



E-CUBE

**STRATEGY
CONSULTANTS**

Perspectives de développement des SMR/AMR en France

Rapport commandité par la Société
Française d'Energie Nucléaire (SFEN)

E-CUBE STRATEGY CONSULTANTS

Version 1.1 du 15 mai 2025

Sommaire

1 Synthèse	6
1.1 Contexte, objectifs et périmètre	6
1.1.1 Contexte	6
1.1.2 Objectifs	6
1.1.3 Périmètre	6
1.2 Résultats clés	7
1.2.1 Contexte de décarbonation de la chaleur et de l'électricité dans l'industrie et les réseaux de chaleur urbains	7
1.2.2 Déterminants de l'implantation géographique des SMR/AMR	7
1.2.3 Potentiel technique pour la production de chaleur par les SMR/AMR	8
1.2.4 Potentiel technique pour la production d'électricité par les SMR/AMR	8
2 La décarbonation des consommations de chaleur des grands sites industriels et réseaux de chaleur urbains représente un défi majeur qui mobilisera des solutions multiples	10
2.1 La chaleur consommée dans l'industrie provient pour l'instant principalement de combustibles fossiles	10
2.2 A l'inverse, les réseaux de chaleur présentent un mix énergétique déjà majoritairement décarboné	11
2.3 Atteindre la neutralité carbone pour la chaleur industrielle et le chauffage urbain d'ici 2050 nécessitera un ensemble de solutions	12
3 Les SMR/AMR constituent une des solutions possibles fournir de la chaleur et de l'électricité décarbonée à l'industrie et aux RCU	13
3.1 Les SMR/AMR recouvrent plusieurs familles technologiques, avec des caractéristiques techniques et des niveaux de maturité différents	13
3.1.1 Les réacteurs à eau pressurisée	14
3.1.2 Les réacteurs à eau bouillante et les réacteurs piscine	15
3.1.3 Les réacteurs à haute ou très haute température	16
3.1.4 Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ou au plomb	16
3.1.5 Les réacteurs à sels fondus	17

3.2 Pour la décarbonation de la chaleur chaque concept de SMR/AMR pourrait répondre à certains cas d'usage, notamment en fonction de la température et de la pression en sortie du circuit secondaire	18
3.3 L'implantation géographique des SMR/AMR sera en partie guidée par les besoins locaux, et contrainte par des considérations techniques et d'acceptabilité locale	20
3.3.1 Les besoins locaux en chaleur et en électricité seront parmi les déterminants de la localisation des SMR / AMR	20
3.3.2 Des considérations techniques contraindront les implantations possibles pour chaque technologie	21
3.3.3 L'acceptabilité et la sécurité industrielle joueront également un rôle clé dans la mise en œuvre effective de SMR/AMR	22
4 Plusieurs segments de consommation pourraient utiliser la chaleur des SMR/AMR : le besoin thermique techniquement adressable est supérieur à 100 TWh_{th}	22
4.1 L'industrie est le premier marché potentiel des SMR/AMR avec ~70 TWh_{th} de besoins thermiques techniquement adressables par les SMR/AMR	22
4.1.1 ~80% de l'énergie consommée dans les procédés de chaleur industrielle est techniquement adressable par les réacteurs nucléaires	23
4.1.2 ~70 TWh _{th} /an de consommation de chaleur se concentrent dans des <i>clusters</i> présentant une taille critique justifiant le déploiement de technologie SMR/AMR	24
4.1.3 Le marché de la chaleur industrielle techniquement adressable par les SMR/AMR dans leur ensemble est réparti sur une soixantaine de <i>clusters</i> , majoritairement dans le Nord et l'Est de la France	26
4.1.4 Cependant, les SMR/AMR ne capteront qu'une partie du marché techniquement adressable, pour des raisons techniques, économiques, et de calendrier de décarbonation notamment	26
4.2 Avec des besoins de température entre 60 et 300°C, les réseaux de chaleur représentent un marché techniquement adressable estimé entre 12 TWh_{th} et 33 TWh_{th}/an pour la fourniture de chaleur par SMR/AMR	31
4.2.1 Les réseaux retenus comme techniquement adressables par les SMR/AMR sont ceux n'ayant, à date, pas recours à une solution décarbonée susceptible d'être encore utilisée à horizons 2050	32
4.2.2 Le marché cible des SMR/AMR se concentre sur les « grands » réseaux de chaleur, c'est-à-dire ceux dont la demande est suffisante pour justifier la construction d'un réacteur	33
4.2.3 Les extensions de réseaux existants et développements de nouveaux réseaux accroîtront le marché techniquement adressable par les SMR/AMR	34
4.2.4 Néanmoins, plusieurs facteurs limiteront la part du marché techniquement adressable captée par les SMR/AMR	35

4.3 Les consommations actuelles de chaleur techniquement adressables par les SMR/AMR représentent environ 18 MtCO₂eq directes, principalement sur le segment industrie	36
4.3.1 Les mix de consommation de chaleur de l'industrie et des réseaux de chaleur actuels se traduisent par des émissions totales en 2022 estimées à ~26 MtCO ₂ eq et ~3 MtCO ₂ eq respectivement	36
4.3.2 Les consommations actuelles de chaleur techniquement adressables par les SMR/AMR représentent environ 16 MtCO ₂ eq directes évitées sur le segment industrie et 2 MtCO ₂ eq sur les réseaux de chaleur	36
4.4 L'émergence de nouveaux secteurs consommateurs de chaleur (production d'hydrogène décarboné, CCUS) pourrait représenter une opportunité >10 TWh_{th}/an à horizon 2050	37
4.4.1 La production d'hydrogène par électrolyse haute température pourrait constituer un marché techniquement adressable par les SMR/AMR entre 0,5 et 3 TWh _{th} à horizon 2050	37
4.4.2 Les technologies de capture du carbone pourraient représenter un besoin supplémentaire de chaleur, une opportunité techniquement adressable estimée entre 10 et 15 TWh _{th} à l'horizon 2050	38
5 Les SMR/AMR électrogènes peuvent notamment offrir une réponse à la demande croissante de grands consommateurs	42
6 Une forte augmentation de la consommation d'électricité des grands sites industriels et data centers est attendue dans les années à venir	47
6.1 L'électrification des procédés industriels, combinée à l'augmentation de l'utilisation d'hydrogène décarboné, devrait entraîner une forte croissance de la demande d'électricité dans les grandes zones industrielles actuelles	47
6.2 Les exploitants de data centers manifestent un intérêt croissant pour l'approvisionnement en électricité issue de la production nucléaire	48
6.2.1 Les exploitants de data centers recherchent notamment une électricité compétitive, de qualité, décarbonée et rapidement disponible, dans un contexte de concurrence entre pays à l'échelle continentale voire mondiale	48
6.2.2 Les consommations des data centers en France pourraient atteindre ~29 TWh _e dès 2040, tirées par l'augmentation du nombre de data centers et les besoins grandissants liés à l'IA	50
6.2.3 Les SMR/AMR constituent une solution d'intérêt pour les exploitants de data centers ayant fixé des objectifs ambitieux en matière d'approvisionnement énergétique et de neutralité carbone	50

7 Tous usages confondus, le potentiel identifié de développement des SMR/AMR est principalement situé sur les grandes zones industrielles et à proximité des grands réseaux de chaleur 54

Annexe 1 – Méthodologie de construction des *clusters* 56

Annexe 2 – Liste des *clusters* 56

1 Synthèse

1.1 Contexte, objectifs et périmètre

1.1.1 Contexte

Un grand nombre de sociétés développent des concepts de petits réacteurs modulaires (SMR ou AMR) dans la perspective d'une implantation en France : ainsi, 10 projets de réacteurs à fission sont soutenus par France 2030.

Ces projets conduisent des industriels, des décideurs politiques et le grand public à s'interroger sur le développement à venir de ces réacteurs : nombre, localisation, rôle dans le système énergétique français.

1.1.2 Objectifs

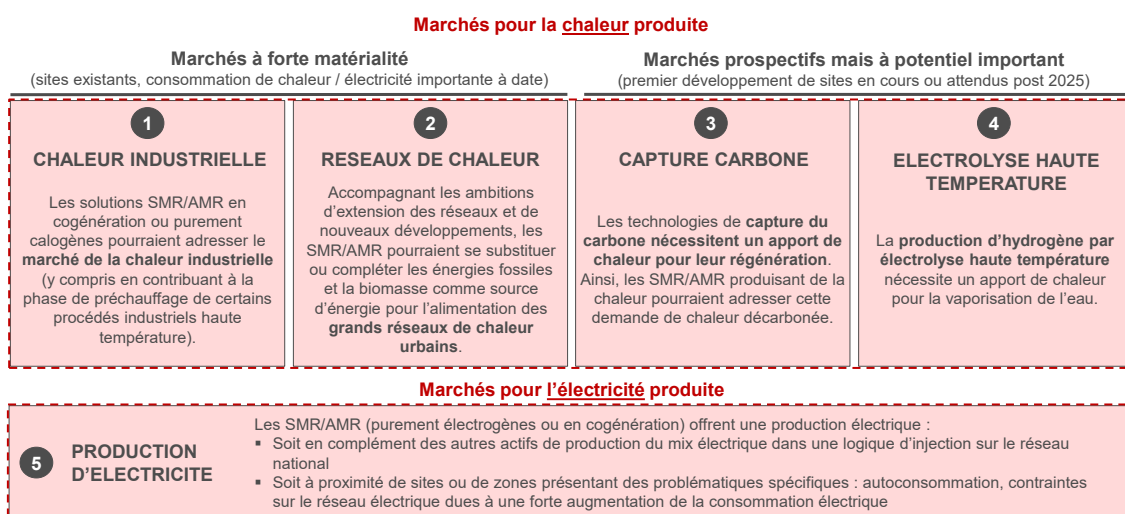
La SFEN a confié à E-CUBE Strategy Consultants le mandat de réaliser une étude qui vise à apporter des éléments de réponse aux deux questions suivantes :

- Quels sont les usages de chaleur et d'électricité décarbonée auxquels les SMR/AMR peuvent répondre en France ?
- Quelles pourraient être les logiques d'implantations géographiques de SMR/AMR envisageables sur le territoire métropolitain ?

Cette étude permet de quantifier le marché « techniquement adressable » par les SMR/AMR (c'est-à-dire les besoins auxquels ils peuvent techniquement répondre). En revanche, elle ne quantifie pas le marché « économiquement adressable » ni « commercialement adressable » par les SMR/AMR, qui dépend notamment de caractéristiques de coût, de prix, de calendrier de décarbonation et d'acceptabilité spécifiques à chaque projet de SMR/AMR. Sur ces sujets, l'étude se limite donc à apporter des éléments de réponse.

1.1.3 Périmètre

Cette étude porte uniquement sur les réacteurs à fission. Les analyses de l'étude concernent les usages suivants :



1.2 Résultats clés

1.2.1 Contexte de décarbonation de la chaleur et de l'électricité dans l'industrie et les réseaux de chaleur urbains

Les SMR/AMR constituent **une des solutions possibles pour fournir de la chaleur et de l'électricité décarbonée à l'industrie et aux réseaux de chaleur urbains (RCU)**. La France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, avec des objectifs intermédiaires pour l'industrie et les réseaux de chaleur.

La chaleur consommée dans l'industrie provient pour l'instant principalement de combustibles fossiles : la consommation d'énergie finale de l'industrie française représente environ 294 TWh_{th} en 2022, dont plus de la moitié sous forme de chaleur. Les combustibles fossiles représentent plus de 50% des consommations. La faible décarbonation de la chaleur concerne la majorité des secteurs industriels, mais la situation varie selon les spécificités des secteurs. **A l'inverse, les réseaux de chaleur urbains présentent un mix énergétique déjà majoritairement décarboné** : en 2022, les réseaux ont livré aux consommateurs 26 TWh_{th} de chaleur, dont 64% issus d'énergies renouvelables et de récupération.

Concernant **l'électricité qui est déjà presque entièrement décarbonée en France**, les SMR/AMR électrogènes pourraient en produire :

- Soit en **complément des autres actifs de production du mix électrique dans une logique d'injection sur le réseau national**, sans viser la proximité de sites fortement consommateurs
- Soit pour **répondre à des problématiques de sites ou des zones spécifiques**

1.2.2 Déterminants de l'implantation géographique des SMR/AMR

Pour la production de chaleur, **l'implantation géographique des SMR/AMR sera prioritairement guidée par les besoins locaux**, et contrainte par des considérations techniques et d'acceptabilité locale. En effet, **la chaleur n'est aujourd'hui généralement transportée que sur quelques kilomètres** (1km à ~25km selon la température de la chaleur livrée). Chaque concept de SMR/AMR pourrait répondre à certains cas d'usage « chaleur » : les applications adaptées à chaque réacteur dépendent **du niveau de puissance et de la plage de température proposés**.

L'implantation des **SMR/AMR pour la production d'électricité est moins déterminée par la proximité aux sites consommateurs**, du fait de l'existence du réseau national de transport. De manière générale, les implantations de SMR/AMR pourraient notamment concerner des sites qui **ont déjà été utilisés pour la production d'électricité** (ex : anciennes centrales thermiques), ou qui **ont déjà accueilli des activités nucléaires**. Pour répondre à des problématiques locales (volonté d'autoconsommation, capacité limitée disponible sur le réseau), les SMR/AMR pourraient être implantés sur ou à proximité de sites industriels ou data centers : ainsi, **il est possible qu'à l'horizon 2035, la construction d'un SMR/AMR soit envisagée comme une solution alternative ou complémentaire lorsqu'un renforcement de réseau est nécessaire**

pour implanter un grand site consommateur sur une zone où la capacité de soutirage disponible est insuffisante. Cependant, il est important de noter qu'un raccordement des SMR/AMR au réseau public de transport d'électricité demeurera nécessaire pour différentes raisons : ainsi, dans la plupart des cas les SMR/AMR pourraient **réduire le besoin du réseau public d'électricité, sans s'y substituer totalement**.

A l'échelle locale, plusieurs **contraintes techniques pourront limiter les implantations possibles**, la nature et l'ampleur de ces contraintes étant variable d'une technologie à l'autre : disponibilité du foncier, accessibilité du réseau électrique, accès à une source d'eau notamment. **L'acceptabilité et la sécurité industrielle** joueront également un rôle clé dans la mise en œuvre effective de SMR/AMR.

Tous usages confondus, le **potentiel de développement identifié des SMR/AMR est principalement situé sur les grandes zones industrielles et à proximité des grands réseaux de chaleur**.

1.2.3 Potentiel technique pour la production de chaleur par les SMR/AMR

Le **besoin thermique techniquement adressable par la chaleur des SMR/AMR est supérieur à 100 TWh_{th} en 2050**¹². L'industrie est le premier marché potentiel pour la chaleur des SMR/AMR avec ~70 TWh_{th} de besoins thermiques techniquement adressables par les SMR/AMR. Ces 70 TWh_{th}/an sont répartis sur environ soixante *clusters* en France. Selon ses caractéristiques spécifiques, chaque technologie pourra répondre à une partie de ces 70 TWh_{th}/an. Les réseaux de chaleur représentent un marché techniquement adressable estimé entre 12 TWh_{th} et 33 TWh_{th}/an.

En réalité, le **marché « économiquement » et « commercialement » adressable est plus réduit**, en raison d'autres contraintes (en particulier la concurrence avec d'autres technologies de décarbonation de la chaleur). Le marché commercialement adressable pourrait varier fortement d'une technologie à l'autre.

Par ailleurs, l'émergence de nouveaux secteurs consommateurs de chaleur (**production d'hydrogène décarboné, CCUS**) pourrait représenter une **opportunité >10 TWh_{th}/an pour les SMR/AMR à horizon 2050**.

1.2.4 Potentiel technique pour la production d'électricité par les SMR/AMR

Dans le scénario N3 de RTE, les SMR/AMR produisent 27 TWh_e par an d'électricité en 2050, ce qui peut correspondre à ~4 GWe de puissance électrique installée³. Leur développement pourrait

¹ Hors changements de procédés et destructions / créations éventuelles de sites industriels

² A titre indicatif, 100 TWh_{th} correspondent à la production de 250 modules de SMR de 50 MW_{th} fonctionnant 8000 heures par an

³ 27 TWh_e d'électricité correspondent à ~4 GWe de puissance électrique installée en supposant ~7000 heures équivalentes fonctionnement pleine puissance

s'accompagner de **contrats d'approvisionnement avec des grands sites consommateurs**⁴ (industriels ou *data centers*), dont une forte augmentation de la consommation est attendue dans les années à venir.

Procédés industriels

L'électrification constitue un levier majeur pour la décarbonation de l'industrie, et devrait entraîner une augmentation significative de la demande en électricité sur certains sites industriels, sous forme :

- **Directe** : selon les estimations de RTE, cette augmentation de consommation dans l'industrie pourrait atteindre entre 10 et 50 TWh_e à l'horizon 2050 par rapport à 2019⁵.
- **Indirecte** : via le remplacement des combustibles fossiles par de l'hydrogène décarboné produit par électrolyse de l'eau, qui pourrait représenter une consommation annuelle de ~50 à ~100 TWh_e d'électricité en 2050.

Data centers

D'après RTE, les consommations des data centers en France pourraient atteindre **~29 TWh_e dès 2040**, tirées par l'augmentation du nombre de data centers et les besoins grandissants liés à l'IA.

Pour les data centers destinés à un usage pour lequel le temps de latence est peu contraignant (ex : stockage de données « froid », entraînement de modèles d'intelligence artificielle), le choix **d'implantation peut se faire à l'échelle du pays, du continent, voire du monde** car le coût de connectivité est relativement peu contraignant. Dans ce contexte, les exploitants de data centers recherchent notamment une **électricité compétitive, de qualité, décarbonée et disponible le plus rapidement disponible**.

Depuis quelques années, les exploitants de data centers étudient différentes pistes pour obtenir des **puissances importantes de production pilotable d'électricité à proximité des data centers**, notamment pour deux raisons :

- Contraintes sur la **capacité de raccordement**
- Fort développement de la production solaire et éolienne augmente les écarts de prix intra-journaliers et **limite l'intérêt économique des PPA renouvelables « as produced »** (en particulier solaires) pour couvrir la production presque constante (baseload) des data centers

Ce contexte explique les **marques d'intérêt de plus en plus importantes envers les SMR/AMR**, au même titre que d'autres solutions parmi lesquelles le nucléaire de grande capacité, la géothermie, la capture de carbone, l'hydrogène décarboné, le stockage longue durée.

⁴ Dans le reste du document, on désigne par « grand consommateur » un site dont la consommation est au moins du même ordre de grandeur que la puissance thermique d'un SMR/AMR (i.e. minimum 1 MW)

⁵ Source : RTE Futurs énergétiques 2050, consommation électrique supplémentaire de l'industrie dans les scénarios « électrification + » et « réindustrialisation » (hors production d'hydrogène).

2 La décarbonation des consommations de chaleur des grands sites industriels et réseaux de chaleur urbains représente un défi majeur qui mobilisera des solutions multiples

2.1 La chaleur consommée dans l'industrie provient pour l'instant principalement de combustibles fossiles

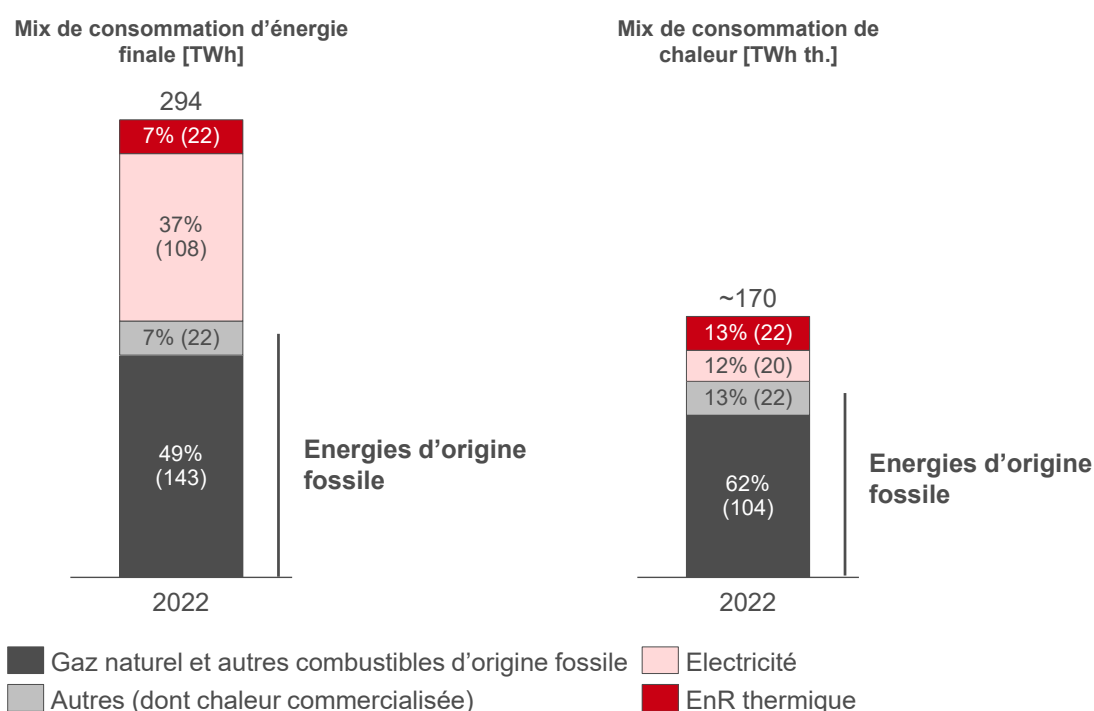


Figure 1 : Mix de consommation d'énergie finale dans l'industrie en 2022, et estimation du mix de consommation de chaleur par énergie⁶⁷

La consommation d'énergie finale de l'industrie française représente environ 294 TWh_{th} en 2022, dont plus de la moitié sous forme de chaleur. Les combustibles fossiles représentent plus de 50% des consommations, le gaz naturel occupant une place prépondérante dans la quasi-totalité des filières industrielles, principalement pour répondre aux besoins de production de chaleur. L'utilisation du charbon, du coke et des produits pétroliers reste quant à elle limitée à des activités

⁶ La chaleur commercialisée désigne l'énergie thermique qui est produite par une entité (comme une centrale de cogénération, une chaufferie industrielle ou un réseau de chaleur) et vendue à des tiers pour répondre à leurs besoins en chauffage, en eau chaude ou en processus industriels. Elle est actuellement principalement d'origine fossile.

⁷ Données réelles 2022 non corrigées du climat (hors récupération de chaleur fatale) issues du Bilan énergétique de la France en 2023 - Données provisoires (SDES). Estimation du mix chaleur fondée sur données INSEE - Les consommations d'énergie dans l'industrie en 2022.

spécifiques, telles que la métallurgie et l'industrie chimique, où ils servent souvent également de matières premières dans les processus de production.

L'électricité, qui représente environ 37% des consommations énergétiques de l'industrie en 2022, bénéficie d'une intensité carbone très faible grâce au parc nucléaire français. Sur les ~108 TWh_{th} d'électricité consommés, ~20 TWh_{th} sont consacrés à la production de chaleur⁸. Enfin, les énergies renouvelables thermiques et les déchets contribuent à moins de 7% de la consommation finale d'énergie du secteur, et ~13% de la consommation de chaleur.

La faible décarbonation de la chaleur concerne la majorité des secteurs industriels, mais la situation varie selon les spécificités des secteurs : par exemple l'industrie de la pâte à papier valorise les co-produits de biomasse générés lors de la fabrication de la pulpe ; ils sont couramment utilisés dans des installations de cogénération, ce qui permet à ce secteur de présenter un mix énergétique de chaleur plus décarboné que la moyenne des secteurs industriels.

2.2 A l'inverse, les réseaux de chaleur présentent un mix énergétique déjà majoritairement décarboné

La France compte environ 950 réseaux de chaleur urbains disposant d'une puissance thermique totale de ~24 GW_{th}. Généralement mises en place par les collectivités, ces infrastructures sont inégalement réparties sur le territoire, la région parisienne concentrant 10 GW_{th} de la capacité thermique (soit ~40% du total).

Mix de consommation d'énergie finale - Chaleur [TWh th.]

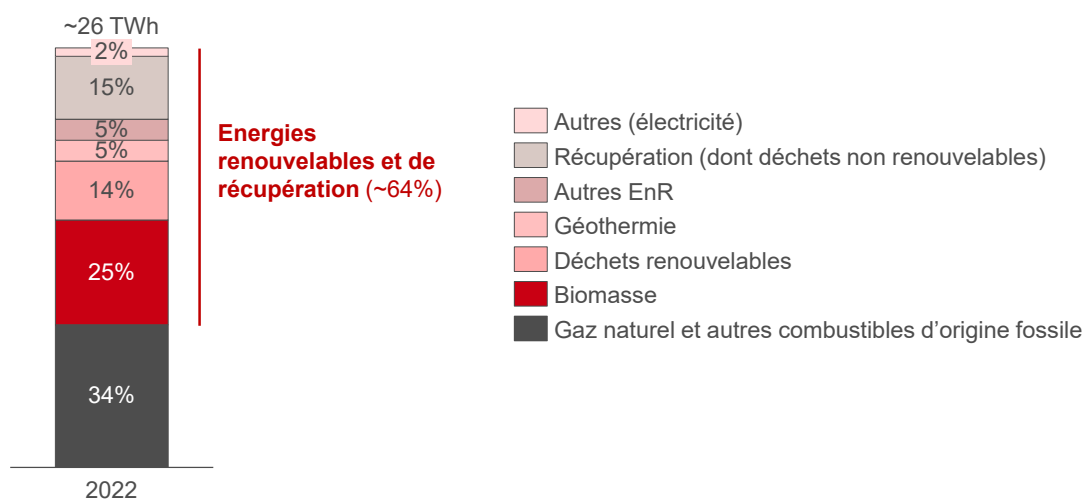


Figure 2 : Mix de consommation d'énergie finale des réseaux de chaleur en 2022⁹

En 2022, les réseaux ont livré aux consommateurs 26 TWh_{th} de chaleur, dont 64% issus d'énergies renouvelables et de récupération : il s'agit en majorité de biomasse et chaleur fatale

⁸ Estimation basée sur les usages thermiques (arcs électriques, résistances, ...) estimés à 18% des consommations électrique (ADEME 2014)

⁹ Données issues du Bilan énergétique de la France pour 2022, Mai 2024.

des unités de valorisation énergétique (incinération de déchets renouvelables et non renouvelables) pour ~55%, et de géothermie et autres sources renouvelables pour ~9%. Le gaz naturel représente un peu plus de 30% du mix.

2.3 Atteindre la neutralité carbone pour la chaleur industrielle et le chauffage urbain d'ici 2050 nécessitera un ensemble de solutions

La France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, avec des objectifs intermédiaires pour l'industrie et les réseaux de chaleur.

Pour l'industrie, cela se traduit par une réduction de -81% des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2050, par rapport aux niveaux de 2015. Ces cibles, inscrites dans le Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), ont été complétées et précisées pour 6 grandes filières industrielles. A la demande du gouvernement, ces industries qui représentent cumulativement ~85% des émissions du secteur ont élaboré des feuilles de route de décarbonation. Ces plans fixent des cibles spécifiques de réduction des émissions, allant de -80% d'ici 2050 pour la production de ciment à -100% (c'est-à-dire la neutralité carbone) pour la sidérurgie. Ces stratégies reposent sur plusieurs leviers majeurs : l'électrification des procédés, l'utilisation accrue des énergies décarbonées thermiques, l'intégration de l'hydrogène bas carbone, le déploiement de technologie de capture carbone et l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Concernant les réseaux de chaleur, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte de 2015 prévoit de multiplier par cinq la quantité de chaleur et de froid renouvelable et de récupération livrée par ces réseaux d'ici 2030, avec une progression continue jusqu'en 2050 pour atteindre la neutralité carbone. Par ailleurs,

Le mix de solutions de fourniture de chaleur qui sera choisi par les acteurs pour atteindre ces objectifs ambitieux dépendra largement de la compétitivité économique des solutions disponibles et adaptées à leur besoin de température. Le rythme de cette décarbonation de la chaleur sera, lui, notamment lié à l'évolution du prix des quotas carbone sur le marché de l'ETS¹⁰.

¹⁰ Emission Trading Scheme

3 Les SMR/AMR constituent une des solutions possibles fournir de la chaleur et de l'électricité décarbonée à l'industrie et aux RCU

3.1 Les SMR/AMR recouvrent plusieurs familles technologiques, avec des caractéristiques techniques et des niveaux de maturité différents

Les SMR/AMR (Small Modular Reactor, Advanced Modular Reactor) sont des réacteurs nucléaires standardisés et industrialisés, avec une fabrication en usine et un assemblage sur site. Ils sont conçus de sorte à limiter les temps de déploiement et sécuriser les coûts de construction.

L'intérêt pour les SMR/AMR est fort : en 2023, l'AIEA identifie plus de 60 designs de SMR/AMR en cours de développement¹¹ par différents types d'acteurs, des grands groupes industriels comme EDF, General Electric Hitachi ou Rolls-Royce aux centres de recherche et aux petites entreprises innovantes. Certains reposent sur des technologies déjà déployées industriellement et commercialement (réacteurs à eau pressurisée de génération III, réacteurs à neutrons rapides au sodium), d'autres sur des technologies qui ont fait l'objet de premiers tests durant les années 1960-70, sans être suivis par un déploiement commercial, notamment du fait d'une baisse générale de l'intérêt pour la filière nucléaire à partir des années 1980 (ex : réacteurs à sels fondus de génération IV).

Pour soutenir cette dynamique, la France s'est dotée d'un cadre de soutien, notamment le programme d'Appel à Projets « Réacteurs nucléaires innovants » opéré par Bpifrance avec le soutien du CEA qui vise à soutenir le développement de réacteurs nucléaires de nouvelle génération en mettant l'accent sur l'innovation technologique, la compétitivité et l'optimisation du cycle des matières et de la gestion des déchets. Le premier volet clôturé en juin 2023 a donné lieu à l'annonce d'une aide de l'Etat à hauteur de 130 millions d'euros¹² et à la sélection de 11 projets lauréats.

Parmi les projets soutenus par France 2030, la plupart sont en cogénération (c'est-à-dire conçus pour produire conjointement chaleur et électricité) : seul Calogena est strictement calogène (c'est-à-dire conçu pour produire uniquement de la chaleur)¹³. Ils couvrent une gamme variée de technologies que l'on peut grouper en 5 grandes filières, selon le mode de refroidissement (fluide caloporteur), le combustible et le modérateur.

¹¹ Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, AIEA, 2024, (68 designs en développement dit « actif », et 83 designs identifiés au total dans la version 2022 du rapport)

¹² 102,21 millions d'euros pour soutenir les 8 premiers lauréats et 27,8 millions d'euros pour les 3 nouveaux projets annoncés en mars 2024

¹³ Outre Calogena, le projet français ARCHEOS développé par le CEA est également exclusivement calogène

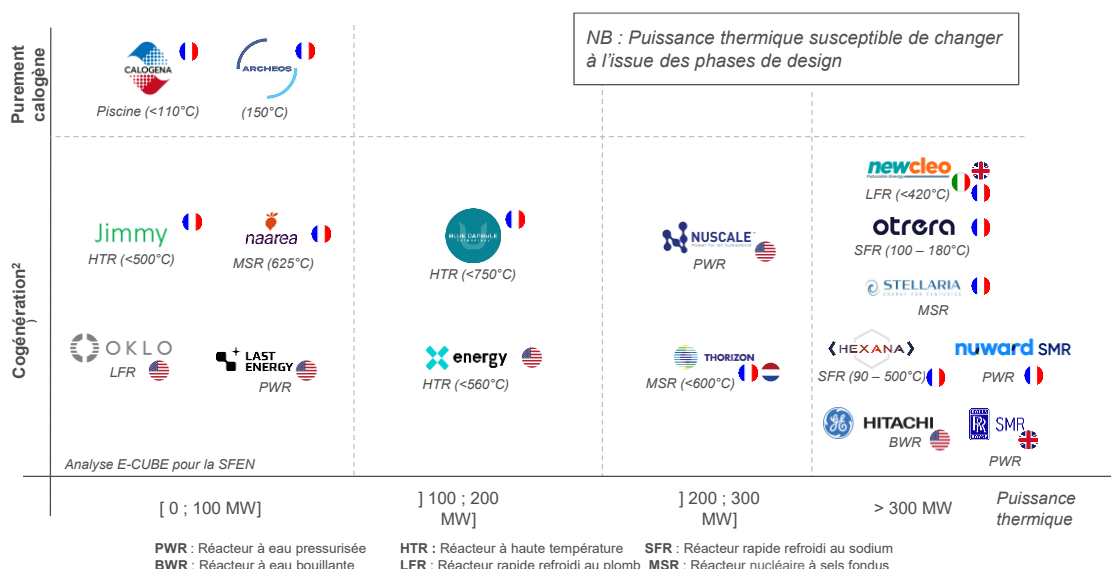


Figure 3 : Sélection de SMR/AMR en cogénération ou purement calogènes (notamment 10 sociétés soutenues par France 2030, ARCHEOS, et échantillon d'acteurs internationaux)¹⁴

3.1.1 Les réacteurs à eau pressurisée

Description générale de la technologie

Les réacteurs à eau pressurisée ou REP (en anglais, PWR - Pressurized Water Reactor) utilisent un combustible enrichi à 3-5% en uranium-235 et de l'eau ordinaire sous haute pression. Cette dernière est utilisée à la fois comme modérateur et caloporteur (fluide de refroidissement). Le cœur du réacteur chauffe l'eau, maintenue à l'état liquide sous haute pression dans un circuit primaire, qui transfère ensuite sa chaleur à un circuit secondaire produisant de la vapeur. Celle-ci peut être dirigée vers une turbine à des fins de production d'électricité et/ou de chaleur.

Maturité et état de développement

Cette technologie est celle de ~60% des centrales nucléaires dans le monde, et l'intégralité des réacteurs commerciaux exploités par EDF en France. Plusieurs sociétés se sont lancées dans le développement de versions à « petite échelle », telles que le français Nuward (groupe EDF), NuScale ou encore Rolls-Royce. Sur les 25 designs recensés par l'AIEA en 2023, 2 sont en phase de construction en Argentine et en Chine. Les autres sont aujourd'hui dans des phases allant de design conceptuel au design détaillé, et plusieurs projets annoncent viser un déploiement autour de 2030.

Caractéristiques techniques (volet thermique)

La taille de ces réacteurs pourrait varier de moins de 100 MWth (Last Energy, ~80 MWth) à plus de 1000 MWth (RR-SMR, ~1350 MWth).

¹⁴ La catégorie « cogénération » regroupe tous les SMR/AMR pour lesquels la cogénération est annoncée ou étudiée, même si la répartition possible chaleur / électricité n'est pas connue à date

Ils sont en capacité de produire de la chaleur à des températures comprises entre 150 et 250-300°C.

Illustration – Cas de Nuward

Le projet NUWARD, porté par le groupe EDF, est une solution française de réacteur nucléaire à eau pressurisée modulaire de petite taille. Avec une puissance électrique d'environ 400 MWe, ce réacteur vise une utilisation en cogénération, initialement dimensionnée jusqu'à ~100 MWth.

En fin d'année 2024, les équipes de NUWARD ont revu leur conception pour optimiser leurs objectifs en termes de performance et de compétitivité. Désormais, l'objectif est de finaliser le « conceptual design » d'ici mi-2026.

3.1.2 Les réacteurs à eau bouillante et les réacteurs piscine

Description générale de la technologie

Ces réacteurs utilisent également de l'eau « légère » comme modérateur et caloporteur. Toutefois, ils diffèrent des réacteurs à eau pressurisée par le fait que l'eau est chauffée directement dans le réacteur. Comme les REP, ils utilisent comme combustible de l'oxyde d'uranium faiblement enrichi.

On en distingue deux types :

- Les réacteurs à eau bouillante ou REB (en anglais BWR, - Boiling Water Reactor), dans lesquels la vapeur est générée directement dans le réacteur
- Les réacteurs « piscine », dans lesquels l'eau est chauffée dans le réacteur sans atteindre l'ébullition

Maturité et état de développement

Initialement développés aux États-Unis (première unité commerciale à Humboldt Bay en 1963), les réacteurs à eau légère à « basse pression » sont aujourd'hui le deuxième type de réacteur le plus répandu dans le monde, avec des réacteurs en fonctionnement aux États-Unis, au Japon, en Allemagne, et Russie notamment.

A date, plusieurs développeurs de SMR ont opté pour des technologies de réacteur à eau légère à « basse pression » : c'est notamment le cas du réacteur « piscine » de Calogena (30 MWth) ou réacteur à eau bouillante de GE Hitachi (870 MWth).

Caractéristiques techniques (volet thermique)

La puissance thermique varie de quelques dizaines de MWth (Calogena) à plusieurs centaines (GE Hitachi). La plupart des REB fonctionnent à une pression de 70 à 80 bars et produisent de la vapeur à une température allant jusqu'à 250-300°C. Les réacteurs « piscine » fonctionnent à plus basse pression (5 bars pour Calogena) et produisent une chaleur basse température (autour de 100°C).

Illustration – Cas de Calogena

Emanation du groupe industriel Gorgé créée en 2021, la société **Calogena** se consacre au développement, à la construction et à l'exploitation de réacteurs nucléaires modulaires calogènes d'une capacité d'environ 30 MWth, destinés à fournir une chaleur décarbonée aux

réseaux de chaleur urbains. La température de sortie serait comprise entre 70 et 110°C. Calogena a soumis son dossier d'autorisation de sûreté (DOS) en novembre 2024 à l'ASNR, marquant une étape critique vers l'autorisation du réacteur Cal-30.

3.1.3 Les réacteurs à haute ou très haute température

Description générale de la technologie

Les réacteurs à haute température (HTR) utilisent de l'hélium comme caloporteur et du graphite comme modérateur. Ils fonctionnent avec de l'uranium enrichi, par exemple sous forme TRISO (TriStructural Isotropic) composées de microbilles d'uranium à moyenne teneur (High-Assay Low-Enriched Uranium) avec un taux d'enrichissement variant entre 5 et 20%.

Maturité et état de développement

Le développement des réacteurs HTR a débuté dans les années 1950 dans le cadre de projets de recherche aux États-Unis, en Allemagne et au Royaume-Uni. Ces premiers réacteurs avaient des puissances comprises entre 40 et 150 MWth et pouvaient atteindre des températures proches de 1000°C. Ces projets initiaux ont jeté les bases des technologies HTR modernes, actuellement en développement en Chine, aux États-Unis et en France.

En Chine, le HTR-PM construit à Shidaowan est entré en service en décembre 2023. Ce démonstrateur est constitué de deux réacteurs, chacun de 250 MWth/105 MWe, utilisant un combustible enrichi à 8,5% et capable de produire une vapeur à 750°C.

Caractéristiques techniques (volet thermique)

Les réacteurs HTR modernes varient en puissance de quelques MW (Jimmy, 10 à 20 MWth) à plusieurs centaines de MW (HTR-PM chinois, 250 MWth par réacteur). Leur technologie permet d'atteindre des températures plus élevées que les réacteurs à eau pressurisée, pouvant être supérieures à 500°C.

Illustration – Développements en France et à l'international

En France, la startup **Jimmy** développe un réacteur de 10 à 20 MWth qui cible le secteur industriel, pour des consommations de chaleur allant jusqu'à 500°C. En 2024, elle a annoncé avoir soumis une demande d'autorisation de création auprès du ministère de la Transition écologique pour un projet de générateur thermique ayant pour objectif de produire de la chaleur sur le site industriel de Cristal Union, acteur européen majeur du secteur sucrier, situé à Bazancourt. Par ailleurs, Jimmy a obtenu début 2025 le Permis de Construire d'un premier bâtiment industriel au Creusot Montceau qui abritera dans un premier temps une boucle d'essais et à terme permettra de stocker, tester et pré-assembler les équipements livrés par les fournisseurs.

Également lauréate de l'AAP France 2030, la société **Blue Capsule** s'appuie sur un mix de deux technologies : le combustible TRISO des réacteurs HTR et le système de transport de la chaleur et certains autres composants des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium. Ce réacteur est dimensionné pour fournir jusqu'à 150 MWth, avec une température de sortie comprise entre 700 et 750°C.

3.1.4 Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ou au plomb

Description générale de la technologie

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) se distinguent des réacteurs conventionnels par l'utilisation de neutrons à haute vitesse (environ 20 000 km/s), permettant d'augmenter l'efficacité des réactions de fission (dans les réacteurs thermiques, les neutrons sont ralentis à environ 2 km/s). Pour transférer la chaleur générée par la fission, plusieurs fluides caloporteurs peuvent être utilisés, dont principalement le sodium (RNR-Na) ou le plomb (RNR-Pb). Ces réacteurs fonctionnent sans modérateur, permettant aux neutrons de conserver une énergie cinétique élevée. Les réacteurs à neutrons rapides se distinguent par leur capacité à exploiter non seulement l'uranium-235, mais aussi l'uranium-238 ou le plutonium-239, tout en valorisant les matières issues du retraitement des combustibles usés. Cette particularité leur permet de maximiser l'utilisation des ressources nucléaires en atteignant la « surgénération », c'est-à-dire une production d'isotopes fissiles supérieure à leur consommation, et de réduire significativement les déchets à longue durée de vie issus du combustible usé des réacteurs à eau légère.

Maturité et état de développement

Parmi les différentes variantes de RNR, seuls les réacteurs refroidis au sodium (RNR-Na) ont atteint un niveau de maturité technologique significatif. Des démonstrateurs, d'abord calogènes puis électrogènes, des réacteurs expérimentaux (Phénix en France, Joyo au Japon) et des réacteurs industriels (Superphénix, tête de série industrielle de 1200 MW électriques ; BN800 en Russie) ont été exploités ou sont toujours en exploitation dans plusieurs pays.

Caractéristiques techniques (volet thermique)

Si la température produite par les RNR diffère selon les designs, elle est généralement comprise entre 400 et 600°C. Les RNR présentent une grande diversité de tailles, allant des réacteurs de quelques mégawatts (Oklo Aurora, ~50 MWth) à plusieurs centaines de mégawatts (HEXANA, 2x400 MWth).

Illustration – Développements en France et à l'international

La société **HEXANA** développe un système à cogénération de réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium intégré, comprenant deux réacteurs modulaires de 400 MWth chacun (capables de fournir de la chaleur à 500°C) et l'équivalent de 300 MW électriques. Ces réacteurs ont la particularité d'être associés à un dispositif de stockage de chaleur (réservoirs de sels fondus) offrant une capacité de découplage entre la production continue des réacteurs et la distribution d'énergie, qui devient flexible et s'adapte aux différents besoins des clients.

Le réacteur d'**Otrera New Energy** utilise également le sodium comme caloporteur. L'OTRERA 300 est un réacteur au sodium à boucle, qui peut fournir 2x110 MWe et 2X180MWth à 100-180°C.

Newcleo développe un réacteur à neutrons rapides basé sur une technologie utilisant le plomb comme fluide caloporteur selon deux configurations, de 90 MWth pour le LFR-AS-30 et 480 MWth pour le LFR-AS-200. Ce dernier pourra être déployé dans des centrales multi-réacteurs comprenant 2, 4 ou même 6 unités selon les besoins et capable de fournir de la chaleur à 500 °C (des activités de R&D sont en cours pour atteindre des températures supérieures à 550 °C).

3.1.5 Les réacteurs à sels fondus

Description générale de la technologie

Les réacteurs à sels fondus (RSF) se distinguent par l'intégration du combustible fissile directement dans le fluide caloporteur (un sel fondu) circulant en continu dans le cœur du

réacteur. Ils sont conçus pour fonctionner à pression atmosphérique, et peuvent se décliner en configurations à neutrons lents ou rapides. Leur technologie permet une fermeture partielle du cycle du combustible, en recyclant certains actinides et en réduisant le volume des déchets radioactifs.

Maturité et état de développement

Le premier réacteur expérimental à sels fondus a été développé dans les années 1960 par le Laboratoire national d'Oak Ridge (7 MWth). Une dizaine de concepts de réacteurs AMR sont actuellement en cours d'étude à l'échelle mondiale, et sont majoritairement en phase de *pre-licensing* à l'heure actuelle, certains ayant dépassé ce stade sur le plan¹⁵. L'alliance de recherche Natura Resources, un consortium incluant trois autres universités, a récemment obtenu un permis de construction pour son nouveau réacteur à sels fondus, le Natura MSR-1, sur le campus de l'Abilene Christian University (ACU).

Caractéristiques techniques (volet thermique)

Les températures de fonctionnement des réacteurs à sels fondus sont comprises entre 500 et 700 °C, ouvrant des possibilités pour des applications thermiques industrielles.

Illustration – Développements en France et à l'international

En France, le réacteur XAMR que développe **Naarea** est un exemple de petit réacteur à sels fondus et à spectre rapide, d'une puissance thermique de 80 MW, capable de produire à la fois de la chaleur et de l'électricité, avec une température de fonctionnement maximale de 625°C. Naarea projette de mettre en service un premier réacteur XAMR dès 2030.

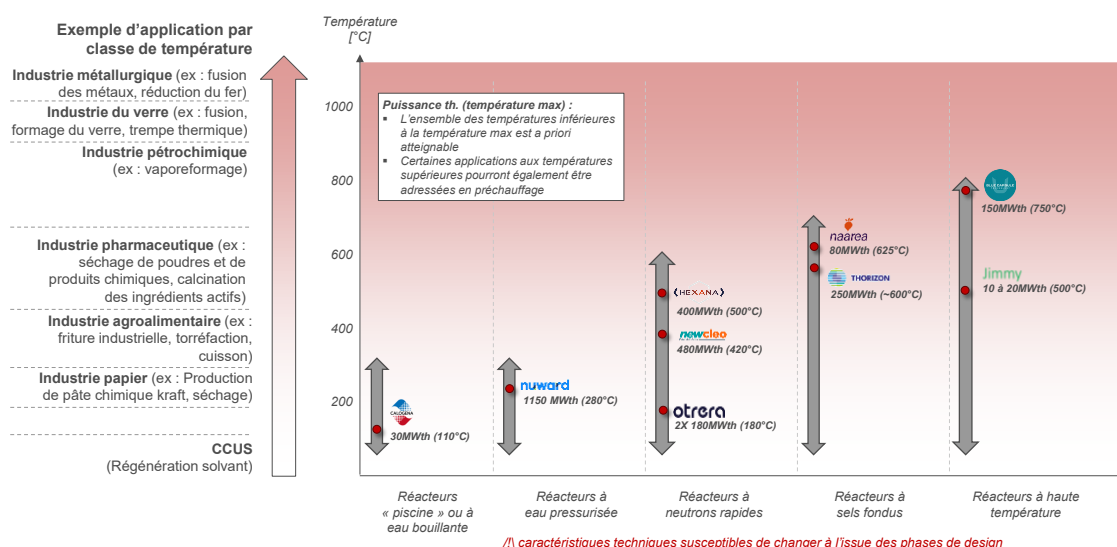
Thorizon développe un réacteur à sels fondus modulable, conçu pour produire 250 MWth en utilisant des cartouches de combustible interchangeables. Prévu pour un premier déploiement en 2032, le projet a entamé en 2024 une *joint preparatory review* auprès des autorités françaises et hollandaises.

Fondée en 2023, la société **Stellaria** est une émanation du CEA. Elle vise à concevoir des réacteurs nucléaires innovants à neutrons rapides utilisant des sels fondus. Ces réacteurs, d'une capacité d'environ 500 MWth ou 250 MWe chacun, sont destinés à produire à la fois de l'électricité et de la chaleur pour les grands industriels et pour injection dans les réseaux publics.

3.2 Pour la décarbonation de la chaleur chaque concept de SMR/AMR pourrait répondre à certains cas d'usage, notamment en fonction de la température et de la pression en sortie du circuit secondaire

Les applications adaptées à chaque réacteur dépendent du niveau de puissance proposé (voir chapitres suivants) et de la plage de température et de pression en sortie du circuit secondaire.

¹⁵ TerraPower a engagé la construction des parties non nucléaires de son SMR MCRE dans le Wyoming en juin 2024, et son permis de construction est en cours de revue par la NRC



Nota : même si la température d'un procédé est supérieure à celle que peut livrer un SMR/AMR, ce dernier peut couvrir une partie de la demande de chaleur (montée en température, par exemple jusqu'à 250°C ou 500°C), une autre technologie assurant le complément pour atteindre une température supérieure

Figure 4 : Plages de température par technologie SMR / AMR

En France, ~50% de la consommation de chaleur industrielle concerne des procédés nécessitant des températures inférieures à 250°C. Sur cette plage, la chaleur est majoritairement utilisée sous forme de vapeur. Il s'agit principalement des secteurs de l'industrie agro-alimentaire, où la vapeur est utilisée pour des procédés de cuisson, de pasteurisation ou encore de stérilisation ; et de l'industrie papier, où la vapeur sert essentiellement aux phases de production et séchage de la pâte à papier. D'autres secteurs industriels nécessitent ces températures pour certaines étapes de production comme l'industrie textile où la vapeur est utilisée pour le lavage, les procédés de teinture et de séchage des fibres, ou encore l'industrie chimique qui consomme de la vapeur pour certaines réactions à basse température.

D'un niveau de maturité commerciale moindre, certaines technologies de capture de carbone dont l'absorption, l'adsorption ou encore la séparation membranaire consomment de la chaleur généralement inférieure à 150°C pour l'étape de régénération des solvants ou des membranes.

A l'industrie s'ajoute la consommation des réseaux de chaleur urbains, dont l'alimentation requiert une chaleur comprise entre 60 et 300°C. La majeure partie du marché se situe en deçà de 200°C, à l'exception de quelques réseaux en région parisienne.

Ces cas d'usages sont donc adressables par la majorité des technologies SMR/AMR. Ils sont naturellement le cœur de cible des réacteurs à eau bouillante et à eau pressurisée, dont la plage de températures adressable est limitée à 250-300°C.

Inversement, certaines industries comme la pétrochimie, l'industrie pharmaceutique ou encore la métallurgie présentent certains besoins de chaleur dépassant largement les 250°C. La vapeur y est également moins utilisée comme vecteur principal, au profit de gaz et autre fluides thermiques. Sur ces applications pouvant aller jusqu'à 750°C, les technologies de réacteur à

haute température ou à neutrons rapides (refroidis au plomb, sodium ou sels fondus) peuvent apporter des solutions de décarbonation. De plus, ces secteurs peuvent également recourir à un couplage technologique, où le SMR apporte une partie de la montée en température, notamment sur la phase de préchauffage (par exemple jusqu'à 250°C ou 500°C), et une autre technologie assure le complément pour atteindre une température supérieure (par exemple des résistances électriques, dont l'approvisionnement pourrait également être assuré par un SMR). A titre d'illustration, le vaporeformage pratiqué par les pétrochimistes nécessite une température pouvant aller au-delà de 800°C. Néanmoins, une part significative de la consommation d'énergie se fait à des températures < 250°C, notamment la vaporisation du naphta (chaleur latente nécessaire pour le changement de phase). De manière similaire, l'électrolyse à haute température nécessite une phase initiale de vaporisation (autour de 150°C), reposant sur des températures très inférieures à celle de la phase d'électrolyse à proprement parler (entre 500 et 900°C).

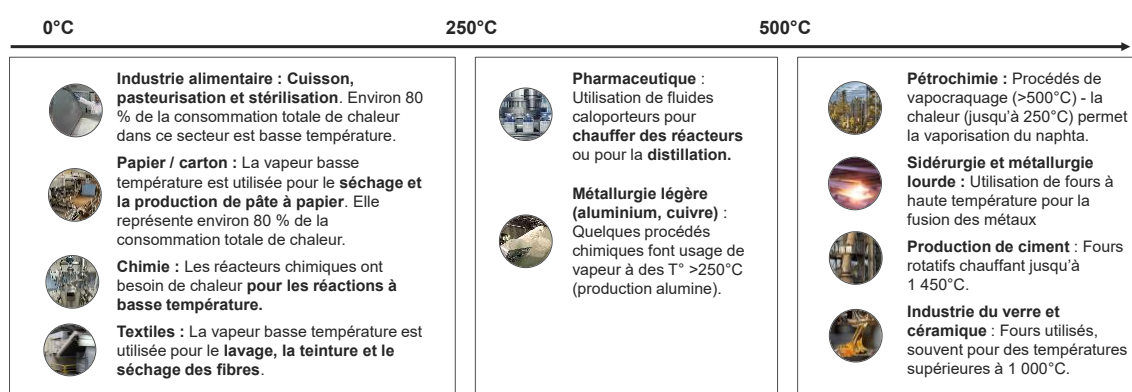


Figure 5 : Exemples de procédés industriels par classe de température

3.3 L'implantation géographique des SMR/AMR sera en partie guidée par les besoins locaux, et contrainte par des considérations techniques et d'acceptabilité locale

3.3.1 Les besoins locaux en chaleur et en électricité seront parmi les déterminants de la localisation des SMR / AMR

Pour la production de chaleur, **l'implantation géographique des SMR/AMR sera prioritairement guidée par les besoins locaux**, et contrainte par des considérations techniques et d'acceptabilité locale. En effet, la **chaleur n'est généralement transportée que sur quelques kilomètres** (aujourd'hui 1km à ~25km selon la température de la chaleur livrée)¹⁶.

L'implantation des **SMR/AMR pour la production d'électricité est moins contrainte par la proximité aux sites consommateurs**, du fait de l'existence du réseau national de transport. De manière générale, les implantations de SMR/AMR pourraient notamment concerner des **sites qui ont déjà été utilisés pour la production d'électricité** (ex : anciennes centrales

¹⁶ Le transport sur plus longue distance est techniquement possible mais les coûts de transport et les pertes peuvent affecter fortement l'économie des projets, notamment en fonction de la température de la vapeur transportée

thermiques), ou qui ont déjà accueilli des activités nucléaires. Pour répondre à des problématiques locales (volonté d'autoconsommation, fonctionnement de SMR/AMR en cogénération, capacité limitée disponible sur le réseau), les SMR/AMR pourraient être implantés sur ou à proximité de sites industriels ou data centers.

Ces motivations sont résumées ci-dessous :

Vecteur énergétique	Principaux déterminants d'implantation géographique de SMR/AMR identifiables à date
Chaleur	- Besoins individuels des sites industriels : - Procédés actuels de l'industrie - Capture de carbone - Electrolyse pour production d'hydrogène décarboné - Besoins des réseaux de chaleur urbains (ou industriels) - Opportunités de mutualisation des besoins industriels et/ou de RCU (groupements existants ou à constituer)
Electricité	Injection sur le réseau : notamment sites qui ont déjà été utilisés pour la production d'électricité (ex : anciennes centrales thermiques), ou qui ont déjà accueilli des activités nucléaires Réponse à des problématiques locales : - Contraintes de capacité de raccordement sur le réseau RTE, liées notamment - A de nouvelles implantations industrielles - A l'électrification de procédés sur des sites industriels existants - A l'implantation de data centers - Opportunités d'autoconsommation (consommateurs cherchant un approvisionnement en électricité bas carbone et constante à un prix stable sur le long terme) - Présence de SMR/AMR fonctionnant en cogénération

3.3.2 Des considérations techniques contraindront les implantations possibles pour chaque technologie

A l'échelle locale, plusieurs contraintes techniques pourront limiter les implantations possibles, la nature et l'ampleur de ces contraintes étant variable d'une technologie à l'autre :

Nature de la contrainte	Détail de la contrainte
Disponibilité du foncier	Disponibilité du foncier nécessaire à l'installation de la centrale (incluant le périmètre de sécurité du site), ainsi qu'à son chantier (phase de construction), respectant l'objectif de non-artificialisation des sols. - Distance entre le site d'implantation de la centrale et le cluster consommateur - Disponibilité d'un foncier (e.g. friche industrielle) de surface suffisante, permettant notamment d'accueillir les dispositifs liés à la sécurité et sûreté physique du site (périmètre de sécurité, gardes, etc.)
Accessibilité du réseau électrique (HTA ou HTB selon technologie)	Faisabilité d'un raccordement au réseau électrique haute tension - Distance au réseau électrique - Disponibilité d'un réseau avec un risque de congestion mesurée - Dans certains cas : redondance (feeders séparés sur plusieurs points de transformation)
Accès à une source d'eau (suivant les technologies)	Accès à l'eau permettant l'alimentation des systèmes de sécurité et refroidissement du réacteur. - Distance entre site d'implantation de la centrale et la source froide (mer, lac, cours d'eau, nappe...) - Débit moyen minimal NB : Certaines technologies reposent sur des systèmes de refroidissement ne nécessitant pas d'accès à une source d'eau froide (ex : aéroréfrigérants en circuit fermé). Par ailleurs, pour les technologies concernées, cette contrainte est d'autant moins forte que la part de l'électricité dans la production est faible (par opposition à la chaleur).
Autres : niveau de sismicité, risque de submersion	Eléments relatifs à la sécurité du site (ex : niveau sismicité selon réglementation spécifique pour les INB, RFS 2001-01).

Tableau 1 : principales contraintes techniques d'implantation pour les SMR/AMR¹⁷

3.3.3 L'acceptabilité et la sécurité industrielle joueront également un rôle clé dans la mise en œuvre effective de SMR/AMR

Comme pour toutes les implantations industrielles, et nucléaires en particulier, l'acceptabilité locale et la compatibilité avec le PPRT¹⁸ influenceront sur le développement effectif de projets de SMR/AMR. Concernant l'acceptabilité locale, une étude conduite par OpinionWay pour le compte de la SFEN est venue rappeler récemment le besoin de mettre en place des structures d'échange entre parties prenantes comme les CLI (Commissions locales d'information).

En raison de leur caractère spécifique à chaque projet et difficile à anticiper, ces aspects ne sont pas traités dans le présent document.

4 Plusieurs segments de consommation pourraient utiliser la chaleur des SMR/AMR : le besoin thermique techniquement adressable est supérieur à 100 TWh_{th}

Caveat : cette partie repose sur une évaluation des besoins de chaleur « à procédés actuels », mais certains procédés industriels pourraient évoluer, notamment du fait de la mise en œuvre de projets de décarbonation et d'électrification. L'opportunité de faire évoluer les procédés dépendra des solutions disponibles pour les décarboner, dont pourront faire partie les SMR.

4.1 L'industrie est le premier marché potentiel des SMR/AMR avec ~70 TWh_{th} de besoins thermiques techniquement adressables par les SMR/AMR

Sur les 170 TWh_{th}/an de chaleur consommée par l'industrie, les réacteurs nucléaires modulaires dans leur ensemble pourraient « techniquement » répondre aux besoins de ~70 TWh_{th}/an de chaleur industrielle : c'est le marché « techniquement adressable ». En réalité, le marché « économiquement » et « commercialement » adressable est plus réduit, en raison d'autres contraintes (en particulier la concurrence avec d'autres technologies de décarbonation de la chaleur). Ces 70 TWh_{th}/an sont répartis sur environ soixante *clusters* en France.

Selon ses caractéristiques spécifiques, chaque technologie ne pourra répondre qu'à une partie de ces 70 TWh_{th}/an. En particulier, leurs propriétés techniques, leur compétitivité économique,

¹⁷ En tant qu'ouvrages "à risque spécial", les futurs projets de SMR/AMR devront faire l'objet d'analyses géologiques et sismiques spécifiques à chaque site. Ainsi, bien que le risque sismique se répartisse de manière inégale sur l'ensemble du territoire français, il n'est pas possible de qualifier *a priori* la compatibilité des sites avec ce critère.

¹⁸ PPRT : plan de prévention des risques technologiques

ainsi que leur maturité et leur calendrier de développement impacteront à la baisse le marché adressable par chaque SMR ou AMR. Ces impacts sont détaillés ci-dessous.

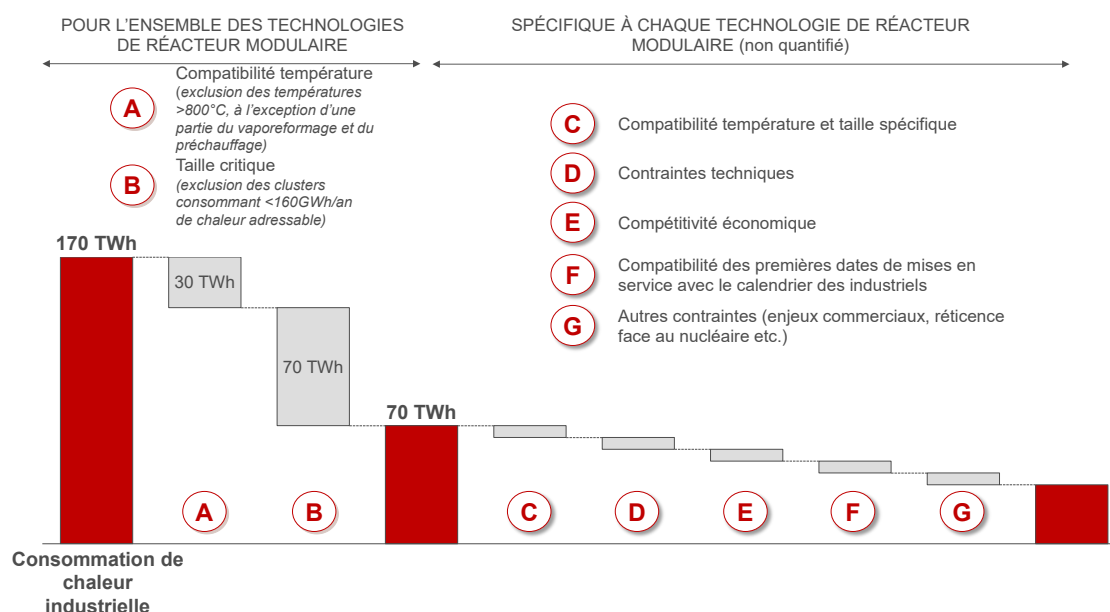


Figure 6 : « Cascade » du marché adressable par les SMR sur le marché chaleur industrielle¹⁹

4.1.1 ~80% de l'énergie consommée dans les procédés de chaleur industrielle est techniquement adressable par les réacteurs nucléaires

Comme détaillé en 3.2, chaque type de réacteur nucléaire modulaire (SMR/AMR) est conçu pour fournir de la chaleur dans une plage de température spécifique. Les réacteurs à eau pressurisée (PWR) et à eau bouillante (BWR) peuvent répondre à des besoins thermiques jusqu'à 250-300°C, tandis que les réacteurs à haute température (HTR) ou à neutrons rapides (FNR) peuvent atteindre des températures autour de 700°C. Chaque technologie est donc compatible avec une partie des besoins des sites industriels, dont les profils de consommation de chaleur diffèrent fortement.

En combinant les plages de température couvertes par les différentes technologies SMR/AMR (y compris en préchauffage), environ 140 TWh_{th}/an sont techniquement adressables par au moins une technologie de SMR/AMR, soit 80% des besoins thermiques de l'industrie. *A contrario*, certains procédés spécifiques, comme ceux nécessitant des fours à très haute température (industrie verrière, métallurgie) ne sont pas adressables par la vapeur des réacteurs nucléaires modulaires calogènes.

¹⁹ Le marché ici présenté est celui de la consommation de chaleur en 2022 en TWh thermiques : les variations possibles sur les décennies à venir (désindustrialisation / réindustrialisation, efficacité énergétique) ne sont pas prises en compte.

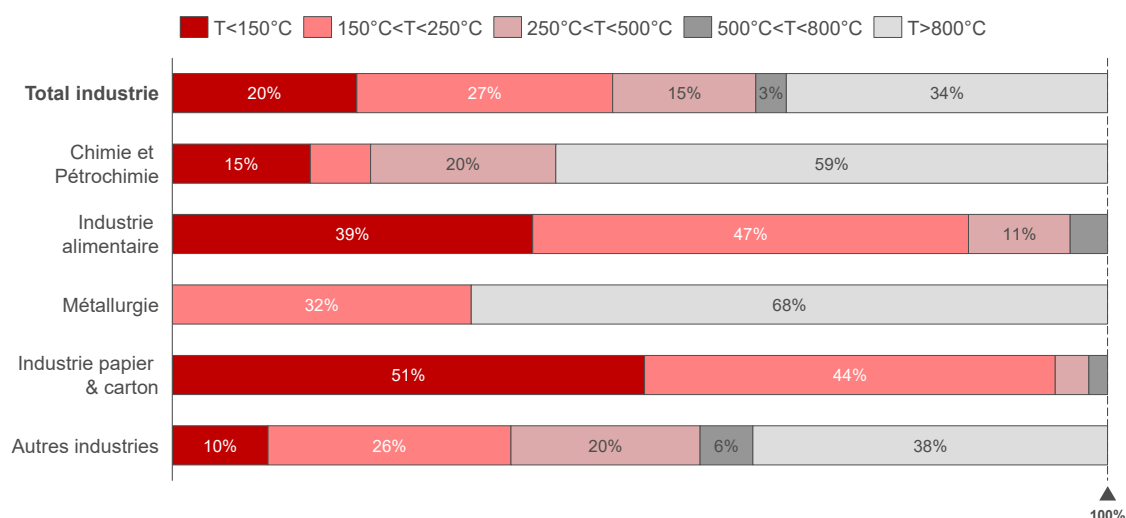


Figure 7 : Estimation de la consommation industrielle de chaleur en France par température de procédé [% de la consommation d'énergie sous forme de chaleur, par segment]²⁰

4.1.2 ~70 TWh_{th}/an de consommation de chaleur se concentrent dans des *clusters*²¹ présentant une taille critique justifiant le déploiement de technologie SMR/AMR

L'économie des SMR/AMR purement calogènes nécessite généralement un taux d'utilisation élevé pour amortir l'important investissement initial sur des volumes de consommation de chaleur les plus élevés possibles. Les installations en cogénération peuvent cependant couvrir des besoins de chaleur plus variables dans le temps, l'énergie non consommée sous forme de chaleur pouvant être valorisée sous forme d'électricité.

Dans les deux cas, étant donné que la chaleur est difficile et coûteuse à transporter, les SMR/AMR dont la chaleur est valorisée devront être installés dans des zones géographiques où ils pourront livrer localement une quantité suffisante de chaleur.

Pour qualifier la taille du marché adressable en fonction de la taille critique des sites, E-CUBE a mené une analyse sur la localisation et la consommation des sites industriels consommateurs de chaleur. Si certains grands sites industriels représentent à eux seuls une consommation correspondant à un ou plusieurs SMR/AMR, des réacteurs pourraient également alimenter plusieurs sites situés dans un rayon limité, formant ainsi un « cluster industriel »²² : dans le cadre de cette étude, nous retenons 20 km comme éloignement maximal entre deux sites alimentés par un même SMR/AMR.

À ce jour, les réacteurs en développement présentent des puissances thermiques variées, allant de quelques mégawatts (MW) à plusieurs centaines de MW par unité. Par ailleurs, certains

²⁰ Estimations basées sur les répartitions de consommation chaleur par classe de températures par industrie de l'ARENA (Renewable energy options for industrial process heat, 2019), de l'IEA (IEA Decarbonizing industrial process heat: the role of biomass) et The European Heat Pump Association

²¹ Un *cluster* industriel correspond à l'agrégation des consommations de chaleur de plusieurs sites industriels dans un rayon de 20km. Voir la méthodologie de création des *clusters* en Annexes

²² Voir méthodologie de construction des « clusters » en Annexe

réacteurs offrent une capacité de modulation de leur production de chaleur, ce qui leur permet de s'adapter à des profils de consommation variables. En effet, de nombreuses industries n'ont pas un profil de consommation de chaleur stable et continue tout au long de l'année. Nous présentons ci-dessous 3 profils types de modulation de la consommation de chaleur : « intra-journalière », « 2x8 », et « saisonnière ».

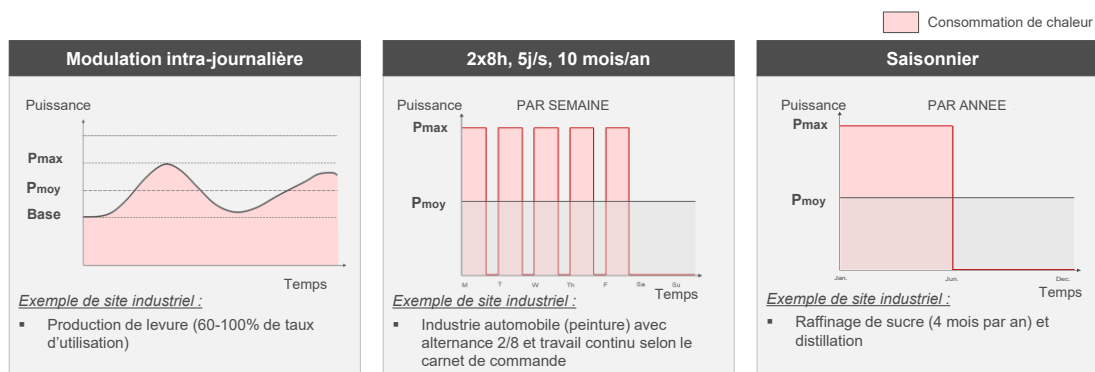


Figure 8 : Exemple de profil de consommation de chaleur dans l'industrie

Ainsi, E-CUBE a retenu un seuil minimal de consommation de chaleur de **~160 GWh_{th}/an**, ce qui correspond à une puissance thermique de 20 MW_{th} utilisée en base continue (avec 90% de disponibilité). En appliquant le seuil de 160 GWh/an, on inclut également des usages plus saisonniers, où le SMR/AMR fonctionnerait à une puissance > 20 MW_{th} sur une partie de l'année.

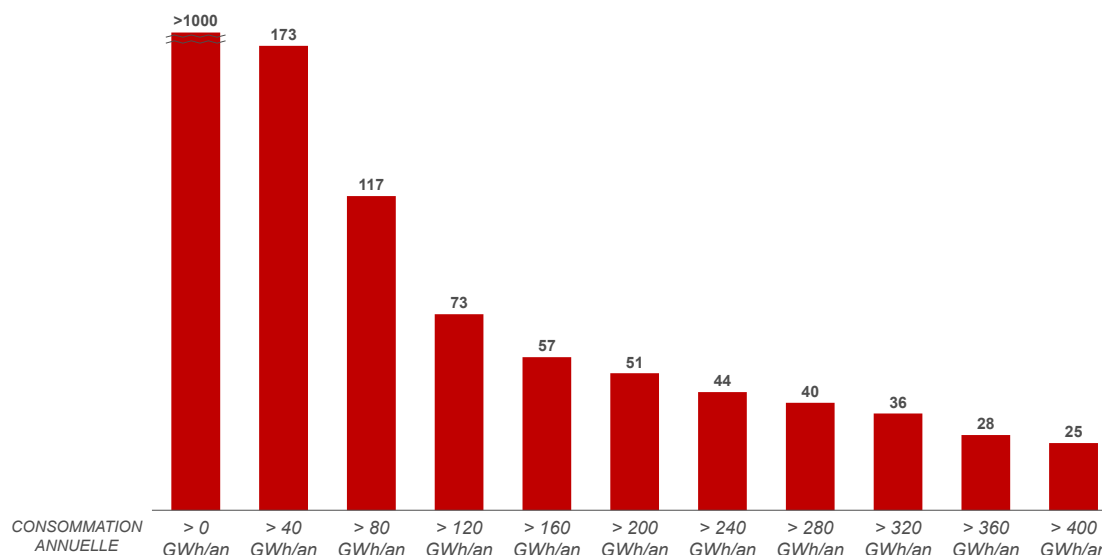


Figure 9 : Nombre de clusters industriels par consommation annuelle adressable par un SMR/AMR en 2022²³

²³ Chiffrage issu du retraitement des données de consommation par points de livraison d'énergie à la maille adresse – années 2022 (SDS)

Notice de lecture : il existe en France 57 clusters dont la consommation est supérieure à 160 GWh_{th}/an.

Ainsi, E-CUBE dénombre 57 clusters industriels présentant une consommation de chaleur dépassant les 160 GWh_{th}/an. Le besoin de chaleur substituable par une source nucléaire et situé dans des *clusters*²¹ industriels justifiant l'implantation d'un réacteur modulaire est estimé à ~70 TWh_{th}/an.

A noter : seules sont ici considérées comme substituables par de la chaleur issue de réacteurs nucléaires les consommations de chaleur provenant actuellement de gaz naturel ou de biomasse. En effet, on suppose que la chaleur produite à partir de CSR (combustible solide de récupération) ou de combustibles minéraux solides (charbon, houille, ...) a peu de chances d'être substituée car elle permet respectivement d'éliminer des déchets produits sur site ou d'utiliser le même produit comme matière première et source de chaleur.

4.1.3 Le marché de la chaleur industrielle techniquement adressable par les SMR/AMR dans leur ensemble est réparti sur une soixantaine de *clusters*, majoritairement dans le Nord et l'Est de la France

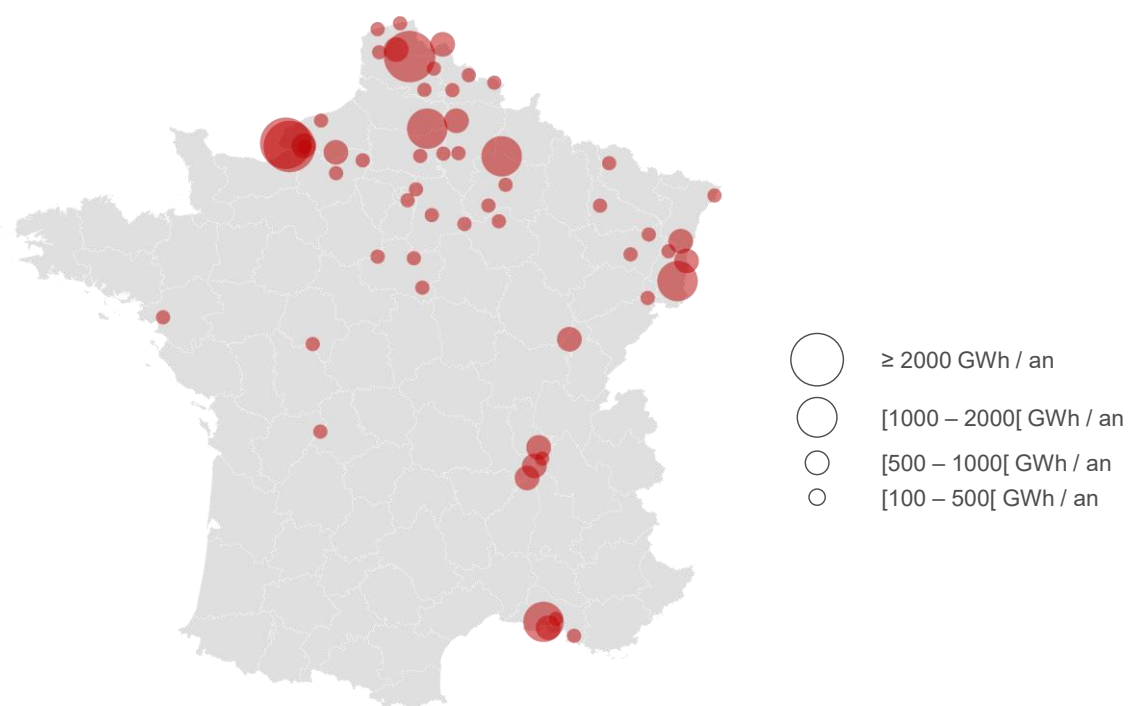


Figure 10 : Carte des *clusters* industriels techniquement adressables par les réacteurs nucléaires modulaires

4.1.4 Cependant, les SMR/AMR ne capteront qu'une partie du marché techniquement adressable, pour des raisons techniques, économiques, et de calendrier de décarbonation notamment

(C) Contrainte de température et taille spécifique par technologie

Tout d'abord, les contraintes de température maximale et de puissance minimale seront plus ou moins fortes selon les technologies. Par exemple, les réacteurs à eau bouillante et à eau pressurisée n'accéderont qu'à la part de ces consommations correspondant à leurs plages de température, soit des températures inférieures à ~250-300°C.

(D) Critères techniques propres à chaque technologie

Chaque design de réacteur peut comporter des contraintes techniques propres, qui limiteront son potentiel de déploiement. Suivant les cas, ces contraintes peuvent comprendre par exemple l'accès à un foncier suffisamment important pour accueillir le réacteur, la proximité d'une source d'eau ayant un débit suffisant pour permettre l'alimentation du circuit de refroidissement, ou encore la disponibilité d'un raccordement au réseau électrique à haute tension, notamment pour les réacteurs en cogénération. Les critères sont listés en 3.3.2.

(E) Critère de compétitivité économique

Sur les sites où un SMR/AMR peut s'implanter techniquement, il fera face à la concurrence d'autres sources de chaleur décarbonée. Le choix des industriels se tournera vers des solutions disponibles et matures, correspondant opérationnellement à son besoin (plage de température, puissance thermique disponible), et économiques. Les 5 principales solutions concurrentes sont la biomasse, le biométhane, le solaire thermique, la pompe à chaleur haute température, et les combustibles solides de récupération.

- La **biomasse** est la solution de production de chaleur renouvelable actuellement la plus développée. Les chaudières biomasse pour l'industrie se sont développées à travers les Appel à Projets BCIAT²⁴ créés en 2009 et financés par le Fonds Chaleur, France relance et France 2030. Entre 2009 et 2022, 245 projets représentant 16 TWh_{th}/an de production en ont été lauréats. La majorité des chaudières biomasse sont développées dans l'industrie agro-alimentaire, ainsi que les industries du bois et granulés, du papier et carton, et la chimie.
- Le **biométhane** est issu de la méthanisation de matières organiques. Il peut être autoconsommé sous forme de chaleur ou d'électricité, ou épuré puis injecté dans le réseau de gaz naturel sous forme de biométhane. Du point de vue du SEQUE (EU-ETS), un consommateur de gaz issu du réseau peut justifier de l'origine renouvelable du gaz consommé par sa chaudière par exemple en signant un contrat d'achat pluriannuel (« Biomethane Purchase Agreement » ou BPA) avec un producteur de biométhane ; d'autres entités comme le GHG Protocol pourraient prochainement reconnaître cette possibilité. En 2023, une capacité de production de 11,8 TWh_{th}/an de biométhane était raccordée au réseau de gaz²⁵ et cette capacité est appelée à poursuivre sa progression.
- Le **solaire thermique** est encore très peu développé en France et représentait en 2022 0,2% de la consommation finale de chaleur, tous secteurs confondus²⁶. Il se divise en deux catégories : les technologies basse température, jusqu'à ~150°C, et les technologies solaires à concentration, pouvant produire de la chaleur de 250 à 1000°C. Dans l'industrie, la première catégorie est adaptée principalement aux procédés de

²⁴ Biomasse Chaleur pour l'Industrie, l'Agriculture et le Tertiaire

²⁵ Panorama des gaz renouvelables en 2023, SER

²⁶ Panorama chaleur renouvelable 2022, ADEME

préchauffage et de séchage. La centrale de 13 MW_{th} inaugurée en 2023 dans une usine de production de lactosérum de Lactalis en est un exemple. Les technologies à concentration sont moins développées en France. Elles sont habituellement utilisées pour produire de l'électricité, mais sont plus récemment envisagées comme une solution de production de chaleur pour l'industrie.

- Si les **pompes à chaleur** aérothermiques sont aujourd'hui répandues dans des maisons individuelles, la technologie de PAC haute température adaptée à des usages industriels est peu mature à date. Quelques acteurs se positionnent sur la chaîne de valeur de la PAC industrielle et installent des premiers démonstrateurs, tels que le Transpac développé par Dalkia et en opération depuis avril 2023 dans une usine papetière de Wepa Greenfield. Ces pompes à chaleur peuvent valoriser de la chaleur de récupération entre 60 et 90°, et produire de la chaleur à 140°C. Elles pourraient notamment être développées dans les industries papetières, agroalimentaires et textiles.
- Les **combustibles solides de récupération** (CSR) sont des déchets non recyclables tels que bois, plastiques, caoutchoucs, papiers, cartons, tissus. Ils constituent une alternative au stockage pour les déchets qui ne peuvent être recyclés, et les chaudières CSR permettent de décarboner le mix de chaleur pour les industriels en remplaçant simplement des chaudières gaz. La FNADE estime qu'à horizon 2050 la filière CSR pourrait atteindre 5 Mt, dont 1 Mt destiné à la décarbonation de l'industrie cimentière²⁷. Cela représente un potentiel de production de chaleur de ~12,5 TWh_{th}.

D'autres solutions moins matures technologiquement existent, notamment l'équipement d'une chaudière gaz avec une technologie de capture du carbone, ou l'usage de l'hydrogène comme combustible. Elles pourraient néanmoins représenter des alternatives crédibles à l'horizon de temps envisagé (2050), bien que conditionnées à la mise en place d'une logistique spécifique d'acheminement des molécules de CO₂ ou d'H₂.

Des chaudières électriques (*e-boilers*) peuvent également être utilisées : leur utilisation est structurellement plus chère que les pompes à chaleur, mais elles permettent d'atteindre un niveau de température supérieur. Leur fonctionnement est notamment envisagé en appoint d'autres systèmes afin de saisir des opportunités aux heures où l'électricité est peu chère sur le marché de gros²⁸.

²⁷ Contribution de la filière déchet au mix énergétique français, FNADE, Décembre 2023

²⁸ Le coût complet présenté en Figure 12 pour la chaudière électrique correspond à une utilisation en base toute l'année

Facteur

de

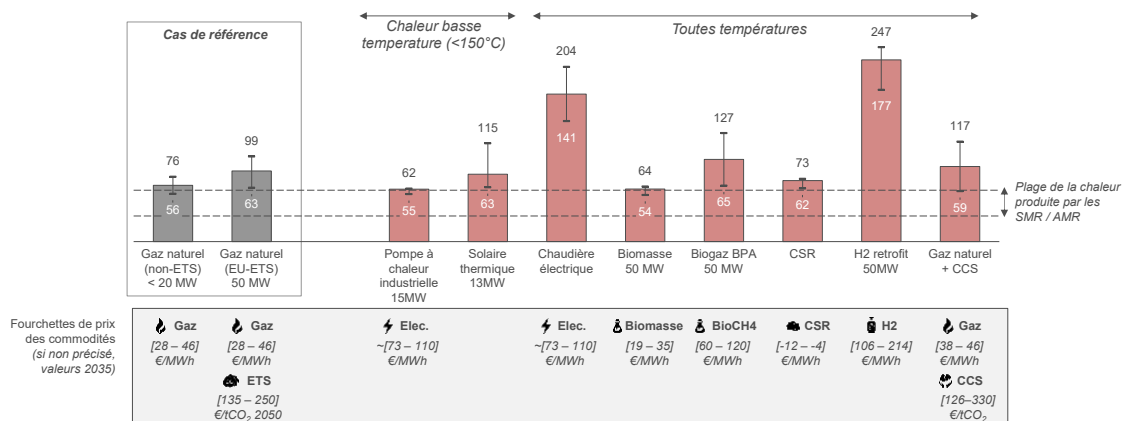


Figure 11 : Coût complet de la chaleur par technologies de production [€/MWh_{th}]

Hypothèses : Calculs E-CUBE fondés sur une revue de littérature des hypothèses de CAPEX / OPEX avec un taux d'actualisation de 10% (hypothèse d'un financement via tiers financement), 2%/an d'inflation, durée de vie des actifs de 20 ans et début de projet en 2035. Coût complet calculés hors allocation de quotas ETS gratuits. Estimation CCS incluant le transport et stockage de CO₂. Coût complet en sortie d'unité de production, n'incluant pas de coût de livraison. Coût complet estimé sans solution de stockage d'électricité ni de chaleur pour les pompes à chaleur et les chaudières électriques.

À ce jour, les données publiques disponibles pour estimer le coût complet de la chaleur produite par un réacteur SMR ou AMR restent limitées : seules certaines indications en ordre de grandeur sont communiquées par les acteurs. Calogena annonce un objectif de coût de ~60 €/MWh_{th}²⁹, tandis que Steady Energy, en collaboration avec Tractebel, vise un coût inférieur à 40 €/MWh_{th}³⁰ (certains porteurs de projets envisageant des coûts encore plus bas).

Le positionnement concurrentiel des SMR/AMR dépendra fortement du prix qu'ils pourront proposer. Pour les applications à basse température, les pompes à chaleur (PAC) apparaissent comme les principaux concurrents, mais leur performance dépend de la disponibilité d'une source de chaleur fatale. Par ailleurs, les PAC et le solaire thermique sont limités en puissance (actuellement ~15 MW_{th}) et en température (140°C)³¹. Il convient de noter que ces valeurs correspondent aux technologies disponibles à ce jour et sont susceptibles d'évoluer à l'avenir : Plusieurs projets annoncent des pompes à chaleur capables de dépasser 30 MW_{th} de puissance, ainsi que des prototypes atteignant des températures supérieures à 140°C. Néanmoins, la présente analyse tient compte des limites actuelles des technologies industrialisées et commercialement disponibles. Dans ce cadre, le solaire thermique à haute température avec concentration n'est pas retenu.

Pour les applications à haute température, les chaudières biomasse représentent une alternative, mais leur déploiement pourrait être limité par la disponibilité des combustibles, en particulier le bois-énergie, et par les contraintes liées à la gestion durable des ressources forestières. L'ADEME³² prévoit entre 47 à 68 TWh_{th}/an de production de chaleur issue de la biomasse pour l'industrie, les réseaux de chaleur et le tertiaire à horizon 2050, dont 25 à 45 TWh_{th}/an pour l'industrie. Cela représente une augmentation modérée pour l'industrie qui consomme déjà

²⁹ Calogena, Décarboner la chaleur urbaine, 2024

³⁰ Révolutionner la production d'énergie. L'avenir de la chaleur propre est là, 2024

³¹ La température et la pression de la vapeur peut cependant être relevée par compression mécanique

³² Biomasse : enjeu stratégique de la transition écologique, ADEME, février 2024

~20 TWh_{th} de chaleur issue de biomasse. Au-delà, la production de chaleur pourrait entrer en concurrence avec les autres usages envisagés pour la biomasse, ou se heurter à l'impératif de gestion durable des ressources.

(F) Compatibilité des calendriers de décarbonation

Les industriels font face à une triple pression — réglementaire, des contreparties et économique — qui façonne leurs calendriers de décarbonation. Sur le plan réglementaire, des mesures comme le système ETS et la loi Climat et Résilience imposent des objectifs ambitieux à horizon 2030 et 2040. Selon la dernière révision de l'EU ETS, le plafond d'émission pour les industries concernées devrait atteindre zéro autour de 2040, conformément à la trajectoire de réduction progressive des quotas alloués. Or pour un certain nombre de sites, les évolutions importantes de l'outil industriel ont lieu à l'occasion de grands arrêts prévus tous les 6 à 8 ans, qui nécessitent parfois des années de préparation : les stratégies pour atteindre une cible 2040 doivent donc être définies dans le courant de la décennie 2030. Simultanément, la pression des contreparties, qu'il s'agisse des clients, consommateurs ou actionnaires, s'intensifie, notamment du fait la mise en place de la taxonomie européenne et de la CSRD. Enfin, la pression économique, entre coûts croissants des émissions et fluctuations des prix de l'énergie fossile, pousse les industriels à accélérer leur transition.

Dans ce contexte, la date de disponibilité industrielle effective des SMR/AMR influera sur le marché qu'ils pourront adresser : plus elle interviendra tard, plus des solutions alternatives de décarbonation auront déjà été mises en œuvre. Cependant, comme la plupart de ces solutions (solaire thermique, pompes à chaleur, chaudières biomasse ou CSR) ont une durée de vie de ~20 ans, les SMR/AMR peuvent également cibler un « deuxième marché » au moment du renouvellement des investissements.

Secteur	Pression réglementaire	Pression des contreparties	Pression économique
Industries du bois et du papier	- Secteurs d'activité soumis à l'ETS - Les sous-secteurs les plus émetteurs ont été contraints de publier une feuille de route de décarbonation, avec l'approbation du gouvernement (ou sont en train de l'élaborer), avec objectif de réduction d'émissions en 2030 par rapport à 2015 : - Mines et métallurgie : -34 % - Chimie : -41% à -49% d'objectif, en fonction de la maturité technologique - Ciment : -24% cible - Papier : -39% cible - De plus, les 50 sites les plus émetteurs sont tenus de construire leur propre feuille de route	- Peu d'exigences de la part des parties prenantes sauf dans des secteurs spécifiques (ex : les industriels de la métallurgie doivent répondre à la demande des constructeurs automobiles pour de l'acier bas carbone) - La pression des actionnaires devrait s'accroître avec l'entrée en vigueur de la taxonomie européenne et de la CSRD	- Exposition à la concurrence internationale atténuée par le lancement du MACF - mécanisme d'ajustement CO₂ aux frontières (Fit for 55) - Secteurs parmi les plus gros consommateurs d'énergie (~2/3 d'origine fossile) - Coût des indemnités ETS
Industries du verre, de la céramique et du béton			
Industries lourdes (raffinerie, chimie, pharmacie, métallurgie)			
Industries agroalimentaires (alimentation, boissons)	- Industries potentiellement soumises à l'ETS en fonction de la taille des sites situés en Europe - Feuille de route de la décarbonation en construction - Industries potentiellement soumises à l'ETS en fonction de la taille des sites situés en Europe	- Secteur principalement B2C avec une forte importance de l'image de marque - Présence d'acteurs « prescripteurs » impliqués dans le RE100 et la SBTi - Impact du changement climatique sur l'agriculture - Sous-secteurs fortement exposés au marché B2C (ex : constructeurs automobiles) - La pression actionnariale devrait s'intensifier avec l'adoption de la taxonomie verte	- Grande variabilité de la part du coût de l'énergie : certains sous-secteurs ont des processus de production énergivores (ex : maltage, poudre de lait) - Coût des quotas ETS - Secteurs exposés à la concurrence extra-européenne avec une forte pression à la réduction des coûts - La concurrence atténuée par le lancement du MACF - Mécanisme d'ajustement CO₂ aux frontières (Fit for 55)
Autres industries manufacturières			

Figure 12 : Illustrations de pressions à la décarbonation dans certaines industries

(G) Autres contraintes impactant le marché commercialement adressable

Le déploiement des solutions SMR/AMR pourrait être limité par plusieurs éléments commerciaux. Parmi ceux-ci, le risque de contrepartie, tant du côté du développeur de la solution SMR, qui

pourrait être jugé insuffisamment robuste financièrement, que du côté du consommateur de chaleur, dont la pérennité d'activité sur la durée de vie du réacteur pourrait être incertaine. En effet, les solutions nucléaires s'amortissent sur une période longue (*a minima* 20 à 30 ans) et nécessitent donc des engagements à long terme. Cette nécessité de visibilité sur la durée pourrait restreindre le nombre de clients adressables, en particulier pour des industriels dont l'horizon d'investissement est plus court ou dont les modèles économiques ne permettent pas de s'engager sur de longues périodes. Autre facteur : les risques de retard dans le déploiement et la capacité limitée à s'engager sur des volumes de chaleur à long terme. Par ailleurs, bien que l'énergie nucléaire puisse susciter des réticences, cet argument semble avoir un impact limité parmi les industriels en France, où l'opinion publique opposée au nucléaire était estimée à environ 12% en 2022 (contre 46% favorable et 40% hésitante), selon l'ASNR ; il est par ailleurs plausible que l'acceptabilité soit plus forte à proximité de certains sites nucléaires existants. En outre, certains industriels français considèrent déjà les SMR comme une solution décarbonée viable pour leurs besoins en chaleur : par exemple, Cristal Union a lancé une étude de faisabilité pour l'implantation d'un réacteur Jimmy pour alimenter en chaleur sa distillerie et sucrerie de Bazancourt dans la Marne.

4.2 Avec des besoins de température entre 60 et 300°C, les réseaux de chaleur représentent un marché techniquement adressable estimé entre 12 TWh_{th} et 33 TWh_{th}/an pour la fourniture de chaleur par SMR/AMR

Le marché techniquement adressable des réseaux de chaleur urbains (RCU) en France, pour les SMR/AMR, est estimé entre 12 TWh_{th}/an, potentiel technique à date, et 33 TWh_{th}, en tenant compte d'un scénario de développement des réseaux. Le besoin de chaleur se situant entre 60 et 300°C, l'ensemble des plages de température sont adressable par au moins une technologie de SMR/AMR. Comme pour les usages industriels, le marché adressable pourra varier fortement d'une technologie à l'autre, selon la compétitivité économique et d'autres critères commerciaux.

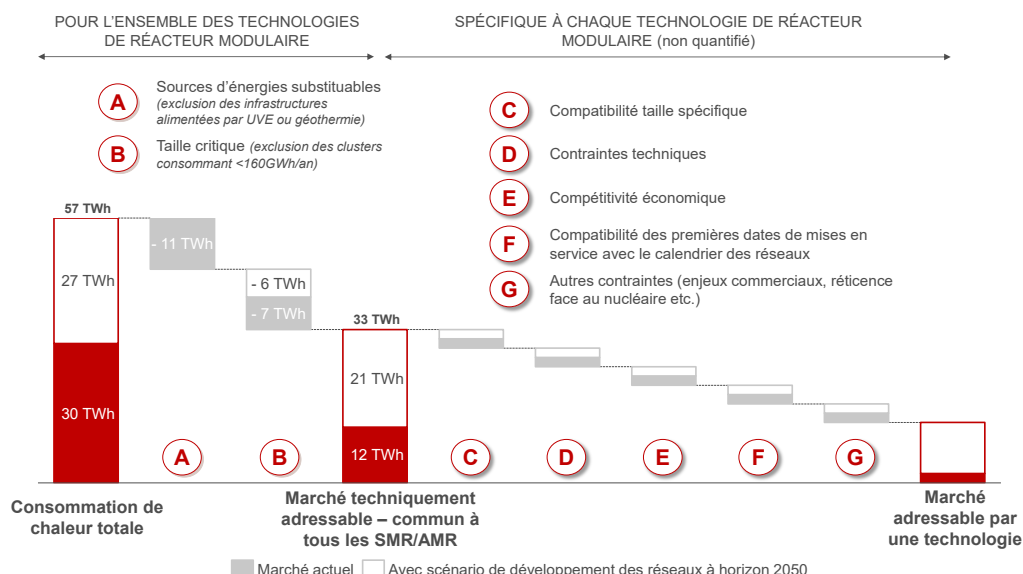


Figure 13 : « Cascade » du marché adressable par les SMR sur le marché RCU³³

4.2.1 Les réseaux retenus comme techniquement adressables par les SMR/AMR sont ceux n'ayant, à date, pas recours à une solution décarbonée susceptible d'être encore utilisée à horizons 2050

Afin d'estimer le marché techniquement adressable, il est pertinent d'exclure les réseaux dont une part importante de la chaleur provient d'ores et déjà d'une source de chaleur décarbonée ayant une longue durée de vie.

La durée de vie moyenne d'une chaudière biomasse est d'environ 20 ans. Ainsi, on peut supposer les RCU alimentés par des installations à la biomasse depuis les années 2010 réévalueront ce choix technologique à l'horizon 2030. Ces réseaux sont donc inclus dans le marché adressable des SMR/AMR.

À l'inverse, une part importante des RCU est aujourd'hui alimentée par des « unités de valorisation énergétique » (UVE) qui récupèrent la chaleur issue de la combustion de déchets, et ne sont *a priori* pas appelées à disparaître à l'horizon 2030 ou 2050. Bien que les volumes incinérés à l'avenir soient incertains du fait des collectes de biodéchets et des incitations à augmenter le recyclage, la part des réseaux alimentés par ce type d'installation a été écartée du marché techniquement adressable.

De manière similaire, les installations géothermiques, qui alimentent une quarantaine de réseaux pour un total de 1,7 TWh_{th}/an, présentent une durée de vie supérieure à 60 ans. Ces infrastructures étant peu susceptibles d'être remplacées à court ou moyen terme, elles ont également été retirées du marché techniquement adressable par les SMR/AMR.

Ce premier filtre sur la source d'énergie réduit le marché adressable de 30 TWh_{th} à 19 TWh_{th}³⁴.

³³ Différence avec les données en partie 2.2 liée à correction climatique. Estimations basées sur données SDES

³⁴ Consommation de chaleur corrigée du climat

4.2.2 Le marché cible des SMR/AMR se concentre sur les « grands » réseaux de chaleur, c'est-à-dire ceux dont la demande est suffisante pour justifier la construction d'un réacteur

La France compte de nombreux petits réseaux de chaleur, dont la demande énergétique est *a priori* insuffisante pour justifier l'utilisation de SMR : ~80% des réseaux ont une puissance thermique installée inférieure à 10 MW_{th}. Or, ces réseaux de chaleur urbains sont dimensionnés pour répondre aux besoins des consommateurs raccordés, notamment pendant les périodes hivernales. Contrairement au secteur industriel, la consommation de chaleur dans les réseaux urbains varie très fortement entre l'été et l'hiver, avec un facteur de charge moyen annuel généralement autour de 40%. On considère que le marché cible pour les SMR/AMR se concentre donc principalement sur les grands réseaux, avec une puissance thermique installée supérieure à 45 MW_{th}³⁵.

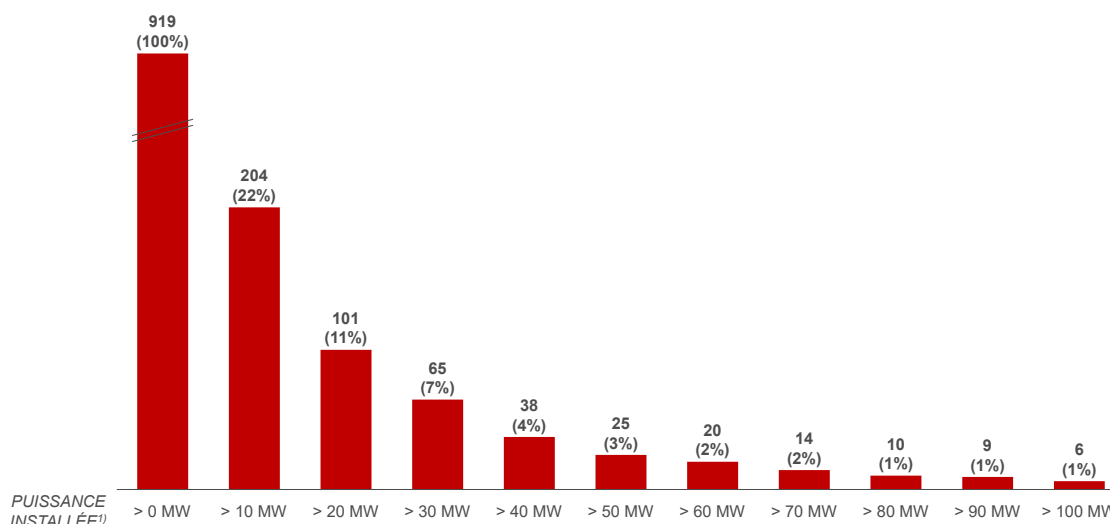


Figure 14 : Nombre de réseaux de chaleur par puissance installée en 2022

1) Puissance installée déduite des consommations annuelles de chaleur avec 40% de facteur de charge

Notice de lecture : il existe en France 25 réseaux de chaleur de puissance installée supérieure à 50MW_{th}.

De la même manière que pour l'industrie, un SMR/AMR peut fournir de la chaleur pour plusieurs réseaux de chaleur à proximité, qui forment un *cluster*³⁶. E-CUBE a retenu, pour son estimation du marché techniquement adressable, les *clusters* de réseaux présentant une consommation de chaleur supérieure à 160 GWh_{th} par an, soit des réseaux avec *a minima* 20 MW_{th} de puissance moyenne sur l'année.

La sélection de ces réseaux conduit à un marché techniquement adressable par les SMR/AMR de ~12 TWh_{th}/an, réparti sur 20 clusters de réseaux de chaleur.

³⁵ Correspond à la consommation d'une puissance moyenne de 20MW_{th} sur l'année.

³⁶ Sur un critère de 45km de diamètre (distance max SMR/AMR-RCU : 22,5 km), en excluant les réseaux de consommation annuelle <25 GWh. Pour le détail de la méthodologie de formation des clusters, voir Annexe 1.

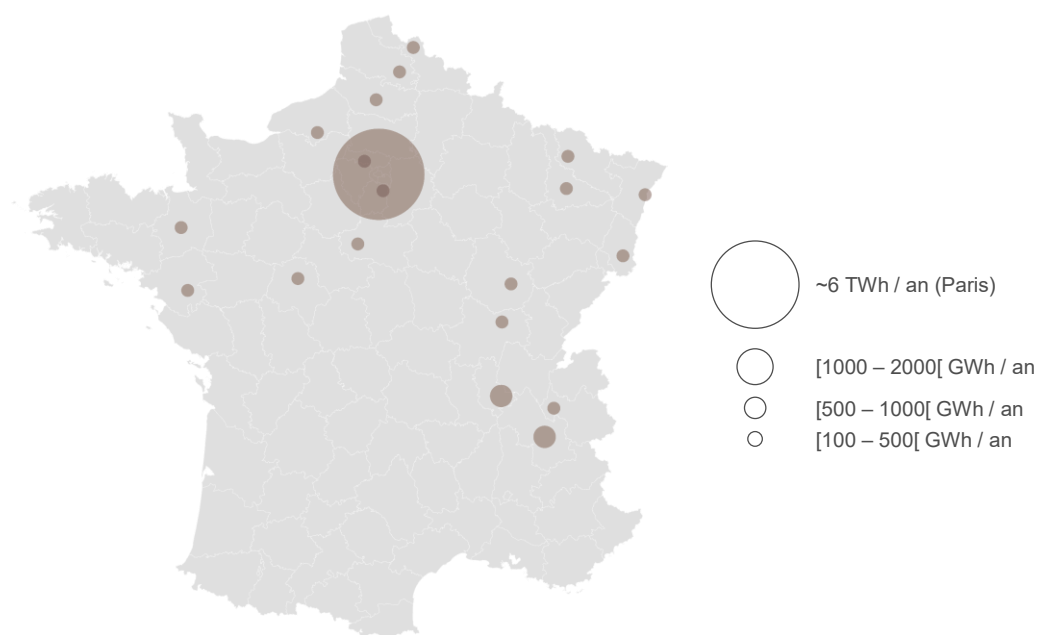


Figure 15 : Carte des *clusters* de réseaux de chaleur existants techniquement adressables par les SMR/AMR

4.2.3 Les extensions de réseaux existants et développements de nouveaux réseaux accroîtront le marché techniquement adressable par les SMR/AMR

La France s'est fixé des objectifs ambitieux de développement des RCU. La PPE 3 en cours de consultation prévoit ainsi 90 TWh_{th} de chaleur livrée par réseaux de chaleur en 2035 (à comparer à 26 TWh_{th} en 2022). Un scénario plus conservateur est retenu dans la présente étude, considérant une croissance de 2%/an³⁷ de la consommation par réseau de chaleur. Les volumes distribués devraient augmenter d'ici 2050 par extension des réseaux existants (+18 TWh_{th}) et création de nouveaux réseaux (+9 TWh_{th}), faisant passer la quantité d'énergie livrée par les RCU de 30 TWh_{th} en 2022 à 57 TWh_{th} en 2050.

³⁷ Taux de croissance moyen de la consommation des réseaux de chaleur dans le scénario S3 "Transitions 2050" ADEME

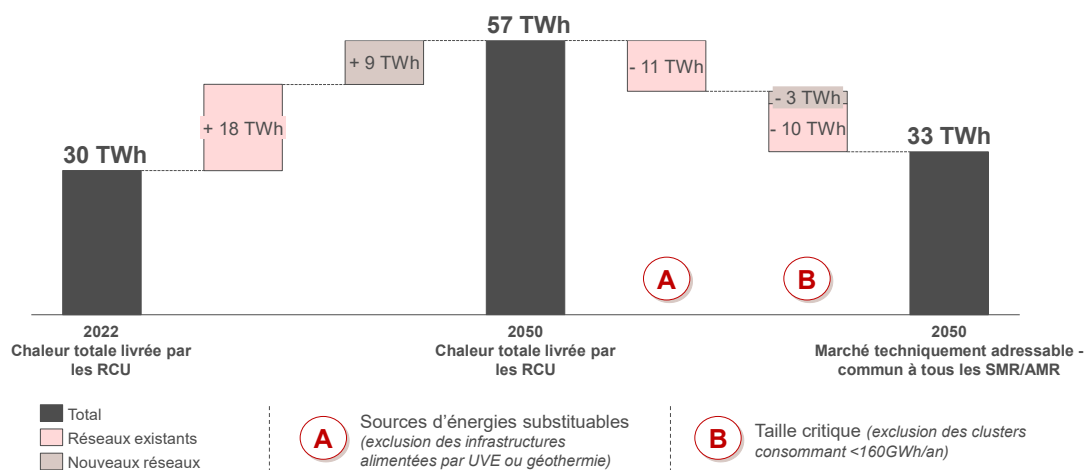


Figure 16 : Marché des réseaux de chaleur techniquement adressable par les SMR/AMR en 2050, en TWh_{th} thermiques/an de chaleur livrée

Ces ambitions de développement des réseaux de chaleur devraient significativement accroître le nombre de ces infrastructures ainsi que leur taille. Cette dynamique favorise largement la croissance de la taille du marché adressable par les SMR/AMR.

E-CUBE évalue à ~33 TWh_{th} le marché techniquement adressable en tenant compte d'une croissance des réseaux. L'extension des réseaux existants est supposée proportionnellement répartie sur ces derniers, ce qui permet à certains *clusters* actuellement « trop petits » d'atteindre la taille critique justifiant l'implantation d'un réacteur nucléaire. En 2050, la répartition de la production de chaleur par taille de cluster est supposée égale pour les réseaux existants et pour les nouveaux réseaux.

Par ailleurs, une croissance des réseaux de froid pourrait s'accompagner d'une croissance de la demande de chaleur afin d'alimenter des groupes de production de froid par absorption (compression thermique à travers un fluide intermédiaire comme le bromure de lithium ou l'eau-ammoniac). Néanmoins, ces technologies sont peu utilisées aujourd'hui par rapport aux technologies à compression (moins de 5% du froid produit dans les réseaux de froid urbains français en 2023 selon la FEDENE).

4.2.4 Néanmoins, plusieurs facteurs limiteront la part du marché techniquement adressable captée par les SMR/AMR

Un certain nombre de facteurs impacteront la capacité des SMR/AMR à capter une part du marché. Tout comme dans l'industrie, les contraintes techniques, économiques et commerciales favoriseront ou freineront le déploiement de ces technologies sur le territoire français. Premièrement, les SMR/AMR devront faire face à la concurrence des solutions alternatives (voir partie 4.1.4).

De plus, le profil de charge des réseaux de chaleur urbains, très marqué par des variations saisonnières, impose aux SMR/AMR une capacité à moduler leur production de chaleur. Cela implique

- Soit d'accepter une utilisation faible en dehors des pics de demande, ce qui dégrade l'économie du projet
- Soit de sous-dimensionner les SMR/AMR pour maximiser leur utilisation, mais cela nécessiterait des moyens de production d'appoint pour répondre aux besoins durant les périodes de forte demande
- Soit de rendre la production flexible, par exemple en convertissant la chaleur non utilisée en électricité

L'effet réglementaire joue également un rôle clé. La loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) fixe l'objectif d'une multiplication par 5 de production de chaleur issue d'énergie renouvelable et de récupération (EnR&R) en 2030 par rapport à 2012, correspondant à 39,5 TWh_{th} en 2030. La Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE), actuellement en consultation, fixe des objectifs de 75% de taux d'EnR&R dans les réseaux en 2030 puis de 80% en 2050. Ces objectifs sont axés sur des taux de pénétration d'énergies renouvelables et de récupération, et leur extension aux technologies décarbonées comme les SMR/AMR est incertaine. La manière dont ces technologies seront considérées dans le cadre des stratégies de transition énergétique influencera directement leur potentiel de déploiement.

4.3 Les consommations actuelles de chaleur techniquement adressables par les SMR/AMR représentent environ 18 MtCO₂eq directes, principalement sur le segment industrie

4.3.1 Les mix de consommation de chaleur de l'industrie et des réseaux de chaleur actuels se traduisent par des émissions totales en 2022 estimées à ~26 MtCO₂eq et ~3 MtCO₂eq respectivement

En 2022, la consommation de chaleur dans l'industrie a atteint un total de 170 TWh_{th} (soit ~58% de la consommation finale d'énergie par l'industrie). On estime que la production de cette chaleur industrielle est responsable d'émissions directes de GES de ~26 MtCO₂eq par an³⁸. Celles-ci sont principalement liées à la combustion d'énergies fossiles, qui représentent environ 62% du mix énergétique utilisé pour la production de chaleur dans l'industrie.

Quant à la production à destination des réseaux de chaleur, elle représentait des émissions directes de l'ordre de 3 MtCO₂eq³⁹ en 2022 (principalement liées à la combustion de gaz naturel, qui représente 30% du bouquet énergétique utilisé).

4.3.2 Les consommations actuelles de chaleur techniquement adressables par les SMR/AMR représentent environ 16 MtCO₂eq

³⁸ Calculées en utilisant les facteurs d'émissions des différentes énergies fournis par l'ADEME pour les combustibles fossiles et l'Amorce pour les réseaux de chaleur.

³⁹ Sur la base des données ACV de l'enquête Fedene 2022 s'appuyant sur les facteurs d'émissions du décret tertiaire (à l'exception de quelques facteurs d'émissions, e.g. le bois-énergie considéré à 13 gCO₂eq/kWh)

directes évitées sur le segment industrie et 2 MtCO₂e sur les réseaux de chaleur

Parmi les 170 TWh_{th} de chaleur consommée par l'industrie, 70 TWh_{th} sont considérés comme techniquement adressables par des réacteurs nucléaires modulaires, qui représentent aujourd'hui 16 MtCO₂e d'émissions directes par an.

Concernant les réseaux de chaleur, les ~12 TWh_{th} de marché techniquement adressables par les SMR/AMR représentent des émissions directes légèrement inférieures à 2 MtCO₂e par an.

Ainsi, au total sur ces deux marchés techniquement adressables, au périmètre des consommations existantes, les émissions directes sont de ~18 MtCO₂e, soit plus de 60% des émissions directes liées à la consommation de chaleur de ces secteurs.

4.4 L'émergence de nouveaux secteurs consommateurs de chaleur (production d'hydrogène décarboné, CCUS) pourrait représenter une opportunité >10 TWh_{th}/an à horizon 2050

Plusieurs procédés industriels en développement pourraient représenter des débouchés importants pour les SMR/AMR :

- La production d'hydrogène décarboné pour différentes applications, notamment : raffinage / pétrochimie, production d'ammoniac, production de carburants de synthèse (*e-fuels*)
- La capture de CO₂ à des fins de réutilisation ou de stockage
- Le dessalement d'eau de mer

Par ailleurs, la propulsion marine pourrait constituer un autre marché pour les SMR/AMR.

Cette étude se penche uniquement sur la production d'hydrogène et le CCUS.

4.4.1 La production d'hydrogène par électrolyse haute température pourrait constituer un marché techniquement adressable par les SMR/AMR entre 0,5 et 3 TWh_{th} à horizon 2050

L'électrolyse haute température (HTE) est une technologie de décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène, qui, contrairement à l'électrolyse traditionnelle (alcaline & membranes échangeuses de protons), fonctionne avec de la vapeur à des températures comprises entre 500 et 800°C⁴⁰. Cela conduit à une efficacité accrue de la production d'hydrogène (>85-90% contre

⁴⁰ Certains systèmes d'électrolyse à haute température (ex : Genvia) sont conçus de manière à ce qu'au point de fonctionnement en régime permanent le système puisse être alimenté avec de la vapeur d'eau à 150 °C seulement, les gaz de sortie réchauffant la vapeur mise en entrée

~60-70% pour les technologies traditionnelles). Les cellules à électrolyse solide (SOEC) constituent la technologie principale de ce procédé⁴¹.

Cette technologie pourrait offrir une meilleure efficacité énergétique et, à terme, réduire significativement les coûts de production de l'hydrogène. Plusieurs projets sont actuellement en développement (Projet MULTIPHY, Construction d'une *Giga factory* d'unités SOEC par GENVIA).

Les besoins en chaleur de la technologie HTE pourraient représenter une opportunité particulièrement intéressante pour les SMR/AMR car la consommation de chaleur de ces procédés est importante (8 à 10 kWh_{th}/kg d'hydrogène produit⁴²) à une température comprise entre 500 et 800°C⁴³ ; de plus, le mix chaleur / électricité correspond à ce que peuvent livrer certains designs de SMR/AMR. Dans les scénarios RTE Futurs énergétiques 2050, la production d'hydrogène par électrolyse en France pourrait atteindre 1 à 2 Mt à horizon 2050⁴⁴. En supposant que la technologie haute température représente entre 10%⁴⁵ et 20% des futurs développements (soit les développements post 2030), entre 45 et 350 kt d'hydrogène pourraient être produits par électrolyse haute température à horizon 2050. La taille de ces unités de production d'hydrogène devra être suffisante pour justifier l'implantation d'un SMR. On peut estimer le marché techniquement adressable à horizon 2050 entre ~0,5 et 3 TWh_{th}.

Si certaines technologies de SMR/AMR permettent de fournir l'intégralité de la montée en température nécessaire, d'autres pourraient n'apporter qu'une partie de celle-ci, notamment sur la phase initiale de vaporisation qui se situe à environ 150°C. De plus, les SMR/AMR en cogénération sont également capables de fournir l'énergie électrique nécessaire à la réaction d'électrolyse.

Il est important de souligner que ces estimations ne prennent pas en compte le risque réglementaire lié à la définition européenne de l'hydrogène, selon la source d'énergie électrique employée. En effet, suite à l'adoption en mai 2024 du paquet « Hydrogène et gaz décarboné », la Commission européenne prépare un acte délégué⁴⁶ définissant les normes comptables et seuils de réduction d'émission pour les méthodes de production de l'hydrogène bas carbone, qui servira de socle d'un futur système de certification. Sans reconnaissance comme « bas carbone » de la filière de production utilisant l'énergie nucléaire, le développement des SMR/AMR sur ce marché pourrait être fortement réduit. Par ailleurs, à l'instar de l'industrie, ce marché sera confronté à la concurrence d'autres technologies de production de chaleur, ainsi qu'aux divers facteurs limitant le marché mentionnés précédemment.

4.4.2 Les technologies de capture du carbone pourraient représenter un besoin supplémentaire de chaleur, une opportunité

⁴¹ D'autres technologies en développement comme la décomposition de l'eau par cycle thermochimique pourraient nécessiter des températures plus faibles (ex : 550 °C pour le cycle hybride Cu-Cl)

⁴² Solid Oxide Electrolysis (SOEL) Overview of the technology and Current challenges and developments, 2022

⁴³ Certains systèmes d'électrolyse à haute température (ex : Genvia) sont conçus de manière à ce qu'au point de fonctionnement en régime permanent le système puisse être alimenté avec de la vapeur d'eau à 150 °C seulement, les gaz de sortie réchauffant la vapeur mise en entrée

⁴⁴ Le scénario N03 RTE prévoit ~64 TWh PCI d'hydrogène produit par an ; Le scénario M0 RTE prévoit ~35 TWh PCI d'hydrogène produit par an

⁴⁵ Global Hydrogen Review 2023, Capacités de production d'électrolyseur à horizons 2030, ~10% seront basées sur la technologie SOEC

⁴⁶ Le projet d'acte délégué mis en consultation en septembre 2024 reporte l'évaluation de la voie nucléaire à 2028

techniquement adressable estimée entre 10 et 15 TWh_{th} à l'horizon 2050

Les technologies de capture, stockage et valorisation du carbone (CCUS) permettent de capturer les émissions de CO₂ pour les utiliser comme matière première (par exemple pour produire des carburants renouvelables), ou pour les stocker de façon durable. Le CCUS est un des leviers majeurs pour l'atteinte des objectifs de neutralité carbone mondiaux et nationaux, notamment pour les émissions « difficiles à décarboner », comme celles de certains procédés industriels non énergétiques (ex : production de ciment).

En France, la stratégie nationale CCUS⁴⁷ actuelle prévoit des capacités de 31,4 à 57,9 Mt CO₂ captées par an à horizon 2050. Dans certains secteurs, le CO₂ capté est biogénique, c'est-à-dire issu de la combustion ou dégradation de la biomasse (par opposition au CO₂ fossile), et peut ainsi être valorisé pour la production de carburants de synthèse (e-fuels). C'est le cas dans l'industrie papetière, qui récupère le CO₂ stocké dans les arbres lors du procédé de production de pâte à papier à partir de fibre de cellulose. Dans d'autres secteurs, les capacités de CCUS permettront de capter des émissions difficiles à décarboner. Ainsi, les 7 – 8 MtCO₂/an issus de la production de ciment et chaux proviennent du chauffage du calcaire pour la production de clinker. Dans le secteur de la chimie, le CCUS devrait servir à capter les émissions difficilement abattables, comme les torches de sécurité sur les vapocraqueurs ou l'incinération de solvants et déchets dangereux. La filière mise aussi sur le CCUS comme une solution plus rapide et compétitive que l'électrolyse pour la décarbonation de l'hydrogène. En effet, l'hydrogène produit par vaporeformage du méthane représentait 2,5 MtCO₂/an en 2019.

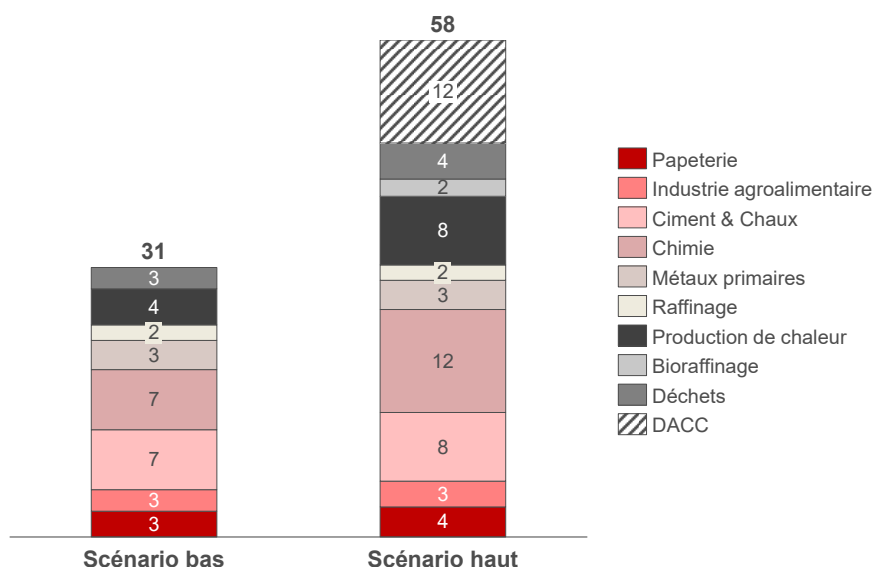


Figure 17 : capacités de CCUS 2050 par origine d'après la stratégie nationale CCUS, en MtCO₂/an captées

⁴⁷ Etat des lieux et perspectives CCUS, Juillet 2024, Ministère de l'Economie

Plusieurs technologies de capture du carbone sont actuellement en développement. Certaines nécessitent de la chaleur lors de la phase de régénération :

- Les technologies à base de solvant, comme les amines, absorbent le CO₂ dans un contacteur, qu'il est nécessaire de chauffer afin de libérer le CO₂ capturé et permettre la réutilisation du solvant. Cette étape est très énergivore et requiert des températures entre 120 et 150°C.
- Les technologies par absorption requièrent également de la chaleur pour libérer le CO₂ capté, dont la température varie selon le type de sorbant. A noter : si l'usage d'un cycle thermique est courant, certaines variantes des technologies à absorption utilisent une baisse de pression.
- Les technologies membranaires séparent le CO₂ des gaz résiduels. Une fois saturée, la membrane est soumise à une montée en température afin de désorber le CO₂ respectivement de la membrane, du solvant et du sortant.

A *contrario*, les technologies de distillation cryogénique ne nécessitent pas d'apport de chaleur : elles reposent sur un changement de phase, séparant le CO₂ du gaz par distillation dans des conditions cryogéniques, sous forme liquide (liquéfaction) ou solide (désublimation). Air Liquide a notamment développé une solution de captage de CO₂ Cryocap, qu'il opère sur un site de production d'hydrogène depuis 2015.

Technologie	Description	Besoin en chaleur	Température	Consommation de chaleur	TRL
 Absorption	Le CO ₂ des gaz de combustion ou de l'air est piégé dans un solvant solide ou liquide	Le mélange est ensuite chauffé pour extraire le CO ₂ (certains solvants peuvent être réutilisés)	120 – 150°C	[0.5 à 0.8 MWh/tCO ₂]	9
 Adsorption	Les dépôts de CO ₂ se créent sous la surface d'un adsorbant solide à haute pression. La surface est régénérée en diminuant la pression pour libérer le CO ₂	La régénération se fait en augmentant la température du lit solide (Thermal Swing Adsorption) ou en réduisant la pression (Pressure Swing Adsorption)	100-130°C selon les sorbants	Similaire à l'absorption	7 - 9
 Séparation membranaire	Le dioxyde de carbone est séparé des autres gaz de combustion à haute pression à travers un filtre	Certaines membranes nécessitent d'être opérées à des températures élevées	70 – 100°C	Inférieur à l'absorption	7 - 9
 Distillation cryogénique	Le CO ₂ est séparé de l'air ou des gaz de combustion grâce à sa distillation dans des conditions cryogéniques (liquéfaction à -57°C ou désublimation à -79°C)	Aucun	-	-	7
 "Carbonate looping"	Le carbone est piégé chimiquement dans une réaction redox avant d'être transformé en dioxyde de carbone sous une boucle chimique	Le carbonate obtenu est ensuite chauffé pour libérer le CO ₂	700 – 950°C	~2 MWh/tCO ₂	6

→ Les technologies les plus matures (TRL entre 7 et 9) ont une demande moyenne en chaleur de **650kWh / tCO₂**

Figure 18 : Panorama des technologies de capture du carbone et leur besoin de chaleur⁴⁸

Les capacités de CCUS qui seront déployées avec des technologies nécessitant un apport de chaleur représenteront un nouveau marché adressable par les SMR/AMR. La pénétration des différentes solutions de capture est très incertaine à horizons 2050. Beaucoup de technologies sont en cours de développement et cette forte concurrence favorise l'innovation. En supposant une pénétration de 50%⁴⁹ des solutions consommant de la chaleur, le marché techniquement adressable par les SMR/AMR pourrait représenter entre 10 TWh_{th}/an et 15 TWh_{th}/an.

⁴⁸ Les données de l'absorption correspondent à la technologie aux amines, qui sont les solvants les plus avancés et les moins onéreux. Les technologies d'oxy-combustion ne sont pas étudiées ici.

⁴⁹ Hypothèse que la technologie concurrente reposant sur de la cryogénie capte la plupart du marché sur les applications chimie (dont la production d'hydrogène) et ciment.

Cette estimation ne tient pas compte des développements des procédés DAC (Direct Air Capture), qui consomment également des quantités importantes de chaleur : 1,47 à 2 MWh_{th}/tonne de CO₂ selon l'AIE⁵⁰. Le scénario haut de la Stratégie nationale (12 MtCO₂ captés/an) représenterait donc une consommation de chaleur adressable techniquement de ~17 à 24 TWh_{th}.

Sur ce marché, les SMR/AMR seront confrontés aux mêmes contraintes que pour les autres marchés. La contrainte de consommation minimale de chaleur devrait avoir un impact faible, sachant que les capacités de CCUS ne seront déployées que sur les sites ou zones industrielles les plus émetteurs. En effet, une puissance thermique de 20 MW_{th} (frange basse de la taille des SMR), permet d'adresser les besoins d'une installation de capture du carbone autour de ~250 ktCO₂/an, or la plupart des projets en développement à date concerne des sites bien au-delà de ce niveau d'émission.

Les contraintes techniques varieront en fonction de la technologie de SMR/AMR. Elles auront un impact similaire à celui pour l'industrie, étant donné que le CCUS se développera sur les mêmes sites (Voir partie 3.3.2).

Les réacteurs modulaires devront de plus concurrencer les autres technologies de production de chaleur (voir partie 4.1.4). Pour des technologies basse température comme l'absorption ou la séparation membranaire, la compétitivité économique avec la PAC industrielle pourra en particulier avoir un impact non négligeable sur la part de marché des SMR/AMR.

⁵⁰ Besoins en énergie des procédés L DAC et S DAC – Source : Données AIE (2022).

5 Les SMR/AMR électrogènes peuvent notamment offrir une réponse à la demande croissante de grands consommateurs

Si le gestionnaire de réseau de transport, RTE, ne prévoit pas de développement de SMR/AMR électrogène commercial en France avant 2035⁵¹, il envisage un développement conjoint des EPR2 et des SMR/AMR à horizon 2050 dans le scénario N03 de l'exercice de prospective « *Futurs Energétiques 2050* », où les SMR/AMR se développent à partir de 2035, jusqu'à fournir 27 TWh_e par an d'électricité en 2050.

Les SMR/AMR électrogènes peuvent proposer une production électrique :

1. Soit **en complément des autres actifs de production du mix électrique dans une logique d'injection sur le réseau national**, sans viser la proximité de sites fortement consommateurs (rationnel « national ») : certains SMR/AMR ciblent notamment un fonctionnement flexible avec des modulations importantes en réponse aux signaux de prix du marché de gros de l'électricité grâce à un stockage de chaleur intégré sur site.
2. Soit à **proximité de sites ou de zones présentant des problématiques spécifiques** (rationnel « local »). Ces problématiques peuvent être de plusieurs natures, notamment :
 - Répondre à une demande d'approvisionnement en électricité, bas carbone et constante à un prix stable sur le long terme (**intérêt « économique »**)
 - Pallier des contraintes liées au réseau électrique - limite de puissance disponible en soutirage et délais de disponibilité de puissance supplémentaire (**intérêt « technique »**).

Dans le premier cas de figure, les implantations de SMR/AMR pourraient concerner notamment des **sites qui ont déjà été utilisés pour la production d'électricité** (ex : anciennes centrales thermiques), ou qui ont déjà accueilli des activités nucléaires. Nous ne l'étudions pas plus en détail dans le cadre des présents travaux.

Dans le deuxième cas de figure, les sites concernés pourraient être des **sites industriels ou data centers de différentes tailles**, à l'image de ceux qui sont aujourd'hui reliés à des centrales thermiques à flamme en cogénération (en particulier au gaz naturel) dont la puissance thermique atteint parfois plusieurs centaines de MW_e.

Cependant, l'**intérêt « économique »** peut être satisfait par un **PPA** sans que le SMR/AMR soit implanté à proximité du site consommateur. Par rapport à un PPA, l'autoconsommation peut

⁵¹ RTE ne prévoit pas de mise en service de SMR électrogène commerciaux avant 2035, mais n'exclut pas le développement de prototypes ou de réacteurs expérimentaux

réduire certains coûts (réseau et taxes) dans la mesure où la réglementation l'autorise, mais ceux-ci sont relativement limités en France pour les grands sites consommateurs⁵².

Quant à l'intérêt « technique », il est **difficile d'anticiper plus précisément quelles seraient les zones les plus favorables au développement de SMR/AMR**, car le délai pour renforcer le réseau (4 à 5 années entre les études initiales et la mise en service pour une ligne à très haute tension de 225 kV / 400 kV⁵³) est pour l'instant plus court que le délai avant la première mise en service commerciale de la plupart des SMR/AMR électrogènes lauréats du programme France 2030 (les démonstrateurs devant être mis en service au plus tôt en 2030). Par conséquent, le renforcement du réseau semble pour l'instant être une solution « plus rapide » que la construction d'un SMR/AMR.

Néanmoins, face à l'ampleur des travaux et des investissements à mettre en œuvre pour faire évoluer le réseau de transport d'électricité dans les années à venir (renouvellement des installations existantes, raccordement des parcs éoliens en mer, développement des interconnexions), **RTE établit un ordre de priorité des travaux de renforcement**, en particulier pour le raccordement de la production solaire et éolienne à terre, et pour le raccordement de nouveaux sites consommateurs.

Cette priorisation a conduit RTE à définir dans le dernier SDDR (Schéma Décennal de Développement du Réseau) plusieurs **catégories de priorité pour les zones de forte électrification** à destination de l'industrie et des data centers :

- Priorité 1 : grandes zones industrialo-portuaires (Dunkerque, Fos-sur-Mer, Le Havre) où la forte croissance anticipée de la demande fait que les projets de renforcement sont déjà avancés (a minima : études environnementales en cours)
- Priorité 2 : 7 zones où RTE a engagé les procédures administratives mais le lancement effectif des travaux est suspendu à « la matérialisation concrète des projets industriels que ces projets ont vocation à alimenter » (ou si l'Etat ou la CRE lèvent cette condition)
- Priorité 3 : zones où « une augmentation de la consommation d'électricité est susceptible d'intervenir à brève échéance » du fait de la volonté de développement de collectivités locales, et où « un engagement financier sera demandé aux industriels concernés » pour lancer les travaux

Par ailleurs, RTE mettra en place une procédure d'attribution pour les sites pouvant rapidement (dès 2028) être alimentés avec des fortes puissances (~1 GW).

⁵² Pour les consommateurs > 150 GWh/an, le TURPE représente de l'ordre de ~5€/MWh (avec des réductions de 50% à 80% pour les entreprises électro-intensives), et les taxes de l'ordre de ~1 €/MWh

⁵³ Délai présenté par RTE pour les zones industrielles « P2 » dans le SDDR 2025

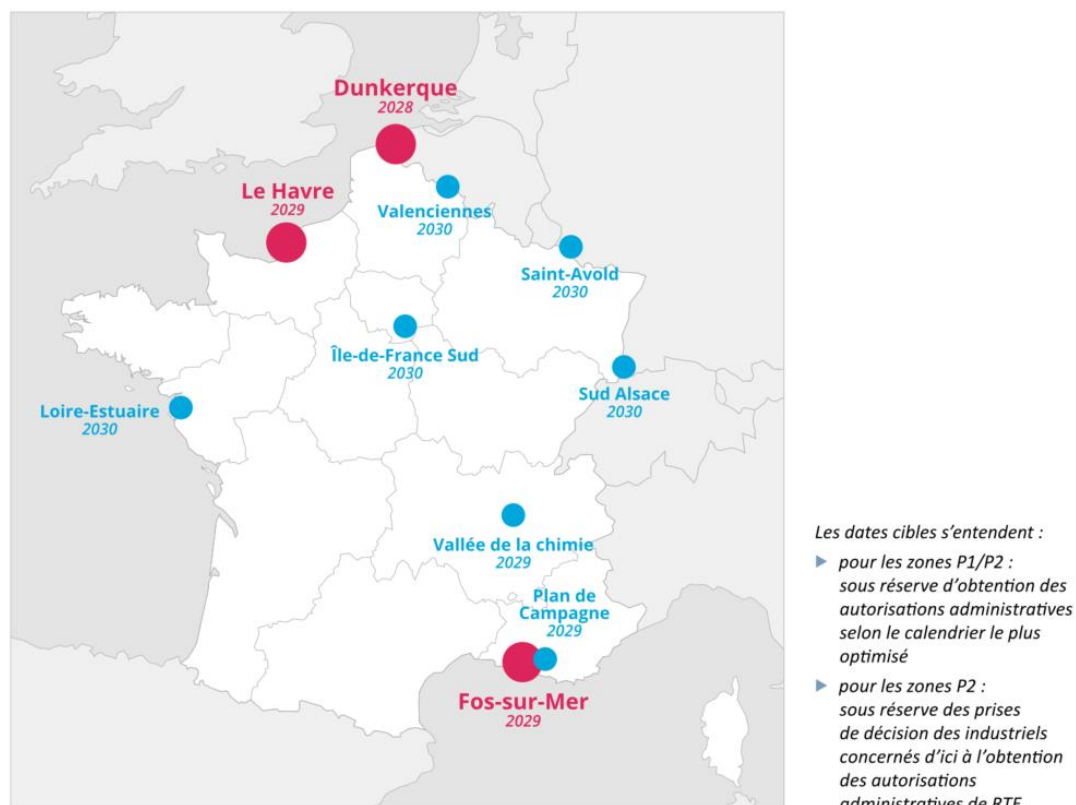


Figure 19 : Zones P1 et P2 (développement du réseau pour l'industrie bas-carbone et/ou numérique) du SDDR 2025 de RTE (source : RTE)

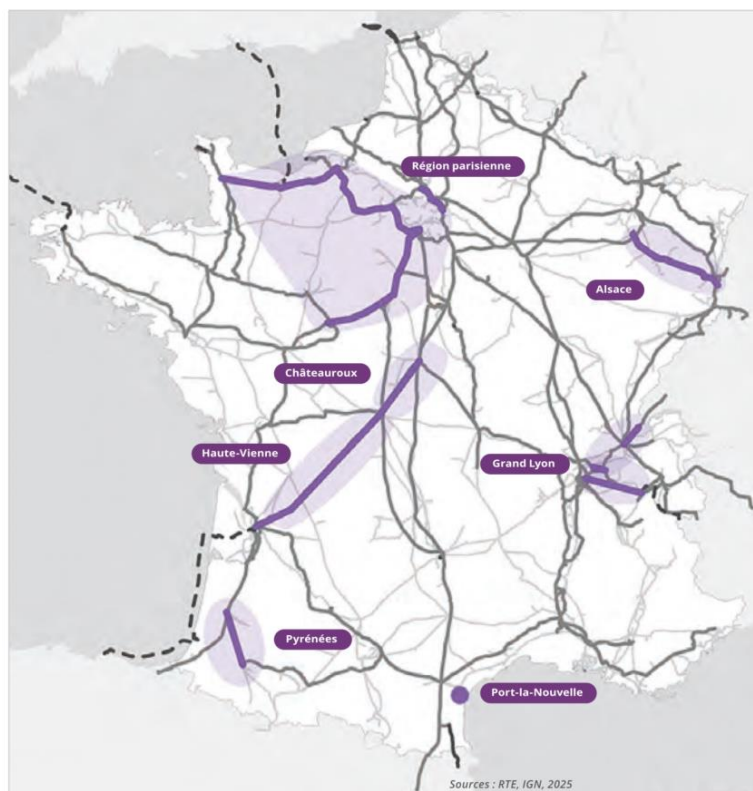


Figure 20 : Zones P3 et stratégies associées d'accélération du programme THT pour l'accueil de la consommation industrielle d'ici 2030 du SDDR 2025 de RTE (source : RTE)

Il est donc **possible qu'à l'horizon 2035, la construction d'un SMR/AMR soit envisagée comme une solution alternative ou complémentaire lorsqu'un renforcement de réseau est nécessaire pour implanter un grand site consommateur** sur une zone où la capacité de soutirage disponible est insuffisante. De tels projets pourraient ressortir d'initiatives de grands consommateurs, ou de collectivités locales telles que celles des zones « P3 » du SDDR.

Cependant, il est important de noter qu'un raccordement des SMR/AMR au réseau public de transport d'électricité demeurera nécessaire :

- A minima pour assurer une **redondance d'approvisionnement pour les consommateurs**, afin de garantir la continuité d'alimentation en cas d'indisponibilité fortuite ou planifiée du SMR/AMR
- Suivant les technologies, pour assurer les **fonctions de sûreté des réacteurs** (ex : REP) : dans certains cas, cela peut nécessiter des raccordements électriques avec le même niveau de tension (400 kV) et de fiabilité que les sites consommateurs
- Eventuellement pour **permettre l'injection sur le réseau** du surplus de production d'électricité

Ainsi, dans la plupart des cas les SMR/AMR pourraient **réduire le besoin de réseau public d'électricité, sans s'y substituer totalement**.

L'implantation des SMR/AMR électrogènes pour répondre à des problématiques locales pourrait se faire notamment :

- **Sur site (autoconsommation individuelle)** : cette modalité présente en théorie la meilleure garantie de sécurité physique d’approvisionnement et les coûts d’infrastructure les plus faibles. Cependant, les contraintes du site, en particulier l’espace disponible, peuvent en limiter la possibilité.
- **« A proximité » des nouveaux sites consommateurs** : à titre d’exemple, dans un projet de décision mis en consultation en février 2025, le régulateur irlandais CRU propose de conditionner la construction de nouveaux data centers à l’ajout d’une capacité de production d’électricité sur site ou « à proximité » au moins équivalente à la puissance de raccordement du data center – les modalités de mise en œuvre de cette proposition restant à préciser.

6 Une forte augmentation de la consommation d'électricité des grands sites industriels et data centers est attendue dans les années à venir

Le développement des SMR/AMR pourrait s'accompagner de contrats d'approvisionnement avec des grands sites consommateurs, dont la consommation est appelée à croître dans les années à venir, sous l'effet :

- De l'électrification des **procédés industriels** (directe et indirecte) ;
- Du développement de **data centers**.

D'autres applications particulières (ex : sites isolés des industries extractives) pourraient constituer des cibles commerciales pour les SMR/AMR, mais elles ne sont pas étudiées ici.

6.1 L'électrification des procédés industriels, combinée à l'augmentation de l'utilisation d'hydrogène décarboné, devrait entraîner une forte croissance de la demande d'électricité dans les grandes zones industrielles actuelles

L'électrification constitue un levier majeur pour la décarbonation de l'industrie, entraînant une augmentation significative de la demande en électricité sur certains sites industriels. Elle se fera sous forme :

- **Directe** : par exemple, remplacer des chaudières à combustible par des pompes à chaleur industrielles pour produire de la chaleur basse température dans des secteurs comme l'agroalimentaire ou la fabrication de papier et de carton, ou remplacer des fours à gaz par des fours électriques dans l'industrie du verre. Selon les estimations de RTE, cette augmentation de consommation dans l'industrie pourrait atteindre entre 10 et 50 TWh_e à l'horizon 2050 par rapport à 2019⁵⁶.
- **Indirecte** : via le remplacement des combustibles fossiles par de l'hydrogène décarboné produit par électrolyse de l'eau. RTE projette dans le scénario « référence » des Futurs Énergétiques 2050 une production annuelle d'hydrogène par électrolyse entre 1 et 2 Mt/an en 2050⁵⁷. Cette production nécessitera des quantités importantes d'électricité : environ 50 kWh_e par kilogramme d'hydrogène produit pour l'électrolyse basse température (rendement de ~65 %) et environ 35 kWh_e pour l'électrolyse haute température (rendement électrique pouvant atteindre 90 %), qui requiert également un apport de chaleur. Ainsi, la production d'hydrogène par électrolyse pourrait mobiliser entre 9,5 et 21 GW_e de capacité électrique installée en 2050, représentant une consommation annuelle de ~50 à ~100 TWh_e d'électricité.

⁵⁶Source : RTE Futurs énergétiques 2050, consommation électrique supplémentaire de l'industrie dans les scénarios « électrification + » et « réindustrialisation » (hors production d'hydrogène).

⁵⁷Dans le scénario "hydrogène +" de RTE, la production d'hydrogène par électrolyse en France atteint ~3 à 4 Mt

6.2 Les exploitants de data centers manifestent un intérêt croissant pour l'approvisionnement en électricité issue de la production nucléaire

La consommation d'électricité des data centers croît régulièrement depuis plusieurs années. Cette croissance est appelée à accélérer sous l'effet de l'augmentation du trafic internet, de l'essor des services cloud et de l'essor des modèles d'intelligence artificielle, notamment générateurs de texte et d'images.

On distingue plusieurs modalités de détention et d'exploitation de data centers : nous nous intéressons ici uniquement aux data centers en colocation et dédiés.

Type de data center	Caractéristiques	Logique d'implantation
Enterprise	Exploité et utilisé par une entreprise pour ses propres besoins.	Sur ou à proximité d'un site de l'entreprise, pour maximiser contrôle et sécurité.
Colocation	Exploité par un hébergeur et utilisé par des entreprises clientes qui y louent de l'espace et/ou des serveurs <i>Exemples : Data4, Digital Realty, Equinix etc</i>	Historiquement : à proximité d'infrastructures de réseau (atterrage de câbles sous-marins, points d'interconnexion internet...) pour maximiser la qualité de connexion, et / ou à proximité des centres d'activité économique pour faciliter les opérations techniques par l'exploitant, ses sous-traitants et ses clients
Dédié	Exploité par un fournisseur de services informatiques ou télécom (ex : cloud, IA, accès internet...) et utilisé pour son propre compte. <i>Exemples :</i> - Fournisseurs de services cloud ou IA : Amazon, Google, Meta, Microsoft, OpenAI - Opérateurs télécom : Bouygues, Free, Orange, SFR etc	De manière croissante pour les applications HPC / IA (entraînement en particulier) / stockage froid : en fonction des conditions d'accès à l'énergie / foncier / ressource en eau (coût, disponibilité)

6.2.1 Les exploitants de data centers recherchent notamment une électricité compétitive, de qualité, décarbonée et rapidement disponible, dans un contexte de concurrence entre pays à l'échelle continentale voire mondiale

Pour les data centers destinés à un usage pour lequel le temps de latence est peu contraignant (ex : stockage de données « froid », entraînement de modèles d'intelligence artificielle), le choix d'implantation peut se faire à l'échelle du pays, du continent, voire du monde car le coût de connectivité est relativement peu contraignant.

	Ressources numériques (stockage, calcul, interconnexion) avec impératif de localisation			Ressources numériques sans impératif de localisation
Rationnel de localisation	Proche des utilisateurs finaux (usine, ville, véhicule...)	Proche des activités économiques	Proche des points clés du réseau internet	NA
Types de localisations	Villes de 100 k+ habitants avec activité économique importante	Très grandes villes	Grandes villes hébergeant des IXP ou des atterrages de câbles télécom sous-marins	NA
Exemples en France	Rennes, Strasbourg	Paris	Paris, Lyon, Marseille	N'importe où
Types d'applications	Réseaux télécom Applications "edge" (ex : inférence IA) Tout besoin de calcul ou de stockage			Applications sans contrainte de latence : calcul intensif (calcul scientifique, entraînement IA), stockage de données "froid"
Exemples d'acteurs	▪ Opérateurs télécom  ▪ Hébergeurs de colocation spécialisés dans le "edge"  ▪ Hébergeurs de colocation  ▪ Opérateurs cloud disposant de data centers en propre  ▪ Acteurs spécialisés des services aux réseaux (e.g. CDN, IXP, opérateurs télécom)			

Figure 21 : Rationnel de localisation des data centers

Ce choix repose sur plusieurs critères stratégiques :

- L'**électricité** : **coût** faible et stable sur plusieurs années, **qualité** (continuité d'alimentation définie par la fréquence et le temps de coupure, qualité de l'onde de tension), caractère **décarboné ou renouvelable**, raccordement **rapide**
- Le **foncier**
- La **ressource en eau** : le refroidissement liquide est le plus efficace et le plus dense énergétiquement (en kW de puissance de calcul par baie de serveur standard), et limite donc la consommation d'électricité et de foncier. Cela explique que les processeurs (CPU, GPU, TPU) et les serveurs conçus pour l'IA soient maintenant majoritairement conçus pour ce mode de refroidissement. Néanmoins, ce mode de refroidissement crée généralement une consommation d'eau importante car il est souvent associé à des tours de refroidissement par évaporation.

La croissance des services cloud et des modèles d'IA conduit à une augmentation de la puissance de calcul demandée et – par recherche d'effets d'échelle – à une augmentation de la taille unitaire des data centers : les sites *hyperscale* (> 20 MW) autrefois exploités uniquement par les GAFAM sont maintenant la norme, et les tailles de projet se comptent maintenant en centaines de MW (ex : 300 MW pour le projet de Sesterce à Gardanne, destiné à proposer à des tiers de la puissance de calcul pour entraîner des modèles d'IA) voire atteignent le GW (ex : 2 GW pour le projet de Meta à Richland Parish en Louisiane, destiné à entraîner ses modèles d'IA Llama)⁶⁰.

Ce contexte explique que les développeurs et exploitants de data centers sont notamment intéressés par des sites qui hébergent déjà des consommations importantes d'électricité et d'eau, dans des géographies à climat froid ou tempéré, et où l'électricité est décarbonée et abondante (ex : Google exploite depuis 2009 un data center sur le site d'une ancienne papeterie à Hamina, en Finlande).

⁶⁰ A l'occasion du Sommet pour l'action sur l'IA de février 2025 à Paris, l'Élysée a dévoilé un projet d'investissement porté par un consortium franco-émirati qui pourrait conduire à la création d'un datacenter de 1GW

Ainsi, le gouvernement français a récemment dévoilé en février 2025 une liste de 35 sites « prêts à construire » spécialement identifiés pour accueillir de nouveaux data centers, représentant des surfaces allant de 18 à plus de 150 hectares, et pouvant être rapidement raccordés au réseau électrique, qui pourraient atteindre un total de 1 GW à horizon 2027.

6.2.2 Les consommations des data centers en France pourraient atteindre ~29 TWh_e dès 2040, tirées par l'augmentation du nombre de data centers et les besoins grandissants liés à l'IA

Selon le schéma décennal de développement du réseau (SDDR) de RTE (version mise en consultation en 2024) la consommation annuelle des data centers pourrait atteindre environ 29 TWh_e en 2040. D'après le CESE, cette consommation pourrait atteindre « 50 voire 70 » TWh_e en 2050⁶¹.

Plusieurs facteurs rendent difficile d'estimer la consommation future des data centers en France :

- Concurrence internationale pour leur implantation
- Equilibre incertain entre croissance de la demande et gains de performance énergétique, ces derniers permettant une croissance d'autant plus forte de la demande de capacité de stockage, de calcul et de transport de données. Ils sont attendus à plusieurs niveaux :
 - **Logiciel** : efficacité de l'entraînement des algorithmes d'IA (ex : des acteurs comme Deepseek et MistralAI cherchent à minimiser la puissance de calcul employée pour l'entraînement de leurs modèles par rapport aux leaders du marché des LLM : DeepSeek a ainsi annoncé en janvier 2025 utiliser environ un dixième de la puissance de calcul du modèle Llama 3.1 de Meta, grâce à des méthodes d'entraînement plus efficaces – la performance des modèles n'étant cependant pas égale)
 - **Matériel** :
 - Technologie de **refroidissement** (ex : passage d'un refroidissement à air à un refroidissement liquide)
 - **Conception** des processeurs / puces / serveurs (ex : Google revendique 67% d'économies d'énergies avec sa sixième génération de TPU par rapport à la génération précédente⁶²)
 - **Technologie** de calcul (ex : développements en traitement optique de données)

6.2.3 Les SMR/AMR constituent une solution d'intérêt pour les exploitants de data centers ayant fixé des objectifs ambitieux en matière d'approvisionnement énergétique et de neutralité carbone

⁶¹ Source : CESE, "Pour une intelligence artificielle au service de l'intérêt général", janvier 2025

⁶² TPU : Tensor Processing Unit, circuit intégré développé par Google pour le calcul tensoriel, dont une des applications sont les algorithmes de *machine learning*

Les grands exploitants du secteur adoptent des stratégies ambitieuses pour limiter leur impact environnemental. Ces stratégies concernent notamment l'efficacité énergétique et l'approvisionnement en électricité.

L'objectif est multiple :

- Conforter le **droit à opérer** des data centers
- Faciliter le **développement** de projets en limitant les ressources nécessaires
- Sécuriser l'**approvisionnement en électricité** (coût, qualité, caractère décarboné ou renouvelable, disponibilité rapide)

Historiquement, la sécurisation de l'approvisionnement en électricité concernait principalement l'**achat d'électricité renouvelable en PPA** qui permet de justifier que l'électricité utilisée est renouvelable tout en coût sécurisant à long terme une partie de l'approvisionnement (en fonction de la source d'approvisionnement et du type de PPA retenu) : Google a par exemple signé son premier PPA avec un parc éolien dès 2010, et indique avoir contracté un total de 14 GW de capacité renouvelable entre 2010 et 2023. Certains recourent également à des projets d'autoconsommation en intégrant des actifs renouvelables sur site, comme Echelon en Irlande (projet éolien de 1 GW) ou Google en Belgique (2,8 MW de photovoltaïque), mais la puissance de ces projets est faible par rapport à la consommation des data centers.

Cette stratégie se double depuis plusieurs années chez certains acteurs comme Google et Microsoft d'une recherche de **correspondance entre production décarbonée et consommation à un pas de temps fin** (la correspondance fondée sur les garanties d'origine associées aux PPA étant à pas mensuel en Europe), appelée « **24/7 carbon-free energy matching** ». Cependant, les approches d'autres acteurs (Amazon, Meta) divergent, et cette recherche de correspondance est moins prégnante en France où le mix électrique est déjà largement décarboné du fait de l'important parc nucléaire⁶³.

Depuis quelques années, les exploitants de data centers étudient différentes pistes pour obtenir des puissances importantes de production pilotable d'électricité à proximité des data centers, notamment pour deux raisons :

- Le fort développement actuel ou anticipé des usages de l'électricité dans certaines régions **limite la capacité de raccordement**
- Le fort développement de la production solaire et éolienne augmente les écarts de prix intra-journaliers et **limite l'intérêt économique des PPA renouvelables « as produced »** (en particulier solaires) pour couvrir la production presque constante (*baseload*) des data centers

Ce contexte explique les marques d'intérêt de plus en plus importantes envers les SMR/AMR, au même titre que d'autres solutions parmi lesquelles le nucléaire de grande capacité, la géothermie, la capture de carbone, l'hydrogène décarboné, le stockage longue durée... Les SMR présentent l'intérêt d'une certaine répliquabilité des projets d'un site à l'autre, et d'une modularité par rapport aux centrales nucléaires de grande puissance pour l'autoconsommation (l'ajout de réacteurs

⁶³ Selon RTE, « 95% de l'électricité produite en France, en 2024, était décarbonée ».

permettant d'accompagner la montée en puissance du data center, qui peut s'étaler sur plusieurs années).

Plusieurs annonces récentes illustrent cet intérêt, principalement aux USA (voir Figure 22 ci-dessous).

Exploitant du datacenter	Partenaire exploitant nucléaire	Détail de la relation
		Sept. 2023 : Projet de développement d'un campus de SMRs sur le site de Nyköping destiné à alimenter des centres de données Lancement en mai d'une étude de faisabilité et mise en service prévue à l'horizon 2030
		Mars 2024 : Annonce de l'acquisition du datacenter de 960 MW, directement alimenté par la centrale nucléaire de Susquehanna Steam Electric Station (2GW), de Talen Energy par AWS (filiale d'Amazon) et d'un contrat d'achat long terme de l'électricité nucléaire (jusqu'à 480MW). Nov. 2024 : Rejet par les autorités de la demande d'augmentation d'approvisionnement par la centrale nucléaire, citant des craintes pour le réseau local.
		Avr. 2024 : Signature d'un préaccord entre Equinix et Oklo portant sur un approvisionnement pouvant atteindre 500 MW d'énergie nucléaire. Cet accord fait suite à une lettre d'intention signée en février et à la réalisation par Equinix d'un prépaiement de 25 millions de dollars à Oklo, donnant droit à une option sur des actions de la société ou sur une fourniture d'électricité à tarif préférentiel.
		Sept. 2024 : Signature d'un PPA de 20 ans entre Microsoft et Constellation, à partir de 2028, adossé au redémarrage de l'unité 1 de la centrale nucléaire (835 MW) de Three Mile Island en Pennsylvanie, fermée depuis 2019, afin de fournir de l'électricité à ses datacenters.
	NC	Sept. 2024 : Annonce de la construction d'un datacenter de 1 GW par Oracle, alimenté par 3 SMR (permis de construire obtenus). Technologie choisie et développeurs des SMR non communiqués à date.
		Oct. 2024 : Signature d'un Master Plant Development Agreement pour la construction de centrales nucléaires (500 MW répartis sur 6 à 7 petits réacteurs modulaires) d'ici 2035 entre Kairos Power et Google. Développement, construction et opération réalisés par Kairos et vente de l'énergie via un PPA avec Google. Premier réacteur prévu pour 2030 afin d'alimenter les datacenters.
		Oct. 2024 : Investissement d'Amazon dans la société X Energy pour financer la conception et les processus d'autorisation du développeur de réacteur nucléaire modulaire. Objectif de développement de 5 GW à horizon 2039, et premier déploiement de 4 unités AMR totalisant 320 MW destinées à alimenter ses centres de données, dans le cadre de sa stratégie de neutralité carbone.
		Déc. 2024 : Signature d'un accord-cadre de fourniture d'électricité non contraignant (Master Power Agreement) portant sur une capacité pouvant aller jusqu'à 12 GW d'ici 2044 Prévoit le développement, la construction et l'exploitation par Oklo de ses réacteurs nucléaires Aurora Powerhouse dans le cadre de contrats d'achat d'électricité (PPA)
	NC	Déc. 2024 : lancement d'un appel à propositions afin d'identifier des développeurs potentiels dans le domaine de l'énergie nucléaire pour soutenir le développement de 1,4 GW de nouvelle capacité de production nucléaire aux États-Unis Meta accordera la priorité aux développeurs capables d'assurer l'ensemble du cycle de vie des centrales.
		Jan. 2025 : Engagement conjoint pour le co-développement de 2 GW d'énergie nucléaire afin d'alimenter le portefeuille de centres de données en expansion d'Endeavour. Mise en service des premiers réacteurs prévue à l'horizon 2029.
		Mars 2025 : signature d'un accord (MoU) pour étudier l'utilisation du SMR AP300 de Westinghouse afin d'alimenter les futurs datacenters Data4 en Europe. Dans le cadre de cet accord, Data4 prévoit d'utiliser l'AP300 SMR comme technologie de référence pour évaluer son déploiement sur l'un de ses futurs centres de données en Europe.

Figure 22 : Exemples d'annonces récentes d'exploitants de data centers relativement à la production nucléaire (non exhaustif)

7 Tous usages confondus, le potentiel identifié de développement des SMR/AMR est principalement situé sur les grandes zones industrielles et à proximité des grands réseaux de chaleur

Le potentiel identifié de déploiement des SMR/AMR se concentre dans essentiellement autour des grandes zones industrielles et des grands réseaux de chaleur.

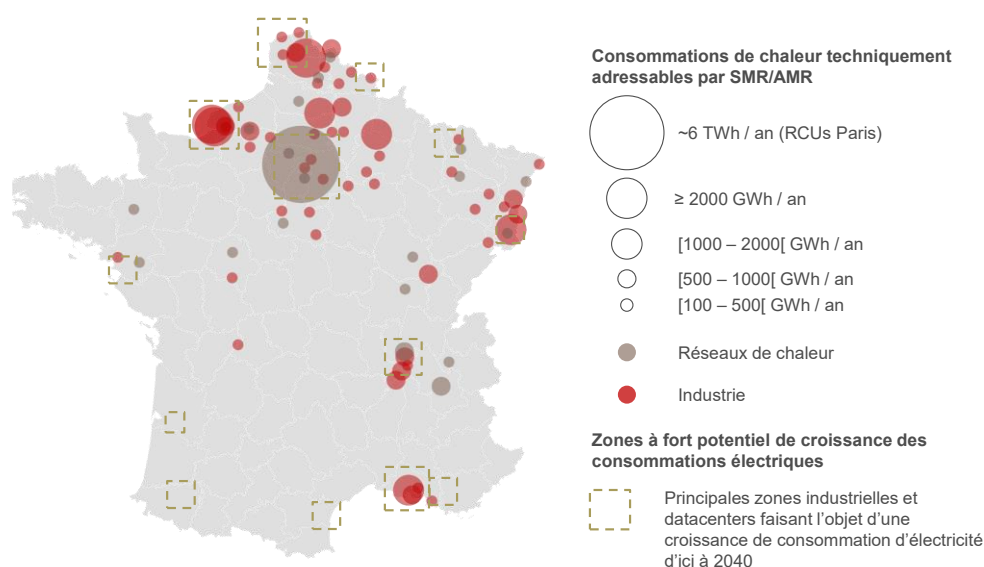


Figure 23 : Carte des *clusters* de l'industrie et réseaux de chaleur existants techniquement adressables par les SMR/AMR, et zones de potentielles fortes croissances de la consommation électrique

Concernant les zones industrielles, il s'agit notamment de :

- La **zone du Havre**, qui comprend de nombreux sites de l'industrie chimique et pétrochimique ;
- Les **zones industrielles proches de l'Allemagne (Chalampé, Biesheim)** qui regroupent plusieurs industriels de la chimie ;
- Les **zones industrielles de Dunkerque, Fos-Sur-Mer / Lavéra / Berre et Saint-Nazaire**, qui réunissent des grands sites des industries chimiques, métallurgiques et agro-alimentaires

- La **zone industrielle Nord** qui comprend des sites industriels agroalimentaires du sucre et des produits amylacés ;
- La **vallée de la chimie**, à proximité de Lyon.

Ces bassins industriels combinent plusieurs usages potentiels : chaleur décarbonée et électricité décarbonée pour les procédés industriels, et potentiellement de nouveaux usages comme le captage de carbone (CCUS) et la production d'hydrogène.

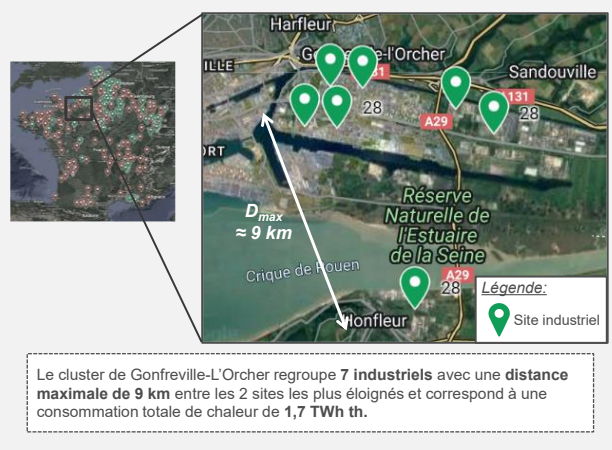
Outre les besoins industriels, les réseaux de chaleur urbains offrent également un potentiel important pour les SMR/AMR. La région parisienne représente le principal centre de consommation en volume ; elle est également identifiée comme une zone présentant des perspectives de croissance significatives en matière de consommation électrique de data centers. Les réseaux autour de Lyon et Grenoble constituent des zones secondaires en termes de potentiel. De manière plus diffuse, les autres principaux foyers de consommation se situent principalement dans la moitié nord du pays.

Annexe 1 – Méthodologie de construction des *clusters*

Méthodologie de formation de clusters industriels

- 1 Application d'un filtre de taille minimum (sélection des sites industriels **consommant au moins 25GWh/an**)
- 2 Récupération des **coordonnées des sites** (longitudes / latitudes) à partir de leurs adresses par API de géocodage
- 3 Formation des clusters sous contrainte « distance maximale séparant 2 sites d'un même cluster est **< 20 km.** »
- 4 Rétention des clusters qui dépassent un certain **seuil de consommation de chaleur**

Exemple de cluster



Annexe 2 – Liste des *clusters*

Industrie

Annonay
Arques
Artenay
Benheim
Berre l'Etang
Biesheim
Boiry Sainte Rictrude
Calais
Cambrai
Chalampé
Chevrières
Clairefontaine
Compiègne
Connantre - Haussimont
Corbeilles
Descartes - Les Ormes
Dunkerque
Epinal
Etrépigny
Fontaine le fun
Fos-Sur-Mer (incl. Lavéra)
Gien

Gonfreville-l'Orcher
Kaysersberg
Lens - Douai
Lille et alentours
Louviers
Maisons Alfort
Marckolsheim
Marseille Est
Matouges - Isse
Maubeuge
Mormant - Nangis
Nancy
Nesle - Roye
Nogent-Sur-Seine
Origny Saint Benoite
Port Jérôme Sur Seine
Raffinerie de Donges
Raffinerie de Harfleur
Raffinerie de Martigues
Raffinerie de Port-Jérôme-Sur-Seine
Reims
Rety
Rouen Sud
Roussillon
Saillat sur Vienne
Saint-Agathe (Florange)
Saint-Fons (Lyon Sud-Est)
Saint-Venant
Sochaux
Soissons
Tavaux (Sud Dijon)
Valenciennes
Vaujour - Saint Soupplets
Vienne
Villette sur Aube

Réseaux de chaleur urbains

Amiens
Chambéry/Annecy/Albertville
Dijon
Grenoble
Le Creusot
Lille
Lyon

Metz
Mulhouse
Nancy
Nantes
Nord Ouest Paris (Cergy)
Orléans
Paris
Paris Sud-Est
Rennes
Rouen
Strasbourg
Sud Ouest Lille (Arras, Douai, Lens, Béthune)
Tours

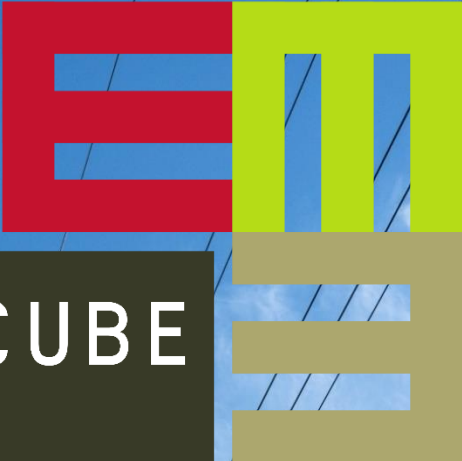


E-CUBE Strategy Consultants est une structure de conseil en stratégie spécialisée dans les secteurs de l'énergie, de l'environnement, des infrastructures et dans les enjeux de décarbonation. Nous sommes reconnus sur le marché du conseil pour la qualité de notre expertise, le haut niveau de nos équipes, la flexibilité et l'écoute de notre approche.

Nos travaux couvrent l'ensemble des problématiques de Directions Générales : analyse stratégique, stratégie décarbonation et impact sur les modèles d'affaires, redéfinition des stratégies d'approvisionnement énergétique, études réglementaires et technico-économiques, évolution des organisations ou amélioration de la performance opérationnelle, analyse de données et modélisation, *due diligence*.

Nos interventions s'organisent autour de trois axes :

- **Energie et Environnement** : accompagner les acteurs de la chaîne de valeur de l'énergie dans l'anticipation et la prise en compte de l'évolution de leur environnement marché, réglementaire, concurrentiel et technologique. Assister les acteurs privés et publics dans la réévaluation de leur stratégie afin d'intégrer les enjeux et les opportunités d'une « nouvelle donne » énergétique et environnementale.
- **Mobilité** : accompagner les acteurs de l'automobile, du ferroviaire, du transport aérien, du shipping et de la logistique dans le cadre de leurs projets stratégiques (Corporate, M&A), réglementaires et opérationnels. Accompagner les leaders de l'industrie dans la réévaluation de leur stratégie afin d'intégrer les enjeux du digital et de la transition énergétique
- **Décarbonation** : accompagner les acteurs industriels et tertiaires dans la compréhension des impacts sur leurs activités et leurs modèles d'affaires de la transition énergétique et environnementale, appuyer et challenger leur stratégie de décarbonation, les aider dans la refonte des stratégies d'approvisionnement énergétique et de logistique.



E-CUBE

STRATEGY
CONSULTANTS

LAUSANNE — PARIS — BRUXELLES

Perspectives de développement des SMR/AMR en France

Mai 2025

© E-CUBE Strategy Consultants SA 2025. Tous droits réservés.

www.e-cube.com

Crédit photo : imantsu (reference iStock 1414685583)