



Les pratiques d'urbanisme et l'aménagement du territoire de la Métropole Rouen Normandie à l'épreuve des défis posés par le **changement climatique**

RÉFÉRENT GIEC LOCAL

Céline Fréchet

AUTRICES ET AUTEUR

Céline Fréchet

Léna Tullifer (ENSA Normandie)

Valter Balducci (ENSA Normandie)

RELECTURES ET CONTRIBUTIONS

Les services de l'urbanisme et de l'aménagement
de l'espace public de la Métropole Rouen Normandie

Sommaire

AVANT-PROPOS	5
LE TERRITOIRE MÉTROPOLITAIN DE ROUEN	6
Rappel synthétique de la réglementation encadrant la planification du territoire et la gestion des risques naturels	8
UNE URBANISATION GALOPANTE ACCENTUANT LA VULNÉRABILITÉ DU TERRITOIRE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	11
L'étalement urbain dans la Métropole Rouen Normandie	12
Les enjeux et les conséquences de l'étalement urbain vis-à-vis du changement climatique	13
Annexes : Évolution de l'étalement urbain dans plusieurs secteurs géographiques de la Métropole Rouen Normandie	14
L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN	20
Les facteurs qui influencent le climat urbain	21
Observations du phénomène sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie	24
Pistes d'améliorations pour lutter contre les îlots de chaleur urbain	25
Conclusion	29
Recommandations pour l'amélioration des connaissances	30
LES RISQUES ACCRUS D'INONDATION	31
État des lieux sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie	31
Pistes d'améliorations pour améliorer la gestion de l'eau et du risque inondation	34
Conclusion	37
Recommandations pour l'amélioration des connaissances	38
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	39

Avant-propos

La présente étude concerne à la fois l'impact du changement climatique sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie, et les interrogations que ces impacts posent aux outils et aux pratiques d'urbanisme et d'aménagement du territoire. Bien que les effets du changement climatique puissent renvoyer à de nombreux sujets, cette étude ne traitera pas du champ d'action urbanistique dans sa complexité mais se concentrera sur l'évolution de l'urbanisation et de l'étalement urbain, ainsi que deux conséquences majeures accentuées par le changement climatique qui en résultent, à savoir l'îlot de chaleur urbain et le risque d'inondation.



Le territoire métropolitain de Rouen

Les effets du changement climatique sont observés à l'échelle planétaire, avec des conséquences dramatiques sur les territoires et leurs habitants. Le territoire rouennais n'échappe pas à ces phénomènes globaux (montée des eaux, augmentation des températures...), avec des répercussions territoriales et des évolutions propres au contexte normand. Les effets de ces phénomènes peuvent aussi être atténués ou accentués par, d'une part, les spécificités physiques du territoire (géographie, présence d'eau, végétation...), et d'autre part, par les formes et l'organisation des activités humaines.

En effet, successivement, certaines doctrines et paradigmes en urbanisme ont façonné nos villes, notre quotidien, ou notre cadre de vie à travers plusieurs domaines divers tels que la typologie du bâti, la concentration de la population, le maillage des routes et des infrastruc-

tures. Ces aménagements ont engendré (ou ont été engendrés par) des usages et de nouvelles activités anthropiques, accentuant les effets du changement climatique (trafic routier et pollution, climatisation, activités industrielles...), ou dans de rares cas, l'atténuant (aménagement de parc, de forêts, de zones tampons, etc.).

Ainsi, le changement climatique questionne l'urbanisme contemporain et donc la façon de penser et de faire la ville. Prendre en compte l'impact de ce phénomène global dans le territoire représente un défi incontournable aujourd'hui dans les réflexions portant sur les politiques d'aménagement du territoire à toutes les échelles, de la rue aux quartiers, de chaque commune à l'aire urbaine dans son entièreté. La mise en place d'outils de gestion adaptés à cette nouvelle situation présuppose une connaissance préalable des facteurs de

vulnérabilité du territoire avant de proposer des stratégies d'atténuation, d'adaptation et de résilience.

La géographie et l'usage du sol

La Métropole Rouen Normandie se situe dans la partie aval de la Seine, une vallée encaissée formée par les méandres du fleuve et bordée de plateaux calcaires sensibles au ruissellement et à l'érosion. D'après le mode d'occupation des sols de 2019¹, le territoire est composé à plus de deux tiers d'espaces boisés (34 %), de zones agricoles (29 %) et naturels, terrestres ou aquatiques (8 %) (Figure 1). Cette composition du paysage rouennais fait partie de l'équilibre et de la spécificité du territoire, et chaque changement peut avoir un impact sur les phénomènes naturels locaux. Pour exemple, les grands massifs forestiers localisés de part et d'autre de la Seine ainsi que dans les vallées et sur les coteaux, peuvent in-

¹ Les chiffres indiqués sont plus récents que ceux du PLU de la Métropole qui a mobilisé le mode d'occupation des sols de 2015. Néanmoins, les ordres de grandeur restent similaires.

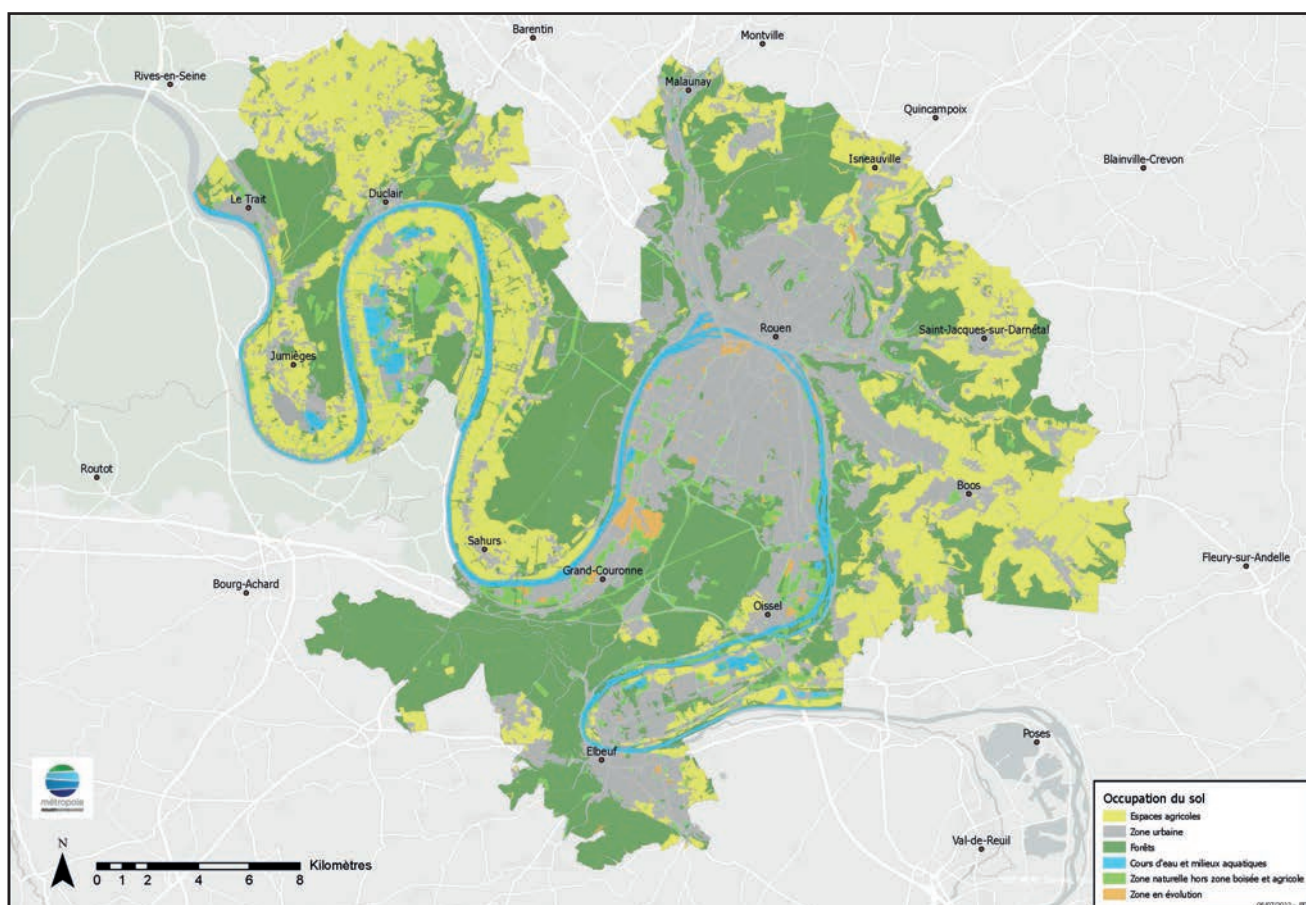


FIGURE 1. L'occupation du sol par grand type d'usage dans la Métropole Rouen Normandie. Les espaces urbains continus et historiques sont localisés principalement le long des rives de la Seine dans la boucle de Rouen et d'Elbeuf, et dans les vallées affluentes de la Seine (Cailly, Aubette, Robec) - Source : mode d'occupation des sols de la Métropole Rouen Normandie de 2019, carte réalisée en 2022.

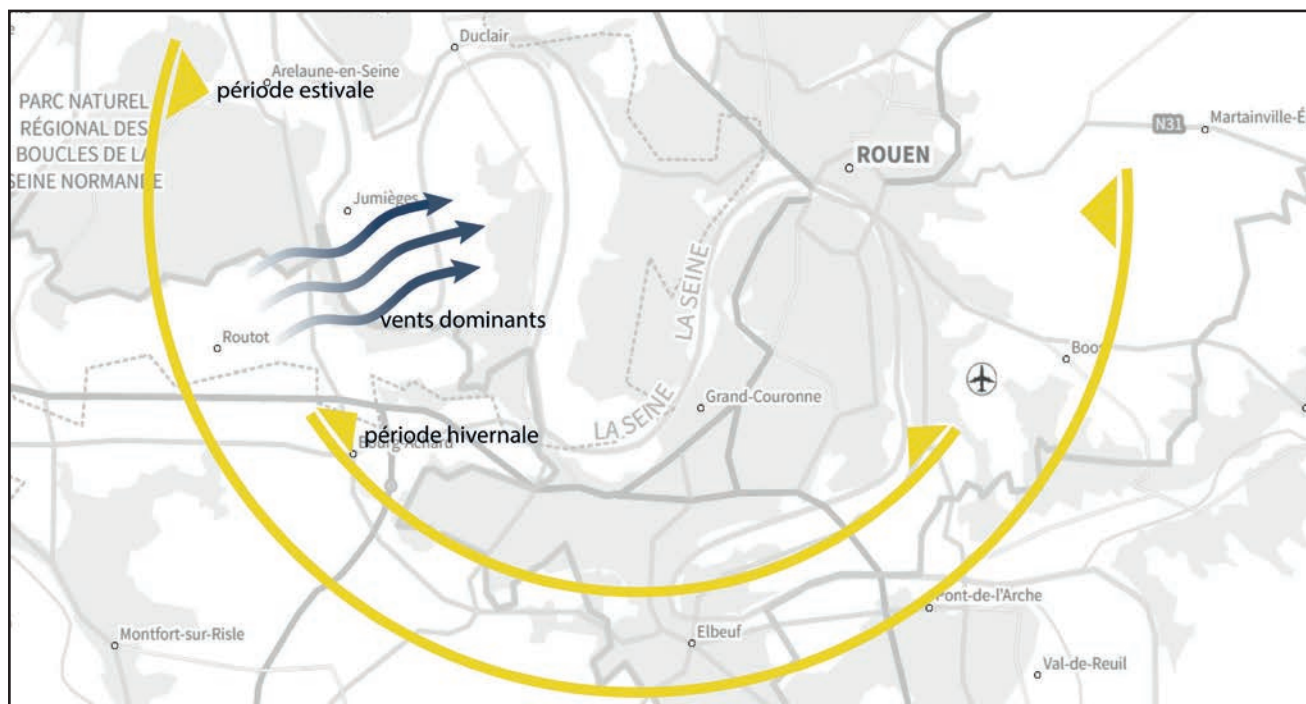


FIGURE 2. Le territoire de la Métropole Rouen Normandie, ensoleillement hivernal et estival, et vents dominants –
Source : Illustration de Céline Fréchet, fond de plan : www.geoportail.gouv.fr, 2022.

fluencer certains mouvements d'air et rendre plus complexe le cheminement des vents dominants sur le territoire. Ainsi, le grignotage des espaces naturels par les activités anthropiques a entraîné au fil du temps une altération plus ou moins marquée du climat local.

La zone urbanisée représente moins d'un tiers du territoire métropolitain (29%), et comprend les espaces résidentiels (54 % du total), les activités économiques (21 %), les grands équipements (23 %) et d'autres espaces en cours d'évolution (3,5 %). Les espaces résidentiels comprennent des formes urbaines très différenciées. En effet, on distingue d'une part, l'habitat individuel situé dans les lotissements en marge de ville et dans des tissus plus denses dans les faubourgs (environ 85 % des espaces résidentiels, dont 37,5 % d'habitats individuels dit très peu denses, et 48 % d'habitats dit plus denses) ; puis l'habitat collectif présent sous la forme de grands ensembles d'habitation ou de petites poches éparées sur l'ensemble du territoire urbanisé (environ 11 % des espaces résidentiels) ; et enfin l'habitat dense et continu typique des tissus urbains multifonctionnels des hypercentres (environ 3,5 % des espaces résidentiels).

Le climat

L'identification des effets du changement climatique sur les territoires suppose de connaître l'évolution de certains paramètres climatiques, comme la température atmosphérique ou les précipitations. Leur déter-

mination, objet des synthèses dédiées à la « *Évolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie* » (Laignel B., Nouaceur Z., 2018) et « *La ressource en eau et le risque inondation dans la Métropole Rouen Normandie* » (Kazmierczak L., Laignel B., Charrier F., 2019), permet de mieux comprendre les raisons des manifestations les plus extrêmes du changement du climat, de la canicule à la sécheresse, de l'inondation aux tempêtes, qui sont l'objet de ce présent travail de synthèse.

La Métropole Rouen Normandie est soumise au climat normand considéré comme océanique, avec de nombreux paramètres qui viennent le nuancer et le préciser (alors que dans certaines autres régions de la Normandie, le climat reste homogène et tempéré, à l'intérieur des terres, les températures y sont plus contrastées, avec des hivers relativement doux et des étés plus chauds). Néanmoins, ces tendances évoluent, et une augmentation des températures moyennes annuelles d'environ 1,3 à 1,9°C est constatée sur la période 1970-2017. Toutes les projections indiquent une élévation supplémentaire de la température moyenne annuelle en Normandie qui varie entre +2°C pour les scénarios² les plus optimistes, à +6°C pour les scénarios les plus pessimistes (Laignel B., Nouaceur Z., 2018). Concernant l'évolution des précipitations et notamment de la pluviométrie entre 1970 à 2017, les cumuls présentent une forte variabilité interannuelle. En effet, les relevés montrent une succession d'années sèches et d'années

avec des excédents pluviométriques. De même, les simulations à long terme montrent des évolutions qui peuvent être sujettes à de fortes disparités locales, notamment entre les plateaux et le fond de la vallée de la Seine. Néanmoins, la tendance générale qui en ressort montre une stabilité des précipitations dans le cas d'un scénario optimiste (RCP 2,6), et une légère baisse de l'ordre de 100 à 200 mm en moyenne respectivement pour un scénario médian (RCP 4,5) et pessimiste (RCP 8,5) (Laignel B., Nouaceur Z., 2018).

La fréquence des événements météorologiques extrêmes (canicules, sécheresses, fortes pluies) va vraisemblablement augmenter avec le changement climatique. Des incertitudes persistent cependant sur l'évolution des tempêtes hivernales et des vents forts car aucune tendance ne semble se dégager dans les modèles actuels sur le territoire français (Ouzeau et al., 2014). Cette absence de tendance s'observe également à l'échelle de l'agglomération rouennaise (Laignel B., Nouaceur Z., 2018, p. 18 ; Préfet de la région Normandie, 2020a, p. 20).

Enfin, de par sa localisation dans l'hémisphère nord et sur la façade Atlantique, l'exposition du territoire au soleil est orientée au sud, avec des vents dominants provenant de l'ouest (Figure 2). Ces caractéristiques peuvent avoir un rôle important dans la conception des opérations d'urbanisme et d'aménagement dans le but de favoriser la qualité et le cadre de vie des habitants.

² Les scénarios évoqués correspondent aux profils représentatifs des concentrations (en anglais, Representative Concentration Pathway - RCP) établis par le GIEC international dans son 5e rapport d'évaluation de 2013. Ils permettent d'évaluer l'impact de la réduction des émissions et des concentrations des gaz à effet de serre d'origine anthropique sur l'augmentation de la température de l'atmosphère de la Terre.

Rappel synthétique de la réglementation encadrant la planification du territoire et la gestion des risques naturels

L'aménagement du territoire de la Métropole Rouen Normandie est soumis à plusieurs niveaux de réglementations : nationale, régionale, locale. Il est également articulé en plusieurs thématiques qui, selon les échelles et les priorités politiques, déterminent le paysage de l'agglomération (Figure 3).

La complexité locale réside dans le fait que certaines réglementations regroupent plusieurs thématiques et plusieurs niveaux de compatibilité. Chaque procédure de modification et d'évolution des cadres réglementaires locaux doit ainsi être particulièrement précise afin de respecter l'ensemble des cadres législatifs dont ils dépendent, entraînant une réalisation particulièrement longue et une application finale sur le territoire qui parfois apparaît obsolète face à la rapidité des changements urbains, d'usages ou climatiques.

À l'échelle de la Métropole Rouen Normandie, ces ambitions se retranscrivent via le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT), le Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET) et le Plan Local d'Urbanisme Intercommunal (PLUi). Ce

dernier regroupe toutes les thématiques du territoire à travers des écrits, des renvois ou annexes. La Métropole Rouen Normandie a lancé en décembre 2022 la révision de ces documents, avec la préparation d'un SCoT valant PCAET (SCoT-AEC) pour 2026 et la révision du PLUi dans le même temps.

L'urbanisme et l'aménagement du territoire

Le cadre réglementaire est complexe et est élaboré à différentes échelles. Le socle est donné à l'échelle législative nationale, par les lois et les principes du droit de l'urbanisme (Code de l'urbanisme, livre 1er). Puis les objectifs à moyen et à long termes en matière d'aménagement régional sont fixés dans le **Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET)**, comme le prévoit la loi NOTRe³.

Le **Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT)** est un document stratégique dont l'objectif est la construction d'une vision

prospective à l'échelle métropolitaine. Il vise à concilier le développement du territoire (résidentiel, économique, touristique...) avec la préservation de ses ressources naturelles (eaux, sous-sol...) et ses espaces agricoles, naturels et forestiers. Le SCoT de la Métropole de Rouen, approuvé le 12 octobre 2015, planifie et oriente le développement du territoire pour les vingt prochaines années (2015-2033) en lui donnant un cadre cohérent en matière d'aménagement du territoire, d'habitat, de mobilité, de développement économique et commercial, et d'environnement. L'élaboration du SCoT-AEC et la révision du PLUi lancée en décembre 2022 devront à la fois prendre en compte leurs évolutions ainsi que l'urgence de répondre aux enjeux climatiques et de biodiversité, et trouver des solutions pour intégrer l'évolutivité de la situation entre le temps de leur élaboration et de leur mise en œuvre à court, moyen et long terme.

Le **plan local d'urbanisme (PLU)** à l'échelle d'une commune ou le PLUi à l'échelle d'un regroupement de communes, comme c'est le cas sur la Métropole Rouen Normandie, est un document d'urbanisme qui établit un projet global d'urbanisme et d'aménagement et fixe en conséquence les règles générales d'utilisation du sol sur le territoire. Il prescrit l'aménagement du territoire en respectant les

³ La loi NOTRe n. 2015-991 du 7 août 2015 concerne la nouvelle organisation territoriale de la République.

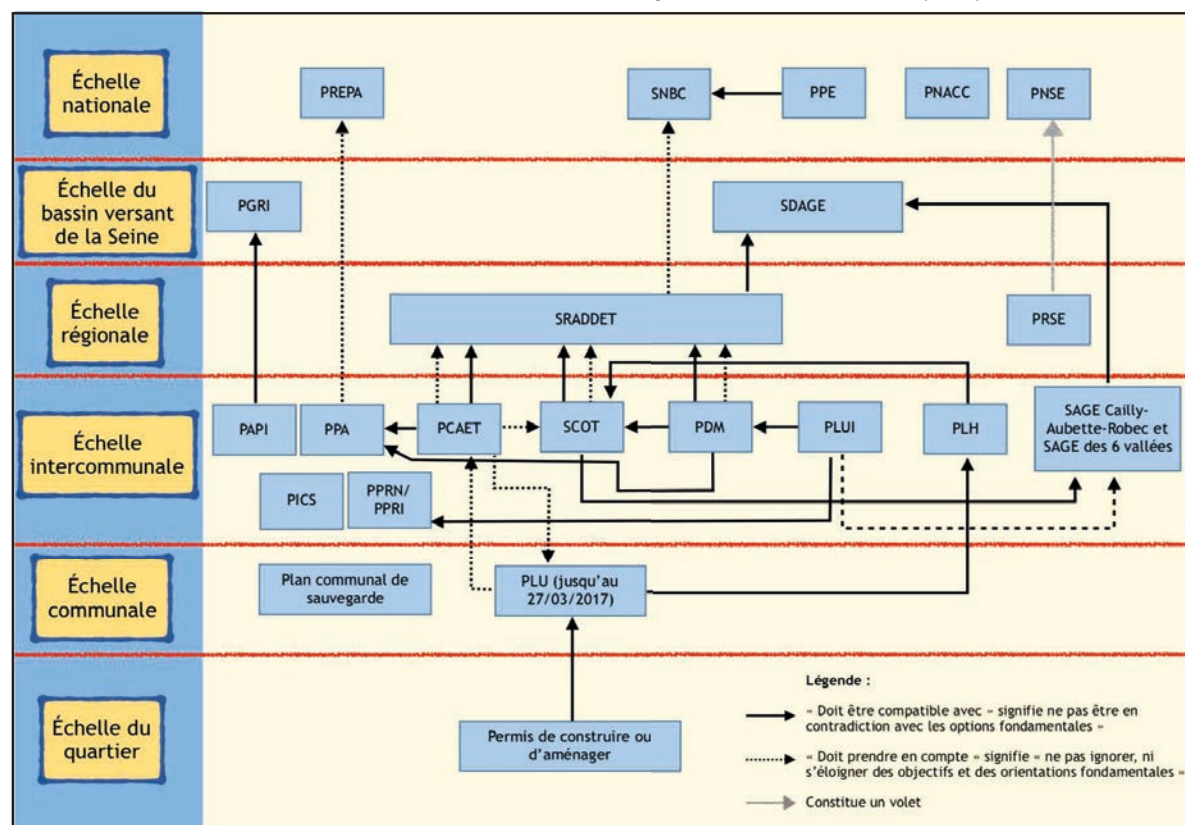


FIGURE 3 : Articulation de la réglementation concernant les risques naturels et la lutte au changement climatique à différents échelons territoriaux – Source : Illustration réalisée par les auteurs.

politiques nationales et territoriales d'aménagement et les spécificités d'un territoire (Art. L.101-2 du code de l'urbanisme). Le PLUi de la Métropole a été approuvé en 2020. Au sein de ce document prescriptif, sont présentes plusieurs composantes

- un rapport de présentation, qui explique les choix retenus notamment en matière de consommation d'espace, en s'appuyant sur un diagnostic territorial et une analyse de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers (il doit justifier les règles du PLUi) ;
- un projet d'aménagement et de développement durable (PADD) qui définit les orientations générales d'aménagement, d'urbanisme, d'habitat, de déplacement, d'équipement, de protection des espaces et de préservation ou de remise en bon état des continuités écologiques. Il fixe les objectifs chiffrés de modération de la consommation de l'espace et de lutte contre l'étalement urbain.
- des orientations d'aménagement et de programmation (OAP) qui, dans le respect du PADD, comprennent des dispositions portant sur l'aménagement, l'habitat, les transports et les déplacements ;
- un règlement et des documents graphiques, qui délimitent les zones urbaines (U), les zones à urbaniser (AU), les zones agricoles (A) et les zones naturelles et forestières (N), et fixent les règles générales.
- des annexes (servitudes d'utilité publique, listes des lotissements, schémas des réseaux d'eau et d'assainissement, plans d'exposition au bruit des aérodromes, secteurs sauvegardés, ...).

Au sein de cet ensemble réglementaire figure aussi le **Programme Local de l'Habitat (PLH)** qui correspond au document de planification et de programmation de l'offre de logements en application des articles R 301-1 à R302-13 du Code de la construction et de l'habitat (C.C.H.). La Métropole a adopté son PLH le 16 décembre 2019, pour la période 2020-2025. Cette politique locale vise à répondre aux besoins en logements et en hébergements et à favoriser la mixité sociale, tout en assurant entre les communes et entre les quartiers d'une même commune une répartition équilibrée et diversifiée de l'offre de logements. Le PLH a une durée, définie par la loi ALUR (loi sur l'Accès au Logement et un Urbanisme Renoué) du 27 janvier 2014, de 6 ans avec une prorogation de 2 ans sous certaines conditions. Le PLH est élaboré selon trois phases successives :

- Phase 1 : diagnostic sur le fonctionnement des marchés du logement sur l'offre sociale, privée, individuelle, collective, sur l'offre foncière et sur la qualité des parcs de logement.

- Phase 2 : orientations et objectifs fixés par la Métropole afin de répondre aux besoins identifiés et résoudre les dysfonctionnements mis en évidence par le diagnostic.
- Phase 3 : programme d'actions détaillé par secteur géographique pour mettre en œuvre de manière opérationnelle les orientations et les objectifs.

Le Plan des Mobilités (anciennement Plan des Déplacements Urbains – PDU)

est une démarche de planification sur 10 ans, qui impose une coordination entre tous les acteurs concernés, pour élaborer un projet global en matière d'aménagement des infrastructures de déplacements et de développement des mobilités sur le territoire. Cette politique fournit plus largement un cadre afin de favoriser un développement maîtrisé des déplacements urbains, périurbains, et ruraux du territoire, et des déplacements intercommunaux sur l'aire urbaine en général. Le projet de PDM de la Métropole Rouen Normandie a été arrêté en juin 2013 par le conseil communautaire, et approuvé le 15 décembre 2014. Un nouveau PDM est en cours d'élaboration depuis 2021 et son approbation est envisagée pour le premier semestre 2024.

Le cycle de l'eau

Le **Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Seine Normandie**, a été élaboré par le comité de bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands et approuvé par le Préfet coordonnateur de bassin en 2020 pour la période 2022-2027. Il joue un rôle important dans la prise de conscience collective des enjeux environnementaux et vise à la restauration et à la continuité du cycle de l'eau, à l'infiltration des eaux pluviales, ou bien au rétablissement des continuités écologiques (ADAGE Environnement, 2020, p.180).

La Métropole Rouen Normandie est concernée par deux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) :

-SAGE des 6 vallées.

-SAGE Cailly-Aubette-Robec.

La gestion des risques naturels

Le **Plan de Prévention des Risques (PPR)**, élaboré par les services de l'Etat sous l'autorité du préfet de département, est un document établi en concertation avec les collectivités locales, qui régit l'utilisation des sols exposés à des risques naturels (PPRn) ou technologiques (PPRt⁴). Il vise la réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens à travers la maîtrise des constructions dans les zones exposées à un ou plusieurs risques, mais aussi dans celles qui ne sont pas directement exposées et où des aménagements pourraient les aggraver.

Comme le PPR, le **Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI)** est issu de la loi du 2 février 1995. Il délimite les zones d'exposition aux risques d'inondation dans lesquelles il régit les possibilités de construction ou d'aménagement. Il participe à la réduction de la vulnérabilité en délimitant des mesures de prévention, de protection ou de sauvegarde des biens existants. La Métropole Rouen Normandie est concernée par cinq PPRI : Vallée de la Seine - Boucles de Rouen, Vallée de la Seine-Boucles d'Elbeuf, bassin versant de la Rançon et de la Fontenelle, bassin versant de l'Austreberthe et du Saffimbec, bassin versant du Cailly, de l'Aubette et du Robec (MRN, PLU, 2020c, TOME 2. Etat initial de l'environnement).

Le développement durable

Les objectifs à moyen et à long termes en matière d'aménagement du territoire et de lutte contre le changement climatique sont fixés au niveau régional dans le **Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET)** et retranscrits au sein des règlements locaux, via notamment le Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET).

Le **PCAET** constitue un projet de développement durable qui vise à définir des objectifs stratégiques et opérationnels en matière d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, de consommation d'énergie et de production d'énergies renouvelables, et de lutte contre la pollution de l'air. Le PCAET doit prendre en compte le schéma de cohérence territoriale (SCoT), et être pris en compte par le plan local d'urbanisme (PLU). Le PCAET de la Métropole Rouen Normandie a été adopté en décembre 2019. Ces objectifs de développement durables sont également présents au sein du PLUi qui détermine les conditions d'un aménagement du territoire respectueux des principes du développement durable en répondant aux besoins de développement local.

Au cœur du PLUi, se trouve le **Projet d'Aménagement et de Développement Durables (PADD)**, qui définit les grands principes d'urbanisme et d'aménagement promus par les décideurs locaux afin de protéger l'environnement et d'améliorer le cadre de vie, de favoriser le renouvellement urbain et la qualité urbaine et architecturale des projets d'aménagements. Les **Orientations d'Aménagement et de programmation (OAP)**, qui représentent les dispositifs d'urbanisme opérationnels, peuvent également définir les actions nécessaires pour mettre en valeur l'environnement, notamment les continuités écologiques, les paysages, les entrées de villes et le patrimoine (MRN, PLU, 2020d).

⁴ La loi du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement a institué les plans de prévention des risques naturels. Elle est retranscrite dans les articles L.562-1 à L.562-9 du code de l'environnement.



Encadré n° 1 :

Organisation de la prévention et de la gestion du risque d'inondation sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie

Pour l'évaluation et la gestion des risques d'inondation, les outils d'urbanisme suivent la directive européenne 2007/60/CE du 23 octobre 2007, dite directive inondation, dont l'objectif concerne la réduction des conséquences négatives pour la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique des inondations provoquées par le débordement de cours d'eau, la remontée de nappes phréatiques, le ruissellement agricole et urbain, mais aussi la submersion marine. La directive prévoit la concertation entre les parties prenantes du bassin concerné, notamment les services de l'Etat, les élus, les associations d'habitants ou professionnelles, etc. La mise en œuvre se décompose en plusieurs étapes. D'abord, l'Évaluation Préliminaire des Risques d'Inondation (EPRI), qui, à l'échelle du district hydrographique Seine-Normandie, décrit les inondations passées et en évalue les conséquences négatives. L'EPRI concernant le bassin Seine-Normandie a été arrêté en décembre 2011 par les préfets. À la suite de l'EPRI, en 2012, sont identifiés les Territoires à Risque Important d'Inondation (TRI), c'est-à-dire des territoires présentant d'importants enjeux et fortement exposés aux aléas d'inondation. Les TRI comprennent une cartographie des aléas et des enjeux et identifie trois scénarios cartographiés en fonction de leur probabilité, faible, moyenne et forte, et l'élaboration de stratégies de gestion du risque inondation à différentes échelles, en référence à la Stratégie nationale de gestion du risque d'inondation (SNGRI), approuvée en 2014.

Puis, le Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) du bassin Seine-Normandie, élaboré par la DRIEE Île-de-France pour la période 2016-2021, définit les objectifs à l'échelle des districts hydrographiques pour réduire les

conséquences négatives des inondations sur la santé humaine, sur l'environnement, sur le patrimoine culturel et l'économie, ainsi que les mesures à mettre en œuvre pour les atteindre. Le PGRI donne un cadre aux politiques locales de gestion des risques d'inondation en combinant les actions de réduction de la vulnérabilité, de gestion de l'aléa, de gestion de crise, de gouvernance et le développement de la culture du risque. Le SCOT de la Métropole doit notamment être compatible avec les orientations et les objectifs du PGRI car certaines de ses dispositions demandent l'encadrement des constructions en zones inondables, et ont donc une incidence directe sur les documents de planification urbaine et la manière de construire en zone inondable.

En continuité avec le SNGRI et les démarches précédentes, la Stratégie locale de gestion du risque d'inondation (SLGRI) vise à atteindre sur le périmètre du TRI, les objectifs de réduction des conséquences négatives des inondations. Les périmètres, les objectifs principaux des stratégies locales ainsi que leur délai d'élaboration ont été arrêtés par les préfets coordonnateurs de bassin en 2014.

Le Programme d'Actions de Préventions contre les Inondations (PAPI) Rouen Louviers Austreberthe, débuté en 2019, a pour objectif de promouvoir une gestion intégrée des risques d'inondation en vue de réduire leurs conséquences dommageables sur la santé humaine, les biens, les activités économiques et l'environnement. Le PAPI permet aux collectivités locales d'élaborer un programme d'étude préalable (PEP), afin d'obtenir un diagnostic, de définir une stratégie et d'élaborer un programme d'actions qui seront mis ensuite en œuvre.

Une urbanisation galopante accentuant la vulnérabilité du territoire au changement climatique

L'impact du changement climatique sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie est accentué, en partie, par des activités humaines et notamment par des politiques favorisant l'expansion urbaine. Ce processus transforme des espaces naturels des campagnes et des forêts en zones bâties, très (trop) souvent artificialisées. Cette diminution, voire cette disparition de secteurs entiers d'espaces de pleine terre (avec ses qualités

de rétention d'eau, de réserve de la biodiversité...) et de parcelles dédiées à l'agriculture a une incidence forte sur le territoire. En plus de la disparition de ces terres naturelles, l'imperméabilisation des surfaces au sol dans les zones urbaines accentue certains phénomènes renforcés par le changement climatique, comme les risques d'inondation et les îlots de chaleur urbains. Le contrôle de l'étalement urbain sur le territoire agricole consti-

tue un objectif de la planification urbaine, au moins depuis la loi relative à la solidarité et au renouvellement urbains (SRU) votée le 13 décembre 2000. Plus récemment, la loi Climat et résilience de 2021 instaure l'objectif de la zéro artificialisation nette (ZAN), qui constitue un pas important vers l'arrêt de l'étalement urbain.

Encadré n°2 :

Causes et effets de l'étalement urbain sur le sol national.

L'étalement urbain n'est pas un phénomène nouveau, et dans l'histoire européenne, les villes ont fait face aux croissances successives et aux reculs progressifs de leurs faubourgs. En effet, les différents exodes ruraux dans l'histoire antique ou médiévale ont marqué les villes avec des nouvelles fortifications ou routes, mais l'équilibre entre la ville et la campagne a toujours été maintenu grâce ou à cause des invasions, des épidémies, de nouvelles centralités de pouvoirs etc.

Les premières croissances significatives urbaines des villes (en Europe) ont lieu fin XVIIIe et début XIXe, dès le début de l'ère industrielle : l'attractivité des villes (travail, essor économique...) et l'exode rural génèrent une arrivée massive de population à loger. Des quartiers entiers sont ajoutés aux centres-villes parfois sous l'impulsion du privé (afin de loger les travailleurs des entreprises) et du public.

Ces extensions urbaines favorisant l'industrialisation mais dépourvues de qualités hygiéniques et sociales seront critiquées par un mouvement réformateur qui, en nom de l'hygiénisme et du principe de desserrement des tissus des villes, proposera des modèles urbains alternatifs, comme les cités jardins et plus tard les quartiers du modernisme architectural.

Certaines croissances urbaines ont également d'autres origines plus modernes au XXe siècle : reconstruction après la Seconde Guerre mondiale, « baby-boom », le début des premiers congés payés, la démocratisation de la voiture et le développement de la société de consommation ont entraîné une augmentation des complexes touristiques et des résidences secondaires principalement localisés sur les lieux de villégiature.

Cependant, le phénomène de l'étalement urbain actuel a une incidence plus profonde sur le territoire par son ampleur et sa relative soudaineté, mais surtout car, contrairement aux précédentes croissances citadines, il est le produit de millions d'actes d'urbanisme personnels sans cohérence générale, sans structure d'espaces publics, ni centralité. Cette « soudaine » mutation urbaine impose aux services publics (accessibilité, réseaux de télécommunications, d'eau, d'électricité, d'assainissement, de chaleur, etc.) le rythme des transformations

(agrandissements ou démolitions des infrastructures, équipements ou réseaux publics), les obligeant à additionner au coup par coup ces travaux de viabilisation, sans possible recul sur un fonctionnement global. L'habitat, les usages, les mobilités, les infrastructures, le mode de vie, autant de domaines de la société qui ont été durablement marqués par l'étalement urbain...

L'étalement urbain contemporain résulte principalement de plusieurs causes :

- Les prix bas des énergies et la massification de la voiture individuelle (favorisé par une politique nationale industrielle misant sur le développement de l'automobile)
- L'augmentation de la corrélation entre le confort de l'habitat (plus de m² / habitant) et le niveau des revenus.
- L'attractivité d'une forme de vie « rêvée » promue par le mode de vie américain : la maison individuelle.
- Le pavillon neuf sur un terrain vierge de construction le long d'une voie de desserte reste le logement le moins cher en m² habitable pour les futurs propriétaires et les lotisseurs (mais pas pour la société civile).
- Les dynamiques régionales ou nationales avec l'implantation d'équipements en pleine campagne comme certaines gares TGV, des nouvelles infrastructures (autoroutes...), le développement de mobilités, des universités, une nouvelle unité de production de multinationale, un centre commercial, de loisirs...

Ce phénomène a pour principales conséquences d'augmenter les frais de déplacements qui maintiendront les habitants au bord d'une dépendance économique (par exemple, utilisation de la voiture en milieu rural où la desserte en transports en commun est moindre), et *in fine* d'augmenter les coûts de fonctionnement pour la société civile. Ceux-ci se retranscrivent au niveau de l'accès aux services publics (transports en commun, voiries, réseaux d'assainissement, d'eau, d'électricité, de télécommunications, construction de nouveaux équipements publics comme des hôpitaux, des écoles, etc.), et sur le morcellement des espaces naturels (baisse de la biodiversité, grignotage des terres agricoles et artificialisation des terres, augmentation des risques inondations, etc.).

L'étalement urbain dans la Métropole Rouen Normandie

Les études préalables au PLU de la Métropole Rouen Normandie ont montré qu'entre 1999 et 2015, 2,3% du territoire métropolitain a été urbanisé, ce qui représente la disparition d'environ 1 550 hectares d'espaces naturels, agricoles et forestiers, soit 97 hectares en moyenne par an (MRN, PLU, 2020a, p. 245 – Figure 4). La part consacrée à l'habitat a été la plus forte (56%), tandis que les espaces pour les équipements et pour les infrastructures routières, d'un côté, et les activités économiques de l'autre, représentent respectivement 15,5% et 20,5% (MRN, PLU, 2020a, p. 247).

L'impact des règlements sur l'aménagement et sur la relative mutabilité des espaces agricoles est plus logiquement marqué dans les communes rurales et périurbaines situées sur les plateaux agricoles. Dans les bourgs et villages de ces zones, les nouveaux lotissements sont établis en continuité avec le tissu bâti existant le long de la voirie principale, comme dans la commune de Bonsecours située sur le plateau Est, ou dans la commune de Duclair, située à l'Ouest de Rouen et de

manière plus prononcée sur d'autres communes situées sur le plateau au Nord, comme Isneauville (voir Annexes).

La tendance des villes à s'étaler sur la campagne résulte de la combinaison de phénomènes économiques et sociaux successifs (voir encadré n°2) qui ont contribué à façonner le paysage et la structure du territoire métropolitain contemporain. La propension culturelle et économique actuelle à habiter en milieu rural, la disponibilité des moyens de transport individuels, la construction d'un vaste réseau routier, la disponibilité de politiques fiscales adéquates, et la localisation extra urbaine des plateformes logistiques et des centres commerciaux constituent autant de facteurs qui expliquent la structuration du territoire contemporain, générant une progression de l'urbanisation à la campagne. De plus, ces installations, construites en périphérie des villes et souvent à proximité d'axes routiers structurants, participent à l'attractivité des territoires voisins. Les villes de Tourville-la-Rivière, Isneauville, Franqueville-

Saint-Pierre, sont symboliques de ce type d'urbanisation pour des usages commerciaux qui représentent plus de 12% de surface urbanisée en 16 ans dans la Métropole (Figure 5). En outre, ces secteurs aménagés imperméabilisent de grandes surfaces de terre naturelle avec, non seulement la construction disparate de locaux, mais également avec des surfaces bitumées pour répondre à leurs exigences de fonctionnement : accès routiers multiples, zones de manœuvre, stationnements... Cette urbanisation galopante s'est donc accompagnée d'un usage prépondérant de l'automobile qui, outre ses conséquences sur la qualité de l'air, représente aussi la deuxième plus importante source émettrice de gaz à effet de serre sur le territoire de la Métropole après le secteur industriel, avec environ un tiers du total des émissions en 2019⁵.

Au-delà des enjeux qu'il représente pour l'adaptation du territoire au changement climatique via l'infiltration des pluies, la lutte contre les îlots de chaleur, les ruissellements et les inondations, et les sécheresses, le contrôle de l'étalement urbain représente donc aussi un enjeu majeur pour l'atténuation du changement climatique, les sols de pleine terre étant des puits de carbone naturels.

⁵ Sources : ORECAN – Atmo Normandie – Inventaire version 3.2.8 et ORECAN – Biomasse Normandie – version 12_21 (Transport routier) – Biomasse Normandie – version v1.0 (Transport non routier) – Biomasse Normandie – version 09.19 (Séquestration Carbone) – Format de rapportage PCAET ORECAN

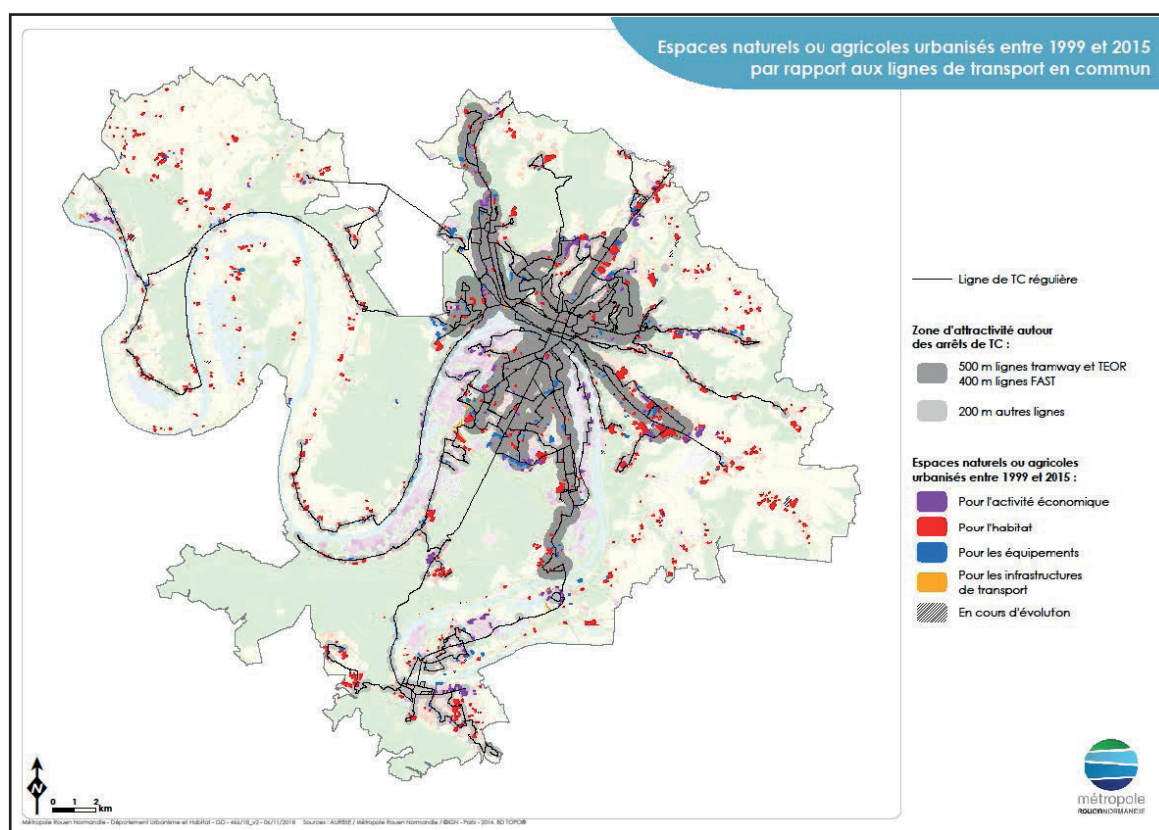


FIGURE 4 : Évolution de l'étalement urbain selon les usages entre 1999 et 2015, dans la Métropole Rouen Normandie. Source : PLU (2020). RP, Tome 1, Diagnostic territorial, p. 256



FIGURE 5 : Photos-aériennes illustrant l'évolution entre 1950 et 2020 de l'urbanisation de la ville de Tourville-la-Rivière, située au Sud de la Rouen, entre la Seine et l'autoroute A15, in <https://remonterletemps.ign.fr>.

Les enjeux et les conséquences de l'étalement urbain vis-à-vis du changement climatique

L'étalement urbain et l'artificialisation des sols aggravent directement ou indirectement plusieurs effets du changement climatique sur le territoire et ses habitants. L'effet direct de cette urbanisation est la destruction des espaces naturels jouant un rôle important pour l'environnement et le bien-être de la population (production de bois et d'oxygène, cultures, séquestration carbone, zone tampon inondable, zone de calme et de fraîcheur, aménités environnementales, patrimoine naturel et culturel, etc.). Une fois ces bénéfices environnementaux dégradés ou perdus, la régulation des manifestations les plus extrêmes du changement climatique (canicule, sécheresse, incendie, inondation, tempêtes, etc.) s'avère beaucoup plus difficile. Pour exemple, l'urbanisation du lit majeur de la Seine sur l'ensemble de la Métropole de Rouen a entraîné une perte de prairies inondables et de zones humides, ainsi que des problèmes de gestion des eaux pluviales et des risques d'inondations par débordement (MRN, PLU, 2020b, p. 7, 145). Dans les cas de phénomènes météorologiques importants ou exceptionnels (tempêtes, grêles,

pluie intense, etc.), l'absence de ces prairies inondables régulatrices ne permet plus de contenir l'élévation du niveau du fleuve et les débordements sur l'espace public. D'autre part, l'artificialisation entraîne l'imperméabilisation des terres qui réduit, voire annule la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol avec pour conséquences directes la réduction de la recharge des nappes phréatiques et le renvoi systématique des eaux dans les réseaux d'assainissement provoquant leur surcharge, voire leur saturation, et accentuant en conséquence les inondations.

Enfin, l'imperméabilisation coupe aussi les différents couloirs écologiques de surface, les trames vertes, bleues, et brunes, qui assurent la préservation de la biodiversité sur le territoire. Celle-ci s'en trouve appauvrie aussi bien sur les plateaux que sur les rives et berges des cours d'eau. Cette fragmentation des habitats, premier facteur d'érosion de la biodiversité (cf synthèse du GIEC Local sur cette thématique), nuit à la faune et à la flore locale et les fragilise face à l'évolution du changement climatique et des événements extrêmes.

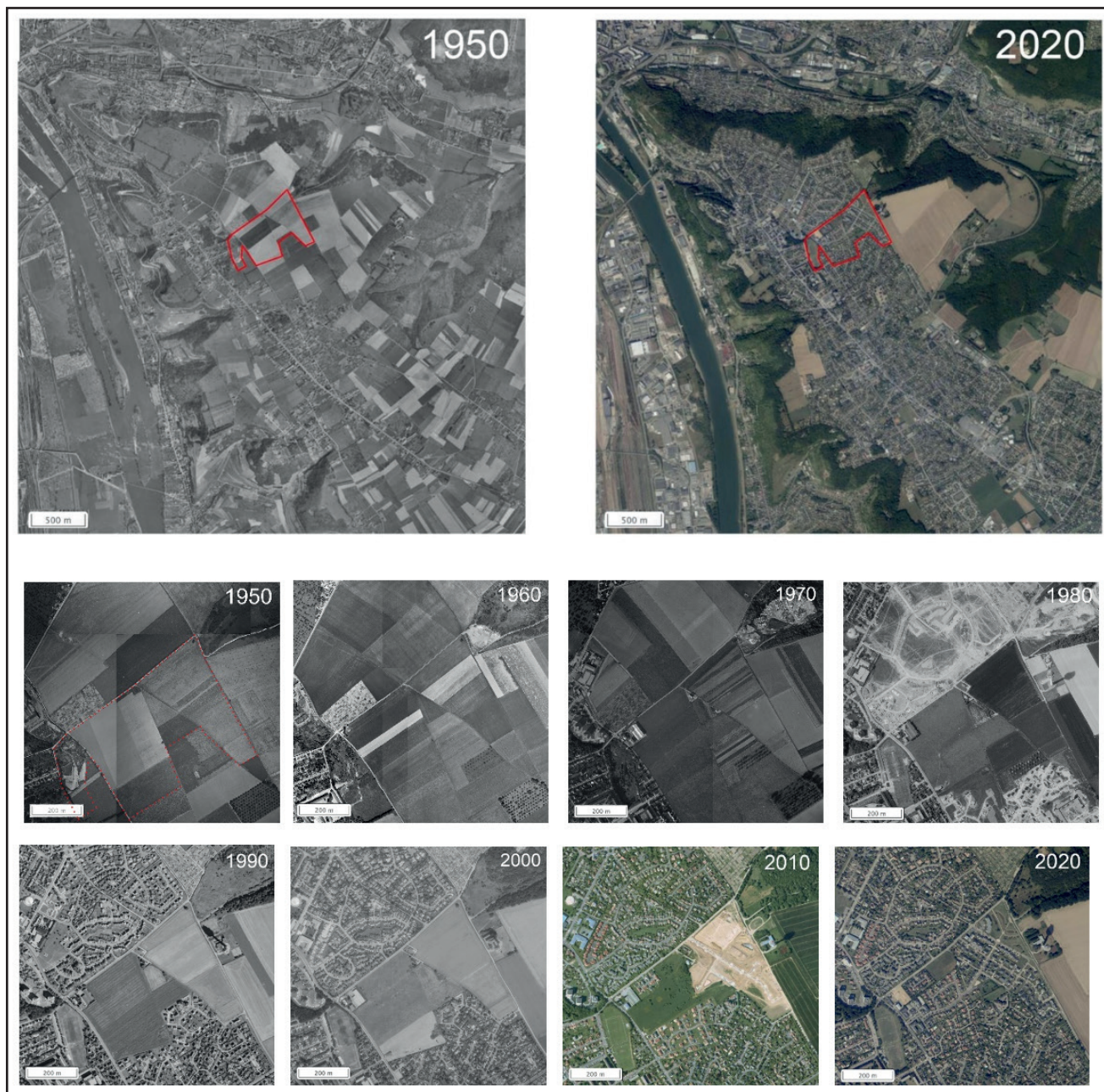
Encadré n°3

Des pistes de réflexion pour limiter l'étalement urbain peuvent être alors posées :

- Démystifier la densité urbaine à travers des débats publics, présenter différents modèles urbains denses et montrer que la densité urbaine n'est pas systématiquement synonyme d'immeuble hauts ;
- Tenir compte de la demande réelle de maisons individuelles, et du besoin de proposer de nouvelles typologies de lotissements denses et qualitatifs afin de diversifier l'offre d'habitat ;
- Recréer des centralités économiques, sociales et identitaires propres aux territoires périurbains ;
- Aménager sur les terrains résiduels, les espaces enclavés de manière radioconcentrique et non plus linéaire (le long des voies) ;
- Stabiliser du front urbain et introduire des formes de transition douce de la « ligne de contact » souvent chaotique, entre urbanisation et espaces naturels : aménagement de « zones tampons » ;
- Etablir des quotas de permis de construire sur certains hameaux ;
- Faire des réserves publiques de terrains ;
- Rendre indispensable l'intervention des professionnels avec une vision globale et pluridisciplinaire de l'aménagement dès la conception initiale en associant les urbanistes, les paysagistes, les architectes mais aussi des écologues et des hydrologues etc., et ne pas se limiter aux acteurs de la construction tels que les aménageurs ou les promoteurs (à établir travers des OAP, ou des cahiers des charges, ou à travers des permis d'aménager...) ;
- Maîtriser les prix de sortie sur les logements en régénération urbaine afin de proposer une alternative ;
- Répartir plus efficacement la croissance économique sur les territoires ;
- Encadrer et faciliter le processus de division parcellaire.

Annexes : Évolution de l'étalement urbain dans plusieurs secteurs géographiques de la Métropole Rouen Normandie

Plateau Est, aux environs des communes de Bonsecours et de Le Mesnil-Esnard



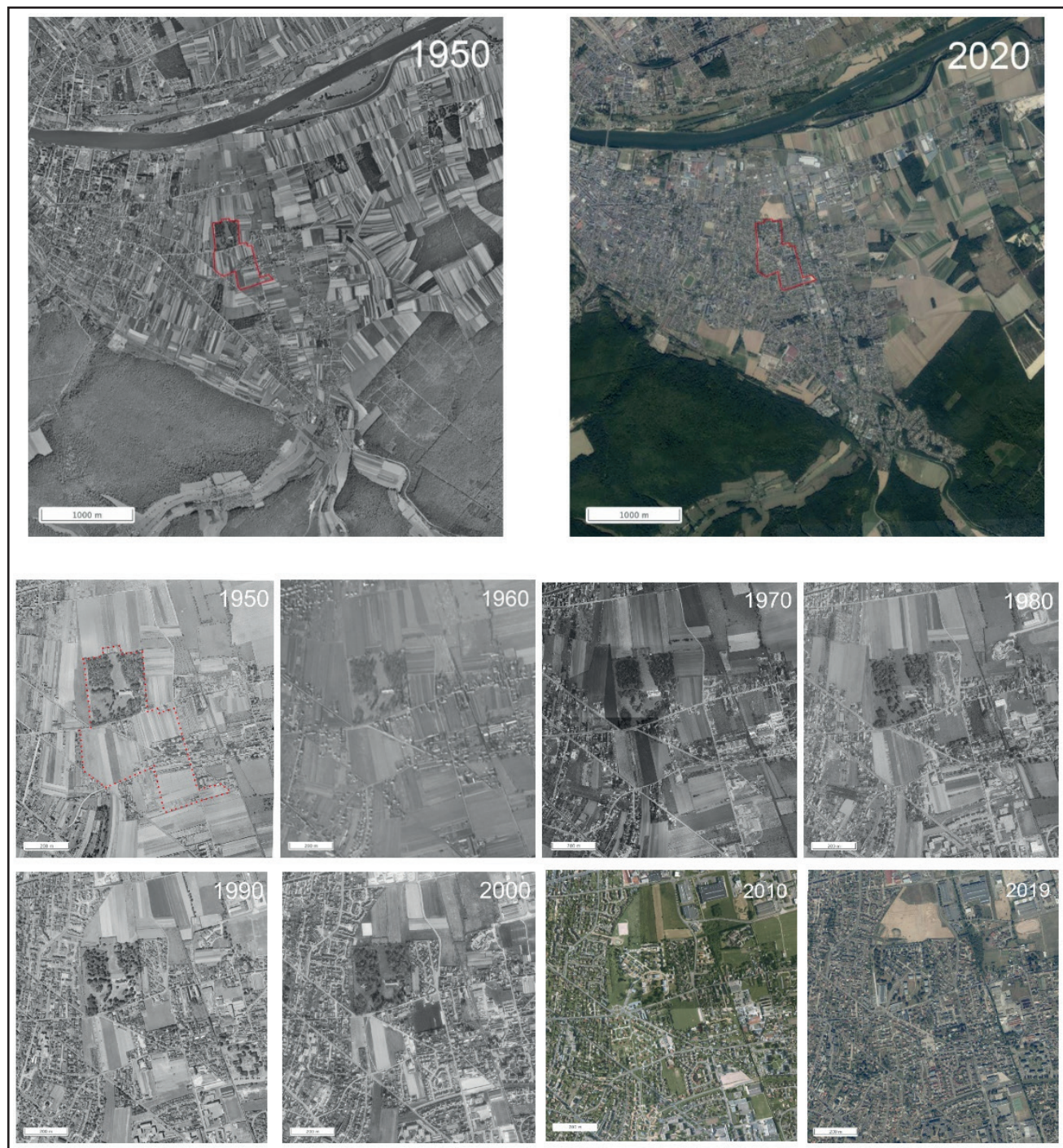
Évolution de l'étalement urbain autour des communes de Bonsecours et de Le Mesnil-Esnard, situées sur le plateau est, entre 1950 et 2020. – Source : Institut National de l'information géographique et forestière, <https://remonterletemps.ign.fr>, 2021.

Plateau Nord, autour de la commune de Houpeville



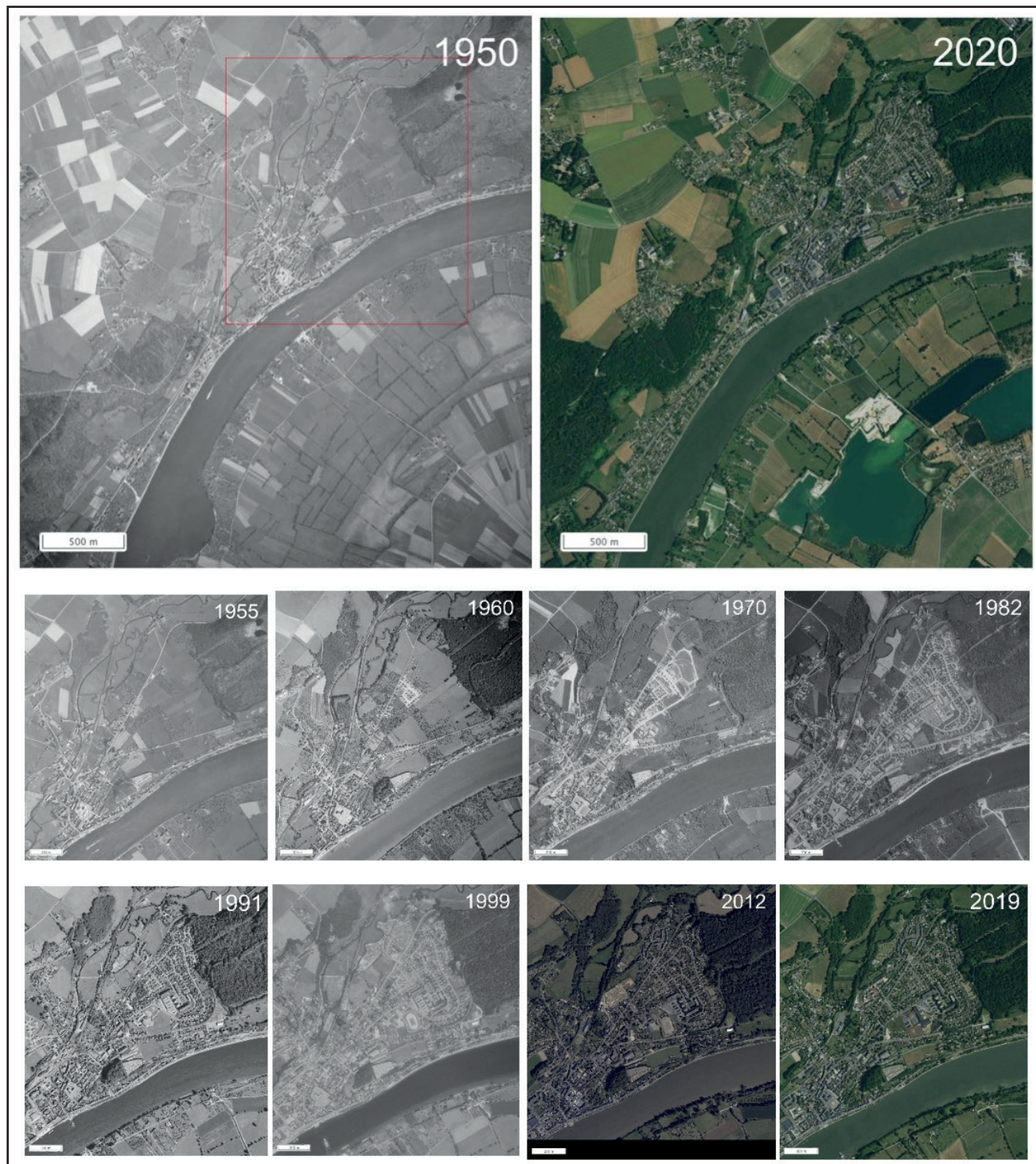
Évolution de l'étalement urbain autour de la commune de Houpeville, située sur le plateau nord, entre 1950 et 2020. – Source : Institut National de l'information géographique et forestière, <https://remonterletemps.ign.fr>, 2021.

Au sud de la Métropole, vers l'agglomération d'Elbeuf



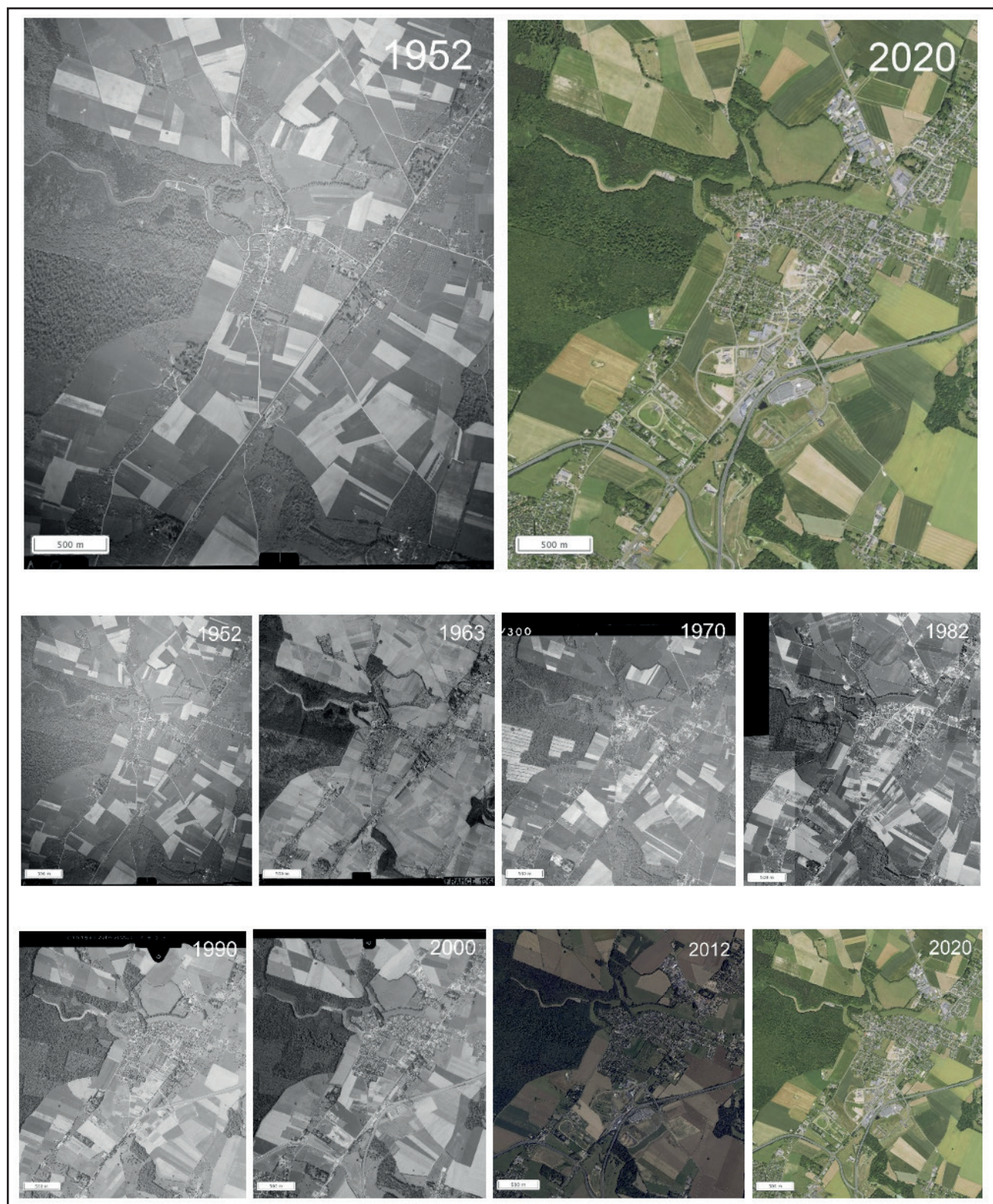
Évolution de l'étalement urbain autour de l'agglomération d'Elbeuf, située au sud de Rouen, entre 1950 et 2020. – Source : Institut National de l'information géographique et forestière, <https://remonterletemps.ign.fr>, 2021.

À l'ouest de la Métropole, à Duclair



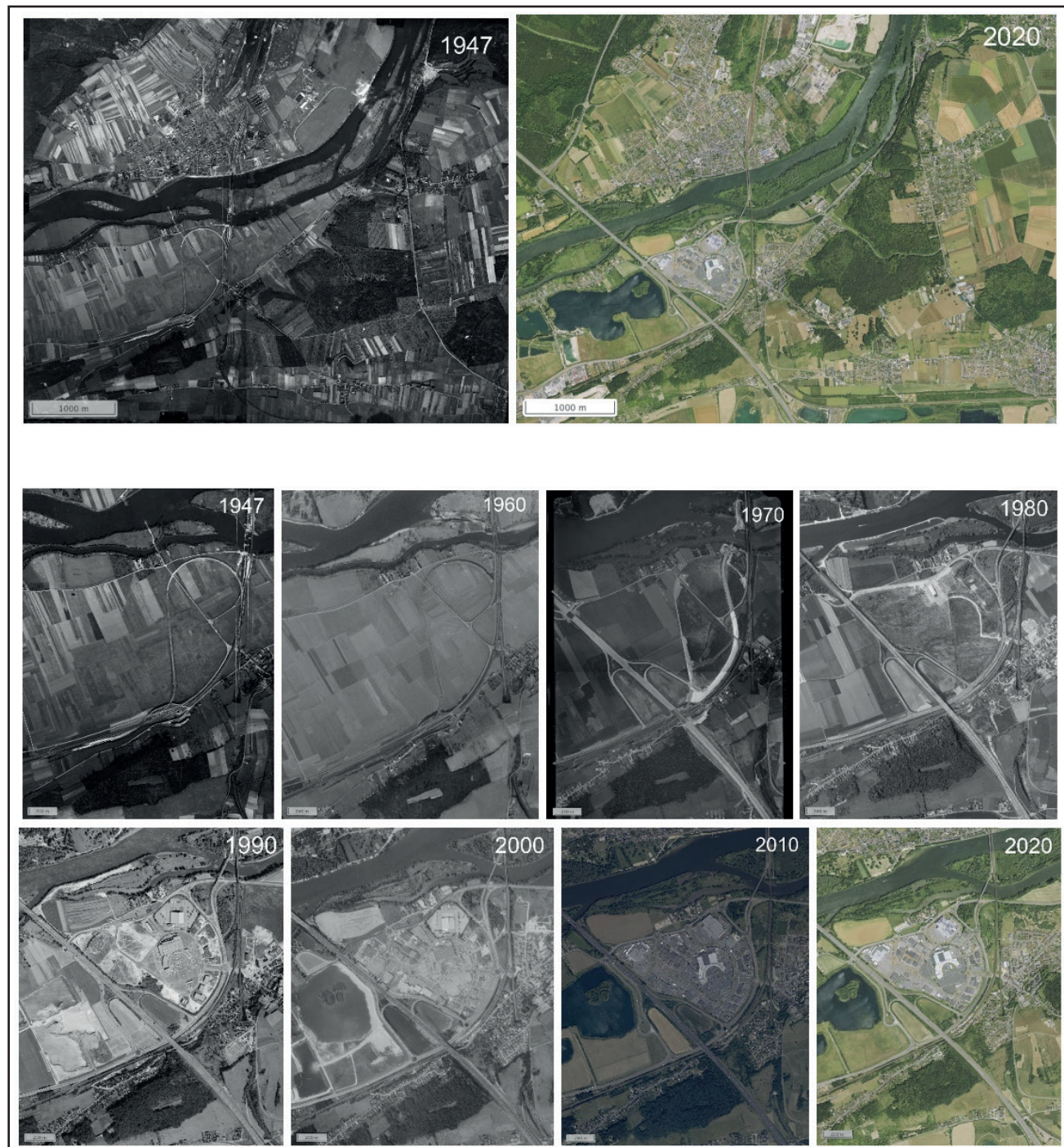
Évolution de l'étalement urbain de la commune de Duclair, située à l'ouest de la Métropole Rouen Normandie, entre 1950 et 2020. – Source : Institut National de l'information géographique et forestière, <https://remonterletemps.ign.fr>, 2021.

Au nord-est de Rouen, vers Isneauville



Évolution de l'étalement urbain dans la commune d'Isneauville, située au nord-est de Rouen, entre 1952 et 2020. –
Source : Institut National de l'information géographique et forestière, <https://remonterletemps.ign.fr>, 2021.

Au sud de Rouen, à Tourville-la-Rivière



Évolution de l'étalement urbain de la commune de Tourville-la-Rivière, située au sud de Rouen, entre 1947 et 2020. – Source : Institut National de l'information géographique et forestière, <https://remonterletemps.ign.fr>, 2021.

L'îlot de chaleur urbain

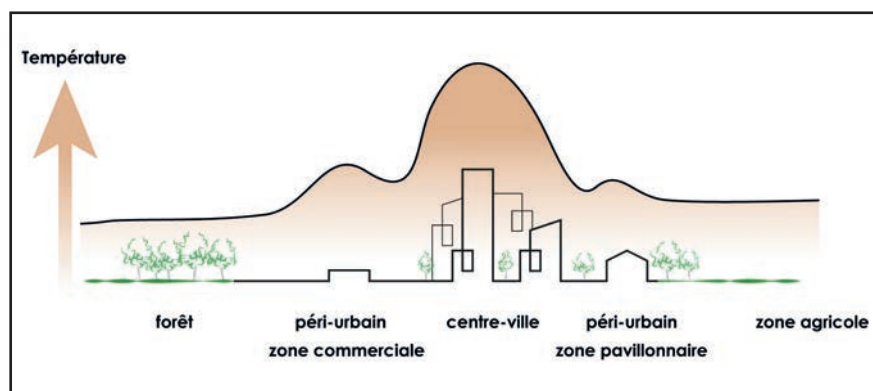


FIGURE 6 : Schéma simplifié de l'îlot de chaleur urbain – Source : Illustration de Céline Fréchet

L'évolution des températures atmosphériques ces dernières années témoigne d'une tendance à l'augmentation de la fréquence des étés chauds et des périodes caniculaires (Laignel et Nouaceur, 2018). Cette tendance sera accompagnée dans les prochaines décennies par une différence thermique plus grande entre les villes, les zones périurbaines et les milieux ruraux. Il s'agit d'un phénomène typique des agglomérations qui se nomme **“îlot de chaleur urbain”** (Cantat, 2004 ; Laignel et Nouaceur, 2018 ; Préfet de la région Normandie, 2020a, Terrin et al., 2015) (Figure 6). Ce phénomène est en étroite relation avec la concentration des activités humaines dans les zones urbaines dont les caractéristiques physiques amplifient la sévérité des épisodes caniculaires, et se caractérise par un écart de température pouvant s'élever de 2°C à 4°C entre les centres d'agglomération, généralement dense, la périphérie, et la campagne (Terrin et al., 2015). Cette différence s'explique selon plusieurs paramètres et leurs différentes combinaisons, dont les principales sont les formes urbaines (orientations, volumes...), le comportement des matériaux des constructions sur l'espace public, le jour et la nuit, l'absence ou rareté de végétation ou d'eau libre permettant le rafraîchissement de l'air, et les émissions de chaleur anthropiques (issues de la climatisation par exemple).

Le phénomène des îlots de chaleur est particulièrement présent dans un environnement où le rafraîchissement nocturne ne peut se faire (rayonnement des matériaux, pollution...). Ainsi chaque matin de l'épisode caniculaire présente une température plus élevée que la veille, qui sera à son tour alimentée par la chaleur journalière et ainsi de suite, amplifiant chaque jour le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

L'îlot de chaleur urbain implique un inconfort et des risques sanitaires accrus en raison des très fortes chaleurs qui règnent le jour, et surtout des nuits qui demeurent étouffantes et qui ne permettent pas à certains citoyens de bénéficier d'une récupération physiologique suffisante et de bonne qualité (Laignel et Nouaceur, 2018 ; Ladner et al., 2020). Plus largement, les fortes chaleurs dégradent l'état de santé des populations jusqu'à provoquer des décès prématurés. À titre d'exemple, la canicule de 2003 aurait engendré une surmortalité de 35% à Rouen (INVS, 2003 ; INVS, 2004 ; Besancenot, 2004). Selon Santé Publique France, les canicules de 2019 et 2020 ont également provoqué une surmortalité respectivement de 9,6% et de 27,8% en Seine-Maritime⁶. Avec le changement climatique, ce phénomène se renforce en ville et implique donc des enjeux sanitaires majeurs.

⁶ Bulletin de Santé Publique France sur les étés 2019 et 2020 en Normandie.

Encadré n°4

Rappel de deux principes physiques pour la compréhension de ce chapitre

1- L'albédo est la capacité d'un objet, d'une surface, d'un corps de quelconque nature à renvoyer l'énergie solaire qui lui parvient. Elle correspond au rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie reçue et s'exprime entre 0 pour une surface qui absorberait entièrement les rayonnements sans réflexion (un « corps noir »), et 1 pour une surface qui réfléchirait 100 % de l'énergie. Les matériaux utilisés pour le revêtement de la voirie, comme l'asphalte ou un revêtement contenant du bitume, ont un albédo proche de 0, respectivement à 0,07 et 0,18, représentant leur haut niveau d'absorption de la chaleur. En revanche, les pelouses, ayant un albédo plus élevé, proche de 0,3, accumulent moins la chaleur en la réfléchissant davantage, et participent donc au rafraîchissement de leur environnement. L'albédo dépend aussi de la couleur et de la rugosité des matériaux. Les matériaux de couleurs claires et lisses, comme le marbre ou le calcaire, réfléchissent davantage le rayonnement solaire et ont tendance à avoir un albédo plus élevé que les matériaux aux couleurs foncées et rugueux comme l'asphalte (Perrin G., 2020, p. 79, Terrin et al., 2015). L'albédo moyen des villes européennes est de 0,15 à 0,30. Une augmentation de l'albédo de 0,20 à 0,45 permettrait de réduire la température jusqu'à 4 °C, les journées estivales particulièrement chaudes.

2 - L'inertie thermique mesure la capacité d'un matériau à accumuler puis à restituer un flux thermique dans un temps plus ou moins long (Perrin G., 2020, p. 79).

Ces deux principes physiques décrivent comment les matériaux urbains réagissent par rapport à l'énergie reçue. Le phénomène d'îlots de chaleur est accentué selon la **combinaison de l'inertie thermique et de l'albédo d'un matériau utilisé**. Celui-ci emmagasine de la chaleur la journée, et la libère dès que la température baisse, la nuit. Au matin les matériaux libèrent encore de la chaleur et la chaleur de la journée suivante vient de nouveau s'emmagasiner...

Les facteurs qui influencent le climat urbain

Plusieurs facteurs jouent donc un rôle important dans l'apparition et la sévérité de ce phénomène. Ils renvoient notamment à la morphologie de la ville, son contexte géographique, mais aussi la présence de la végétation et de l'eau, ainsi que des matériaux des espaces publics et du bâti.

Les formes urbaines

La morphologie du territoire a un impact important sur son climat. La modification de la topographie et des couvertures végétales, la modification des cours d'eau, la construction de volumes bâtis et leurs concentrations dans des villes, l'artificialisation des sols et son imperméabilisation constituent des facteurs qui participent à l'altération du climat local.

Les différences de rugosité peuvent amener à la formation de microclimats très différents. La rugosité peut être identifiée à plusieurs échelles : celle du territoire, dans la complexité

de ses reliefs ; celle d'une ville, dans la diversité de ses formes urbaines et de l'irrégularité de sa végétation ; et aussi celle du bâtiment, par le choix de sa forme et de sa matérialité. Ces différentes formes et échelles de la rugosité des surfaces ont un effet sur le flux d'air, qui va être accéléré, freiné, voire bloqué (Figure 7). La comparaison des températures des villes de Rouen et du Havre durant la canicule de 2003 montre les effets des différentes conditions géographiques et de formes urbaines. Si la ville de Rouen, plus dense, a constaté une augmentation de 3°C, celle du Havre, moins dense et traversée par des grandes artères routières qui permet aux vents dominants venus de la mer de s'engouffrer, de disperser la pollution et de rafraîchir les espaces publics, a vu une augmentation de 2°C (MRN, PCAET, 2019a., p. 54)⁷.

À l'échelle de la Métropole Rouen Normandie, les formes (tissus) urbaines côtoient les

forêts, les champs agricoles, les zones industrielles, etc. Chacune de ces zones influence la zone voisine générant ainsi autant de variation de températures ressenties. Quant à la structure urbaine du territoire, plusieurs formes se distinguent (Figure 8) : **le centre-ville historique, les grands ensembles, les zones industrielles et commerciales, les nouvelles centralités urbaines, et les zones d'habitat pavillonnaire**. Chaque forme urbaine a un effet sur la circulation des masses d'air et sur la température au sol. Au sein de Rouen, les différentes formes urbaines ont un impact sur les températures ressenties (présence de végétation, hauteurs des bâtiments, matériaux de l'espace public, orientation des constructions). Par exemple, les températures ressenties le même jour et à la même heure à Saint-Sever sont différentes que celles ressenties au centre-ville historique, ou encore dans la zone pavillonnaire du Boulvingrin.

⁷ Il est à noter que cette organisation urbaine peut avoir des avantages lors des épisodes caniculaires, mais peut également générer de l'inconfort durant les périodes hivernales.

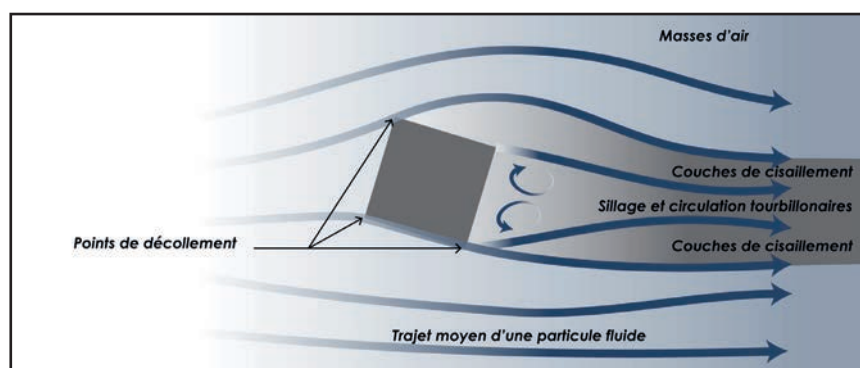


FIGURE 7 : Effets de distorsion des flux d'air dû à la présence d'un objet – Source : illustration de Céline Fréchet.

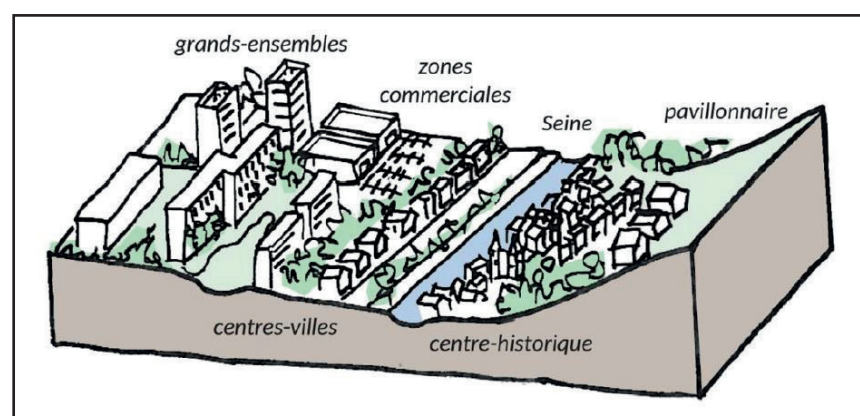


FIGURE 8 : Schéma des grands principes de la structure urbaine de l'hypercentre de la ville de Rouen – Source : illustration de Céline Fréchet

Le tissu historique bénéficie d'une orientation prévalente Est-Ouest qui permet à l'air de circuler via les rues, et d'être à l'ombre en été (Figure 9). Ses rues plutôt étroites, tout comme les petites courettes à l'intérieur des îlots, créent des ombres portées qui diminuent l'apport de chaleur et les bâtiments historiques, généralement avec des matériaux naturels (bois, torchis, brique, pierre...) dont l'albédo et l'inertie thermique est peu importante, accompagnent cette composition (voir encadré n°4 et Figure 10). De plus, les voies de circulation sont composées de pavés naturels clairs, non jointoyés et parfois enherbés qui complètent cette composition d'ensemble⁸. Cependant, le remplacement progressif des matériaux de revêtement de l'espace public avec des matériaux plus contemporain (bitume, béton, dalles...), à la place de pavés non jointoyés ou enherbés, même dans le centre-ville rouennais peut rapidement modérer les bénéfices des constructions historiques.

Dans les nouvelles centralités, la volumétrie urbaine peut aussi former des canyons urbains se caractérisant par des rues proportionnellement étroites par rapport à la hauteur des bâtiments, exposés aux rayonnements, avec des fronts bâtis ininterrompus. Cette forme peut piéger les rayonnements solaires et infra-rouges, et les renvoyer plusieurs fois par ricochet, augmentant ainsi la chaleur (Figure 11). De plus, la chaleur peut se retrouver piégée par une chape de pollution, participant à la dispersion des rayonnements. Par conséquent, si la rue au sein de cette forme urbaine concentre un trafic automobile important, l'îlot de chaleur urbain s'accroît davantage. Il est à noter que l'orientation des vents dominants peut jouer un rôle important dans la dispersion de la pollution (Figure 2).

Les zones commerciales, comme les plateformes logistiques ou les supermarchés de périphéries, sont composées généralement de bâtiments espacés relativement bas avec de très grandes surfaces artificialisées et imperméables dédiées au stationnement. L'absence d'ombre, l'ampleur des surfaces artificielles, et les matériaux absorbant le rayonnement solaire remplissent les conditions pour former des îlots de chaleur. Néanmoins, même si l'albédo des matériaux utilisés pour recouvrir le sol est faible et leur inertie importante (voir encadré n°4) provoquant des températures particulièrement élevées en plein soleil, le phénomène d'îlot de chaleur urbain est moins important que dans certaines zones urbaines car cette forme urbaine permet un rafraichis-

⁸ Pour rappel, l'albédo des matériaux reste primordial pour lutter contre les effets des îlots de chaleur urbain (voir chapitre sur les matériaux).

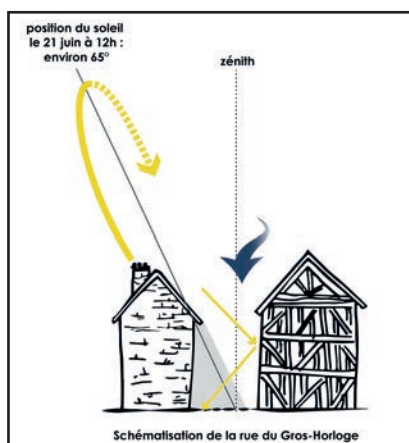


FIGURE 9 : Schématisation de l'ensoleillement dans la rue du Gros Horloge à Rouen le 21 juin à 12h00 – Source : illustration de Céline Fréchet.



FIGURE 10 : Schématisation de l'effet d'absorption et de restitution de l'irradiation solaire dans des bâtiments en pan en béton (à gauche) et en pan de bois (à droite) – Source : Illustration de Céline Fréchet.

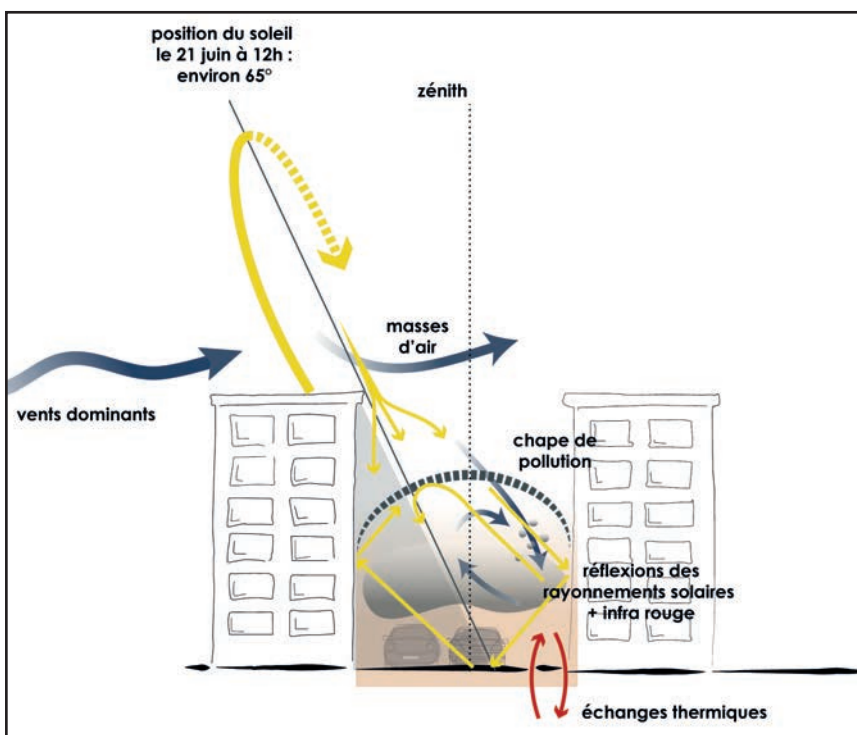


FIGURE 11 : Schéma de l'ensemble des facteurs qui peuvent accentuer les effets de l'îlot de chaleur urbain – Source : illustration de Céline Fréchet.

sement nocturne plus efficace (surface importante en contact direct avec l'air, présence de vent, et peu de réflexions et de piégeage du rayonnement dû aux façades des bâtiments). Il est à noter malgré tout que cette forme urbaine participe à l'îlot de chaleur urbain situé aux alentours et qu'elle engendre d'autres vulnérabilités qui vont s'aggraver avec le changement climatique, notamment vis-à-vis du risque d'inondation et du cycle de l'eau (voir chapitre suivant), et de la disparition de terres agricoles (voir chapitre précédent).

Dans les zones d'habitat pavillonnaire, les températures seront variables en fonction de la densité, de la végétalisation et des matériaux utilisés. En effet, la présence de jardins et de surfaces ombragées permet de limiter relativement le phénomène d'îlot de chaleur. Cependant, cette forme urbaine participera également à l'aggravation des effets du changement climatique sur l'agglomération, notamment sur le risque d'inondation et le cycle de l'eau (voir chapitre suivant), en raison de l'étalement urbain qu'elle génère au détriment des terres agricoles (voir chapitre précédent).

Les matériaux de revêtement et de construction des façades

À l'amplification du phénomène d'îlot de chaleur urbain, à l'effet des différentes formes urbaines s'associent l'apport des matériaux avec lesquels la ville est construite, les revêtements de l'espace public et les matériaux employés dans les bâtiments, surtout au niveau des façades et des toitures, mais aussi la végétation ou la présence de surfaces d'eau. Les matériaux utilisés comme revêtement du sol de l'espace public

ont un effet direct sur le climat urbain. Ces revêtements, généralement en matériaux artificiels, ont souvent la caractéristique d'absorber la chaleur produite par le rayonnement solaire afin de la restituer pendant la nuit, participant de cette façon au phénomène de l'îlot de chaleur urbain (voir encadré n°4). L'effet sur le climat est donc très important, compte tenu du maillage des espaces publics en ville.

Les facteurs anthropiques

Selon l'Observatoire Régional de l'Énergie, du Climat et de l'Air de Normandie (ORECAN), les principales sources de pollution atmosphérique de la Métropole concernent le secteur industriel, routier et résidentiel. Bien que la qualité de l'air se soit améliorée ces dernières années, des pics de pollution peuvent encore se produire. En période estivale, la pollution à l'ozone constitue aussi une source de chaleur supplémentaire en interagissant avec les rayons de soleil, les polluants, et la chaleur déjà présente (Le-grand et al., 2020). Celle-ci est d'autant plus importante lorsque les températures dépassent les 30°C et peut être responsable de nombreux problèmes de santé, principalement respiratoires aigus comme des bronchites, mais aussi neurologiques (maux de têtes) ou cardio-vasculaires (hypertension artérielle, infarctus, accidents vasculaires-cérébraux, etc.) (Perrin G, 2020, Ladner et al., 2020).

D'autre part, des équipements rejettent directement de la chaleur au sein de l'espace public, augmentant ainsi le phénomène d'îlot de chaleur. Les climatiseurs en sont des exemples par excellence lors des vagues de chaleur. En effet, l'utilisation de ces derniers dans les bâtiments permet de réguler la température et l'humidité

d'un espace intérieur, apportant un indéniable confort, mais l'énergie requise et l'humidité sont alors rejetés directement à l'extérieur sous la forme d'un air chaud. Lors d'une canicule ou d'une vague de chaleur, ils fonctionnent de jour comme de nuit, et rejettent d'autant plus de chaleur dans l'espace public, augmentant ainsi considérablement les températures extérieures et par conséquent aggravant le phénomène d'îlot de chaleur urbain (Figure 12). Une étude de modélisation sur l'impact des climatiseurs faite à l'échelle de la ville de Paris a constaté une augmentation locale de la température extérieure comprise entre 0,2°C et 2,5°C (ADEME, 2021). Ces données ont amené à une augmentation des températures dans les consignes d'utilisation de la climatisation de 23°C à 26°C pour les bureaux, et à 28°C pour les résidences (ADEME, 2021).

En soi, l'usage de la climatisation peut, de prime abord, être considérée comme une mesure curative pour résister aux canicules et aux îlots de chaleur (voir dans le chapitre dédié à ces mesures). Néanmoins, cette solution peut constituer une « maladaptation » au changement climatique dans la mesure où ces effets secondaires accentuent la chaleur environnante, et implique aussi une quantité d'énergie importante à mobiliser, dont la production rejette elle-même de la chaleur. Son utilisation peut rester malgré tout nécessaire pour des activités d'intérêt général à la collectivité (hôpitaux, EHPAD, serveurs informatiques, et toutes les activités nécessitant le maintien d'une température ambiante).

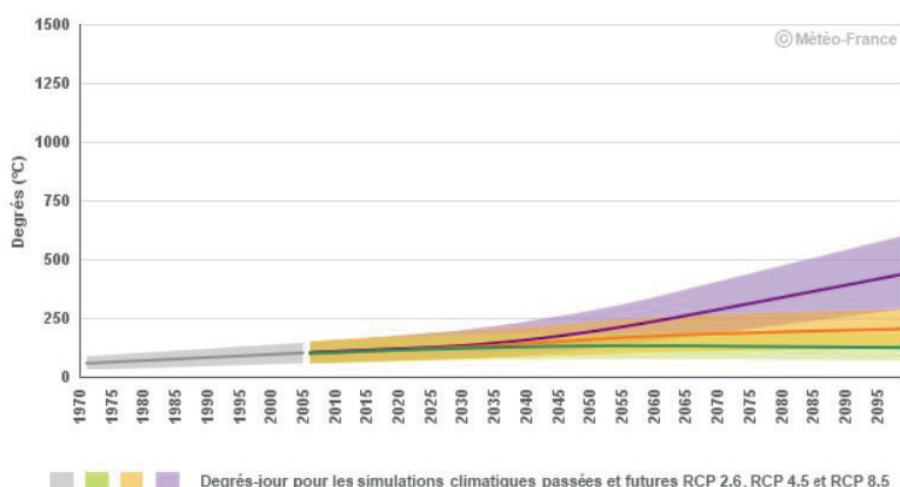


FIGURE 12 : Évolution des degrés-jour annuels de climatisation en Haute-Normandie selon des simulations du climat passé (1976-2005) et futur pour trois scénarios climatiques optimiste (RCP 2,6), médian (RCP 4,5) et pessimiste (RCP 8,5). Ces projections montrent une augmentation des besoins futurs en climatisation pour les scénarios RCP 4,5 et 8,5. Tandis qu'ils seraient plus maîtrisés dans le scénario RCP 2,6 où les gaz à effet de serre sont drastiquement réduits. - Source : site Climat HD de Météo-France. Plusieurs systèmes de climatisation peuvent être utilisés en ville (ADEME, 2021) : un climatiseur à rejet d'air sec, le plus fréquent, mais qui aggrave l'îlot de chaleur urbain la nuit en évacuant l'air chaud à l'extérieur ; un climatiseur à rejet d'air humide dégradant aussi le confort thermique extérieur ; les systèmes géothermiques ou sur nappe qui ont une incidence sur les milieux aquifères souterrains, et les réseaux urbains de froid qui présentent l'avantage de ne pas surélever significativement la température de l'air et dont les rejets sont redirigés vers le lieu de production du froid.

Observations du phénomène sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie

La connaissance de l'îlot de chaleur urbain implique de réaliser de nombreuses observations avec des méthodes de mesures spécifiques. Au sein de la Métropole Rouen Normandie, le traitement d'images satellitaires en 2020 (Figure 13) a permis de mettre en évidence les secteurs de l'agglomération émettant le plus de chaleur. Sans surprise avec ce qui a été décrit précédemment, les parties émettant de la chaleur se situent au niveau du centre-ville et des zones industrielles et commerciales, tandis que les es-

paces avec une végétation prédominante (les bois, les forêts, et les milieux ruraux) émettent moins de chaleur en raison de leur albédo plus important (voir encadré n°4). Cette carte permet de préciser davantage la multiplicité des microclimats urbains et le rôle des matériaux employés dans la diffusion de la chaleur. Cette carte ne montre cependant pas la température ressentie au sol qui peut varier selon les formes urbaines, le vent, le degré de végétation, etc. (voir chapitre précédent), et ne distingue pas non plus les différentes

sources produisant de la chaleur (chaleur d'usine, réverbération, etc.). Cette carte représente seulement les lieux chauds et froids, et non les îlots de chaleur urbains dans leur globalité et leur complexité. De surcroît, des photos prises avec une caméra thermique au niveau de l'espace public même et des bâtiments (Figure 16) viennent apporter un regard supplémentaire sur le rôle des matériaux et les concepts physiques évoqués dans l'encadré n°4 à l'échelle de l'espace public et des bâtiments.

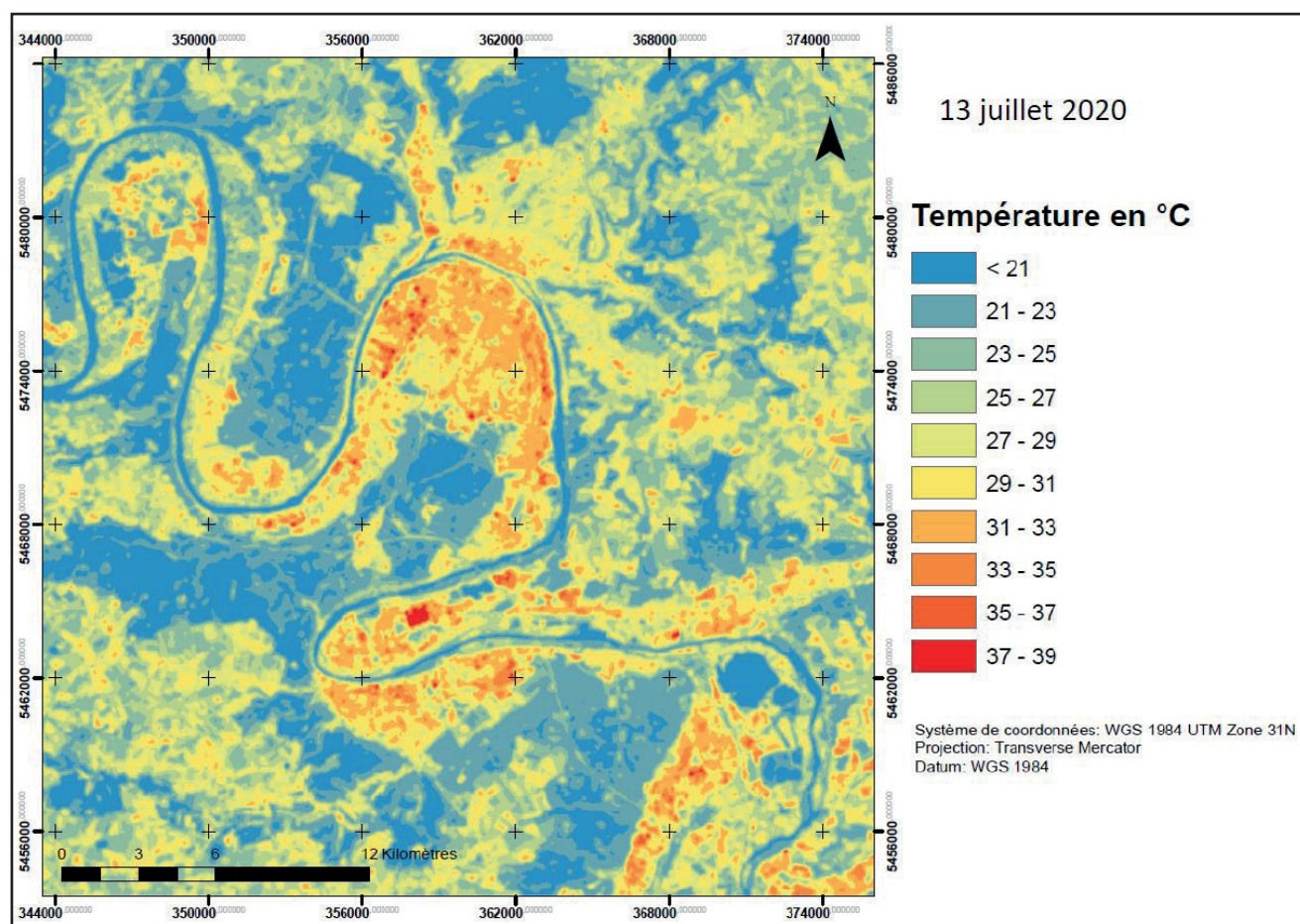


FIGURE 13 : Thermographie du territoire de la Métropole le 13 juillet 2020 réalisée à partir du satellite Landsat-8 (cliché pris à 10h45) - Cette thermographie montre uniquement la température de surface réfléchie (voir l'encadré n°4 sur l'albédo) à un moment précis. Elle ne correspond pas à la température ressentie au sol. Source : Nouaceur Z., 2020. Campagne de mesures des paramètres climatiques dans l'agglomération rouennaise (Bilan scientifique - action 1), Université de Rouen Normandie, Rouen, 2020.

Pistes d'améliorations pour lutter contre les îlots de chaleur urbain

Dans leur ensemble, le phénomène d'îlot de chaleur urbain résulte de la combinaison de plusieurs facteurs, allant de la situation géographique à l'évolution actuelle du climat, jusqu'aux facteurs locaux aggravants d'origine anthropique, dont certains sont la conséquence de méthodes d'urbanisation qui ne tenaient pas forcément compte des paramètres climatiques et environnementaux locaux. Les pistes d'amélioration qui suivent visent à réduire la vulnérabilité du territoire aux îlots de chaleur en favorisant des pratiques d'urbanisme plus appropriées pour lutter contre ce phénomène. **Elles peuvent être réparties en deux types de mesures : les mesures « préventives », pour empêcher ou limiter le rejet de chaleur et la formation des îlots de chaleur urbain en agissant sur la planification urbaine et des mobilités, l'aménagement de l'espace public, d'espaces végétalisés et de plans d'eau, la conception des bâtiments ; d'autres mesures plutôt « curatives », qui agissent temporairement et à une échelle très localisée pour atténuer les effets néfastes de la chaleur.**

Les mesures préventives

Agir sur la division parcellaire

Afin de répondre aux enjeux démographiques, sans poursuivre l'étalement urbain, ni une densification irréfléchie, qui pourra accentuer les effets des îlots de chaleur urbain, le PUCA⁹ a engagé une consultation internationale de recherche sur la densification "douce" qui présente un potentiel d'évolution urbain. Plusieurs actions peuvent être développées, comme la division parcellaire, l'extension, la surélévation, le renouvellement, la mutation, la rénovation ou la réhabilitation (MRN, PLU, 2020a, p. 260, PUCA, 2013). Des diagnostics territoriaux ont donc été réalisés, répertoriant chaque tissu urbain avec ses potentiels de densification. Par exemple, les tissus pavillonnaires présentent un potentiel important qui permettent cette densification douce sans modifier sensiblement les formes urbaines du quartier en mutation, et sans démolir le bâti présent (exemple du concept « Build in my backyard », PUCA, 2013, p. 7).

⁹ Le Plan Urbanisme Construction Architecture est un service interministériel visant à développer les projets et les innovations dans le domaine de l'architecture et la construction, ainsi que de l'urbanisme.

Les espaces urbains mutables

Sur la piste de la densification, le renouvellement urbain présente également une alternative à l'étalement urbain. Les friches industrielles ou portuaires présentent sur le territoire rouennais en sont un exemple. Ces zones permettent de reconstruire la ville sur la ville en intégrant un urbanisme raisonné et bioclimatique. Des friches sont en cours de reconstruction sur le territoire : les éco-quartiers Rouen Flaubert et Luciline ou bien avec le quartier Aubette Martainville à l'Est. En effet, souvent situées proches de centres, leurs renouvellements permettent de ne pas artificialiser un espace naturel ou agricole, et de réaliser des projets urbains importants en redonnant une place à la végétation et au cycle de l'eau.

Le PLU a identifié 623 ha d'espace de renouvellement urbain, dont 300 ha se situent sur Seine-Sud, une future zone d'activité (Figure 14). Une base de données des "espaces mutables" a été élaborée au sein de la Métropole et enrichie par les travaux du Programmes Local de l'Habitat (PLH) lors d'un recensement réalisé dans le cadre de la démarche Grande Seine 2015 (MRN, PLU, 2020a, p. 257).

Favoriser les modes de déplacement doux

Le renouvellement urbain passe également par la reconsidération des modes de déplacements urbains et plus particulièrement par l'implémentation des modes doux. Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, la voiture s'est imposée dans les sociétés contemporaines et dans les villes, menant à l'artificialisation et l'imperméabilisation des sols pour

la supporter. Elle est également responsable d'émissions de gaz à effet de serre et de la pollution de l'air, et participe de ce fait à l'augmentation des températures, et de l'îlot de chaleur urbain. Les modes doux se présentent comme une alternative à la voiture, et permettent de repenser l'aménagement des villes. En effet, l'aménagement de pistes cyclables ou de voies piétonnes peuvent s'accompagner d'une désimperméabilisation et d'une renaturation des sols du réseau de la mobilité, et *in fine* de limiter les effets des îlots de chaleur urbain. Par exemple, l'aménagement des quais de Rouen rive gauche a permis de réintégrer les piétons et les cyclistes, tout en laissant de la place à la végétation.

Le constat réalisé sur les parts modales, les modes doux (marche, vélo, trottinette électrique) ou alternatifs à la voiture individuelle (covoiturage, autopartage) représentent une part non négligeable sur le territoire, même si l'usage de la voiture individuelle reste prépondérant, notamment à la périphérie du centre de l'agglomération (Savary, 2022). La diversification et l'intégration sécurisée de ces usages dans l'espace public et la voirie implique donc des conceptions et des décisions plus complexes à mener. Dans le cadre de ses politiques de mobilité, la Métropole prévoit une stratégie basée sur l'intermodalité et le développement des transports en commun ou du vélo (via le Réseau Express vélo) qui va dans le bon sens (MRN, PLU, 2020a, p. 215, p. 217, p. 220) même si beaucoup reste encore à faire pour intégrer les modes doux, ainsi que les autres enjeux susmentionnés (gestion de l'eau et réduction du ruissellement, renaturation). Une solution complémentaire pourrait consister à diminuer les déplacements, en favorisant des pratiques comme les circuits courts, ou le télétravail lorsque cette solution est possible (Préfet de la région Normandie, 2020a).

Friches recensées en 2017-2018			
	A vocation Habitat et Mixte (en ha)	A vocation Economie (en ha)	Total (en ha)
Cœur d'agglomération	10	2	12
Espaces urbains	26	531	557
Pôles de vie	1	25	26
Bourgs et villages	5	23	28
Total	42	581	623

Source : EPFN, 2017-2018

FIGURE 14 : Le nombre des friches recensées en 2017-2018 dans la Métropole Rouen Normandie, in MRN, 2020a, p. 257.

Introduire des critères bioclimatiques dans la conception des bâtiments

Dans son rapport sur les stratégies de rafraîchissement des villes, l'ADEME, met en évidence le fait que la relation entre l'architecture et le climat n'est pas nouvelle, et qu'elle a toujours été présente dans les manières de penser les villes. Ces dernières se sont construites souvent de façon empirique, en s'adaptant aux particularités du climat local. Par exemple, les rues étroites bordées de bâtiments hauts caractéristiques du centre-ville de Rouen protègent des rayonnements solaires et offrent plus de fraîcheur en été tout en protégeant du froid en hiver (ADEME, 2021).

L'émergence climatique contemporaine impose une prise en compte renouvelée du climat local dans la réflexion du projet aux échelles urbaines et architecturales. Ceci repose sur un ensemble de dispositifs allant de l'étude de l'orientation des rues, optimisant ainsi l'apport solaire ou les bénéfices des vents dominants qui aident au confort thermique, à l'étude de l'orientation des bâtiments selon les apports solaires, en précisant le degré d'ouverture des fenêtres et la mise en place de protections solaires, de persiennes ou de végétation (ADEME, 2021 ; Perrin G, 2020).

L'introduction de critères bioclimatiques dans la conception des projets urbains et des

projets architecturaux pourra contribuer à réduire l'installation de climatiseurs¹⁰ lors de la construction ou de la rénovation des bâtiments de solutions purement techniques, en faveur de dispositifs alternatifs comme les protections solaires, l'isolation des enveloppes, ou l'inertie intérieure associée à la ventilation nocturne (ADEME, 2021).

Les matériaux de l'espace public

Dans la perspective de réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain, le choix des matériaux se fait selon différents points de vue. D'une part, la préférence pour des matériaux ayant un albédo fort permet de réfléchir le rayonnement solaire et infrarouge et d'éviter son absorption ; d'autre part, le choix de matériaux avec une faible inertie permettra de limiter la restitution de la chaleur la nuit (voir encadré n°4). Sans remplacer l'ensemble des matériaux, certaines agglomérations ont choisi de recouvrir des revêtements existants de peinture blanche, ou de changer partiellement les matériaux dans les zones accentuant le phénomène d'îlot de chaleur. Cette solution peut présenter des limites dans des quartiers denses et très fréquentés. En effet, en période de fort ensoleillement, les matériaux comportant une forte réflexion provoquent un inconfort pour les usagers (éblouissements)

potentiellement dangereux sur des carrefours où le trafic routier est important.

Renforcer la végétation et encourager la circulation du vent

Selon le type d'espace vert et la nature de la végétation, les effets ne seront pas identiques. L'action rafraîchissante de la végétation est due à deux principaux mécanismes (Figure 15) :

- **L'ombrage d'une canopée** qui bloque une partie plus ou moins importante des rayons du soleil grâce aux feuilles. En interceptant le rayonnement solaire, les arbres réduisent l'énergie qui devrait arriver au sol, sur les bâtiments et les passants.

- **Par l'évapotranspiration des plantes**, c'est-à-dire les transferts d'eau dans la plante qui s'effectue via la transpiration des feuilles ou des plantes herbacées. Elle permet de réduire les températures aux alentours et d'augmenter l'humidité de l'air. Cependant, le stress hydrique subi par les arbres en ville avec les fortes chaleurs peut entraîner la senescence prématurée des plantes, et réduire l'efficacité de ce mécanisme.

- **Par évaporation de la terre**, c'est-à-dire que l'eau contenue dans la terre s'évapore augmentant ainsi l'humidité de l'air qui fait alors baisser la température.

¹⁰ À l'exception des bâtiments contraints par des normes techniques, comme les hôpitaux ou encore les serveurs informatiques.

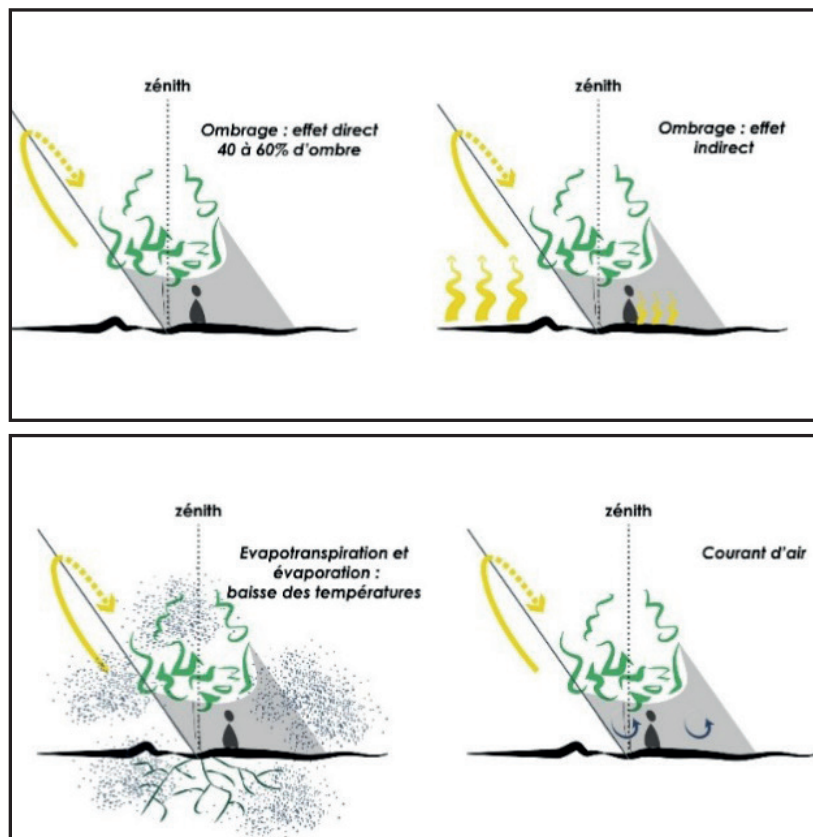


FIGURE 15 : Effets de la présence d'une plante par rapport à son ombrage, à l'évotranspiration et à l'évaporation, et aux courants d'air – Source : Illustration de Céline Fréchet.

La végétation en pleine terre, grâce à son albédo plus élevé, absorbe plus de chaleur qu'un sol minéral, mais permet également l'infiltration de l'eau, jouant un rôle conséquent dans l'apport de fraîcheur. Ainsi, l'enherbement, ou plus généralement la mise en place sur le territoire d'une trame brune, offre les avantages d'un sol perméable, laissant l'eau de pluie s'infiltrer, se stocker, et favorise ensuite l'évaporation et l'évapotranspiration par la végétalisation. De plus, avec un albédo de 0,3, cette même surface va rejeter 70% du rayonnement solaire sans émettre de rayonnement infrarouge. Les températures restent donc peu élevées en journée et la chaleur n'est pas réémise le soir, ne participant pas à la hausse de la température (Figure 16).

À une échelle géographique plus large, les parcs urbains constituent des oasis de fraîcheur relativement efficaces en raison de la densité de végétation plus importante que dans le reste de la ville. Leur influence sur la température offre aussi l'avantage de se diffuser au-delà de leur périmètre, bien que cette capacité puisse varier selon la taille du parc et ses caractéristiques intrinsèques comme la surface enherbée ou le nombre d'arbres plantés (Müller et al., 2014 ; Monteiro et al., 2016). Les parcs avec une faible superficie (0,2-0,3 ha) n'ont qu'une action rafraîchissante ponctuelle. À l'inverse, plus leur taille augmente de plusieurs hectares, plus la fraîcheur est contenue. La canopée et les surfaces enherbées interviennent quant à elles plutôt sur la diffusion et le niveau de fraîcheur au sein et autour du parc. La configuration d'un parc urbain est donc aussi essentielle à prendre en compte. En dehors des parcs, les alignements d'arbres positionnés près des axes routiers peuvent procurer de l'ombre et apporter un rafraîchissement efficace (Gomez et al., 2001 ; Coutts et al., 2015). Cependant, si leur densité est importante (à l'instar des grands bâtiments), ils peuvent réduire la vitesse de certaines masses d'air et limiter la dispersion des polluants issus du trafic qui se retrouvent piégés (Figure 11). Une distance de quelques mètres entre chaque arbre permet de ne pas entraver les flux d'air. **Il apparaît donc nécessaire que l'aménagement des espaces verts, les opérations de renaturation ou d'urbanisme en général prennent en compte à la fois les spécificités des espèces végétales et la circulation des vents dominants (Figure 2) afin d'optimiser leur action dans le rafraîchissement de la ville.** Concernant la capacité d'atténuation du phénomène d'îlot de chaleur urbain, les expériences de végétalisation urbaine constituent une solution incontournable mais non suffisante. C'est notamment le cas des solutions de façades et de toitures végétalisées sur les constructions qui émergent depuis les années 2000. Il s'agit d'une solution architec-

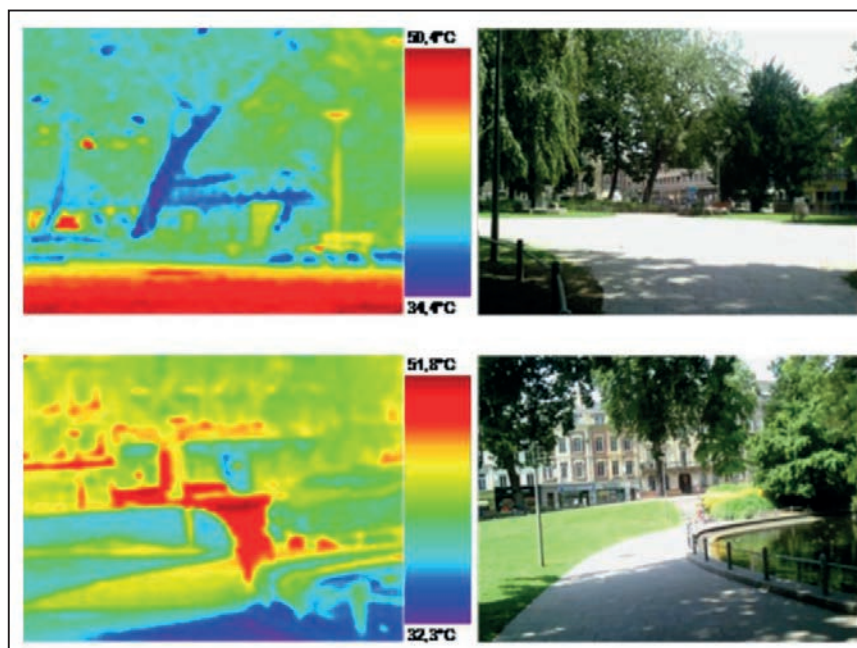


FIGURE 16 : Clichés thermiques pris aux alentours du Square Verdrel et du Musée des Beaux-Arts le 31 juillet 2020 à 14h30 – Source : Nouaceur Z., 2020. Campagne de mesures des paramètres climatiques dans l'agglomération rouennaise (Bilan scientifique - action 1), Université de Rouen, Rouen Normandie, 2020.

turelle qui a été intégrée dans la production contemporaine de l'architecture, mais qui reste accessoire (et assez coûteuse) au niveau de l'atténuation des effets des îlots de chaleur urbain.

Enfin, l'action rafraîchissante de la végétation en milieu urbain rencontre plusieurs limites en période de stress hydriques ou de la présence de polluants dans le sol (Gutleben C, 2014. p. 33). Durant les périodes de sécheresse, lorsque l'eau vient à manquer, le mécanisme d'évapotranspiration n'apporte plus les bienfaits rafraîchissants qui lui sont propres, et le bénéfice donné par ces espaces s'amorçait (Gutleben C, 2014. p. 46). L'augmentation des périodes de sécheresse et de canicules prévue par les modèles climatiques (Laignel et Nouaceur, 2018) impliquera donc d'améliorer la gestion de l'eau en milieu urbain.

Créer des plans d'eau et améliorer la gestion de la ressource en milieu urbain

L'eau est présente dans les villes sous la forme de fleuves et de rivières, des lacs et des zones humides, mais aussi sous des formes plus artificielles, comme des bassins, des jets d'eau ou les fontaines. Elle participe au rafraîchissement du climat urbain *via* son évaporation (par la transformation de chaleur sensible en chaleur latente), mais aussi de par ses propriétés thermiques qui diffèrent des surfaces minéralisées et imperméables lui conférant un effet « thermostat » (Sun & Chen, 2012 ; Steeneveld et al., 2014 ; Peng et al., 2020). Celui-ci se manifeste notamment lorsque la profondeur des plans d'eau

est suffisante pour permettre un mélange des masses d'eau et une régulation de la température, sous réserve que le vent soit lui-même suffisant et ne soit pas entravé par la rugosité des formes urbaines (Steenefeld et al., 2014 ; Jacobs et al., 2020). Par ailleurs, la taille des plans d'eau semble également jouer un rôle significatif dans l'apport de fraîcheur dans la mesure où les petits plans d'eau (canaux, fossés, petits bassins) n'ont qu'une très faible influence sur les températures.

Enfin, la fraîcheur est optimisée en ajoutant de la végétation et de l'ombrage à proximité (Jacobs et al, 2020). C'est particulièrement le cas pour les villes situées à proximité d'un fleuve où le rafraîchissement est d'autant plus fort lorsque les rives sont végétalisées (Hathway et Sharples, 2012). Les récents aménagements de la rive gauche de la Seine à Rouen vont dans ce sens et semblent avoir porté leur fruit comme en témoigne l'attrait de la population pour ces espaces en été. Plus largement, la présence d'un réseau hydrographique important dans la Métropole peut constituer aussi un atout non négligeable pour lutter contre la chaleur intense en été. **Ainsi, à l'instar des parcs urbains, les plans d'eau contribuent donc à la formation d'oasis de fraîcheur en ville, et apportent en outre d'autres bénéfices sur le plan de la biodiversité, ou encore sur la santé et le bien-être de la population (Mitchell et Popham, 2008 ; INVS, 2015).**

De façon plus générale, le rétablissement du cycle de l'eau en ville est essentiel pour le confort thermique et pour la gestion des

eaux pluviales. Aujourd'hui altéré du fait de l'imperméabilisation des sols et de la diminution des milieux humides ou aquatiques, les phénomènes d'îlots de chaleur urbain et de ruissellement s'en trouvent exacerbés en ville. Le processus de rafraîchissement par l'eau en ville dépend donc en partie de la surface perméable disponible ainsi qu'à la végétation présente. L'eau qui s'infiltre dans le sol va apporter de multiples bienfaits, comme l'évaporation et l'évapotranspiration par l'intermédiaire des plantes, ou encore favoriser la recharge des nappes phréatiques ou limiter leur sécheresse en été (Perrin G, 2020, p. 57). Prendre en considération la trame bleue et le chemin naturel de l'eau lui redonne une place dans la ville et rétablit un bon état écologique local tout en participant au rafraîchissement urbain. Avec la problématique du ruissellement, les noues, les cours d'eau, les zones humides restent des solutions incontournables dans cette gestion (Perrin G, 2020, p.58).

La désimperméabilisation des sols, lorsque cela est possible, est donc la clé pour favoriser une gestion de l'eau intégrée en milieu urbain qui permettra, outre de limiter les effets néfastes des îlots de chaleur urbain, de réduire le risque d'inondation par ruissellement, et le risque de sécheresse en été¹¹. Plus largement, rouvrir les sols permet aussi de capter naturellement du carbone de l'atmosphère. La désimperméabilisation est donc l'une des solutions à privilégier en priorité pour à la fois atténuer le changement climatique et s'y adapter. Elle est aussi bénéfique et indispensable pour mieux garantir la survie des végétaux en place, notamment les arbres, et la déminéralisation doit être couplée autant que possible à de la pleine terre en substitution.



Les mesures curatives

Ces mesures correspondent aux actions ponctuelles qui permettent d'atténuer à très court terme et très localement les effets de la chaleur, notamment pour les quartiers du territoire qui ne bénéficieraient pas des mesures préventives évoquées précédemment. Toutefois, les bénéfices et l'efficacité de ces secondes mesures restent aussi limités dans l'espace et le temps, car certaines installations peuvent être soit gourmandes en eaux (ressource à préserver), et surtout que les aménagements doivent être réfléchis plus globalement.

Il peut s'agir notamment de la végétation en pot mais dont les limites sont nombreuses. En effet, elle apporte peu de bénéfices en termes de biodiversité (elle ne participe pas à la trame brune), en termes d'ombre sur l'espace public (très réduit en raison de la faible hauteur des arbustes, même si on y ajoute la hauteur de pot), et en termes d'évaporation (due à la réserve de terre très réduite). Elle implique également un arrosage plus fréquent. Les jets d'eau (fontaines, bassins, brumisations, etc.) constituent une autre solution curative. Par exemple, alors que les fontaines permettaient naguère un accès à l'eau potable, elles constituent désormais un point de rafraîchissement (Figure 17). Les brumisateur vaporisent des microgouttelettes plus fines qu'un cheveu qui sont diffusées à l'aide du vent dans l'environnement proche.

Il est à noter qu'avant l'urbanisation massive du XX^e siècle, les fontaines de Rouen étaient toutes alimentées par les sources environnantes par nécessité d'approvisionnement des populations. Une petite partie de ces fontaines le sont encore, mais l'obstruction progressive de ces sources ou rivières, parfois par des constructions invasives, ne permet plus une alimentation « durable » et naturelle de ces fontaines¹².

Avec le stress récurrent que connaît la ressource en eau l'été, il peut être complexe voire controversé de mettre en place ce genre d'ouvrage. Pour éviter cette situation, il paraît donc nécessaire d'engager une réflexion globale sur les mesures préventives pour restaurer le cycle de l'eau en ville en :

- Réduisant la consommation d'eau :
 - » Favoriser un comportement économe des gros consommateurs (les industries notamment) et les équipements économes (réduction du débit d'eau).
 - » Récupérer les eaux pluviales.
- Favorisant un meilleur traitement des eaux usées :
 - » Limiter la pollution à la source et adapter le traitement aux polluants.
 - » Éviter la dilution des eaux usées dans les eaux de pluie ou de ruissellement (saturation des réseaux et traitement d'eau réputée propre).
- Réduisant le ruissellement en rendant les sols perméables afin que l'eau puisse s'infiltrer facilement en ville.

¹¹ Maîtriser l'étalement urbain et préserver les espaces NAF, Fiche outil, Limiter l'imperméabilisation des sols, Ministère de la transition écologique, s.d., p. 1.

¹² Tanguy J., 2000. Fascicule : Sources et fontaines, Dépôt légal : octobre 2000. N°ISBN 2 - 913914-11-X. © Communauté de l'agglomération rouennaise. Collection histoire(s) d'agglomération - N°ISSN 1291-8296.



FIGURE 17 : Photo d'une fontaine à Rouen près de la station de métro Joffre-Mutualité. Les jets d'eau peuvent entraîner une baisse temporaire et localisée de la température de 1°C à 3,5 °C mais leur usage peut être controversé dans le cas de restrictions de la ressource en eau en été. – Source : Santamouris, 2017, in ADEME, 2021, p. 46.

Conclusion

CARACTÉRISTIQUES DU TERRITOIRE

- Territoire formé par des plateaux calcaires sillonnés par des vallées créées par l'érosion fluviale et sensible au ruissellement
- Système hydrographique centré sur la vallée de la Seine, formant 5 méandres
- Climat tempéré, océanique
- Territoire métropolitain composé à part égale de tissus urbains, d'espaces agricoles et de milieux forestiers
- Tendance à l'étalement urbain porté sur le territoire agricole
- Augmentation des sols artificialisés

CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BASSIN DE LA SEINE À L'HORIZON 2100

- Allongement des périodes de canicule : +10 à +30 jours par an ;
- Augmentation de la température moyenne annuelle entre +2°C et +6°C selon les scénarios ;
- Ensoleillement plus important ;
- Légère baisse des précipitations moyennes ;
- Augmentation de la fréquence des événements pluvieux extrêmes de +2 à +10% ;
- Élévation du niveau marin : 0,6 à 1,1 m (médiane)
- Diminution du débit des cours d'eau (moyenne annuelle de -10% à -30%, en été de -25% à -45%)
- Baisse de la recharge des nappes (moyenne annuelle de -16% à -30%)

IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

- Augmentation des été chauds et de périodes caniculaires
- Augmentation de la différence thermique entre villes, zones périurbaines, milieux ruraux : formation d'îlots de chaleur urbains
- Hausse de la température dans les zones urbaines denses et artificialisées



CONSÉQUENCES POUR LE TERRITOIRE

- Augmentation de la pollution de l'air et des pics d'ozone
- Inconfort thermique durant la nuit notamment
- Risques sanitaires accrus en période estivale (malaise, déshydratation, décès, etc.) et à long terme en raison de la pollution de l'air
- Erosion de la biodiversité

ACTIONS POUR L'ADAPTATION DU TERRITOIRE

En priorité, mettre en œuvre des mesures préventives empêchant le rejet de chaleur en milieu urbain :

- Agir sur la planification urbaine en développant une densification douce, des actions de renouvellement sur les espaces urbains mutables, désimperméabiliser les sols où cela est possible afin de favoriser l'infiltration de l'eau et des pluies à leur point de chute
- Introduire des critères bioclimatiques dans la conception bâtiments, intégrer des matériaux avec un albédo plus élevé
- Renforcer la présence végétale et de l'eau en ville, encourager la circulation du vent
- Favoriser les modes de déplacement doux

Dans un second temps et plus ponctuellement, faire appel à des mesures curatives (fontaines, jets d'eau, etc.)

Recommandations pour l'amélioration des connaissances

Afin de mieux appréhender le confort thermique urbain, les secteurs vulnérables à l'îlot de chaleur urbain, ou à l'inverse les secteurs plus frais par l'action du vent, de l'eau et de la végétation, il pourrait être intéressant de développer une modélisation fine des tissus urbains de la Métropole Rouen Normandie, aux échelles de la commune, du quartier, et de la rue. Des études typologiques pourraient fournir des informations des textures urbaines, des espaces publics, de l'orientation des rues, des masques solaires et des zones d'ombrages, de la perméabilité des sols, de la pénétration du vent. Une première pierre sera fournie par la plateforme multirisque que l'Université Rouen Normandie développe actuellement à l'échelle du territoire de la Mé-

tropole Rouen Normandie. Cet outil permettra de croiser les risques de canicule, de sécheresse et d'inondation et d'identifier plus précisément les zones du territoire pour lesquelles les vulnérabilités à ces risques sont importantes. Il serait aussi intéressant de doter le territoire de la Métropole d'un réseau de capteurs à températures, pluviomètres, et anémomètres pour mesurer in-situ les échanges de chaleur et d'humidité, les secteurs les plus arrosés, ou encore l'action du vent. Couplée à la plateforme multirisque, cette solution permettrait de suivre en temps réel l'évolution des îlots de chaleur urbain.

Le développement d'autres projets de recherche entre les acteurs impliqués dans l'urbanisme, l'architecture et l'adaptation du

territoire au changement climatique, et en particulier au phénomène de l'îlot de chaleur urbain, pourrait s'avérer utile pour comprendre les difficultés à prendre en compte ce phénomène dans les projets. Des entretiens pourraient être menés auprès des professionnels du bâtiment (promoteurs, aménageurs, etc), des architectes, des urbanistes, ou des bureaux d'études, afin de comprendre leur point de vue, leurs problématiques et les difficultés auxquels ils doivent faire face en amont et pendant la réalisation d'un projet urbain ou architectural. C'est le cas de logiques de coûts ou de faisabilité qui peuvent empêcher l'exécution de projets d'aménagement urbain innovants répondant aux enjeux du changement climatique et de la biodiversité.



Les risques accrus d'inondation

État des lieux sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie

Une partie des vulnérabilités du territoire de la Métropole au risque inondation est le résultat de l'application de critères d'urbanisation qui ne prenaient pas en compte les problématiques environnementales et climatiques. En effet, l'artificialisation des sols empêche toute infiltration, et la constructibilité dans les zones inondables et l'étalement urbain surchargent les ouvrages hydrauliques en aval. Cette vulnérabilité pourrait s'accroître sous l'effet de l'augmentation de la fréquence des épisodes de précipitations extrêmes cumulée avec les phénomènes de marées et l'élévation du niveau de la mer qui se transpose sur le niveau d'eau dans l'estuaire de la Seine où se situe le territoire de la Métropole. Ainsi, le changement climatique pourrait impliquer une extension des zones inondables, exposant au risque inondation une part plus importante de la population, des emplois et des activités économiques, parmi lesquelles les industries classées "Seveso" situées en bordure de Seine.

La coupe schématique (Figure 18) montre l'évolution des berges de la Seine au sein de la ville de Rouen. L'illustration montre une artificialisation progressive des berges avec une accélération brutale depuis le XX^e siècle. Ces aménagements au-delà des aspects pratiques et économiques forment une barrière, une déconnexion entre le fleuve et son milieu naturel. Outre l'aspect négatif sur la biodiversité, l'artificialisation des berges oblige à canaliser les différents déversements, comme les eaux de ruissellement et les rivières. Ces canalisations de la Seine et des différentes eaux forment un entonnoir délocalisant les débordements du fleuve qui peuvent être, dans les zones non urbanisées, absorbés en partie par les berges naturelles, les nappes d'accompagnement et les marécages (rive gauche / au centre du méandre de la Seine). Les inondations ne sont pas des événements exceptionnels dans la Métropole et le risque, presque omniprésent, peut prendre quatre grandes formes principales : par un débordement de cours d'eau ou une crue (de la Seine et de ses affluents), par ruissellement, par remontée de nappes situées au fond de la vallée de la Seine, et par submersion marine qui empêche l'écoulement de l'eau du fleuve et entraîne une élévation de l'estuaire de la Seine (ARTELIA & GIP SA, 2013a, Fisson, Lemoine, et Gandilhon, 2014 – Figure 19).

Les inondations entraînent une dégradation des espaces publics, des habitations et bouleversent le cadre de vie, la santé et la sécurité de la population avec des risques sani-

taires immédiats (blessures, traumatismes...) et différés (neuropsychiques, environnementaux, traumatiques...) (Ladner J, Legrand C, et al., 2020). Sans changement majeur sur les modes d'occupation des sols, les conséquences et la sévérité de ces événements s'accroîtront vraisemblablement avec le changement climatique.

Le territoire et ses acteurs font souvent face avec difficulté aux épisodes d'inondation les plus intenses et les prévisions climatiques indiquent que ces événements deviendront plus réguliers. Plusieurs secteurs et services essentiels à la population sont en première ligne, et leur rupture ou leur inaccessibilité peut entraîner parfois un isolement temporaire de certains quartiers. Par exemple, des

réseaux de transport peuvent être fermés, comme en témoigne l'inondation de plus en plus fréquente des trémies des quais. Les réseaux électriques et de télécommunication présentent aussi des fragilités (Savary, 2022). Selon les niveaux d'eau, les stations d'épuration et les réseaux d'assainissement étant limités par leur dimensionnement, le surplus d'eau ne pouvant être accueilli, peut se déverser directement dans les cours d'eau, engendrant des pollutions considérables dans les milieux (accumulation de déchets, produits chimiques entraînés par les inondations et contaminant les milieux, turbidité, etc.) (MRN, PLU, 2020c, Préfet de la région Normandie, 2020a ; Kazmierczak L., Laignel B., Charrier F., 2019).

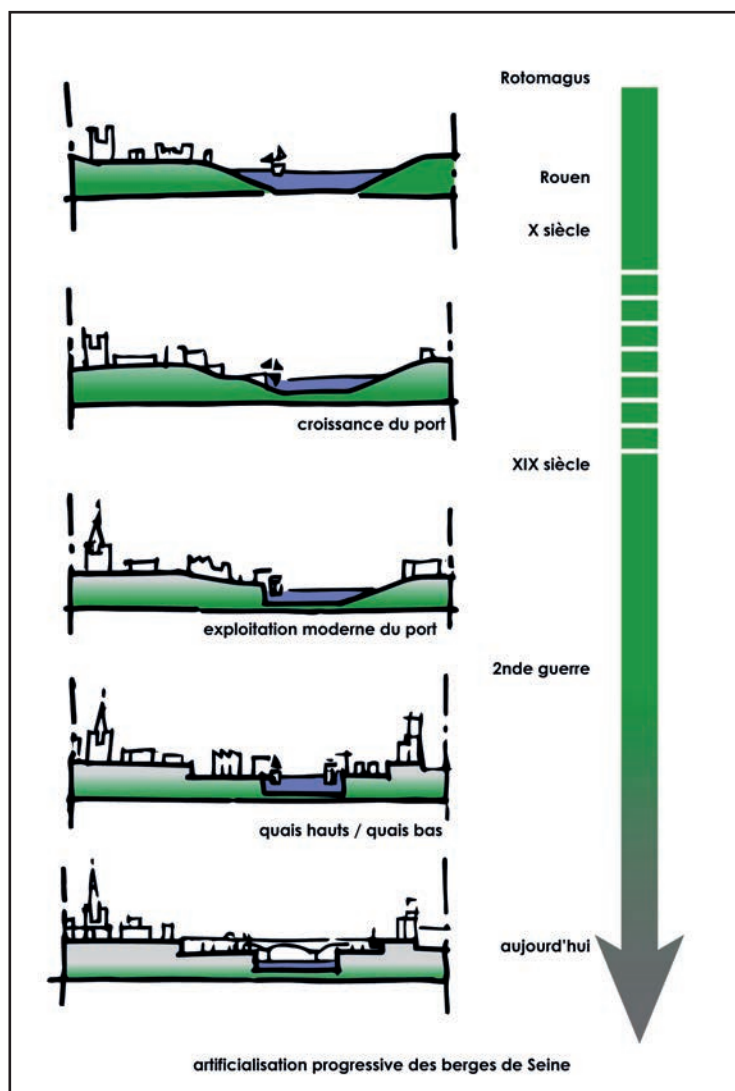


FIGURE 18 : Rouen et son fleuve : artificialisation progressive des berges de la Seine. Illustration réalisée par Céline Fréchet.

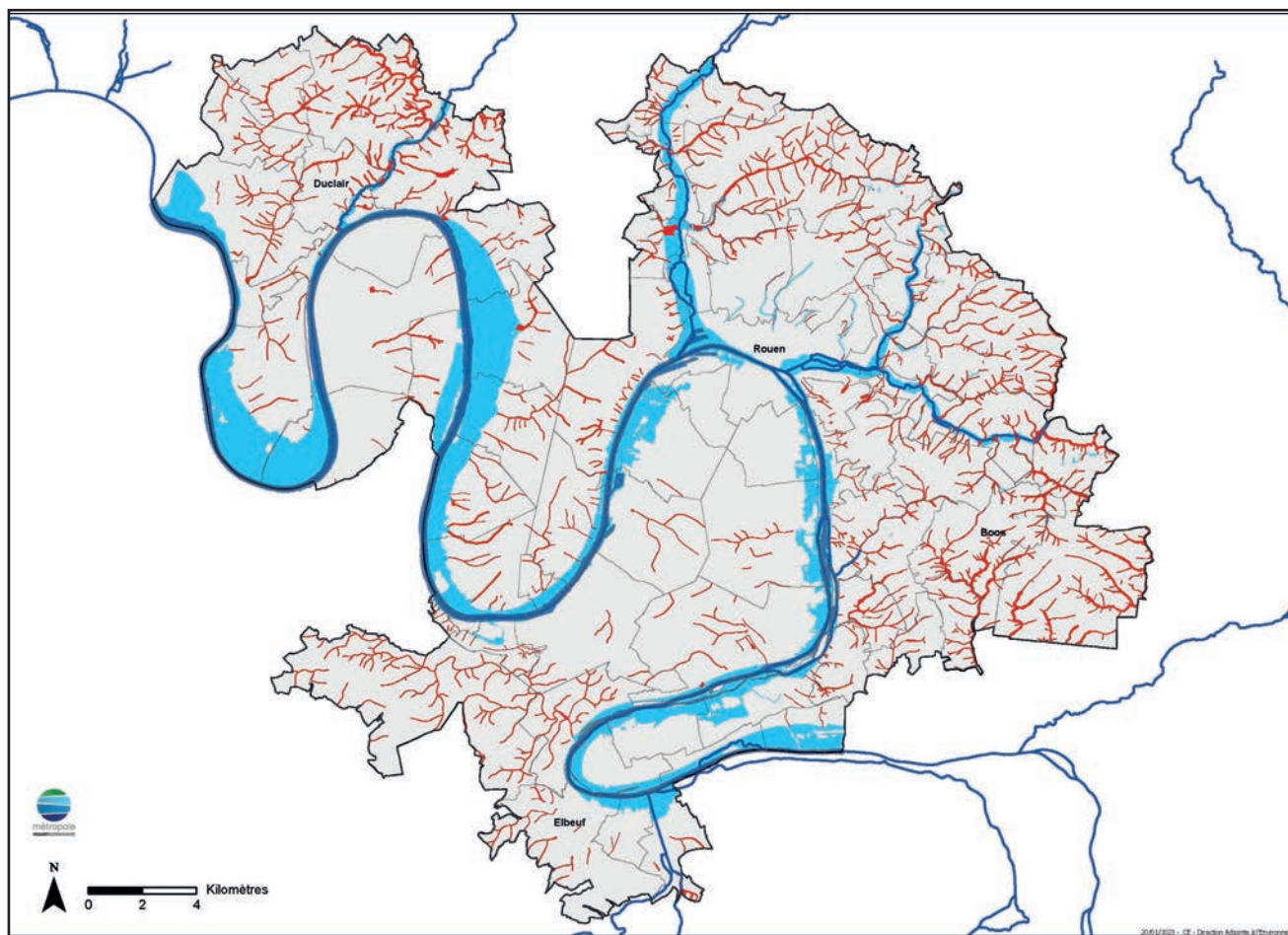


FIGURE 19 : Le risque d'inondation sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie : Source : carte réalisée en 2023 par la Métropole Rouen Normandie à partir des PPRN de la Vallée de la Seine (boucle de Rouen et d'Elbeuf), du PPRI du Cailly, de l'Aubette et du Robec, du PPRN Bassin versant de l'Austreberthe et du Saffimbec, du TRI Rouen Louviers Austreberthe, 2019.

L'inondation par débordement des cours d'eau

Très peu de modélisations et de projections montrent une évolution de la fréquence d'inondation par débordement des cours d'eau due au changement climatique (ADAGE Environnement, 2020, p. 60). Deux types de crues peuvent être distinguées, lentes et rapides. Les crues définies comme lentes peuvent survenir lorsque les sols sont saturés lors de perturbations océaniques hivernales, conduisant aux débordements des cours d'eau. Les crues rapides résultent d'événements pluvieux extrêmes qui, au-delà des débordements, peuvent engendrer des ruissellements et des inondations « éclair », ainsi que des coulées de boue qui ruissellent jusqu'aux points les plus bas de la ville et saturer les réseaux d'assainissement (ADAGE Environnement, 2020).

L'inondation par ruissellement

Le phénomène de ruissellement n'est pas exceptionnel sur le territoire normand comme l'a montré le dernier épisode en date du 4 juin 2022 dans plusieurs communes de l'agglomération de Rouen. L'accentuation d'épisodes de pluies intenses (averses orageuses par exemple) avec le changement climatique ne fera qu'aggraver ces risques d'inondation. Ce type d'inondation éclair se manifeste par

sa soudaineté et par sa violence, car il s'agit de plusieurs mois de précipitations qui se déversent dans un temps relativement court (CEPRI, 2014). Lors de ces événements, le ruissellement peut aussi entraîner des coulées de boue, une pollution des sols, une accumulation de déchets, et accentuer l'érosion (ADAGE Environnement, 2020). Par gravité, l'eau qui ruisselle rejoint les points les plus bas de la ville et sature les réseaux d'assainissement. Ceux-ci se composent de « tuyaux », mais également de bassins de rétention (publics, mais également privés sur des grandes opérations) qui retardent l'arrivée des eaux de pluie dans les canalisations, puis dans la Seine. Cependant, l'artificialisation étant en perpétuelle expansion et ne permettant plus l'infiltration de l'eau à son point de chute, les ouvrages de rétention en amont se sont rapidement saturés car ils se retrouvent en aval des nouveaux aménagements. L'artificialisation et l'imperméabilisation des sols favorisent donc la surcharge des réseaux en amont et augmentent la sévérité des inondations par ruissellement (Figure 20). Par ailleurs, l'eau ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, se voit traitée comme un « déchet » et redirigée directement dans le réseau d'eau pluviale ou celui d'assainissement, pour être rejetée dans la Seine (ou occasionnellement dans les stations d'épuration). La consé-

quence est que l'eau de la pluie qui, naguère abreuyaient les terres en amont (alimentant les ruisseaux, les nappes, les terres agricoles, les forêts et autres milieux naturels) se retrouve dans le réseau jusqu'à la Seine. L'altération du cycle de l'eau naturel dans les milieux urbains denses ne permet plus aux pluies de se déverser dans la Seine sur une échelle de temps bien plus longue qui aurait permis d'absorber la soudaineté et la violence de l'épisode pluvieux.

Ce ruissellement étant accentué par les grandes étendues de revêtements imperméables comme les parkings des zones commerciales et d'activités, il peut également être le résultat de la transformation des sols par les pratiques agricoles. Les sols très secs, dus entre autres à la battance des sols, ou gelés, ou encore gorgés d'eau à la suite d'un précédent épisode de fortes pluies, peuvent également empêcher l'infiltration de l'eau (Ministère de la Transition Écologique, 2020a). Depuis les remembrements agricoles réalisés dans la seconde moitié du XX^e siècle, les champs agricoles forment de grandes étendues (*openfield*) dépourvues d'arbres ou de haies constituant historiquement des bocages. Les précipitations, d'autant plus lorsqu'elles sont extrêmes, ruissellent désormais à travers les champs sans presque aucun obstacle (MRN, PLU, 2020c). Ce ruisselle-

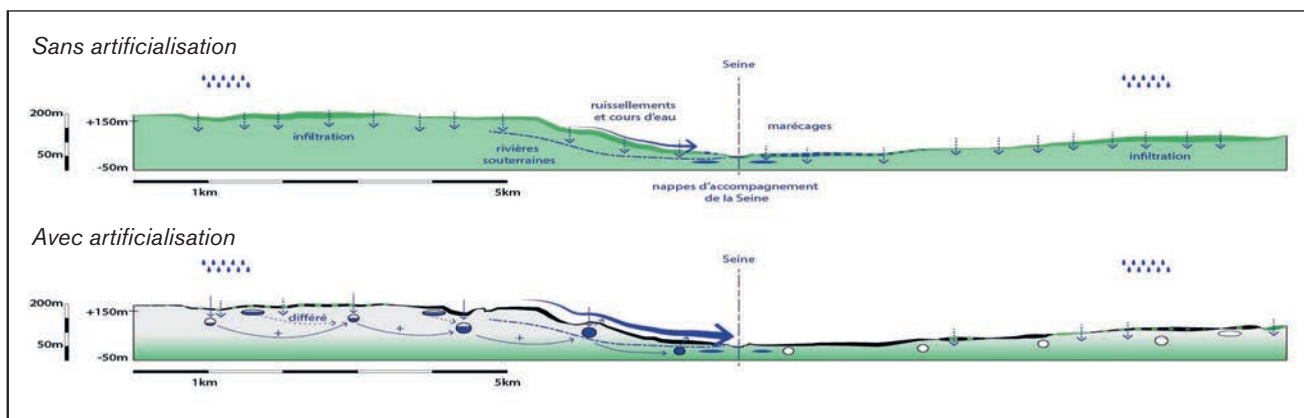


FIGURE 20 : Fonctionnement schématique en coupe du ruissellement sur l'agglomération rouennaise avec et sans artificialisation des sols. Dessin de Céline Fréchet.

ment entraîne par ailleurs dans son sillage les résidus de pesticides et de produits phytosanitaires utilisés pour les besoins agricoles qui participent à la contamination des autres milieux terrestres et aquatiques alentours aussi bien en surface (mares, lacs, cours d'eau) qu'en profondeur (nappes phréatiques) où est puisée l'eau potable.

L'inondation par remontée de nappes

La gestion du risque inondation implique aussi de prendre en compte la remontée de la nappe phréatique qui résulte de plusieurs facteurs. Le plus classique renvoie au volume d'eau excessif à absorber supérieur à la capacité d'accueil de la nappe, une situation due parfois à une forte pluviométrie durant plusieurs mois ou durant des événements pluvieux exceptionnels qui engendrent une recharge exceptionnelle des nappes. Il est à noter également que les nappes n'ont pas toutes la même perméabilité et la même profondeur, et des événements pluvieux, aussi intenses soient-ils, n'engendreront pas forcément une saturation des nappes. Ceci implique un risque moindre de ce type d'inondation pour certaines parties du territoire, notamment au niveau des plateaux où la nappe de la craie est profonde, même si certaines parties sont perchées. À l'inverse, les communes situées au fond de la vallée de la Seine sont plus concernées par ce type d'inondation.

Concernant les nappes d'accompagnement de la Seine (présentes sur la ville de Rouen), un autre facteur important renvoie à l'action des marées. En effet, directement connectées à la Seine à la manière de vases com-

municants, le niveau de ces nappes change avec celui de la Seine. Il est à noter que ce même phénomène d'augmentation du niveau de la Seine est amené à être accentué par l'élévation du niveau marin. Certaines nappes d'accompagnement étant affleurantes, elles débordent rapidement via les sols ne pouvant plus accueillir le surplus d'eau issue de la pluie, ce qui aura pour effet d'accroître davantage les ruissellements.

La submersion marine et l'augmentation des niveaux d'eaux de la Seine

L'augmentation du niveau de la Seine n'est pas seulement en relation au volume exceptionnel de la masse d'eau lors de pluies hors normes qui, n'étant pas ralenties par l'infiltration dans le terrain, ruissellent rapidement vers le fleuve. Il est aussi accentué par la montée du niveau marin qui, au-delà de constituer un danger pour le littoral, ralentit la vitesse d'écoulement de l'eau continentale dans la mer et par conséquent augmente le niveau de l'eau du fleuve. La submersion marine est un type d'inondation côtière, caractérisée par sa rapidité dans un temps relativement court. Elle résulte de conditions météorologiques défavorables, avec des vents forts et des précipitations abondantes, provoquant des houles plus importantes et une surcote maritime¹³. La submersion peut se répercuter sur tout l'estuaire et le cours aval de la Seine jusqu'au territoire de la Métropole Rouen Normandie. Le ralentissement de l'écoulement de la Seine vers la mer, associé aux pressions atmosphériques, engendre une hausse du niveau du fleuve, des débordements et des

inondations sur le territoire métropolitain. Les inondations par submersion marine posent aussi les problèmes de qualité de l'eau, dus à sa turbidité et sa salinité (MRN, PLU, 2020c, Préfet de la région Normandie, 2020a).

Des estimations faites en 2012 par la Société publique locale d'aménagement (SPLA), Rouen Normandie Aménagement, de la CREA¹⁴, afin de visualiser l'impact de la hausse du niveau marin moyen sur l'éco-quartier Flaubert, montre que sur une base d'élévation du niveau de la Manche de 60 cm, la Seine au niveau de la Métropole Rouen Normandie enregistrerait un rehaussement moyen de 32 cm (MRN, PCAET, 2019a, p. 54). Depuis, les projections de l'élévation du niveau marin ont été revues à la hausse et suggèrent que les conséquences à l'échelle de la Métropole seront plus importantes (Kazmierczak, Laignel, et Charrier, 2019). Les récentes modélisations d'ARTELIA, pour le compte d'une étude du Groupement d'Intérêt Public (GIP) Seine Aval et de la DREAL Normandie, s'accordent également sur une aggravation de la vulnérabilité du territoire au risque d'inondations par débordement de la Seine en raison de l'élévation du niveau marin (ARTELIA, 2022 ; GIP Seine Aval, 2022). Le GIP Seine Aval a aussi montré que la retranscription de l'élévation du niveau marin sur les niveaux d'eau de la Seine peut dépendre de plusieurs facteurs : d'une part, selon les coefficients de marée et le débit de la Seine principalement, qui peuvent entraîner un blocage des écoulements fluviaux ; ou encore la baisse de la pression atmosphérique, pouvant entraîner des vents forts et des phénomènes de surcotes (Lemoine, 2015).

¹³ Différence du niveau de la marée par rapport aux prévisions (Refmar, 2013)

¹⁴ La CREA était la Communauté d'agglomération Rouen-Elbeuf-Austreberthe créée le 1^{er} janvier 2010 par le regroupement de quatre structures intercommunales. Elle a été substituée le 1^{er} janvier 2015 par la Métropole Rouen Normandie à la suite de la loi MAPTAM de 2014.

Pistes d'améliorations pour améliorer la gestion de l'eau et du risque inondation

Changer de paradigme sur la gestion des pluies et considérer l'eau comme une ressource précieuse et limitée

Dans la Métropole, les eaux de pluie sont principalement collectées et évacuées par un système de grilles et de canalisations qui n'est pas sans conséquences sur le cycle de l'eau : diminution de l'infiltration de la pluie, augmentation du ruissellement et des écoulements, concentration des polluants et des rejets. Les impacts sur les cours d'eau, les nappes phréatiques, la biodiversité ainsi que sur la sécurité des personnes et des biens sont nombreux. Tout ce surplus d'eau qui ne s'infiltre pas dans le sol fait défaut en période estivale où l'action combinée des fortes températures et de la sécheresse provoque le dépérissement de la végétation en milieu urbain, pourtant indispensable pour offrir un peu de fraîcheur aux citoyens. **Il serait donc nécessaire de considérer désormais l'eau de pluie comme une ressource précieuse à optimiser, et non plus comme un déchet. Dans cette optique, il s'agirait donc revoir la pratique dite de « tout à l'égout » : tout ne peut pas et tout ne doit pas y aller, et notamment l'eau de pluie.** En raison de l'étalement urbain et de l'artificialisation des sols, le besoin d'absorber les pluies intenses en ville a entraîné la construction d'ouvrages de plus en plus coûteux (diamètre de plusieurs mètres, espace pharamineux pour la stocker, des kilomètres à parcourir...), posant en même temps des problèmes de pollution qui est transférée en aval, provoquant la dégradation du milieu récepteur. Au lieu de connecter systématiquement une surface imperméabilisée à une canalisation, favoriser son infiltration à son point de chute permettrait une gestion plus optimale des eaux pluviales et une réduction du ruissellement.

Le « zéro rejet » est une autre forme de réseau séparatif, moins coûteux et plus durable. Ces solutions constituent des éléments d'une ville aux caractères plus bioclimatiques, dont le rétablissement du cheminement de l'eau à travers l'infiltration dans le sol et le maintien de l'eau proche de son point de chute permet de contribuer à la maîtrise des inondations. **Toutefois, l'infiltration suppose des sols perméables que les opérations d'aménagement ont toujours eu tendance à détruire. Il y a donc un vrai enjeu pour mettre en œuvre ces solutions, de réfléchir comment un sol peut être amendé, comment on lui redonne vie, et comment on le rend plus vite poreux.** Pour autant le glissement vers la

notion de zéro rejet est une approche négative. L'eau nécessite d'être travaillée comme une ressource à optimiser pour alimenter les îlots de fraîcheur (forêts, parcs, bois urbains, étangs, lacs, etc.), ou pour être réutilisée dans d'autres cas d'usage (dans les bâtiments par exemple où environ 80 % des pluies peuvent être gérées avec des blocs sanitaires pour des zones d'activités – source Cerema). Aujourd'hui la multifonctionnalité n'est pas encore systématisée dans les aménagements et les opérations d'urbanisme. Il s'agit pourtant d'une réponse aux enjeux bioclimatiques et de réchauffement des villes et un élément d'identité territoriale et de bien-être urbain.

Prendre en compte l'eau à travers les projets d'urbanisme et d'aménagement de l'espace public, et la conception des ouvrages

Prendre en compte le cycle de l'eau et le système hydraulique dans les projets

La France est un pays avec un risque d'inondation important, et l'enjeu majeur a été pendant longtemps uniquement la lutte contre les inondations avec une approche unique et systématiquement hydraulique, tandis que d'autres pays se sont orientés vers une gestion de l'eau plutôt tournée sur la qualité des eaux. Depuis les années 1950-1960, l'eau pluviale est traitée automatiquement comme un déchet qu'il fallait évacuer hors de la ville. Vers les années 1990, un constat¹⁵ faisant état de plus de la moitié des bassins enterrés n'étaient ni connus ni entretenus, a permis l'émergence des premiers métiers de la gestion de l'eau basés sur la gestion des risques d'inondation.

Concernant le territoire de la Métropole, différents documents encadrent la prise en compte du risque sur le territoire (cf rappel du cadre réglementaire au début de cette synthèse). Néanmoins, il est nécessaire de ne pas se limiter aux obligations réglementaires et de penser à la prise en compte du risque de la manière la plus complète possible dans un projet d'aménagement adapté à anticiper au maximum les aléas. En effet, l'adaptabilité d'un territoire constitue sa première force face aux différents risques climatiques, d'autant plus pour les nouveaux aménagements qui, en principe, sont réalisés pour plusieurs décennies, voire des centaines d'années. Anticiper la gestion des eaux et le risque d'inondation en amont des aménagements et sur une échelle globale permet de prendre en compte le fonctionnement hydraulique et le changement climatique à l'échelle pertinente dès les premières phases de réflexion du projet. Par

exemple, pour la submersion marine, une projection de l'aléa à 100 ans est présente dans le PPRi et peut servir de base pour la prise en compte du changement climatique dans les projets d'aménagement dans les vallées fluviales. Ces objectifs nécessitent de ressortir explicitement dès la conception du projet et en faire partie intégrante.

Des espaces publics perméables et adaptables

En aménagement, il est possible de travailler sur des revêtements perméables (substrats et végétations, revêtement poreux, non jointés, des pavés enherbés...). Déjà évoqués dans le chapitre sur les îlots de chaleur urbain, ces aménagements présentent l'avantage de réduire le ruissellement en favorisant l'infiltration de l'eau dans les sols. Selon la méthode choisie, la rétention d'eau varie de 25 à 90 % (source : Cerema).

Gérer les eaux de pluie dans le lieu de leur chute appelle des techniques et des ouvrages qui sont encore considérés comme des techniques alternatives. Ces ouvrages ont la fonction de recueillir les eaux de pluie, de les stocker temporairement, puis de les restituer dans un temps successif au même site, après un éventuel traitement. Cette restitution s'effectue soit par infiltration dans le sol à débit limité ou régulé par l'intermédiaire d'un réseau superficiel ou enterré. Les techniques les plus courantes sont les bassins, les noues et fossés, les tranchées, les puits d'infiltration et les chaussées à structure réservoir :

- Les noues sont des fossés ouverts et enherbés, larges et peu profonds servant à la collecte, à la rétention et/ou à l'infiltration des eaux pluviales alimentant la nappe phréatique et les plantations.
- Les tranchées drainantes et infiltrantes sont des ouvrages superficiels et linéaires remplis de matériaux poreux et capables de stocker temporairement les eaux pluviales. Les tranchées recueillent les eaux de ruissellement en accueillant le volume et le débit pour ensuite les évacuer.
- Les revêtements poreux sont constitués de matériaux non étanches qui facilitent une infiltration diffuse des eaux pluviales dans le sol ou tout simplement avec des pavés/dalles non jointoyées.
- Les jardins de pluie sont des dépressions naturelles ou artificielles végétalisées destinées à retenir les eaux pluviales collectées dans un périmètre allant de la maison individuelle à une opération d'urbanisme d'envergure (quartier par exemple). Par ailleurs, constitués par des rochers et par des plantes adaptées aux sols humides et alimentés uniquement par des eaux pluviales, les jardins de pluie permettent une épuration des eaux avant leur infiltration dans le sol.

¹⁵ Source : ancienne Direction Départementale de l'Équipement (DDE) du Ministère de l'Équipement



Noie sur le quartier de la Luciline recueillant la rivière du même nom, les eaux pluviales du quartier et qui fait office de bassin de rétention dès que les ouvrages d'assainissement sont en charge. Photo de gauche : fonctionnement classique / photo de droite : mis en charge de la noie due au phénomène de crue, d'eau de ruissellement et de remontée de nappe en juin 2016.

© Céline Fréchet

Toutefois cette solution doit être accompagnée d'études préalables afin de vérifier la compatibilité du sol avec ces ouvrages de gestion collectif des eaux de pluie par infiltration. En effet, il a été constaté sur les plateaux du territoire quelques problèmes d'effondrement de terrain avec le développement local du karst amplifié par d'importants volumes infiltrés.

De plus, pour chaque nouvel aménagement il est nécessaire d'intégrer le risque d'inondation, en particulier pour les différents modes de déplacement. Assurer un cheminement hors d'eau lors d'une crue de cours d'eau permet d'assurer une continuité piétonne sécurisée et accessible, (passerelle en bois au sein d'un jardin de pluie, rehaussement d'un cheminement...). Pour limiter les risques d'inondation liés aux ruissellements, il est possible de travailler la perméabilité des liaisons comme les trames vélos/piétons, ou encore de réduire les vitesses d'écoulement par des aménagements qui ralentissent les crues.

Adaptation de l'existant **Désimperméabiliser les sols**

Rendre les sols urbains perméables concourt à l'adaptation au changement climatique des villes sur plusieurs aspects : restauration du cycle de l'eau, recharge de la nappe phréatique et diminution du risque de sécheresse, du ruissellement des pluies et des inondations, limitation de la pollution rejetée dans les milieux aquatique, atténuation des îlots de chaleur urbain via l'évaporation des sols et la transpiration de la végétation, etc.)¹⁶. La mise en œuvre de ce genre d'actions nécessite de mobiliser plusieurs type d'outils ou de leviers. Tout d'abord, il peut s'agir d'outils stratégiques comme établir des dispositions dans le PLUi incitant à préserver des surfaces de l'urbanisation, ou utiliser des outils limitant l'urbanisation, tels que les conventions d'aménagement, ou les cahiers des charges de cession de terrain. Puis, des leviers techniques comme des aménagements favorisant une gestion alternative des eaux pluviales qui, au-lieu de ne faire appel qu'au « tout tuyaux », consistent à récupérer l'eau et à favoriser son infiltration dans le sol (cf partie précédente). Ces actions peuvent être étudiées dans le

cadre de programme de réintroduction des espaces de nature en ville, comme celui que la ville de Rouen réalise actuellement. Enfin, des outils financiers peuvent être mobilisés en sollicitant par exemple l'appui des Agences de l'eau dans le cadre d'introduction de techniques alternatives de gestion des eaux pluviales. Le financement d'opérations d'une autre nature mais dont certains aspects peuvent converger vers l'objectif de la désimperméabilisation des sols peut aussi s'avérer pertinent. Il s'agit d'une évaluation au cas par cas, en fonction des conditions du projet et de son objectif (restauration de continuité écologique, renaturation pour expansion des crues, végétalisation de toitures, friches urbaines en renouvellement, aménagement d'espaces publics).

Les stratégies opérationnelles pour la mise en œuvre de la désimperméabilisation des sols urbains, outre le changement du matériau par un autre plus perméable, consistent en de véritables projets d'aménagements diffus permettant la gestion des eaux de pluie au plus près de leur point de chute. Ceci signifie déconnecter les eaux pluviales du réseau de collecte communautaire pour les insérer dans

¹⁶ Maitriser l'étalement urbain, s.d. ; Neaud C., Salmon D. 2020a

un autre réseau et les réutiliser pour l'irrigation des espaces plantés et pour l'infiltration dans le sol (CEREMA 2019). Plus que considérer l'eau de pluie comme un déchet et la rediriger vers le réseau d'assainissement, il semble plus efficace de penser à une gestion alternative des eaux pluviales qui restaure le cycle naturel de l'eau. Lorsque ces aménagements sont végétalisés, ils remplissent généralement plusieurs fonctions et concourent à plusieurs usages dans la ville, tels que les promenades, les jardins partagés, les aires de jeux pour enfants, etc.

Restaurer les zones humides et les zones d'expansion des crues

Les zones humides représentent environ 2 775 hectares de surfaces sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie¹⁷. Ces zones sont majoritairement situées en aval de Rouen et classées en zone Natura 2000¹⁸ (MRN, PCAET, 2019a, p. 152). Certains types d'espace naturel jouant un rôle dans l'atténuation du ruissellement et des inondations ont progressivement disparu. Les zones humides, les mares, ou les haies et les arbres, ont été substituées par de grandes surfaces agricoles industrielles, commerciales ou dédiées à l'habitat ou à des équipements structurants. Leur préservation et leur (ré)intégration dans les projets d'aménagement du territoire, ainsi que la mise en place de zones d'expansion des crues, constituent des actions prioritaires à intégrer dans chaque aménagement. Les dernières modélisations du GIP Seine Aval et de l'entreprise ARTELIA ont notamment montré l'intérêt des zones d'expansion de crue car celles-ci permettraient de réduire les zones à enjeux en laissant l'inondation de la Seine s'étendre un peu plus sur le lit majeur du fleuve. Ces modélisations ont considéré de supprimer des murets anti-inondation construits au sommet des berges de la Seine qui préviennent les débordements locaux, mais qui augmentent les niveaux d'eaux de pleine mer lors d'une inondation. **Cette suppression engendrerait une diminution du niveau d'eau à Rouen de l'ordre de 10 à 20 cm pour une crue avec une période de retour de 30 ans. Toutefois, cette solution induirait des enjeux politiques, d'égalité et d'équité non négligeables entre les territoires urbains et ruraux (GIP Seine Aval, 2022).**

Récupérer les eaux de pluie

Les nombreuses solutions pour la collecte des eaux de pluies à la source présentent de multiples avantages incitant à son développement. Par exemple, la gestion à la source

par la mise en place de cuves de récupération d'eau de pluie permet de recueillir temporairement les eaux pluviales et ainsi de modérer le phénomène de ruissellement. À l'échelle d'un quartier, *"la mutualisation, dans une cuve de stockage, de l'eau de pluie collectée par plusieurs surfaces de collecte s'avère intéressante en milieu urbain dense et pour des besoins importants en eau de pluie"* (CEREMA, 2018).

De plus, la récupération de l'eau pluviale à son point de chute limite les transferts des polluants par les eaux pluviales et le ruissellement. Enfin, elle permet aussi de pallier une restriction d'eau nécessaire à cause des sécheresses et du manque que cela va impliquer. Aujourd'hui les pratiques spontanées d'habitants ou d'acteurs locaux se transforment petit à petit en leviers d'actions pour les décideurs locaux (mise en œuvre d'une prescription réglementaire, recommandations techniques, aides financières pour l'acquisition d'une cuve, ou projets expérimentaux à plus grande échelle).

Les raisons de ces intérêts proviennent de plusieurs facteurs comme l'émergence d'une sensibilité environnementale dans la population, la diffusion de nouvelles approches concernant l'écoconstruction et l'éco-aménagement via les principes de l'ingénierie écologique, la structuration progressive d'un secteur d'activités du BTP spécifique, et aussi la reconnaissance institutionnelle par des collectivités pionnières (CEREMA, 2018).

Également, les toitures végétalisées visent le stockage de l'eau de pluie. Bien que plus coûteux qu'une toiture classique (environ 1,2 à 1,5 fois plus élevé dus à la surcharge de 50 à 150 kg/m² et à l'entretien successif de la végétation), les toits végétalisés diminuent le volume de l'eau de pluie qui participe au ruissellement, avec des variations notables selon leur composition.

Adapter le bâti

L'adaptation des bâtiments au changement climatique concerne les parties du territoire destinées à une nouvelle urbanisation et le bâti existant (au-delà du PPRI) (Kabra, Arab et Fleury, 2022). Certaines actions simples pourraient être mises en place à la suite d'un diagnostic de vulnérabilité du bâti qui décrirait les travaux à privilégier (remonter les éléments du réseau électrique au-dessus de la côte des plus hautes eaux connues (PHEC), ne pas stocker de produits polluants en dessous des PHEC). L'innovation des nouvelles constructions semble consister en la prise en compte dès la conception des éléments permettant de résister et de protéger les personnes aux

aléas auquel le bâtiment est exposé.

Des stratégies pourraient prendre en compte la préservation du bâti des impacts d'une inondation. D'une part, pour les bâtiments construits en zone inondable et dont le déplacement est impossible, la stratégie pourra être celle de permettre la pénétration des eaux au rez-de-chaussée, mais en déplaçant les parties habitées à un étage supérieur, et de créer une zone refuge toujours accessible. Souvent en sous-sol, mais également en rez-de-chaussée ou alors réalisés en surface sur une couche imperméable, les parkings sont souvent réduits à leur simple usage de stockage de voitures. Nécessaires, ces parkings peuvent devenir un véritable atout pour faire face aux risques d'inondation, notamment les parkings de surfaces qu'ils soient publics ou en zones commerciales. En effet, ces espaces ont une acceptabilité plus forte à l'inondation que des logements ou commerces ou des parkings privés où se trouve la voiture familiale. Réaménagés, ils peuvent devenir une opportunité, notamment au vu de leur surface, pour permettre soit l'infiltration des eaux de pluie avec des surfaces drainantes, soit avec des réserves d'eau permettant d'accueillir les eaux à proximité, à travers des systèmes de noues et de bassins (avec des séparateurs d'hydrocarbure ou autre polluant). Il est également à noter que lors des crues exceptionnelles (relativement prévisibles), ces parkings de surface peuvent être partiellement ou totalement inondés avec une communication adaptée. De manière générale, travailler l'acceptabilité de l'inondabilité des parkings en surface quel que soit le type d'aléa constitue une piste d'amélioration supplémentaire pour la réduction du risque inondation. D'autre part, pour les nouveaux bâtiments ne pouvant pas se construire sur un autre site, l'abandon du rez-de-chaussée (pilotis, parking inondable, etc.) semble se confirmer comme une solution diffuse et praticable. Cependant, la solution qui consiste à construire sur pilotis ne peut permettre la résilience à long terme car la distribution du logement à niveau ainsi que le fonctionnement des services à l'immeuble comme l'assainissement (si non-collectif) doivent être considérés. En l'occurrence, la solution de surélever le rez-de-chaussée suppose uniquement des épisodes d'inondation de courte durée. Enfin, une autre stratégie, très difficile à concevoir et à faire accepter, mais adaptée à un niveau d'inondation d'environ 1 mètre, pourra être celle d'adapter le bâti à la présence de l'eau mais en l'empêchant de pénétrer à l'intérieur du bâti.

¹⁷ Selon le millésime 2019 du mode d'occupation des sols de la Métropole Rouen Normandie.

¹⁸ Natura 2000 est un programme européen en faveur de la préservation de la biodiversité, constitué par un réseau des sites naturels ou semi-naturels de l'Union européenne destiné à protéger des espèces et des habitats remarquables tout en maintenant des activités socio-économiques (www.natura2000.fr).

Conclusion

CARACTÉRISTIQUES DU TERRITOIRE

- Territoire formé par des plateaux calcaires sillonnés par des vallées créées par l'érosion fluviale et sensible au ruissellement
- Système hydrographique centré sur la vallée de la Seine, formant 5 méandres
- Climat tempéré, océanique
- Territoire métropolitain composé à part égale de tissus urbains, d'espaces agricoles et de milieux forestiers
- Tendance à l'étalement urbain porté sur le territoire agricole
- Augmentation des sols artificialisés

CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BASSIN DE LA SEINE À L'HORIZON 2100

- Allongement des périodes de canicule : +10 à +30 jours par an ;
- Augmentation de la température de l'air entre +1°C et +6°C ;
- Ensoleillement plus important ;
- Légère baisse des précipitations moyennes ;
- Augmentation de la fréquence des événements pluvieux extrêmes de +2 à +10% ;
- Élévation du niveau marin : 0,6 à 1,1 m (médiane)
- Diminution du débit des cours d'eau (moyenne annuelle de -10% à -30%, en été de -25% à -45%)
- Baisse de la recharge des nappes (moyenne annuelle de -16% à -30%)

IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

- Augmentation des phénomènes pluvieux extrêmes, du ruissellement, de la vitesse d'écoulement de l'eau en aval et des inondations qui en résultent
- Surcoûts pour adapter le réseau d'assainissement aux eaux de pluies extrêmes
- Augmentation du niveau de l'eau marine et fluviale



CONSÉQUENCES POUR LE TERRITOIRE

- Inondations plus fréquentes par débordement des cours d'eau, par ruissellement dans l'espace public, par remontée des nappes phréatiques et par submersion marine
- Dégradation de l'espace public, des habitations et des activités économiques,
- Risques sanitaires directs (blessures, décès etc.), et indirects (stress post-traumatiques, dépression, etc.) suite à la perte d'un proche, d'un bien ou d'une activité
- Interruption des mobilités et isolement temporaire des quartiers, impacts sur les réseaux viaires et de transport (inondation des trémies et du métro, interruption de lignes de transports)
- Interruption de services d'intérêt communautaire : coupure d'eau potable, d'électricité et de télécommunication
- Arrêt des stations d'épuration avec déversement des effluents

ACTIONS POUR L'ADAPTATION DU TERRITOIRE

Changer de paradigme sur la gestion des pluies et considérer l'eau comme une ressource précieuse et limitée :

- L'eau de pluie ne doit plus être considérée comme un déchet, et tout ne peut pas et ne doit pas aller à l'égoût.
- Repenser la relation entre les modes d'urbanisation et le climat

Prendre en compte l'eau à travers les projets d'aménagement et la conception des ouvrages, et développer des espaces publics perméables

Adapter l'existant :

- Désimperméabiliser les sols où cela est possible afin de favoriser l'infiltration de l'eau et des pluies à leur point de chute,
- Récupérer les eaux de pluie
- Restaurer les zones humides et les zones d'expansion des crues
- Adapter le bâti

Recommandations pour l'amélioration des connaissances

Sur le plan des inondations, la plateforme multirisque développée en partenariat avec l'Université Rouen Normandie permettra d'appréhender plus précisément le risque inondation de la Seine sur le territoire en simulant divers scénarios d'évolution du changement climatique via le principe du *machine learning*. Ce projet de recherche permettra de contribuer à l'amélioration de sa prise en compte dans les opérations d'urbanisme et d'aménagement et dans l'adaptation du bâti existant avec les acteurs du territoire (communes, entreprises dont les industries et le BTP, architectes et urbanistes, aménageurs, promoteurs, bailleurs sociaux, etc.).

Par ailleurs, dans le cadre de ses compé-

tences en matière de gestion de la ressource en eau, la Métropole pilote la réalisation d'un modèle hydrogéologique couvrant l'ensemble des ressources en eau, en partenariat avec le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et l'Agence de l'Eau Seine Normandie. Ce modèle permettra de réaliser des analyses prospectives des impacts du changement climatique sur les capacités de production en eau potable et d'évaluer les conséquences des futurs prélèvements en eau sur les milieux aquatiques et humides. Opérationnel en 2025, cet outil pourrait aussi permettre de suivre la recharge des nappes du bassin versant du territoire.



Références bibliographiques

- ADAGE Environnement, 2020. Rapport environnemental du SDAGE 2022-2027 du bassin Seine Normandie, Eau Seine Normandie, Préfet de la région Île-de-France, 255 p.
- ADEME, 2021. Rafrâchir des villes : des solutions variées, 80 p.
- APUR, 2014. Les îlots de chaleur urbains à Paris, cahier#2, simulation climatique de trois formes urbaines parisiennes et enseignements, 40 p.
- ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013a. Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine - Rapport de l'objectif A : Définition des périodes de retours des événements jouant un rôle dans les inondations. 131p. et annexes.
- ARTELIA, 2022. Modélisation des inondations en estuaire de la Seine : dynamique et emprise des inondations. Etude réalisée pour le GIP Seine-Aval.
- Besancenot J.-P., 2004. Une vague de chaleur meurtrière : les enseignements de l'été 2003 en France, Géoconfluences – DESCO – ENS LSH, Brève, 6. <http://www.ens-lsh.fr/geoconfluence/doc/breves/2004/6.htm>
- Cantat O. 2004. « L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps », in Norois, n. 191, pp. 75-102, <http://journals.openedition.org/noroi/1373>
- CEPRI, 2014, Gérer les inondations par ruissellement pluvial, Guide de sensibilisation, 92 p.
- CEREMA, 2018. L'intérêt de l'utilisation de l'eau de pluie dans la maîtrise du ruissellement urbain. Les enseignements d'un panorama international, 96 p.
- CEREMA 2019a, « Comment intégrer la désimperméabilisation des sols sur son territoire ? L'exemple du Grand », in <https://www.cerema.fr/fr/actualites/comment-integrerdesimpermeabilisation-sols-son-territoire>,
- Chen, A. L., Sun, R. H., & Chen, L. D. (2012). Applicability of traditional landscape metrics in evaluating urban heat island effect. Ying Yong Sheng tai xue bao= The Journal of Applied Ecology, 23(8), 2077-2086.
- Coutts. A.M., White. E.C., Tapper. N.J., Beringer. J., Livesley. S.J. 2015. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. Theoretical Application Climatology. Vol 124. p.55-68.
- Fisson C., Lemoine J.-P., Gandilhon F., 2014. Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine - Synthèse. Etude réalisée par ARTELIA pour le compte du GIP Seine-Aval, 31 p.
- Fisson C. & Lemoine J.P., 2016. Les niveaux d'eau en estuaire de Seine : risque inondation et changement climatique. Fascicule Seine-Aval 3.5, 46 p.
- GIP Seine-Aval, 2022. Tout s'explique : La vallée de la Seine face au risque inondation.
- Gomez F., Tamarit N., Jabaloyes J. 2001. Green zones, bioclimatics studies and human comfort in the future development of urban planning. Landscape and Urban Planning. Vol.55. p. 151-161.
- Gutleben C, Musy M, et al, 2014. Impacts du végétal en ville : Fiches de synthèse, Programme de recherche VegDUD, 61 p.
- Hathway E.A., Sharples S. 2012. The interaction of rivers and urban form in mitigating the UrbanHeat Island effect: A UK case study. Building and Environment. Vol 58. p.14-22.
- INVS, 2003. Impact sanitaire de la vague de chaleur en France survenue en août 2003 Website : http://www.invs.sante.fr/publications/2003/chaleur_aout_2003/index.html
- INVS, Vagues de chaleur de l'été 2003 : relations entre températures, pollution atmosphériques et mortalité dans neufs villes françaises. Rapport d'études. 2004, 44p.
- INVS, novembre 2015. Changement climatique et santé : nouveaux défis pour l'épidémiologie et la santé publique.
- Jacobs C., Klok L., Bruse M., Cortesao J., Lenzholer S., Kluck J. 2020. Are urban water bodies really cooling ? Urban climate. Vol 32. 14 pages.
- Kabra L. S., Arab N., et Fleury F. (2022). Les impacts du changement climatique sur l'architecture dans la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC Local pour la Métropole Rouen Normandie, 32p.
- Kazmierczak L., Laignel B., Charrier F., 2019. La ressource en eau et le risque inondation dans la Métropole Rouen Normandie. Constat et analyse prospective dans un contexte de changement climatique. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, 24 p.
- Ladner J., Legrand C., Kazmierczak L., Charrier F. et al., 2020. Les enjeux de santé publique dans un contexte de changement climatique à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, p. 24.
- Laignel B., Nouaceur Z., 2018. *Évolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie*. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, 24 p.
- Legrand C., Kazmierczak L., Charrier F., 2020. Les impacts du changement climatique sur la qualité de l'air dans la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, 12 p.
- Lemoine J.-P., 2015. Analyse par modélisation de l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer dans l'estuaire de la Seine, Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 34p.
- Ministère de la Transition écologique, 2020a : <https://www.ecologie.gouv.fr/generalites-sur-risque-inondation-en-france>, dernière consultation le 1.12.21
- Ministère de la transition écologique, Guide pratique pour limiter l'artificialisation des sols. Pour un aménagement et une planification plus sobre, s.d.
- Ministère de la transition écologique, Maîtriser l'étalement urbain et préserver les espaces NAF, Fiche outil, Limiter l'imperméabilisation des sols, s.d.
- Mitchell R, Popham F. Effect of exposure to nature environment on health inequalities : an observational population study. Lancet. 2015.
- Monteiro, M. V., Doick, K. J., Handley, P., & Peace, A. (2016). The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London. Urban Forestry & Urban Greening, 16, 160-169.
- MRN, PCAET, 2019a. PCAET (Plan Climat Air Énergie Territorial), Diagnostic, adopté par le conseil métropolitain le 16 décembre 2019, 64 p.
- MRN, PLU, 2020a. PLU, RP, Tome 1, Diagnostic territorial, 309 p.
- MRN, PLU, 2020b. PLU (Plan Local d'Urbanisme), RP (Rapport de présentation), Tome 2, *État initial de l'environnement*, Livre 1, 174 p.
- MRN, PLU, 2020c. PLU, RP, Tome 2, *État initial de l'environnement*, Livre 2, 164 p.
- MRN, PLU, 2020d, PLU, RP, Tome 3. Orientations d'Aménagement et de Programmation.
- Müller N., Kuttler W., Bartlag A.B. 2014. Counteracting urban climate change : adaptation measures and their effect on thermal comfort. Theoretical Application Meteorology. Vol 115. p.243-257.
- Neaud C., Salmon D. 2020a,

Désimperméabilisation et renaturation des sols. Fiche n. 2, Paysage et désimperméabilisation à Marseille : les sols dans le projet urbain durable pour la ville héritée, CEREMA Île-de-France, mars 2020

Nouaceur Z., 2020. Campagne de mesures des paramètres climatiques dans l'agglomération rouennaise (Bilan scientifique - action 1), Université de Rouen - Métropole Rouen Normandie

Ouzeau G., Deque M., Jouini M., Planton S., Vautard R., Vrac M., 2014. Scénarios régionalisés. Le climat de la France au XXI^e siècle, Vol. 4, Rapport de la mission Jean Jouzel, ministère de l'écologie, développement durable, transports et logement, 62 p.

Perrin G., 2020. Rafrâichissement urbain et confort d'été. Lutter contre les canicules, Édition Dunod, 168 p.

Peng J., Liu Q., Xu Z., Lyu D., Du Y., Qiao R., Wu J. 2020. How to effectively mitigate urban heat island effect ? A perspective of waterbody patch size threshold. *Landscapes*

and Urban Planning. Vol 202. 10 pages.

Préfet de la région Normandie, 2020 a. Le Climat en Normandie, 96 p., http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/20201110_profil_climat-eb.pdf

Préfet de la région Normandie, 2013. La Normandie s'adapte au changement climatique.

PUCA, 2013. Vers des politiques publiques de densification et d'intensification "douces"? Intérêts, limites et opportunités, 26 p.

Refmar, 2013, http://refmar.shom.fr/fr/applications_maregraphiques/niveaux-extremes, dernière consultation le 1.12.2021

Rey F., 2018, Restaurer les milieux et prévenir les inondations grâce au génie végétal, éditions Quae, Versailles, 114 p.

Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P. R., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, D., & Synnefa, A. (2017). Passive and active cooling for the outdoor built environment. Analysis and assessment of the cooling potential of

mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 154, 14–33.

Savary M. (2022). Analyse synthétique des effets du changement climatique sur les mobilités dans la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC Local pour la Métropole Rouen Normandie, 24p.

Steenekveld G.J., Koopmans S., Heusinkveld B.G., Theeuwes N.E. 2014. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. *Landscapes and Urban Planning*. Vol 121. p. 92-96.

Terrin J-J, 2014. Villes inondables, préventions, adaptation, résilience, collection la ville en train de se faire, Marseille, Éditions Parenthèses, 288 p.

Terrin J-J, 2015. Villes et changement climatique. Îlots de chaleur urbains, Marseille, Éditions Parenthèses, 288 p.

[illegible]

[illegible]

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il doit être cité selon la forme suivante :

Fréchet C., Tullifer L., Balducci V. (2023). Les pratiques d'urbanisme et l'aménagement du territoire de la Métropole Rouen Normandie à l'épreuve des défis posés par le changement climatique. Rapport du GIEC Local pour la Métropole Rouen Normandie, 44p.

Le GIEC Local ne serait en aucune façon responsable des interprétations, productions intellectuelles, et publications diverses résultant des résultats de leurs travaux et pour lesquelles il n'aurait pas donné d'accord préalable.

Le GIEC Local est un groupe d'experts créé dans le cadre de la COP21 Rouen Normandie animée par la Métropole Rouen Normandie. Les experts proviennent des structures suivantes :



CONTACT

Léo KAZMIERCZAK - Chargé de projet climat

leo.kazmierczak@metropole-rouen-normandie.fr

Charlotte CÉLESTIN - Responsable de projets PCAET

charlotte.celestin@metropole-rouen-normandie.fr