



Les effets du **changement climatique** sur le **secteur énergétique** dans la **Métropole Rouen Normandie**



GIEC

de la Métropole
Rouen Normandie

Groupe interdisciplinaire d'experts locaux sur le climat



métropole
ROUENNORMANDIE

RÉFÉRENT GIEC DE LA
MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE
Bruno Renou

AUTEURS
Bruno Renou, Robin Boulot, Léo Kazmierczak

RELECTURES ET CONTRIBUTIONS
Guillaume Lacassin, Jean-Baptiste Le Gac, Théo Willekens,
Anna Dinand (Insa Rouen Normandie)
Direction de la Transition énergétique
de la Métropole Rouen Normandie
Institut TURN de l'Université Rouen Normandie

Sommaire

AVANT-PROPOS DES AUTEURS ET PRÉCAUTIONS DANS L'INTERPRÉTATION DES HYPOTHÈSES ET DES RÉSULTATS DE CETTE ÉTUDE	5
CONTEXTE ET STRATÉGIE ÉNERGÉTIQUE DE LA MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE	6
L'INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES PRIORISÉES PAR LA MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE	9
L'INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES STRATÉGIES ÉNERGÉTIQUES SUR LA PRODUCTION ET LA CONSOMMATION D'ÉNERGIES NON RENOUVELABLES	17
HYPOTHÈSES SUR L'ÉVOLUTION DES CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE	20
LA VULNÉRABILITÉ DES INFRASTRUCTURES DE DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE	31
CONCLUSION	34
BIBLIOGRAPHIE	35
ANNEXE	36

Avant-propos des auteurs et précautions dans l'interprétation des hypothèses et des résultats de cette étude

Quelques définitions

Le domaine de l'énergie recouvre plusieurs notions fondamentales dont les définitions nous paraissent nécessaires à rappeler. Tout d'abord sur la distinction entre énergies primaires et énergies finales, les premières correspondent à une forme d'énergie disponible de manière naturelle avant toute transformation, et exploitée directement ou importée ; les secondes désignent l'énergie disponible après les phases de transformation et de distribution de l'énergie primaire. L'énergie finale est donc celle consommée pour les besoins des usagers (particuliers, activités économiques, administrations publiques, etc.). Par convention, en France, il est estimé qu'il faut 2,58 kWh d'énergie primaire pour obtenir 1 kWh d'électricité, afin de compenser les pertes liées aux phases de transformation et de distribution de l'énergie primaire. Le taux de conversion est de 1 pour les autres énergies (fioul, charbon, gaz, bois, vent, eau, soleil), c'est-à-dire qu'1 kWh d'énergie primaire est égal à 1 kWh d'énergie finale car ces énergies ne nécessitent pas ou peu de transformation pour leur utilisation finale¹.

Les énergies primaires peuvent être des énergies non renouvelables constituées de combustibles d'origine fossile (produits pétroliers, gaz, charbon) ou de minerais (uranium) d'une part, ou des énergies renouvelables issues de ressources naturelles (bois, eau, rayonnement solaire, force du vent, géothermie, marée, etc.) d'autre part. Il existe également des énergies de récupération issues de procédés industriels ou l'incinération des déchets qui produisent de la chaleur pouvant être valorisée pour d'autres usages (chauffage de l'usine ou d'autres sites situés hors du périmètre de l'industrie via des réseaux de chaleur dédiés) (Tableau 1).

L'électricité en tant qu'énergie finale est issue de différentes sources de production. En France, l'électricité est majoritairement produite à partir du nucléaire (75 % de l'énergie primaire produite en 2021²). Néanmoins, l'électricité peut aussi être produite à partir des systèmes de production renouvelable, ou encore à partir de gaz naturel, de pétrole et de charbon. Le reste des énergies finales correspond à des énergies dites « thermiques » utilisées sous forme de chaleur.

Précautions dans l'interprétation des hypothèses et des résultats de cette étude

À partir des données de l'Observatoire Régional de l'Énergie, du Climat et de l'Air de Normandie (ORECAN), du Schéma Directeur des Énergies (SDE) de la Métropole Rouen Normandie, de la stratégie du Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET), et des tendances des climats passés et à venir, nous avons estimé, dans la mesure du possible, plusieurs hypothèses sur l'ampleur des effets du changement climatique sur la production, la distribution et la consommation de l'énergie au sein du territoire. Cependant, cet exercice s'accompagne inéluctablement d'incertitudes et de limites plus ou moins importantes. Les propos qui suivent illustrent donc des tendances et des ordres de grandeur généraux au regard des connaissances disponibles lors de la réalisation de cette étude.

Tableau 1 : Récapitulatif des principales énergies utilisées aujourd'hui

Énergies renouvelables et de récupération (EnR&R)	Énergies non renouvelables
Solaire photovoltaïque et thermique Éolien Géothermie Hydraulique Bois-énergie Énergie aérothermique Biogaz Unité de valorisation énergétique des déchets Chaleur fatale industrielle Biocarburants	Produits pétroliers Gaz naturel Charbon Nucléaire

¹ Source Réseau RAPPEL : <https://www.precaire-energie.org/energie-primaire-et-energie-finale-le-coefficient-energetique-ou-facteur-d/>

² Source : SDES, Bilan énergétique de la France, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2022/7-bilan-energetique-de-la-france>

Contexte et stratégie énergétique de la Métropole Rouen Normandie

La sobriété, l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables constituent les trois champs d'action relatifs à l'énergie pour lutter contre le réchauffement climatique. Celui-ci influence directement sur les moyens de production et les modes de consommation de l'énergie, ainsi que sur les actions mises en place par la Métropole Rouen Normandie dans le but de réduire l'empreinte carbone du territoire. Il en résulte des conséquences sur la production, la distribution et la consommation de l'énergie dans la Métropole (Figure 1). L'étude des influences du réchauffement climatique constitue donc un enjeu important à prendre en compte par la Métropole dans sa stratégie d'adaptation du secteur énergétique à long terme.

Cette étude a pour objet d'analyser les effets déjà perceptibles ou potentiels du changement climatique sur le secteur énergétique local, de la production de l'énergie, à sa distribution par les réseaux et jusqu'à sa consommation finale. Ces étapes sont impactées directement par l'évolution des facteurs climatiques (hausse de la température atmosphérique diminuant l'utilisation du chauffage en hiver, ou hausse de la fréquence des canicules qui favorise le recours à la climatisation en été), ainsi que leurs conséquences (élévation du niveau de la mer, disponibilité des ressources naturelles). Afin d'anticiper ou de compenser ces évolutions du climat, la Métropole a établi un Schéma directeur des énergies (SDE) en 2017 dont les orientations stratégiques et opérationnelles ont été reprises dans le Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET) approuvé en 2019. Sur le volet énergétique, le plan d'action s'articule autour du développement des énergies renouvelables, des mobilités, et de la rénovation énergétique des logements et des bâtiments tertiaires. Ces trois axes sont eux-mêmes dépendants des ressources naturelles disponibles (comme la ressource bois pour le développement du bois énergie par exemple), qui elles-mêmes dépendent également de l'ampleur du changement climatique et de la fréquence des événements extrêmes (feux de végétation diminuant la ressource en bois). Le secteur énergétique est donc influencé à la fois par le dérèglement climatique et au travers de la stratégie énergétique de la Métropole (Figure 1).

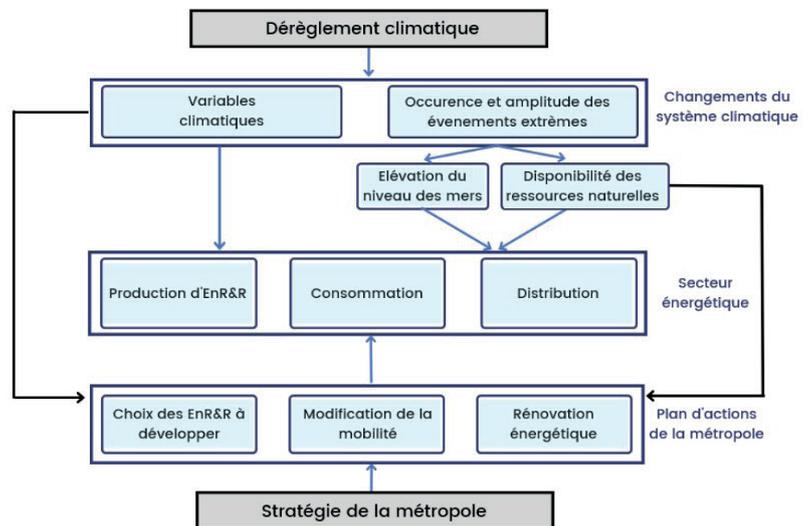


Figure 1 : Modes d'impact du réchauffement climatique sur le secteur énergétique de la Métropole Rouen Normandie

Stratégie de la Métropole en matière de production d'énergie renouvelable

Le SDE a mis en lumière une part écrasante des énergies fossiles dans la production d'énergie locale (91 % contre 7 % de bois-énergie et 2 % de chaleur fatale industrielle). Pour inverser cette tendance, le PCAET de la Métropole vise à multiplier la production d'énergie renouvelable par 2,5 (jusqu'à 3 000 GWh/an), et à atteindre un mix énergétique composé à 100 % d'énergie renouvelable, dont 42 % de l'énergie produite proviendrait de sources locales. Les énergies dont le potentiel de développement semble le plus important sont le bois-énergie (26 % du mix en 2050), la récupération de chaleur fatale industrielle ou de récupération (7 %), le photovoltaïque (5 %), et la méthanisation (4 %).

L'atteinte de ces objectifs nécessitera plusieurs grands chantiers pour déployer les infrastructures nécessaires au développement de ces énergies (extension des réseaux de chaleur par exemple), et impliquera des acteurs divers comme les entreprises, les citoyens pour favoriser l'autoproduction et l'autoconsommation, ou encore une coopération à l'échelle de l'ensemble de la région Normandie pour développer un circuit d'approvisionnement des ressources locales notamment en bois-énergie et d'autres productions d'énergies renouvelables. En effet, la production visée à l'horizon 2050 à l'échelle

de la Métropole Rouen Normandie resterait insuffisante pour couvrir les besoins des consommations. Une coopération entre les collectivités et les entreprises à l'échelle de la Région Normandie et de la vallée de la Seine paraît donc indispensable. La récente formalisation de l'Entente Axe Seine qui réunit la Ville de Paris et 12 intercommunalités dont la Métropole Rouen Normandie, Le Havre Seine Métropole, et la Métropole du Grand Paris, va dans ce sens. Plus localement, la Métropole Rouen Normandie a également lancé son propre service public de transition énergétique, appelé « Énergies Métropole Rouen Normandie » composé de deux structures techniques³ :

- L'Agence locale de la transition énergétique Rouen Normandie (ALTERN) chargée d'accompagner les particuliers dans leurs projets de rénovation énergétique, ainsi que les communes dans la rénovation de leur patrimoine.
- L'Axe Seine Énergies Renouvelables (ASER), une société d'économie mixte pilotée par l'Entente Axe Seine, et chargée de déployer massivement les infrastructures de production d'énergie renouvelable locale en intervenant notamment dans la mobilisation de financements et la réalisation d'études vérifiant la capacité technique et financière des projets.

Actuellement, selon les chiffres de l'ORECAN, la production d'énergie renouvelable locale suit une trajectoire favorable à l'atteinte

³ Voir le communiqué de presse de la Métropole Rouen Normandie du 3 février 2022.

de ces objectifs, même si la production peut être plus aléatoire certaines années (2011 ou 2019) (Figure 2). De plus, le suivi exact de cette évolution reste difficile en raison du secret statistique qui protège les données de plusieurs filières comme le biogaz et le bois cogénération. La production illustrée comme suit est donc sous-estimée.

Stratégie de la Métropole en matière de réduction de la consommation d'énergie

La Métropole vise la réduction de 70 % de la consommation énergétique de son territoire par rapport à 2005, à travers notamment une rénovation massive des bâtiments vers un niveau moyen « BBC – Bâtiment basse consommation », ou encore le développement des mobilités actives (vélo, marche, trottinette, etc.), de l'électromobilité, et du covoiturage. D'autres enjeux spécifiques ont été identifiés sur le secteur industriel, le plus énergivore, et qui est traité plus spécifiquement par un plan d'action intégré élaboré au sein du réseau européen UrbanPact, et du groupe local Urbact.

Actuellement, les chiffres de l'ORECAN montrent une tendance à la stagnation de la consommation d'énergie entre 2005 et 2019 sur le territoire de la Métropole. Les chiffres de 2021 montrent une baisse notable de la consommation d'énergie mais qui peut être liée aux perturbations causées par la pandémie de la COVID-19. Il reste à étudier si ces chiffres confirment une nouvelle tendance, ou si la consommation d'énergie va rebondir lors des prochains bilans de l'ORECAN. Dans ce second cas, les efforts pour atteindre les objectifs du PCAET vont s'accroître au fil du temps si la consommation d'énergie de tous les secteurs n'est pas réduite plus rapidement (Figure 3).

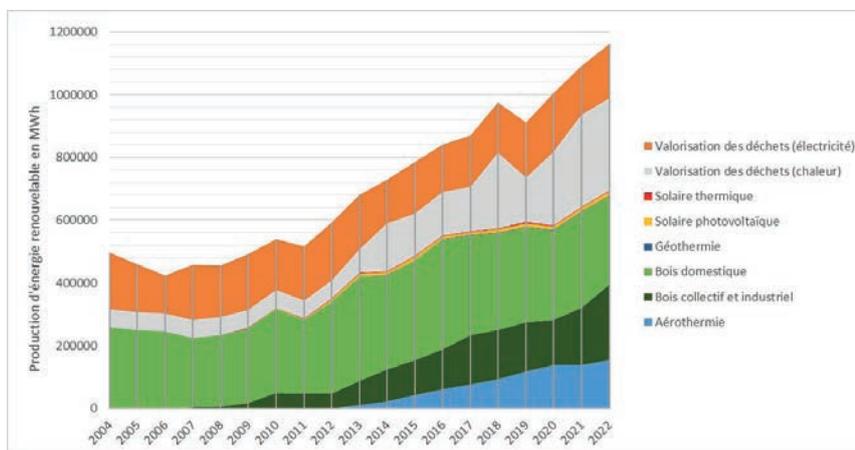


Figure 2 : Production d'énergie renouvelable dans la Métropole Rouen Normandie entre 2004 et 2022 - Source : ORECAN – Biomasse Normandie – 2022_v1.0

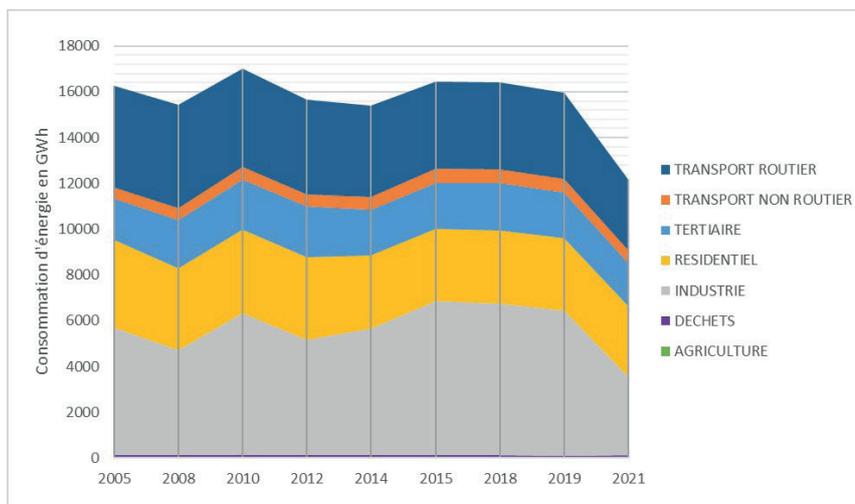


Figure 3 : Consommation d'énergie des secteurs d'activité dans la Métropole Rouen Normandie entre 2005 et 2021. – Source : ORECAN – Atmo Normandie – Inventaire version 4.1.0 et ORECAN – Biomasse Normandie – version 12_23 – Biomasse Normandie – version v1.0 (Transport non routier) – Format de rapportage PCAET_ ORECAN

Contribution du secteur de l'énergie à l'atténuation au changement climatique

La transition vers une consommation plus sobre en énergie et vers des énergies renouvelables implique aussi des enjeux majeurs pour la décarbonation du territoire. Selon l'ORECAN, les secteurs les plus énergivores sont aussi les plus émetteurs de gaz à effet de serre (secteurs industriel, routier et résidentiel) (Figure 4).

De même, ces émissions se retranscrivent aussi vis-à-vis du mix énergétique. Les sources d'énergies fossiles (produits pétroliers, gaz naturel, hors combustion), qui concentrent actuellement la majorité du mix énergétique (91 %, voir précédemment), représentent logiquement les principales émissions de gaz à effet de serre. Tandis que les énergies renouvelables ne contribuent que marginalement à ces émissions (Figure 5).

Constituant désormais le fer de lance de la politique climatique française pour respecter l'Accord de Paris sur le climat de 2015 via son inscription dans la Stratégie nationale bas carbone, et reprise par la Métropole Rouen Normandie dans le cadre de son engagement dans la démarche « Cities Race to Zero » en 2020, la neutralité carbone implique néanmoins une transformation radicale et très rapide, en moins de trois décennies, des modes de production et de consommation de l'énergie, ainsi que du mix énergétique composé principalement de combustibles d'origine fossile (pétrole, gaz naturel, charbon). L'ampleur de cette transformation ne doit donc pas être sous-estimée et requiert des études et des concertations approfondies sur les investissements financiers et techniques à engager, et les conséquences environnementales, sociales et économiques qu'ils induisent à court, moyen et à long terme (Veyrenc, 2023).

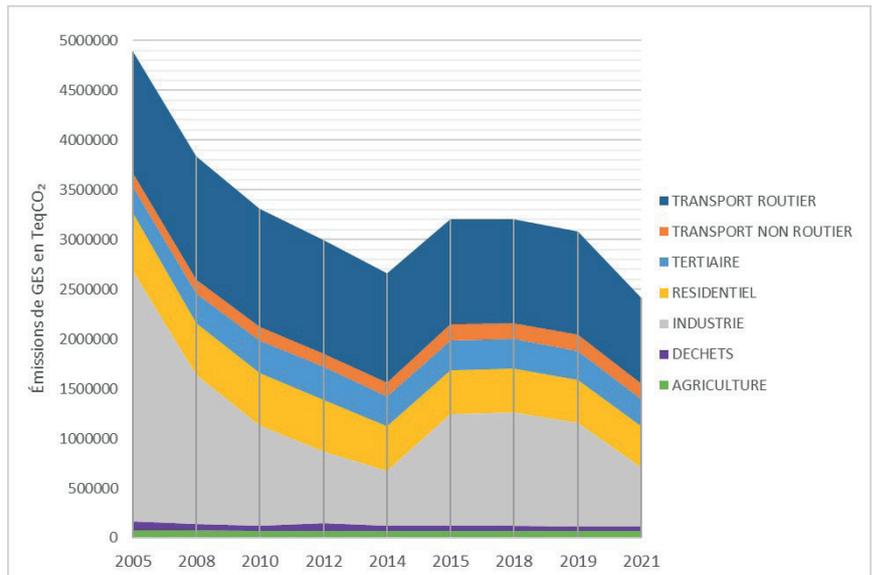


Figure 4 : Émissions de gaz à effet de serre sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie de 2005 à 2021 (hors SCOPE 3) – Source : ORECAN – Atmo Normandie – Inventaire version 4.1.0 et ORECAN – Biomasse Normandie – version 12_21 (Transport routier) – Biomasse Normandie – version v1.0 (Transport non routier) – Biomasse Normandie – version 09.19 (Séquestration Carbone) – Format de rapportage PCAET_ORECAN

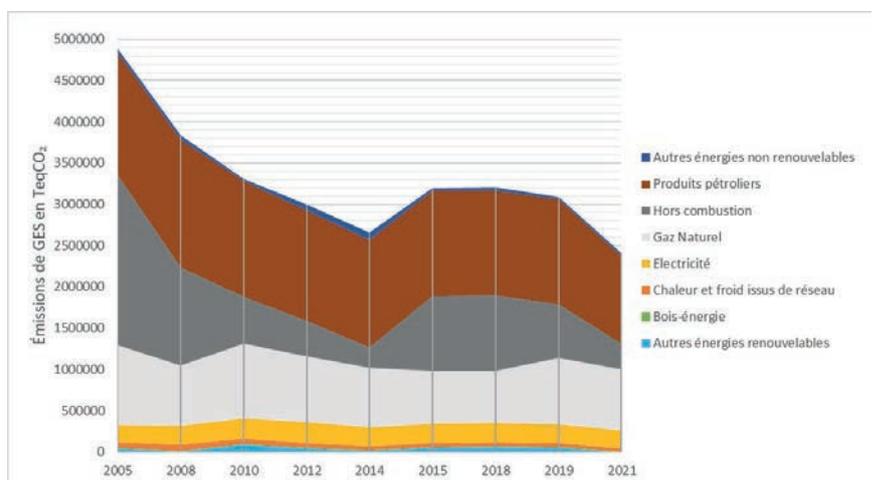


Figure 5 : Émissions de gaz à effet de serre des sources d'énergie utilisées sur le territoire entre 2005 et 2021 (hors SCOPE 3) - Source : ORECAN – Atmo Normandie – Inventaire version 4.1.0 et ORECAN – Biomasse Normandie – version 12_21 (Transport routier) – Biomasse Normandie – version v1.0 (Transport non routier) – Biomasse Normandie – version 09.19 (Séquestration Carbone) – Format de rapportage PCAET_ORECAN

L'influence du changement climatique sur le développement des énergies renouvelables prioritaires par la Métropole Rouen Normandie

Le bois-énergie

Selon le SDE, le bois énergie est utilisé aussi bien à titre individuel pour alimenter les chaudières domestiques (bois bûches, granulés), qu'à titre collectif pour alimenter les chaudières collectives hors réseau et les chaufferies d'alimentation des réseaux de chaleur. Dans l'industrie, le bois-énergie est utilisé par des chaudières et par cogénération pour produire de la chaleur et de l'électricité.

Consommation de bois-énergie

La Métropole consomme environ 340 000 tonnes de bois énergie chaque année, mais n'en produit environ que 38 000 tonnes sur son territoire, soit environ 11 % de sa consommation (Figure 6). Le reste du bois-énergie provient des territoires limitrophes et principalement de la région Normandie (FNCOFOR, 2016).

Les ressources en bois de la Métropole

À l'échelle de la Métropole, les ressources en bois sont importantes en raison de la surface occupée par les forêts sur le territoire. En effet, celles-ci représentent près d'un tiers du territoire soit environ 24 500 ha dont 22 500 ha de surface forestière de production. Cette surface est notamment composée de 12 000 ha de forêts publiques (53 %), avec quatre grands massifs forestiers domaniaux (Roumare, Forêt Verte, le Trait Maulévrier et La Londe-Rouvray), et de 10 500 ha de forêts possédées par des gestionnaires privés (47 %). Les forêts de la Métropole sont peuplées à 78 % de feuillus comme le chêne sessile, le chêne pédonculé et le hêtre, et à 20 % de conifères comme le pin sylvestre et le pin laricio. Les forêts mixtes associant des feuillus et des conifères constituent les 2 % restants (Kazmierczak et al., 2020).

Une capacité maximale de 87 500 t/an de ressources forestières en bois-énergie a été identifiée sur le territoire de la Métropole par le Plan d'approvisionnement territorial (2015). 65 000 t/an seraient exploitables dans les conditions actuelles dont 47 000 tonnes/an qui le seraient facilement (Figure 7). Cette ressource en bois est constituée majoritairement de feuillus (93 %), et se situe principalement dans les forêts privées (64 %). La principale contrainte de cette exploitabilité

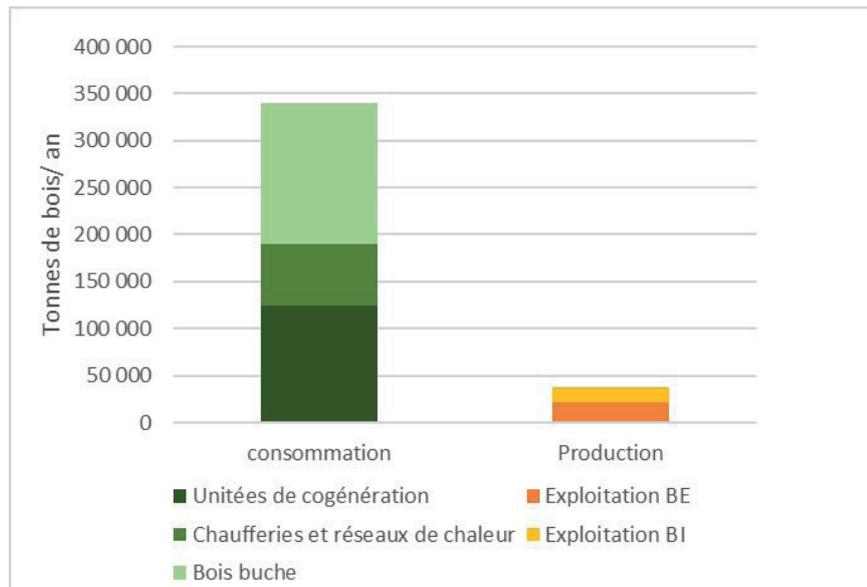


Figure 6 : Comparaison entre la production et la consommation de bois-énergie dans la Métropole Rouen Normandie – Source: FNCOFOR, 2016.

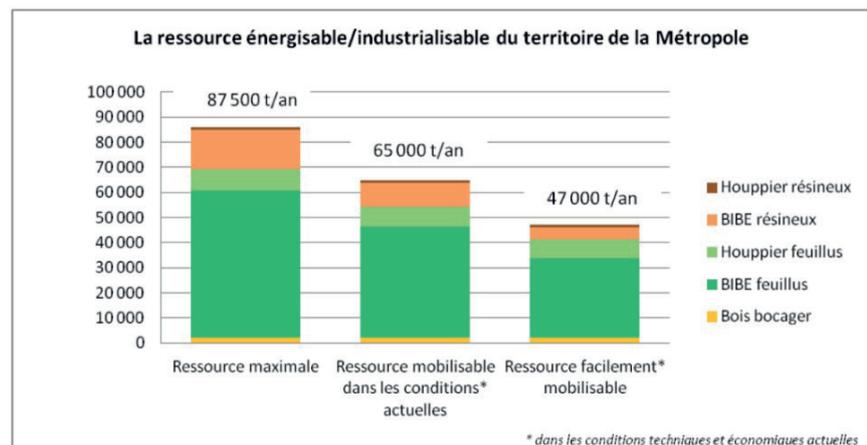


Figure 7 : Ressources en bois-énergie de la Métropole – Source: FNCOFOR, 2016

est l'accessibilité aux arbres qui est évaluée par la distance de débardage. Ces capacités de bois-énergie sont donc majoritairement constituées de bois provenant des forêts (ressources forestières) mais une petite partie (environ 2 250 t/an) provient aussi des haies présentes autour des champs agricoles (ressources bocagères). Sur les 740 km de haies que possède la Métropole, 450 km peuvent constituer des sources de bois-énergie (FNCOFOR, 2016).

Outre les ressources forestières et bocagères, il est également possible de valoriser le bois en fin de vie en bois énergie en recyclant les déchets en bois des industries, du BTP et des particuliers. Les flux de déchets de bois provenant de la Métropole sont estimés à 35 000 t/an (20 000 tonnes issues du BTP et 15 000 tonnes venant des déchetteries du territoire) (SDE, 2017).

Perspectives de l'utilisation du bois-énergie dans la Métropole vis-à-vis du changement climatique et des politiques régionales

La Métropole prévoit de poursuivre le développement de la filière bois-énergie en visant une augmentation de la production énergétique actuelle de 800 GWh/an à l'horizon 2050 (Figure 8). Ce développement s'appuie principalement sur le bois-énergie alimentant les réseaux de chaleur (PCAET, 2019). En parallèle, le développement de la filière bois-énergie est aussi impulsé par les politiques et les programmes menés à l'échelle régionale (Programme Régional de la Forêt et du Bois coordonné par le Région Normandie, et le Programme Bois Énergie Normandie animé par l'association régionale Biomasse Normandie depuis 1995), ainsi que par les politiques européennes (paquets énergie-climat) et nationales (loi de transition énergétique pour une croissance verte du 17 août 2015, loi d'accélération de la production d'énergie renouvelable du 10 mars 2023, programmation pluriannuelle de l'énergie).

L'ensemble de ces politiques et des conjonctures locales (arrêt d'une grosse unité de pâte à papier et augmentation du recyclage du bois d'industrie) ont conduit, au début des années 2010, au développement de la récolte de bois pour un but énergétique en Normandie (Figure 9).

La ressource en bois peut être aussi bien envisagée comme un moyen de substitution aux énergies fossiles, que pour le stockage du carbone dans les forêts ou les produits bois (AcclimaTerra et al., 2018). Pourtant, cette promotion importante du bois énergie dans un contexte de transition énergétique ne s'est pas accompagnée d'une étude préalable sur les impacts d'une telle politique. Il n'existe pas d'études suffisamment précises à l'échelle locale, ni sur l'effet de ces prélèvements sur la durabilité des écosystèmes forestiers, ni des effets des résidus de la combustion (fumées, cendres) sur l'environnement (Kazmierczak et al., 2020).

D'autre part, le réchauffement climatique a une incidence directe sur la ressource en bois (Kazmierczak et al., 2020). L'augmentation globale de la température contraint de plus en plus la croissance de certaines espèces locales, dont le dépérissement pourrait entraîner une baisse des ressources en bois exploitables pour le bois-énergie. Le chêne pédonculé, le hêtre et le pin sylvestre, les espèces parmi les plus présentes sur le territoire, sont par exemple les plus susceptibles d'être affectées par l'augmentation globale des tem-

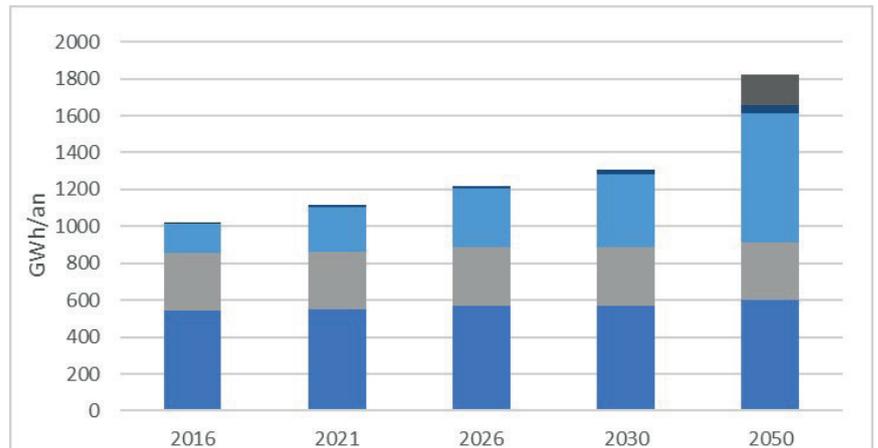


FIGURE 8 : Objectifs de production d'énergie liés à l'utilisation de bois-énergie dans la Métropole à l'horizon 2050 – Source : PCAET, 2019.

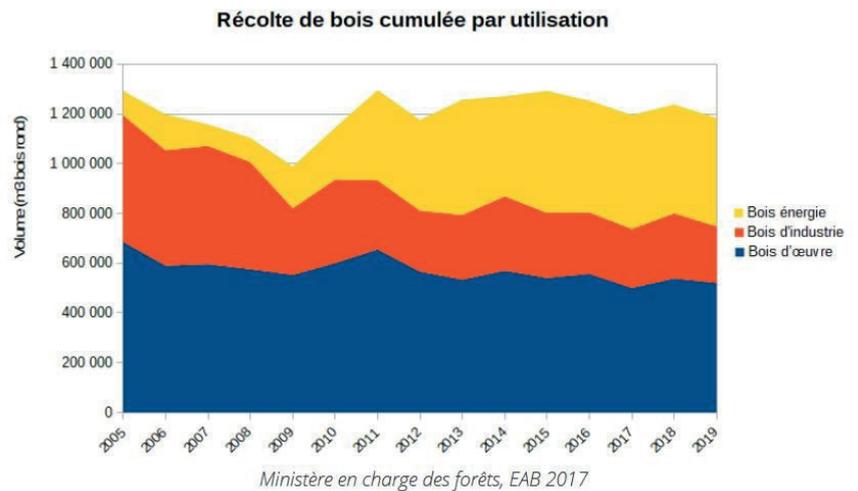


Figure 9 : Récolte de bois cumulée par utilisation – Source : Ministère en charge des forêts, Enquête annuelle de branche sur l'exploitation forestière et la première transformation du bois, 2019, in Programme Régional de la Forêt et du Bois.

pérations et pourraient dépérir dans le cas d'un scénario climatique avec de fortes émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5). Plus résistant, le chêne sessile pourrait néanmoins connaître aussi des difficultés croissantes pour se maintenir sur le long terme sur le territoire dans le cas de ce même scénario (Kazmierczak, et al., 2020). Les forêts sont également sensibles aux catastrophes climatiques (canicules, feux de forêts, sécheresse...) dont les occurrences augmenteront vraisemblablement avec le réchauffement climatique en Normandie (Cantat et al., 2020; Laignel et Nouaceur, 2023). Ces catastrophes pourraient engendrer un pic de récolte de bois causé par un volume important de bois morts et dévastés. Mais ce pic serait ensuite suivi aussi d'une baisse drastique de la ressource disponible. Actuellement, le bois-énergie est l'une des ressources d'énergie renouvelable

les plus abordables sur le plan économique mais l'intermittence de la disponibilité de la ressource aura probablement des conséquences sur son prix⁴ (FNCOFOR, 2016; Kazmierczak et al. 2020).

Pour préserver les ressources en bois de la Métropole malgré ces dépérissements, l'introduction d'espèces plus résilientes à l'évolution rapide du climat pourrait être une solution. Le chêne pubescent déjà présent en faible quantité sur le territoire en est un exemple mais d'autres espèces issues de régions chaudes présentent aussi un intérêt comme le chêne rouge d'Amérique pour les feuillus, et le douglas californien pour les résineux. Néanmoins, ces espèces peuvent avoir une incidence sur la composition physico-chimique des sols, et leur introduction se ferait aussi au détriment d'espèces locales (Kazmierczak et al., 2020). Des questions

⁴ En excluant les conséquences économiques exceptionnelles résultant de conflits géopolitiques tels que la guerre en Ukraine en 2022 qui a provoqué une élévation généralisée des prix de l'énergie. Voir le bilan 2022 du Centre d'Études de l'Économie du Bois (CEEB).

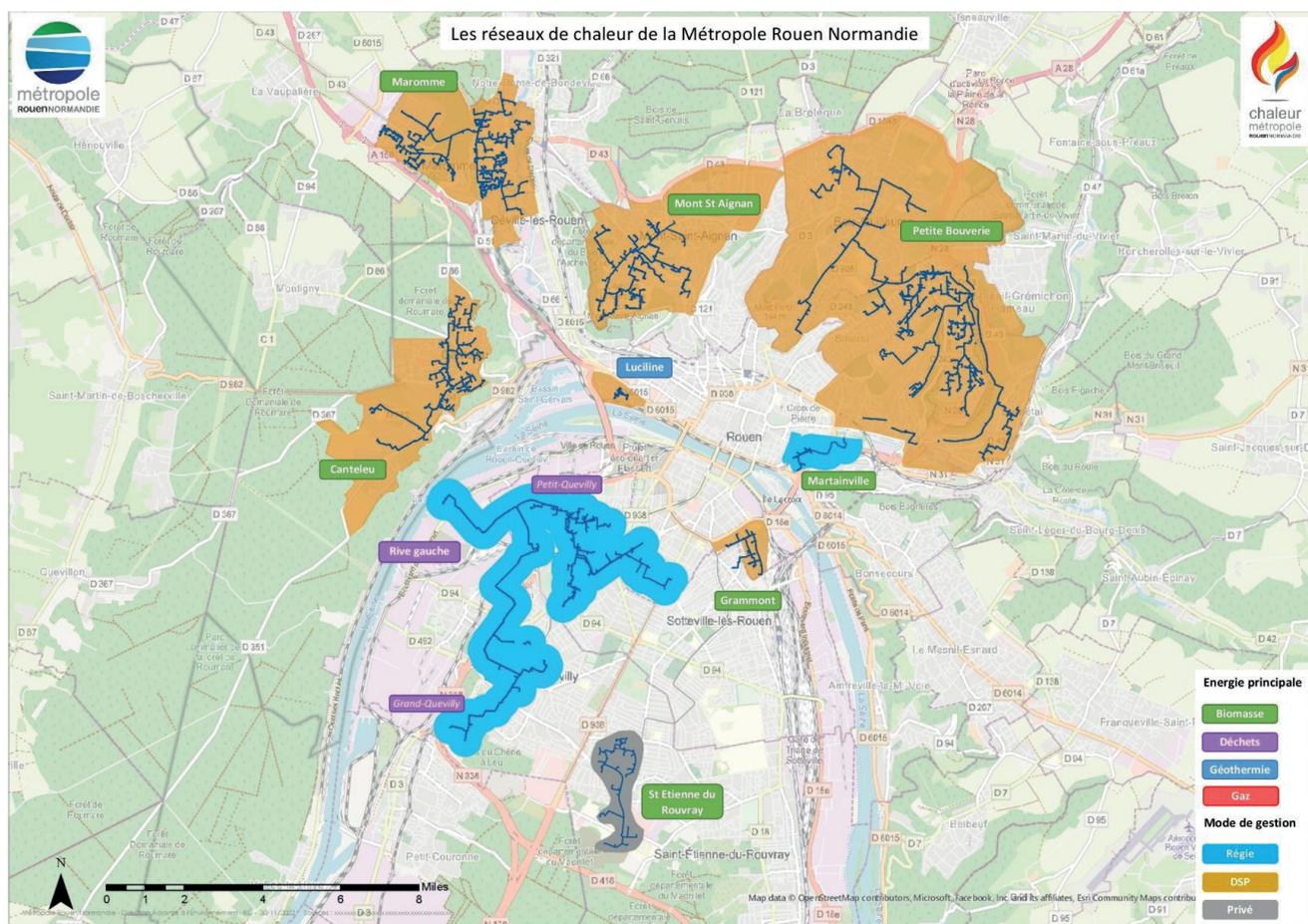


Figure 10 : Les réseaux de chaleur de la Métropole Rouen Normandie. Le réseau Franklin situé à Elbeuf n'est pas représenté sur la carte. – Source : Métropole Rouen Normandie, 2022.

liées aux autres fonctions assurées par la forêt, à savoir le maintien de la biodiversité locale (fonction écologique), l'utilisation du bois d'œuvre pour la construction (fonction économique), la contribution à l'identité paysagère du territoire (fonction patrimoniale) et l'acceptabilité sociale par la population (fonction sociale), se posent vis-à-vis de l'introduction d'espèces forestières nouvelles pour adapter l'écosystème forestier au changement climatique et produire du bois-énergie. Pour y répondre, un consensus social sur la priorisation des fonctions des forêts nécessite d'être trouvé entre les acteurs du territoire (citoyens, décideurs locaux, entreprises, associations, services et organismes de l'État) (Kazmierczak et al., 2020).

La chaleur fatale et les réseaux de chaleur

Certains quartiers de la Métropole Rouen Normandie sont alimentés par 11 réseaux de chaleur qui exploitent plusieurs sources d'énergies renouvelables (Figure 10). Actuellement, sept réseaux exploitent le bois-énergie, deux autres valorisent la chaleur fatale issue de l'incinération de déchets (UVE) et les deux derniers exploitent la géothermie. Ces centrales thermiques utilisent également le gaz naturel ou la cogénération à titre d'appoint si la demande sur le réseau est importante. Les réseaux de chaleur permettent ainsi de distribuer 385 GWh/an avec une couverture de 70 % par les énergies renouvelables (données à fin juin 2023).

Unité de valorisation énergétique (UVE)

L'unité de valorisation des déchets (UVE) du SMEDAR permet de valoriser une grande partie des déchets non recyclables produits dans la Métropole et dans les territoires limitrophes par la récupération de la chaleur fatale issue de leur combustion. Ainsi, plus de 300 000 tonnes de déchets sont valorisées en énergie chaque année. En plus d'assurer ses propres besoins énergétiques, l'UVE contribue au réseau de distribution d'électricité et aux réseaux de chaleur du Grand-Quevilly (Vésuve) et du Petit-Quevilly (SDE, 2017).

Chaleur fatale industrielle

L'énergie produite par les entreprises industrielles peut constituer une ressource de chaleur conséquente avec un potentiel total évalué à environ 1 400 GWh/an. Les usines développent des procédés pour valoriser en interne au maximum cette énergie, ou avec d'autres acteurs privés en étant vendue puis rachetée par une autre entreprise. Des projets de création d'un réseau de chaleur entre les industries ou de raccordement aux réseaux de chaleur urbains sont à l'étude (SDE, 2017).

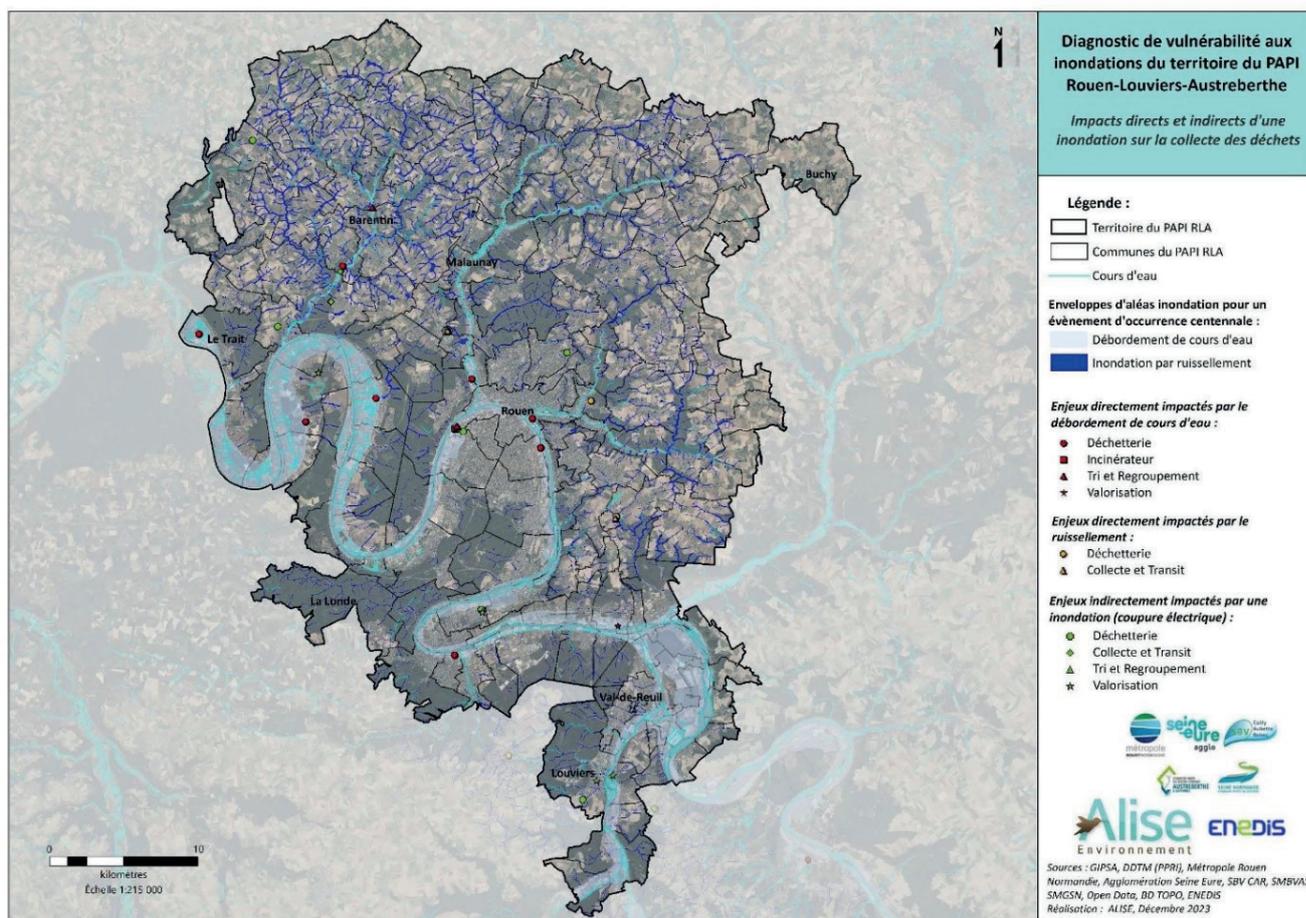


Figure 11 : Exposition aux inondations des installations de gestion des déchets – Source : ALISE Environnement, 2023, pour le diagnostic du PAPI RLA.

Projets de développement de l'UVE et des réseaux de chaleur

La Métropole a pour projet de développer les réseaux de chaleur et s'appuie beaucoup sur ce mode de production et de transmission d'énergie pour augmenter la part des énergies renouvelables dans sa production d'énergie locale (SDE, 2017). D'une part, afin de valoriser davantage de chaleur de l'UVE (objectif de doublement), la Métropole prévoit de poursuivre le développement du réseau de chaleur sur l'ensemble de la rive gauche de Rouen. D'autre part, des projets de rénovation et d'extension des réseaux existants sont menés comme celui du réseau de la Petite Bouverie qui fonctionnait préalablement au gaz et qui exploite désormais le bois-énergie. La Métropole projette également de construire 10 nouveaux réseaux de chaleur qui exploiteraient le bois-énergie et la chaleur fatale. L'ensemble des réseaux existants et en projet contribueront aux objectifs de production de 880 GWh/an d'ici 2050 avec une couverture d'énergie renouvelable de plus de 80 %.

Perspectives du développement des réseaux de chaleur et de la chaleur fatale dans la Métropole vis-à-vis du changement climatique

La localisation du SMEDAR rend le centre de valorisation des déchets sensible aux crues et aux inondations. Dans le cadre d'une élévation du niveau marin de 1 m qui se retranscrirait dans l'ensemble de l'estuaire de la Seine, ce site pourrait être sujet à des inondations et des crues plus fréquentes de la Seine d'ici 2100 (ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013 et 2014; Fisson et al., 2014; Lemoine J.-P., 2015, Kazmierczak et al., 2019; ARTELIA, 2022). Le diagnostic du Programme d'Actions de Prévention des Inondations Rouen Louviers Austreberthe (PAPI RLA) montre que les installations principales de gestion des déchets, composées des différents sites du SMEDAR de Grand-Quevilly et Petit-Quevilly dont l'unité de valorisation énergétique, sont exposées au risque inondation (Figure 11 – ALISE Environnement, 2023). Ces sites sont soumis à des crues assez rares (au-delà de la centennale, avec une hauteur d'eau de 2 m pour la millénale) qui vont avoir tendance à être plus fréquentes dans le contexte du changement climatique. Le territoire de la Métropole est particulière-

ment exposé avec 7 déchetteries situées en zone d'aléa. D'ici 2100, le risque inondation pourrait donc interroger la pérennité de ces sites à leur emplacement actuel et remettre en cause en partie la production d'énergie issue de la valorisation des déchets.

Les gisements des combustibles solides de récupération (CSR) concernant les déchets d'activités économiques, les ordures ménagères résiduelles, le tout-venant des déchetteries et les refus des chaînes de tri des matériaux recyclables ne sont pas influencés par le dérèglement climatique, comme pourraient l'être les ressources végétales méthanisables. Par ailleurs, le procédé de combustion n'est pas non plus impacté, excepté par des risques d'inondation potentiels du SMEDAR. En revanche, la quantité de déchets produits pourrait tendre vers la baisse au regard des objectifs nationaux en la matière. En effet, la loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire du 10 février 2020 impose aux collectivités de réduire leur production de déchets de 15 % en 2030 par rapport à 2010. Dans la Métropole Rouen Normandie, le volume de déchets produits reste important mais diminue lentement (Figure 12). À l'inverse, le SMEDAR, qui valorise également les déchets collectés dans quatre autres inter-

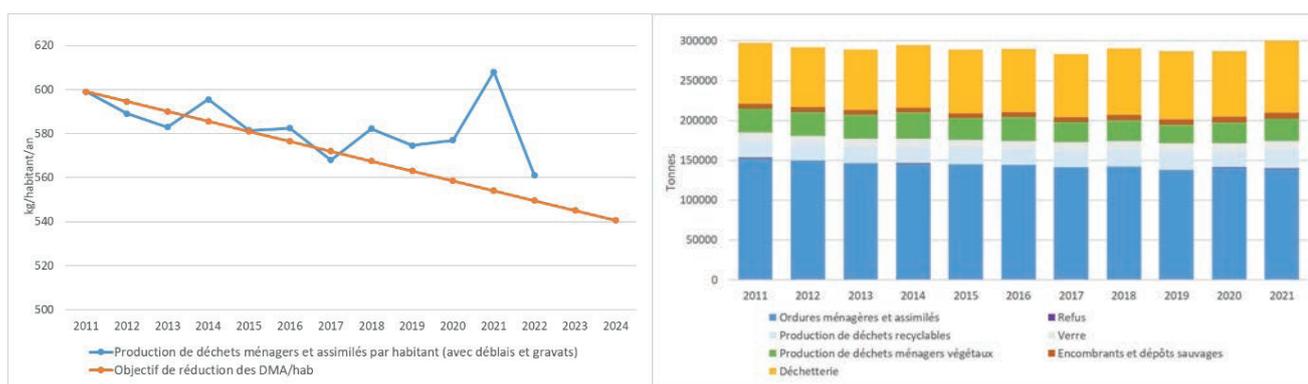


Figure 12 : À gauche, évolution de la production de déchets ménagers et assimilés comparé à l'objectif de la loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire. À droite : évolution du tonnage des déchets collectés. – Source : rapport d'activité de la Métropole Rouen Normandie 2021 et 2022.

communalités⁵, montre une augmentation de la production totale de toutes les catégories de déchets en 2021 (déchets ménagers, déchets recyclables, déchets verts, apports en déchetteries). Bien que les données ne soient pas encore disponibles pour l'année 2022 au moment où ces lignes sont écrites, il est probable que cette augmentation ne soit que ponctuelle car les chiffres de production de déchets ménagers et assimilés en 2022 pour la Métropole Rouen Normandie sont bien inférieurs à ceux de 2021 (561 kg/hab contre 608 kg/hab).

Le solaire photovoltaïque

Actuellement, l'énergie solaire photovoltaïque permet de produire 11 GWh/an d'électricité selon l'ORECAN. Deux centrales solaires sont implantées sur le territoire : une installation de 4 900 kWc dans l'entreprise Renault de Cléon en ombrière de parking, et une installation de 500 kWc dans l'entreprise Dispano à Sotteville-lès-Rouen. Le territoire comprend également 950 installations de panneaux solaires diffus de petites puissances gérées par les particuliers pour un total de 5 600 kWc installés (PCAET, 2019).

Potentiels de développement

Après identification de l'ensemble des surfaces exploitables, des contraintes d'orientation et d'installation, et en considérant un ensoleillement moyen de 1 050 kWh/kWc, la Métropole a identifié un potentiel exploitable de 340 GWh/an sur son territoire. Ce potentiel compte 13 800 installations d'une puissance moyenne de 6,4 kWc sur les toits résidentiels (93 GWh/an), 905 installations d'une puissance moyenne de 225 kWc sur les bâtiments industriels et commerciaux (214 GWh/an) et

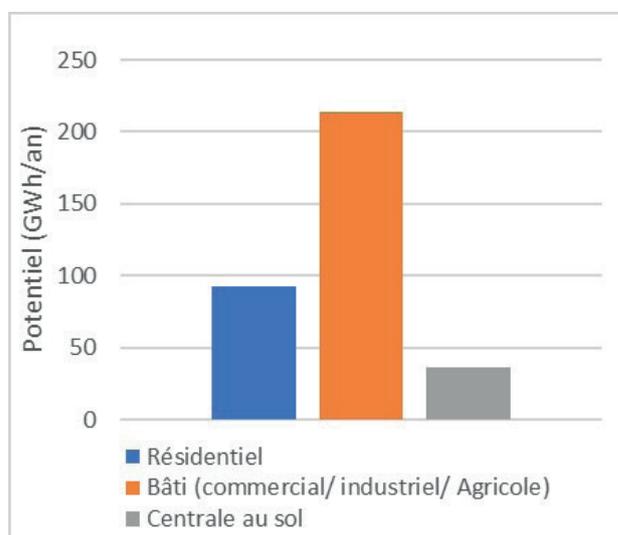


Figure 13 : Objectifs de production d'énergie solaire dans la Métropole Rouen Normandie d'ici 2050 – Source : SDE, 2017

5 centrales au sol d'une puissance moyenne de 7 000 kWc (37 GWh/an). L'objectif de la Métropole est d'atteindre 10 % de ce potentiel en 2025 soit une production de 34 GWh/an avant d'exploiter entièrement ce potentiel à l'horizon 2050. Les installations photovoltaïques demandent des investissements financiers importants parfois difficiles pour les ménages. La Métropole insiste donc en priorité sur les installations des secteurs commerciaux et industriels (Figure 13 – SDE, 2017), dont le déploiement va être facilité par la loi du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production des énergies renouvelables. À travers cette loi, les immeubles non résidentiels neufs ou lourdement rénovés (écoles, hôpitaux, etc.) devront développer des installations solaires sur leurs toitures. Cette obligation sera étendue en 2028 aux autres bâtiments non résidentiels. De plus, les organismes privés d'habitations à loyer

modéré (HLM) devront également procéder à une étude de faisabilité pour développer des équipements solaires sur les toitures des logements sociaux. Une accélération est également attendue sur le développement des ombrières photovoltaïques sur les parkings, la loi du 10 mars 2023 instaurant des obligations d'installation sur les parkings de surface supérieure à 1 500 m².

Ces éléments seront prochainement actualisés, une étude étant en cours pour affiner les mesures des potentiels solaires sur le territoire. En particulier, le potentiel des centrales solaires au sol avait été peu étudié en 2017, donc une augmentation significative de ce gisement est attendue. De plus, certaines technologies supplémentaires seront considérées, telles que les centrales photovoltaïques flottantes, l'agrivoltaïsme ou les centrales photovoltaïques linéaires.

⁵ 160 communes situées dans le périmètre du SMEDAR en 2021, pour 610 191 habitants

Effets du changement climatique sur la productivité des panneaux photovoltaïques

L'un des effets du réchauffement climatique à l'échelle locale pourrait être l'augmentation du nombre de jours d'ensoleillement et du rayonnement solaire (GIEC, 2013; Laignel et Nouaceur, 2023). Le rayonnement solaire est la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface et de temps. Une étude de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL, 2020) sur le profil environnemental de la Normandie ne présente pas de chiffres précis pour la Métropole Rouen Normandie mais fait un état des lieux du rayonnement sur des territoires voisins tels que Lisieux, Évreux, ou encore Fécamp. Les valeurs étant sensiblement similaires pour ces territoires, nous avons fait l'hypothèse que Rouen suivait la même évolution (Tableau 2).

Dans le cas d'un scénario optimiste de faibles émissions de gaz à effet de serre (RCP2.6) et pessimiste de fortes émissions (RCP8.5), l'ensoleillement moyen pourrait atteindre respectivement 126,3 W/m² ou 129,3 W/m² contre 116,3 W/m² pour la période de référence (1976-2005). En considérant la productivité des panneaux photovoltaïques proportionnelle à l'évolution de l'ensoleillement, la capacité de production des panneaux solaires augmenterait, même si l'augmentation de la température pourrait légèrement atténuer cette tendance. En effet, à partir de 25 °C, et pour chaque degré supplémentaire, le rendement du panneau photovoltaïque diminue (Dezurarche, 2019; Peters et Buonassisi, 2019). Il est calculé qu'une augmentation de 1 °C du panneau entraîne une diminution de 0,5 % de son rendement. Ainsi, l'augmentation des températures avec un nombre de jours chauds croissant pourrait affecter légèrement la production d'énergie photovoltaïque. Les phénomènes d'îlots de chaleur urbains accentués par l'augmentation du nombre de jours de chaleur et de canicules en Normandie, et par extrapolation dans l'agglomération rouennaise, pourraient également augmenter la sensibilité des installations photovoltaïques sur les toitures des logements (Cantat et al., 2020; Laignel et Nouaceur, 2023; Fréchet et al., 2023). Malgré tout, la baisse de rendement reste marginale en comparaison du gain de productivité dû au rayonnement. À l'horizon 2100, il est donc probable que les effets du réchauffement climatique augmenteront la productivité des panneaux photovoltaïques entre 1129 à 1144 kWh/kWc installés en fonction des scénarios. Cela représente une augmentation entre 7,5 et 9 % de la productivité du photovoltaïque (Figure 14).

		1976-2005	Horizon 2100
	Référence	RCP 2.6	RCP 8.5
Hiver	41	42	39
Printemps	143	151	159
Été	200	229	239
Automne	81	83	90
Annuel	116,3	126,3	129,3

Tableau 2 : Estimation de l'évolution de la saisonnalité du rayonnement solaire à Rouen en W/m² selon deux scénarios de changement climatique de faibles émissions (RCP 2,6 – optimiste) et de fortes émissions (RCP 8.5 – pessimiste) – Source : Hypothèses des auteurs selon DREAL Normandie, 2020.

Toutefois, ces hypothèses restent à nuancer dans la mesure où ces effets restent limités en moyenne, et seront de faible amplitude et inférieurs à la variabilité interannuelle naturelle jusqu'à l'horizon 2050. Selon le gestionnaire du réseau de transport d'électricité (RTE), le changement climatique aurait moins d'impact sur la production d'énergie solaire que l'accroissement de la dépendance de l'équilibre entre l'offre et la demande à cette source d'énergie (RTE, 2021).

Autres vulnérabilités des installations solaires

Les centrales au sol potentiellement constructibles dans les friches situées dans les zones industrielles le long de la Seine pourraient être davantage vulnérables aux inondations d'ici la deuxième moitié du XXI^e siècle en raison notamment de l'élévation du niveau de la mer, comme c'est le cas pour le SMEDAR. Cette évolution pourrait avoir une influence importante dans les études de faisabilité des projets et le développement de nouvelles centrales au sol sur le territoire.

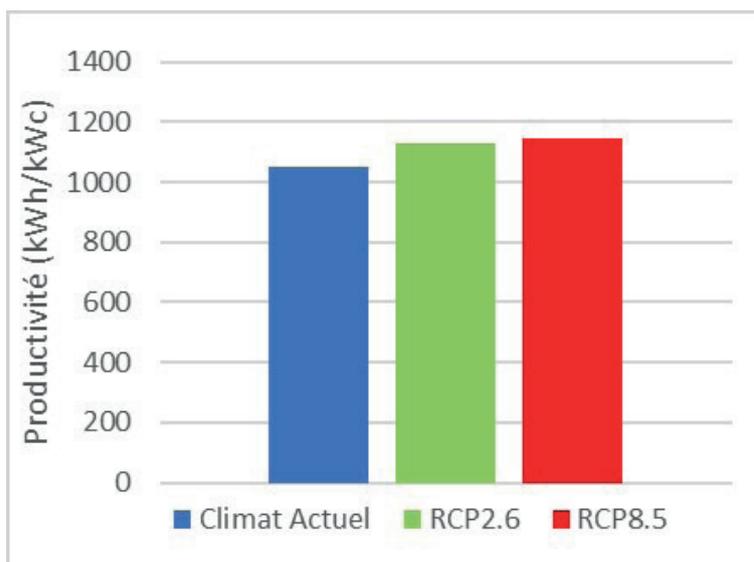


Figure 14 : Influence du réchauffement climatique sur la productivité annuelle des panneaux photovoltaïques en fonction des scénarios RCP à l'horizon 2100 – Source : hypothèse des auteurs

La production de biogaz

La Métropole Rouen Normandie est autorité concédante, chargée de l'organisation de la distribution publique de gaz naturel sur 58 communes alimentées et exploitées par Gaz Réseau Distribution France (GRDF). Le réseau de distribution de gaz de la Métropole est composé de 1886 km de canalisations desservant ces communes, de 33 postes de transformation haute pression/basse pression et de 117 813 points de livraison, pour un total de 3 744 GWh/an. Dans sa politique de réduction des énergies fossiles, la Métropole prévoit de réduire la consommation de gaz naturel de 40 % et d'augmenter celle du biogaz à une hauteur de 300 GWh/an. Il est à noter que des contraintes ponctuelles en termes de capacité de distribution d'énergie et d'injection de biogaz existent dans certaines zones de desserte où il ne faut pas injecter plus que ce que chaque zone peut consommer (SDE, 2017).

Production de biogaz actuelle

Actuellement, deux sites industriels utilisent le procédé de méthanisation pour valoriser leurs déchets : l'usine EUROPAC et l'usine SAIPOL. La première produit 18 GWh/an de biogaz par valorisation des eaux usées issues du process industriel. La seconde produit 1,6 GWh PCI/an de biogaz généré par le traitement des effluents issus des procédés industriels (PCAET, 2019).

Potentiel de développement de biogaz

Il existe plusieurs types de méthanisation qui dépendent des déchets et des ressources (agricoles, produits résiduaire, ressources agro-industrielles, biodéchets). Les potentiels énergétiques pour chaque type de méthanisation ont été recensés sur l'ensemble du territoire pour un total estimé à 75 GWh/an (Figure 15).

À l'horizon 2050, la Métropole a pour objectif d'exploiter plus de 60 % des ressources méthanisables présentes sur son territoire. Cinq projets de méthanisation ont été identifiés parmi l'ensemble des ressources potentielles recensées préalablement pour chaque type de méthanisation. Deux portent sur la valorisation des eaux usées des stations d'épuration (STEP) par méthanisation, un valorise des effluents d'élevage et deux autres portent sur

la valorisation et la méthanisation d'effluents issus de l'agro-industrie. L'ensemble de ces projets présente un potentiel de production d'énergie brute de 48,1 GWh, soit 64 % de l'ensemble des ressources méthanisables de la Métropole. Une partie de cette énergie est autoconsommée pour autonomiser les procédés, l'autre partie est valorisée et constitue une ressource utile de 42,1 GWh (Figure 16 - SDE, 2017).

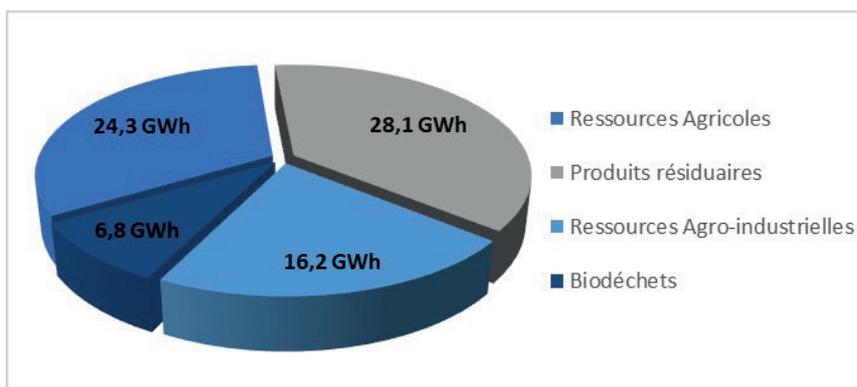


Figure 15 : Potentiel énergétique de méthanisation de la Métropole – Source : SDE, 2017

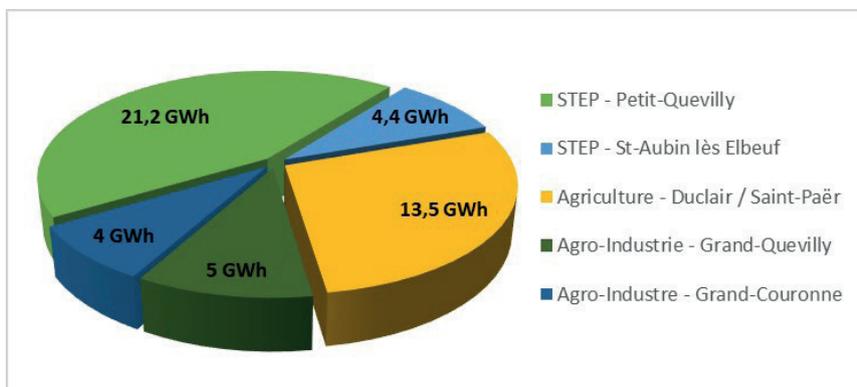


Figure 16 : Projets de méthanisation de la Métropole – Source : SDE, 2017 ; PCAET, 2019.



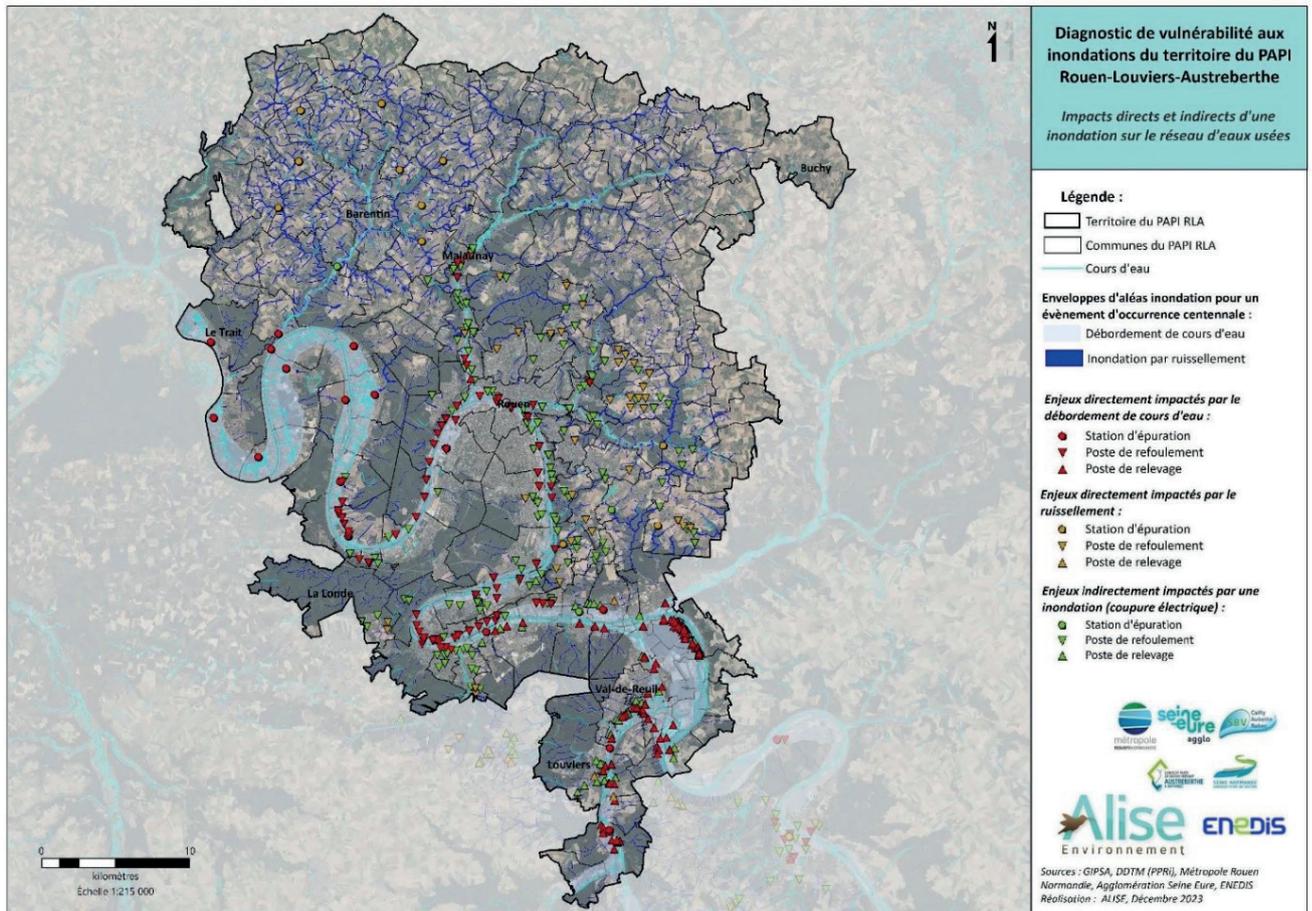


Figure 17: Installations de traitement des eaux usées exposées au risque d'inondation – Source : ALISE Environnement, 2023, pour le diagnostic du PAPI RLA.

Effets du changement climatique sur le potentiel de méthanisation

Les méthanisations résultant des activités agricoles et des boues des stations d'épuration (STEP) pourraient s'avérer sensibles au changement climatique. La méthanisation dite « agricole » est impactée par la variabilité de la croissance des végétaux (Diomard et Chéron, 2020 ; Ben Othmen et Bruyat, 2023), dont ceux permettant le phénomène de production de biométhane. Tandis que la méthanisation des boues des STEP est potentiellement impactée par les aléas climatiques (canicules, variabilité des précipitations, sécheresses, inondations) et les tendances de long terme du changement climatique (hausse des

températures, variabilité des régimes pluviométriques) suivant la localisation des STEP. Ces aléas peuvent aussi engendrer des dysfonctionnements dans les processus biologiques effectués par les STEP (Programme Solidarité Eau, 2018).

Selon le diagnostic du PAPI RLA, entre 10 et 20 STEP sur le périmètre du PAPI Rouen-Louviers-Austreberthe, soit entre 690 000 équivalent habitants (EH) à 865 000 EH, sont exposées aux débordements de la Seine (fréquent, moyen ou rare⁶). Pour les autres scénarios de débordement des affluents de la Seine (Eure, Austreberthe, Cailly, Aubette, Robec), il s'agit d'1 ou 2 STEP

concernées pour chaque scénario (entre 86 600 et 123 000 EH respectivement pour des débordements moyen et rare de l'Eure, 45 200 EH pour des débordements de l'Austreberthe, et 11 300 EH pour Cailly, Aubette, Robec). Le ruissellement peut potentiellement concerner une dizaine de STEP mais pas au cours d'un même évènement, généralement localisé (environ 11 600 EH) (Figure 17, ALISE Environnement, 2023).

⁶ La fréquence des débordements décrite ici correspond aux trois scénarios d'évènements utilisés pour réaliser les cartes des surfaces inondables du Territoire à Risques Importants d'Inondation (TRI) Rouen Louviers Austreberthe. Le débordement fréquent correspond à un évènement avec une période de retour entre 10 et 30 ans, un débordement moyen désigne un évènement avec une période de retour d'au moins 100 ans, et un débordement rare désigne un évènement avec une période de retour d'au moins 1 000 ans.

L'influence du changement climatique et des stratégies énergétiques sur la production et la consommation d'énergies non renouvelables

La production d'énergie nucléaire

Connaître les effets du dérèglement climatique sur l'énergie nucléaire paraît essentiel dans la mesure où celle-ci représente environ 75 % de l'énergie primaire⁷ produite en France et 40 % de la consommation d'énergie primaire. Il est donc très probable que l'électricité alimentant la Métropole Rouen Normandie provienne en majorité des centrales nucléaires les plus proches (centrales de Paluel et de Penly – Figure 18).

La vulnérabilité des centrales nucléaires aux aléas météorologiques et climatiques est tributaire de leur localisation géographique (proche du bord de mer, d'un fleuve ou d'une rivière) et de leur système de refroidissement (RTE, 2021). Les centrales nucléaires sont notamment réparties en deux catégories de système de refroidissement : celles en circuit ouvert où l'eau, pompée dans le cours d'eau ou la mer à proximité, refroidit le circuit secondaire et est rejetée dans le milieu aquatique avec une température plus élevée ; et les centrales en circuit fermé où l'eau réchauffée circule dans un aéro-réfrigérant. Dans ce second cas, environ 40 % du prélèvement de l'eau est consommé par évaporation, mais celui-ci est bien plus faible que pour une centrale à cycle ouvert. De même, l'échauffement du fleuve est plus faible par rapport à la température de prélèvement. De manière générale, les centrales sont très gourmandes en eaux de surface (fleuve, mer) utilisées dans les procédés de refroidissement des réacteurs. Selon la Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en eau (BNPE) et un récent rapport de la Cour des comptes (2023), sur les 33,5 milliards de m³ d'eaux prélevées pour satisfaire les différents usages, un peu plus de la moitié est destinée au refroidissement des centrales nucléaires qui en restituent la quasi-totalité (98 %) dans le milieu naturel (sous forme de rejet d'eau liquide ou

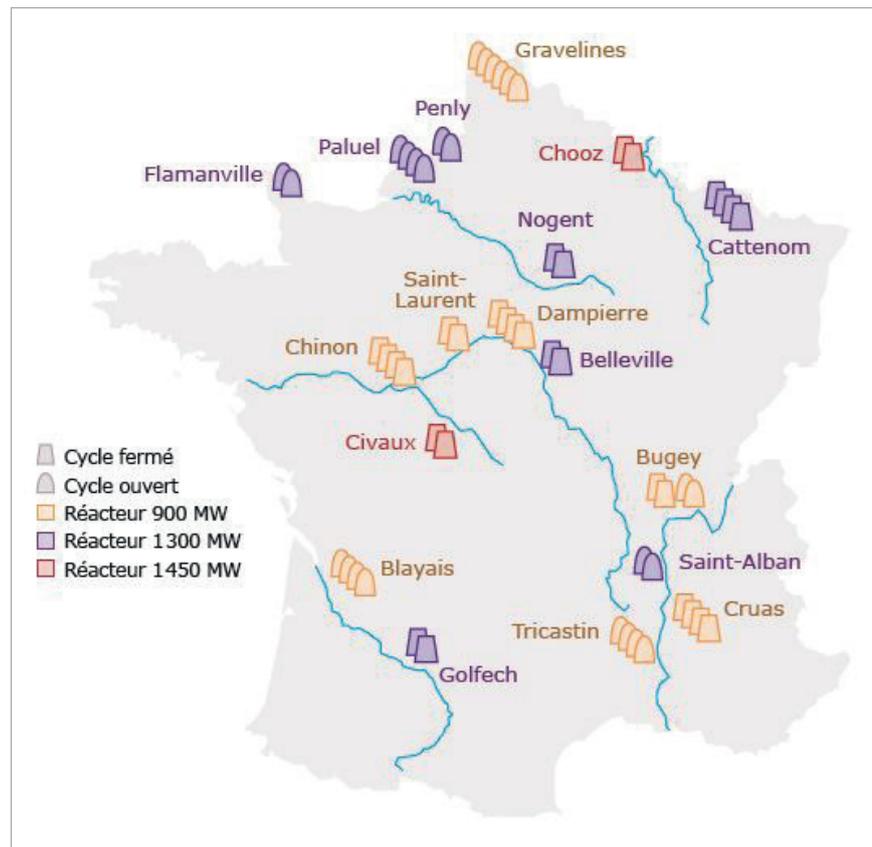


Figure 18 : Localisation des centrales nucléaires en France métropolitaine selon leur puissance et leur cycle de refroidissement – Source : RTE, 2021

par évaporation) mais bien souvent avec une température plus élevée. Toutefois, ces prélèvements ne sont pas homogènes selon les régions et sont principalement concentrés dans la région Auvergne-Rhône-Alpes (70 % du prélèvement total nécessaire à l'exploitation du parc de réacteurs nucléaires). Les prélèvements des centrales électriques du bassin de la Seine-Normandie s'élèvent à un peu plus de 500 millions de m³, soit presque autant que les prélèvements réalisés pour les besoins industriels, et deux fois moins que les prélèvements pour l'eau potable (Figure 19).

La réduction du débit d'eau froide et le réchauffement des cours d'eau engendrés par une hausse des températures moyennes, des sécheresses et des vagues de chaleur plus longues et fréquentes l'été, ont dès aujourd'hui un impact certain sur la production d'énergie nucléaire, pouvant entraîner des indisponibilités, voire parfois des arrêts de certains réacteurs (RTE, 2021). Ces situations sont encadrées par la réglementation afin de limiter les rejets d'eau chaude dans les milieux aquatiques et les prélèvements d'eau en cas de canicule ou de sécheresse importante.

⁷ Source : SDES, Bilan énergétique de la France, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2022/7-bilan-energetique-de-la-france>

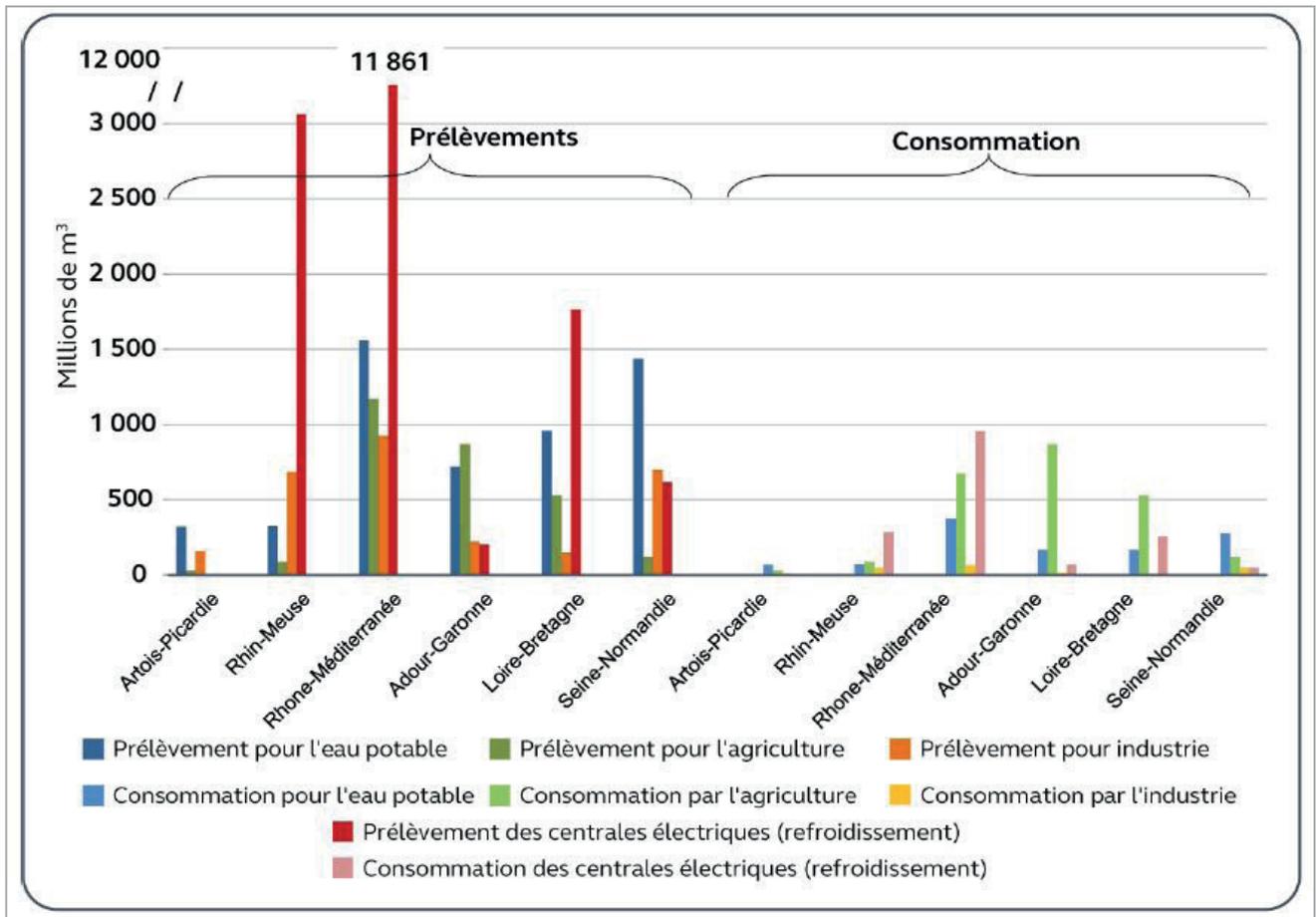


Figure 19 : Prélèvements et consommation d'eau douce en France métropolitaine, par usage et par bassin hydrographique, en millions de m³, moyenne 2008-2016. – Source : BNPE, Portail <https://www.notre-environnement.gouv.fr/> du Commissariat général au développement durable (CGDD), Cour des comptes, 2023.

Les indisponibilités restent limitées, mais une augmentation significative des arrêts pour causes climatiques a été observée ces dernières années avec des pertes de production pouvant atteindre jusqu'à plusieurs térawattheures par an (RTE, 2021). À titre d'exemple, des indisponibilités de certains réacteurs se sont notamment produites en juillet 2019 et ont engendré une baisse de la puissance de 6 GW (soit 10 % de la capacité installée); ou encore dans le sud-ouest de la France en 2022, bien qu'un phénomène de corrosion sous contrainte, repéré dès fin 2021, se soit produit au même moment et ait nécessité des maintenances, des contrôles et des réparations selon le bilan énergétique de RTE pour l'année 2022.

Les phénomènes de canicule et de sécheresse étant renforcés par le réchauffement climatique en France, et même en Normandie (Cantat et al., 2020; Laignel et Nouaceur, 2023), des effets directs sont donc déjà perceptibles sur la disponibilité d'une source d'eau froide pour les procédés de refroidissement des réacteurs. Les centrales apparaissant comme les plus vulnérables au dérèglement climatique semblent celles fonctionnant en circuit ouvert et situées en bord de fleuve, car leur capacité à refroidir le combustible, et

donc à maintenir leur mode de fonctionnement, dépend directement de la disponibilité d'une source d'eau froide. Selon les modélisations utilisées par RTE dans son rapport sur les Futurs énergétiques, les réacteurs les plus sensibles au climat pourraient être davantage indisponibles (RTE, 2021). Si les deux centrales les plus proches de la Métropole de Rouen Normandie disposent d'un procédé de refroidissement à cycle ouvert (Figure 19) et nécessitent donc un fort débit d'eau, elles sont situées sur la côte normande et consomment de l'eau de mer dont la disponibilité ne sera pas impactée. De plus, l'effet du réchauffement de la mer de la Manche est actuellement plus faible en comparaison de l'impact d'une baisse de débit pour une centrale en bord de fleuve. Les centrales de Paluel et de Penly peuvent donc être considérées comme peu vulnérables aux aléas climatiques liés à la chaleur et à la sécheresse à l'heure actuelle (RTE, 2021). Toutefois, à l'avenir, l'élévation du niveau de la mer pourrait interroger la pérennité de ces centrales ou l'implantation de nouvelles sur les côtes.

Enfin, la production d'énergie nucléaire future sera aussi conditionnée à l'état du parc nucléaire en 2050. En prenant en compte une durée maximale de fonctionnement de 60

ans, qui est aujourd'hui considérée comme l'hypothèse de référence pour le parc existant, la plupart des réacteurs actuels de seconde génération seront fermés en 2050, tandis que la prolongation de quelques sites n'est pas encore techniquement faisable (Veyrenc, 2023). Mises en service respectivement entre 1985-1986 et 1990-1992, les centrales de Paluel et de Penly fonctionneront encore probablement en 2050 mais arriveront en fin de vie. La localisation de nouveaux réacteurs pourrait aussi influencer le risque d'indisponibilité en cas de sécheresse et de canicule (RTE, 2021; Veyrenc, 2023).

De manière générale, selon les modélisations et les hypothèses de RTE, une légère baisse de la production annuelle est envisagée à l'horizon 2050 selon des scénarios climatiques médian (RCP 4.5) et pessimiste (RCP 8.5). Le risque d'indisponibilité simultanée des réacteurs pourrait aussi progresser.

La production d'autres énergies non renouvelables

Comme susmentionné en introduction, le mix énergétique de la Métropole Rouen Normandie est composé très majoritairement d'énergies fossiles (gaz et pétrole notamment). Nous pouvons émettre l'hypothèse que le changement climatique n'aurait qu'une influence indirecte sur la production et la consommation de ces énergies par le biais des stratégies et des actions locales et nationales visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Par ailleurs, ces actions seraient d'autant plus renforcées pour répondre aux nouveaux objectifs européens fixés en 2021 en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2030 (-55 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990), et à la crise énergétique déclenchée par la guerre en Ukraine en 2022. Ces récents événements ont renouvelé l'intérêt de diversifier le mix énergétique en réduisant considérablement la part des énergies fossiles importées au profit des énergies renouvelables⁸, en prorogeant la durée de vie de tous les réacteurs nucléaires, voire à la création de nouveaux, et en diffusant largement les efforts en matière d'efficacité énergétique et de sobriété. L'architecture du marché européen de l'énergie, qui fait dépendre les prix de l'électricité de celui du gaz, dont les prix ont gonflé à des niveaux inédits en conséquence du contexte géopolitique en 2022, nécessite également d'être repensée pour que ces changements soient efficaces sur le long terme. La déconnexion entre les prix de l'électricité et du gaz apparaît donc primordiale et prioritaire pour atteindre les trajectoires climatiques fixées par les États européens (Veyrenc, 2023).



⁸ Via la loi n° 2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables. Voir la description de la loi sur le site Vie Publique : <https://www.vie-publique.fr/loi/286391-energies-renouvelables-loi-du-10-mars-2023>

Hypothèses sur l'évolution des consommations d'énergie

Il est difficile de quantifier les impacts du changement climatique sur les consommations de chaque énergie primaire au sein des secteurs d'activité. Les modifications des consommations en énergie finale ont donc été évaluées, notamment sous forme d'électricité ou de chaleur, car cela permet d'identifier quels usages sont amenés à changer comme le chauffage et la climatisation des locaux ou des véhicules, qui concernent des modifications des consommations d'électricité, de produits pétroliers, de gaz naturel, etc. Plusieurs usages étant intégrés dans chaque secteur d'activité (chauffage, climatisation, numérique), il est proposé de les étudier spécifiquement dans un premier temps. Puis, l'évolution des consommations d'énergie par secteur d'activité sera abordée pour les cinq secteurs suivants : agriculture, mobilités (transport de personnes et de marchandises), industriel, résidentiel et tertiaire (Tableau 3).

Secteurs de consommation	
Agriculture	Secteur primaire, produisant les matières premières et lié à l'exploitation de cultures et à la production de viande
Industriel	Secteur secondaire, traitant de la transformation de matières premières en biens et marchandises
Résidentiel	Regroupe la totalité des habitations, qu'elles soient individuelles ou collectives
Tertiaire	Correspond à l'activité de l'ensemble des services (commerce, santé, éducation, administration, ...)
Mobilités	Regroupent les transports de voyageurs et de marchandises (fret)

Tableau 3 : Les différents secteurs de consommation pris en compte dans cette partie

Évolution de plusieurs usages spécifiques

Diminution de la consommation de chauffage en hiver

La température intérieure de référence est en moyenne fixée à 19 °C dans les logements habitables français. Lorsque la température extérieure est inférieure à cette température de référence, le chauffage sera déclenché dans les habitations. L'indicateur degrés-jour (DJ) de chauffage est

utilisé afin d'évaluer la consommation en énergie pour le chauffage. Depuis les années 1960, Météo-France observe une diminution d'environ 5 % en moyenne par décennie de degrés-jour sur le territoire de l'ex région Haute-Normandie⁹. Sur la dernière décennie, la valeur moyenne de degrés-jour à la station météorologique de Rouen-Boos se situe autour de 2250 DJ, soit 500 DJ en moins depuis les années 1970 (Figure 20). Cette baisse des besoins de chauffage pourrait résulter de la diminution du nombre de jours de froid¹⁰ (-23 occurrences/an en moyenne à Rouen) et l'augmentation de la température moyenne (+ 2,2 °C) sur la période 1970-2020 (Cantat et al., 2020 ; Laignel et Nouaceur, 2023 – Figure 20).

⁹ Source : Climat HD de Météo-France. Pour définir le degré-jour pour l'ex région Haute-Normandie selon la méthode chauffagiste, la formule suivante a été utilisée par Météo-France : $DJ = (17 - \text{Température moyenne quotidienne})$ si cette température était inférieure 17 °C. La température moyenne quotidienne correspond à la somme des températures minimales et maximales quotidiennes mesurées, divisée par deux.

¹⁰ Température inférieure ou égale à 0°C

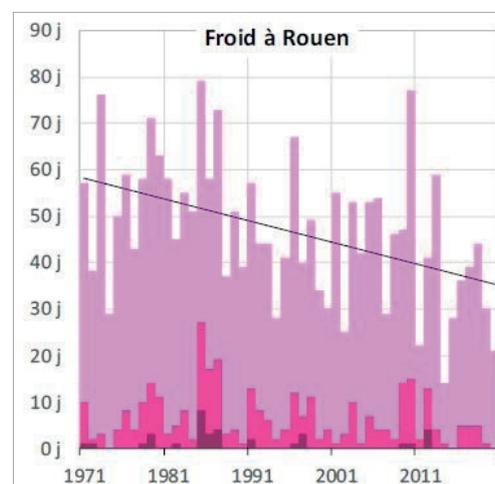
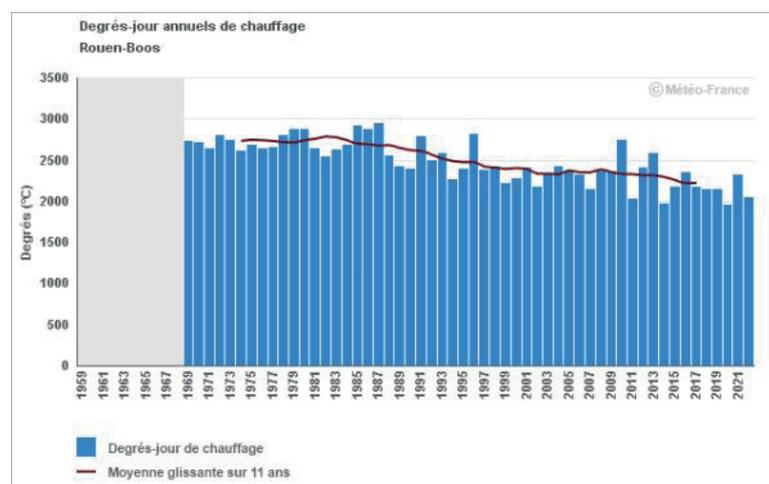


Figure 20 : À gauche, évolution des degrés-jour annuels de chauffage mesurés à la station Rouen-Boos entre 1969 et 2022. Sources: Climat HD de Météo-France. À droite : Évolution du nombre de jours de froid (T° minimale journalière de l'air inférieure ou égale à 0 °C en rose, à -5 °C en jaune et à -10 °C en violet) à la station Rouen-Boos entre 1971 et 2020. – Source: Données Météo-France traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020 ; Laignel et Nouaceur, 2023).

Les projections climatiques montrent que la température moyenne annuelle pourrait augmenter entre + 1 °C (RCP 2.6) et + 4 °C (RCP 8.5) dans l'ex région Haute-Normandie d'ici à 2100¹¹. De plus, les vagues de froid deviendront de plus en plus rares sur le territoire de la Métropole de Rouen, à l'inverse des jours de chaleurs et anormalement chauds qui devraient se multiplier (Cantat et al., 2020 ; Laignel et Nouaceur, 2023). La baisse des besoins de chauffage pourrait donc se poursuivre dans les années et les décennies à venir sur le territoire de l'ancienne Haute-Normandie (Figure 21). Météo-France montre notamment une baisse continue des degrés-jour annuels de chauffage jusqu'au milieu du siècle par rapport à la période de référence 1976-2005, quels que soient les scénarios climatiques. À partir de 2050, l'évolution des besoins en chauffage diffère avec une stabilisation dans le cas d'un scénario de faibles émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6), tandis qu'une baisse de plus d'un tiers serait possible d'ici 2100 dans le cas d'un scénario de fortes émissions et d'un réchauffement du climat important (RCP 8.5).

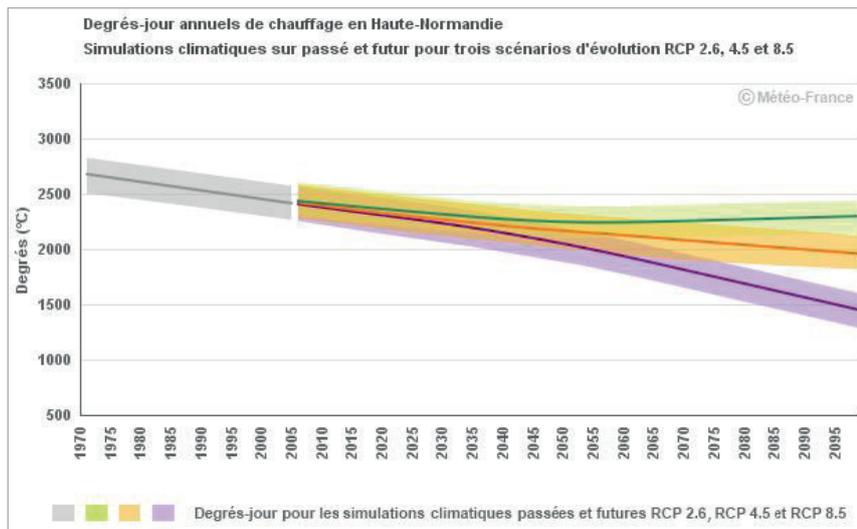


Figure 21 : Évolution attendue des degrés-jour annuels de chauffage en Haute-Normandie selon des simulations du climat passé et futur et trois scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5) – Source : Climat HD de Météo-France.

Augmentation des besoins en climatisation l'été

À l'inverse, l'augmentation globale de la température va entraîner une augmentation des besoins en climatisation. À l'échelle nationale, la réduction de la consommation de chauffage pendant l'hiver serait quasiment annulée par la hausse de la consommation de climatisation l'été (RTE, 2021). Selon les mesures de Météo-France, dans l'ex région

Haute-Normandie, même si les besoins en climatisation sont actuellement peu significatifs, ils augmentent depuis les années 1960 et sont corrélés aux années où le nombre de jours de chaleur (température supérieure ou égale à 25° à Rouen) a été particulièrement important (Cantat et al., 2020 - Figure 22)¹².

¹¹ Source : Climat HD de Météo-France : <https://meteofrance.com/climathd>

¹² Pour définir le degré-jour pour l'ex région Haute-Normandie selon la méthode climatisation, la formule suivante a été utilisée par Météo-France : $DJ = (Température\ moyenne\ quotidienne - 18)$ si cette température était supérieure 18 °C. La température moyenne quotidienne correspond à la somme des températures minimales et maximales quotidiennes mesurées, divisée par deux.

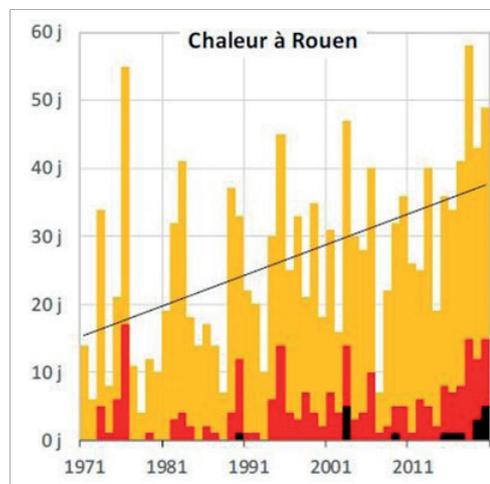
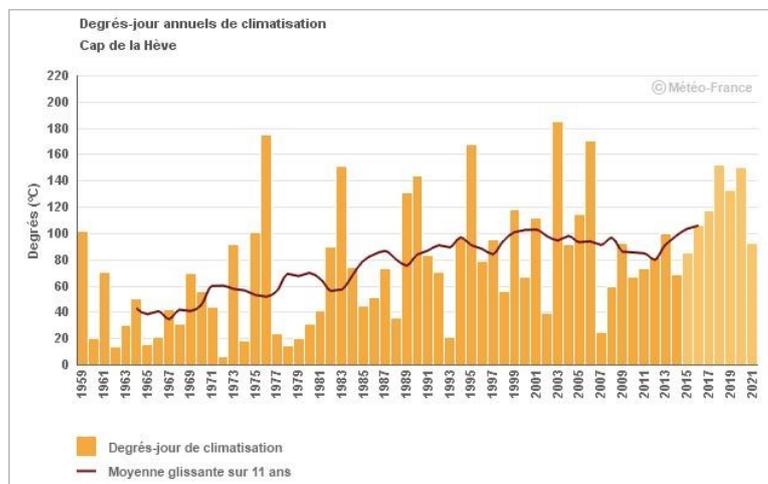


Figure 22 : Ci-dessus, évolution des degrés-jour annuels de climatisation mesurés à la station du Cap de la Hève près du Havre entre 1959 et 2021 – Source : Climat HD de Météo-France. À droite : Évolution du nombre de jours de chaleur (T° maximale journalière de l'air supérieure ou égale à 25 °C (en orange), supérieure ou égale à 30 °C (en rouge), et supérieure ou égale à 35 °C (en noir)) à la station Rouen-Boos entre 1971 et 2020. – Source : Données Météo-France traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020 ; Laignel et Nouaceur, 2023).

À l'avenir, Météo-France montre une augmentation des besoins futurs en climatisation pour les scénarios avec des émissions modérées de gaz à effet de serre (RCP 4.5) et de fortes émissions (RCP 8.5) pour lesquels la température moyenne annuelle augmenterait aussi respectivement entre +2 °C et +4 °C d'ici la fin du siècle. Tandis que les besoins en climatisation seraient plus maîtrisés dans le scénario RCP 2.6 où les émissions de gaz à effet de serre sont drastiquement réduites, et où le réchauffement climatique est contenu à 1 °C dans l'ex région Haute-Normandie par rapport à la période de référence 1976-2005 (Figure 23). Ces projections sont à nouveau corrélées avec l'évolution des jours de chaleur. Actuellement d'environ 16 jours pour la Métropole Rouen Normandie selon la période de référence (1976-2005), le nombre de jours de chaleur pourrait passer, d'ici 2100, de 25 jours en moyenne pour un scénario optimiste (RCP 2.6), à entre 40 à 60 jours en moyenne pour un scénario pessimiste (RCP 8.5) (Cantat et al., 2020 ; Laignel et Nouaceur, 2023).

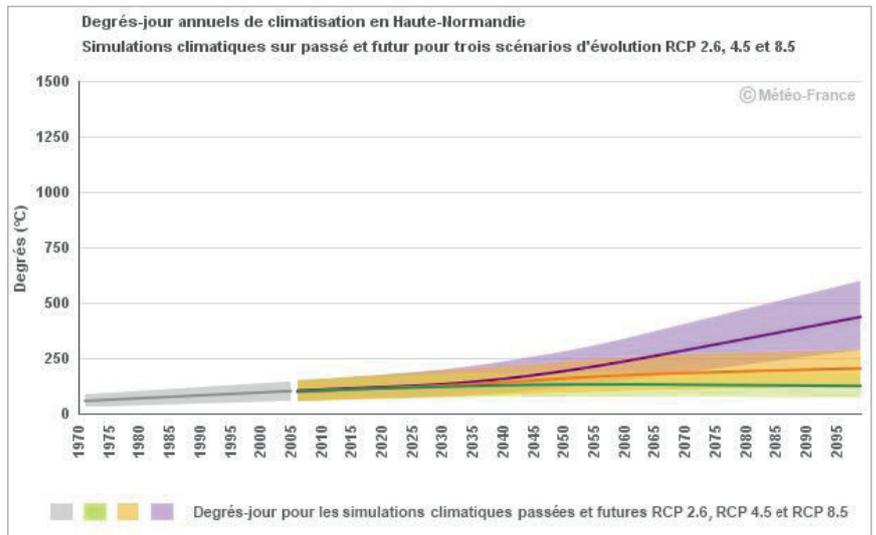


Figure 23 : Évolution des degrés-jour annuels de climatisation en Haute-Normandie selon des simulations du climat passé (1976-2005) et futur pour trois scénarios climatiques optimiste (RCP 2.6), médian (RCP 4.5) et pessimiste (RCP 8.5) – Source : Climat HD de Météo-France.

En outre, l'augmentation des besoins en climatisation pourrait aussi avoir une incidence sur l'utilisation de fluides frigorigènes et de gaz fluorés (HCFC, HFC) principalement utilisés pour des procédés de refroidissement (froid commercial, froid industriel, transport frigorifique, froid domestique, climatisation mobile, etc. voir Annexe). Les gaz fluorés peuvent contribuer aux émissions de gaz à effet de serre et au réchauffement climatique en raison de leur potentiel de réchauffement global (PRG) bien supérieur à celui du dioxyde de carbone (CO₂). Ils sont également responsables de la dégradation de la couche d'ozone et ont été réglementés par le protocole de Montréal en 1987, l'amendement de Kigali de 2016, et le règlement européen n°517/2014 sur les gaz fluorés.

Ces réglementations, dont l'objectif était de réduire les émissions de gaz fluorés, ont aussi

permis de réduire les émissions en équivalent CO₂ (Figure 24). En France métropolitaine, les émissions de fluides frigorigènes ont été estimées à 6300 tonnes en 2020 et diminuent progressivement depuis le début des années 2010. Cette tendance peut s'expliquer par la substitution des gaz fluorés de forts PRG par d'autres avec des PRG plus faibles, par l'amélioration des pratiques, la formation des opérateurs, et l'efficacité des filières de traitement des équipements en fin de vie. L'évolution de la réglementation, la participation des professionnels, et la hausse des prix des HFC ont pu également contribuer à l'amélioration de la récupération des fluides frigorigènes dans les équipements et, par conséquent, à la réduction des émissions (AFCE et CITEPA, 2022).

Sur le territoire de la Métropole Rouen Nor-

mandie, selon l'ORECAN, les émissions en tonnes équivalent CO₂ de gaz fluorés ont augmenté de 2005 à 2015 avant de diminuer progressivement jusqu'en 2021, dernier bilan disponible. Des tendances différentes sont observées entre les principaux secteurs avec une diminution dans le secteur industriel, une légère augmentation dans le secteur résidentiel, et une stabilisation dans le secteur tertiaire (Figure 25).

Bien que légère, l'augmentation des émissions de gaz fluorés pour le secteur résidentiel nécessiterait d'être surveillée, car elle pourrait être causée par un recours de plus en plus régulier à des systèmes de climatisation individuels pour faire face aux jours de chaleur plus fréquents (cf. Figure 22), ou encore pour pallier une inadéquation de l'isolation et du confort intérieur des logements

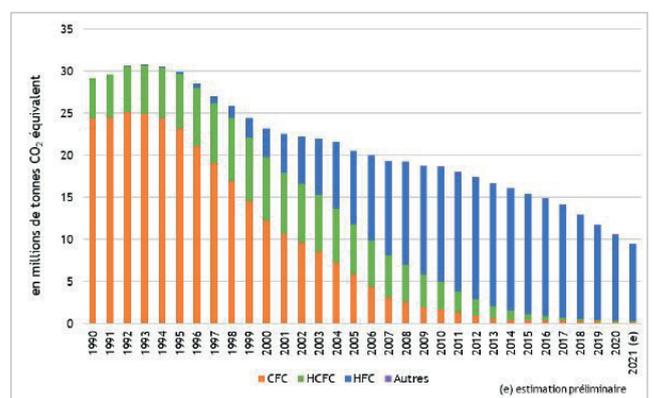
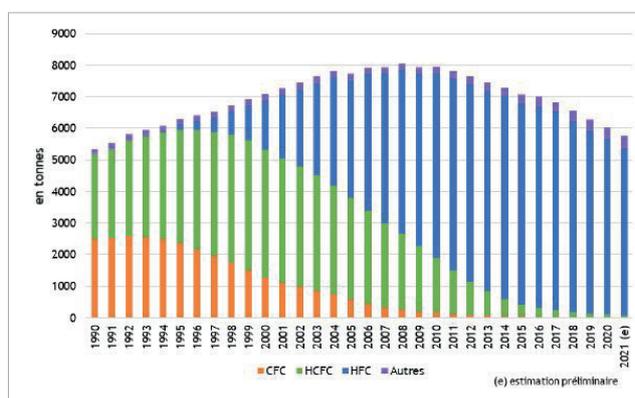


Figure 24 : À gauche, émissions de fluides frigorigènes en tonnes en France entre 1990 et 2020 - À droite, émissions en millions de tonnes CO₂ équivalent de fluides frigorigènes pour la même période. – Source : AFCE et CITEPA, 2022.

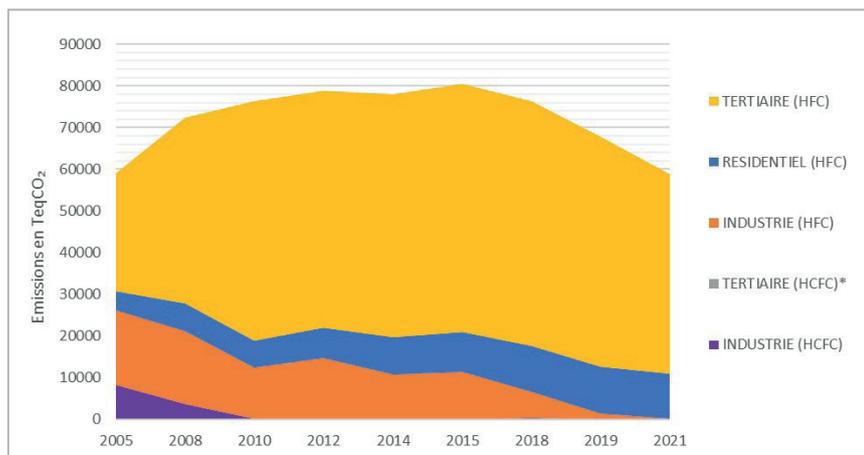


Figure 25 : Émissions de gaz fluorés (HCFC et HFC) en tonnes équivalents CO₂ sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie entre 2005 et 2021. Les émissions de HCFC pour le secteur tertiaire représentent 85 Teq. CO₂ en 2010 seulement. Cette valeur est trop basse pour apparaître sur le graphique. – Source : ORECAN – Atmo Normandie – Inventaire version 4.1.0 et ORECAN – Biomasse Normandie – version 12_21 (Transport routier) – Biomasse Normandie – version v1.0 (Transport non routier) – Biomasse Normandie – version 09.19 (Séquestration Carbone) – Format de rapportage PCAET_ORECAN

qui pousseraient les occupants à chercher de la fraîcheur par un système de climatisation individuel (Kabra, Arab et Fleury, 2022). La production de chaleur au niveau du condenseur des systèmes de production de froid (climatiseurs et PAC réversibles individuels) pourrait aussi entraîner, voire renforcer une augmentation potentielle de la sensation de chaud (à l'extérieur) en période de canicule (ADEME, 2021).

Évolution de la consommation d'électricité issue du chauffage et de la climatisation

Actuellement, la consommation d'électricité en France est fortement sensible aux températures. Par exemple, en hiver, en dessous de 15 °C, une baisse de la température de 1 °C engendre une augmentation moyenne de la consommation de l'ordre de 2400 MWh. En été, la consommation d'électricité est moins thermosensible comparé à d'autres pays du sud de l'Europe tels que l'Espagne ou l'Italie où le déploiement des appareils de climatisation est plus important (Figure 26 – RTE, 2021).

En raison de l'augmentation des températures moyennes, minimales et maximales, des jours de chaleur, et de la diminution des jours de froid, le changement climatique va avoir un impact sur la consommation d'électricité issue du chauffage en hiver et de la climatisation en été en France (RTE, 2021). De plus, la tendance à l'électrification des équipements de chauffage et de climatisation entraîne un « effet parc » engendrant une augmenta-

tion de la consommation d'électricité pour le chauffage. Toutefois, cette tendance est contrebalancée par l'amélioration de l'isolation thermique du bâti, l'amélioration de la performance des systèmes de chauffe, et la diminution des besoins de chauffage en hiver. Inversement, la consommation liée à la climatisation devrait augmenter et viendrait compenser les diminutions des besoins de chauffage en hiver. En somme, d'ici 2050, la consommation cumulée de climatisation et de chauffage en France serait répartie différemment dans l'année, avec une consommation plus importante en été et plus faible en hiver (RTE, 2021).

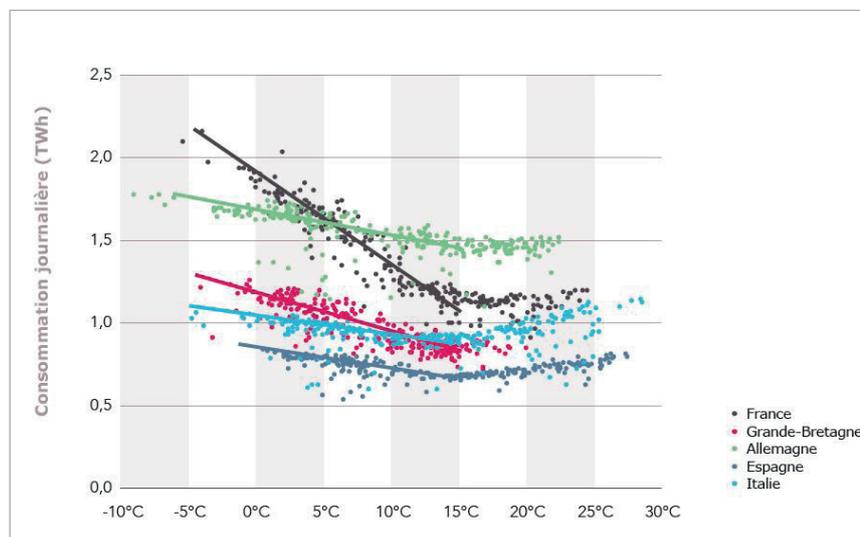


Figure 26 : Consommation journalière d'électricité en fonction de la température dans plusieurs pays européens en 2020 - Source : RTE, 2021.

La consommation d'énergie du numérique

Le CNRS estime qu'entre 6 % à 10 % de la consommation mondiale d'électricité est liée au développement des nouvelles technologies (CNRS, 2018). Selon The Shift Project, elle est également responsable d'environ 3,7 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre en 2018 (Ferrebœuf, 2018). La consommation d'énergie liée au numérique (et les émissions de gaz à effet de serre associées pour la produire) occupe donc une part de plus en plus croissante dans chaque secteur d'activité. Les serveurs utilisés par les entreprises sont reliés à des data centers (des hébergements de données) très énergivores en raison des procédés de refroidissement nécessaires pour les maintenir à une température ambiante et éviter une surchauffe des serveurs. L'entretien de ces infrastructures complexes est désormais indispensable car les activités économiques ou domestiques étant aujourd'hui très dépendantes du numérique, la panne d'un data center peut causer des perturbations majeures. Bien que les activités implantées sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie aient recours à plusieurs data centers en France, voire dans le monde, il existe un data center, le CRIANN, implanté sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie. Il convient donc de prendre en compte cet enjeu supplémentaire sur le territoire. Des solutions peuvent exister pour limiter le poids énergétique et climatique du numérique, ou encore valoriser la chaleur produite par les appareils (via des réseaux de chaleur appropriés par exemple).

Les consommations d'énergie du secteur agricole

Le secteur agricole ne représente qu'une part très marginale dans les consommations énergétiques sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie (0,26 % en 2021 selon l'ORECAN, soit 32 GWh). Les produits pétroliers sont les principaux combustibles utilisés (Figure 27) et servent notamment à alimenter les engins et les bâtiments agricoles (Figure 28).

Selon l'ADEME (2012), l'énergie représente aussi entre 13 et 20 % des charges variables des exploitations selon les productions. L'importation et l'exportation de denrées alimentaires, des intrants agricoles (engrais, aliments pour animaux, semences, etc.), et de divers matériaux, représentent également une consommation d'énergie indirecte liée aux transports de marchandises (ADEME et al., 2012).

Ainsi, il est probable que l'évolution de la consommation d'énergie future du secteur agricole sera très majoritairement liée à l'utilisation des produits pétroliers (environ 80 % de la consommation d'énergie finale), ou à une éventuelle électrification des machines. La lutte contre le changement climatique et la recherche de la neutralité carbone pourrait aussi induire un développement des énergies renouvelables, comme la biomasse, la méthanisation ou encore l'agrivoltaïsme dont le déploiement a été encadré par la loi du 10 mars 2023 d'accélération de la production d'énergies renouvelables. La production agricole restera cependant l'usage prioritaire sur les terres cultivables et les ouvrages solaires au sol seront interdits sur celles-ci.

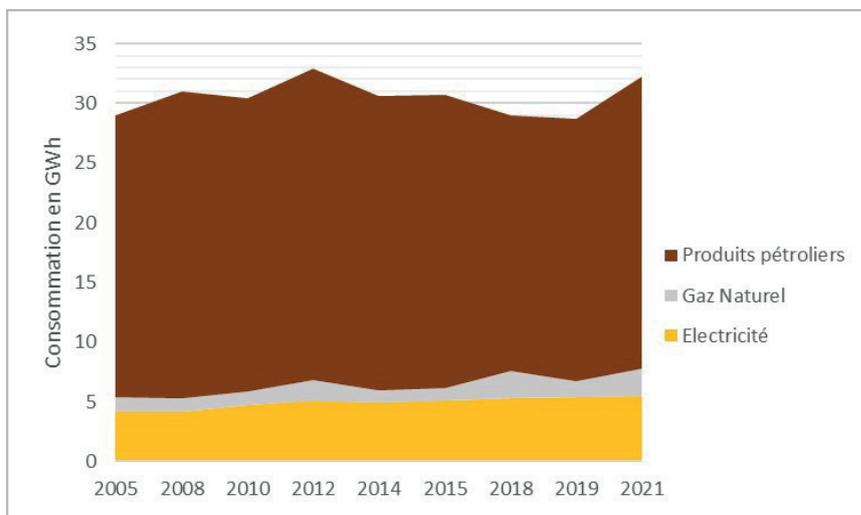


Figure 27 : Consommation d'énergie (GWh) du secteur agricole selon le type de combustible utilisé entre 2005 et 2021 dans la Métropole Rouen Normandie – Sources : ORECAN – Atmo Normandie – Inventaire version 4.1.0 et ORECAN – Biomasse Normandie – version 12_23 – Biomasse Normandie – version v1.0 (Transport non routier) – Format de rapportage PCAET_ORECAN

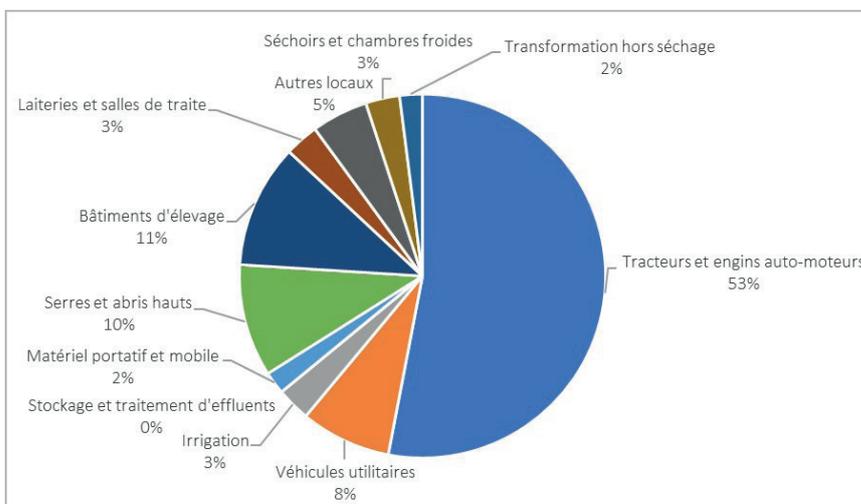


Figure 28 : Répartition des consommations d'énergie par type d'usage dans les exploitations agricoles françaises en 2011 – Sources : SSP, Enquête sur les consommations et les productions d'énergie dans les exploitations agricoles, Lamotte et Martin, 2014.

Les consommations d'énergie du secteur industriel

Plusieurs filières industrielles comme l'automobile, la valorisation énergétique, la papeterie, la pétrochimie, la pharmacie ou l'agroalimentaire sont implantées sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie. Selon les données de l'ORECAN, la consommation d'énergie du secteur industriel s'élevait à environ 3435 GWh en 2021 (6350 GWh en 2019 avant la COVID-19), soit environ 28 % des consommations d'énergie totales de la Métropole cette année-là (cf. Figure 3). Le secteur utilise principalement des combustibles d'origine fossile (gaz, produits pétroliers), de l'électricité, du bois énergie, et d'autres énergies renouvelables dans une moindre mesure (Figure 29).

Objectifs de développement de la Métropole

Pour diminuer la consommation d'énergie du secteur industriel, la Métropole met en place ou contribue à des projets visant à rassembler les entreprises autour de la transition énergé-

tique et des émissions bas carbone, via notamment la démarche UrbanPact (PCAET, 2019). Plusieurs industries réunies au sein de l'association UPSIDE se sont aussi engagées dans l'appel à projet de l'ADEME « Zone industrielle bas carbone » afin d'amorcer cette transition. La candidature est portée conjointement avec d'autres associations d'industries de l'Axe Seine telles que InCase Industries Caux Seine et Synerzip-LH (Le Havre). Certains champs d'action présentent du potentiel comme le développement des énergies renouvelables (le photovoltaïque et la récupération de chaleur fatale pour favoriser l'autoconsommation des industries), l'utilisation de l'hydrogène ou encore le développement du captage, du stockage et de l'utilisation du carbone (CCUS) (UrbanPact, 2022).

Impacts du changement climatique sur les consommations d'énergie du secteur

Bien que négligeable à court terme, l'élévation du niveau marin aura un impact réel sur la Métropole dès l'horizon 2100. Les zones autour de la Seine seront potentiellement à risque d'inondation chaque année. Cela aura une incidence sur le fonctionnement du tissu industriel, très développé sur les berges de Seine, notamment sur la partie ouest de la

rive gauche de Rouen. Plusieurs sites classés "Seveso" sont notamment situés dans la plaine alluviale de la Seine. Ces zones seront potentiellement inondables en considérant une montée des eaux entre 1 à 2 m, correspondant pour le scénario pessimiste à long terme (Kazmierczak et al., 2019). Des questions de délocalisations d'entreprise (et donc de leurs consommations d'énergie) et la limitation pour l'implantation de nouvelles industries pourraient se poser si les risques venaient à devenir trop importants.

Plus indirectement, la lutte contre le changement climatique et les politiques de plus en plus ambitieuses pour réduire les émissions de gaz à effet de serre à court terme nécessiteront également une transformation radicale des modes d'approvisionnement et de consommation en énergie des industries vers des solutions bas carbone. La réalisation des projets de sobriété et d'autosuffisance énergétique prévue dans le cadre de ZIBAC et d'URBENPACT pourrait permettre à ces industries d'engager cette transformation et de réduire à court et moyen termes leur consommation d'énergie et leur dépendance aux énergies fossiles.

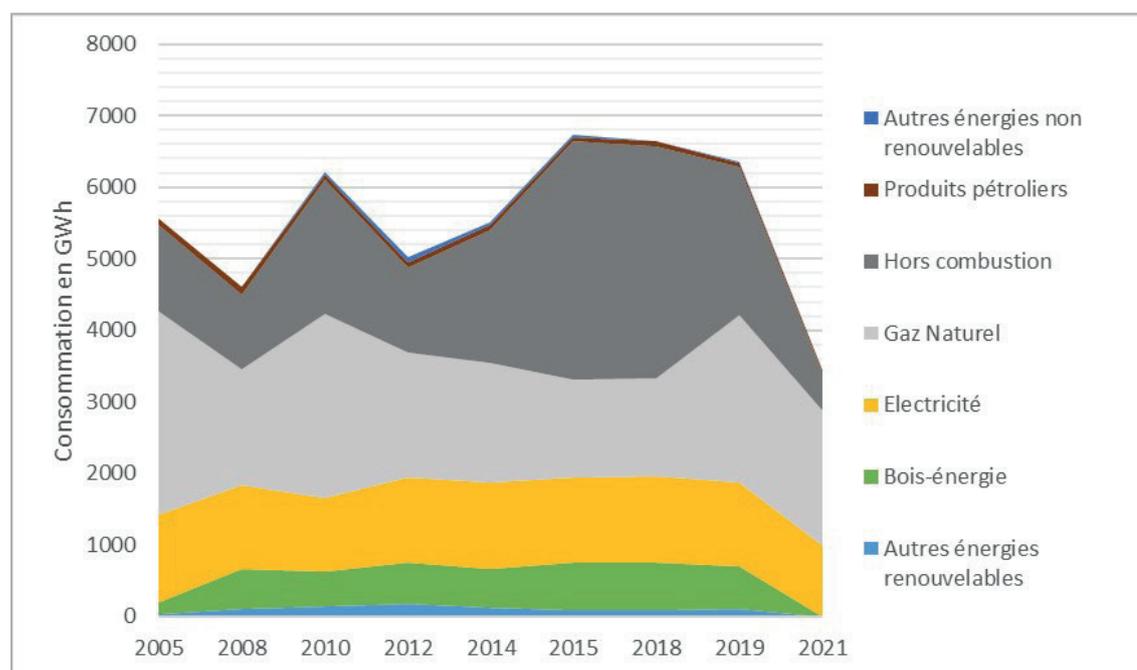


Figure 29 : Évolution de la consommation d'énergie (GWh) du secteur industriel par type de combustible dans la Métropole Rouen Normandie entre 2005 et 2021 - Source : ORECAN – Atmo Normandie – Inventaire version 4.1.0 et ORECAN – Biomasse Normandie – version 12_23 – Biomasse Normandie – version v1.0 (Transport non routier) – Format de rapportage PCAET_ORECAN

Les consommations d'énergie du secteur résidentiel

Selon l'ORECAN, la consommation d'énergie du secteur résidentiel était de 3057 GWh en 2021 (3150 GWh en 2019 avant la COVID-19). C'est le second secteur le plus énergivore de la Métropole avec une part d'environ 25 % de la consommation totale en 2021. Le gaz est le combustible le plus utilisé dans la consommation d'énergie, suivi de l'électricité (environ un tiers), de la chaleur et du froid issus des réseaux, du bois-énergie, et des produits pétroliers (Figure 30).

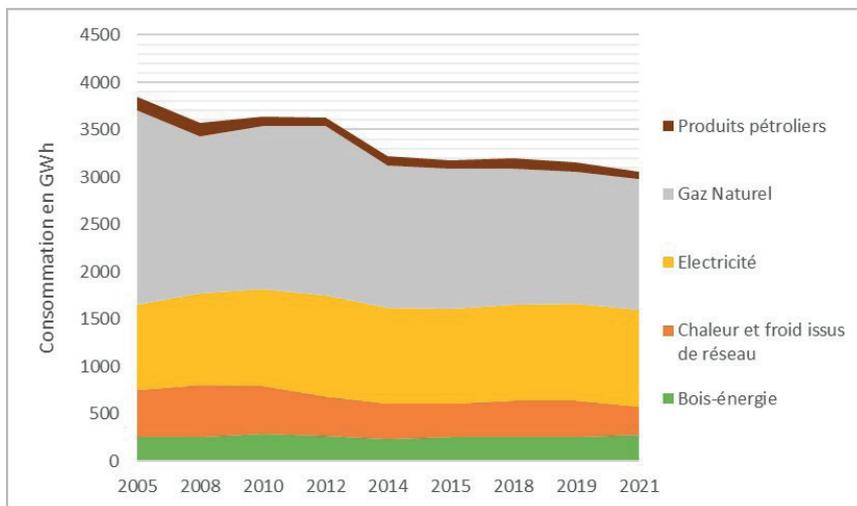


Figure 30 : Évolution de la consommation d'énergie (GWh) du secteur résidentiel par type de combustible dans la Métropole Rouen Normandie entre 2005 et 2021 - Source : ORECAN – Atmo Normandie – Inventaire version 4.1.0 et ORECAN – Biomasse Normandie – version 12_23 – Biomasse Normandie – version v1.0 (Transport non routier) – Format de rapportage PCAET_ORECAN

L'énergie est principalement utilisée pour le chauffage (67 %), 10 % pour l'eau chaude sanitaire (ECS), et 23 % pour le reste des usages (éclairage, appareils électroménagers, etc.) (Figure 31). Les consommations diffèrent en fonction des types de logements. 43 % des logements sont des maisons individuelles, les autres logements sont des appartements de copropriétés ou des HLM. 63 % de la consommation du secteur provient des maisons et notamment de leurs besoins en chauffage (SDE, 2017).

Hypothèses sur l'évolution de la consommation du secteur résidentiel

À l'horizon 2050, l'objectif de la Métropole est d'atteindre une consommation d'énergie pour le secteur résidentiel de 1 100 GWh/an. Pour y parvenir, le PCAET prévoit la rénovation de l'ensemble du parc immobilier afin d'atteindre un niveau moyen du label Bâtiments basse consommation (BBC) de manière à diminuer les consommations liées au chauffage des habitations qui représentent 67 % de la consommation de l'ensemble du parc immobilier. Le nombre total de rénovations de logements est évalué à 208 400 par la Métropole (Figure 32).

Pour évaluer le potentiel de baisse de la consommation des rénovations des maisons principales de la Métropole, deux scénarios de rénovation sont proposés comme hypothèses :

- Scénario « Rénov D » : rénovation des logements les plus énergivores (classes E, F et G) en logements à consommation moyenne (classe D)
- Scénario « Tout BBC » : rénovation des logements non basse consommation (classes C, D, E, F et G) en logements basse consommation (classes A et B)

Le premier scénario représente un nombre total de 103 000 rénovations contre 208 400 pour le second scénario. La baisse de la consommation est de 23 % dans le scénario « Rénov D » et atteint 65 % dans le scénario « Tout BBC ». En complément, la baisse de la consommation du secteur résidentiel a aussi été estimée en fonction des scénarios RCP, et en considérant la part moyenne de chauffage dans la consommation d'un loge-

ment rénové à 30 % (Figure 33)¹³. Pour la période la plus proche (2041-2070), et dans le cas d'une rénovation totale des logements en basse consommation « Tout BBC », la baisse de la consommation du secteur résidentiel a été estimée entre 69 % (RCP 2.6) et 73 % (RCP 8.5), ce qui correspond à une consommation comprise entre 1 147 et 999 GWh/an, soit dans la fourchette des objectifs fixés par le PCAET.

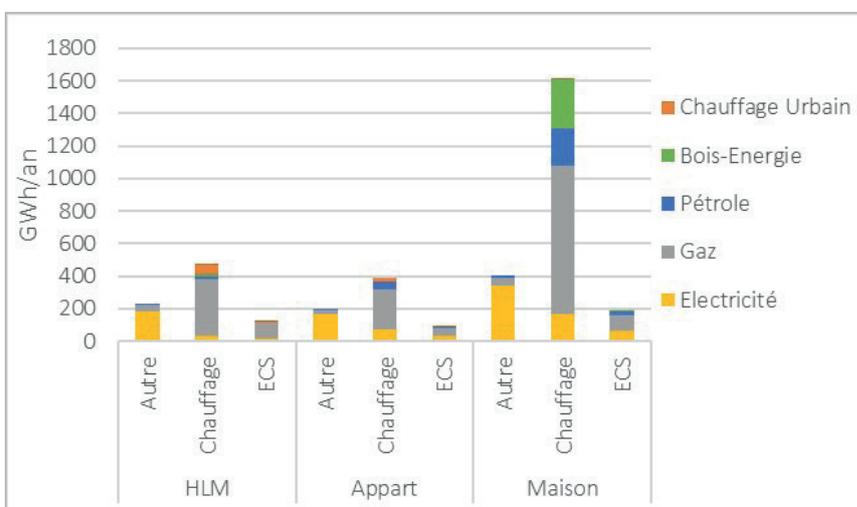


Figure 31 : Consommation d'énergie en fonction des usages et des types de logement – Source : SDE, 2017

¹³ Pour cette hypothèse, nous nous sommes appuyés sur la part actuelle du chauffage dans la consommation d'énergie dans le résidentiel qui était de 65 % en 2018 (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-logement-2022/29-consommation-denergie#:~:>). On a ensuite avancé l'hypothèse qu'une rénovation efficace réduisait à la fois la contribution du chauffage dans la consommation totale ainsi que la consommation totale. On a proposé de diviser par deux la part du chauffage. Cette valeur n'est donc pas associée à une référence. Néanmoins, le tableau final n'est qu'assez peu sensible à cette valeur.

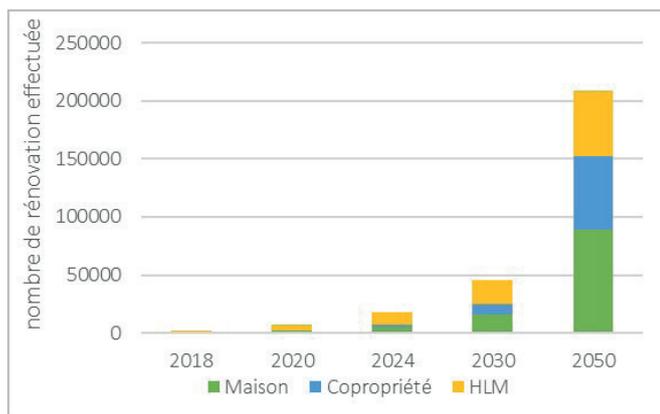


Figure 32 : Objectifs de rénovations jusqu'en 2050 – Source : PCAET, 2019.

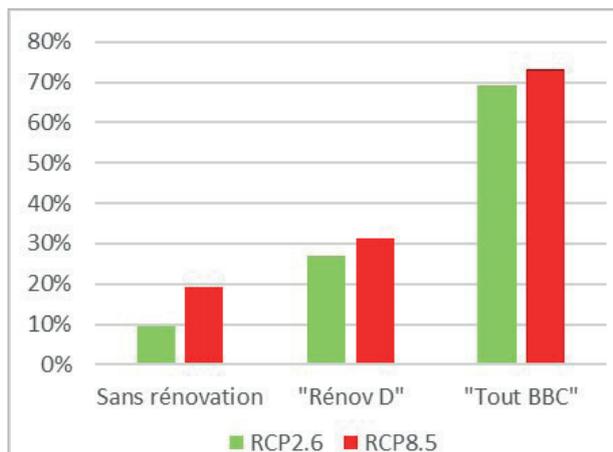


Figure 33 : Hypothèses sur la baisse de la consommation d'énergie du secteur résidentiel en fonction des scénarios de rénovation et des scénarios RCP

Les consommations d'énergie du secteur tertiaire

La consommation du secteur tertiaire s'élevait à 1 883 GWh en 2021 (1 972 GWh en 2019 avant la COVID-19). Sa part dans la consommation totale de la Métropole est d'environ 15 %. L'électricité et le gaz sont principalement utilisés (Figure 34). Concernant les usages, selon le SDE, près de 70 % de l'énergie consommée par le tertiaire est utilisée pour le chauffage, et 9 % pour l'eau chaude sanitaire (ECS). En 2017, les bâtiments du tertiaire représentaient une surface totale de 10 602 000 m² répartie entre le tertiaire publique (34 %) et le tertiaire privé (66 %) (SDE, 2017). Le PCAET vise une baisse des consommations d'énergie du secteur de 62 % en 2050 par rapport à 2005, soit une consommation qui représenterait environ 900 GWh/an.

Hypothèses sur la réduction de la consommation d'énergie du secteur tertiaire

Suivant la surface et la consommation d'énergie totales, la rénovation de l'ensemble des bâtiments du secteur tertiaire en bâtiments basse consommation de classe B permettrait de réduire la consommation d'énergie à 960 GWh/an, soit une baisse de consommation de 58 %.

Par ailleurs, comme pour le résidentiel, on considère en plus des rénovations, une baisse des besoins en chauffage proportionnelle à la baisse du nombre de DJU de chauffage résultant de l'augmentation globale de la température. La part de chauffage d'un bâtiment tertiaire rénové est considérée comme pour le résidentiel à 30 %¹⁴. Ainsi, la baisse totale de la consommation d'énergie du secteur tertiaire serait comprise entre 60 et 62 % à l'horizon 2050 en fonction des scénarios RCP, soit un résultat proche des objectifs du PCAET.

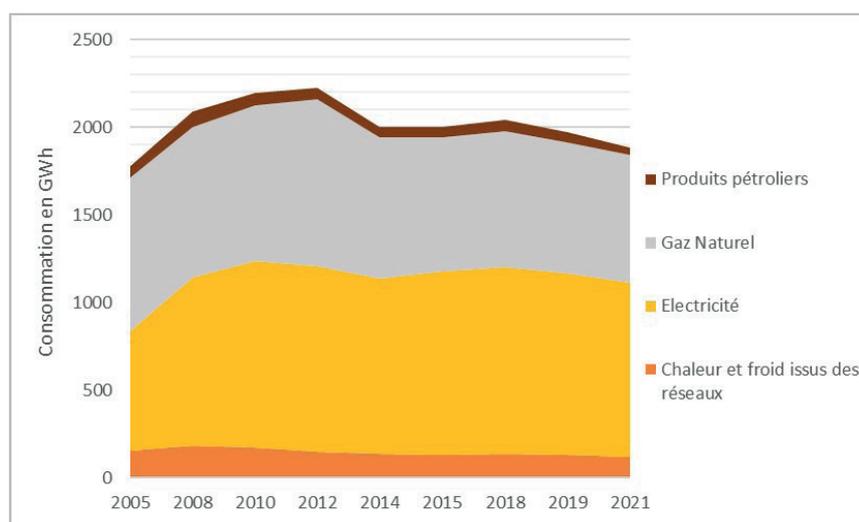


Figure 34 : Évolution de la consommation d'énergie (GWh) du secteur tertiaire par type de combustible dans la Métropole Rouen Normandie entre 2005 et 2021 - Source : ORECAN – Atmo Normandie – Inventaire version 4.1.0 et ORECAN – Biomasse Normandie – version 12_23 – Biomasse Normandie – version v1.0 (Transport non routier) – Format de rapportage PCAET_ORECAN

¹⁴ Même hypothèse que pour le secteur résidentiel (vote note précédente). Référence pour le tertiaire : <https://reseau-chaueur.cerema.fr/espace-documentaire/consommation-denergie-dans-les-batiments-chiffres-cles-2018>

Les consommations d'énergie des mobilités (transports routier et non routier)

Au sein de la Métropole, selon l'ORECAN, la consommation d'énergie issue du secteur des mobilités s'élevait à 3676 GWh en 2021, dont 3096 GWh pour le secteur routier, et 580 GWh pour le secteur non routier (4397 GWh en 2019 avant la COVID-19, dont 3760 GWh pour le secteur routier et 637 GWh pour le secteur non routier). Ainsi, les mobilités représentaient environ 30 % de la consommation totale d'énergie du territoire en 2021. Les produits pétroliers sont principalement utilisés, et l'électricité ne constitue qu'une part marginale dans la consommation d'énergie (Figure 35).

Parmi ces chiffres, la consommation d'énergie liée au fret serait de 1 440 GWh/an et provient principalement du transport routier (78 %), et des transports maritimes (15 %) (SDE, 2017). Les transports de marchandises par voie fluviale, ferroviaire et aérienne ne représentent qu'une part marginale (5 %).

Concernant le transport de voyageurs, la consommation d'énergie résulte principalement de l'utilisation de la voiture individuelle (88 %), et le reste provient des transports en commun (SDE, 2017). L'enquête ménage déplacement (EMD) menée en 2017 montre que sur 1,67 million de déplacements internes et d'échanges réalisés quotidiennement sur la Métropole, la voiture individuelle représente un peu plus de la moitié des déplacements, tandis que la marche en représente un tiers et les transports en commun environ 11 %. La part modale du vélo est marginale (1 %) (Cerema, 2018; Savary, 2022).

L'objectif de la Métropole est d'atteindre une consommation de 550 GWh/an en 2050 (-76 % par rapport à 2005) en diminuant le nombre des déplacements effectués en voiture au profit des déplacements réalisés en transport en commun, à pied ou à vélo (Figure 36) (PCAET, 2019).

Conséquences de la climatisation des véhicules lors des fortes chaleurs

Selon l'ADEME (2020), en étant activée, la climatisation des véhicules accroît la consommation de carburant d'un véhicule particulier de 2 l/100 km en ville, 0,4 l/100 km sur route et autoroute, et de 1 l/100 km en moyenne pour les véhicules les plus récents. Par ailleurs, dans le cas d'une journée à 30 °C avec un fort ensoleillement, la surconsommation de carburant peut

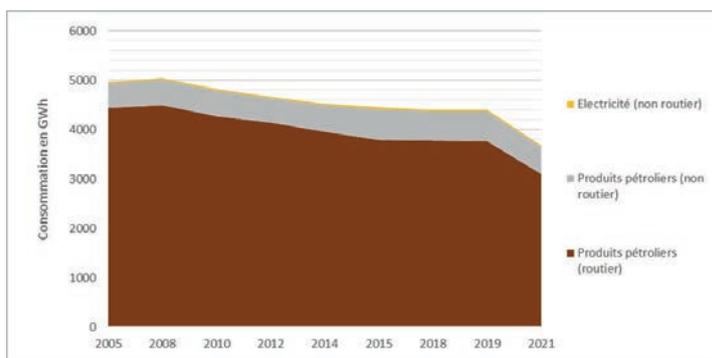


Figure 35: Évolution de la consommation d'énergie (GWh) des secteurs routiers et non routiers par type de combustible dans la Métropole Rouen Normandie entre 2005 et 2021 - Source: ORECAN – Atmo Normandie – Inventaire version 4.1.0 et ORECAN – Biomasse Normandie – version 12_23 – Biomasse Normandie – version v1.0 (Transport non routier) – Format de rapportage PCAET_ORECAN

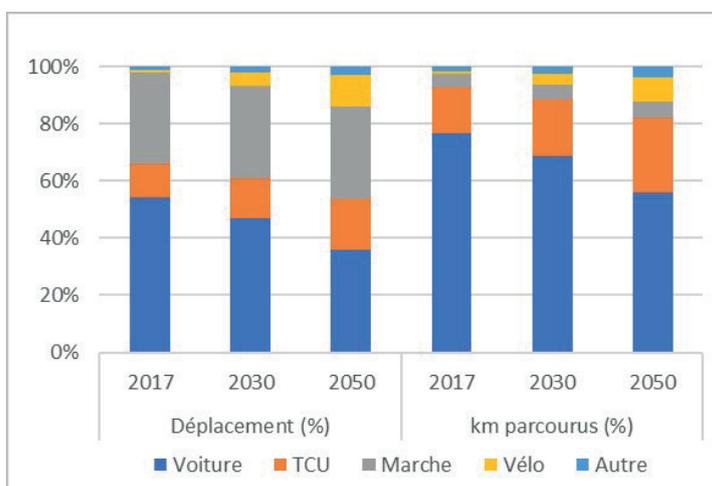


Figure 36: Hypothèses sur l'évolution des parts modales dans la Métropole

atteindre entre 40 % à 70 % en ville, et 15 % à 30 % sur la route et l'autoroute pour une température de consigne de 20 °C. Cette surconsommation de carburant est réduite de 8 % en ville et 5 % sur la route et l'autoroute en prenant une température de consigne de 25 °C. En outre, cette surconsommation de carburant s'accompagne d'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (environ 25 g/km de CO₂) et de polluants atmosphériques (+40 % de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures imbrûlés, +25 % d'oxydes d'azotes (Nox) pour les moteurs à essence; +40 % de Nox et +30 % de particules pour les moteurs diesel). Cette surconsommation se produit particulièrement en ville où la concentration de chaleur est plus importante qu'en milieu rural, en raison notamment des phénomènes d'îlots de chaleur urbains (Fréchet et al., 2023). Pour les moteurs électriques, l'utilisation de la climatisation peut réduire l'autonomie du véhicule de 25 % (ADEME, 2020).

Les systèmes de climatisation des véhicules utilisent aussi des fluides frigorigènes appartenant à la catégorie des gaz fluorés. En fonctionnant, une partie du fluide présent dans le circuit de climatisation du véhicule est rejetée dans l'atmosphère (via des fuites, des opérations de maintenance et d'entretien, un accident, ou une non-récupération du fluide à la fin de vie du véhicule) et contribue à accroître le réchauffement climatique. En effet, utilisé jusqu'à son interdiction depuis janvier 2013 dans les nouveaux modèles de véhicules, et depuis 2017 dans tous les véhicules neufs, le fluide R-134a a un potentiel de réchauffement global (PRG) de 1430¹⁵. Il est aujourd'hui progressivement remplacé par le R-1234yf introduit dans les véhicules les plus récents, et dont le PRG est de 4 (ADEME, 2020).

En France, les émissions de gaz fluorés concernent également les véhicules industriels, les cars et bus, et les trains puisque ces transports utilisent aussi la climatisation (Tableau 4).

¹⁵ Cela signifie qu'1 g de R-134a rejeté dans l'atmosphère équivaut à 1 430 g de CO₂.

Les taux de fuite sont estimés respectivement à 8 %, 10 % et 5 % pour les véhicules industriels, les cars et les bus, et les trains. Les émissions sont les plus élevées en fin de vie car les fluides frigorigènes ne sont pas systématiquement récupérés dans les véhicules hors d'usage avant leur destruction. Cependant, ces facteurs peuvent être surestimés car les quantités récupérées ne sont qu'estimées, et non mesurées. Il n'existe donc pas un inventaire plus précis (AFCE et CITEPA, 2021).

L'augmentation du nombre de jours de chaleur envisagée par les projections climatiques pourrait induire un recours plus fréquent à la climatisation des véhicules, et donc à une surconsommation de carburant pour les moteurs thermiques, ou d'électricité pour les moteurs électriques. Malgré tout, il existe plusieurs solutions pour limiter la surconsommation des véhicules en période de fortes chaleurs (Tableau 5 – Gagnepain, 2005 ; Gagnepain, 2007).

La Métropole Rouen Normandie étant autorité organisatrice des mobilités (AOM), elle dispose de plusieurs pouvoirs pour intégrer des consignes de fonctionnement de la flotte de bus (régulation des vitesses, écoconduite, etc.). Elle peut également agir sur l'achat de bus dans ses cahiers des charges et ses appels d'offres en exigeant une proposition de bus fonctionnant par compression ou par climatisation évaporative et précisant la nature de fluide frigorigène utilisé, la quantité, la puissance mécanique nécessaire pour le fonctionnement de la climatisation, et un certificat d'engagement des performances sanitaires et de conformité à la réglementation (CEPSR) (Gagnepain, 2007). Elle peut aussi agir sur la récupération des fluides frigorigènes dans les bus en fin de vie. L'utilisation de la climatisation dans les transports en commun en été reste toutefois nécessaire pour maintenir un confort aux usagers dont l'état de santé est fragile (jeunes enfants, personnes âgées, femmes enceintes, etc.), et surtout aux conducteurs qui assurent un service pendant plusieurs heures, parfois sous des températures très élevées qui peuvent affecter leur concentration et leur santé. Son usage relève donc aussi d'un enjeu de santé collective, de santé au travail et de sécurité.

Hypothèses sur la consommation d'énergie des transports en commun urbains

La Métropole renouvelle son parc de bus et prévoit d'électrifier massivement l'ensemble des véhicules de transports en commun au sein du territoire. L'objectif est d'atteindre un taux de circulation de bus électriques ou hydrogènes de 50 % en 2026 et de 100 % en 2050. En 2022, des tests ont été effec-

2020	Climatisation automobile	Véhicules industriels	Cars et bus	Trains
Facteur d'émission à la charge	0,23 %	0,23 %	0,13 %	1,50 %
Facteur d'émission fuitif	8 %	8 %	10 %	5 %
Facteurs d'émission à la maintenance	Environ 1 %	Moins de 3 %	Moins de 3 %	Environ 1 %
Facteur d'émission de fin de vie	46 %	92 %	92 %	12 %

Tableau 4 : Facteurs d'émissions estimés durant la durée de vie des automobiles, des véhicules industriels, des cars et des bus, et des trains en France – Source : AFCE et CITEPA, 2021.

Pour les véhicules automobiles	Pour les réseaux de bus
<ul style="list-style-type: none"> - Éteindre la climatisation automatique tant que la température extérieure est supportable - Ouvrir les fenêtres pour évacuer la chaleur dans l'habitacle avant d'utiliser la climatisation, mais rouler avec les fenêtres fermées - Limitez l'utilisation de la climatisation selon une température de consigne à 4 ou 5 °C de moins que la température extérieure - Stationner à l'ombre lorsque c'est possible 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduire les charges thermiques - Améliorer la distribution et la circulation de l'air à l'intérieur du bus - Optimiser le fonctionnement du système de climatisation - Imposer, à l'instar des bureaux, une température de consigne en dessous de laquelle la climatisation ne doit pas être déclenchée (25 °C par exemple). - Utiliser un système de climatisation évaporative, sans compresseur, ni fluide frigorigène.

Tableau 5 : Exemples de solutions pour limiter l'utilisation de la climatisation dans les véhicules automobiles et les bus tout en maintenant un confort intérieur supportable – Sources : ADEME, 2020 ; Gagnepain, 2005 ; Gagnepain, 2007.

tués sur de nouveaux bus électriques sur les lignes TEOR pour lesquelles 79 bus articulés électriques seront mis en service d'ici 2026 (100 % des TEOR). À propos des autres lignes de bus, en plus des 22 bus électriques déjà mis en service sur le réseau, environ 50 bus électriques et 14 bus à hydrogène ont été commandés pour renouveler le parc de 420 bus et autocars de la Métropole. Des projets de retrofit (changement du moteur thermique par un moteur électrique) sont également en cours sur 49 bus et autocars pour atteindre ces objectifs.

En considérant l'évolution de la consommation proportionnelle à l'augmentation du nombre de km parcourus en transport en commun (Tram et Bus) de 25 % en 2026, et de 64 % en 2050, et

en considérant un rapport de consommation de 0,35, soit un pourcentage de réduction de consommation de 65 % par rapport au bus thermique, le gain d'énergie résultant du changement de motorisation des bus permet de réduire la consommation globale d'énergie des transports collectifs de 10 % en 2026 (230 GWh) et 25 % en 2050 (190 GWh)¹⁶ (Figure 37).

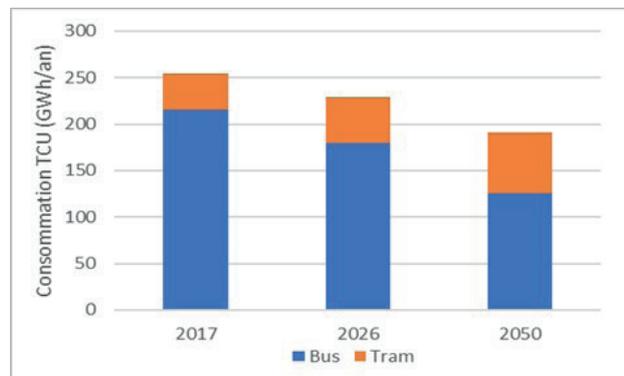


Figure 37 : Hypothèse sur l'évolution de la consommation des transports en commun urbains

¹⁶ Hypothèses s'appuyant sur l'étude de l'ADEME « Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains » 2018 qui décrit les consommations d'énergie selon la motorisation des bus.

Hypothèses sur l'évolution de la consommation des voitures particulières

La Métropole a également mis en place un réseau de bornes de recharge pour les voitures électriques. En 2020, il s'agit de 138 points de recharge pour véhicules électriques qui sont mis à disposition des usagers. En 2019, la consommation de ces bornes s'élevait à 353 054 kWh.

La voiture est le type de transport à l'échelle locale qui consomme le plus d'énergie. La Métropole a identifié trois leviers d'action afin de diminuer cette consommation : la baisse de l'usage de la voiture, l'augmentation du taux d'occupation des voitures (co-voiturage) et l'augmentation des voitures électriques en circulation. La consommation d'une voiture électrique est en moyenne de 17 kWh/100 km, celle des voitures thermiques est de 7 l/100 km soit environ 70 kWh/100 km. En ville, la consommation d'une voiture électrique est 75 % plus faible qu'une voiture thermique. À l'horizon 2050, dans l'hypothèse où la voiture représenterait 50 % des kilomètres parcourus, tous types de transports confondus, où le taux d'occupation serait de 2 personnes par véhicule, et où les voitures électriques représenteraient 60 % des véhicules en circulation (Tableau 6), la consommation d'énergie des voitures diminuerait de 72 % en 2050 par rapport à la consommation actuelle (Figure 38). Cela représenterait une consommation de 360 GWh/an. En ajoutant la consommation des transports en commun, le secteur des mobilités représenterait une consommation de 550 GWh/an, soit une consommation proche des objectifs du PCAET (Figure 38).

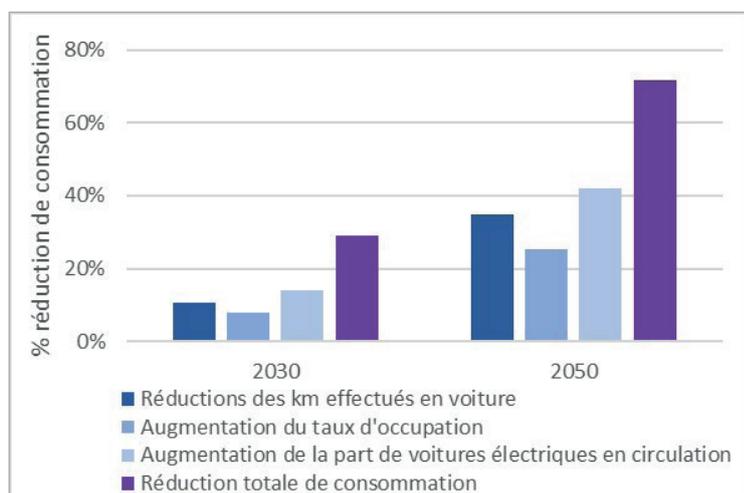


Figure 38 : Hypothèses des auteurs sur les réductions de la consommation des voitures à l'horizon 2030 et 2050 en fonction des leviers d'économie d'énergie (%)

Hypothèses sur l'évolution de la consommation d'énergie du fret

Au niveau des transports de marchandises, l'objectif du PCAET de la Métropole est d'atteindre une consommation de 1 000 GWh/an en 2050. Faute de données suffisantes, il n'est actuellement pas possible d'émettre des hypothèses à propos de l'impact direct du changement climatique sur l'évolution des consommations d'énergie liées au fret. Néanmoins, celles-ci pourraient être influencées indirectement selon les actions nationales et locales pour réduire les consommations d'énergies fossiles (voir chapitre précédent). À titre d'exemple, plusieurs projets d'électrification des modes de transports fluviaux sont envisagés par HAROPA en vue de décarboner le secteur. Le développement du fret fluvial et maritime, et ferroviaire, est aussi étudié pour réduire le fret routier.

Autres conséquences du changement climatique pouvant affecter la consommation d'énergie du fret

Néanmoins, l'utilisation et la consommation d'énergie de ces nouveaux modes de fret pourraient être influencées par l'occurrence des phénomènes extrêmes sur les infrastructures et les mobilités des marchandises (Savary, 2022).

Ainsi, la navigation fluviale pourrait être bouleversée par la transposition de l'élévation du niveau marin dans l'estuaire de la Seine, par des inondations plus régulières, ou à l'inverse, des sécheresses et des étiages de la Seine en été plus fréquents. Ces événements pourraient avoir un impact sur les tirants d'air et les tirants d'eau limitant ainsi l'accès aux axes fluviaux à certains bateaux sur des périodes plus ou moins longues pouvant occasionner des retards dans l'importation ou l'exportation de marchandises. En outre, les tempêtes ou les crues de la Seine peuvent engendrer l'inaccessibilité temporaire des ports et géné-

Leviers d'économie d'énergie	2017	2030	2050
Part du nombre de km total parcourus (%)	76,6 %	68,5 %	50,0 %
Taux d'occupation	1,35	1,5	2
Taux de voiture électrique (%)	0 %	20 %	60 %

Tableau 6 : Estimations des leviers d'économies d'énergie – Hypothèses des auteurs

rer des ruptures dans la chaîne d'approvisionnement en marchandises (Savary, 2022).

De plus, les événements extrêmes peuvent engendrer des perturbations (baisse de la vitesse), voire des indisponibilités relativement importantes des réseaux ferrés et routiers. Les rails ou des caténaires peuvent notamment subir des dilatations lors des fortes températures. Une partie du réseau souterrain peut également être inondée ponctuellement lors de fortes précipitations ou de crue de la Seine. C'est également le cas de nombreuses trémies routières situées à proximité de la Seine et pouvant être inondées. Dans certains cas, l'exploitation des services peut être d'autant plus durablement impactée que le système d'assainissement n'est pas forcément conçu pour évacuer de grosses quantités d'eau dans les parties souterraines. Les réseaux ferrés sont aussi bien moins flexibles que les réseaux routiers et les conséquences sur les mobilités ferroviaires de l'indisponibilité d'un tronçon sont beaucoup plus importantes et étendues. Ainsi, l'indisponibilité d'une section provoque des effets en cascade sur une grande partie du réseau et sur l'ensemble des mobilités, aussi bien de voyageurs et des marchandises, et ne desservant pas le territoire. La forme en étoile du réseau ferroviaire desservant la Métropole accentue le risque de perturbations générales des mobilités, en cas de difficultés sur l'une des branches. Une indisponibilité du tronçon commun autour de la gare rive droite peut notamment occasionner un blocage complet du réseau ferroviaire dans l'agglomération rouennaise (Savary, 2022).

Enfin, la Seine étant aussi un obstacle majeur pour les mobilités, l'indisponibilité de certains ouvrages d'art peut engendrer des déviations plus importantes du trafic et des consommations de carburants supplémentaires. Suite à l'incendie accidentel du pont Mathilde en 2012, les congestions sur le réseau routier, voire des situations de blocage complet de la circulation, ont été plus récurrentes au cœur de l'agglomération dès le moindre incident (panne par exemple) sur l'un des axes routiers (Savary, 2022).

La vulnérabilité des infrastructures de distribution de l'énergie

Sensibilité des infrastructures de distribution de l'électricité

Deux types de réseau électrique parcourent le territoire de la Métropole pour la distribution de l'énergie : le réseau de distribution haute tension A (HTA) avec une tension comprise entre 15 et 30 kV et le réseau de distribution Basse Tension (BT) avec une tension de 230 ou 400 V. Le réseau HTA constitué de 2 019 km de câbles distribue l'énergie électrique provenant des postes sources situés sur le territoire et desservant les 3 696 postes de transformation HTA/BT. Le réseau BT constitué de 2 748 km de câbles fait quant à lui la liaison entre les postes de transformation et les particuliers consommateurs d'électricité (SDE, 2017).

Temps de coupure électrique

Le critère B mesure en minute le temps moyen d'une coupure d'électricité subit par les consommateurs (Figure 39). Il permet de repérer les secteurs touchés par une coupure et d'identifier la cause et la ligne du réseau à l'origine de cette coupure. Sur le territoire de la Métropole, environ 50 % du temps de coupure provient d'incidents sur le réseau HTA avec un temps de coupure moyen de 26 minutes contre 8,3 minutes pour le BT. Le réseau en amont des postes sources (réseau de transport d'énergie) ne représente que 10 % du temps de coupure. Selon le SDE, les coupures ne sont pas homogènes sur le territoire car les communes desservies par le réseau en régime rural à l'ouest de la Métropole sont généralement les plus concernées.

Vulnérabilités des réseaux

Les infrastructures énergétiques sont particulièrement exposées aux aléas climatiques et leur adaptation apparaît désormais comme un enjeu prioritaire (RTE, 2021). Ces vulnérabilités se vérifient à l'échelle de la Métropole au niveau des réseaux HTA et BT qui présentent plusieurs vulnérabilités différentes selon leur localisation en milieu rural ou urbain (Figure 40), et selon les aléas climatiques (canicules, inondations, tempêtes, orages, etc.) (SDE, 2017). Les câbles aériens nus (615 km) sont vulnérables aux aléas climatiques tels que les tempêtes, les vents violents, les chutes de neige ou de branches d'arbres. Les câbles souterrains à papier imprégné (CPI - 311 km) principalement situés

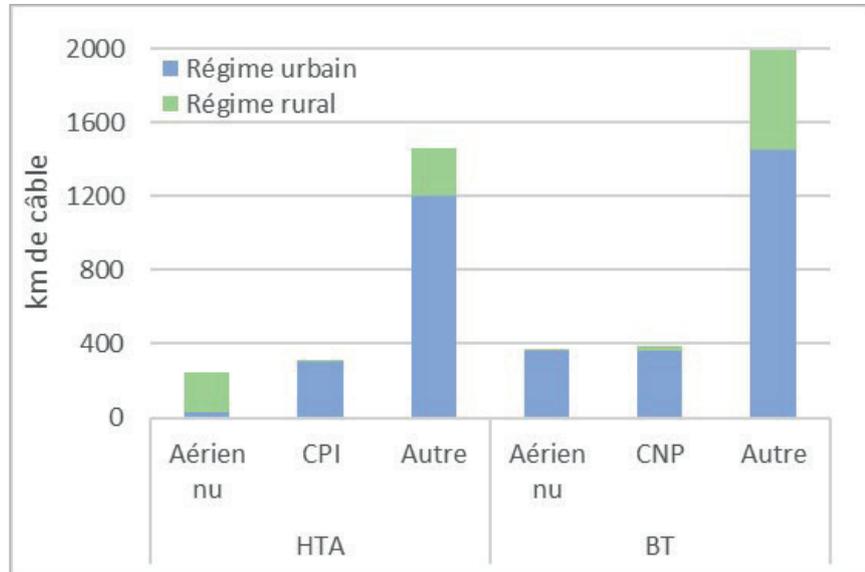


Figure 40: Linéaire du réseau électrique en kilomètres de câbles en fonction du type de câble et du réseau – Source : SDE, 2017

en milieu urbain sont moins vulnérables aux tempêtes. Ils sont aussi isolés et protégés contre les infiltrations d'eau et les inondations y compris au niveau des raccords car les boîtiers sont étanches. En revanche, comme les câbles à neutre périphérique situés en milieu rural (CNP - 386 km), ils sont sensibles aux épisodes de fortes chaleurs qui peuvent engendrer des claquages électriques pouvant atteindre 16,5 % du réseau en régime urbain et 4,9 % en régime rural.

Enfin, le réseau électrique est le plus vulnérable aux inondations à partir des étapes de distribution. Les dommages portent essentiellement sur les transformateurs HTA et les branchements individuels. En effet, les

postes de transformation HTA et BT présentent un risque d'ennoiement, c'est-à-dire un court-circuit provoqué par le contact avec l'eau. Les postes qui les abritent ne sont pas étanches et doivent de plus être aérés, facilitant l'introduction d'eau en cas d'inondation. Néanmoins, les postes de transformation peuvent fonctionner dans 60 cm à 1 m d'eau. Les transformateurs, eux, sont partiellement étanches : le bobinage et les branchements HTA (63 000 V) peuvent résister à l'eau contrairement aux branchements MT (20 000 V) et BT (230 V) (Ministère de la transition écologique, 2020).

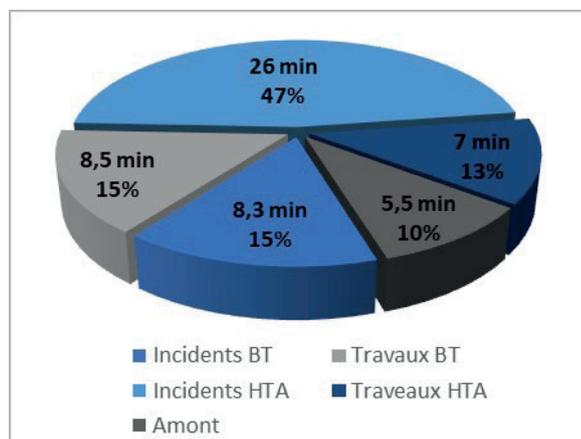


Figure 39: Temps de coupure (critère B) en fonction de la cause et du réseau – SDE, 2017

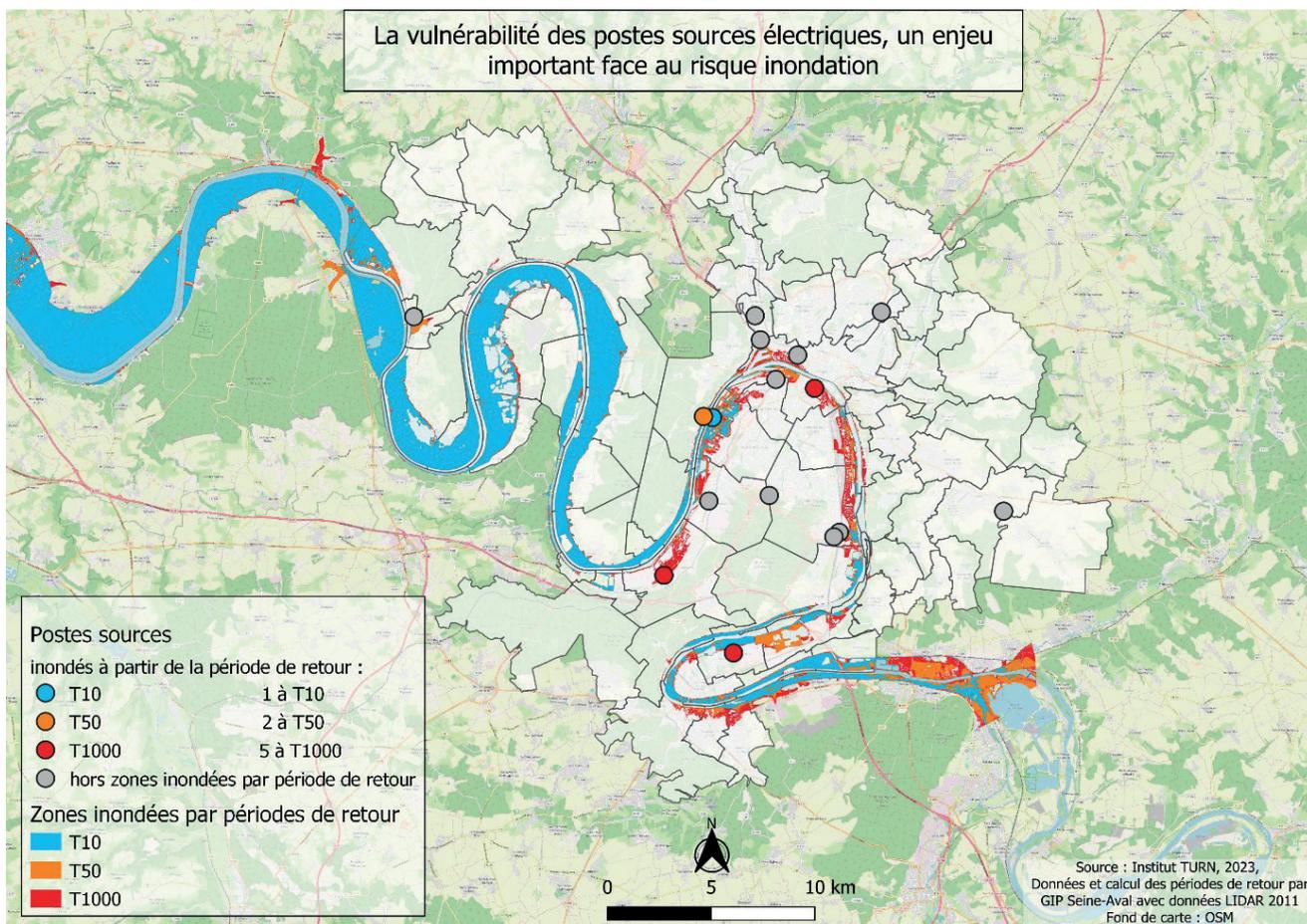


Figure 41 : Plusieurs postes sources sensibles au débordement de la Seine – Source : plateforme multirisque élaborée par l'Université Rouen Normandie, Laignel, Geffroy, et Champion, 2023.

Impacts du réchauffement climatique sur le réseau électrique

La plateforme multirisque élaborée par l'Université Rouen Normandie étudie les impacts des inondations et des canicules et la résilience des infrastructures de distribution de l'électricité. Des premiers résultats montrent que sur les postes sources qui alimentent la Métropole en électricité, plusieurs sont situés sur des zones potentiellement inondables et sensibles, car ils alimentent des centres médicaux importants et des industries (Laignel, Geffroy, Champion, 2023 – Figure 41). Des questions se posent donc sur l'adaptation et le dimensionnement à moyen et long terme des installations électriques au risque inondation dont la fréquence n'est pas exceptionnelle et pourrait être renforcée avec le changement climatique via l'augmentation des pluies intenses, et l'élévation du niveau marin dans l'estuaire (Kazmierczak et al., 2019).

En cas d'inondation, le territoire peut être affecté directement au niveau des biens et des personnes situés au sein de l'enveloppe de vulnérabilité, mais aussi indirectement, avec

des conséquences qui s'étendent au-delà de l'enveloppe de vulnérabilité.

Dans le cadre du diagnostic des vulnérabilités aux inondations servant au diagnostic du PAPI (ALISE Environnement, 2023), un travail avec l'Agence Maîtrise d'Ouvrage réseaux d'Enedis a permis d'identifier les zones sensibles potentiellement impactées par une défaillance électrique en s'appuyant sur une enveloppe de vulnérabilité qui cumule les scénarios de deux aléas d'occurrence centennale : débordement de cours d'eau et ruissellement. La zone étudiée (territoire du PAPI RLA et Communauté d'agglomération Seine-Eure – CASE) comprend 371 259 clients, et l'aléa engendre la coupure d'alimentation en électricité de 99 067 clients, soit 27 % des clients. Parmi ces clients, 71 867 le sont car ils sont inondés et 27 220 sont coupés alors qu'ils ne sont pas inondés (impacts indirects). Pour le territoire de la Métropole Rouen Normandie, environ 50 000 clients subiraient une coupure électrique, dont 37 000 seraient inondés, et 13 000 ne seraient pas inondés (Figure 42).

En outre, le risque de claquage électrique serait à surveiller de près dans la mesure où le

nombre de jours de chaleur et de canicules pourrait augmenter quels que soient les scénarios de changement climatique (Cantat et al., 2020; Laignel et Nouaceur, 2023). Les fortes températures peuvent aussi provoquer la dilatation des câbles et leur rapprochement vers le sol (RTE, 2021). Pour assurer la sécurité des populations environnantes, l'intensité des lignes est réduite à un certain seuil. Ainsi, plus la température extérieure est élevée, moins la marge d'élévation en température causée par les transits d'électricité est importante. Cet effet pourrait être amplifié avec l'augmentation des températures moyennes et nécessite donc d'être pris en compte dans le dimensionnement des réseaux électriques aériens.

Des actions sont aussi étudiées par la Métropole Rouen Normandie pour remplacer les câbles souterrains CPI et CNP, ainsi que les câbles aériens nus les plus vulnérables par d'autres types de câbles plus résistants comme les câbles souterrains synthétiques. Ce remplacement vise à améliorer l'efficacité et la sécurité du service de distribution (SDE, 2017).

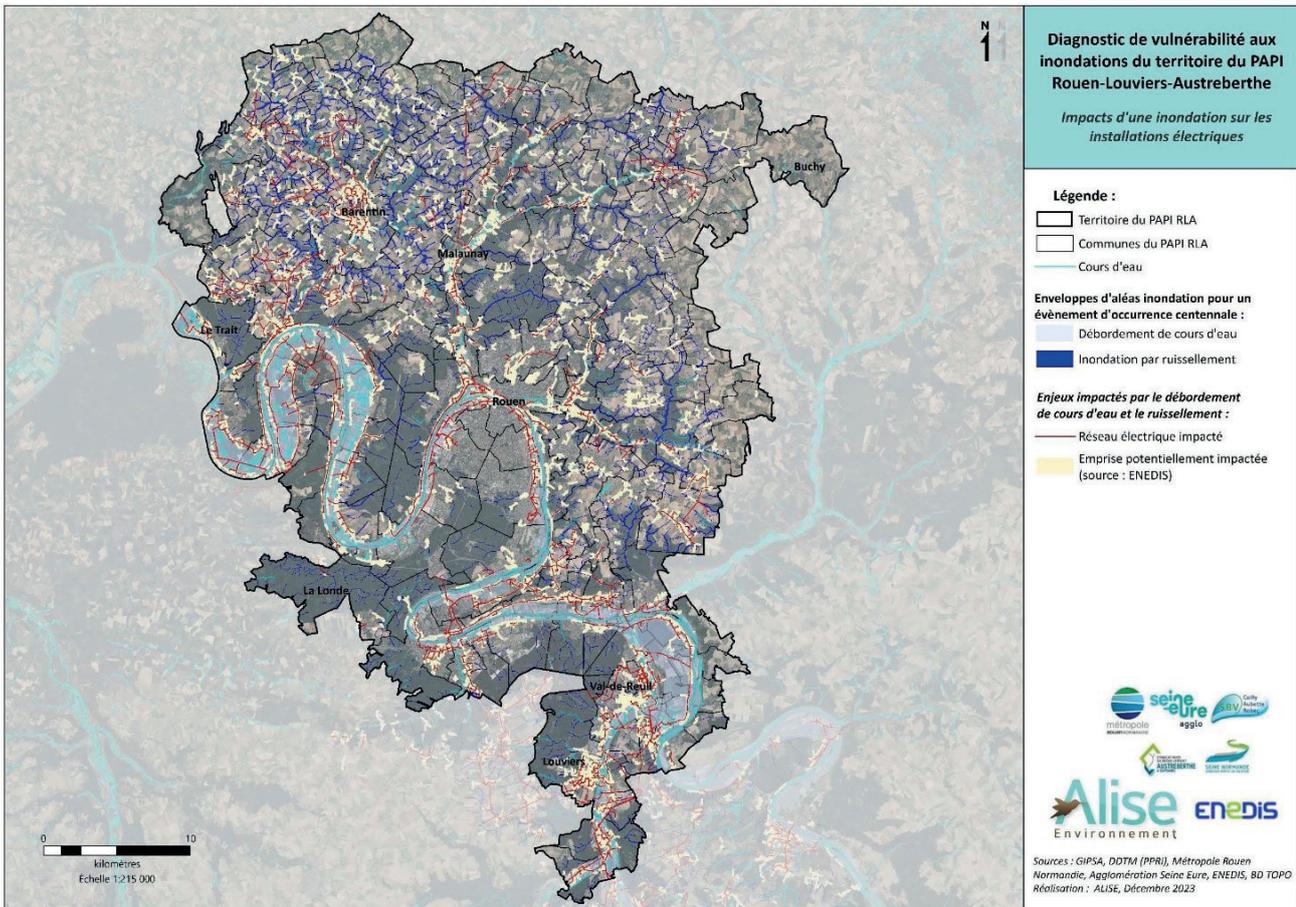


Figure 42 : Exposition des installations électriques au risque d'inondation – Source : ALISE Environnement, 2023, pour le diagnostic du PAPI RLA.

Enfin, l'intégration de « l'effet parc » causé par l'électrification des équipements, et d'un niveau plus élevé de production d'énergie renouvelable intermittente, pourra susciter des interrogations vis-à-vis de la capacité des réseaux à assurer un équilibre entre l'offre et la demande en électricité en permanence. De nos jours, les risques pour le système électrique sont les plus importants lors d'une vague de froid et d'une indisponibilité des réacteurs nucléaires. D'ici 2050, le système électrique sera plus dépendant aux énergies renouvelables et les risques pourraient être plus importants lors de périodes sans vent combiné à une vague de froid sur l'ensemble de l'Europe (RTE, 2021). Néanmoins, le risque d'un black-out généralisé reste très rare car de nombreux leviers existent pour répondre à un déséquilibre entre l'offre et la demande d'électricité : recours à des moyens posts marchés tels que l'interruption de grands sites industriels rémunérés en contrepartie, importations d'électricités d'autres gestionnaires européens, réduction de la tension sur les réseaux de distribution, et délestages ciblés et tournants des consommations non essentielles.

Vulnérabilité des réseaux de distribution du gaz

En 2022, les canalisations classées dans la catégorie des réseaux sensibles représentent 7,7 % du réseau de gaz de la Métropole et sont majoritairement en fonte ductile (SDE, 2017). L'infiltration d'eau semble être le principal problème pour ces réseaux. Pour pallier la corrosion par l'eau, les réseaux sont maintenant fabriqués en polyéthylène haute densité PE100. Mais, de manière générale, tous les types de conduites (basse pression et moyenne pression A, B, C) peuvent encourir un défaut d'étanchéité à la suite d'une rupture ou de fragilisations par une déstabilisation du sol (Ministère de la Transition Écologique, 2020).

Les postes de détente sont également sujets aux inondations. Quand ils sont disposés dans des armoires de rue, les événements sont disposés en hauteur pour ne pas être atteints par l'eau. En revanche, ils sont parfois enterrés et

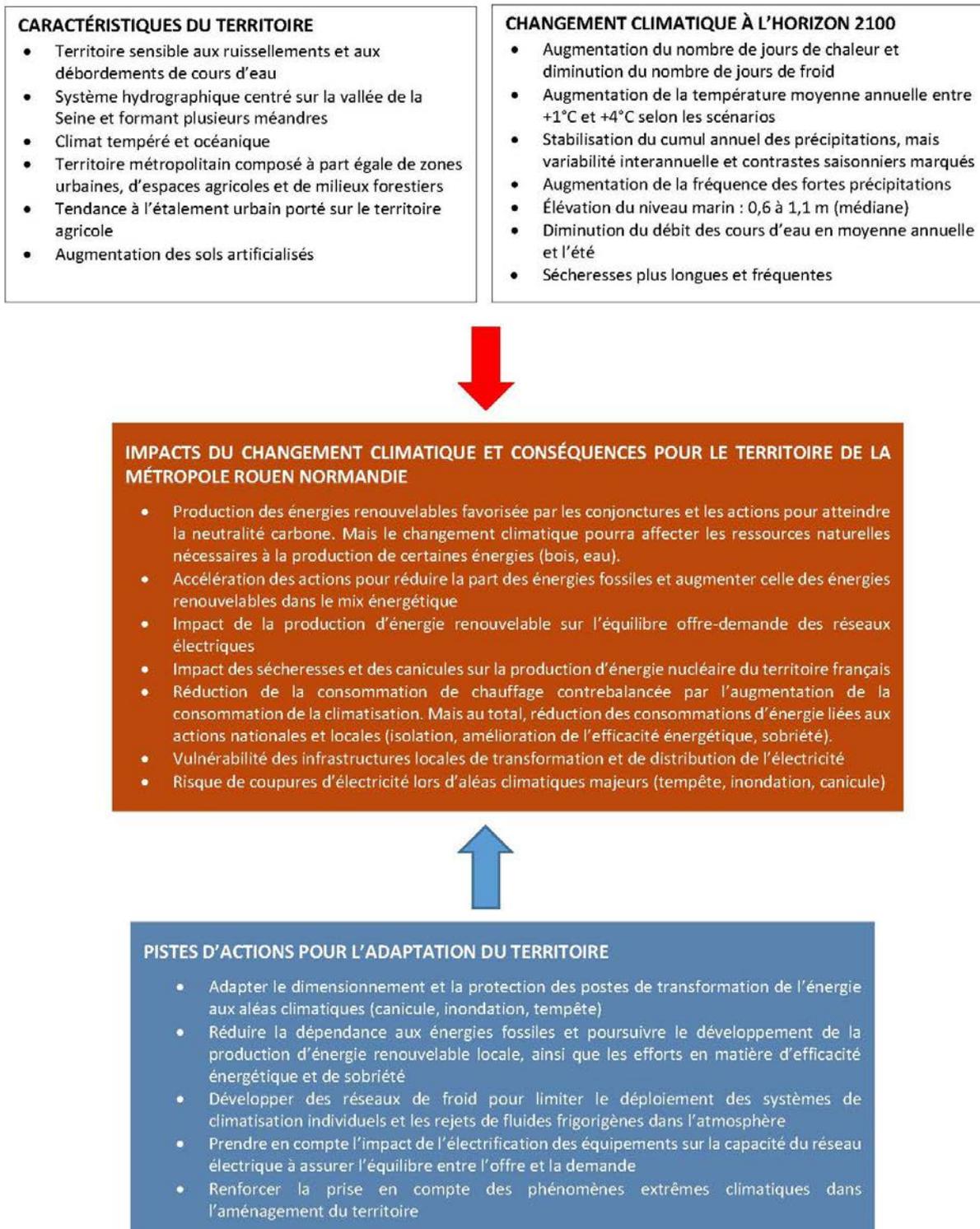
donc plus facilement inondables. Lorsque l'eau atteint les événements, elle entraîne en effet une augmentation de pression. Le risque d'une conséquence désastreuse est limité puisque les installations de sécurité détectent l'augmentation de pression et déclenchent une coupure d'alimentation. Néanmoins une augmentation trop importante de la pression peut provoquer des dommages aux appareils et des inflammations (Ministère de la Transition Écologique, 2020).

Vulnérabilité des réseaux de chaleur

Hormis la localisation des sites de production de chaleur renouvelable (UVE, chaleur fatale industrielle) en zone inondable, aucune étude ne semble mettre en lumière de potentielles vulnérabilités physiques des réseaux de chaleur de la Métropole Rouen Normandie au changement climatique. Les réseaux actuels sont conçus pour être étanches à l'eau et isolés.

Conclusion

Schéma récapitulatif des voies d'impact du changement climatique sur le secteur énergétique local



Bibliographie

- ALISE Environnement (2023). Diagnostic global de vulnérabilité aux inondations du territoire du Programme d'actions de prévention des inondations Rouen-Louviers-Austreberthe (PAPI RLA). Phases 1 et 2. 186 p.
- AcclimaTerra, Le Treut, H. (dir). Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine. Pour agir dans les territoires. Éditions Région Nouvelle-Aquitaine, 2018, 488 p.
- ADEME, CEREOPA, I CARE ENVIRONNEMENT, 2012. Analyse économique de la dépendance de l'agriculture à l'énergie: Evaluation, analyse rétrospective depuis 1990 et scénarios d'évolution à 2020. 86 p.
- ADEME, Denis Bénita, AJBD, David Fayolle. 2018. Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains. 100 pages.
- ADEME, 2020. La climatisation automobile: Impact énergétique et environnemental.
- ADEME, 2021. Rafraîchir des villes: des solutions variées, 80 p.
- AFCE / Citepa, 2022. Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole. Résultats 2020 et estimation provisoire 2021.
- ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013. Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine - Rapport de l'objectif B: Elaboration de scénarios pouvant déclencher les inondations, en combinant différents événements selon leur occurrence. 22p. et annexes.
- ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2014. Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine - Rapport de l'objectif D: Modélisation de la ligne d'eau pour différents scénarios. 35p. et annexes.
- ARTELIA, 2022. Modélisation des inondations en estuaire de la Seine: dynamique et emprise des inondations. Etude réalisée pour le GIP Seine-Aval.
- Ben Othmen M.A., Bruynat M.-P. (2023). Les impacts du changement climatique sur l'agriculture dans la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC Local pour la Métropole Rouen Normandie. 28p.
- Cantat O., Laignel B., Nouaceur Z., Costa S., 2020. Changement climatique et Aléas météorologiques. Rapport GIEC normand, 39 p.
- Cerema. (2018). Enquête Ménages Déplacements 2017 - Principaux résultats - Métropole Rouen Normandie.
- CNRS Le Journal, « Numérique: le grand gâchis énergétique », 16 05 2018. [En ligne]. Available: <https://lejournal.cnrs.fr/articles/numerique-le-grand-gachis-energetique> [Accès le 05 05 2022].
- Cour des comptes, mars 2023. L'adaptation au changement climatique du parc de réacteurs nucléaires, Communication à la commission des finances du Sénat. 116p.
- Dezurarche C., « Futura Planète », 22 08 2019. [En ligne]. Available: <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/energie-renouvelable-rechauffement-climatique-menace-production-energie-solaire-77319/>. [Accès le 05 05 2022].
- Diomard, I., & Chéron, E. (2020). Etat des lieux sur le changement climatique et ses incidences agricoles en région Normandie.
- DREAL Normandie, « Profil environnemental de la Normandie - Le climat en Normandie: présentation et évolution », 2020.
- Fédération Nationale des Communes Forestières (FNCOFOR) (2016). « Plan d'Approvisionnement Territorial (PAT) de la Métropole Rouen Normandie, Programme AMI Bois ».
- Ferreboeuf H. (dir.), Lean ICT: Pour une sobriété numérique, The Shift Project, octobre 2018, 88 p.
- Fisson C., Lemoine J.-P., Gandilhon F., 2014. Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine - Synthèse. Etude réalisée par ARTELIA pour le compte du GIP Seine-Aval, 31p.
- Fréchet C., Tullifer L., Balducci V. (2023). Les pratiques d'urbanisme et l'aménagement du territoire de la Métropole Rouen Normandie à l'épreuve des défis posés par le changement climatique. Rapport du GIEC Local pour la Métropole Rouen Normandie, 44p.
- Gagnepain L. – La climatisation des véhicules industriels et des transports en commun de personnes – Comparatif de la climatisation évaporative par rapport à la climatisation «classique» par compression – Données et Références – Décembre 2005, 6p.
- Gagnepain L. – La climatisation des autobus – Impacts sur la consommation et la pollution – Données et Références – Octobre 2007, 7p.
- IPCC/GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. 34 p.
- Kabra L. S., Arab N., et Fleury F. (2022). Les impacts du changement climatique sur l'architecture dans la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC Local pour la Métropole Rouen Normandie, 32p.
- Kazmierczak L., Laignel B., Charrier F., 2019. La ressource en eau et le risque inondation dans la Métropole rouennaise: constat et analyse prospective dans un contexte de changement climatique. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, 24 p.
- Kazmierczak L., Aubert M., Charrier F., et al. (2020). Les forêts de la Métropole Rouen Normandie face au changement climatique. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, 40 p.
- Laignel B., Nouaceur Z., 2023. Évolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, version actualisée., 32 p.
- Laignel B., Geffroy A., Champion R. La Métropole Rouen Normandie: Territoire d'expérimentation pour la mise en place d'une plateforme numérique sur le multirisque, présentation du 08/08/22.
- Lamotte P., Martin J.-P. « Consommation d'énergie: Les exploitations agricoles consomment majoritairement des produits pétroliers », Agreste Primeur n°311, mai 2014, 4p.
- Lemoine J.-P., 2015. Analyse par modélisation de l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer dans l'estuaire de la Seine, Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 34p.
- Ministère de la Transition Écologique (2020). « Chiffres clés de l'énergie », 2020.
- Peters I. M., et Buonassisi T., The Impact of Global Warming on Silicon PV Energy Yield in 2100, Massachussets Institute of Technology, 2019.
- Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET) de la Métropole Rouen Normandie, 2019.
- Programme Solidarité Eau, « Les services d'eau et d'assainissement face au changement climatique. Quels impacts ? Comment agir ? » 2018, 76 p. [En ligne]. Available: https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ps_eau_les_services_eau_et_assainissement_face_au_changement_climatique_2018.pdf
- Réseau de Transport d'Électricité (RTE), 2021. « Climat et système électrique » in Futurs énergétiques 2050, Chapitre 8. 44p.
- Savary M. (2022). Analyse synthétique des effets du changement climatique sur les mobilités dans la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC Local pour la Métropole Rouen Normandie, 24p.
- Schéma Directeur des Énergies (SDE) de la Métropole Rouen Normandie, 2017.
- Urbanpact, plan d'actions intégré, octobre 2022, 155p.
- Veyrenc T. (2023). Retours sur les Futurs énergétiques 2050. In: Annales des Mines-Responsabilité et environnement. Cairn/Softwin. p. 9-13.

Annexe

Structure de la base de données des secteurs du froid et de la climatisation (AFCE & CITEPA, 2022)

Froid domestique	Réfrigérateur, congélateur, cave à vin, sèche-linge thermodynamique
Froid commercial	Supermarché, hypermarché, petit commerce
Transport frigorifique	Semi-remorque, utilitaire, part des conteneurs réfrigérés au niveau mondial, part des navires réfrigérés
Climatisation à air	Climatiseur portable, split, window, multi-splits, installations centralisées, VRV, roof top, autres équipements de climatisation
Pompes à chaleur réversibles	Air/eau, eau/eau, sol/sol, sol/eau, chauffe-eau thermodynamique
Groupes refroidisseurs à eau	A compresseur centrifuge : - De forte puissance (> 350 kW) - De moyenne puissance (50 à 350 kW) - De faible puissance (< 50 kW)
Froid industriel	Agroalimentaire, procédés chimiques, procédés pharmaceutiques, production de caoutchouc, patinoire
Climatisation automobile	Véhicule particulier, utilitaire léger, véhicule industriel, car et bus, train.

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

Renou B., Boulot R., Kazmierczak L. (2024). Les effets du changement climatique sur le secteur énergétique dans la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC de la Métropole Rouen Normandie, 40 p.

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

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



CONTACT

Léo KAZMIERCZAK - Chargé de projet climat

leo.kazmierczak@metropole-rouen-normandie.fr

Charlotte CÉLESTIN - Responsable de projets PCAET

charlotte.celestin@metropole-rouen-normandie.fr