



HAL
open science

Les impacts du changement climatique sur l'architecture dans la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC Local pour la Métropole Rouen Normandie.

François Fleury, Noura Arab, Lamia Solh Kabra

► To cite this version:

François Fleury, Noura Arab, Lamia Solh Kabra. Les impacts du changement climatique sur l'architecture dans la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC Local pour la Métropole Rouen Normandie.. La Métropole Rouen Normandie. 2022. halshs-03562554

HAL Id: halshs-03562554

<https://shs.hal.science/halshs-03562554>

Submitted on 9 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ARCHITECTURE DANS LA MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE

Lamia Solh Kabra, Noura Arab, François Fleury

Modalités d'intervention sur le document, soumis pour expertise à Raphaël Labrunye : merci de ne rien supprimer, mais soit d'utiliser la fonction "commenter", soit le mode d'édition "suggestion".

Table des matières

1. Problématique générale	5
1.1 Contexte	5
1.2 Qu'entend-on par "architecture"?	6
1.3 Spécificités métropolitaines	7
2. Impacts du changement climatique sur l'architecture	8
2.1 Aléas vague de chaleur et canicule	8
2.1.1 Caractérisation de l'aléa	8
2.1.2 Facteurs urbains aggravants	9
2.1.3 Impacts sur le bâti	9
2.1.4 Impacts sur le confort intérieur et le comportement des occupants	11
2.1.5 Consommation énergétique et impacts économiques	13
2.1.6 Impacts indirects sur la production architecturale	14
2.2 Aléas sécheresse et retrait-gonflement des argiles	14
2.2.1 Caractérisation de l'aléa	14
2.2.2 Impacts sur le bâti	16
2.2.3 Impacts sur le confort et le comportement des occupants	16
2.2.4 Conséquences économiques	17
2.3 Aléa inondation	17
2.3.1 Caractérisation de l'aléa	17
2.3.2 Impacts sur le bâti	19
2.3.3 Impacts sur le comportement des habitants	20
2.3.4 Impacts économiques	20
3. Adaptation de l'architecture au changement climatique	21
3.1 Faire face aux vagues de chaleur	21
3.1.1 Principes généraux de la thermique d'été	21

3.1.2 Principes d'adaptation	22
3.2 Faire face au phénomène de sécheresse	25
3.2.1 Maîtriser la teneur en eau	25
3.2.2 Renforcer les structures	26
3.3 Faire face aux inondations	26
3.3.1 Eviter	27
3.3.2 Résister	28
3.3.3 Céder	28
4. Application au cas de la Métropole Rouen Normandie	30
4.1 Impacts	30
4.1.1 Connaissance du bâti	30
4.1.2 Modélisation de la vulnérabilité	31
4.1.3 Limites des approches de type performance énergétique	31
4.1.4 L'habitant	32
4.2 Adaptation	32
4.2.1 Modèles d'optimisation	32
4.2.2 Evaluation de scénarios	33
4.3 Adaptation atténuante	34
4.3.1 Conception bio-climatique	34
4.3.2 Éco-matériaux	34
4.3.3 Directions de recherche	35
5. Tableaux synthétiques	38
5.1 Tableau récapitulatif aléa Vague de chaleur	38
5.2 Tableau récapitulatif aléa Sécheresse et RGA	39
5.3 Tableau récapitulatif aléa Inondations	40
6. Bibliographie	41

1. Problématique générale

1.1. Contexte

Le fait de considérer l'adaptation de l'architecture au changement climatique et non plus seulement sa contribution à l'atténuation du dérèglement modifie la perspective et oblige à intégrer très concrètement un ensemble de problématiques nouvelles, qu'il s'agisse d'évaluer le coût de la non-adaptation, d'envisager des scénarios de gestion de crise, ou de mieux prendre en compte la thermique d'été. D'un point de vue philosophique, la confrontation à la nécessité de l'adaptation secoue en profondeur la société, qui doit désormais autant se protéger elle-même que protéger l'environnement, et ceci de manière urgente. On peut ainsi penser que bien des hiérarchies de valeurs seront remises en cause, ouvrant sur des doctrines nouvelles de l'action publique.

L'évaluation du risque associé aux impacts du changement climatique sur l'architecture suppose d'évaluer l'aléa¹, les enjeux² et la vulnérabilité³ du territoire.

La caractérisation de l'aléa pour les communes de la Métropole fait l'objet de la fiche de synthèse *Évolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie* (Laignel et al. 2018), qui indique qu'il n'y a pas de tendance significative concernant les phénomènes impliquant le vent, ni pour les quantités moyennes de précipitations. En revanche, ce rapport affirme que :

- "L'îlot de chaleur urbain devrait se renforcer", avec "des périodes de canicule plus fréquentes". [...] Le nombre de jours de canicule en Normandie qui est compris entre 0 et 10 jours aujourd'hui pourrait passer de 10 à 30 jours en 2100". Le pourcentage de sécheresse suit la même tendance.
- "En France métropolitaine, la majorité des modèles prévoient une augmentation généralisée du taux de précipitations extrêmes, avec des valeurs relativement faibles pouvant toutefois dépasser localement les 5% voire 10% à l'horizon 2071-2100. En Normandie, les scénarios pour un horizon proche (2021-2050) montrent une hausse du nombre de jours de fortes précipitations qui varie entre 0 et + 1 à l'intérieur des terres."

Ces aléas présentent différents enjeux. Les épisodes de canicule affectent davantage les zones à forte densité bâtie, mais la métropole dans son ensemble est concernée, avec des enjeux humains et économiques importants. La déshydratation et la fatigue associées aux canicules peuvent avoir de graves conséquences sur la santé, dégradent la qualité de vie, affectent l'activité économique, et peuvent conduire à des taux de surmortalité non négligeables. D'un autre côté, les épisodes de sécheresse conduisent à des dommages aux

¹ Un aléa climatique est un événement ou phénomène naturel plus ou moins prévisible, hors de contrôle. On décrit un aléa par sa nature, sa localisation, sa fréquence (probabilité et/ou date d'occurrence) et son intensité. Le changement climatique augmente l'intensité et la fréquence de certains d'entre eux, en fonction du territoire considéré.

² L'enjeu mesure l'exposition des populations, milieux et activités à l'aléa. A titre d'exemple, selon la définition classique du risque, l'enjeu humain et économique associé à un cyclone de très forte intensité peut être nul s'il se produit dans une zone inhabitée.

³ La vulnérabilité caractérise le degré auquel un système peut être affecté négativement par l'aléa. La vulnérabilité d'un territoire dépend de multiples facteurs, dont l'aménagement du territoire, l'occupation des sols, les activités économiques locales, l'existence d'infrastructures de protection, la structure par âge et le niveau de vie des ménages, etc.

édifices associés aux mouvements des fondations provoqués par le phénomène de retrait et gonflement des argiles. L'enjeu associé à l'augmentation du nombre de jours de précipitations extrêmes est quant à lui limité aux zones inondables. Ces enjeux sont décrits plus précisément dans la partie 2, qui inventorie les impacts sur l'architecture pour chacun de ces trois aléas.

Enfin, la vulnérabilité du territoire dépend directement des qualités de son architecture, celles du bâti et celles des espaces qu'elle crée. La connaissance de ces facteurs de vulnérabilité est essentielle pour élaborer des stratégies d'adaptation qui feront l'objet de la partie 3.

1.2. Qu'entend-on par "architecture"?

La description des impacts potentiels du changement climatique sur l'architecture ne peut pas suivre la même méthodologie que si l'on s'intéressait uniquement au bâti ou à un composant "naturel" du milieu. En tant qu'expression de la culture et résultat d'une démarche de conception nourrie de subjectivité, l'architecture n'est qu'en partie déterminée par son environnement physique. Il serait cependant théoriquement possible de décrire l'impact sur ses composants matériels, voire également sur les paramètres physiques du confort qu'elle offre - tels que la température intérieure ou l'humidité dans l'air - à condition de ne considérer que les édifices déjà présents et de réduire l'habitant à un ou plusieurs scénarios d'occupation (manipulation des fenêtres et occultations, commande des équipements, recours à des dispositifs palliatifs, etc).

Si donc il est bien question d'architecture, il faudrait également évaluer l'impact du changement climatique sur l'expression architecturale, sur cette dimension subjective, difficile à chiffrer, mais indispensable à un environnement accueillant, rassurant et stimulant. Sur un territoire qui présente un patrimoine diversifié, riche en valeurs (historique, artistique, sociale, etc.) et qui contribue à son attractivité, c'est un élément important à considérer. En effet, le changement climatique peut indirectement avoir une influence sur l'expression architecturale à chaque fois qu'une intervention sur l'existant ou la conception neuve le prend en compte. Il a déjà été montré, par exemple, qu'une attention accrue à la thermique d'été est susceptible de modifier les formes architecturales (Arab 2021). Il s'agit donc bien d'un impact potentiel, même s'il est indirect.

Toujours d'un point de vue théorique, on peut penser que le changement climatique est susceptible d'influencer les impacts de l'architecture sur l'environnement lors des différentes phases de son cycle de vie. Une telle approche doit permettre d'envisager l'adaptation comme une intervention qui minimise ses impacts sur l'environnement, et en particulier sur les émissions de gaz à effet de serre. Cette ouverture de la question paraît nécessaire quand on constate l'accélération des installations de climatiseurs dans les commerces, bureaux et logements privés lors de chaque canicule.

Enfin, dans l'objectif de couvrir par ces fiches de synthèse le maximum de systèmes potentiellement impactés, il semble également intéressant d'appréhender l'architecture

comme une activité économique, impliquant un réseau d'acteurs complexe qui, au-delà de la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'oeuvre, des artisans et entreprises de construction, inclut les bureaux d'étude et de contrôle, les habitants, les collectivités, les filières de production de matériaux et fournisseurs d'énergie, les compagnies d'assurance, etc.

1.3. Spécificités métropolitaines

En première approximation, il est raisonnable de penser que les effets sur l'architecture des aléas identifiés sur la métropole de Rouen (canicule, sécheresse, précipitations extrêmes) seront similaires partout où ces aléas sont similaires. C'est pourquoi cette synthèse porte d'abord sur les impacts potentiels et facteurs de vulnérabilité tels qu'ils ont déjà été identifiés de façon générale - indépendamment du lieu - pour les aléas en question.

Il est cependant évident que les spécificités locales en matière d'architecture, de ressources, de savoir-faire et de modes d'habiter vont influencer l'importance des impacts et les orientations vers l'adaptation. Même si des typologies ont déjà été identifiées par période de construction (Gauthiez 1991), et que le patrimoine remarquable de Rouen soit renseigné dans une certaine mesure (Pérouse de Montclos 2013, Chaline 2006, 2013, par exemple), il n'existe en revanche à notre connaissance ni d'étude de leurs comportements thermiques ou thermo-hydriques, ni de caractérisation quantitative du bâti sur le territoire de la Métropole.

Si les ressources et savoir-faire locaux auront conditionné en partie les systèmes constructifs d'avant guerre, c'est beaucoup moins le cas pour la reconstruction et après. Cependant dans l'hypothèse où la préoccupation environnementale se traduit en partie par une plus grande attention portée à l'intégration des édifices dans leur contexte local, on peut imaginer une forme de réappropriation de ces cultures constructives pour faire face au changement climatique.

Enfin concernant les modes d'habiter, nous n'avons pas connaissance non plus d'étude en sociologie de l'énergie ou en psychologie de l'environnement qui puisse aider à identifier une spécificité rouennaise. Rappelons simplement que la souffrance des populations lors des vagues de chaleur dépend non pas des températures absolues, mais de l'intensité de *l'écart* à la moyenne des températures, et qu'en conséquence la Normandie n'est pas à l'abri de tels risques.

2. Impacts du changement climatique sur l'architecture

2.1. Aléas vague de chaleur et canicule

2.1.1 Caractérisation de l'aléa

La vague de chaleur est l'un des aléas climatiques les plus préoccupants au regard de la vulnérabilité des populations exposées, notamment à cause de la hausse de la fréquence et de l'intensité des épisodes de fortes chaleur dans les prochaines décennies et leurs conséquences sur la santé et le cadre bâti.

Selon l'ONERC (2018) et Météo France⁴, les vagues de chaleur se caractérisent par un temps particulièrement chaud qui perdure sur au moins deux à trois jours, avec des températures maximales supérieures aux normales saisonnières de la région .

La persistance des vagues de chaleur (nombre de jours chauds) et leurs intensités (niveaux de température) sont spécifiques à chaque région. L'évolution récente des températures en Normandie indique une augmentation significative de la température atmosphérique depuis les années 1980. D'après les projections basées sur le scénario RCP8.5 sans politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO₂, cette hausse pourrait être comprise entre +2 et +4°C à l'horizon 2100 (Laignel 2018). En outre, ce réchauffement s'accompagnerait d'une augmentation du nombre de jours dont la température maximale serait supérieure à 25°C, et d'une diminution des jours de gel et de neige (DREAL Normandie 2020).

Le réchauffement climatique se caractérise également par une augmentation des événements caniculaires. Le Plan national canicule (PNC)⁵ définit la canicule comme un épisode de températures élevées, de jour comme de nuit, sur une période prolongée durant laquelle les moyennes glissantes sur trois jours des températures minimales et des températures maximales atteignent voire dépassent des seuils définis pour chaque département. En Seine Maritime, ces seuils sont atteints lorsque les températures ne descendent pas sous le seuil de 18°C (IBM min) pendant au moins 3 nuits, et dépassent le seuil de 33°C (IBM max) en journée⁶.

Selon la synthèse du GIEC local *Évolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie* (Laignel 2018), "le nombre de jours de canicule en Normandie qui est compris entre 0 et 10 jours aujourd'hui pourrait passer de 10 à 30 jours en 2100".

Les seuils d'alerte départementaux peuvent être atteints plus rapidement en milieu urbain à cause de facteurs aggravants de la chaleur.

⁴ <https://meteofrance.com/changement-climatique/observer/changement-climatique-et-vagues-de-chaleur>

⁵ Plan de gestion de canicule national 2020 :

<https://www.seine-maritime.gouv.fr/Politiques-publiques/Sante/Actualites/Plan-de-gestion-de-canicule-national-2020-Information-s-recommandations-et-consignes>

⁶ Seuil d'activation de la vigilance orange canicule :

<https://www.francebleu.fr/infos/climat-environnement/infographie-canicule-les-seuils-pour-que-la-vigilance-orange-soit-activee-d-epartement-region-pres-de-1532422818>

2.1.2 Facteurs urbains aggravants

L'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) est un phénomène physique qui amplifie les effets de la vague de chaleur. Les conditions météorologiques régionales (température, humidité de l'air, vent) d'une part et les caractéristiques propres du milieu urbain (nature des matériaux, formes urbaines, absence de végétation et de points d'eau, sources anthropiques de chaleur) d'autre part, favorisent l'émergence et l'intensification des îlots de chaleur urbains (OID 2020a ; ADEME 2012).

L'ICU se caractérise par des températures plus élevées au sein des zones urbaines denses comparativement aux zones rurales environnantes qui profitent d'un refroidissement plus rapide. Ce phénomène résulte de la restitution durant la nuit de la chaleur emmagasinée au cours de la journée par les surfaces et les volumes du cadre bâti exposés au rayonnement solaire (Nouaceur 2020 ; ADEME 2012). L'ICU se manifeste plus intensément la nuit que le jour, et la différence de température entre le centre ville et les périphéries peut atteindre 12°C dans les grandes agglomérations (DREAL Normandie 2020 ; ONERC 2018 ; ADEME 2012).

La chaleur absorbée par les surfaces exposées au rayonnement solaire est restituée à l'environnement en partie par réflexion durant le jour et en partie par réémission dans l'infrarouge. La ville dense est composée de multiples surfaces constituant des obstacles pour l'énergie renvoyée qui se retrouve piégée comme dans le cas des canyons urbains (Salagnac, 2015). Il en résulte une évacuation de la chaleur moins rapide en zone urbaine qu'en périphérie, ce qui contribue au maintien de températures nocturnes élevées aggravant les effets de la vague de chaleur. Par ailleurs, la densité et la morphologie urbaine font obstacle au vent qui pourrait évacuer une partie de la chaleur (ADEME 2012).

Dans une perspective d'adaptation au changement climatique, il apparaît nécessaire de prendre en compte l'ICU dans les projets d'aménagements urbains via les documents de planification territoriale (SCOT, PCAET, PLU, CPAUPE, etc.), d'autant plus que ce phénomène risque de s'intensifier à l'avenir avec l'augmentation des vagues de chaleurs et des canicules (Nouaceur, 2020). Les impacts du phénomène d'îlot de chaleur urbain sont davantage abordés dans la synthèse du GIEC local sur la thématique de l'urbanisme.

2.1.3 Impacts sur le bâti

Les vagues de chaleur sont théoriquement susceptibles d'avoir une influence sur les contraintes dans la structure, l'intégrité et le bon fonctionnement des réseaux et équipements, ainsi que sur l'état des différents matériaux de construction dans l'édifice. Les dégâts spécifiquement associés au retrait-gonflement des argiles en période de sécheresse sont décrits plus loin (chapitre 2.2.2).

Charges mécaniques non prévues sur les structures

Des différences de température d'une zone à l'autre de la structure (extérieur/intérieur, ensoleillée/à l'ombre, sol/structure) génèrent des dilatations thermiques différentielles qui

peuvent se traduire par des efforts internes dont il faut tenir compte dans la conception et le dimensionnement.

Les édifices en France sont dimensionnés pour les variations de température d'origine climatique selon les charges spécifiées par l'Eurocode 1, partie 1-5⁷ qui renvoie à l'annexe nationale⁸ pour ce qui est de la spécification des températures à considérer. La température maximale considérée pour chaque département est donnée avec une probabilité annuelle d'être dépassée de 0,02 (équivalant à une période moyenne de retour de 50 ans). La version applicable aujourd'hui date de 2008, et ne tient donc pas compte de l'impact du changement climatique des 14 dernières années.

Si l'Observatoire de l'immobilier durable⁹ (OID) et Salagnac¹⁰ mentionnent tous les deux ces effets potentiels sur les structures, en revanche ce dernier estime que "Les températures extrêmes affectent peu de manière directe les ouvrages de bâtiment".

Impacts sur le second oeuvre

Les mêmes dilatations thermiques différentielles peuvent affecter les éléments du second oeuvre, en particulier les systèmes constitués en partie de métal, matériau ayant un fort coefficient de dilatation thermique. Ainsi la même *fiche aléa - vague de chaleur* du projet "Bat-ADAPT" de l'OID indique comme impacts possibles la "détérioration des structures, enveloppes et réseaux de plomberie à l'origine de fuites : fissuration des bétons, dilatation des composants métalliques et matériaux de couverture (toitures en zinc, plomb), craquelure des enduits".

Dans un tout autre registre, les équipements de production de froid (climatiseurs, réfrigérateurs, congélateurs) sont davantage sollicités et ceux dont le fonctionnement produit de la chaleur (ordinateurs, micro-ondes, etc) ont plus de mal à l'évacuer, ce qui peut conduire à des arrêts ou dysfonctionnements.

Impacts sur les matériaux biosourcés et géo-sourcés

Le comportement mécanique du bois de structure dépend de la température et de son taux d'humidité, lequel varie avec l'humidité de l'air ambiant. Selon Kherais et al., la résistance d'un élément en bois baisse quand la température de l'air dépasse 35°C et lorsque son taux d'humidité est inférieur à 10%. De son côté, Ranta-Maunus¹¹ affirme qu'une exposition prolongée à des températures supérieures à 60°C conduit à un endommagement du bois et une réduction irréversible de sa résistance. Il n'est pas impossible d'imaginer que dans certains combles, cette température puisse être atteinte lors de canicules importantes, ou que d'autres phénomènes tels que la fissuration ou du jeu dans les assemblages puissent apparaître.

⁷ Norme NF EN 1991-1-5, Mai 2004, P06-115-1

⁸ NF EN 1991-1-5/NA (février 2008)

⁹ Fiche aléa vague de chaleur Bat-ADAPT

¹⁰ Salagnac, 2015, p.18

¹¹ Ranta-Maunus A. Effects of Climate and Climate Variations on Strength, In Timber Engineering (editors: Thelandersson S, Larsen HJ) John Wiley, UK, 2003, pp: 153-167.

La terre crue de la bauge et du torchis, techniques répandues en Normandie, est le siège de variations hygrométriques au rythme des périodes de pluie et de sécheresse. Alors qu'il existe de nombreux travaux qui décrivent le phénomène de fissuration lors du séchage de la terre crue en fonction des formulations des différents mélanges, de la température et de l'humidité ambiantes, nous n'avons en revanche rien trouvé sur le comportement de murs ou de parements existants lors de vagues de chaleur prolongées. Considérant que l'exposition d'éprouvettes de terre crue stabilisée (par du ciment) compactée à des cycles de d'humidification-séchage conduit à une réduction de la résistance en compression (Hakimi et al. 1998), on peut penser que l'augmentation des fréquences et amplitudes de tels cycles pourrait également fragiliser des murs ou parements en terre crue non stabilisée.

On peut étendre ces interrogations aux matériaux biosourcés poreux et hygroscopiques, même si, comme pour les matériaux ci-dessus, leur mise en œuvre séculaire dans des climats plus chauds ne posent pas de problèmes particuliers. Il se peut en effet que les variantes constructives locales qui permettent ces adaptations fines au climat ne soient plus tout-à-fait optimisées pour les changements climatiques rapides en cours.

2.1.4 Impacts sur le confort intérieur et le comportement des occupants

Le confort thermique intérieur est directement impacté par l'intensité de la chaleur, et les effets des canicules sont aggravés en zone urbaine par le phénomène d'îlot de chaleur (voir 2.1.2). Les impacts sanitaires du changement climatique sont davantage développés dans les synthèses du GIEC local sur les thématique de la santé et de la qualité de l'air.

Impacts sur le confort intérieur

En période de fortes chaleur, la température intérieure peut atteindre voire dépasser les températures extérieures, créant une ambiance thermique difficilement acceptable dans la durée par les occupants, en fonction de leurs capacités d'adaptation. En ce sens, la sensibilité à la baisse du confort thermique dans les bâtiments dépend d'une part de la performance thermique du bâtiment et d'autre part de la capacité de thermorégulation humaine (comportementale et physiologique) et du ressenti de l'individu. L'interprétation du confort varie d'un individu à un autre et dépend entre autres de sa subjectivité, de son rapport culturel à la chaleur et son degré de tolérance, de son niveau d'activité, de son type d'habillement, de sa condition physique (ADEME 2012 ; Bornarel et al. 2014 ; SGAR Haute et Basse-Normandie 2013).

En période de canicule, les faibles écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur d'une part et entre le jour et la nuit d'autre part, ne permettent pas un rafraîchissement rapide des locaux par la ventilation naturelle (OID, 2020a ; ADEME, 2012). De plus, la nécessité d'ouvrir les fenêtres pour ventiler pendant la nuit peut exposer les occupants à des nuisances sonores qui dégrade leur confort acoustique, notamment au sein des locaux de sommeil, ce qui peut avoir pour incidence de limiter le recours à la surventilation nocturne (Bouchet & Carretero 2018 ; Bouchet 2017). Le recours à la climatisation accentue l'effet d'îlot de chaleur urbain par le rejet d'air chaud vers l'extérieur et de ce fait, aggrave localement l'impact de la vague de chaleur (Salagnac 2015 ; ADEME 2012).

Impacts sur la santé

La canicule de 2003, caractérisé par des températures journalières maximales et minimales particulièrement élevées par rapport aux périodes estivales précédentes, s'est accompagné d'une vague de surmortalité inédite qui a mis en évidence l'impact sanitaire des vagues de chaleur sur les populations exposées (NVS 2004 ; ADEME 2012 ; Salagnac 2015). Des événements d'une telle intensité pourraient devenir plus fréquents dans les prochaines décennies (Laignel 2018), conduisant à une augmentation significative de la mortalité en période estivale (ONERC 2018).

En période de canicule, on observe une dégradation progressive de l'état physiologique des individus avec l'apparition de symptômes plus ou moins sévères, tels que déshydratation sévère, crampes de chaleur, syncope, épuisement thermique, hyperthermie. Les effets varient d'une personne à l'autre¹² et les plus vulnérables sont les personnes âgées, les personnes atteintes de certaines maladies chroniques (diabète, insuffisance respiratoire, maladies cardio-vasculaires...), les nourrissons et enfants en bas âge, les femmes enceintes, les personnes handicapées, les personnes isolées, dépendantes ou précaires, et les travailleurs exposés à la chaleur à l'extérieur ou à l'intérieur (ADEME 2012 ; Salagnac 2015 ; Ladner 2020).

La chaleur favorise la stagnation des masses d'air en ville et la concentration des polluants dans l'air (ozone, particules fines, pollens et autres aéro-allergènes), ce qui peut aggraver les effets des maladies respiratoires chroniques tel que l'asthme, voire augmenter le risque de développement de pathologies chroniques plus sévères à long terme tels que le cancer du poumon ou des maladies cardio-respiratoires (ADEME 2012 ; DREAL Normandie 2020). Par ailleurs, en cas de vague de chaleur les individus passent la majorité de leur temps dans des espaces clos (logement, lieu de travail) pour se protéger des fortes températures extérieures et des pics de pollution récurrents. Or une mauvaise aération de ces espaces a pour conséquence la dégradation de la qualité de l'air intérieur. La chaleur et l'humidité favorisent la multiplication des acariens et des moisissures, mais également l'émission dans l'air ambiant de certaines substances chimiques contenues dans les matériaux de construction ou les équipements tel que le formaldéhyde, particulièrement utilisé dans la fabrication des panneaux de bois agglomérés, l'isolation ou les parquets (ADEME 2012 ; DREAL Normandie 2020 ; Ladner 2020).

Impacts sur les usages et les comportements

La durée et la qualité du repos d'un individu sont fortement dégradées par les températures nocturnes élevées (ADEME 2012), ce qui engendre une sensation continue de fatigue pouvant avoir des conséquences sur son état psychologique (difficulté de concentration, irritabilité), mais également sur son comportement (réduction de l'activité en milieu de journée, modification des habitudes vestimentaires et alimentaires). Par exemple, le recours exclusif à la climatisation pour se rafraîchir peut induire un comportement passif des usagers

¹² Les individus sont-ils tous égaux face à la chaleur ? (2019, juin 13). Santé publique France. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaleurs-canicule/articles/les-individus-sont-ils-tous-egaux-face-a-la-chaleur> Consulté le 25/11/2021.

face à la régulation de leur confort thermique, les dispensant de prendre d'autres mesures de précaution ou d'adaptation à la chaleur (Bornarel et al. 2014).

Lors d'une vague de chaleur, les usagers peuvent être contraints à un confinement prolongé dans des bâtiments plus ou moins adaptés (logement, lieu de travail) pour se protéger de la chaleur (Bornarel et al. 2014). La liberté de déplacement des individus est de fait dégradée par la persistance de fortes températures en extérieur, ce qui peut provoquer un sentiment d'enfermement (OID 2020a). Par ailleurs, les individus auront naturellement tendance à vouloir se protéger et se rafraîchir en recherchant des espaces ombragés et frais, et ce notamment pendant les heures les plus chaudes de la journée. En milieu urbain, les individus investissent massivement les équipements publics ouverts climatisés ou naturellement frais pour se réfugier de la chaleur tels que les centres commerciaux, les musées, les bibliothèques, ou les lieux de culte. De la même manière, les espaces verts, les points d'eau (fontaines, bassins, jets d'eau) et les berges sont utilisés comme refuges par les populations vulnérables (personnes âgées, enfants) pour atténuer l'impact de l'effet d'îlot de chaleur (OID 2020a ; ADEME 2012).

2.1.5 Consommation énergétique et impacts économiques

L'intensification des vagues de chaleur entraîne une augmentation de la demande énergétique estivale, liée notamment à une utilisation accrue des climatiseurs et ventilateurs, ainsi qu'à l'augmentation du nombre de douches (dont l'eau reste chauffée). Cette surconsommation énergétique est la manifestation de l'adaptation spontanée des occupants et peut engendrer l'apparition de pics de consommation pendant les épisodes caniculaires (Perrin 2020 ; OID 2020a ; Salagnac 2015 ; SGAR de Haute et Basse-Normandie 2013). Selon l'étude *La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires* (CODA Stratégies 2021), le taux de climatisation atteint près de 34% dans la zone climatique H1a qui englobe une grande partie de la région Normandie. La faible qualité thermique de certains bâtiments résidentiels et tertiaires les rend particulièrement vulnérables à l'augmentation des températures (ADEME 2012). Il en résulte une augmentation en constante progression de l'usage de la climatisation, avec par exemple un taux d'équipement des ménages qui est passé de 14% en 2016 à 25% en 2020¹³. Les systèmes de climatisation impactent d'ores et déjà l'environnement à travers les consommations d'énergie et les émissions de GES. Ainsi, le cumul des consommations énergétiques de la climatisation de confort pour les secteurs résidentiel et tertiaire est estimé à près de 15 TWh en 2020, générant des émissions de CO2 évaluées à 0,9 millions de tonnes annuelles (CODA Stratégies 2021).

En matière d'économie de la construction, les événements de fortes chaleurs ont également pour incidence le ralentissement voire l'arrêt des chantiers et des travaux de construction pour préserver la santé et la sécurité des travailleurs du BTP, ce qui peut entraîner des pénalités de retard de chantier (OID 2020a ; INRS 2018).

¹³

<https://presse.ademe.fr/2021/06/la-climatisation-vers-une-utilisation-raisonnee-pour-limiter-limpact-sur-lenvironnement.html>

2.1.6 Impacts indirects sur la production architecturale

"L'architecture change parce que le monde change", comme l'écrit Pascale Mira dans sa thèse (Mira 2015) qui propose un système d'organisation des idées associées à la préoccupation environnementale que l'architecture est susceptible d'exprimer. Par ailleurs, l'architecture peut changer sous cette même influence sans pour autant que cela se manifeste dans l'expression. Noura Arab (Arab 2021) montre par exemple que les différentes réglementations thermiques depuis 1974 n'ont eu que très peu d'influence sur l'architecture du logement social collectif, et que ce n'est qu'à partir de la *RT2012*¹⁴ que l'impact devient plus perceptible. Elle attribue cette évolution à plusieurs facteurs, dont la nature même de la nouvelle réglementation, les plus grandes sensibilisation et formation de l'architecte dans ce domaine depuis les années 2000.

On constate à travers une abondante littérature - scientifique ou non - sur ce sujet, qu'il existe bien une tendance contemporaine à traduire en architecture la volonté de réduire l'impact environnemental des édifices - par la conception bio-climatique - qui va au-delà d'une simple résolution par l'ajout ou l'optimisation de systèmes techniques (Mandoul 2012 ; Laporte 2018 ; Rahm 2021). Si la thermique d'été est bien présente dans la réglementation thermique depuis les années 2000, la canicule de 2003 a sans doute marqué les esprits des architectes de façon bien plus prégnante. Bien que ce soit difficile à quantifier, il est certain que le changement climatique influence déjà nombre d'architectes et donc une certaine production architecturale.

Avec le temps l'urgence se précise, les différents niveaux de gouvernance se préoccupent désormais non seulement de l'atténuation mais également de l'adaptation nécessaire face à ces changements. Ces injonctions seront certainement entendues par une partie au moins de la profession et il est probable que les architectes intégreront de plus en plus l'anticipation des vagues de chaleur dans leur conception - neuve ou d'intervention sur l'existant -, ce qui aura une influence sur les formes, les matériaux, et l'expression. L'adaptation de la formation des architectes et le développement d'une offre de formation continue sur le sujet est alors nécessaire pour limiter le décalage entre les intentions et la performance réelle. Elle devra notamment porter sur la connaissance des éléments de vulnérabilité présentés dans la partie 3, qui sont les leviers de l'adaptation.

2.2. Aléas sécheresse et retrait-gonflement des argiles

2.2.1 Caractérisation de l'aléa

Sécheresse

Selon Météo France¹⁵, une sécheresse se définit comme "un déficit en eau sur une période relativement longue". Il s'agit d'un extrême climatique dont l'impact sur les territoires dépend

¹⁴ Réglementation thermique 2012

¹⁵ <https://meteofrance.com/changement-climatique/observer/changement-climatique-et-secheresses>

de leur vulnérabilité hydrogéologique et de la disponibilité de la ressource en eau. Plusieurs types de sécheresses sont à distinguer selon qu'il s'agit d'un déficit de précipitation (sécheresse météorologique) ou d'un déficit d'humidité du sol (sécheresse agricole ou géotechnique) (ONERC 2018). S'agissant d'évaluer l'impact sur les édifices, nous ne considérons ici que ce dernier type. La sécheresse agricole est déterminée par un déficit en eau des couches superficielles du sol situées entre 1 et 2 mètres de profondeur, tandis que la sécheresse géotechnique se caractérise par une diminution du taux d'humidité de la couche du sous-sol (ONERC 2018).

Les projections climatiques indiquent une tendance à l'augmentation des sécheresses du sol, avec une aggravation possible de leur intensité au cours de la seconde moitié du XXI^e siècle (ONERC 2018). La modification du régime pluviométrique et l'augmentation du nombre et des intensités des vagues de chaleur - qui amplifient le phénomène d'évapotranspiration¹⁶ - ont pour impact l'assèchement des sols en surface (BRGM 2020). Ainsi le changement climatique pourrait entraîner à long terme une baisse du niveau moyen annuel d'humidité du sol (Météo France ; Salagnac, 2015).

À l'échelle de la Normandie, les projections climatiques indiquent que le pourcentage de sécheresse devrait augmenter à l'horizon 2080 (Laignel 2018), tandis que l'indice d'humidité des sols superficiels pour la région a déjà atteint au 1^{er} avril 2021 un déficit de 20 à 30% par rapport à la moyenne sur la période 1981-2010¹⁷.

Retrait-gonflement des argiles

La consistance des sols argileux varie en fonction du taux d'humidité du sol. L'assèchement d'un tel sol provoque une rétractation des argiles, ayant pour effet un tassement irrégulier du sol en surface. Inversement, un nouvel apport d'eau en période humide entraîne un gonflement des argiles. Dans un climat tempéré comme celui de la France, les sols argileux sont le plus souvent saturés en eau, ce qui limite le phénomène de gonflement. Par conséquent, les sols sont plus vulnérables face au phénomène de retrait des argiles engendré par l'assèchement du sol (BRGM 2020). Ces variations de volume sont d'autant plus élevées que le sol est riche en argiles gonflantes¹⁸, ce qui entraîne localement des mouvements de terrain différentiels pouvant porter atteinte à la solidité et à l'intégrité des constructions (Salagnac 2015 ; ONERC 2018 ; BRGM 2020).

Or les plateaux argileux de Normandie sont particulièrement sensibles à l'augmentation des épisodes de sécheresse des sols de par la présence d'argiles "gonflantes" (DREAL Normandie 2020).

Les effets d'une sécheresse géotechnique intense se manifestent généralement sur la couche supérieure du sol (0,5 à 1,5 m de profondeur), mais la présence de végétation peut jouer un rôle aggravant. En effet, les racines des arbres puisent l'eau du sol et peuvent s'étendre jusqu'à 1,5 fois la hauteur de l'arbre ce qui peut augmenter la profondeur atteinte par l'assèchement du sol. La présence d'arbres comme le chêne, le peuplier ou le saule à

¹⁶ "Quantité d'eau transférée vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes." (ONERC, 2018, p.70).

¹⁷ Bulletin national de situation hydrologique du 12 avril 2021, p.10

¹⁸ <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/le-phenomene-de-retrait-gonflement-des-sols-argileux>

proximité d'une construction peut provoquer un retrait et un tassement du sol plus important et accentuer l'ampleur du phénomène en modifiant les conditions hydriques des sols (Nowamooz 2007 ; Vincent 2009).

2.2.2 Impacts sur le bâti

Lors de sécheresses, le déficit d'humidité dans le sol n'est pas homogène, et la rétractation des argiles engendre un mouvement d'enfoncement du sol non uniforme (tassement différentiel) pouvant générer de graves désordres sur le bâti (Vincent 2009 ; BRGM 2020). Ces tassements différentiels peuvent provoquer des dégâts à la fois sur les structures en surface (bâtiment, fondations superficielles, ouvrages de soutènement...), et sur les ouvrages enterrés (tunnels, canalisations, fondations profondes...).

Les tassements différentiels du sol

En période sèche, la perte d'appui sous une partie des fondations sous l'effet de ce tassement différentiel provoque des dégâts localisés notamment aux angles des constructions (Vincent 2009 ; OID 2020b ; BRGM 2020). Il en résulte des fissurations principalement en façade, souvent obliques, et autour des points de faiblesse du bâti que représentent les ouvertures. Les dégâts se manifestent également par des décollements au niveau des éléments jointifs tels que les garages, les perrons et les terrasses, une distorsion possible des portes et fenêtres, voire une dislocation des dallages et des cloisons intérieures. Par ailleurs, des fuites d'eau ou la rupture de canalisations enterrées peut aggraver le phénomène de retrait-gonflement par l'amplification des différences d'humidité des sols environnant le bâti, entraînant une aggravation des dégâts par l'apparition de gonflements localisés (OID 2020b ; BRGM 2020).

La vulnérabilité des maisons individuelles

Les maisons individuelles sont les constructions les plus impactées par le phénomène de retrait-gonflement des argiles car elles présentent des fondations peu profondes et donc plus vulnérables aux tassements différentiels, et leur structure est plus légère et moins rigide que celle des bâtiments collectifs (Vincent 2009 ; SGAR haute et basse-Normandie 2013 ; BRGM 2020). Par ailleurs, les maîtres d'ouvrage sont le plus souvent des particuliers ne disposant pas d'une connaissance de la réglementation en vigueur. Peu d'études géotechniques préalables sont ainsi réalisées sur les terrains situés en zones à risque, tandis que les prescriptions constructives définies par les Plans de prévention des risques naturels sont le plus souvent peu ou pas prises en compte dans les choix de conception (ONERC 2018 ; OID 2020b).

2.2.3 Impacts sur le confort et le comportement des occupants

Bien que nous n'ayons pas connaissance d'études sur l'impact de tels désordres sur le vécu des habitants, on peut penser qu'en dehors des conséquences économiques évoquées

ci-dessous, le rapport des habitants à leur logement se dégrade. En effet, la présence de fissurations donne une image négative, elle inquiète et altère le sentiment d'appartenance. De tels événements peuvent conduire à reporter ou annuler des investissements sur l'amélioration ou l'entretien de la maison.

Par ailleurs, les désordres pouvant concerner les ouvertures, la ventilation et l'isolation peuvent s'en trouver perturbés, réduisant alors le confort d'une pièce ou la performance thermique du logement.

2.2.4 Conséquences économiques

Bien qu'il ne fasse ni morts ni blessés, le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux constitue un risque majeur en raison de l'ampleur des dégâts matériels provoqués, notamment parce qu'ils touchent à la structure et à l'intégrité du bâti. Ce phénomène représente la deuxième cause d'indemnisation en France au titre du régime d'indemnisation des Catastrophes Naturelles après les inondations (le risque sécheresse représente 37% de la sinistralité Non-Auto cumulée depuis 1982 contre 53% pour le risque inondation), pour un coût global des dommages assurés s'élevant à 1,2 milliards d'euros en 2020¹⁹. D'un point de vue assurantiel, les coûts des sécheresses se limitent aux dommages causés au bâti en raison du retrait-gonflement des argiles ou des mouvements de sol, et le coût d'indemnité moyen du sinistre pour une maison individuelle est de l'ordre de 15 000 euros (Cribellier 2015 ; ONERC 2018 ; OID 2020b).

Les dommages subis par un bâtiment construit dans une zone déclarée inconstructible par le PPR ou dans une zone exposée au phénomène de retrait-gonflement des argiles en aléa moyen et fort sans prise en compte des prescriptions constructives peuvent ne pas être indemnisés²⁰. L'augmentation de la fréquence des sécheresses depuis les années 1990 a entraîné une extension des surfaces potentiellement affectées par les effets de retrait-gonflement des argiles (ONERC 2018). Ainsi, les épisodes de sécheresse des années 1990-1991 et 2003-2004 ont cumulé près de 10 milliards d'euros d'indemnités en France²¹. Selon l'analyse de Cribellier et Gresselin (2015), l'adaptation de l'ensemble des maisons individuelles construites entre 2013 et 2030 en zone d'aléa fort et moyen en région normande pourrait entraîner un coût d'adaptation de 150 à 240 millions d'euros, dans le cas d'une stricte application des prescriptions des PPRN.

2.3. Aléa inondation

2.3.1 Caractérisation de l'aléa

L'inondation est définie par la Directive 2007/60/EC comme "[une] submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal". Cet aléa peut prendre de

¹⁹ Chiffres de la Caisse Centrale de Réassurance.
<https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/-/chiffres-cl%C3%A9s-1982-2020>

²⁰ Article L125-6 du Code des Assurances (J.O. 31 juillet 2003)

²¹ <https://www.ecologie.gouv.fr/sols-argileux-secheresse-et-construction>

nombreuses formes, selon qu'il s'agit d'une inondation par débordement de cours d'eau (ou crue), par ruissellement en surface des eaux non absorbées par le sol ou par remontée de nappes phréatiques suite à leur saturation (Salagnac 2014 ; ONERC 2018 ; OID 2020c).

La cause principale des inondations sont les pluies extrêmes (OID 2020c) qui se caractérisent par l'apport d'une grande quantité d'eau dans un laps de temps court (d'une heure à une journée), pouvant parfois égaler celle accumulée habituellement en un mois²². Des épisodes d'inondations peuvent ainsi survenir en plaine lorsque le cumul des précipitations dépasse localement le seuil critique de 50 mm en 24 heures (Météo France ; ONERC 2018). La submersion marine des zones côtières se distingue des autres formes d'inondations en ce sens qu'elle est une conjonction de phénomènes météorologiques extrêmes (dépression atmosphérique, vent, houle, pluie) et de fortes conditions de marées provoquant une surélévation du niveau marin (ONERC 2018 ; DREAL Normandie 2020 ; OID 2020c).

Au même titre que les aléas vagues de chaleur et sécheresse, le phénomène d'inondation est soumis aux impacts du changement climatique. Selon Laignel et Nouaceur (2018), la région Normandie se caractérise actuellement par une faible occurrence des épisodes de pluies extrêmes, mais aucune tendance significative ne se distingue dans l'évolution attendue des précipitations. Néanmoins, une majorité des projections climatiques suggèrent une augmentation modérée de la fréquence et de l'intensité des fortes précipitations d'ici la fin du siècle, avec une grande disparité entre les territoires concernés (Laignel 2018 ; DREAL Normandie 2020).

Une intensification croissante des épisodes de fortes précipitations en Normandie dans les décennies à venir aurait pour conséquence une augmentation du risque d'inondation par ruissellement et par débordement de cours d'eau (DREAL Normandie 2020). Selon le diagnostic du Plan Climat Air Énergie Territorial de la Métropole Rouen Normandie (2019), l'ensemble de ses communes est soumis au risque inondation. Les territoires les plus vulnérables sont fortement exposés aux épisodes d'inondation par ruissellement dû aux orages estivaux intenses et aux abondantes précipitations hivernales. Par ailleurs, "[ce] risque d'inondation par ruissellement est démultiplié dans l'estuaire de la Seine lorsque les épisodes de fortes précipitations surviennent concomitamment à un phénomène de submersion marine et de crue de la Seine"²³. La simulation réalisée par Sandrine Vidal (2012) a ainsi montré que "l'impact moyen sur des crues de la Seine (niveau de la Seine à Rouen supérieure à 4.5 m NGF est [...] de 32 cm à Rouen pour un rehaussement de 60 cm du niveau moyen marin".

Plusieurs communes de la Métropole Rouen Normandie ont été classées en état de catastrophe naturelle suite aux épisodes de fortes intempéries du 12 au 14 février 2020 et du 10 au 13 mars 2020 pour les dommages causés "par les inondations et coulées de boue, les

²² <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Typologie-des-precipitations.html>
²³ Métropole Rouen Normandie, 2019, p.54

inondations par choc mécanique des vagues [et] les inondations par remontées de nappes”²⁴.

2.3.2 Impacts sur le bâti

Les impacts des inondations sur les bâtiments dépendent de divers facteurs que sont la hauteur d'eau qui détermine l'ampleur des éléments touchés, la durée d'immersion qui définit le taux d'humidification des matériaux, la vitesse du courant qui accentue les dégâts matériels sur la structure, et la turbidité et la pollution de l'eau qui affecte la possibilité de retour à un état normal (CEPRI 2010 ; Salagnac 2014 ; OID 2020c).

Dégradation des matériaux

Comme le soulignent Salagnac et al. (2014), la vulnérabilité des matériaux de construction face à l'eau s'est traduite “dans les codes de construction des bâtiments par des dispositions destinées à éviter le contact prolongé de l'eau avec les matériaux constitutifs des différents ouvrages”. Plus la durée d'immersion est importante, plus elle favorise la diffusion de l'humidité dans les murs provoquant la dégradation des matériaux par le gonflement, l'apparition de moisissures, le décollement des revêtements, l'altération des isolants (Salagnac 2014 ; OID 2020c). Les matériaux immergés situés au-dessus du plus haut niveau des eaux peuvent subir une dégradation plus ou moins rapide par remontées par capillarité. Par ailleurs, l'eau charriée lors d'une inondation est le plus souvent polluée par des produits minéraux et organiques qui peuvent potentiellement impacter les matériaux de construction (Salagnac 2014 ; CEPRI 2010).

Dégradation des éléments de construction

La grande majorité des bâtiments construits (maisons individuelles, logements collectifs, bâtiments publics, locaux d'entreprises, etc.) présentent des modes constructifs souvent inadaptés au risque d'inondation. Les bâtiments sont généralement dimensionnés pour résister aux effets mécaniques du vent ou de l'accumulation de neige mais pas aux pressions hydrostatiques (hauteur d'eau) ni aux masses d'eau en mouvement rapide qui, en cas d'inondation, peuvent causer des dégâts significatifs sur la structure (déformation, fissures), voire provoquer l'effondrement du bâtiment.

Selon Salagnac et al. (2014), un mur maçonné “ordinaire” est susceptible de s'effondrer lorsque la différence de hauteur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur atteint ou dépasse un mètre. La présence d'ouvertures en façade (fenêtres, portes, portes-fenêtres) peut fragiliser le mur et diminuer sa résistance face aux effets hydrostatiques. Les pressions hydrostatiques exercées sur les parois peuvent éventuellement provoquer la désolidarisation entre la structure et les fondations sous l'effet de soulèvement de la poussée d'Archimède.

²⁴ *Journal officiel : Plusieurs communes de Seine-Maritime classées en état de catastrophe naturelle.* (2020, 23 juin). Les services de l'Etat en Seine-Maritime. <https://www.seine-maritime.gouv.fr/Actualites/Journal-officiel-Plusieurs-communes-de-Seine-Maritime-classees-en-etat-de-catastrophe-naturelle> Consulté le 29/11/2021

Par ailleurs, les eaux charriées lors d'une inondation peuvent détériorer l'enveloppe d'un bâtiment à cause des chocs par des corps flottants tels que les troncs d'arbres ou les voitures. Dans une moindre mesure, la vitesse du courant d'immersion peut éroder le sol au droit du bâtiment et provoquer l'affouillement des fondations et l'effondrement de la structure.

L'eau est susceptible d'atteindre et d'endommager entre autres les revêtements du sol et leurs supports, les plinthes, les prises de courants, les revêtements muraux, les cloisons, les menuiseries. Selon la hauteur de leur emplacement et la hauteur d'eau, les installations sensibles comme les compteurs électriques, les installations de chauffage et d'eau chaude peuvent également être détériorées.

2.3.3 Impacts sur le comportement des habitants

Les zones urbaines situées en zone inondable sont les territoires les plus vulnérables en raison de la concentration d'importants enjeux humains et socio-économiques. Les épisodes extrêmes d'inondation sont le plus souvent associés à une forte mortalité. Les cas de décès par noyade au domicile sont le plus souvent la conséquence d'une inadaptation du bâtiment au risque d'inondation, notamment du fait de l'absence d'un étage élevé pour se réfugier lors de la montée des eaux (Salagnac 2014 ; OID 2020c). De même, la forte dépendance à la disponibilité de l'électricité d'un grand nombre de dispositifs techniques, notamment dans les bâtiments tertiaires et les équipements publics, constitue un critère de vulnérabilité important. Dans une moindre mesure, la dégradation des biens matériels et la dévastation des lieux d'habitat a des répercussions psychologiques importantes sur les habitants, créant un sentiment de perte, de souillure, de vulnérabilité.

2.3.4 Impacts économiques

Le retour à un état normal peut être relativement long du fait de la perturbation de la vie économique et sociale. Les activités abritées par les locaux en rez-de-chaussée peuvent être durablement impactées à la fois par les dégâts matériels importants qui empêchent une reprise rapide de l'activité et entraînent des pertes économiques importantes, mais également par la perturbation des réseaux (voies d'accès, eau, électricité, assainissement) en milieu urbain (Salagnac 2014 ; OID 2020c). Suite à une inondation, la nécessité de remplacer à neuf les matériaux ou de reconstruire partiellement voire en totalité les ouvrages dégradés peut entraîner un coût de réparation élevé.

Les inondations constituent le principal risque pris en charge par le régime des catastrophes naturelles avec des indemnisations cumulées entre 1982 et 2020 supérieures à 21 milliards d'euros au niveau national, ce qui représente 53% du coût total assuré des indemnisations versées²⁵. Le coût global des dommages assurés est évalué entre 350 et 450 millions d'euros annuels en 2020.

²⁵ Chiffres de la Caisse Centrale de Réassurance.
<https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/-/chiffres-cl%C3%A9s-1982-2020>

Avec l'urbanisation croissante des zones inondables, et plus particulièrement des zones côtières, plus de 1,4 millions d'habitants seraient aujourd'hui exposés au risque de submersion marine en France métropolitaine²⁶. L'estimation des pertes potentielles des biens immobiliers et des infrastructures en Normandie associées à ce risque pourrait s'élever à plusieurs milliards d'euros, auxquels devrait s'ajouter le coût de la délocalisation des populations affectées (DREAL Normandie 2020).

²⁶

Périls couverts par le régime Cat-Nat. <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/perils-couverts>

3. Adaptation de l'architecture au changement climatique

Nous considérons ici les actions d'adaptation qui consistent à réduire la vulnérabilité dans l'objectif de prévenir les risques. Il s'agit donc principalement d'identifier ces facteurs de vulnérabilité, pour chacun des aléas. L'inventaire des principes d'adaptation exposé ici est général, et les actions correspondantes peuvent donc se mettre en œuvre sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie. En revanche, l'évaluation de leurs pertinences et de leurs coûts au regard des spécificités métropolitaines demande des études plus approfondies, dont les objectifs et méthodes sont présentés au paragraphe 4.2. Les diverses doctrines d'adaptation ne sont pas non plus évoquées ici, qui doivent faire l'objet d'un processus démocratique éclairé par les connaissances dont beaucoup sont encore à produire.

Notons enfin qu'il ne s'agit pas d'envisager ici l'adaptation du secteur du bâtiment, mais bien des édifices eux-mêmes, existants ou à venir. Cependant, il est certain que l'information et la formation des acteurs seront nécessaires, le présent document ayant l'ambition d'en constituer une bonne base.

3.1. Faire face aux vagues de chaleur

3.1.1 Principes généraux de la thermique d'été

Les stratégies de conception pour limiter la vulnérabilité à la canicule sont similaires à celles visant le confort en été, et leurs principes sont valables qu'il s'agisse d'un bâtiment neuf ou d'intervenir sur l'existant. Il s'agit de conserver la fraîcheur présente avant la canicule et de réduire et évacuer la chaleur entrante ou produite à l'intérieur de l'édifice. Les trois phénomènes de transfert de chaleur sont mobilisés : le rayonnement, la conduction et la convection (Arab 2021).

Le rayonnement

Le rayonnement qui provient du soleil et des autres corps chauds de l'environnement chauffe le toit et les façades qui lui sont exposés en fonction de leurs capacités d'absorption, lesquelles dépendent du matériau, de la couleur et de l'état de leurs surfaces. Deux stratégies sont donc possibles pour limiter cet apport de chaleur : limiter l'exposition en intercalant des écrans tels que de la végétation, des volets ou des brise-soleil ; et rendre la surface moins absorbante par une couleur claire, une faible rugosité et un matériau peu émissif.

Le soleil chauffe également les surfaces intérieures des murs, les sols et le mobilier qu'il éclaire par les fenêtres. Le rayonnement réémis par ces corps - beaucoup moins chauds que le soleil - se fait dans l'infrarouge et ne peut plus traverser la vitre. Il se produit alors un effet de serre dans la pièce, dont la température de l'air augmente considérablement. Cet effet de serre se produit principalement dans les pièces fermées avec de grandes surfaces vitrées sans protection et exposées au soleil.

Les éléments chauffés par le soleil stockent la chaleur absorbée en fonction de leur capacité thermique. Il faut donc éviter d'exposer au soleil des matériaux à forte capacité thermique et forte émissivité. Dans le cas d'une paroi multicouche, il vaudra mieux placer le matériau le moins émissif et le plus isolant à l'extérieur.

La conduction

Le transfert de chaleur par conduction est provoqué par la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Il se produit à travers le plancher bas, les parois verticales extérieures opaques et vitrées, et la couverture. Les échanges sont proportionnels à la quantité de ces surfaces, qu'il faut donc chercher à minimiser (compacité).

Pour conserver au maximum la différence de température en période de forte chaleur (garder le local frais), toutes ces parois – sauf le plancher bas en contact avec le sol plus frais - doivent être bien isolées. Par ailleurs, pour profiter de la possibilité de stocker la fraîcheur par des matériaux à forte capacité thermique, il faut les mettre au contact de l'air frais, à l'intérieur donc, et placer l'isolant côté extérieur.

Il se peut cependant que la différence de température s'inverse, et qu'il fasse plus chaud à l'intérieur, même en cas de canicule. Dans ce cas, l'isolation ne rend plus le service attendu, empêchant la chaleur de s'évacuer. Cette situation peut se produire en cas d'effet de serre (grandes ouvertures exposées au soleil sans protection) ou en cas de production de chaleur à l'intérieur du local, tels que four, sèche-linge, fer à repasser, serveur informatique, chauffe-eau, etc. Il se peut aussi que la différence de température s'inverse la nuit, l'air devenant plus frais à l'extérieur qu'à l'intérieur. Il faut alors évacuer la chaleur par un autre moyen que la conduction : la ventilation.

La convection

Le transfert thermique par convection se fait par déplacement d'air. La ventilation utilise le mode de convection pour évacuer la chaleur vers l'extérieur, en remplaçant l'air chaud par un air plus frais. En période de canicule, on ne peut espérer faire entrer de l'air frais que la nuit, ou seulement après l'avoir fait circuler au contact d'une paroi froide (puits canadien) ou dans un évaporateur (plan d'eau, par exemple).

La ventilation naturelle d'été se fonde essentiellement sur un courant d'air entre deux ouvertures pratiquées sur des façades différentes, là où les différences de pression dues au vent sont les plus importantes. Dans le cas d'ouvertures mono-orientées, il est encore possible de créer un échange d'air par convection thermique, profitant que l'air chaud, plus léger, « flotte » au-dessus de l'air frais. La nuit quand l'air est plus chaud à l'intérieur, il sort par le haut de la fenêtre (ou de l'édifice), et l'air extérieur plus frais entre par le bas.

Notons que les échanges convectifs à la surface de la peau augmentent avec la vitesse de l'air, et la sensation de fraîcheur liée au courant d'air peut inciter à ventiler alors que la température extérieure est plus importante qu'à l'intérieur, faisant alors entrer de l'air chaud.

3.1.2 Principes d'adaptation

Compte tenu des conséquences humaines importantes des événements caniculaires, l'adaptation du cadre bâti aux effets d'une élévation des températures apparaît essentiel, et notamment en zone urbaine où le phénomène d'îlot de chaleur²⁷ participe à l'aggravation des vagues de chaleur.

²⁷ La synthèse du GIEC local sur la thématique de l'urbanisme abordera plus en détails les mesures d'adaptation à l'îlot de chaleur urbain.

L'environnement du bâtiment

A l'échelle urbaine, les stratégies d'adaptation s'appuient sur les caractéristiques météorologiques locales pour proposer des actions qui reposent sur l'usage des mouvements d'air, de l'eau, de l'ombre et de la gestion des apports solaires. Ainsi, la végétalisation des abords des bâtiments permet d'une part d'améliorer la qualité de l'air mais également de réduire l'impact de la chaleur en interceptant jusqu'à 80% du rayonnement solaire. La végétalisation agit directement sur l'exposition au rayonnement solaire en créant un ombrage et indirectement sur la chaleur en rafraîchissant par évapotranspiration l'air ambiant (ADEME 2012 ; Bornarel et al. 2014 ; OID 2020a). La nature et la couleur des revêtements extérieurs jouent un rôle dans le stockage d'énergie thermique en fonction de l'albédo du matériau (Perrin 2020). Pour réduire l'effet d'îlot de chaleur à proximité du bâtiment, il s'agit de privilégier des revêtements de sol à fort albédo qui réfléchissent plus et sont peu émissifs comme les graviers blancs par exemple.

Les toitures

Les "cool-roof" (ou toitures rafraîchissantes) permettent également de limiter le réchauffement du bâtiment en recouvrant la surface externe exposée au rayonnement solaire par des matériaux de revêtement à fort albédo comme les membranes réfléchissantes, les enduits réfléchissants ou les graviers blancs (ADEME 2012 ; Perrin 2020). L'installation de toitures végétalisées permet également de limiter les effets d'un rayonnement solaire direct à travers le phénomène d'évapotranspiration qui permet d'abaisser localement la température ambiante (ADEME 2012 ; Bornarel et al. 2014 ; OID 2020a), même si en période de canicule, le déficit d'eau limite cet effet (Salagnac 2015).

Les fenêtres et baies vitrées

Se protéger du rayonnement solaire est la stratégie la plus pertinente pour atténuer l'impact des vagues de chaleur. Pour réduire l'incidence directe du rayonnement solaire estival tout en continuant de bénéficier d'un ensoleillement optimal en hiver, le choix des orientations du bâtiment doit prendre en compte la trajectoire du soleil et sa hauteur qui varie en fonction des saisons, mais également les vents dominants. Il est ainsi recommandé que la surface totale des baies vitrées soit de 20% par rapport à la surface habitable, en privilégiant les ouvertures au sud (Perrin 2020). Les apports solaires pénètrent dans le bâtiment en majorité par les surfaces vitrées, qui peuvent laisser passer de 60 à 40% de l'énergie incidente lorsqu'elles ne sont pas protégées (Bornarel et al. 2014). Comme le souligne Salagnac (2015), "[même] avec des verres très performants, une large baie exposée au sud ou à l'ouest (qui plus est, sans stores extérieurs) conduira inéluctablement à des surchauffes à l'intérieur du bâtiment". L'installation de protections solaires (volets, persiennes, brise-soleil fixe ou mobile, casquette, store intérieur) participe à l'amélioration du confort d'été en permettant de se protéger du rayonnement solaire.

L'isolation

En cas d'événement caniculaire, l'objectif de l'enveloppe d'un bâtiment est de ralentir les transferts de chaleur entre extérieur et intérieur afin de conserver le plus longtemps la

fraîcheur de l'air ambiant grâce à une bonne isolation et une bonne étanchéité. Notamment, la capacité des parois à emmagasiner la chaleur et à la restituer en différé après plusieurs heures (inertie thermique) permet de ralentir l'augmentation de la température intérieure en journée en restituant l'énergie au moment où les températures extérieures sont moins élevées. Le choix de matériaux à forte inertie (pierre, béton, terre crue, brique) isolés par l'extérieur participe de fait à améliorer le confort thermique d'été et peut dans une moindre mesure réduire le recours aux systèmes de rafraîchissement comme la climatisation (Bornarel et al. 2014 ; Perrin 2020). Dans le cas d'une réhabilitation ou d'une rénovation thermique du bâti ancien, la réalisation d'un diagnostic préalable du bâtiment est nécessaire pour définir les solutions les plus adaptées à ses caractéristiques intrinsèques. Par exemple, les bâtiments anciens construits avant 1948 possèdent souvent de bonnes qualités thermiques en raison d'une forte inertie des parois qui permet de réguler les échanges thermiques entre intérieur et extérieur (Bornarel et al. 2014).

Ainsi que le précise le rapport technique final de l'étude sur la vulnérabilité et l'adaptation des territoires normands au changement climatique publié en septembre 2013, "[la] majorité des logements ont [...] été construits entre la fin de la Seconde Guerre Mondiale et la première réglementation thermique en 1975 et présentent de ce fait une faible qualité thermique". Pour faire face aux enjeux de l'évolution attendue de l'aléa vague de chaleur, des efforts importants en matière de rénovation thermique du parc immobilier existant devront être mis en œuvre. Le coût de la rénovation varie d'une part en fonction du type d'intervention réalisée²⁸ (isolation thermique des parois opaques, remplacement des menuiseries, etc.) et, d'autre part, en fonction des caractéristiques de la construction comme la typologie constructive ou la valeur patrimoniale.

Apports internes de chaleur et ventilation

Les émissions de chaleur liées à l'exploitation des bâtiments peuvent être minimisées en réduisant les apports internes de chaleur. Le choix d'appareils et équipements (électroménager, bureautique...) ayant une bonne efficacité énergétique permet de réduire les émissions de chaleur au sein des espaces intérieurs (ADEME 2012 ; OID 2020a). Un certain nombre de comportements peuvent également éviter le recours à la climatisation, comme de ne pas utiliser de sèche-linge, de sorte à éviter le dégagement de chaleur et à profiter de la fraîcheur dégagée par l'évaporation du linge, ou de manger cru au maximum pour éviter d'utilisation du four ou des plaques chauffantes.

La climatisation doit être considérée comme une solution d'adaptation ponctuelle, à laquelle il ne faut avoir recours que pour des situations exceptionnelles (personnes fragiles, maison de retraite, hôpital, local collectif de refuge, etc.). En effet, non seulement sa consommation énergétique augmente les émissions de gaz à effet de serre, mais en plus, elle rejette de l'air chaud à l'extérieur, aggravant l'effet d'îlot de chaleur. Afin de répondre aux enjeux d'atténuation du réchauffement climatique, il s'agit de privilégier des solutions de rafraîchissement sans rejet de chaleur telles que la ventilation naturelle (ADEME 2012).

²⁸ La collecte des prix des gestes de rénovations réalisée en 2018 par l'ADEME a identifié 7 catégories d'interventions de rénovation. ADEME et al., 2019.

Trois stratégies de ventilation naturelle sont possibles : la ventilation traversante, mono-latérale et l'effet de cheminée (ou le tirage thermique). Chacune induit des choix de conception spécifiques comme orienter le bâtiment par rapport aux vents, privilégier la typologie traversante, positionner les ouvertures de manière à assurer le meilleur balayage de l'air possible dans les locaux intérieurs. Le rafraîchissement naturel par "free-cooling" (ou surventilation directe) permet d'évacuer les surchauffes dues aux apports de chaleur internes lorsque l'air extérieur est plus frais que l'air intérieur, principalement la nuit ou au petit matin. En remplacement d'une climatisation, des solutions techniques à faible consommation énergétique existent, comme le puits provençal (ou canadien) qui est un système géothermique utilisant la température du sol qui se maintient autour de 15°C en été pour rafraîchir l'air (ADEME 2012 ; Bornarel et al. 2014).

3.2. Faire face au phénomène de sécheresse

Les mesures d'adaptation face au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux lié aux sécheresses des sols doivent être choisies en fonction des contraintes du terrain et des caractéristiques du bâtiment. Les constructions à usage d'habitation individuelle étant les plus impactées par le phénomène, les mesures proposées ci-dessous visent principalement à réduire la vulnérabilité de cette catégorie d'édifices.

3.2.1 Maîtriser la teneur en eau

Les variations d'humidité des sols dépendent de l'évapotranspiration directe de l'eau par les surfaces libres du sol et de l'aspiration de l'eau à différentes profondeurs par les racines des arbres. Selon le décret n°2019-1223 du 25 novembre 2019, les techniques de prévention des risques de retrait-gonflement des argiles doivent permettre de "limiter les variations de teneur en eau du terrain à proximité de l'ouvrage dues aux apports d'eaux pluviales et de ruissellement ainsi qu'à la végétation". Il est à noter que la plupart des dispositifs de maîtrise des variations de l'humidité dans les sols ont pour objectif de prévenir les effets de retrait des argiles en période sèche.

L'installation d'un trottoir périphérique de 1,5 m de large ou d'une géomembrane enterrée isolant la construction du sol permettent de contrer le phénomène d'évapotranspiration (Vincent 2009 ; OID 2020b ; BRGM 2020).

Par ailleurs, les racines des arbres ont tendance en période sèche à pomper l'eau présente dans le sol plus humide sous les constructions ce qui engendre un assèchement du sol pouvant provoquer un tassement différentiel. Pour mettre à distance le bâti des plantations et réduire l'impact des circulations d'eau dans la couche superficielle du sous-sol autour des racines, des dispositifs d'écrans anti-racines peuvent être implantés entre 1 et 2 m de profondeur (Vincent 2009 ; OID 2020b). Dans les cas où la présence d'un arbre sur le terrain représente un risque imminent pour l'intégrité de la structure, celui-ci peut être déraciné et possiblement replanté à plus grande distance du bâtiment.

Par ailleurs, les réseaux d'assainissement, de drainage et d'eaux pluviales doivent permettre l'évacuation des eaux sans risque d'infiltration dans les sols (OID 2020b ; BRGM 2020), pour

éviter des gonflements additionnels. Pour prévenir les risques de rupture et de gonflement des sols, le recours à des systèmes de réseaux non rigides est préconisé, placés de préférence à une distance minimum de 2m des bâtiments (BRGM 2020).

Enfin, signalons que le Cerema a développé en 2016, en partenariat avec AQC et financé par la Direction Générale de la Prévention des Risques, un dispositif expérimental²⁹ permettant d'humidifier le sol de fondation par injection dans le sol des eaux pluviales stockées. Le coût global du prototype s'est élevé à environ 20 000€.

3.2.2 Renforcer les structures

L'ordonnance n°2020-71 du 29 janvier 2020 réglementant la construction dans les zones identifiées en aléa moyen et fort des Plans de Prévention des risques impose la réalisation d'une étude géotechnique préalable à tout projet de construction par le vendeur du terrain. Dans la conception du bâtiment, la maîtrise d'œuvre doit prendre en compte les recommandations fournies par l'étude géotechnique, notamment sur l'implantation et les caractéristiques structurelles du bâtiment. Les techniques de construction visant à limiter les déformations des ouvrages portent aussi bien sur les fondations que sur la superstructure.

Pour réduire la vulnérabilité des maisons individuelles existantes, la modification des fondations (réalisation de plots ou de micropieux) par une reprise en sous-œuvre peut être envisagée. Pour une construction sur dalle, la démolition du dallage pour réaliser un plancher porté doit être envisagée si le sol ne peut pas être protégé des variations hydriques. Il est encore possible de rigidifier la superstructure en renforçant les chaînages notamment, ou d'orienter les futures déformations sur des joints créés spécifiquement pour éviter la fissuration (Vincent 2009). Cependant, le coût de l'intervention est particulièrement élevé et la mise en œuvre nécessite une étude détaillée des caractéristiques du terrain et du bâtiment.

Dans le cas d'une construction neuve, le choix de fondations profondes et ancrées de manière homogène sur le sol est privilégié. Outre l'approfondissement des fondations, la création d'un vide-sanitaire ou d'un sous-sol généralisé est préférable à la construction sur terre-plein plus vulnérable au retrait et gonflement des sols et permet de maintenir plus longtemps l'état d'hydratation du sol sous la construction en période sèche. Dans le cas d'une extension, les joints de rupture verticaux sont privilégiés pour désolidariser les éléments bâtis de structures différentes ou fondées différemment (Vincent 2009 ; BRGM 2020 ; OID 2020b).

3.3. Faire face aux inondations

Plusieurs stratégies peuvent être adoptées pour se prémunir des impacts d'une inondation, "soit on se met hors d'atteinte de l'eau (stratégie "éviter"), soit on empêche l'eau d'entrer

²⁹ IGHIL AMEUR L. (2019, 17 septembre). "Stabilisation du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux sous les habitations : un système innovant par infiltration d'eau de pluie".

(stratégie “résister”), soit on laisse l'eau rentrer (stratégie “céder”)(CEPRI 2015). Ces trois stratégies répondent à des objectifs différents. Plusieurs facteurs influencent le choix de la stratégie la mieux adaptée, tels que le type d'inondation et ses caractéristiques, la localisation dans le territoire et les aménagements existants. Les coûts associés sont très variables, mais ils peuvent parfois s'élever à plusieurs milliers d'euros selon la nature des travaux envisagés (SGAR Haute et Basse-Normandie 2013, Salagnac 2014).

3.3.1 Eviter

La stratégie “éviter” a pour objectif de mettre hors d'atteinte de l'eau la partie habitée du bâtiment. L'inondation étant un risque géographiquement localisé, la protection la plus efficace en matière de mise en sécurité des occupants et des bâtiments est de ne pas construire en zone inondable. Les contraintes imposées par la géographie du territoire peuvent cependant limiter le recours à cette stratégie.

Les différents principes mis en œuvre sont conditionnés par la hauteur d'eau maximale considérée, qu'il s'agisse de la construction sur pilotis, d'habitat flottant, de la création d'un vide sanitaire, ou de la construction du premier niveau habitable sur un parking souterrain ou un rez-de-chaussée qu'il est envisageable de “céder” à l'eau temporairement pour ne pas dégrader l'assise du bâtiment dues aux pressions hydrostatiques sur les parois. Lors d'un événement extrême comme une inondation torrentielle, la création d'une zone refuge accessible “en toutes circonstances” permet d'anticiper l'évacuation des personnes par le haut (fenêtre de toit, balcon, terrasse) quand les étages inférieurs sont pris d'assaut par les eaux (CEPRI 2010 ; Salagnac 2014 ; OID 2020c).

Quand la nature du terrain s'y prête (CEPRI 2015), la construction sur pilotis est le mode constructif le plus employé par les architectes pour s'adapter en zone inondable, comme en témoignent de nombreuses réalisations récompensées pour leurs qualités architecturales et leurs performances techniques.

Parmi les innovations architecturales en matière d'adaptation à l'inondation, les bâtiments flottants ou amphibies se distinguent par leur remarquable adaptabilité aux variations du niveau d'eau (Salagnac 2014 ; CEPRI 2015). Les bâtiments flottants se sont développés plus particulièrement aux Pays-Bas et au Royaume-Uni et leur construction “dépend du système constructif de la plate-forme flottante”³⁰. Appartenant à la catégorie des flottants, les édifices amphibies sont le plus souvent posés sur le sol, mais “ils montent ou descendent selon la variation du niveau de l'eau le long de colonnes de guidage (ducs d'Albe), empêchant ainsi le bâtiment de dériver”³¹. Malgré des réalisations très médiatisées, l'habitat flottant reste exceptionnel, du fait de sa technicité, de son coût (économique et écologique), et du manque de retour d'expérience d'envergure.

Par ailleurs, en matière d'intervention sur l'existant, s'il est parfois possible de soulever une maison existante et intercaler de nouveaux appuis ou des flotteurs (FEMA 1998), une autre

³⁰ CEPRI, 2015, p.70

³¹ ibid, p.71

solution consiste à ajouter un étage après confortement des fondations et réorganiser l'espace pour que le rez-de-chaussée puisse être inondé sans dégât.

3.3.2 Résister

La stratégie "résister" vise à retarder voire empêcher la pénétration de l'eau dans le bâtiment, par la mise en place de mesures de protection temporaires ou permanentes. Elle n'est possible que pour un niveau d'eau inférieur à un mètre de hauteur et lors d'un épisode d'inondation court (moins de 48 heures) et prévisible pour permettre la mise en œuvre des dispositifs de protection (CEPRI 2015 ; OID 2020c). A l'échelle urbaine, les digues et autres ouvrages de protection sont des dispositifs pour "résister" à la submersion par l'eau des zones habitées.

A l'échelle de l'édifice, les dispositifs sont temporaires (batardeaux, barrières étanches type sacs de sable devant les portes, dispositif d'occultation des prises d'air, clapet anti-retour sur les canalisations, etc.) ou permanents (clapet anti-retour sur les canalisations, portes extérieures étanches, pompes, lignes de drainage autour de la maison, murets, etc.) (CEPRI 2010, 2015 ; OID 2020c). Ces dispositifs de protection permettent de réduire les dommages matériels et la dégradation de la structure, bien que la pénétration de l'eau et de l'humidité dans le bâtiment soit inévitable, engendrant de faibles dégâts dans les locaux intérieurs.

Cette stratégie permet l'adaptation des constructions existantes sensiblement exposées au risque d'inondation et demeure compatible avec les constructions neuves, notamment en privilégiant la mise en œuvre de matériaux les moins altérables possibles et pouvant être réparés aisément et à moindre frais (CEPRI 2010).

3.3.3 Céder

Cette dernière posture accepte "de laisser l'eau pénétrer dans le bâtiment et de prendre en contrepartie toutes les dispositions nécessaires à la limitation de l'endommagement et à la réduction du délai de retour à la normale" (CEPRI 2015). Quand les murs ne peuvent résister à la pression hydrostatique extérieure correspondant au niveau des plus hautes eaux, il s'agit de créer délibérément une ouverture comme une porte ou une porte-fenêtre afin de rétablir l'équilibre de pression sur les murs. Il s'agit généralement du mode d'intervention le moins coûteux.

Naturellement, les locaux ainsi inondables ne devraient pas être des pièces de vie, ni contenir trop de mobilier ou d'objets vulnérables qu'il faudrait mettre à l'abri. Les matériaux de structure, d'isolation et de parement doivent résister à l'eau (béton, brique cuite, pierre, polystyrène, liège, polymères). La mise hors d'eau des équipements vulnérables (compteurs électriques, équipements de chauffage et climatisation), la réalisation de réseaux électriques descendants ou la mise en place de dispositifs facilitant le retour à la normale par l'évacuation de l'eau (portes à seuil bas, installation d'une pompe) permet de limiter les dommages matériels et les coûts de réparation (Salagnac 2014 ; OID 2020c).

4. Application au cas de la Métropole Rouen Normandie

Les études du GIEC local sur les changements climatiques attendus pour la Métropole Rouen Normandie nous ont permis d'identifier les trois aléas (canicule, sécheresse et inondation) dont les impacts sur l'architecture seront potentiellement significatifs. Leurs effets généraux et les actions d'adaptation envisageables sont bien inventoriés dans la littérature scientifique, technique et institutionnelle que nous avons synthétisée, respectivement dans les parties 2 (impacts) et 3 (adaptation).

En revanche, nous n'avons pas trouvé d'étude d'impacts spécifiques à la Normandie ou à ses métropoles. Pour exploiter concrètement les projections du GIEC avec un objectif quantitatif, des études de plus grande ampleur sont nécessaires, pour fournir les méthodes et la connaissance aussi bien pour établir un diagnostic quantitatif que pour évaluer des politiques d'intervention pertinentes. En effet, au-delà des données climatiques propres au territoire, la vulnérabilité, les ressources et les opportunités sont également différentes d'un contexte (architectural, géographique, économique, humain, culturel) à un autre.

Les parties suivantes proposent des suites à donner en matière de production de méthodologies et de connaissances utiles aux citoyens, à leurs élus et aux services techniques pour envisager concrètement l'adaptation au changement climatique. Nous focalisons plus particulièrement sur l'aléa de canicule, qui nous apparaît comme le plus complexe et le plus prégnant, aussi bien pour les habitants (et leur santé) que pour les émissions de gaz à effet de serre associées (climatisation).

4.1. Impacts

Pour évaluer les impacts spécifiques à la Métropole et à l'échelle de la totalité de son parc immobilier, les connaissances nécessaires sont de plusieurs ordres.

4.1.1 Connaissance du bâti

Il faut d'abord que ce parc soit bien décrit au bon niveau de détail et de précision, dans sa diversité et dans sa structuration typologique. Des classifications existent, mais elles ne sont théoriquement opérantes que pour les perspectives qui les ont générées : histoire et stylistique, fiscalité, performance énergétique. Il y a en effet mille manières de décrire un édifice, et les descripteurs qui permettent l'évaluation de la vulnérabilité aux divers aléas associés au changement climatique sont spécifiques et inventoriés dans la partie 3 qui synthétise les actions d'adaptation.

Ces descripteurs étant définis, il faut encore préciser un certain nombre d'options méthodologiques, telles que la définition des périmètres (géographique, fonctionnel, dimensionnel) des différents corpus d'édifices, la stratégie de récolte des données (priorités, fiabilité, précision) ou encore l'identification des sources (bases de données existantes, observations de terrain, enquêtes, participation citoyenne...).

Enfin, la classification elle-même, susceptible de faire émerger un échantillon d'édifices représentatifs, suppose divers traitements statistiques tels que l'étude des corrélations, des analyses factorielles et des classifications hiérarchiques.

4.1.2 Modélisation de la vulnérabilité

Le parc métropolitain étant ainsi décrit, il est possible d'évaluer sa vulnérabilité globale pour peu qu'on sache le faire à l'échelle de l'édifice. Il s'agit de définir un indicateur de vulnérabilité (tassement différentiel, durée de surchauffe, nombre de facteurs négatifs, etc) et de savoir le calculer en fonction des descripteurs. A titre d'exemple, un indicateur de vulnérabilité pour l'aléa de canicule pourrait être similaire dans son concept aux indices du diagnostic de performance énergétique (DPE), ou le besoin de chauffage serait remplacé par le besoin de climatisation.

Une fois ce ou ces indicateurs formulés, il sera encore nécessaire de choisir le bon niveau de modélisation du bâtiment, qui peut aller du simple décompte des facteurs de vulnérabilité - éventuellement pondérés - à la modélisation des phénomènes physiques, géotechnique et mécanique des structures pour le retrait/gonflement des argiles et thermo-aéraulique pour la canicule. Bien entendu, le niveau de sophistication de la modélisation doit être en cohérence avec la précision et la fiabilité des données d'entrée, ainsi qu'avec le nombre d'édifices à modéliser, lequel reflète la variabilité du corpus. Pour ne prendre que l'exemple de l'aléa de canicule, un calcul de type DPE ne pourra pas évaluer le nombre d'heures consécutives où la température intérieure dépasse un certain seuil, que seule la modélisation thermique dynamique pourra estimer, et encore de façon très approximative si la ventilation naturelle doit être prise en compte.

4.1.3 Limites des approches de type performance énergétique

Pour ce qui est de l'aléa de canicule, le problème ressemble donc à celui d'évaluer les consommations énergétiques des édifices à l'échelle d'un territoire, mais sans recourir aux relevés des fournisseurs d'énergie. Cette dernière décennie a vu se multiplier les propositions méthodologiques pour ce problème. Les principaux enjeux d'accès aux données, de recoupement des bases de données (Enerter 2021, Lefort 2020, Rogeau 2020, Méry-Alpa 2020), de modèles d'évaluation des consommations (Cantin 2013, Blervaque 2014, Levy 2018) sont bien identifiés et en partie résolus. Il s'agirait alors de transposer ces méthodes à l'évaluation de la vulnérabilité au changement climatique, qui présente des enjeux similaires tout en requérant des données, des modèles et des résultats spécifiques.

Cependant, un outil d'évaluation - qui quantifie les consommations ou le confort - n'est pas nécessairement un outil de diagnostic ni de simulation - lesquels expliquent et prédisent la performance - et encore moins un outil d'aide à la décision, qui cherche des solutions optimales. Les méthodes mises en œuvre jusqu'ici pour évaluer la performance énergétique de parcs immobiliers à différentes échelles se focalisent sur un nombre réduit de caractéristiques techniques, et ne peuvent aider à construire que des stratégies d'interventions systématiques.

Si l'évaluation des impacts du changement climatique sur l'architecture doit nourrir la genèse de stratégies qui ne visent plus seulement la réduction des consommations au moindre coût mais bien le maintien - voire l'amélioration - de la qualité du cadre de vie malgré le changement climatique, alors l'objectif de cette évaluation est également de bien connaître les phénomènes à l'oeuvre, de savoir évaluer l'influence à grande échelle des actions envisagées, et surtout de développer une pensée systémique, capable d'intégrer des dimensions qualitatives.

4.1.4 L'habitant

Enfin, il ne faut pas oublier que pour ce qui concerne l'aléa de canicule, il est possible d'attribuer un score de vulnérabilité au logement, mais celui-ci ne rendra pas compte de la fragilité de l'habitant (l'âge, l'état de santé général, son origine géographique, etc), de ses habitudes de vie (sensibilité à l'environnement sonore, dépendance aux équipements très exothermiques tels que four, fer à repasser, sèche-linge, habitude vestimentaire, etc), ni de sa compétence d'usager à agir sur son environnement (ouverture des fenêtres la nuit, fermeture des volets le jour, etc). Un croisement des données du recensement ou des bases de données fiscales avec celles du parc immobilier permettrait sans doute d'identifier les situations les plus préoccupantes.

4.2. Adaptation

La pertinence et l'efficacité des différentes actions de réduction de vulnérabilité inventoriées précédemment dépendent des spécificités du territoire en matière de climat, de morphologie urbaine, de caractéristiques du bâti, de ressources, de peuplement. La première étape vers la définition d'une stratégie de mitigation consiste à réaliser un diagnostic selon les propositions du chapitre 4.1, susceptible en même temps d'évaluer l'impact si rien n'est fait et en même temps de mieux comprendre la structuration du parc en matière de vulnérabilité. Sur cette base, différentes approches sont possibles, entre conception experte systémique et algorithme d'optimisation dans une logique systématique.

4.2.1 Modèles d'optimisation

Les méthodes d'optimisation sont basées sur des algorithmes de minimisation d'un rapport coût sur bénéfice, pour lequel on sait établir la valeur en fonction d'un nombre limité de variables. Pour A. Rogeau (2020), par exemple, qui s'intéresse aux stratégies d'intervention pour réduire les consommations énergétiques du logement, ces variables sont : le système de ventilation, l'isolation des différents éléments de l'enveloppe et le système de chauffage, le tout dans un éventail très étroit de solutions classiques et standardisées. Ces fonctions doivent être connues pour chaque type d'édifice considéré³². Outre la question du choix du modèle permettant d'évaluer la fonction cherchée - qui doit être suffisamment simple pour autoriser un grand nombre de calculs tout en étant capable de représenter correctement les

³² Il faut par exemple être capable de calculer le coût et la réduction de consommation associés à l'isolation par l'extérieur des parois verticales opaques d'un immeuble des années 70 en béton armé en utilisant 15 ou 20 cm de laine de verre. Les variables ici sont le mode d'isolation (intérieur/extérieur), la nature et l'épaisseur de l'isolant, le type de paroi (opaque, fenêtres, toiture, façade, sol).

phénomènes clés et la variété des situations - l'indépendance des fonctions entre elles et la réduction de l'espace des solutions est problématique. Par ailleurs, les méthodes de validation de telles méthodes sont complexes et non stabilisées (Lefort 2019).

Ce sont les modèles statiques de type "besoins de chauffage" (qui considèrent les *degrés heure unifiés* et *irradiations heure unifiées* pour caractériser le climat) qui sont généralement utilisés pour une estimation à l'échelle territoriale (Asadi 2012, Fan 2017). L'une des hypothèses de ce type de modèle est que la température intérieure est constante en période de chauffe comme en période de climatisation. Il est donc impossible de tenir compte des transitoires, de l'inertie thermique des parois, ni d'évaluer le confort d'un logement non thermostaté (sans climatisation par exemple).

Par ailleurs, la manière même d'aborder la problématique de l'adaptation ne semble pas encore évidente. Quel objectif un algorithme d'optimisation doit-il viser? Doit-on se concentrer sur les épisodes les plus extrêmes, ou vise-t-on l'amélioration du confort? Faut-il envisager la minimisation d'un besoin de climatisation ou la réduction du nombre d'heures où la température intérieure est supérieure à 28°C? Dans la totalité ou une seule pièce du logement ? Il semble donc peu adapté de s'orienter vers de telles approches.

4.2.2 Evaluation de scénarios

Une alternative aux algorithmes d'optimisation consiste à évaluer la pertinence de projets d'intervention imaginés pour les situations représentatives les plus préoccupantes, et d'estimer leurs coûts. Avec une telle approche, l'espace de solutions n'est pas borné à l'avance et autorise toutes les innovations. En revanche, il n'y a aucune assurance qu'il s'agit d'une solution optimale (qui n'est de toute façon garantie dans la démarche d'optimisation que sur l'espace clos des variables retenues) et le niveau de compétence experte du concepteur devient alors déterminant.

L'approche par scénarios a beaucoup été mise en œuvre pour orienter les plans stratégiques des bailleurs sociaux notamment, leur permettant de déterminer et de programmer dans le temps des campagnes de travaux. Mais d'une part les catégories utilisées pour extraire des situations représentatives sont généralement très grossières, et d'autre part l'espace de solutions est toujours resté très limité aux systèmes techniques (isolation, ventilation, chauffage). Le potentiel de l'approche par scénarios n'a donc pas été pleinement exploité.

Pour ce qui concerne l'adaptation à l'aléa de canicule, il semble nécessaire d'ouvrir considérablement les possibilités, non seulement pour inclure tous les facteurs de vulnérabilité inventoriés ci-dessus, mais également pour intégrer l'ensemble des critères de la qualité architecturale. L'évaluation des solutions doit être écologique (consommations, ACV), technique (paramètres du confort, adéquation entre typologie constructive et dispositif technique), économique (faisabilité, portage des coûts), sociale (problématiques patrimoniales, acceptabilité sociale). Autrement dit, les scénarios proposés doivent relever du projet d'architecture, et leurs évaluations doivent mobiliser l'ensemble des acteurs compétents (ingénieurs, économistes, associations).

4.3. Adaptation atténuante

Le changement climatique est inéluctable, mais son ampleur dans l'avenir dépend de nos émissions de GES. Il est nécessaire de continuer à chercher à l'atténuer, le pire scénario étant que l'adaptation se fasse au prix d'un accroissement des émissions de GES, lequel amplifierait l'effet de serre, et donc le réchauffement climatique, nous obligeant à un plus grand effort d'adaptation et donc encore davantage d'émissions...

4.3.1 Conception bio-climatique

Pour ces raisons, il faut à tout prix lutter contre la solution de facilité que constitue la climatisation, et tirer parti au maximum de la conception bioclimatique, qu'il s'agisse de construction neuve ou d'intervention sur l'existant. L'adaptation peut ainsi même être une opportunité pour réduire nos émissions de GES. C'est le cas quand l'intervention sur l'existant est privilégiée par rapport à la démolition, quand l'installation d'un puits provençal contre la canicule sert de puits canadien en hiver, ou que l'amélioration de l'isolation permet de réduire globalement la facture énergétique, en hiver comme en été.

La conception bioclimatique s'oppose à une vision d'intervention standardisée. Elle suppose de prendre en compte globalement les caractères spécifiques d'un logement, tels que l'orientation et la taille de ses ouvertures, son potentiel de ventilation naturel, sa place dans l'immeuble ou la parcelle, ses matériaux de construction, ses éléments de façade et sa valeur patrimoniale, etc.

4.3.2 Éco-matériaux

L'adaptation atténuante implique encore que les interventions sur le bâti minimisent les émissions de GES, par exemple en utilisant des matériaux écologiques tels que les matériaux biosourcés, géo-sourcés et de réutilisation, qui demandent peu de transformation et peu de transport.

Si l'on reste dans une logique industrielle classique et des matériaux courants, il s'agira d'optimiser le système avec une meilleure efficacité énergétique des outils, une plus grande maîtrise des polluants, l'utilisation de matière première recyclée, la valorisation des déchets et la conception de filières de recyclage. Cet angle d'attaque ne modifie pas ou peu les habitudes des maîtres d'ouvrages, des concepteurs, des bureaux d'étude et des artisans. Transversale aux différents modes productifs, la stratégie qui vise à réduire les distances de transport cible la réduction de l'énergie et des émissions de gaz associées. Le béton pourrait ainsi améliorer son score écologique avec un ciment produit localement, ou du sable et des granulats provenant de carrières proches ou de recyclage de déchets de démolition locaux.

Une autre stratégie aujourd'hui plus innovante du point de vue du système global de production consiste à se détourner de logiques industrielles au profit de techniques et de matériaux nécessitant le moins de transformations possibles de la matière. L'utilisation de la pierre, de la terre crue, du bois, de la paille ou du roseau demande en revanche une relance de l'économie artisanale locale. Cette approche échappe à la logique « produit », ce qui la rend difficilement compatible avec l'ensemble du système de normalisation actuel qui s'appuie largement sur les fiches FDES (fiche de déclaration environnementale et sanitaire) ou DEP (déclaration environnementale de produit).

Les matériaux biosourcés ont un bon potentiel pour constituer des éco-matériaux. En effet il s'agit d'une ressource renouvelable et qui stocke du CO₂. Mais pour garantir que l'ensemble de son cycle de vie présente de faibles impacts environnementaux, il faut associer à l'origine biosourcée :

- une gestion écologique de la production, et ceci ne concerne pas uniquement le bois (renouvellement, biodiversité, absence de polluants, bonne gestion de l'eau) ;
- une énergie de production faible ou non émettrice de GES pour la récolte, le transport, le stockage, la transformation, le chantier, la déconstruction ;
- une logique de substitution aux matériaux à forte empreinte environnementale (par fonction équivalente et par une conception globale systémique) ;
- le maintien du coût écologique de l'entretien à un bas niveau ;
- la gestion de la fin de vie : recyclage, valorisation compostage ou énergie.

4.3.3 Directions de recherche

Sur le plan technique, il n'y a pas de véritable frein à l'utilisation d'éco-matériaux dans la construction, pour peu qu'ils soient mis en œuvre par des professionnels compétents. Si les matériaux à forte émission de GES sont encore largement majoritaires, c'est pour différentes raisons :

- La familiarité des professionnels avec ces matériaux. Ce sont les matériaux traditionnels d'aujourd'hui. Les combinaisons classiques entre produits standardisés facilitent la conception.
- Leur coût est encore inférieur à celui des éco-matériaux, pour la raison précédente et parce qu'ils sont issus de processus de fabrication industrialisés avec de très forts effets d'échelle. Les filières locales de production d'éco-matériaux sont encore fragiles, peu structurées, voire inexistantes dans certains cas. Leurs capacités de production sont mal connues.
- Seuls les matériaux industriels sont compatibles avec les modèles simples des ingénieurs (notamment pour ce qui concerne les eurocodes). Le comportement mécanique hautement non-linéaire de la plupart des éco-matériaux, l'importance de l'humidité dans leur comportement thermique, la variabilité de leurs caractéristiques les rend plus complexes à modéliser.
- Au-delà de leur fort potentiel, les qualités écologiques des matériaux alternatifs doivent encore être formellement démontrées, et les filières n'ont que peu les moyens de réaliser les études correspondantes ou de mettre en place une logistique écologiquement efficace.

Recherche pluridisciplinaire

La Métropole Rouen Normandie a engagé un certain nombre d'actions pour encourager la mise en œuvre de matériaux biosourcés dans la construction, dont la plus remarquable est certainement l'obligation de mettre en œuvre un minimum de 18 kg/m² construit de matériaux biosourcés dans les opérations immobilières dans les quartiers Rouen Flaubert et Luciline. Ces actions ont été inventoriées et commentées dans le cadre du programme de

recherche POPSU Métropole Rouen Normandie (Fleury 2021). Le rapport correspondant ouvre sur un certain nombre d'actions possibles d'une part et de besoins en connaissances d'autre part :

- Mieux connaître l'ensemble des initiatives, qu'elles soient publiques aux échelles communale, départementale ou régionale, ou privées issues de démarches de propriétaires, de concepteurs ou d'associations.
- Poursuivre l'étude d'un corpus de réalisations exemplaires. En fonction de l'accessibilité aux données, seraient privilégiés d'une part les édifices les plus représentatifs de grandes catégories et d'autre part ceux pour lesquels une cible d'utilisation de matériaux écologiques est explicitement visée.
- Étudier la possibilité de mettre en place une véritable stratégie d'optimisation des transports de matériaux : gros camions bien remplis et peu de parcours à vide, maillage serré des distributeurs avec des capacités de stockage adaptées.
- Donner les moyens aux services d'instruction des permis de construire de vérifier que des solutions moins émettrices de GES ont bien été envisagées, et se sont avérées déraisonnables.
- Réaliser un retour d'expériences des engagements de la COP21 locale, en se donnant des cibles de suivi des actions rigoureuses et représentatives, et préciser les moyens d'évaluation.
- Étudier la possibilité de valoriser la mise en œuvre de matériaux vertueux, ayant fait leur preuve dans les traditions constructives, sans pour autant avoir de fiche FDES, tels que la construction en terre crue ou la couverture en chaume.
- Évaluer le potentiel des filières locales d'éco-matériaux : état des filières, estimation des gisements, des capacités de production, identification des actions de développement (logistique, marchés garantis, aides techniques et financières...).

Recherche en architecture

L'observation des discours, engagements et actions de la Métropole ou des acteurs de son territoire pour la promotion de l'utilisation des éco-matériaux dans la construction conduit encore à poser des questions d'architecture (Fleury, 2021) :

- Dans quelle mesure l'intégration de la cible de réduction des émissions de GES par l'utilisation d'éco-matériaux en amont du processus de conception permet-elle de réduire les coûts, de garantir l'efficacité écologique de la démarche, tout en améliorant globalement la qualité architecturale ?
- Plus globalement, quel rôle l'architecte peut-il jouer dans le réseau d'acteurs impliqués ? Peut-il, ou doit-il, par la façon de les mettre en œuvre et de les questionner, être le garant du sens et de la cohérence des contraintes réglementaires, des prescriptions environnementales, des aspirations collectives ? Les procédures d'attribution des marchés sont-elles compatibles avec un tel rôle ?
- La mise en œuvre de ces matériaux est-elle de nature à participer d'une identité architecturale métropolitaine ? Dans quelle mesure ces matériaux sont-ils rendus visibles, ou impliquent-ils une modification des formes construites ? La provenance locale de ceux-ci est-elle communiquée ? Quelles connotations portent-ils, et

comment celles-ci sont-elles mises en scènes (écologie, high-tech, innovation, tradition, sain, local, chaleureux, etc.) ou désamorçées (dépassé, vulnérable, cheap, cher, etc.) ?

- Quel est le statut des démonstrateurs, des édifices emblématiques ou manifestes ? Sont-ils susceptibles de communiquer les aspirations des élus ? Constituent-ils des objets-frontières, support d'échanges de connaissances de traductions hétérogènes, comme dispositif d'intégration des savoirs, comme médiation dans les processus de coordination d'experts et de non-experts ? Peuvent-ils faire l'objet d'un retour d'expérience scientifique et formalisé ?

5. Tableaux synthétiques

5.1. Tableau récapitulatif aléa Vague de chaleur

Aléa : Hausse des températures diurnes et nocturnes ; augmentation du nombre de jours de canicule		
Impacts	Critères de vulnérabilité	Adaptation
<p><u>Sur le bâti</u> Dilatations thermiques différentielles impactant la structure (charges non prévues) et le second oeuvre (fissuration des bétons, dilatation des composants métalliques, craquelure des enduits)</p>	<p>Absence de joints de dilatation, construction en période froide, mauvaise mise en œuvre des enduits.</p>	<p>Prévoir ou insérer des joints de dilatation ; prendre en compte la hausse des différences de températures dues au changement climatique dans le dimensionnement.</p>
<p><u>Sur les espaces intérieurs</u> Dégradation de la qualité de l'air ; sur-chauffe, effet de serre.</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Capacité de thermorégulation de l'occupant, apports internes de chaleur. * Exposition aux nuisances sonores, absence de systèmes d'aération. * Mauvaise isolation, faible capacité thermique des matériaux. * Exposition des surfaces vitrées au rayonnement solaire, absence de protections solaires, absence de masque végétal. 	<ul style="list-style-type: none"> * Information et conseils auprès des habitants ; identification des refuges de fraîcheur urbains. * Double orientation des ouvertures (sur-ventilation naturelle de nuit) * Choix de matériaux à forte inertie isolés par l'extérieur (quand pertinent) * installation de "cool-roof" et toitures végétalisées * Végétalisation des espaces extérieurs, installation de protections solaires * Installation de puits provençal
<p><u>Sur le cycle de vie</u> Augmentation du taux d'équipement en climatisation et surconsommation énergétique</p>	<p>Vulnérabilité des réseaux urbains d'énergie</p>	<p>Réglementer l'usage de la climatisation?</p>

5.2. Tableau récapitulatif aléa Sécheresse et RGA

Aléa : Amplification des différences d'humidité des sols ; tassements différentiels du sol argileux.		
Impacts sur le bâti	Critères de vulnérabilité	Adaptation
<p>Dégradation des fondations superficielles et des éléments de constructions en contact avec le sol.</p> <p>Fissurations en façade et autour des ouvertures.</p> <p>Dislocation des dallages et des cloisons intérieures.</p> <p>Désolidarisation des éléments jointifs (garage, perrons, terrasses).</p>	<p>* Terrain d'assise non homogène, proximité de végétation, de canalisations enterrées fragiles ou non étanches.</p> <p>* Infiltrations d'eau en périphérie immédiate de l'édifice.</p> <p>* Faible profondeur des fondations, présence d'un sous-sol partiel, construction sur dalle.</p> <p>* Faibles rigidité et poids de l'édifice.</p> <p>Architecture complexe et manque de joints de rupture.</p>	<p>* Réalisation d'une étude géotechnique préalable.</p> <p>* Installation de dispositifs d'écrans anti-racines, systèmes de réseaux non rigides.</p> <p>* Installation d'un trottoir périphérique ou d'une géomembrane enterrée.</p> <p>* Approfondissement des fondations, création d'un vide-sanitaire ou d'un sous-sol généralisé.</p> <p>* Rigidification de la structure par chaînages</p> <p>* Installation de joints de rupture verticaux.</p>

5.3. Tableau récapitulatif aléa Inondations

Aléa : submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal. Débordement de cours d'eau (ou crue), ruissellement en surface, remontée de nappes phréatiques, submersion marine.		
Impacts sur le bâti	Critères de vulnérabilité	Adaptation
<p><u>Physico-chimiques</u> Détérioration des matériaux par contact prolongé de l'eau ou par remontées par capillarité (gonflement, moisissure, décollement des revêtements, altération des isolants).</p> <p>Endommagement des revêtements de sol et muraux, des cloisons et menuiseries.</p> <p>Détérioration des installations sensibles (compteurs électriques, chauffage, ECS).</p> <p><u>Structuraux</u> Déformation voire effondrement des parois.</p> <p>Affouillement des fondations par érosion du sol.</p> <p>Désolidarisation entre la structure et les fondations sous l'effet de la poussée d'Archimède.</p> <p>Endommagement suite aux impacts d'objets transportés par le courant.</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Implantation en zone inondable, caractéristiques de l'aléa : durée, hauteur et turbidité de l'eau. * Vitesse de l'écoulement. * Matériaux inadaptés (plâtre, laine de verre) et séchage difficile (points bas, manque de ventilation). * Présence d'équipements techniques et objets de valeur sous le niveau des plus hautes eaux. * Structure inadaptée à la différence de pression hydrostatique entre l'intérieur et l'extérieur. * Présence d'un sous-sol. 	<ul style="list-style-type: none"> * Construction en zone non-inondable * Construction d'un niveau habitable au-dessus des eaux maximales (pilotis, habitat flottant, surélévation) * Mise hors d'eau des équipements vulnérables * Mise en place de mesures de protection temporaires ou permanentes (batardeaux, barrières étanches, pompes, clapet anti-retour sur les canalisations...). * Renforcements de la structure et/ou des fondations. * Choix de matériaux résistants à l'eau.

6. Bibliographie

Articles, ouvrages et publications :

ADEME, 2012. *Guide de recommandation pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain à destination des collectivités*. Île-de-France.

ADEME, Vouillamoz P-E., Leblanc C., Paulou J., Goineau J., Huiban J., I Care & Consult, EP, EMENDA, 2019. *Rénovation énergétique des logements : étude des prix*.

Arab N., 2021. *Influence de la préoccupation énergétique sur l'architecture du logement social entre 1925 et 2015*. thèse de doctorat en architecture, soutenue le 13/12/2021 à l'Ecole nationale supérieure d'architecture de Lyon.

Asadi E. et al. 2012. "Multi-objective optimization for building retrofit strategies : A model and an application.", *Energy and Buildings*, 44 :81–87, jan 2012.

Bornarel A., Brindel Beth S., Brisedou B., Bussolino E., Cortesse S., Fradin J., Mansouri Y., Monaco F.X., Raoust M., Serieis M.. 2014. *Confort d'été passif*. ARENE Île-de-France, ICEB.

Bouchet J-A., 2017. *Adaptation au changement climatique en milieux urbains, Journée Technique*. CEREMA.

Bouchet J-A., Carretero N., 2018. *Confort thermique et qualité d'usage*. CEREMA.

Cassadou S., Chardon B., D'helf M., Declercq C., Eilstein D., Fabre P., Filleul L, Jusot J-F., Lefranc A., Le Tertre A., Medina S., Pascal L., Prouvost H., Ledrans M. (2004). *Vague de chaleur de l'été 2003 : relations entre températures, pollution atmosphérique et mortalité dans neuf villes françaises*. rapport d'étude, INVS.

CCR, 2021. *Les catastrophes naturelles en France. Chiffres clés 1982-2020*. Publication. <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/-/chiffres-cl%C3%A9s-1982-2020>, consulté le 29/11/2021.

CEREMA, 2016. *Systèmes de climatisation et réseaux de froid*.

CEREMA, 2021. *Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie : Enseignements opérationnels. Évaluation 2012-2019*.

CEPRI, 2010. *La bâtiment face à l'inondation, Diagnostiquer et réduire sa vulnérabilité face à l'inondation*.

CEPRI, 2015. *Comment saisir les opérations de renouvellement urbain pour réduire la vulnérabilité des territoires inondables face au risque d'inondation ? Principes techniques d'aménagement*.

Chaline J.-P., 2013. *Rouen, Les maisons à pans de bois au fil des siècles et des rues*, Amis des monuments Rouennais, Saint-Etienne-du-Rouvray.

Chaline J.-P., 2006. *Demeures rouennaises du XIXe siècle*, Société des amis des monuments Rouennais, Saint-Etienne-du-Rouvray.

CODA Stratégies, 2021. *La climatisation de confort dans le bâtiment*. ADEME.

Cribellier M-P., Gresselin F., 2015. *Changement climatique en Normandie : Territorialisation des impacts et enjeux*. DREAL Haute et Basse-Normandie.

De Munck C., 2013. *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*. Thèse de doctorat en Océan, Atmosphère et surfaces continentales, soutenue le 08/11/2013 à l'INPT Toulouse.

DREAL Normandie, 2020. *Le Climat en Normandie*. Publication.

http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/20201110_profil_climat-web.pdf

Fan Y. et Xia X. 2017. "A multi-objective optimization model for energy efficiency building envelope retrofitting plan with rooftop PV system installation and maintenance". *Applied Energy*, 189 :327–335, mar 2017.

FEMA (Federal Emergency Management Agency) 1998. *Homeowner's guide to retrofitting - Six ways to protect your house from flooding*.

Fleury F., 2021. *La métropole biosourcée ? Potentiels et actions métropolitaines pour la promotion des matériaux écologiques dans la construction*. Rapport de recherche POPSU Métropole Rouen Normandie.

Frayssinet L. et al. 2018. "Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 2018, 81, Part 2, pp.2318-2327.

Gauthiez B., 1991. *La logique de l'espace urbain, formation et évolution : le cas de Rouen*, thèse de doctorat en histoire. soutenue à l'Ecole des hautes études en sciences sociales, Paris.

Gersonius B., Zevenbergen C., Puyan N. & Billah, M.M.M., 2008. *Efficiency of private flood proofing of new buildings – adapted redevelopment of a floodplain in The Netherlands*.

Global Alliance for Buildings and Construction, Observatoire de l'Immobilier Durable, 2021. *Buildings and Climate Change Adaptation : A Call for Action*. Paris.

<https://globalabc.org/index.php/resources/publications/buildings-and-climate-change-adaptation-call-action>

Hakimi A., H. Ouissi, M. El Kortbi et N. Yamani. "Un test d'humidification-séchage pour les blocs de terre comprimée et stabilisée au ciment", *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 31, January-February 1998, pp 20-26.

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.

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.

Laporte R., 2018. "Notes sur la part d'imitation dans l'innovation en architecture", *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère* [En ligne], 1 | mis en ligne le 30 janvier 2018, consulté le 23 novembre 2021. URL : <http://journals.openedition.org/craup/282> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/craup.282>

Lefort L. et al., 2021. *Méthodologie de validation d'outils de simulation énergétique urbaine avec un cas d'application sur la Seine-et-Marne*. IBPSA France 2020, novembre 2020, Reims [en ligne], France. hal-03202696, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03202696>

Malnic E., 1998. *Maisons de Normandie*, éditions Eyrolles.

Mandoul T., 2012. "Climat(s) : nouveau paradigme pour l'architecture ?", *Raison publique*, 2012/2 N° 17, Presses universitaires de Rennes, pp 141-161
<https://www.cairn.info/revue-raison-publique1-2012-2-page-141.html>, consulté le 23/11/2021.

Mestres J.-M., 2021. "Philippe Rahm : « La forme suit le climat »", Transcription d'entretien pour la revue *Urbanisme* n°417. <https://www.urbanisme.fr/invite/philippe-rahm>, consulté le 23/11/2021.

Métropole Rouen Normandie, 2019. *Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET) : Tome 1 Diagnostic*.

Mira, P., 2015. *Penser l'architecture environnementale des idées aux formes & des formes aux idées. Dans quel processus de néomorphisation sommes-nous ?*, thèse de doctorat sous la direction de François Fleury, soutenue le 18 décembre 2015 à l'ENSA Lyon.

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

Nowamooz H., 2007. *Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels*, thèse de doctorat en Sciences de l'ingénieur (physique), soutenue le 19/12/2007 à l'Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL.

Observatoire de l'Immobilier Durable, 2020a. Fiche aléa vague de chaleur.
<https://www.taloen.fr/ressources/4d9c4ec1-1777-4f03-8126-d0791304d7f4>

Observatoire de l'Immobilier Durable, 2020b. Fiche aléa sécheresse et RGA.
<https://www.taloen.fr/ressources/03cd90c0-b65d-4f4f-a3c7-a2c3162e5070>

Observatoire de l'Immobilier Durable, 2020c. Fiche aléa inondations.
<https://www.taloen.fr/ressources/7ff9e5ca-f0bc-42d4-b2bf-278ff9a59a3b>

Observatoire de l'Immobilier Durable, 2020d. *Fiche aléa submersions marines*.

Office International de l'Eau, 2021. *Bulletin national de situation hydrologique (BSH national) du 12 avril 2021*.

ONERC, 2018. *Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique*. Rapport au premier ministre et au Parlement. La Documentation Française, Paris.

Pérouse de Montclos J.-M., 2013. *Normandie : Le Dictionnaire du Patrimoine*, Place de victoires (Ed).

Perrin G., 2020. *Rafraîchissement urbain et confort d'été : Lutter contre les canicules*. DUNOD.

Proverbs, D. G., Brebbia, C. A., & Penning-Rowsell, E. C. (Éds.). *Flood recovery, innovation and response*, WIT, p.247-259.

Salagnac J.-L., 2015. *Adaptation du cadre bâti aux conditions climatiques actuelles et futures : le cas des canicules*. Rapport de recherche. CSTB.

Salagnac J.-L., Marchand D., Florence C., Delpeche P., Axès J.-M., 2014. *Impacts des inondations sur le cadre bâti et ses usagers*. Rapport final. CSTB.

SGAR de Haute et Basse-Normandie (2013). *L'adaptation aux effets du changement climatique en Haute et Basse-Normandie*. Rapport technique final.

Vidal S., 2012. *Impact de la rehausse du niveau marin moyen sur l'Éco-quartier Flaubert*. SPLA CREA Aménagement.

Vincent M., Cojean R., Fleureau J.-M., Cui Y. J., Jacquard C., Kazmierczak J.-B., Masrouri F., Tessier D., Alimi-Ichola I., Magnan J.-P., Blanchard M., Fabre D., Pantet A., Audiguier M., Plat E., Souli H., Taibi S., Tang A.-M., Morlock C., ... Fontaine C., 2009. *Rapport de synthèse final du projet ARGIC (Analyse du retrait - gonflement et de ses Incidences sur les Constructions)*. Rapport BRGM/RP-57011-FR en partenariat entre le Centre de Géosciences, le BRGM, le LMSSMat, le CERMES, Fondasol, l'INERIS, le LAEGO, l'INRA, le LGCIE, le LCPC, Météo-France, le GHYMAC et l'Université de Poitiers.

Liens internet :

“Stabilisation du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux sous les habitations : un système innovant par infiltration d'eau de pluie”, article extrait du dossier *Le Cerema mobilisé pour adapter le bâti au changement climatique* [en ligne], publié en ligne le 17 septembre 2019.

<https://www.cerema.fr/fr/actualites/stabilisation-du-phenomene-retrait-gonflement-sols-argileux>, consulté le 30/11/2021.

“Journal officiel : Plusieurs communes de Seine-Maritime classées en état de catastrophe naturelle”, Les services de l’Etat en Seine-Maritime, mise à jour le 23 juin 2020.

<https://www.seine-maritime.gouv.fr/Actualites/Journal-officiel-Plusieurs-communes-de-Seine-Maritime-classees-en-etat-de-catastrophe-naturelle>, consulté le 29/11/2021.

“Les individus sont-ils tous égaux face à la chaleur ?”, Santé publique France, publié en ligne le 13 juin 2019.

<https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaieurs-canicule/articles/les-individus-sont-ils-tous-egaux-face-a-la-chaieur>, consulté le 25/11/2021.

“Plan de gestion de canicule national 2020 : informations, recommandations et consignes”, Les services de l’Etat en Seine-Maritime, mise à jour le 29 septembre 2020.

<https://www.seine-maritime.gouv.fr/Politiques-publiques/Santé/Actualités/Plan-de-gestion-de-canicule-national-2020-Informations-recommandations-et-consignes>, consulté le 20/10/2021.

“Vagues de chaleur et changement climatique”, Météo France, publié en ligne le 28/02/2020.

<https://meteofrance.com/changement-climatique/observer/changement-climatique-et-vagues-de-chaieur>, consulté le 20/10/2021.

“Sécheresses et changement climatique”, Météo France, publié en ligne le 27/02/2020.

<https://meteofrance.com/changement-climatique/observer/changement-climatique-et-secheresses>, consulté le 30/11/2021.

Dossier thématique Retrait-gonflement des argiles, Géorisques.

<https://www.georisques.gouv.fr/risques/retrait-gonflement-des-argiles>

Dossier thématique Inondations, Géorisques.

<https://www.georisques.gouv.fr/risques/inondations>

Bat-ADAPT, outil cartographique d’analyse de vulnérabilité climatique développé par l’OID en 2020. <https://www.taloen.fr/bat-adapt>

Textes législatifs :

Directive 2007/60/EC du 23 octobre 2007 relative à l’évaluation et à la gestion des risques d’inondation.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32007L0060>

Arrêté du 28 avril 2020 portant reconnaissance de l’état de catastrophe naturelle (J.O. juin 2020). <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041987226>

Décret n°2019-1223 du 25 novembre 2019 relatif aux techniques particulières de construction dans les zones exposées au phénomène de mouvement de terrain différentiel consécutif à la sécheresse et à la réhydratation des sols (J.O. 26 novembre 2019).

<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000039420045/2020-01-01/>

Ordonnance n° 2020-71 du 29 janvier 2020 relative à la réécriture des règles de construction et recodifiant le livre 1er du code de la construction et de l'habitation (J.O. 31 janvier 2020)

<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000041562511/2021-07-01/>