités compétentes. Cela est d'autant plus vrai que les canicules en été pourront alterner avec de fortes pluies.

Le réseau de bus et de transport en commun peut être fortement sollicité en termes de consommation de carburant pour la climatisation déjà perçue comme un service indispensable : il devra être rénové d'autant plus si les citoyens prennent leurs véhicules individuels en période de chaleur, ce qui contribue à agraver la situation, l'effet d'ICU et la pollution.

Surmortalité / santé : le changement climatique va provoquer une augmentation de l'intensité et de la fréquence des canicules et par conséquence une augmentation du nombre de jours de fortes températures qui favorisent une augmentation de la pollution à l'ozone troposphérique. Il en résultera une augmentation des problèmes respiratoires liés à ces épisodes. Les difficultés d'adaptation aux

fortes chaleurs lors des canicules entraînent des pathologies (déshydratation, coup de chaleur, hyperthermie) et peuvent conduire à une hausse de la mortalité habituelle, particulièrement chez les populations les plus sensibles (-5 ans et +65 ans).

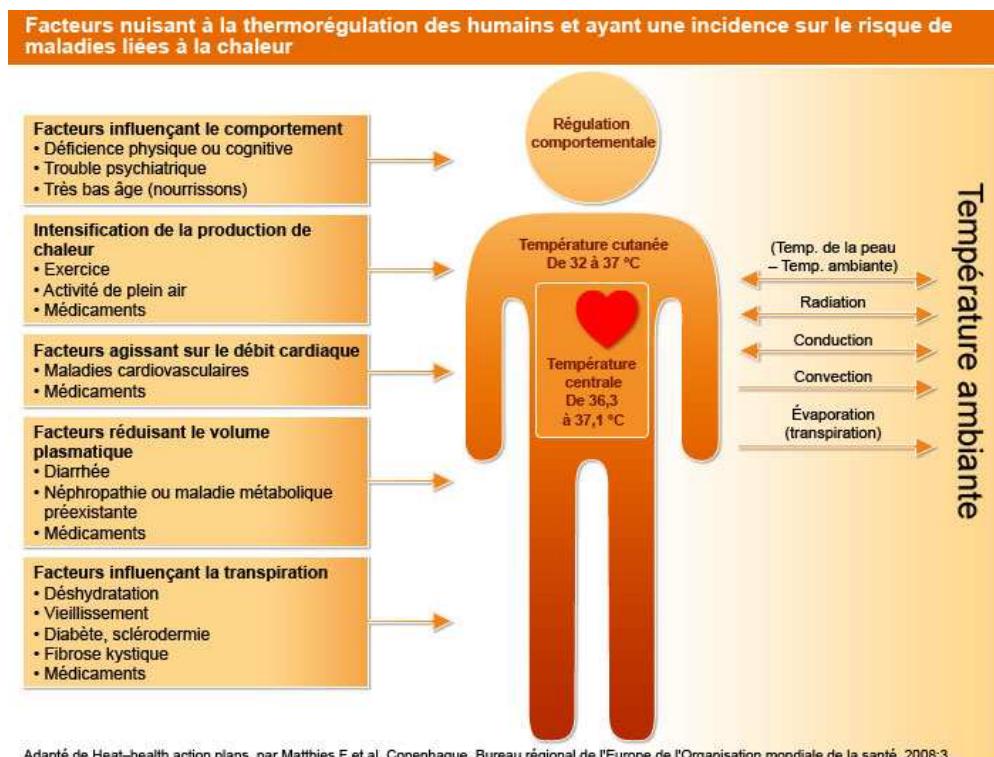


Figure 46. Illustration de l'incidence de la chaleur sur le corps humain

La démographie du Pradet, plutôt âgée est plutôt vulnérable à ces incidences. Les dispositifs d'alerte et de surveillance ont été améliorés depuis la canicule de 2003. L'épisode de 2018 semble avoir montré que les dispositifs en place fonctionnent aux côtés de familles et d'individus qui ont appris à respecter des gestes de bon sens (ne pas aller à la plage en pleine après-midi pour les personnes vulnérables, sortir le matin et le soir, s'hydrater, prendre des nouvelles, etc.)

Augmentation des épisodes de forte pollution : l'effet conjoint du soleil, de la chaleur et de l'absence de vent caractéristique des canicules entraîne une concentration des polluants et par conséquent des pics d'ozone. Cela aboutit à l'aggravation des problèmes de santé liés à la qualité de l'air.

La forte utilisation du véhicule personnel tend à aggraver ces épisodes à l'échelle du Pradet qui est une ville sensible à ce phénomène notamment par sa proximité à des zones d'émissions majeures (autoroute, centre-ville, port). Néanmoins, la majeure partie des épisodes de pollution provient d'autres activités métropolitaines, telles que celles du port.

Fragilisation des infrastructures du réseau électrique : les postes électriques sont soumis à une forte chaleur et peuvent prendre feu.

3.2.1. Quelles capacités d'adaptation actuelle et future de la ville du Pradet ?

- La ville dispose de plusieurs zones naturelles, « sanctuarisées » par les différentes planifications d'urbanisme telles que le SCOT. Elle est par ailleurs entourée de zones agricoles et par la mer qui sont des espaces qui se rafraîchissent la nuit.
- Le parc de la mairie, en plein cœur de la zone la plus dense, agit comme un véritable îlot de fraîcheur.
- La mise en place de systèmes d'alerte avec le CCAS et en lien avec la préfecture et son plan canicule sont de nature à permettre l'information des populations. Nous avons pu voir que des systèmes d'alerte avec utilisation de technologies modernes (TIC) permettaient de toucher directement les populations. L'affichage en mairie indiquant les bons gestes pour gérer la canicule gagnerait à être diffusé plus largement.
- Le développement potentiel du secteur de la Grenouillère devra faire l'objet d'une attention particulière. Néanmoins, les plans du projet tels que configurés en 2011 et disponibles sur le site de la mairie montrent une préoccupation première sur l'organisation d'une trame vert et bleue de nature pour permettre le rafraîchissement des zones urbanisées.
- Un travail plus conséquent pourra être poursuivi concernant les zones pavillonnaires, le groupe scolaire, et la zone commerciale avec la mise en œuvre de solutions diverses (principalement « désimperméabiliser » les sols, inciter les particuliers à utiliser certains matériaux, créer des zones d'ombres, etc.).

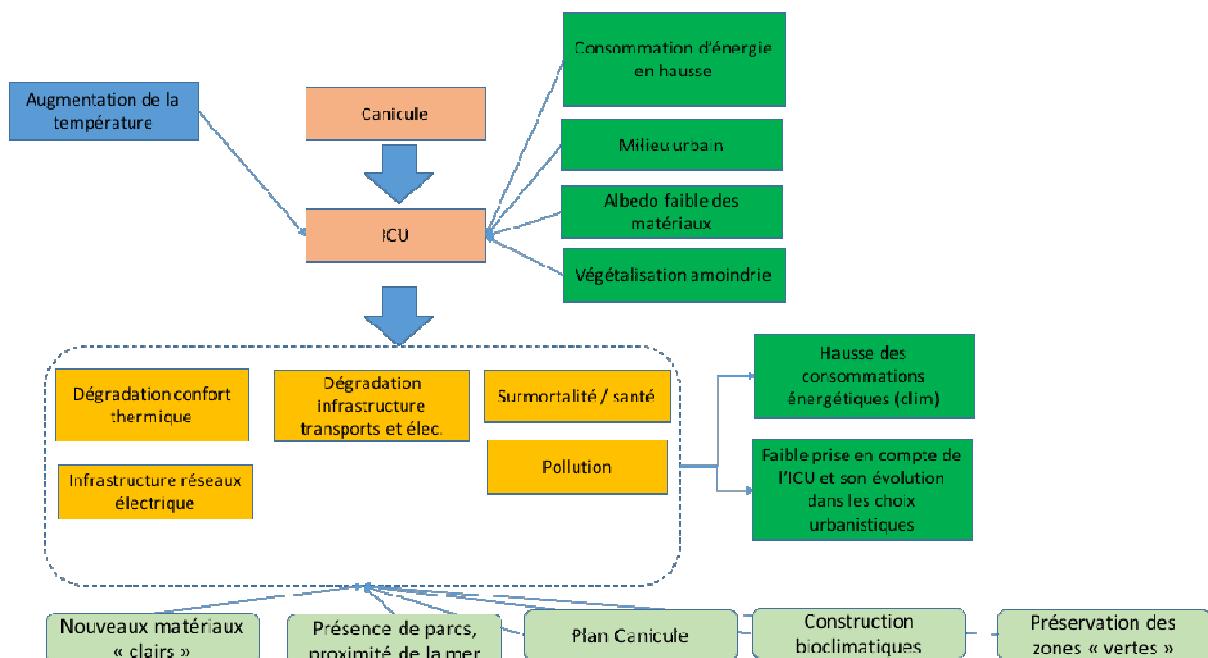


Figure 47. Chaine d'impacts ICU et canicules

4. Le système hydraulique, les risques hydrogéologiques et les risques littoraux

4.1. Un territoire déjà soumis aux risques hydrogéologiques et littoraux

4.1.1. Un territoire fortement concerné par les inondations et coulées de boue

L'analyse des arrêtés de catastrophe naturelle (base GASPAR) sur la période 1982-2017 montre une prédominance des phénomènes d'inondations et coulées de boue, en particulier à l'automne.

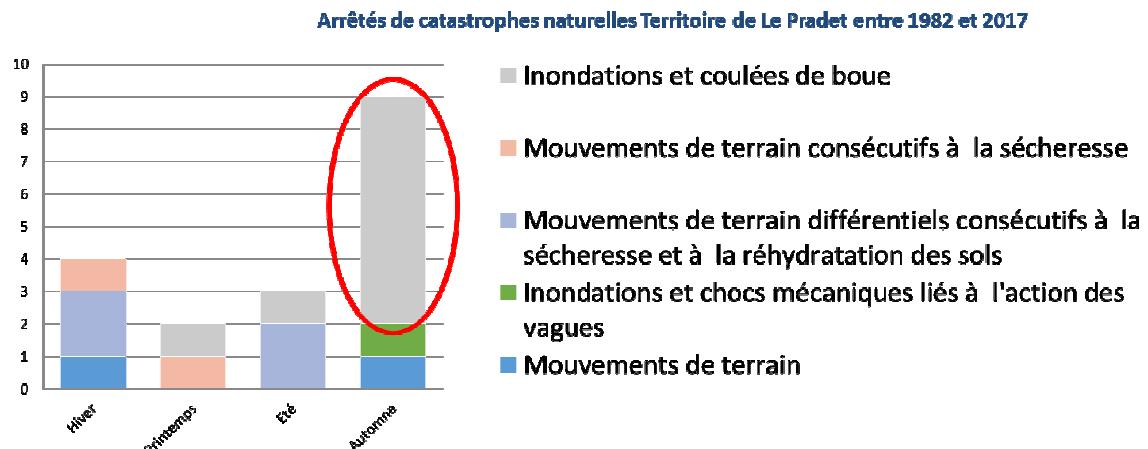


Figure 48. Bilan des arrêtés de catastrophe naturelle sur la commune du Pradet entre 1982 et 2017 (source : base GASPAR (<http://www.georisques.gouv.fr>)

En particulier, l'état de catastrophe naturelle pour inondations a été déclaré 7 fois depuis 2010 et 4 fois en 2014.

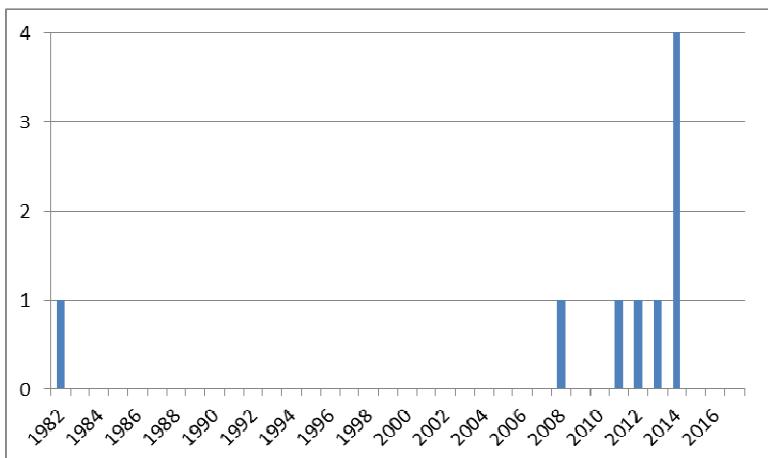


Figure 49. Nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle liés à des inondations par année sur la commune du Pradet entre 1982 et 2017 (source : base GASPAR (<http://www.georisques.gouv.fr>)

Le territoire est en effet fortement concerné par les inondations du fait de la présence du fleuve de l'Eygoutier au nord de la commune (inondations par débordement de l'Eygoutier et de ses affluents) et de son régime de précipitations, caractérisé par la survenue de pluies intenses (des volumes importants concentrés sur quelques heures) à l'automne et au début de l'année (inondations par ruissellement suite au débordement et/ou à des dysfonctionnements du réseau pluvial).

En 2014, de fortes pluies ont été enregistrées en janvier et des épisodes exceptionnels ont eu lieu à l'automne (19 septembre et 7 octobre). La commune a alors été touchée par des inondations et des coulées de boue, causant des dommages matériels importants. Les dommages provenaient essentiellement du débordement d'ouvrages enterrés obstrués par des matériaux ou des embâcles. Dans le cas de la résidence citée ci-dessous, dont une partie du parking s'est effondrée, un ouvrage enterré dimensionné pour une pluie trentennale a cédé alors que la pluie mesurée correspondait à un événement de période de retour 5 ans.

Orages dans le Var : une résidence évacuée au Pradet, près de Toulon



« Des orages et des fortes pluies ont touché le Var cette nuit et moins fortement ce mardi matin. Une trentaine de personnes ont été évacuées (...) Une partie du sol des habitations s'est effondrée dans le parking. »

Source : France 3 Provence-Alpes-Côte d'Azur, 07/10/2014.



Inondation du secteur La Guillaumière



Inondation du secteur Port des Oursinières



Évènement du parking de la résidence Régence Park



Laisse de crue visible sur les ouvertures de la résidence Régence Park

Figure 50. Dégâts causés par les pluies du 7 octobre 2014 (source : photos des riverains tirées de l'Expertise hydraulique des bassins-versants du massif de la Colle Noire, Artelia, 2016)

Le 6 décembre 2014, un effondrement de terrain a eu lieu dans la calanque du Pin de Galles, causant l'évacuation de 25 personnes et touchant quatre habitations. Une vingtaine de cabanons restent inaccessibles en raison d'un arrêté municipal de péril.

Le Pradet: 60 personnes évacuées après une coulée de boue



« Après les fortes pluies de ces dernières semaines, une partie de la falaise s'est détachée au Pradet. Une impressionnante coulée de boue s'est répandue dans la calanque du Pin de Galle. Au moins 4 maisons ont été touchées, 60 personnes ont dû être évacuées. »

Source : France 3 Provence-Alpes-Côte d'Azur, 07/12/2014.

Avant les enregistrements d'arrêtés de catastrophe naturelle, les inondations de janvier 1978, crue centennale de l'Eygoutier, ont fortement marqué le territoire : après 5 jours de pluie, un épisode pluvieux de 160 mm en 24h a fait monter le débit de l'Eygoutier jusqu'à 200 m³/s et le Plan de la Garde est resté inondé pendant 18 jours.



Figure 51. Photos des inondations au Plan de la Garde et à la sortie du tunnel de la Clue lors de la crue centennale de Janvier 1978. Source : Association Intercommunal des Riverains de l'Eygoutier²⁷

4.1.1. Sécheresses et ressources en eau : un territoire naturellement pauvre en eau, mais sécurisé par le système Durance-Verdon

Dans le cadre de cette étude, peu de retours d'expérience des grandes sécheresses récentes (notamment 2003-2007 et 2016-2017) ont pu être collectés. Du fait de sa connexion avec le système Durance-Verdon via la Société du Canal de Provence (SCP), l'approvisionnement en eau de la commune du Pradet apparaît comme étant relativement sécurisé.

Néanmoins, des tensions ponctuelles ont pu apparaître. On note par exemple la remarque suivante dans le rapport de présentation du PLU de 2011 : « à l'été 2005, le lac de Carcès est vide, la nappe phréatique dans laquelle puise la commune est au plus bas ». Or c'est en août 2005 que se déclare l'incendie du massif de la Colle Noire.

²⁷ <http://eygoutier.free.fr/inondation78.html>



Une analyse plus précise des retours d'expérience paraîtrait opportune pour mieux anticiper les conséquences des sécheresses agricoles et hydrologiques sur le territoire.

4.2. Les tendances hydroclimatiques futures et leurs impacts

4.2.1. Projections

Évolution des sécheresses

Le terme de « sécheresse » peut faire référence à trois phénomènes qu'il convient de distinguer pour mieux comprendre les différentes situations, leurs causes et leurs conséquences :

- **la sécheresse météorologique se traduit par un déficit prolongé et anormal de la pluviométrie** : de longues périodes sans pluie. Depuis les années 1970, on observe une récurrence de périodes avec des forts déficits et notamment la récurrence d'années à forte sécheresse successives 1989-1990, 2006-2007 et 2016-2017, phénomène rarement observé lors du dernier siècle. Aujourd'hui, les modèles ne nous permettent pas de dire si ces années s'inscrivent dans une tendance à l'augmentation des années sèches liée au changement climatique. En revanche, l'augmentation, en lien avec le changement climatique, des sécheresses estivales, en durée et intensité, est une quasi-certitude en milieu méditerranéen avec une diminution des précipitations et une augmentation des températures ;
- pour suivre plus finement l'impact de la sécheresse sur les plantes (agriculture, forêt), la sécheresse peut être abordée également à travers **l'humidité du sol : on parle avec de sécheresse édaphique (des sols) ou agricole**. Le projet de recherche Climsec, dont les résultats sont disponibles sur le portail Climat HD²⁸, s'est penché sur l'évolution des sécheresses sous changement climatique en développant des simulations de l'humidité du sol. L'humidité du sol prend en compte d'une part les précipitations, mais également les phénomènes d'évapotranspiration. Un temps chaud et/ou venteux va amplifier fortement le dessèchement causé par l'absence de pluie.

Pour la région, l'évolution prévue par les modèles climatiques pour l'indicateur d'humidité des sols est préoccupante, notamment dans l'hypothèse où rien n'est fait pour freiner l'émission des gaz à effet de serre. **Au cours du XXI^{ème} siècle, quel que soit le scénario climatique considéré, un assèchement des sols est attendu en toute saison avec pour effet un allongement de la période de sol très sec (avancée nette au printemps) et une diminution de la période favorable à la recharge.** À partir des années 2080, l'humidité moyenne du sol entre les mois de mars et septembre pourrait correspondre aux situations sèches extrêmes d'aujourd'hui, ce qui augmenterait énormément le besoin d'irrigation des cultures et donc accentuerait la pression sur les ressources en eau.

Enfin, la sécheresse hydrologique fait référence à un déficit de ressources en eau dites « bleues », c'est-à-dire l'eau des cours d'eau et des nappes souterraines. En général, elle fait suite aux sécheresses météorologiques et agricoles. Ce point sera traité plus en détails dans les paragraphes suivants.

²⁸ <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>

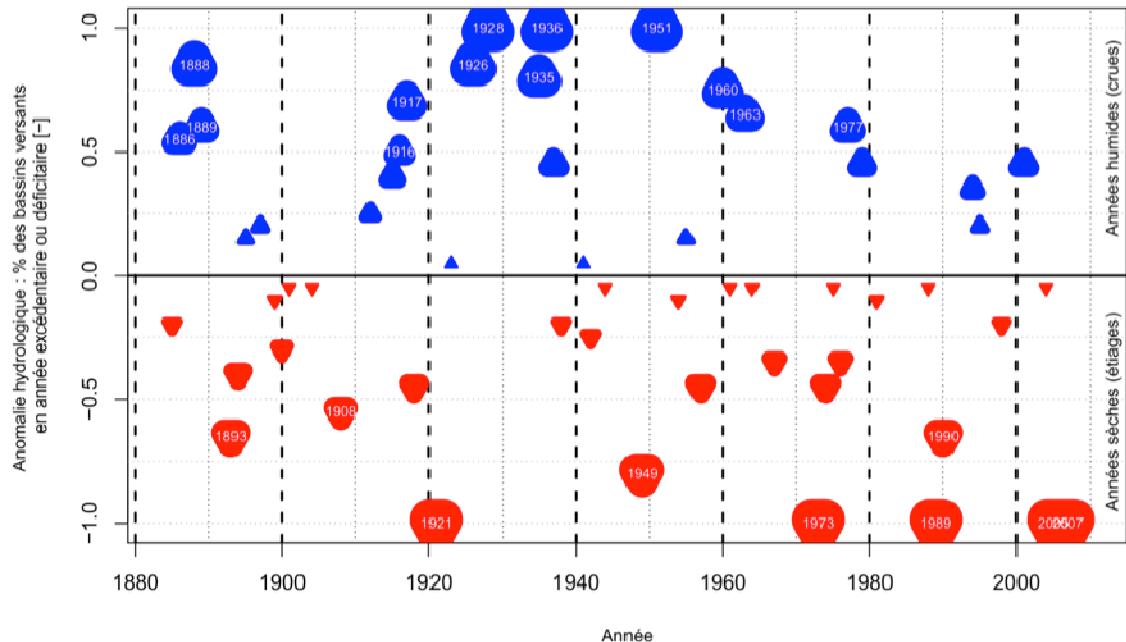


Figure 52. Anomalie hydrologique de 20 bassins-versants de la Durance. Cette figure présente la proportion de bassins-versants en état d'anomalie entre 1883 et 2010 (un signe moins indique une période d'étiage, le symbole étant lui aussi proportionnel au nombre de bassins concerné).

Source : cahier « Ressources en eau », GREC-SUD, www.grec-sud.fr

Les conséquences du changement climatique sur le risque incendies

Le massif de la Colle Noire :

Située sur les 1^{ers} contreforts occidentaux du massif des Maures, la Colle Noire est un massif préservé compris entre les agglomérations littorales toulonnaise et hyéroise. 152 hectares des 157 que comprend ce massif sont situés sur la commune du Pradet (et 5 ha sur la commune de Carqueiranne). « Poumon vert » de la métropole, ce massif est un espace récréatif et touristique, mais aussi un espace à forte valeur écologique et paysagère. Classé ZNIEFF (Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique), le massif fait l'objet d'une gestion partenaire entre le Conservatoire du littoral, l'Office national des forêts, les communes du Pradet et de Carqueiranne, et TPM.

L'incendie de 2005 :

en août 2005, un incendie de grande ampleur a ravagé la quasi-totalité du massif.

« *L'incendie qui s'est déclaré jeudi 4 août sur le massif de la Colle Noire, entre les communes du Pradet et de Carqueiranne dans la Var, a brûlé près de 250 hectares de végétation et nécessité l'évacuation à titre préventif de 1500 personnes, a-t-on appris auprès du CODIS (Centre opérationnel d'incendie et de secours). » Par L'Obs publié le 07 août 2005 à 10h26*

Depuis cet incendie, le massif fait l'objet d'un vaste programme de réhabilitation et de sécurisation. Les travaux de restauration des terrains incendiés, ainsi que sa position lui ont permis de retrouver rapidement une végétation abondante. Aujourd'hui, le massif est essentiellement constitué d'un maquis, parsemé de chênes-lièges rescapés.



Figure 53. Dans la nuit du 4 au 5 août 2005, un incendie ravageait le massif de la Colle Noire.
Photo : Var Matin.

Évolution récente du risque incendie

Aujourd'hui, et depuis quelques années, on observe déjà un impact du changement climatique sur le danger « météo de feu de forêt ». Les situations de forte température combinées à des forts vents et de fortes sécheresses sont de plus en plus fréquentes associées à un allongement de la saison météo à risque qui est en train d'évoluer de juillet-août à début juin-fin septembre. Malgré une diminution des surfaces brûlées, grâce à la prévention et la lutte anti-incendie, **on remarque dans notre région une hausse des grands feux liés à des températures élevées (2003) et des années de fortes sécheresses (2016, 2017)**. Durant ces longues périodes de sécheresse continues, la végétation et la litière profonde du sol se dessèchent très profondément, augmentant fortement le potentiel d'intensité et de propagation du feu. Ces conditions rendent la lutte très difficile et génèrent de forts impacts sur les enjeux humains, économiques et écologiques.

Évolution future du risque incendie

Plusieurs facteurs suggèrent que les feux vont augmenter dans le futur, et notamment les grands feux, dont principalement l'évolution des paysages qui montrent une tendance à la fermeture et à l'embroussaillement conjuguée avec le changement climatique. Les projections climatiques annoncent des sécheresses estivales plus intenses et plus longues et une augmentation importante de la température estivale associée à des périodes de canicule à répétition. Les conditions sont ainsi réunies pour favoriser l'éclosion d'incendies dévastateurs représentant une menace pour la population, les

infrastructures et les écosystèmes. D'ici 2080, les conditions exceptionnelles de 2003 et 2017 devraient ainsi devenir progressivement des conditions normales voire « fraîches » selon les scénarios. Si on se base sur les scénarios du GIEC, la fréquence des grands feux observée en 2003, 2016, 2017 pourrait déjà augmenter dans les trois prochaines décennies.

Les conséquences liées au risque incendie

Mise en danger de la vie des personnes, fermetures des réseaux de transports, dommages sur les infrastructures (habitats, réseau électrique), pollution atmosphérique (particules), conséquences post-incendies (chutes d'arbres, éboulements etc.). En particulier sur la commune du Pradet, **la destruction de la végétation du massif de la Colle Noire par l'incendie de 2005 a très certainement accentué les phénomènes d'inondation par ruissellement dans les zones résidentielles en aval du massif, du fait d'une moindre rétention de l'eau par les sols et la végétation.**

La difficulté de prévoir l'évolution future de la ressource en eau

Tout **d'abord concernant l'évolution des précipitations**, les projections climatiques fournies par les modèles montrent dans notre région des évolutions contradictoires, que ce soit sur la quantité globale des précipitations annuelles ou sur le nombre de jours de fortes précipitations (pluies supérieures à 20 mm, soit 20 litres/m² sur une journée).

Malgré ces fortes incertitudes, en examinant plus particulièrement la tendance des pluies estivales, on constate une tendance à la baisse plus marquée que sur les autres saisons associée un allongement du nombre de jours consécutifs sans précipitation. Conjugué à la hausse importante des températures de l'air, ce phénomène accentuera la sécheresse des sols en été et aura des conséquences notables à long terme sur la gestion de la ressource en eau et la sensibilité des forêts aux incendies, dans une région déjà très vulnérable sur ces aspects.

Les prévisions d'évolution de la ressource en eau ne sont pas issues directement des simulations des précipitations, mais de modèles qui ont pour objectif de quantifier les évolutions du fonctionnement du bassin-versant et sa composante « débit » soumis aux perturbations du climat (étude Explore 2070) et de la composante anthropique à travers notamment l'augmentation de la demande (cas de R2D2), une perturbation de ces entrées (ici, le climat). Cette multiplicité d'hypothèses rend difficile l'étude de ces évolutions et ainsi l'intensité des changements attendus diffère d'une étude à une autre.

Évolution future de la ressource

Il est donc encore difficile de donner une image chiffrée de la ressource en eau future pour un territoire donné. En revanche, malgré ces difficultés et contraintes de modélisation (qu'il faut garder en mémoire), **il est possible de dégager des tendances « lourdes »** concernant l'évolution de la ressource sur la région et sur le territoire du Pradet :

- la baisse estivale des précipitations et la hausse importante des températures (évapotranspiration) conduiront à une forte augmentation des sécheresses estivales en durée et en intensité. L'augmentation de la demande (demande en irrigation accrue et précoce, tourisme) augmentera la pression sur la ressource ;
- une baisse globale de la ressource en eau à l'échelle annuelle et principalement en période estivale ; pour la région du Pradet, l'étude Explore 2070 prévoit une baisse annuelle de 10 à 20 % du débit des cours d'eau à l'horizon 2065, mais avec une très faible concordance des modèles ;

- une intensification des contrastes saisonniers avec des étiages estivaux plus sévères, notamment pour les bassins au régime piloté par les précipitations ;
- les études « recharge 1 et recharge 2 » sur l'évolution de la recharge en eau des nappes souterraines montrent également une baisse de 10 à 20 % de la recharge d'ici 2050 ;
- résultats du projet Climsec : l'humidité des sols d'ici 2060 équivaldra aux extrêmes secs actuels.

Évolution future des extrêmes hydrologiques avec le changement climatique

La majorité des extrêmes hydrologiques (ruissellements, crues torrentielles, les crues éclairis, etc.) sont des événements par définition rares et causés par des pluies très fortes, mais aussi très localisées (épisodes méditerranéens ou cévenols). Leurs caractéristiques rares et localisées en font des événements quasi impossibles à modéliser et donc à prévoir. Il est donc impossible, aujourd'hui, de prévoir leur évolution en fréquence et en intensité dans le cadre du changement climatique et d'en dégager une tendance pour une région donnée. Leur évolution demeure donc très incertaine. Mais cela ne signifie pas qu'ils n'évolueront pas.

En effet, si l'on se base sur la théorie, si la température augmente, un même volume d'air sous les mêmes conditions de pression peut contenir plus d'eau sous forme vapeur (relation de Clausius-Clapeyron). Or c'est cette quantité de vapeur qui est susceptible d'être précipitée lors des épisodes fortement orageux. L'augmentation du contenu effectif en vapeur d'eau a pu être évaluée en moyenne à 7 % par °C supplémentaire.

Comme les projections prévoient plusieurs degrés d'augmentation de la température, la théorie suggère donc que les fortes pluies pourraient être dans l'avenir notamment plus intenses qu'aujourd'hui et partant que les crues pourraient être plus dévastatrices. C'est la théorie, aucune certitude ne peut y être associée.

De plus, la position du GIEC sur ces questions évolue. En effet, certains modèles prédisent une augmentation de la variabilité du cycle de l'eau ou de la vitesse des vents, ce qui pourrait donc se traduire par plus de sécheresses, d'inondations et de tempêtes, ou par leur intensification. Selon certains modèles, il semblerait donc bien que le changement climatique entraîne une multiplication et une intensification de certains phénomènes météorologiques extrêmes, au moins en ce qui concerne les vagues de chaleur, les sécheresses et les inondations.

4.2.2. Des aléas climatiques aux impacts potentiels

Les tendances hydroclimatiques décrites ci-dessus pourront avoir de multiples impacts potentiels sur l'ensemble des secteurs du territoire.

Impacts liés aux pluies et aux inondations

Risques sur la sécurité des personnes et des biens en lien avec les inondations (ruissellement)

La multiplication et l'intensification des événements de fortes pluies pourraient induire une aggravation des impacts des inondations par ruissellement. Des délais d'alerte ou d'évacuation très courts en cas d'inondation mettent en danger les personnes : inondations des rues avec risque d'écoulement emportant tout sur son passage ou d'isolement de la population suite à la coupure des accès et des communications ; risque de retard de l'intervention des secours ; des dommages aux biens mobiliers. Les dommages indirects, souvent plus importants que les dommages directs, s'ajoutent au bilan : perte d'activité, chômage technique, etc.

Risques sur la sécurité des personnes et des biens en lien avec les inondations (débordement)

L'évolution des phénomènes de crues sous changement climatique est incertaine. Les inondations par débordement de cours d'eau peuvent mettre en danger les personnes, ainsi que les biens mobiliers et immobiliers qui peuvent être endommagés ou emportés. Comme avec le ruissellement, les dommages indirects s'ajoutent au bilan (perte d'activité, chômage technique, etc.).

Risque sur la sécurité des personnes et des biens en lien avec les effondrements de terrain et coulées de boue

Si les causes exactes des effondrements de terrain restent à déterminer, ils semblent être déclenchés au moins en partie lors des fortes pluies. Ces effondrements et coulées de boue peuvent mettre en danger les personnes, ainsi que les biens mobiliers et immobiliers qui peuvent être endommagés, détruits ou emportés.

Inondation des réseaux : électrique, transport terrestre (routier et ferré), eau et assainissement

L'inondation des réseaux d'eau et d'assainissement peut poser des problèmes de gestion de surplus. Les coupures éventuelles des réseaux de transport et des réseaux électriques lors d'inondations impactent également l'accessibilité et le fonctionnement des usines de traitement et des stations d'épuration, entraînant des risques de pollution des milieux naturels par débordement.

Impacts liés aux sécheresses, aux ressources en eau et aux usages

Surexploitation de la nappe

La baisse de la recharge combinée à une éventuelle hausse des prélèvements pourrait mener à une surexploitation de la nappe ayant pour conséquence la baisse de la productivité des pompes, une accentuation des problèmes de qualité de l'eau et, éventuellement, des phénomènes d'intrusion saline et de salinisation des eaux souterraines.

La sensibilité des aquifères à l'intrusion saline dépend de leurs propriétés physiques (type d'aquifère : karstique ou alluvial par exemple, perméabilité, homogénéité), mais aussi de facteurs externes tels que les volumes d'eau prélevés (eau potable, irrigation, industrie..) qui ont un impact sur la charge piézométrique de l'eau douce. La recharge de l'aquifère liée aux précipitations constitue également un facteur déterminant de l'intensité du phénomène d'intrusion saline.

Avec les conséquences du changement climatique, telles que l'augmentation du niveau marin et la modification des conditions de recharge, l'altération de la qualité des eaux douces par l'intrusion saline en milieu côtier est donc un problème susceptible de s'amplifier.

Baisse de la ressource disponible impactant la capacité d'accueil du tourisme saisonnier

La diminution de la disponibilité de l'eau (en particulier en période estivale) couplée à une hausse de la demande en eau (notamment pour l'irrigation du fait de conditions climatiques asséchantes) peut conduire à des restrictions d'usage de l'eau, impactant la capacité d'accueil du tourisme saisonnier.

Baisse de la ressource disponible impactant la capacité d'AEP

Une baisse importante de la ressource disponible peut aller jusqu'à impacter la capacité d'adduction en eau potable : restrictions sur l'usage domestique et /ou ruptures de service en période de sécheresse, baisse de la qualité de l'eau...

Limitation de l'accès à l'eau pour l'irrigation, impactant la production et les revenus

L'accès à l'eau pour l'irrigation peut être limité en cas de tension sur la ressource (ressource insuffisante, usage non prioritaire donc limité en premier en cas de restrictions...). Les restrictions peuvent impacter la production (baisse des rendements voir pertes, dépérissements de pieds de vigne...) et les revenus, mettant en question la viabilité de certaines productions agricoles. Dans le cas du Pradet, l'irrigation est alimentée par le réseau de la Société du Canal de Provence.

Tensions accrues sur le partage de la ressource en eau

La diminution de la disponibilité de l'eau (en particulier en période estivale) couplée à une hausse de la demande en eau (notamment pour l'irrigation du fait de conditions climatiques asséchantes) peut conduire à des restrictions d'usage de l'eau, impactant les usages économiques de l'eau. Des conflits d'usages de l'eau peuvent survenir. Se posent alors des questions de gouvernance et de partage de la ressource, pouvant impacter ou modifier les modes de gestion actuels.

Les impacts sur le littoral : tempêtes, submersion et érosion

En France métropolitaine, 140 000 habitants vivent à moins de 250 m de côtes en érosion et 850 000 personnes (570 000 logements) habitent dans des zones dites « basses », c'est-à-dire à une altitude inférieure à la hauteur atteinte par la mer lors d'une tempête d'occurrence centennale²⁹. L'élévation du niveau moyen de la mer et l'augmentation potentielle de l'intensité et de la fréquence des tempêtes et surcotes marines pourraient avoir un impact marqué sur les activités et infrastructures du littoral, ainsi que sur la sécurité des biens et des personnes.

Érosion du trait de côte : sécurité des personnes (effondrements)

L'élévation du niveau moyen de la mer et l'augmentation potentielle de l'intensité et de la fréquence des tempêtes et surcotes marines pourraient accentuer l'érosion du trait de côte et le risque d'effondrements sur le littoral du Pradet, mettant à risque la sécurité des personnes et des biens dans les zones sensibles.

Tempêtes et submersions marines : dommages aux infrastructures et aux biens situés en bordure de plage (ports, postes de secours, habitations...)

Certaines tempêtes passées ont déjà causé des dommages aux infrastructures et aux biens situés en bordure de plage : postes de secours endommagés (à l'hiver 2016-2017 au Pin de Galle et à l'hiver 2017-2018 sur la plage des Bonnettes), quais du port des Oursinières submergés, etc. L'élévation du niveau moyen de la mer et l'augmentation potentielle de l'intensité et de la fréquence des tempêtes et surcotes marines pourront accentuer ces dommages.

4.3. Analyse des impacts : les facteurs aggravants et les facteurs de résilience

4.3.1. Méthode d'analyse

Pour chacun des impacts décrits dans la partie précédente, le rapport décrit les facteurs aggravants et les facteurs de résilience caractéristiques de la commune du Pradet. Des chaînes d'impacts sont développées pour illustrer le propos. Celles-ci sont des représentations schématiques des interactions entre les facteurs climatiques et les non-climatiques (facteurs aggravants ou de résilience) qui jouent sur la gravité de chacun des impacts du changement climatique. Adaptées au contexte local, ces

²⁹ Colas, S., Duvernoy, J., Lasfargues, S., 2015. Introduction: le littoral, un espace à forts enjeux, *Le littoral dans le contexte du changement climatique*. La Documentation Française.

chaînes d'impacts offrent une vision synthétique des enjeux liés au changement climatique et des leviers potentiels pour l'adaptation.

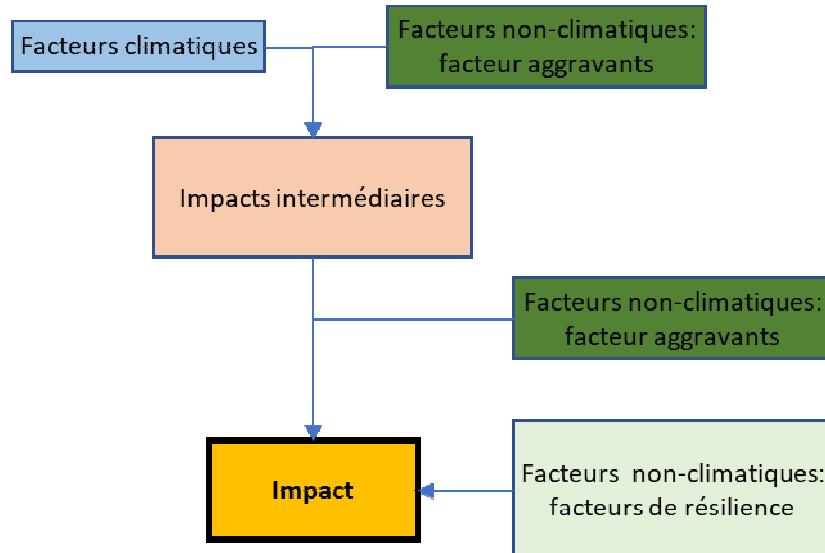


Figure 54. Principe des chaînes d'impacts

4.3.2. Les impacts liés aux pluies et aux inondations

Présentation du système hydrique

La commune du Pradet est située sur le bassin versant de l'Eygoutier, fleuve côtier prenant sa source à la Crau et coulant sur un axe NE-SO à travers la plaine de la Garde puis vers la ville de Toulon. L'Eygoutier reçoit 5 affluents au niveau de la plaine de la Garde : le Lambert, le Réganas et la Planquette sur la rive droite, et l'Artaude et la Règue sur la rive gauche, tous deux venant de la commune du Pradet.

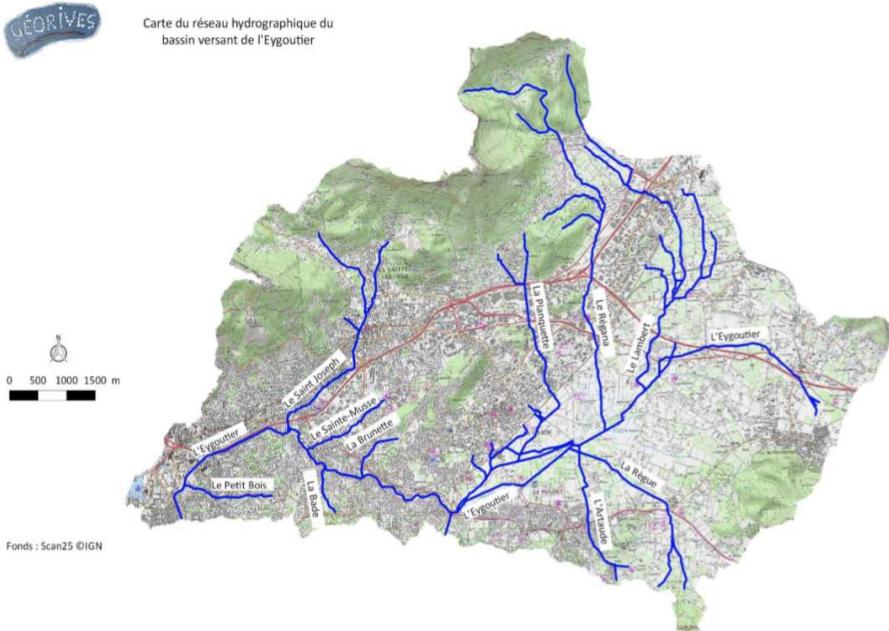


Figure 55. Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Eygoutier (source : Étude du fonctionnement de l'Eygoutier et de ses affluents, approche hydraulique et morphologique en lien avec le milieu. Phase 1 : travaux préalables, février 2018, Ingérop-Géorives)

Le bassin de l'Eygoutier est fortement marqué par l'anthropisation. Les cours d'eau actuels semblent venir en grande partie des constructions anthropiques passées, réalisées principalement pour drainer la vaste plaine alluviale historiquement marécageuse sur la moitié amont du bassin (sur le Plan de la Garde)³⁰. L'embouchure naturelle du fleuve, qui ensablait le port de Toulon, a été déviée par un tunnel creusé sous le fort Lamalguie creusé en 1856 qui aboutit au Mourillon. Une deuxième déviation a été creusée du Pas de la Clue à l'anse San Peyre (le tunnel du Pont de la Clue) à la fin du 19^{ème} siècle dans l'objectif de limiter les fréquentes inondations de Toulon³¹. Enfin, la forte urbanisation du secteur depuis l'après-guerre a pu modifier les écoulements sur le bassin, avec l'augmentation des surfaces imperméabilisées.

Le Syndicat de Gestion de l'Eygoutier a pour objet la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations sur le bassin-versant de l'Eygoutier. Il gère principalement les aménagements hydrauliques sur le bassin-versant. Le syndicat a notamment réalisé un schéma d'aménagement de l'Eygoutier en 1993, des études de faisabilité et d'impact d'aménagements hydrauliques (dont le doublement du tunnel du Pont de la Clue) dans les années 2000, un nouveau Schéma d'Aménagement de l'Eygoutier en 2007. En 2017 un réaménagement au Pont de la Clue a permis de réorienter les débits d'étiage vers Toulon plutôt que dans le tunnel.

L'Eygoutier est qualifié de « Masse d'Eau Fortement Modifiée » et son état écologique a été évalué comme mauvais en 2009 et moyen en 2015, du fait de pressions liées à la morphologie, l'hydrologie, et la qualité de l'eau (pesticides et substances dangereuses).

Imperméabilisation et réponse hydrologique sur la commune du Pradet

³⁰ Etude du fonctionnement de l'Eygoutier et de ses affluents, approche hydraulique et morphologique en lien avec le milieux. Phase 1 : Travaux préalables. Février 2018, Ingérop – Géorives.

³¹ Eygoutier.free.fr/la_riviere.html

Outre les inondations par débordement de l'Eygoutier au niveau du Plan de la Garde, la commune du Pradet est soumise à des inondations par ruissellement lors d'événements pluvieux intenses. Ceux-ci concernent des zones résidentielles se situant au pied des pentes.

D'après l'expertise hydraulique des bassins versants du massif de la Colle Noire réalisée en 2017³² : « Les situations hydrologiques les plus redoutées sur le secteur d'étude sont des épisodes pluvieux intenses (durée 1 ou 2 heures) se produisant soit après une longue période pluvieuse ayant entraîné la saturation des sols, soit après une longue période de sécheresse car les fortes pentes du massif de la Colle Noire associées à un substrat très sec ne permettent pas à l'eau de pluie de pénétrer efficacement le sol. »

Si le bassin-versant de l'Eygoutier est relativement imperméabilisé, il l'est surtout sur les secteurs aval (le sud du Pradet, Toulon...). Or la commune du Pradet bénéficie de la présence de zones agricoles, naturelles et forestières relativement étendues sur ses secteurs amont, qui permettent de ralentir les écoulements.

Néanmoins, l'incendie de 2005 qui a détruit toute la végétation sur le massif de la Colle Noire, a pu avoir pour conséquence une accélération des écoulements du fait d'une moindre capacité de rétention de l'eau. Aujourd'hui encore, la végétation reste jeune sur le massif. La dynamique d'exploitation forestière en cours devrait permettre d'intégrer la problématique de la rétention de l'eau et du ralentissement des écoulements, constituant ainsi un facteur de résilience face au risque d'inondations par ruissellement.

En ce qui concerne le réseau et les ouvrages de gestion de l'eau pluvial, ceux-ci tendent à être dimensionnés pour des événements d'occurrence décennale.

Si le niveau d'imperméabilisation des sols reste relativement contenu sur la commune, avec de surcroît une limitation des nouveaux projets d'urbanisme, on peut noter que les quelques nouveaux projets d'urbanisme ne prennent pas en compte une éventuelle intensification des fortes pluies. De plus, les quelques nouveaux projets d'urbanisme semblent prévoir des bassins de rétention au volume inférieur aux préconisations de la MISEN de 2014^{33,34}.

Certains schémas de gestion et projets en cours pourraient limiter l'impact des inondations sur la commune du Pradet :

- le schéma d'assainissement pluvial avec des travaux effectués ou prévus pour pallier aux dysfonctionnements actuels du réseau pluvial (cf. études hydrauliques) ;
- la gestion du ruissellement par l'amont dans les massifs forestiers, notamment dans le cadre du projet ADAPT.

³² Programme européen Interreg MARITTIMO-IT FR-MARITIME / Projet ADAPT : Expertise hydraulique des bassins versants du massif de la Colle Noire, Maîtrise d'œuvre pour la définition et le suivi d'un site pilote dans le Bois de Courbebaisse. Rapport de synthèse Phases 1, 2 & 3. Octobre 2017, Egis – Artelia.

³³ Expertise hydraulique sur le secteur de l'Artude, Rapport provisoire Version 2, Egis, Mai 2015.

³⁴ Règles générales à prendre en compte dans la conception et la mise en œuvre des réseaux et ouvrages hydrauliques pour le département du Var, fiche synthétique. Mission InterServices de l'Eau et la Nature du Var – MISEN 83, Janvier 2014 (www.var.gouv.fr)

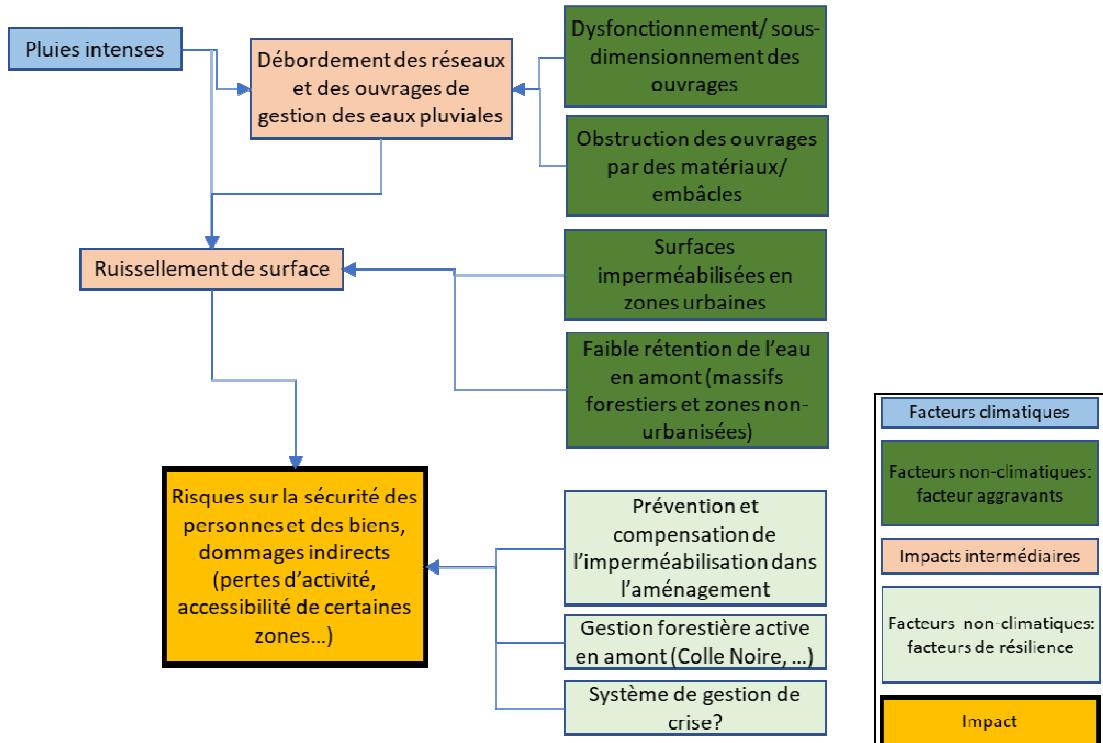


Figure 56. Chaîne d'impacts pour les inondations par ruissellement



Sur les inondations et les coulées de boue : le zonage est-il actualisé ? (en cours d'actualisation pour les inondations par débordement, étude en cours sur le Pin de Galle pour les effondrements). Est-il respecté ?

4.3.3. Impacts liés aux sécheresses, aux ressources en eau et aux usages

Surexploitation de la nappe

L'eau potable de la commune du Pradet provient en partie (environ pour moitié) du captage de la Foux, situé dans les alluvions de la plaine de l'Eygoutier.

La nappe est aujourd'hui classée en bon état quantitatif et un périmètre de protection du captage est en cours d'établissement³⁵.

Sous l'impact d'une baisse éventuelle des précipitations couplée à une hausse de l'évapotranspiration, le taux de recharge de la nappe pourrait baisser.

Dans le rapport de présentation du PLU 2011, on peut lire au sujet de l'adduction en eau potable : « Les 3 dernières années ont montré que les ressources de la commune devenaient limites, le déficit pluviométrique engendre en effet une baisse récurrente du niveau de la nappe phréatique. La préfecture du Var, comme d'autres, en France a pris un arrêté visant à limiter la consommation des usagers pendant les périodes les plus chaudes. Les incendies accentuent ponctuellement les besoins en

³⁵ Étude pour la protection contre les pollutions d'aires d'alimentation des captages : captages de la Foux, captage de Foncqueballe, captage des Arquets, captage de Golf Hôtel, captage de Père Eternet. Programme d'actions, version 2. Alliance Environnement, Toulon Provence Méditerranée, Août 2018.

ea. L'été 2005, le lac de Carcès est vide, la nappe phréatique dans laquelle puise la commune est au plus bas. La commune poursuit sa politique de renouvellement des conduites et branchement vétustes pour diminuer le volume de perte. (...) Par ailleurs, la ville mène une politique active visant à réduire sa consommation d'eau potable utilisée pour l'arrosage des espaces verts en souscrivant pour ces derniers, un contrat pour un compteur d'eau brute auprès de la Société du Canal de Provence. Ces dernières années, la commune du Pradet avec le SIAE a engagé les réflexions pour mobiliser de nouvelles ressources, notamment en lançant une étude dès 2006, pour la création d'un nouveau forage syndical à la limite des communes du Pradet et de la Garde dans une zone mieux située dans l'aquifère, permettant ainsi d'obtenir un débit plus important en période estivale. »

Ainsi, le risque de surexploitation de la nappe, bien que non nul, paraît limité du fait de la diversification des ressources d'eau pour l'AEP, de l'efficience des réseaux d'eau potable et d'une relative stabilité récente et à venir de la population desservie.

 *Quel est l'état quantitatif du lac de Carcès ? Quel est le pourcentage d'AEP provenant du lac de Carcès ? Est-il amené à évoluer dans les années à venir ?*

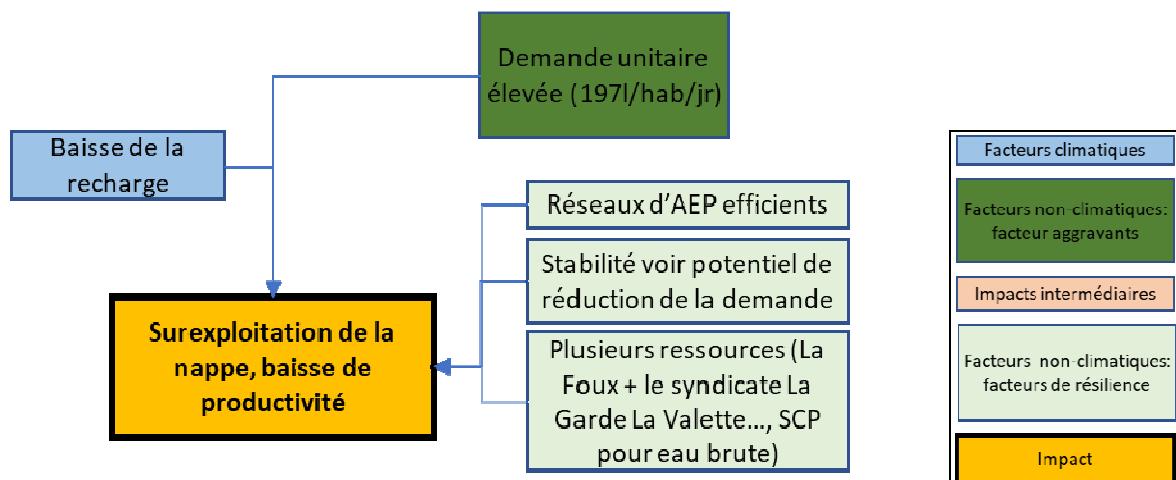


Figure 57. Chaîne d'impacts pour la surexploitation de la nappe

Baisse de la ressource disponible impactant la capacité d'accueil du tourisme saisonnier et la capacité d'AEP

Dans le Schéma départemental des ressources et de l'alimentation en eau du Var (réactualisation 2011/2012), la sécurité des ressources en eau au Pradet est considérée comme moyenne, du fait de la vulnérabilité du captage de la Foux aux pollutions agricoles, compensée en partie par la diversification des ressources avec la connexion au SIAE La Garde – Le Pradet – La Valette. La sécurité de ces ressources pourrait être impactée par une baisse de la recharge et donc de la productivité du captage de la Foux, et par les impacts éventuels des évolutions climatiques et de gestion de la ressource du système Durance-Verdon et de celle du lac de Carcès.

Néanmoins, concernant la capacité de l'alimentation en eau potable, la sensibilité de la commune du Pradet pourrait être limitée par plusieurs facteurs. En effet, avec un rendement du réseau d'AEP en hausse depuis 2011 et à 84 % en 2017, et une relative stabilité récente et projetée de la population, la demande en eau potable ne devrait pas croître, elle pourrait mettre évoluer à la baisse. De plus, avec un volume facturé plutôt élevé de 197 litres par habitant et par jour, la consommation unitaire pourrait

relativement aisément être réduite par des actions de sensibilisation ou de modernisation des équipements.

Pour ce qui est de la capacité d'accueil du tourisme saisonnier, l'importance de l'impact paraît limitée. En effet, si le territoire peut être considéré comme touristique, l'augmentation de la demande en eau en période estivale n'apparaît pas comme un enjeu particulièrement fort pour l'AEP.

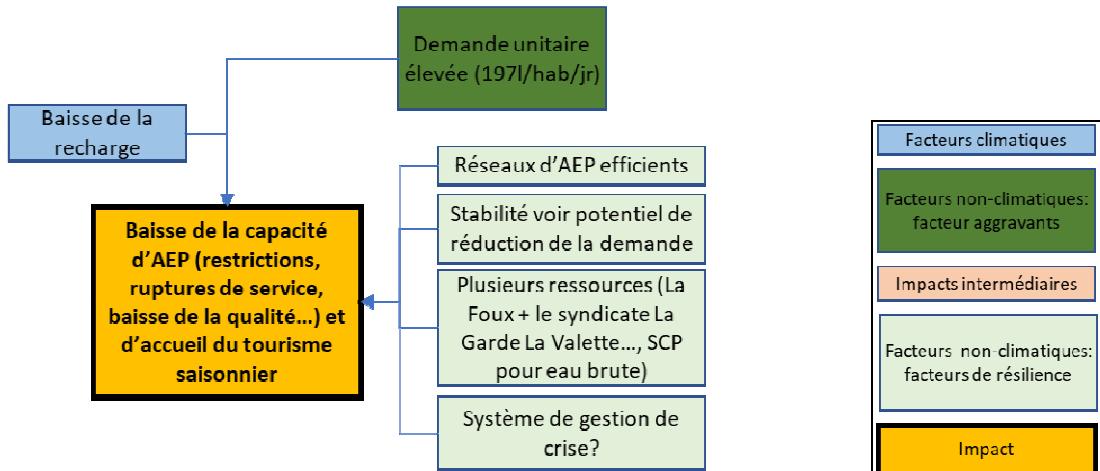


Figure 58. Chaîne d'impacts pour la capacité d'AEP et d'accueil du tourisme saisonnier

Limitation de l'accès à l'eau pour l'irrigation impactant la production et les revenus

Les surfaces agricoles irriguées sur la commune du Pradet le sont principalement pour les productions horticoles, viticoles et, dans une moindre mesure, maraîchères. Elles sont alimentées en eau par la réseau de la Société du Canal du Provence.

Les projections de changement climatique montrent une évolution vers des conditions hydro-climatiques plus asséchantes, c'est-à-dire une baisse de la pluviométrie pendant les mois les plus chauds, et une forte hausse de l'évapotranspiration, conséquence directe de la hausse des températures. Ces conditions pourraient mener à une hausse des besoins en eau pour les surfaces irriguées actuelles, voire à l'apparition de nouveaux besoins sur des surfaces aujourd'hui non irriguées. Néanmoins, malgré un impact réel des conditions climatiques sur les besoins en eau, il faut souligner que le projet R2D2³⁶ portant sur la simulation de la gestion du système Durance-Verdon selon les scénarios de changements climatiques et socioéconomiques a montré que les évolutions des prélèvements dans des scénarios prospectifs pourraient être plus sensibles aux évolutions socioéconomiques qu'aux conditions climatiques.

³⁶ E. Sauquet. R2D2 2050 Risque, ressource en eau et gestion durable de la Durance en 2050. Références : Les connaissances scientifiques au service de la, Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), pp.47-55, 2015.

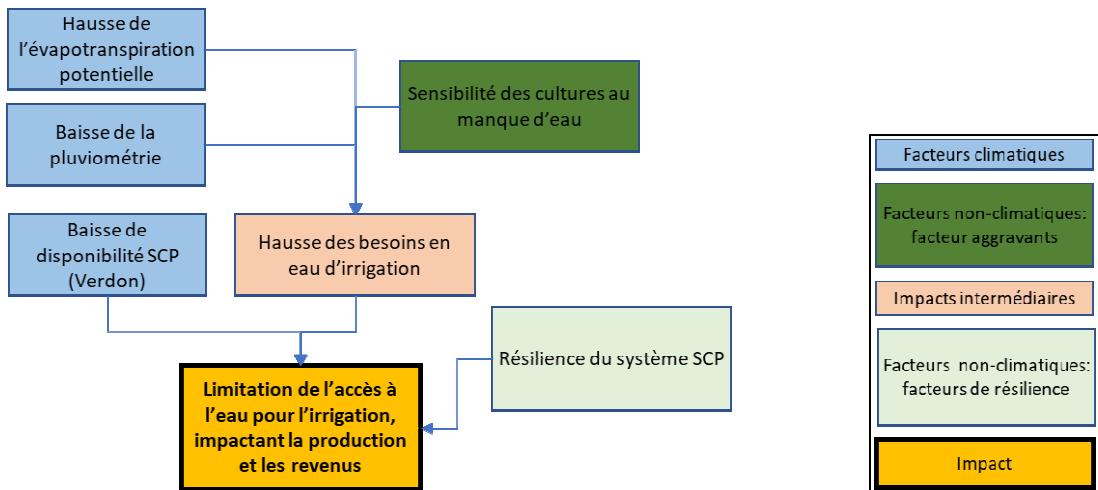


Figure 59. Chaîne d'impacts sur la limitation de l'accès à l'eau pour l'irrigation.

Les zones agricoles et forestières : un fort enjeu d'aménagement pour la commune face au changement climatique

Le maintien de zones agricoles et forestières étendues, entretenues et non interrompues par le mitage urbain, représente un enjeu de taille dans un contexte de changement climatique, à la fois pour en limiter les impacts (adaptation) et pour participer à la limitation des émissions de gaz à effet de serre (GES), soit à l'atténuation.

En effet, ces zones jouent un rôle capital dans la prévention des inondations et la gestion des écoulements, problématique prégnante au Pradet et qui pourrait être amplifiée sous l'effet du changement climatique. Les zones agricoles situées en amont des zones urbanisées, particulièrement le Plan de la Garde pour le Pradet, forment des zones d'expansion des crues et, de par l'étendue de surfaces perméables, permettent de limiter le ruissellement plus en aval lors de fortes pluies. La présence de haies ou bien les pratiques type « agroforesterie », améliorent grandement ce rôle en augmentant la perméabilité et favorisant l'infiltration de l'eau dans les sols. Il en est de même pour les zones forestières, dont on a vu que la destruction par un incendie récent avait eu un fort impact sur le ruissellement en cas de fortes pluies.

Les zones agricoles et forestières présentes sur la commune participent également fortement au maintien d'une qualité de vie élevée. Dans un contexte de changement climatique avec la multiplication et l'intensification des vagues de chaleur, la présence d'îlots de rafraîchissement sur la commune représente un atout non négligeable pour la résilience du territoire et de sa population. Le maintien d'une agriculture de proximité participe également à la résilience du territoire dans un contexte de changements globaux, en favorisant les circuits courts et en limitant la précarité alimentaire.

Enfin les zones agricoles, lorsque les pratiques agricoles sont favorables notamment l'agroécologie, participent activement aux efforts d'atténuation du changement climatique, par le stockage de carbone qu'elles permettent dans le sol. Un abandon de l'activité agricole pourrait fortement impacter le bilan net du territoire en termes d'émissions de GES.

Ainsi, le maintien d'une agriculture florissante sur le territoire (qui passera en partie par la mise en œuvre de solutions pour faire face à des besoins en eau croissants confrontés à une potentielle baisse de la ressource pour l'irrigation) ne peut qu'améliorer sa résilience face au changement climatique. L'entretien des zones forestières et la lutte contre le mitage urbain dans ces zones présente également

un enjeu fort, pour les raisons citées plus haut mais également dans un contexte d'évolution des conditions climatiques vers des situations propices aux grands incendies plus fréquentes.

Tensions accrues sur le partage, problèmes de gouvernance

En cas de tension accrue sur la ressource venant impacter les usages de l'eau, la gouvernance actuelle de l'eau sur le territoire pourrait être questionnée. En l'absence de retours d'expérience sur le déroulé de sécheresses passées, le système en place n'a pu être analysé en détails.

Néanmoins, nous pouvons noter certains facteurs de résilience comme la diversification des ressources et la gestion de l'eau en lien avec la métropole de Toulon et le système Durance-Verdon. À l'inverse, le relatif confort actuel vis-à-vis de la ressource en eau pourrait représenter un frein à l'anticipation de tensions futures et à la mise en place d'une gouvernance juste et efficace dans des situations de manque d'eau.

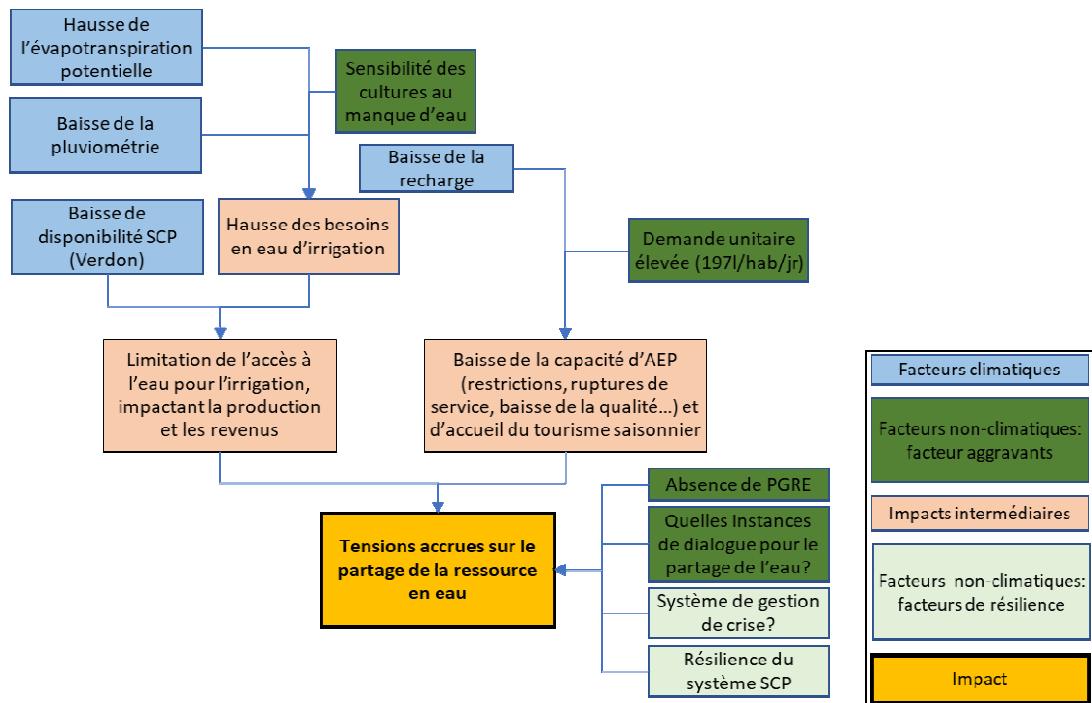


Figure 60. Chaîne d'impacts pour les tensions sur le partage de la ressource en eau



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Viticulture, Le Pradet (source : www.le-pradet.fr/)

Le système Durance Verdon

Les bassins-versants en amont de la Durance et du Verdon disposent de ressources importantes, régulées par de grands barrages (Serre-Ponçon, Castillon...). En revanche, à l'aval du système et jusqu'à la zone côtière, les ressources en eau sont fragiles et associées à une augmentation de la demande en eau liée à développement économique et démographique. Ces conditions ont conduit à réaliser de nombreuses infrastructures de transfert de la ressource en eau. Ainsi, malgré les spécificités géographiques de la région, les transferts se sont multipliés et ont élargi le territoire de l'eau de la Durance bien au-delà de son bassin hydrographique. **La métropole toulonnaise et donc de la ville du Pradet font partie de ces territoires « hors bassins » sécurisés et alimentés en eau par le système Durance-Verdon.** Globalement, cet hydrosystème constitue la principale zone productrice d'eau et couvre le tiers des besoins en eau potable de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

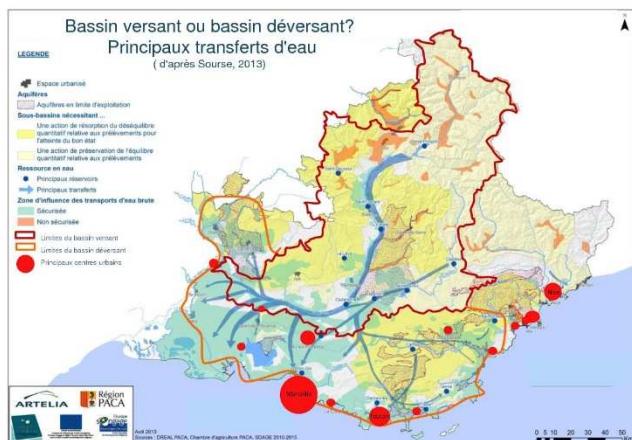


Figure 61. Les transferts d'eau en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (d'après SOURCE 2013)

Ces aménagements ont fortement réduit les inégalités territoriales d'accès à la ressource en eau et ont permis, grâce aux stockages, de s'affranchir d'une partie des contraintes saisonnières. Cependant, certaines années, les tensions restent perceptibles durant la période estivale la plus consommatrice en eau. Ainsi, même en l'absence de conflits d'usage, les sécheresses de 2003 à 2007 et celles de 2016-2017 ont montré la fragilité des règles d'allocation de l'eau et des modalités de gestion actuelles. L'année 2007 a été marquée par un déficit pluviométrique prononcé sur les saisons d'été et d'automne qui a eu pour conséquence un déstockage exceptionnel

supplémentaire d'une partie du volume de la retenue de Serre-Ponçon, initialement réservée à la production hydro électrique.

Ce système pourra-t-il continuer à sécuriser ces territoires littoraux dans le futur ? C'est la question à laquelle se proposait de répondre le projet national de recherche « Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050 » (R2D2 2050³⁷). L'objectif visé était de quantifier les déséquilibres potentiels futurs entre offre et demande en eau sur les secteurs alimentés par la Durance et le Verdon en se basant sur une démarche couplant modélisation de l'hydrosystème et sa composante anthropique associée. Au-delà des inévitables incertitudes, le projet R2D2 2050 a permis de révéler que **les modifications du climat risquent d'engendrer une baisse notable de la ressource naturelle à l'horizon 2050.** Baisse importante notamment au printemps lié à la dynamique entre autres de la constitution et de la fonte du manteau neigeux. Au-delà des incertitudes liées aux précipitations, dans les années à venir les modes de gestion et de gouvernance liées aux ressources en eau et à leur partage seront déterminants sur la capacité du système Durance-Verdon à alimenter et sécuriser les territoires littoraux hors bassins dans le futur.

³⁷ R2 D2 2050. Risk, water Resources and sustainable Development within the Durance river basin in 2050. Coord. Eric Sauquet, IRSTEA, Lyon. Final report, 243p

4.3.4. Les impacts sur le littoral : tempêtes, submersion et érosion

Le 28 avril 2017 un porteur à connaissance concernant la prévention du risque de submersion marine avec prise en compte du changement climatique a été réalisé auprès des 27 communes littorales du département du Var. Le porteur à connaissance comprenait la délimitation des « Zones Basses Littorales » issues de cartographiques élaborées dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive Inondation³⁸ et prenant en compte un aléa de référence centennale intégrant 60 cm de surcote liés aux effets du changement climatique à l'horizon 2100.



Figure 62. Extraits du porteur à connaissance : submersion marine – Directive Inondation, Territoire à Risque Important – TRI Toulon-Hyères, mars 2017

³⁸ Directive 2007/60/CE du 23 octobre 2007

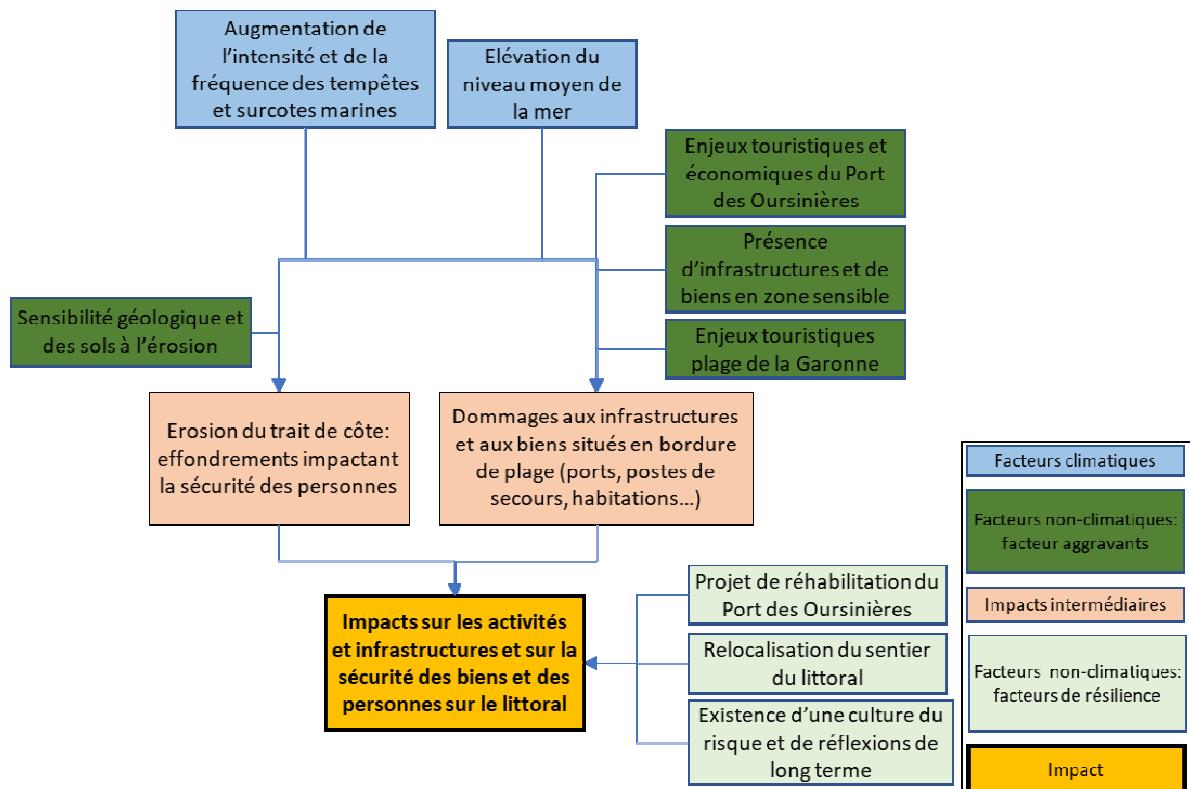
(source : DREAL PACA/EAIP-SM)

Les zones les plus concernées par la submersion sur la commune du Pradet sont la plage de la Garonne et le Cap de Carqueiran, avec le port des Oursinières. Ces deux zones concentrent également des enjeux touristiques et économiques.



Figure 63. La plage de la Garonne au Pradet (source : www.hyeres-tourisme.com)

La commune du Pradet mène actuellement des réflexions de long terme liées à l'érosion et aux submersions marines. En effet, le sentier du littoral est en cours de relocalisation sur certaines zones, et une étude va être lancée pour la sécurisation et la valorisation du port des Oursinières.



64. Chaîne d'impacts sur le littoral

Conclusion générale

L'évaluation des risques et de la vulnérabilité de la commune du Pradet face au changement climatique, réalisée dans la présente étude, permet de mieux appréhender et anticiper les différents changements susceptibles d'impacter les populations, les patrimoines naturel, urbain et agricole du territoire au cours du XXI^{ème} siècle.

Le climat méditerranéen actuel du Pradet, caractérisé par un hiver doux et humide, un été sec et chaud, des précipitations inégalement réparties dans l'année, des événements extrêmes dépendant notamment de la forte variabilité interannuelle, **subit déjà un changement climatique, et ce depuis des décennies**. En effet, un réchauffement de +0,3°C par décennie depuis 1960 est constaté, avec un enchaînement d'été anormalement chauds ces dernières années (2003, puis 2015, 2017 et 2018).

La méthodologie de régionalisation appliquée sur le territoire montre que cette **évolution s'accélère**. Une incertitude demeure quant à l'intensité des changements dépendant des politiques d'atténuation de gaz à effet de serre de l'échelle mondiale à locale conduisant à un scénario socioéconomique intermédiaire (RCP 4.5) ou pessimiste (RCP 8.5), mais le bouleversement climatique, facteur de fragilisation des équilibres écologiques, sociologiques et économiques sur le territoire, sera majeur. Par exemple, l'augmentation de +2°C (médiane issue des simulations des modèles climatiques européens) des températures maximales estivales à l'horizon 2055 signifierait une évolution de +4°C depuis le début de l'ère industrielle (1880). Dans un scénario intermédiaire (RCP 4.5), l'été durerait de mai à début octobre et la commune connaîtrait entre 2 à 3 vagues de chaleur chaque année. **Si le scénario RCP 8.5 est malheureusement la trajectoire suivie, ces bouleversements déjà considérables deviendraient encore plus graves**. À l'horizon 2085, par exemple, l'augmentation de la température estivale gagnerait en moyenne au Pradet +5°C (médiane) : la température dépasserait 25°C pendant environ 4 mois et Le Pradet subirait, par effet de seuil, **37 à 38 vagues de chaleur par an à la fin du siècle !**

Face aux changements annoncés encore difficiles à imaginer à l'échelle humaine, la commune a la capacité de limiter les effets du changement climatique : en effet, Le Pradet dispose de réseaux de qualité (transport, énergie, eau), son étalement urbain (commune périurbaine) est désormais relativement stabilisé du fait d'un ensemble de mesures et de règlementations conservatoires (littoral, SCOT, PLU, etc.), la richesse et la qualité de l'environnement avec sa ceinture maritime, agricole et forestière sont exceptionnelles... **Cependant, de réelles vulnérabilités existent :**

- l'exposition d'une population de plus en plus âgée aux canicules ;
- la pression des changements climatiques sur l'environnement forestier, agricole, urbain... ;
- l'aggravation de certains risques liés aux tempêtes (submersions), inondations et coulées de boue d'une part, aux impacts de l'augmentation de la température lors des pics de chaleur sur la santé et le développement socioéconomique d'autre part.

Ces vulnérabilités demandent la mise en œuvre d'un plan d'actions d'adaptation en vue de prévenir les différents bouleversements évoqués.

Préserver la qualité de vie du Pradet demandera donc des efforts : des choix de gouvernance, des orientations techniques et des études scientifiques pour améliorer la capacité d'adaptation de la commune doivent être mis en œuvre sur un ensemble d'axes thématiques. Citons, par exemple, le confort thermique urbain et des bâtiments à renforcer en appliquant des mesures efficaces et reconnues (isolation), des pistes exploratoires (nouveau mobilier urbain)... Des zones doivent être repensées au

niveau des matériaux (zones pavillonnaires, EPHAD et école) et de l'imperméabilité. Ce dernier sujet rejoint d'ailleurs les problématiques de gestion de l'eau identifiées comme prioritaires dans cette étude : éviter l'imperméabilisation des sols pour une meilleure infiltration des eaux, optimiser l'infiltration en amont des zones urbaines du Pradet, etc. Enfin, l'augmentation des risques climatiques déjà présents sur le territoire demande des actions au quotidien, comme le projet de réhabilitation du port des Oursinières, par exemple, qui doit prendre en compte une vision à long terme du changement climatique et des submersions marines ou encore des études en cours sur les effondrements de terrain après le drame au Pin de Galle.

Le changement climatique se poursuit jour après jour, des modifications rapides sont à l'œuvre et menacent les écosystèmes qui rendent des services à la nature et l'homme, les équilibres sociologiques et économiques du Pradet et de sa métropole Toulon-Provence-Méditerranée. Les connaissances mettent en lumière l'ampleur du changement climatique et plus largement du changement global. Les sociétés ne peuvent plus se permettre d'attendre pour agir et doivent prendre la mesure de la catastrophe qui se profile, sachant que les scénarios optimistes sont quasiment impossibles à atteindre, sauf si une révolution verte mondiale s'opère ces prochaines années, ce qui est peu probable. Il est donc indispensable que tous les échelons de décision publique poursuivent leurs actions et agissent de concert, dès aujourd'hui, pour préparer l'avenir et conduire l'adaptation aux changements des territoires avec les citoyens.

Bibliographie

Chapitre 1

Sibson R., 1981, “A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation”, in *Interpolating multivariate Data* (chapter 2), 21-36, John Wiley & Sons, New York (1981)

La mer et le littoral de Provence-Alpes-Côte d’Azur face au changement climatique, Les cahiers du GREC-PACA édités par l’Association pour l’innovation et la recherche au service du climat (AIR), mai 2017, 48 pages. ISBN : 9782956006046

www.cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5

www.cordex.org

www.drias-climat.fr

www.grec-sud.fr

www.wcrp-climate.org

Chapitre 2

Diagnostic agricole – ZAP Pradet, CA 83, p. 25, mai 2018

Plan de déplacement urbain, 2015

Plan Local d’Urbanisme, 2017

SCOT Provence Méditerranée, 2009

www.enedis.fr

www.le-pradet.fr

Chapitre 3

Chaud dehors ! de la fraîcheur face aux îlots de chaleur urbain, AGAM N°75, Juillet 2018
Site web de Météo-France

Climat et ville : interactions et enjeux en Provence-Alpes-Côte d’Azur, GREC-PACA Juin 2017

Giguère 1., Mesures de lutte contre les îlots de Chaleur Urbain, Institut National de santé publique du Québec, 2009

Taha H., Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat, Energy and buildings, 1997

Voogt, J.A., Urban Heat Island, Published in: Encyclopedia of Global Environmental Change. Ted Munn, Ian Douglas, Michael C. MacCracken, Harold A. Mooney, Peter Timmerman, Mostafa K. Tolba, et al. (Eds.).

Kevin E., et alii, Earth's global energy budget, Amercian Meteorological Society, 2008

Oke, T.R. (1981) Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations. Journal of Climatology, 1, 237-254.

Dubois C., Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique; une feuille de route pour les architectes et les designers urbains québécois. Thèse sous la direction de Luc Adolphe, Université Laval et l'INSA de Toulouse ; 2014

Parmentier, A. Élaboration d'un outil d'aide à la décision pour atténuer le phénomène d'îlots de chaleur en milieu urbain. <http://espace.etsmtl.ca/311/>. 2010

Huang, J., H. Akbari, and H. Taha. 1990. The Wind-Shielding and Shading Effects of Trees on Residential Heating and Cooling Requirements. ASHRAE Winter Meeting, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, Georgia.

Lutte contre îlots de chaleur urbains, référentiel conception et gestion des espaces publics, du Grand Lyon. 2010

Mestayer P.G., Anquetin S. (1995) Climatology of Cities. In: Gyr A., Rys FS. (eds) Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric Mesoscale Flow Fields. ERCOFATAC Series, vol 1. Springer, Dordrecht

Kotchi S., Détection du stress hydrique par thermographie infrarouge, Application à la culture de la pomme de terre, Thèse, sous la direction d'Alain A. Viau. 2004.

Chapitre 4

Cahier « Ressources en eau », GREC-SUD, www.grec-sud.fr

Colas, S., Duvernoy, J., Lasfargues, S., 2015. Introduction: le littoral, un espace à forts enjeux, *Le littoral dans le contexte du changement climatique*. La Documentation Française.

Directive 2007/60/CE du 23 octobre 2007

E. Sauquet. R2D2 2050 Risque, ressource en eau et gestion durable de la Durance en 2050. Références : Les connaissances scientifiques au service de la, Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), pp.47-55, 2015.

Etude du fonctionnement de l'Eygoutier et de ses affluents, approche hydraulique et morphologique en lien avec le milieu. Phase 1 : Travaux préalables. Février 2018, Ingérop – Géorives.

Étude pour la protection contre les pollutions d'aires d'alimentation des captages : captages de la Foux, captage de Foncqueballe, captage des Arquets, captage de Golf Hôtel, captage de Père Eternet. Programme d'actions, version 2. Alliance Environnement, Toulon Provence Méditerranée, Août 2018.

Expertise hydraulique des bassins versants du massif de la Colle Noire, Maîtrise d'œuvre pour la définition et le suivi d'un site pilote dans le Bois de Courbebaisse. Rapport de synthèse Phases 1, 2 & 3. Octobre 2017, Egis – Artelia

R2 D2 2050. Risk, water Resources and sustainable Development within the Durance river basin in 2050. Coord. Eric Sauquet, IRSTEA, Lyon. Final report, 243p

<http://eygoutier.free.fr/inondation78.html>

<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>

Annexe 1

Deltas modélisés des températures minimales de l'air (en °C) entre la période de référence (1996-2015) et les horizons futurs sur le territoire du Pradet

Tmin, écarts (°C)	Horizon 1996-2015	Horizon 2035, RCP 4.5			Horizon 2035, RCP 8.5			Horizon 2055, RCP 4.5			Horizon 2055, RCP 8.5			Horizon 2085, RCP 4.5			Horizon 2085, RCP 8.5		
période/quantile	-	Q1	Q2	Q3															
an	11,3	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	1,0	0,8	1,0	1,1	1,5	1,7	2,0	1,2	1,3	1,5	2,9	3,2	3,4
hiver	5,2	0,5	0,6	1,0	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,2	1,5	1,7	1,1	1,3	1,5	2,8	2,9	3,1
printemps	9,3	0,3	0,4	0,7	0,6	0,7	0,8	0,6	0,7	1,0	1,0	1,1	1,6	1,0	1,1	1,3	2,3	2,6	2,9
été	18,4	0,7	0,8	1,0	0,8	1,0	1,3	1,1	1,3	1,4	1,8	2,1	2,5	1,3	1,5	1,7	3,4	3,9	4,2
automne	12,3	0,4	0,5	0,7	0,7	0,8	1,0	0,7	0,8	1,0	1,7	1,9	2,2	1,3	1,5	1,6	3,2	3,4	3,6
janvier	4,7	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,2	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,4	1,5	1,6	2,7	2,9	3,1
février	5,0	0,3	0,4	0,8	0,2	0,6	0,8	0,5	0,6	1,1	1,2	1,5	1,7	1,1	1,2	1,6	2,6	2,7	3,0
mars	6,4	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	0,5	0,6	0,9	0,9	1,3	1,5	0,9	1,0	1,2	2,3	2,5	2,7
avril	9,0	0,1	0,4	0,7	0,4	0,7	1,0	0,6	0,7	1,0	1,0	1,2	1,6	1,0	1,1	1,3	2,2	2,6	2,8
mai	12,5	0,5	0,6	0,9	0,8	0,9	1,0	0,8	0,9	1,1	1,1	1,3	1,7	0,9	1,1	1,3	2,3	2,8	3,2
juin	16,5	0,6	0,8	1,0	0,7	0,9	1,2	1,0	1,3	1,4	1,5	2,0	2,4	1,2	1,3	1,4	2,9	3,2	3,5
juillet	19,2	0,6	0,8	1,0	0,9	1,1	1,3	0,9	1,3	1,6	1,8	2,1	2,6	1,6	1,8	2,0	3,8	4,2	4,5
août	19,3	0,7	0,9	1,3	0,9	1,1	1,5	1,2	1,4	1,5	1,9	2,2	2,6	1,3	1,7	1,8	3,8	4,6	4,7
septembre	16,2	0,5	0,6	0,8	0,6	0,8	1,0	0,6	0,9	1,1	1,7	2,2	2,7	1,5	1,7	1,8	3,6	4,0	4,2
octobre	12,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,2	0,6	0,7	1,2	1,6	1,7	1,9	1,2	1,3	1,6	2,9	3,1	3,3
novembre	8,5	0,3	0,4	0,8	0,5	0,7	1,1	0,6	0,8	1,0	1,5	1,7	2,3	1,2	1,3	1,4	3,0	3,1	3,2
décembre	5,9	0,5	0,8	1,0	0,7	0,8	1,0	0,7	1,0	1,3	0,9	1,5	1,9	0,9	1,1	1,3	3,0	3,2	3,2

Q1 : 1er quartile – Q2 : médiane – Q3 : 3ème quartile

Températures minimales de l'air (en °C) :

RR (mm)	an	hiver	printemps	été	automne	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	
Horizon 1996-2015	Q2	11,3	5,2	9,3	18,4	12,3	4,7	5,0	6,4	9,0	12,5	16,5	19,2	19,3	16,2	12,3	8,5	5,9
Horizon 2035, RCP 4.5	Q1	11,8	5,7	9,6	19,1	12,7	5,4	5,3	6,6	9,1	13,0	17,1	19,9	19,9	16,7	12,7	8,8	6,4
Horizon 2035, RCP 4.5	Q2	11,9	5,8	9,8	19,2	12,9	5,6	5,4	6,8	9,4	13,1	17,3	20,0	20,1	16,8	12,9	8,9	6,6
Horizon 2035, RCP 4.5	Q3	12,0	6,1	10,0	19,3	13,1	5,7	5,7	6,9	9,7	13,4	17,5	20,2	20,6	17,0	13,1	9,2	6,8
Horizon 2035, RCP 8.5	Q1	12,1	5,9	9,9	19,2	13,0	5,6	5,2	7,1	9,5	13,2	17,2	20,2	20,1	16,9	13,2	9,0	6,5
Horizon 2035, RCP 8.5	Q2	12,1	6,0	10,1	19,4	13,1	5,7	5,6	7,2	9,7	13,4	17,4	20,3	20,4	17,0	13,3	9,2	6,6
Horizon 2035, RCP 8.5	Q3	12,2	6,0	10,2	19,6	13,4	5,9	5,8	7,4	10,0	13,5	17,7	20,5	20,8	17,2	13,6	9,5	6,9
Horizon 2055, RCP 4.5	Q1	12,1	6,0	9,9	19,5	13,0	5,6	5,5	6,9	9,6	13,2	17,5	20,2	20,4	16,9	12,9	9,1	6,6
Horizon 2055, RCP 4.5	Q2	12,2	6,1	10,0	19,7	13,2	5,7	5,6	7,0	9,7	13,4	17,8	20,6	20,6	17,1	13,1	9,3	6,8
Horizon 2055, RCP 4.5	Q3	12,4	6,2	10,4	19,8	13,3	5,8	6,0	7,3	10,0	13,6	17,9	20,9	20,7	17,3	13,5	9,5	7,2
Horizon 2055, RCP 8.5	Q1	12,8	6,4	10,3	20,2	14,0	6,0	6,2	7,3	10,0	13,6	18,0	21,1	21,1	17,9	13,9	10,0	6,8
Horizon 2055, RCP 8.5	Q2	12,9	6,6	10,5	20,4	14,3	6,1	6,5	7,7	10,2	13,8	18,5	21,3	21,5	18,4	14,1	10,2	7,3
Horizon 2055, RCP 8.5	Q3	13,2	6,8	10,9	20,8	14,5	6,3	6,7	7,9	10,6	14,1	18,9	21,9	21,9	18,9	14,3	10,8	7,7
Horizon 2085, RCP 4.5	Q1	12,5	6,3	10,3	19,7	13,6	6,1	6,1	7,3	10,0	13,4	17,7	20,8	20,6	17,7	13,5	9,7	6,8
Horizon 2085, RCP 4.5	Q2	12,6	6,5	10,4	19,9	13,8	6,2	6,2	7,4	10,1	13,6	17,8	21,0	21,0	17,9	13,6	9,8	7,0
Horizon 2085, RCP 4.5	Q3	12,8	6,7	10,6	20,1	13,9	6,3	6,6	7,6	10,3	13,8	17,9	21,2	21,1	18,0	13,9	9,9	7,2
Horizon 2085, RCP 8.5	Q1	14,2	8,0	11,6	21,8	15,5	7,4	7,6	8,7	11,2	14,8	19,4	23,0	23,1	19,8	15,2	11,5	8,9
Horizon 2085, RCP 8.5	Q2	14,5	8,1	11,9	22,3	15,7	7,6	7,7	8,9	11,6	15,3	19,7	23,4	23,9	20,2	15,4	11,6	9,1
Horizon 2085, RCP 8.5	Q3	14,7	8,3	12,2	22,6	15,9	7,8	8,0	9,1	11,8	15,7	20,0	23,7	24,0	20,4	15,6	11,7	9,1

Q1 : 1er quartile – Q2 : médiane – Q3 : 3ème quartile
Comme les valeurs décimales sont arrondies, il est possible que les écarts entre la valeur de référence additionnée au delta soit différente d'un dixième de la valeur calculée.



Annexe 2

Deltas modélisés des températures maximales de l'air (en °C) entre la période de référence (1996-2015) et les horizons futurs sur le territoire du Pradet

Tmax, écarts (°C)	Horizon 1996-2015	Horizon 2035, RCP 4.5			Horizon 2035, RCP 8.5			Horizon 2055, RCP 4.5			Horizon 2055, RCP 8.5			Horizon 2085, RCP 4.5			Horizon 2085, RCP 8.5		
		Q2	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2												
an	19,1	0,5	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	0,7	1,1	1,2	1,5	1,6	1,8	1,3	1,5	1,6	2,8	3,2	3,5
hiver	12,1	0,5	0,7	0,9	0,8	0,9	1,0	0,7	1,0	1,2	1,3	1,4	1,6	1,3	1,5	1,6	2,6	2,8	3
printemps	17,1	0,4	0,6	0,8	0,7	0,8	0,9	0,7	0,9	1,1	1,2	1,3	1,7	1	1,2	1,4	2,3	2,6	2,9
été	27,1	0,7	0,8	0,9	0,8	1,0	1,2	1,0	1,4	1,5	1,7	2,0	2,3	1,3	1,6	1,7	3,3	3,9	4,3
automne	20,2	0,6	0,6	0,8	0,6	0,8	1,0	0,7	0,8	1,1	1,5	1,7	2,1	1,3	1,5	1,6	3	3,3	3,5
janvier	11,5	0,7	0,8	1,1	0,9	1,1	1,2	0,6	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,5	1,6	1,8	2,6	2,8	3,1
février	12,4	0,3	0,4	0,7	0,6	0,7	1,0	0,6	0,7	1,0	1,4	1,4	1,6	1,2	1,3	1,5	2,3	2,5	2,8
mars	14,3	0,2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,6	0,8	1,1	1,1	1,3	1,5	1,1	1,2	1,3	2,3	2,4	2,5
avril	17,1	0,1	0,3	0,6	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,9	1,1	1,3	1,5	0,9	0,9	1,1	2,1	2,3	2,8
mai	20,1	0,5	0,8	1,0	0,8	0,9	1,1	0,9	1,1	1,3	1,3	1,5	1,8	1	1,4	1,5	2,4	2,8	3,3
juin	24,7	0,5	0,6	0,8	0,5	0,8	1,0	0,8	1,1	1,3	1,0	1,8	2,2	0,8	1,1	1,2	2,7	3,2	3,6
juillet	28,2	0,6	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	0,8	1,3	1,7	1,7	2,0	2,4	1,6	1,8	2	3,6	4,2	4,5
août	28,5	0,7	0,9	1,3	0,6	1,1	1,5	1,3	1,5	1,6	1,8	2,1	2,7	1,4	1,8	1,9	3,5	4,3	4,8
septembre	24,9	0,8	1,0	1,1	0,8	0,9	1,2	0,9	1,1	1,5	1,8	2,5	2,9	1,6	2	2,1	3,6	4,2	4,6
octobre	20,2	0,5	0,6	0,9	0,7	1,0	1,2	0,5	0,8	0,9	1,2	1,5	1,9	1	1,3	1,5	2,7	2,9	3,1
novembre	15,6	0,3	0,4	0,6	0,5	0,7	0,9	0,6	0,8	1,1	1,3	1,5	1,7	1,1	1,1	1,2	2,7	2,8	2,8
décembre	12,6	0,5	0,7	1,0	0,4	0,7	0,9	0,6	0,8	1,4	0,8	1,2	1,6	1	1,2	1,3	2,7	3	3

Q1 : 1er quartile – Q2 : médiane – Q3 : 3ème quartile

Températures maximales de l'air (en °C) :

Tmax (°C)	an	hiver	printemps	été	automne	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	
Horizon 1996-2015	Q2	19,1	12,1	17,1	27,1	20,2	11,5	12,4	14,3	17,1	20,1	24,7	28,2	28,5	24,9	20,2	15,6	12,6
Horizon 2035, RCP 4.5	Q1	19,7	12,7	17,5	27,8	20,8	12,2	12,7	14,5	17,2	20,6	25,2	28,8	29,1	25,7	20,7	15,9	13,1
Horizon 2035, RCP 8.5	Q2	19,8	12,9	17,8	27,9	20,8	12,4	12,9	14,9	17,4	20,9	25,3	29,0	29,4	25,9	20,8	16,0	13,3
Horizon 2055, RCP 4.5	Q3	20,0	13,1	17,9	28,1	21,0	12,6	13,1	15,0	17,6	21,1	25,5	29,1	29,8	26,0	21,1	16,2	13,6
Horizon 2055, RCP 8.5	Q1	19,9	12,9	17,9	27,9	20,9	12,4	13,0	15,1	17,5	20,8	25,2	29,1	29,1	25,7	20,9	16,1	13,0
Horizon 2085, RCP 4.5	Q2	20,0	13,0	17,9	28,2	21,1	12,6	13,2	15,2	17,6	21,0	25,5	29,2	29,6	25,8	21,2	16,3	13,3
Horizon 2085, RCP 8.5	Q3	20,2	13,1	18,0	28,3	21,3	12,7	13,5	15,3	17,7	21,2	25,8	29,3	29,9	26,1	21,4	16,5	13,5
Horizon 2085, RCP 4.5	Q1	19,9	12,8	17,9	28,1	20,9	12,2	13,0	14,9	17,6	21,0	25,5	29,0	29,7	25,8	20,7	16,1	13,2
Horizon 2085, RCP 8.5	Q2	20,2	13,2	18,0	28,5	21,1	12,6	13,2	15,1	17,7	21,2	25,8	29,5	29,9	26,0	21,0	16,4	13,4
Horizon 2085, RCP 4.5	Q3	20,3	13,3	18,2	28,6	21,3	12,7	13,5	15,4	17,9	21,4	26,0	29,9	30,0	26,3	21,1	16,7	14,0
Horizon 2085, RCP 8.5	Q1	20,6	13,4	18,3	28,8	21,7	12,9	13,8	15,4	18,1	21,4	25,8	29,9	30,3	26,7	21,4	16,9	13,4
Horizon 2085, RCP 4.5	Q2	20,8	13,6	18,5	29,1	22,0	13,0	13,9	15,6	18,4	21,6	26,5	30,2	30,5	27,4	21,7	17,0	13,8
Horizon 2085, RCP 8.5	Q3	21,0	13,8	18,8	29,5	22,3	13,2	14,0	15,8	18,6	21,9	26,9	30,6	31,1	27,8	22,1	17,3	14,2
Horizon 2085, RCP 4.5	Q1	20,4	13,4	18,1	28,4	21,5	13,0	13,6	15,4	18,0	21,1	25,5	29,8	29,9	26,5	21,2	16,7	13,6
Horizon 2085, RCP 8.5	Q2	20,6	13,6	18,3	28,7	21,7	13,1	13,7	15,5	18,0	21,5	25,8	30,0	30,3	26,9	21,5	16,7	13,8
Horizon 2085, RCP 4.5	Q3	20,7	13,7	18,5	28,8	21,8	13,3	13,9	15,6	18,2	21,6	25,9	30,2	30,4	27,0	21,7	16,8	13,9
Horizon 2085, RCP 8.5	Q1	21,9	14,7	19,4	30,4	23,2	14,1	14,7	16,6	19,2	22,5	27,4	31,8	32,0	28,5	22,9	18,3	15,3
Horizon 2085, RCP 4.5	Q2	22,3	14,9	19,7	31,0	23,5	14,3	14,9	16,7	19,4	22,9	27,9	32,4	32,8	29,1	23,1	18,4	15,6
Horizon 2085, RCP 8.5	Q3	22,6	15,1	20,0	31,4	23,7	14,6	15,2	16,8	19,9	23,4	28,3	32,7	33,3	29,5	23,3	18,4	15,6

Q1 : 1er quartile – Q2 : médiane – Q3 : 3ème quartile

Comme les valeurs décimales sont arrondies, il est possible que les écarts entre la valeur de référence additionnée au delta soit différente d'un dixième de la valeur calculée.



Annexe 3

Deltas modélisés des températures moyennes de l'air (en °C) entre la période de référence (1996-2015) et les horizons futurs sur le territoire du Pradet

	Horizon 1996-2015	Horizon 2035, RCP 4.5			Horizon 2035, RCP 8.5			Horizon 2055, RCP 4.5			Horizon 2055, RCP 8.5			Horizon 2085, RCP 4.5			Horizon 2085, RCP 8.5		
Tmoy, écarts (°C)	Q2	Q1	Q2	Q3															
an	14,9	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,8	1,0	1,1	1,4	1,6	1,7	1,5	1,7	1,9	3,2	3,5	3,7
hiver	8,5	0,5	0,5	0,9	0,7	0,7	0,8	0,8	1,0	1,1	1,2	1,5	1,6	1,4	1,5	1,7	2,9	3	3,2
printemps	13,0	0,3	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,6	1,2	1,3	1,5	2,5	2,8	3,1
été	22,5	0,7	0,8	0,9	0,8	1,0	1,2	1,0	1,3	1,4	1,6	2,0	2,3	1,6	1,8	2	3,6	4,2	4,5
automne	15,9	0,5	0,6	0,9	0,6	0,7	0,9	0,7	0,8	0,9	1,2	1,7	2,0	1,7	1,8	2	3,5	3,7	3,9
janvier	7,9	0,5	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	1,1	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	2,9	3	3,3
février	8,5	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,5	0,6	1,2	1,3	1,5	1,6	1,3	1,5	1,8	2,7	2,8	3,1
mars	10,0	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	1,0	0,6	0,7	0,8	1,1	1,3	1,4	1,4	1,4	1,6	2,6	2,8	2,9
avril	12,7	0,1	0,3	0,6	0,5	0,6	0,8	0,6	0,7	1,0	1,1	1,4	1,7	1,3	1,4	1,5	2,5	2,8	3,1
mai	16,2	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,8	1,0	1,2	1,0	1,3	1,5	1,1	1,3	1,5	2,4	2,9	3,3
juin	20,4	0,7	0,8	1,0	0,7	0,9	1,2	0,9	1,2	1,4	1,3	1,9	2,2	1,2	1,4	1,5	3	3,4	3,7
juillet	23,5	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,2	0,9	1,3	1,7	1,7	2,0	2,5	1,8	2	2,2	3,9	4,4	4,7
août	23,5	0,7	0,9	1,3	0,8	1,0	1,5	1,2	1,4	1,5	1,9	2,2	2,5	1,8	2,1	2,3	4,1	4,8	5,2
septembre	20,0	0,6	0,9	1,0	0,7	0,9	1,0	0,8	1,0	1,3	1,7	2,0	2,6	2,1	2,4	2,5	4,2	4,6	4,9
octobre	15,8	0,4	0,5	0,9	0,7	0,9	1,1	0,4	0,7	0,9	1,1	1,4	1,7	1,6	1,8	2	3,3	3,4	3,6
novembre	11,6	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	1,0	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	2,0	1,6	1,7	1,8	3,3	3,4	3,5
décembre	8,8	0,6	0,9	1,1	0,8	0,8	1,0	0,8	1,1	1,4	1,0	1,4	1,9	1,4	1,6	1,7	3,4	3,5	3,6

Q1 : 1er quartile – Q2 : médiane – Q3 : 3ème quartile

Températures moyennes de l'air (en °C) :

	Tmoy (°C)	an	hiver	printemps	été	automne	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Horizon 1996-2015	Q2	14,9	8,5	13,0	22,5	15,9	7,9	8,5	10,0	12,7	16,2	20,4	23,5	23,5	20,0	15,8	11,6	8,8
Horizon 2035, RCP 4.5	Q1	15,5	9,0	13,3	23,2	16,3	8,4	8,7	10,3	12,8	16,7	21,2	24,3	24,2	20,7	16,2	12,0	9,5
	Q2	15,5	9,0	13,6	23,3	16,5	8,7	8,8	10,5	13,0	16,9	21,3	24,4	24,4	20,9	16,3	12,1	9,7
	Q3	15,7	9,4	13,7	23,5	16,7	8,8	8,9	10,6	13,3	17,2	21,4	24,5	24,8	21,1	16,7	12,3	9,9
Horizon 2035, RCP 8.5	Q1	15,7	9,2	13,6	23,4	16,5	8,8	8,9	10,7	13,2	16,8	21,1	24,4	24,3	20,7	16,5	12,3	9,6
	Q2	15,7	9,2	13,7	23,5	16,6	8,8	9,1	10,7	13,3	17,0	21,4	24,6	24,5	20,9	16,7	12,3	9,7
	Q3	15,8	9,3	13,8	23,7	16,8	8,9	9,2	11,0	13,5	17,2	21,6	24,7	25,0	21,0	17,0	12,6	9,8
Horizon 2055, RCP 4.5	Q1	15,7	9,3	13,7	23,5	16,6	8,8	9,0	10,6	13,3	17,0	21,3	24,4	24,7	20,8	16,3	12,3	9,6
	Q2	15,9	9,5	13,8	23,9	16,7	8,9	9,1	10,7	13,4	17,1	21,7	24,8	24,9	21,0	16,5	12,5	9,9
	Q3	16,0	9,6	14,0	23,9	16,8	9,0	9,7	10,8	13,7	17,4	21,9	25,2	25,0	21,4	16,8	12,7	10,3
Horizon 2055, RCP 8.5	Q1	16,3	9,7	14,1	24,1	17,1	9,3	9,8	11,1	13,8	17,2	21,7	25,3	25,4	21,7	17,0	13,0	9,9
	Q2	16,5	10,0	14,2	24,5	17,6	9,4	10,0	11,3	14,1	17,5	22,3	25,5	25,7	22,1	17,3	13,2	10,2
	Q3	16,6	10,1	14,6	24,8	17,8	9,5	10,1	11,4	14,4	17,7	22,7	26,0	26,0	22,7	17,6	13,6	10,7
Horizon 2085, RCP 4.5	Q1	16,4	9,9	14,2	24,1	17,6	9,6	9,8	11,4	14,0	17,3	21,6	25,3	25,3	22,1	17,4	13,2	10,2
	Q2	16,6	10,0	14,3	24,3	17,7	9,7	10,0	11,4	14,1	17,5	21,8	25,5	25,6	22,4	17,6	13,3	10,4
	Q3	16,8	10,2	14,5	24,5	17,9	9,7	10,3	11,6	14,2	17,7	21,9	25,7	25,8	22,5	17,8	13,4	10,5
Horizon 2085, RCP 8.5	Q1	18,1	11,4	15,5	26,1	19,4	10,8	11,2	12,6	15,2	18,6	23,4	27,4	27,6	24,2	19,1	14,9	12,2
	Q2	18,4	11,5	15,8	26,7	19,6	10,9	11,3	12,8	15,5	19,1	23,8	27,9	28,3	24,6	19,2	15,0	12,3

**Interreg****MARITTIMO-IT FR-MARITIME**

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

	Q3	18,6	11,7	16,1	27,0	19,8	11,2	11,6	12,9	15,8	19,5	24,1	28,2	28,7	24,9	19,4	15,1	12,4
--	-----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Q1 : 1er quartile – Q2 : médiane – Q3 : 3ème quartile

Comme les valeurs décimales sont arrondies, il est possible que les écarts entre la valeur de référence additionnée au delta soit différente d'un dixième de la valeur calculée.

Annexe 4**Deltas des précipitations (en %) entre la période de référence (1996-2015) et les horizons futurs sur le territoire du Pradet**

RR écarts bruts (%)	Horizon 1996-2015	Horizon 2035, RCP 4.5			Horizon 2035, RCP 8.5			Horizon 2055, RCP 4.5			Horizon 2055, RCP 8.5			Horizon 2085, RCP 4.5			Horizon 2085, RCP 8.5		
		Q2	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2
an	802,2	-9,2	-5,5	-0,9	-14,1	-7,3	-2,5	-10,3	-0,5	2,1	-9,2	-6,9	-2,9	-8,7	0,9	11	-19,3	-9,4	1,3
hiver	251,5	-10,3	-1,8	2,8	-18,5	-5,5	3,9	-11,6	1,1	6,0	-13,9	-3,3	1,0	-3	6,2	14,8	-8,2	3,8	14,5
printemps	188,0	-6,5	-3,7	-1,0	-6,7	0,7	10,0	-7,7	-4,9	-2,6	-25,5	-6,4	3,9	-13,1	-1,5	7,1	-19,8	-14,9	-10
été	71,4	-26,9	0,8	31,7	-21,0	-8,6	2,1	-12,8	-6,1	5,7	-34,7	-18,9	-0,8	-17,4	-1	19	-52,9	-41,2	-17,8
automne	296,1	-17,8	-10,9	-5,2	-19,7	-13,1	-2,7	-12,0	-6,8	7,1	-9,1	-3,2	3,2	-10,1	-3,3	6,5	-21,5	-11	0,3
janvier	84,8	-16,0	-7,9	26,7	-18,0	-7,3	4,1	-11,4	-3,2	27,0	-12,6	5,8	14,5	-4,8	-1,2	5,1	-1,4	15,9	26,7
février	68,9	-2,7	3,7	17,8	-26,2	-9,0	11,2	-8,8	-1,8	12,1	-27,6	-13,2	6,9	2,8	22,8	41,1	9,6	18,9	28,3
mars	66,8	-10,4	-6,3	0,9	-14,8	3,5	13,4	-3,1	13,6	18,8	-19,5	4,9	19,5	-11,8	9,1	20,5	1,8	6,4	9,7
avril	58,7	2,2	11,3	20,1	-11,6	7,1	23,9	-16,0	-1,1	8,0	-21,0	-10,6	10,3	-6	-2,6	4,8	-21,5	-17,4	-10,9
mai	57,4	-15,2	-10,2	-3,2	-22,6	-6,1	1,5	-25,2	-20,0	-11,1	-29,9	-20,6	-8,4	-14,1	-4,2	3,5	-36,2	-29,8	-23,9
juin	29,3	-31,0	-10,2	14,6	-33,4	-18,2	2,6	-24,6	-3,0	10,7	-21,0	-7,6	6,1	-14,3	4,1	19,8	-59,7	-48,1	-25,6
juillet	16,2	-16,5	7,6	29,1	-40,3	-17,7	31,4	-28,5	-3,7	18,0	-50,0	-21,3	0,7	-46,9	-30,2	1,9	-61,1	-50,6	-21,6
août	27,0	-28,9	-19,2	26,1	-26,0	-13,4	12,3	-31,5	-12,9	3,9	-47,9	-33,6	-6,9	-6,3	7	23,7	-42,6	-30	-10
septembre	79,1	-31,6	-22,8	-16,8	-37,2	-22,1	-4,9	-41,2	-11,2	5,2	-30,0	-19,8	-4,1	-19,7	-10,5	3,7	-33,1	-27,6	-20,5
octobre	101,1	-8,9	-4,2	6,2	-13,3	-3,0	7,2	-8,0	9,9	32,0	6,4	15,5	25,9	2,7	9,9	18,6	-14	-3,1	6,2
novembre	106,0	-18,2	-11,6	1,0	-29,4	-8,8	13,5	-18,3	-2,9	5,5	-7,1	0,0	7,2	-6,7	-1,6	7,1	-12,8	2,1	19,4
décembre	93,6	-18,8	-9,9	-2,3	-13,3	-1,5	4,7	-10,4	-1,3	4,9	-19,4	-6,8	-0,6	-1,2	5,3	9,6	-23,4	-13,6	-1,5

Q1 : 1er quartile – Q2 : médiane – Q3 : 3ème quartile

Cumuls bruts des précipitations :

RR (mm)	an	hiver	printemps	été	automne	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	
Horizon 1996-2015	Q2	802,2	251,5	188,0	71,4	296,1	84,8	68,9	66,8	58,7	57,4	29,3	16,2	27,0	79,1	101,1	106,0	93,6
Horizon 2035, RCP 4.5	Q1	727,1	225,1	175,9	52,2	243,0	71,3	66,9	59,8	59,9	48,6	20,4	13,1	19,3	54,1	91,9	86,7	76,0
Horizon 2035, RCP 4.5	Q2	757,0	246,8	181,0	71,0	263,8	77,9	71,2	62,5	65,2	51,5	26,0	17,1	21,6	61,1	96,8	93,9	84,2
Horizon 2035, RCP 8.5	Q3	794,4	258,6	186,0	94,1	280,5	107,5	81,1	67,3	70,4	55,6	32,9	20,4	34,2	65,8	107,1	107,0	91,4
Horizon 2055, RCP 4.5	Q1	688,4	204,6	175,6	56,5	237,6	69,2	50,8	56,9	51,8	44,5	19,3	9,5	19,8	49,7	87,4	74,8	81,2
Horizon 2055, RCP 4.5	Q2	741,8	237,8	189,4	64,6	257,6	78,4	62,6	69,1	62,9	54,0	23,9	13,1	23,2	61,6	97,9	96,7	92,4
Horizon 2055, RCP 4.5	Q3	781,2	261,4	206,9	72,2	288,0	88,1	76,4	75,6	72,7	58,3	30,0	20,7	29,9	75,1	108,1	120,4	98,1
Horizon 2055, RCP 4.5	Q1	719,8	222,1	173,5	61,9	260,7	75,0	62,6	64,6	49,4	42,9	21,9	11,4	18,7	46,5	92,4	86,6	84,0
Horizon 2055, RCP 4.5	Q2	797,8	254,3	178,9	66,5	276,0	81,7	67,5	75,9	58,1	45,9	28,4	15,2	23,4	70,0	110,7	103,0	92,3
Horizon 2055, RCP 4.5	Q3	818,1	266,5	183,2	75,0	317,1	107,6	77,0	79,2	63,5	51,0	32,3	18,5	27,8	83,0	133,0	111,9	98,2
Horizon 2055, RCP 8.5	Q1	727,3	216,6	140,0	46,2	269,0	74,0	49,9	53,6	46,3	40,1	22,9	8,1	14,1	55,2	107,3	98,6	75,4
Horizon 2055, RCP 8.5	Q2	745,3	243,2	175,7	57,4	286,8	89,7	59,8	70,0	52,4	45,4	26,8	12,4	17,7	63,3	116,4	105,8	87,3
Horizon 2055, RCP 8.5	Q3	777,2	254,1	195,2	69,7	305,4	97,0	73,6	79,6	64,8	52,6	30,5	16,0	24,7	75,7	127,0	113,6	93,1
Horizon 2085, RCP 4.5	Q1	732,6	243,9	163,4	59,0	266,2	80,7	70,8	58,9	55,2	49,3	25,1	8,6	25,3	63,5	103,8	98,9	92,5
Horizon 2085, RCP 4.5	Q2	809,1	267,0	185,2	70,7	286,2	83,8	84,6	72,9	57,2	55,0	30,5	11,3	28,9	70,8	111,1	104,3	98,6
Horizon 2085, RCP 4.5	Q3	890,6	288,8	201,4	85,0	315,4	89,1	97,2	80,5	61,5	59,4	35,1	16,5	33,4	82,0	119,9	113,5	102,6
Horizon 2085, RCP 8.5	Q1	647,4	230,8	150,8	33,6	232,3	83,6	75,5	68,0	46,1	36,6	11,8	6,3	15,5	52,9	86,9	92,4	71,7
Horizon 2085, RCP 8.5	Q2	726,5	261,0	159,9	42,0	263,5	98,3	81,9	71,1	48,5	40,3	15,2	8,0	18,9	57,3	98,0	108,2	80,9
Horizon 2085, RCP 8.5	Q3	812,9	288,0	169,2	58,7	296,9	107,4	88,4	73,3	52,3	43,7	21,8	12,7	24,3	62,9	107,4	126,6	92,2

Q1 : 1er quartile – Q2 : médiane – Q3 : 3ème quartile

Annexe 5

Le fenêtrage et les techniques de spatialisation de LISDQS

Pour assurer une prise en compte ajustée des effets d'échelle, chaque variable peut être fenêtrée (1x1, 3x3, 5x5, 7x7, 11x11, ..., 101x101) en fonction de son influence. LISDQS comporte un système de fenêtres (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) centré sur le point d'observation (station de mesures locales). Les dimensions des fenêtres sont les suivantes (cas d'étude en exemple : résolution spatiale de 100 m) :

- ✓ fenêtre de base = 1 x 1 pixel, soit 100 x 100 m
- ✓ fenêtre 1 = 3 x 3 pixels, soit 300 x 300 m
- ✓ fenêtre 2 = 5 x 5 pixels, soit 500 x 500 m
- ✓ fenêtre 3 = 7 x 7 pixels, soit 700 x 700 m
- ✓ fenêtre 4 = 11 x 11 pixels, soit 1100 x 1100 m
- ✓ ...
- ✓ fenêtre 101 = 101 x 101 pixels, soit 10100 x 10100 m

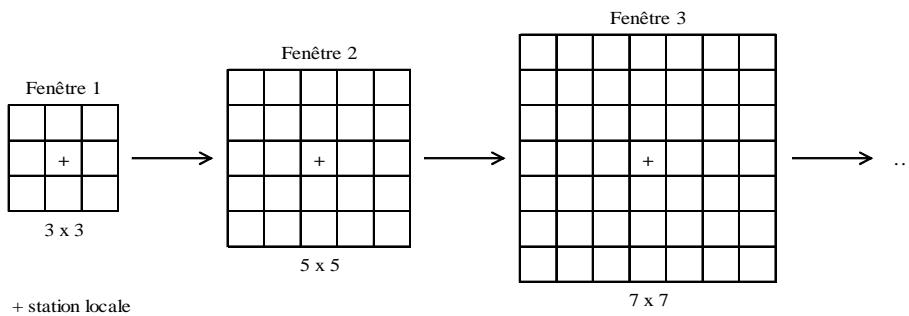


Figure 65. Système des fenêtres de LISDQS utilisé pour les calculs des variables locales

Quatre techniques sont proposées par le logiciel LISDQS : le krigage (ordinaire), les régressions, l'inverse de la distance et les polynômes. L'utilisateur sélectionne une technique pour estimer la variable d'intérêt et calculer les résidus, puis choisit l'une des trois autres techniques pour estimer les résidus issus de la 1^{ère} étape.

Dans le cas des régressions utilisées pour cette étude, les variables explicatives sont identifiées au seuil de 5 %. En dessous, elles ne sont pas retenues. Ces dernières sont ensuite croisées dans le cadre d'une régression multiple. Les coefficients sont considérés comme opérateurs cartographiques pour reconstituer le champ continu de la variable d'intérêt. Deux types de régressions sont proposés :

- ✓ régression globale : une seule régression est appliquée en utilisant l'ensemble du corpus disponible (n stations)
- ✓ régression locale : les n plus proches stations de chaque pixel (maille) de l'aire d'étude sont recherchées, puis les pixels rattachés aux mêmes stations (nombre de stations à définir par l'utilisateur) sont regroupés au sein d'un polygone (Figure 66 : exemple de la moyenne annuelle des températures maximales de l'air, 1996-2015) pour lesquels régressions (identification des meilleurs régresseurs, puis régression multiple) et krigage sont effectués. La densité irrégulière des stations entraîne des distorsions dans l'aire de recrutement des n stations. L'avantage est de réaliser des calculs à partir d'une information locale qui améliore les estimations, mais aussi de cartographier des coefficients de corrélation et de régression.

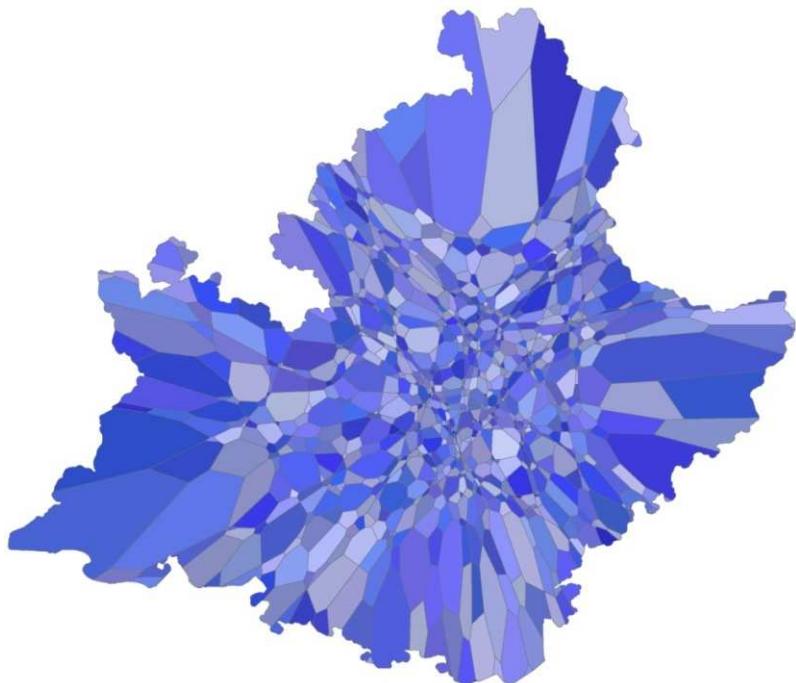


Figure 66. Polygones regroupant les pixels rattachés aux mêmes n stations dans le cadre d'une régression locale (exemple de la moyenne annuelle des températures maximales de l'air, 1996-2015)

Les erreurs d'estimation sont calculées après chaque étape par validation croisée. À chaque exécution (nombre équivalent au nombre d'observations ou mesures locales), une station est retirée du corpus et les coefficients des régressions sont calculés sur la base des $n-1$ stations restantes. Cette opération permet d'obtenir une valeur estimée qui est comparée à la valeur observée. La qualité statistique de l'interpolation peut être évaluée par les n valeurs d'écart. Les redondances des variables explicatives (fenêtres d'une variable présentant un même seuil par exemple), mais aussi la colinéarité sont également contrôlées.

Pour cette étude, la spatialisation des variables climatiques en tout point de l'espace a été réalisée en 3 phases :

- phase 1 : elle correspond à l'estimation des valeurs par les régressions multiples (composées, pour chacune des n situations à analyser, des variables significatives au seuil de 5 %)
- phase 2 : le résidu, calculé par validation croisée, est à son tour estimé par krigage
- phase 3 : elle correspond à la somme des deux estimations précédentes : phase 1 + phase 2.

La phase 4 qui consiste à calculer un nouveau résidu analysé par un processus autorégressif (prise en compte du climat du mois précédent ou de l'année précédente par exemple) pour lequel un résidu final est renseigné, a été testée, mais non utilisée pour conserver l'unité de chaque moyenne mensuelle, saisonnière ou annuelle de la période considérée.

Dans un premier temps, les régressions globales et locales ont été testées. Les régressions locales donnent des résultats de meilleure qualité. Cette technique est donc privilégiée dans cette étude.

Annexe 6

Comprendre les noms des fichiers raster

Au total, 340 cartes mensuelles, saisonnières et annuelles de températures de l'air et de précipitations ont été produites : pour chaque paramètre (Tmin, Tmax, Tmoy, RR), les cartes illustrent le climat présent (1996-2015) et le climat futur en fonction des RCP et des horizons futurs (2026-2045, 2046-2065). Pour les cartes de températures, les surfaces maritimes ne sont pas couvertes car elles faussent les valeurs estimées (évaporation par exemple).

Les cartes du climat présent et futur sont la somme des incertitudes liées à la qualité des mesures locales (stations de mesures), à l'interpolation spatiale des données, aux scénarios d'émissions, aux sorties des modèles globaux et régionaux (climat futur), et aux méthodes de correction des modèles globaux.

Comment décrypter les noms de fichiers selon les horizons climatiques ?

Climat présent, 1996-2015

TT températures de l'air (en °C)
 RR précipitations (en mm)

Tn température minimale de l'air
 Tx température maximale de l'air
 Ty température moyenne de l'air

Valeur moyenne par variable et pas de temps :

an	an
hiver	hiver
print	printemps
ete	été
aut	automne
jan	janvier
fev	février
mars	mars
avril	avril
mai	mai
juin	juin
juil	juillet
aout	août
sept	septembre
oct	octobre
nov	novembre
dec	décembre

TPM Toulon-Provence-Méditerranée

Sources à mentionner dans toute communication : GeographR, données : Météo-France, DRIAS Les futurs du climat.

Climat futur : 2026-2045 (2035), 2046-2065 (2055)

TT températures de l'air (en °C)
 RR précipitations (en mm)

Tn température minimale de l'air
 Tx température maximale de l'air
 Ty température moyenne de l'air

Valeur moyenne par variable et pas de temps :

an an
 h hiver
 p printemps
 e été
 a automne
 1 janvier
 2 février
 3 mars
 4 avril
 5 mai
 6 juin
 7 juillet
 8 août
 9 septembre
 10 octobre
 11 novembre
 12 décembre

hor1 horizon 1, 2026-2045
 hor2 horizon 2, 2046-2065

rcp45 RCP 4.5
 rcp85 RCP 8.5

TPM Toulon-Provence-Méditerranée

Le climat futur est égal au climat présent + deltas (ou anomalies). Les valeurs des horizons futurs correspondent à la médiane des valeurs moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles simulées par les modèles climatiques Euro-Cordex (source DRIAS)

Sources à mentionner dans toute communication : GeographR, données : Météo-France, DRIAS Les futurs du climat.

Format des fichiers

Mise en forme des livrables :

- format de sortie : GEOTIFF (raster)
- projection géographique : Lambert-93, RGF93
- résolution spatiale : 100 m pour les températures de l'air, 1000 m pour les précipitations

Pour toute question et aller plus loin (construction d'indicateurs spécifiques, cartes 3D, calculs de quantiles...), se rapprocher de GeographR : philippe.rossello@geographr.fr

Annexe 7. Bilan radiatif et énergétique

Le bilan radiatif d'une surface peut se noter ainsi :

$$\text{Eq (1)} : Q^* = (1-a)G + RA - RT$$

où :

Q^* : bilan radiatif total ou rayonnement net en W.m^{-2}

G : le rayonnement solaire global W.m^{-2} . C'est la somme du rayonnement direct et diffus (renvoi par les nuages par exemple).

a : albédo de la surface

RA : rayonnement atmosphérique en grandes longueurs d'ondes W.m^{-2}

RT : rayonnement terrestre en grandes longueurs d'ondes W.m^{-2}

Le bilan énergétique :

$$\text{Eq (2)} : Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$$

Où :

Q^* : est le bilan radiatif

Q_F : flux anthropique (nos activités)

Q_H : flux sensible (écoulement d'air)

Q_E : flux latent (évapotranspiration)

ΔQ_S : flux stocké (chaleur emmagasinée dans les matériaux)

ΔQ_A : flux adjectif (le transport de chaleur d'une zone à une autre)

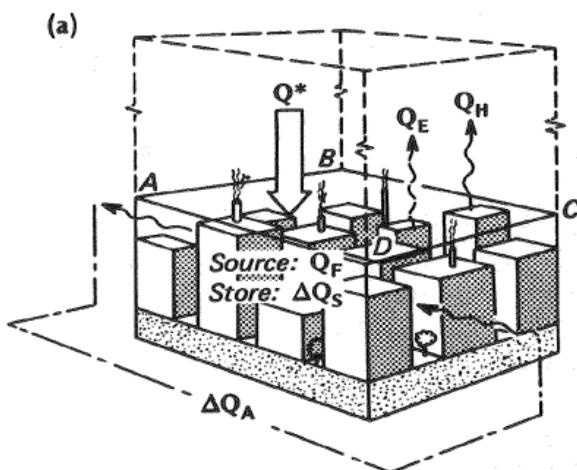


Figure 67. Illustration de l'équation du bilan énergétique (source : J. Bouyer, CEREMA 2017)

Annexe 8. Transect du 10 Août 2018 en fin de canicule

Résultats du transect, première partie centre-ville de Toulon jusqu'au Mourillon :

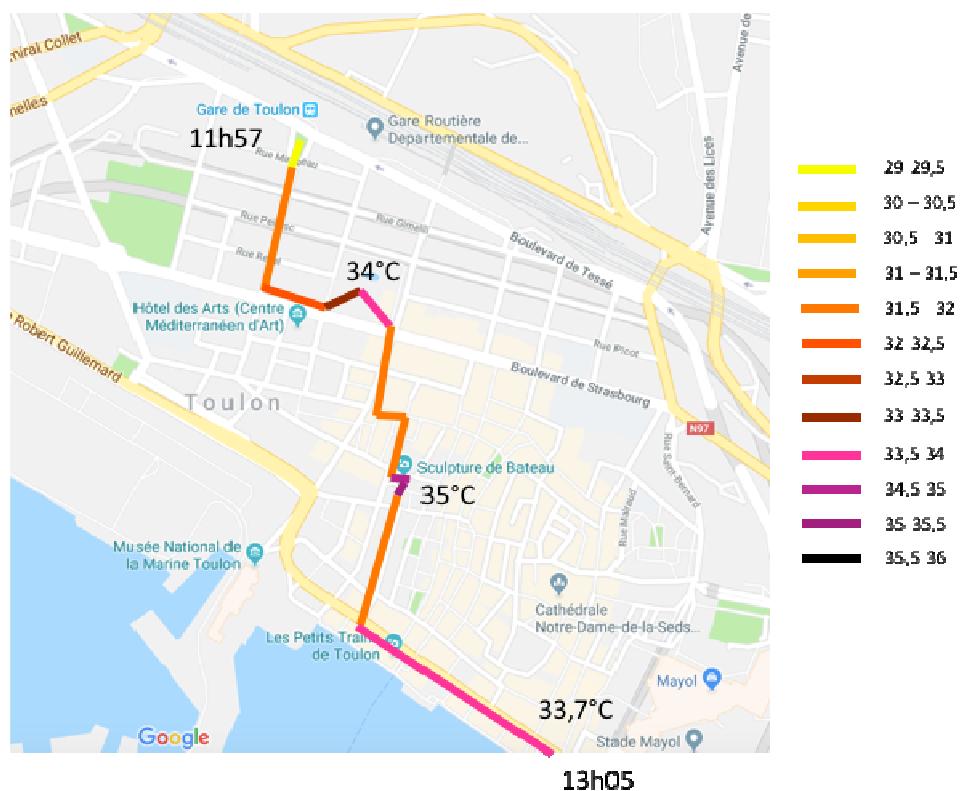


Figure 68. Résultat du transect, partie 1

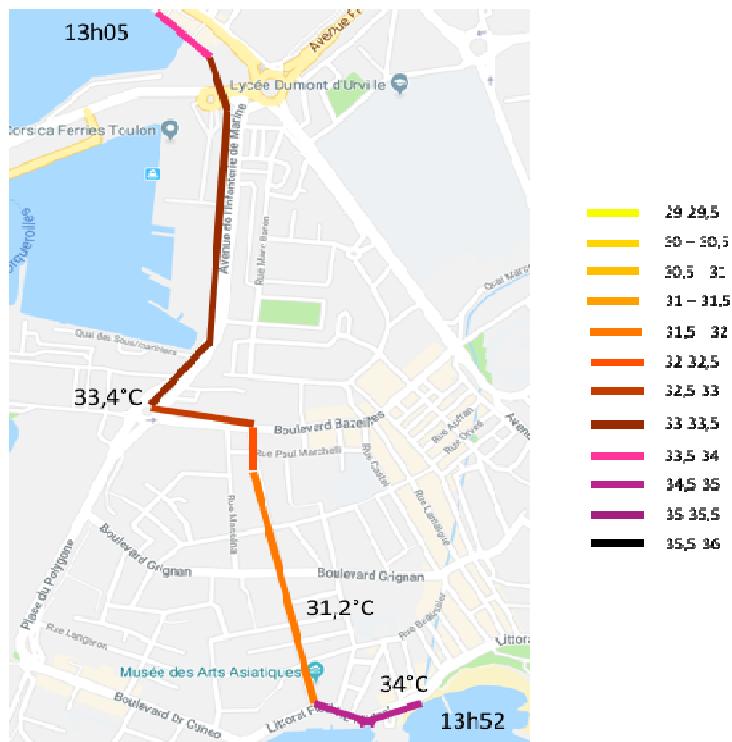


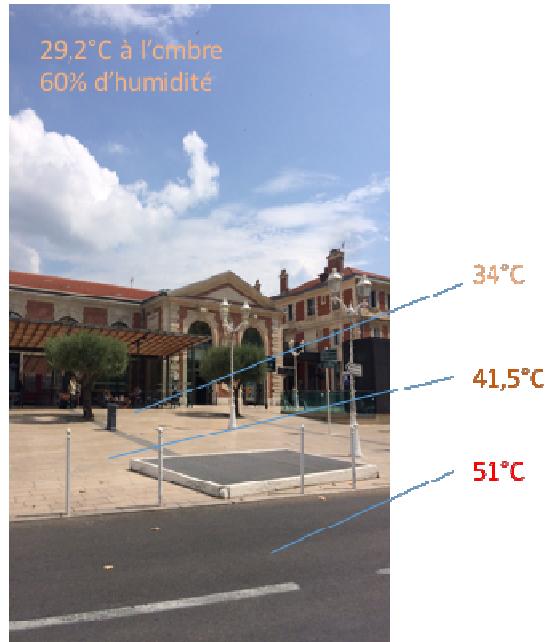
Figure 69. Résultat du transect, partie 2

11h55. Arrivée à la gare SNCF Toulon :

- sortie du TGV : l'effet de chaleur à la sortie de la climatisation du train est immédiat ;
- à l'extérieur de la gare, les sièges sont chauds. Il y a une petite brise qui rend la chaleur un peu supportable, cependant des vitres coupent la brise. L'espace est vide, il y fait trop chaud et les passagers sont dans le Relais H et dans le café de la gare où est écrit comme argument commercial : « climatisation ».

Surfaces & température :

- 34°C dalles blanches devant la gare à l'ombre et 41,5°C au soleil ;
- 51°C pour le bitume ;
- il fait 29,2°C à l'ombre, 60 % d'humidité (fontaine au rond-point).



12h05. Départ du rond-point. Il fait maintenant 30,8°C à l'ombre sur le boulevard. Une personne SDF dort par terre à l'ombre, il est en jean remonté aux chevilles et transpire beaucoup. Faudra-t-il préparer des abris l'été tout comme lors des vagues de froid ?

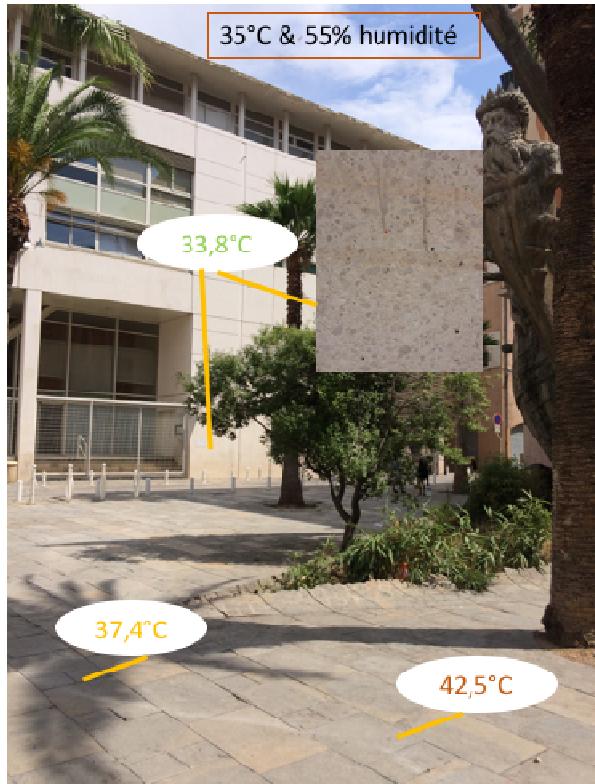
12h17. Arrivée place de la Liberté où règne une très forte chaleur, un soleil important dont la lumière est reflétée par le sol (c'est le point négatif avec les sols clairs). Instinctivement, je me précipite vers la seule zone d'ombre : l'arrière des abribus. Mais il n'y a pas vraiment de place (PS : les nuages sur la photographie de droite ci-dessous sont en fait situés au-dessus du Faron).



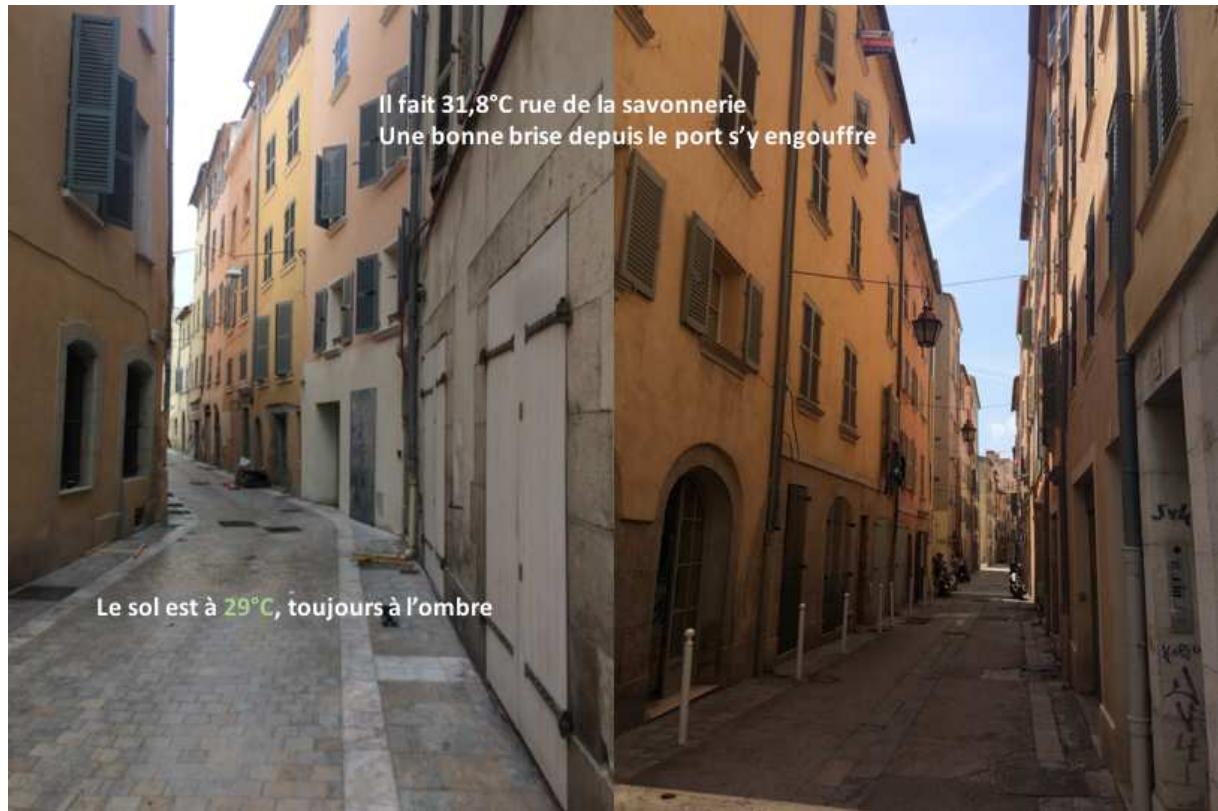
12h21. Départ de la place.

12h31. Arrivée à la fontaine place Amiral Senes, malheureusement elle ne fonctionne pas. Cependant la température reste fraîche et il y a une petite brise. Mesure de température : 31,9°C.

12h39. Place Vattel : comparé aux petites rues, il fait très chaud ici aussi, 35°C !



12h47. Arrivée dans la petite rue des savonnières qui amène au vieux port. La différence avec la place Vattel est claire : le Datalogger enregistre 31,8°C et mon autre instrument 31°C avec 62 % d'humidité. La rue des savonnières est typique du centre-ville, quasiment toujours à l'ombre, orientée vers le port d'où vient une bonne brise marine. En revanche, les odeurs sont accentuées par la chaleur : poubelles, égouts ; avec la chaleur, certaines rues du centre-ville de Toulon vont clairement nécessiter plus de services de nettoyage et plus de civisme pour rester vivables tout l'été.



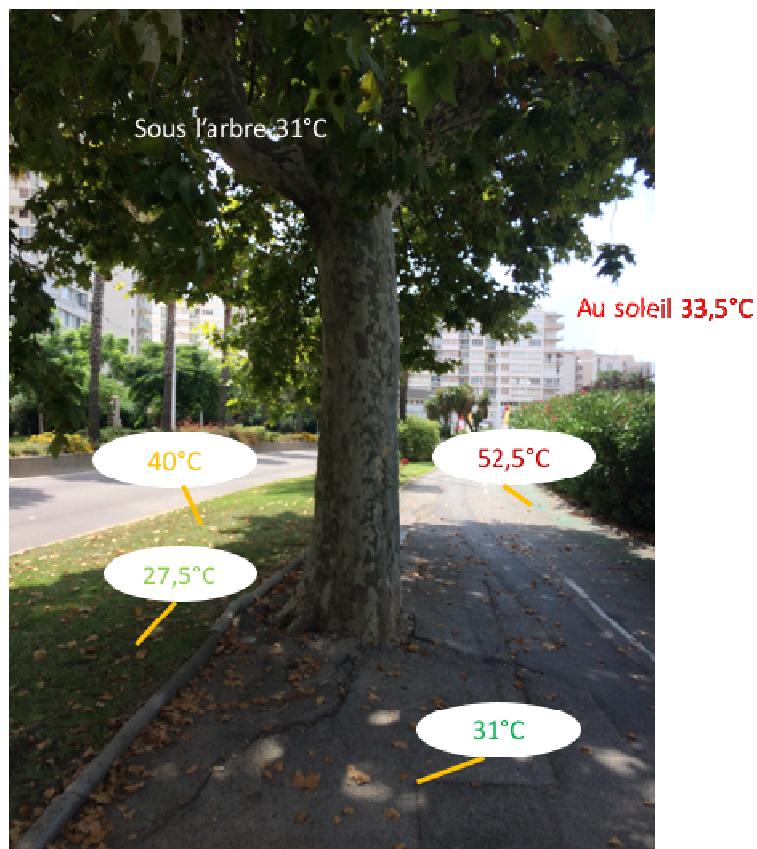
12h49. Arrivée au port. Les terrasses des restaurants sont trop chaudes pour vouloir s'y arrêter malgré l'ombre. Nous posons nos mains sur un des meubles en bois composite du port, c'est brûlant ! 65°C en température de surface, autant qu'un capot de voiture mesuré vers 15h15.



13h05. Je me dirige maintenant vers les plages du Mourillon, le long du port et des bateaux Corsica Ferries. C'est l'un des passages les plus durs du transect : il y a de l'ombre, mais il fait extrêmement chaud ; le vent venant du port permet de marcher sans trop souffrir. En revanche, dès qu'il s'arrête, comme au niveau de la CCI qui coupe le vent, la différence est très importante. La morphologie urbaine joue définitivement un rôle dans la gestion de la chaleur avec les brises qu'elle permet ou non.



13h14. Pause désaltération sous l'ombre d'un platane. J'en profite pour faire quelques relevés qui soulignent l'importance des arbres en ville lors des canicules. Alors que l'herbe au soleil est à 40°C et le bitume à 52,5°C, à l'ombre de l'arbre, ces températures de surface sont respectivement de 27,5°C et de 31°C !



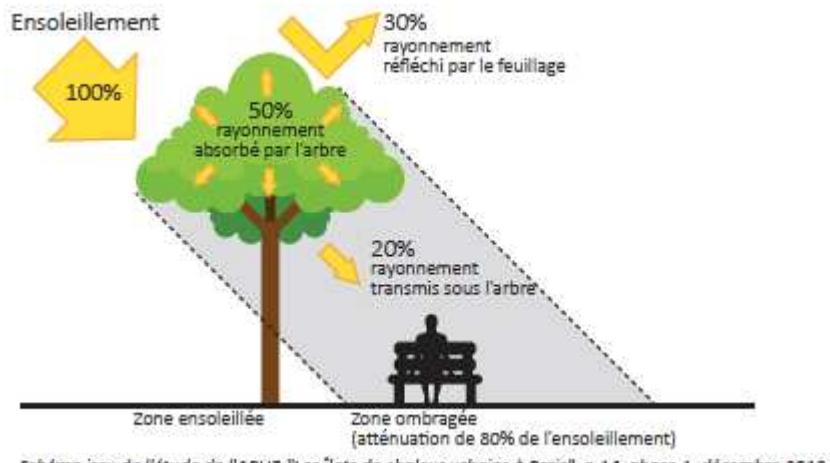


Figure 70. De l'importance des arbres (APUR, 2012)

13h35. Arrivée au milieu du boulevard Eugène Pelletan : une petite rue ombragée, où circule une bonne brise avec des maisons dont certaines ont des jardins. La température redescend à 31,5°C.



13h41. Arrivée sur le littoral : le chemin est en plein soleil.

Surfaces :

- pierre du muret : 39,2°C ;
- bitume 51,5°C ;
- siège abribus en acier à l'ombre 35,4°C.

Récit du transect, deuxième partie au Pradet :

13h57. Entrée dans le bus 23, direction le Pradet. Dans le bus, la climatisation est bien en marche (ou la ventilation ?), mais il y fait tout de même 33,5°C.



Figure 71. Résultat du transect : Partie 3

14h15. Pradet, arrêt Meuniers, après avoir avancé dans la rue principale, je marche lentement vers le Parc de la Mairie.



14h23. Passage au Parc. La fraîcheur (brise) et l'ombre sont appréciables, la température baisse très vite de 2°C.



14h36. Test de l'apport de fraîcheur supposé d'une fontaine. La petite brise ressentie dans ce coin est vraiment agréable. Le thermomètre affiche 29°C, 4,5°C de moins que dans la rue, 15 mn plus tôt.



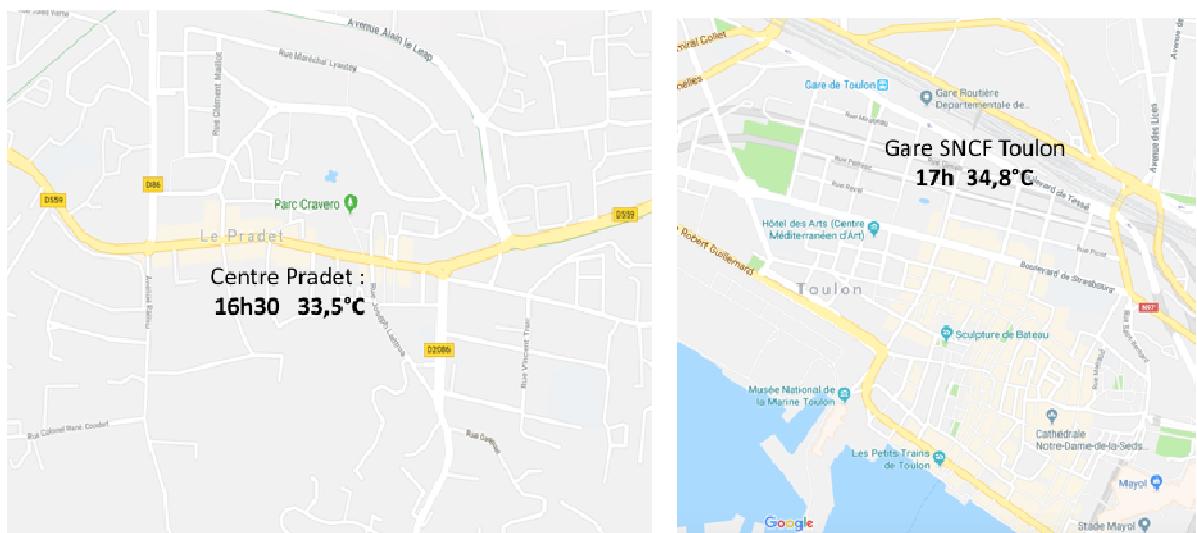
14h58. Une fois sorti du Parc, je me dirige vers les zones pavillonnaires : rue Paul Cézanne, typique d'un lotissement, il y fait une chaleur suffocante. Au 103 rue Pierre de Coubertin, une personne a refait son allée en bitume, il est chaud et très noir.

Nous atteignons le record de la journée (logique dans une certaine mesure du fait de l'heure) devant l'école : 35,8°C. Il fait aussi chaud dans les lotissements que sur la place de Toulon ! Ceci étant, c'est le milieu d'après-midi.



15h30. Descente vers la plage par le boulevard de Lattre de Tassigny. Nous arrivons très vite à 32°C au soleil et **30°C à l'ombre au niveau de la plage**.

16h18. Nous remontons au Pradet. Il fait 33,5°C au soleil. 3,5°C de plus qu'au bord de la mer. Entrée dans le bus à 16h31 : même chaleur étouffante (34°C). À 16h58, arrivée à la gare routière de Toulon : 5 minutes plus tard, le Datalogger indique qu'il fait 34,8°C sur le parvis devant la gare au soleil, soit +1,3°C après avoir quitté 20 minutes plus tôt le centre du Pradet.



Quelles informations nous donnent ce transect ?

- que les îlots de fraîcheur sont réels et peuvent apporter jusqu'à 4°C de moins que dans les rues adjacentes ;
- que le choix des surfaces est déterminant, les écarts peuvent aller jusqu'à 20°C de différence à quelques centimètres près ;
- le mobilier urbain doit être pensé jusque dans ces moindres détails (abribus, surface du mobilier urbain du port, revêtement des bâtiments) ;
- les arbres jouent un rôle essentiel dans le rafraîchissement des villes ;
- les zones pavillonnaires ne sont pas nécessairement moins chaudes en journée : au contraire la forte imperméabilisation des sols et l'absence d'ombre au-delà des jardins privés en font des fournaises ;
- il y a effectivement une différence entre le centre-ville de Toulon et le Pradet, mesurée à environ +1,5°C en fin de journée. Il aurait été intéressant de faire le test tôt le matin où les écarts doivent être plus importants encore ;
- au sein même du Pradet, l'avenue principale est plus chaude (+3,5°C mesurés) que la partie « basse » de la ville en bord de mer.

Annexe 9

	Facteurs climatiques		Facteurs non-climatiques				
	Facteurs en cause	Score	Gravité	Urgence	Extension	Capacité d'adaptation	Score
Dégénération du confort thermique	Hausse du nombre de canicules et de la durée de celles-ci Hausse de la température moyenne °C	2	2	1	1	1	5
Infrastructure des réseaux électriques	Hausse du nombre de canicules et de la durée de celles-ci Hausse de la température moyenne °C	1	0	0	0	1	1
Infrastructure transport	Hausse du nombre de canicules et de la durée de celles-ci Hausse de la température moyenne °C	1	1	1	0	1	3
Surmortalité / Santé	Hausse du nombre de canicules et de la durée de celles-ci Hausse de la température moyenne °C	2	2	1	1	0	4
Pollution	Hausse du nombre de canicules et de la durée de celles-ci Hausse de la température moyenne °C	2	2	1	1	1	5
Baisse des rendements agricoles	Hausse du nombre de canicules et de la durée de celles-ci, sécheresses importantes Hausse de la température moyenne °C	1 à 2	2	1	0	1	4
Risques sur la sécurité des personnes et des biens en lien avec les inondations (ruissellement)	Pluies intenses	1	2	1	1	0	4
Risques sur la sécurité des personnes et des biens en lien avec les inondations (débordement)	Pluies intenses	1	2	1	1	0	4

Annexe 10

	Facteurs climatiques		Facteurs non-climatiques				
	Facteurs en cause	Score	Gravité	Urgence	Extension	Capacité d'adaptation	Score
Risques sur la sécurité des personnes et des biens en lien avec les effondrements de terrain et coulées de boue	Pluies intenses	1	2	1	0	1	4
Inondation des réseaux: électrique, transport terrestre, et assainissement	Pluies intenses	1	1	0	1	0	2
Surexploitation de la nappe	Baisse de la recharge	1 à 2	1	1	1	0	3
Baisse de la ressource disponible impactant la capacité d'accueil du tourisme saisonnier	Baisse de la recharge Baisse des débits de surface (SCP)	2	0	0	1	0	1
Baisse de la ressource disponible impactant la capacité AEP	Baisse de la recharge Baisse des débits de surface (SCP)	1 à 2	1	0	1	-1	1
Limitation de l'accès à l'eau pour l'irrigation, impactant la production et les revenus	Hausse de l'ETP Baisse de la pluviométrie Baisse de disponibilité SCP (Verdon)	1	1	0	1	0	2
Tensions accrues sur le partage de la ressource en eau	Baisse de la recharge Hausse de l'ETP Baisse de la pluviométrie Baisse de disponibilité SCP (Verdon)	1 à 2	1	0	1	0	2
Erosion du trait de côte : sécurité des personnes	Tempêtes Surcotes	1 à 2	1	1	1	0	3
Tempêtes et submersions marines: dommage aux infrastructures et aux biens situés en bordure de plage	Tempêtes Surcotes	1	1	1	1	1	4

