

Industrie nucléaire

Petits réacteurs modulaires (SMR) pour la fourniture de chaleur urbaine et industrielle

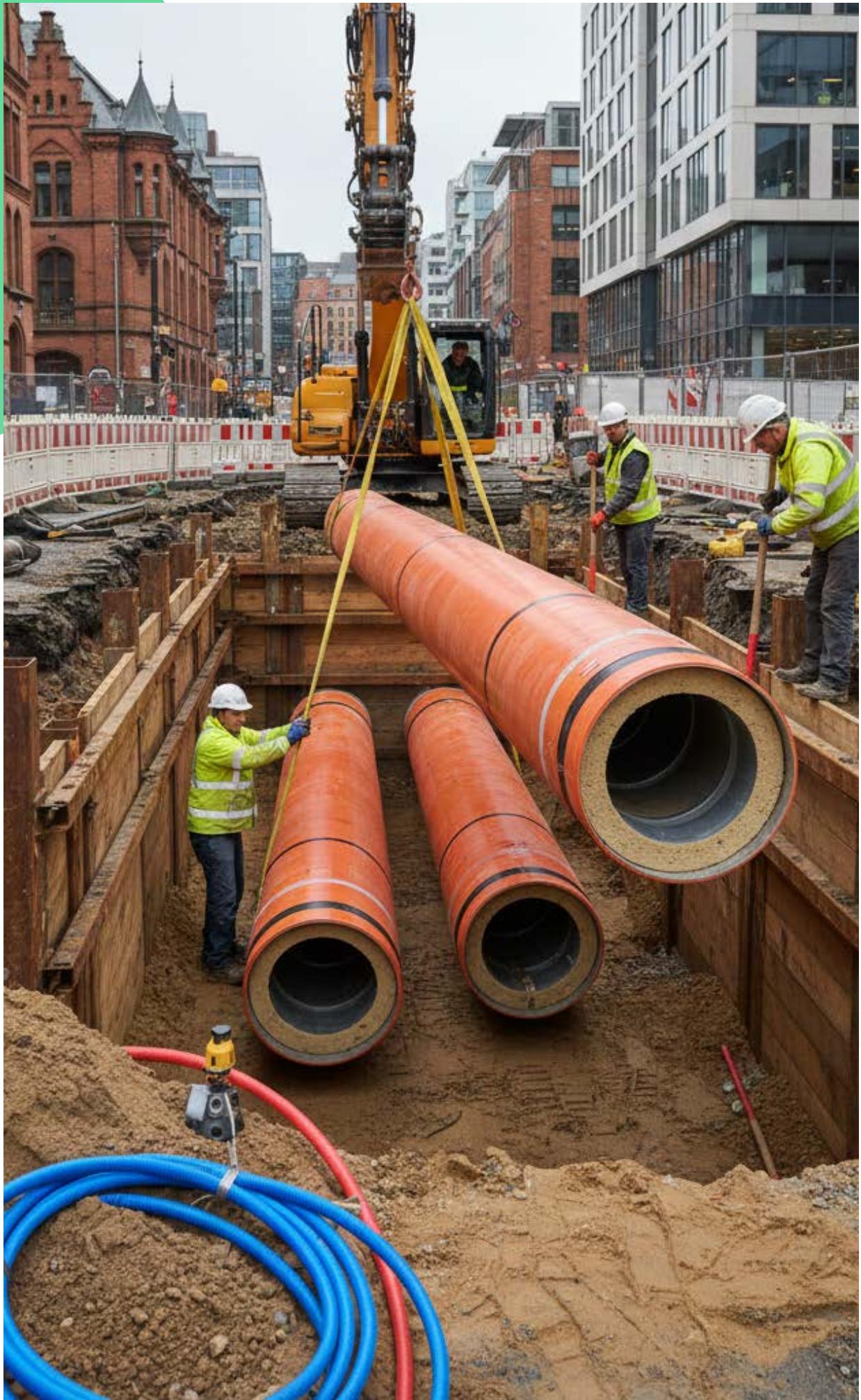
Auteurs :



Pierre Supau
Associate Partner



Aliénor de Thoisy
Consultante



Avant-propos

Face au double impératif de la transition énergétique et du renforcement de la souveraineté, l'énergie nucléaire connaît un regain d'intérêt mondial. Dans ce contexte, les **petits réacteurs modulaires (small modular reactor, SMR)** émergent comme une solution innovante et complémentaire aux grandes centrales, offrant de nouvelles voies pour la décarbonation. Ce document analyse le potentiel de marché spécifique des SMR dédiés à la production de chaleur (dits **calogènes**) en France, dans un contexte politique français et européen de plus en plus favorable, comme en témoigne le plan de relance nucléaire en France, et le Net-Zero Industry Act européen qui reconnaît le nucléaire comme technologie stratégique pour la décarbonation.

Dans les pays européens où le mix électrique est déjà largement décarboné, les usages les plus prometteurs pour les SMR résident dans les applications de production de chaleur, qui sont aujourd'hui fortement dépendantes du gaz fossile, et où les alternatives décarbonées ont un potentiel limité (géothermie) ou bien subissent de forts usages concurrents (comme la biomasse, ou les UVE – unités de valorisation énergétique). En effet, pour une même puissance thermique du réacteur nucléaire, la quantité d'énergie utile fournie sous forme de chaleur est deux à trois fois supérieure à celle fournie sous forme d'électricité, en raison des pertes de rendement inhérentes au cycle thermodynamique de conversion. Ce facteur constitue un levier de compétitivité majeur.

Les SMR se définissent par trois caractéristiques fondamentales :

- **Une faible puissance** : Inférieure à 300 MW, soit un tiers ou moins de la puissance des grands réacteurs, pour une chaleur maximale de 500°C.
- **Une modularité** : Leurs composants sont conçus pour être fabriqués, assemblés et testés en usine avant d'être transportés sur site.
- **Une taille réduite** : Leur empreinte au sol est significativement plus faible que celle d'une centrale conventionnelle.

Bien que la petite taille génère des baisses d'économie d'échelle, l'objectif est d'atteindre un coût potentiellement compétitif grâce à un effet de série massif permis par la standardisation et la fabrication en usine. La réussite du déploiement repose également sur la capacité à surmonter plusieurs défis critiques : la sécurisation des sites d'implantation en concertation avec les territoires, la gestion anticipée de l'ensemble du cycle du combustible et l'obtention d'une acceptabilité locale solide.

Alors que la course mondiale soit lancée, aucun acteur n'a encore atteint le stade de la production industrielle en série. La capacité collective à structurer une filière industrielle européenne compétitive sera donc déterminante pour transformer le potentiel de cette technologie en une réalité industrielle et commerciale.

Résumé exécutif

Les réseaux de chaleur urbains confirment un intérêt très fort pour la chaleur basse température d'origine nucléaire, contrairement aux industriels

En Europe, la chaleur (chauffage, eau chaude et chaleur de procédés) représente environ 40% de l'énergie finale - c'est-à-dire l'énergie effectivement consommée par les ménages et les entreprises – soit 4 300 TWh, devant le transport (3 300 TWh). Environ 70% de cette chaleur est liée au chauffage et à l'eau chaude du résidentiel et du tertiaire et 30% de celle-ci adresse les besoins en chaleur industrielle (~10% pour les procédés <100°C, ~10% pour ceux entre 100 et 1000°C et ~10% pour ceux >1000°C).

Aujourd'hui, plus de **90% de la chaleur est produite par combustion**, fortement émettrice de CO₂, et environ deux tiers est encore d'origine fossile (gaz et charbon principalement). Ce constat explique l'intérêt croissant pour les small modular reactors (SMR), des petits réacteurs nucléaires modulaires produisant de la chaleur et/ou de l'électricité décarbonées. Les **SMR calogènes se positionnent sur ce marché pour le décarboner** avec un changement de paradigme dans l'industrie : ces SMR souhaitent valoriser ~99% de l'énergie produite par la fission nucléaire pour produire uniquement de

la chaleur, contre ~35% pour le nucléaire existant qui produit de l'électricité. Selon les technologies et les constructeurs, ces SMR peuvent se positionner sur des usages de **basse et moyenne** température (typiquement <200°C) ou viser des applications de **température plus élevée, jusqu'à ~500°C**.

L'utilisation des SMR pour produire de la chaleur décarbonée s'impose progressivement dans le débat énergétique avec l'étude E-Cube pour la SFEN¹ qui confirme qu'un marché significatif, de l'ordre de 100 TWh, existe pour l'usage de réacteurs nucléaires modulaires (SMR) dédiés à la chaleur. La Commission de Régulation de l'Énergie (CRE), va plus loin et indique que « **les usages les plus prometteurs des SMR dans les pays européens dont l'électricité est déjà bas-carbone résident dans la production de chaleur** »², en priorité pour : les réseaux de chaleur urbains et l'industrie opérant à des températures inférieures à 500°C.

Cette étude complète les travaux existants en analysant, pour la France, les usages de chaleur à basse (<110°C), moyenne (110–200°C) et plus haute température (>200°C, dans la limite de 500°C). **Elle confirme que le segment le plus porteur est celui des réseaux de chaleur urbains : un marché d'environ 30 TWh aujourd'hui, attendu à 90 TWh en 2035**. Pour passer du potentiel théorique à ce qui est réellement réalisable, l'étude a interrogé une quarantaine d'exploitants de réseaux de chaleur et évalué leurs critères d'achat (durée d'engagement, intégration technique, sensibilité au prix, etc.). Trois points ressortent : (1) ces acteurs sont habitués à des investissements de long terme (20 à 30 ans) ; (2) la généralisation des réseaux basse température (80–110°C, 3–5 bars) facilite l'intégration d'une source nucléaire ; (3) un coût

1- Etude E-Cube pour la SFEN – Marché des SMR et AMR en France

2- Rapport de la CRE - Prospective sur les SMR/AMR

cible de 50-70€/MWh_{th} est jugé stable et compétitif face à la volatilité du gaz, au recul de la biomasse subventionnée et aux limites de la géothermie.

Sur cette base, **le marché effectivement adressable est estimé à une vingtaine d'agglomérations pour un total de 12 TWh**. En excluant la région parisienne, qui représente à elle seule 5 TWh, cela représenterait un potentiel d'une vingtaine de réacteurs calogènes d'entre 30 et 45 MW_{th}. La concrétisation de ces projets dépend toutefois de l'acceptabilité locale et de délais réglementaires et politiques difficilement compressibles.

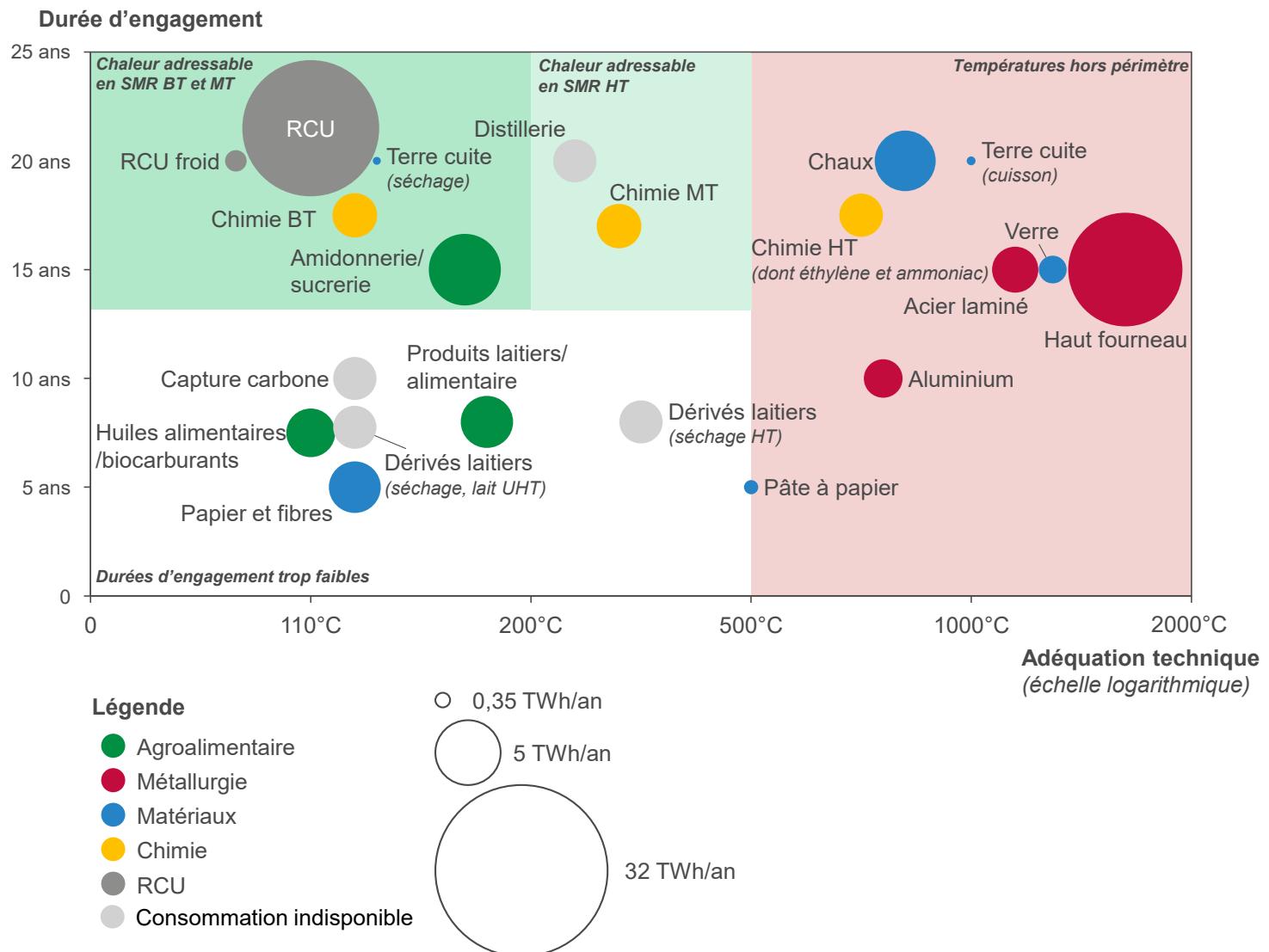
À l'inverse, l'étude met en exergue des **difficultés profondes et structurelles pour adresser les applications industrielles**. Bien qu'il y ait une demande agglomérée importante (65 TWh théoriquement adressables identifiés dans cette étude), les SMR se révèlent peu adéquats: 1) les industriels attendent des ROI de 3-8 ans, incompatibles avec des actifs thermiques capitalistiques nécessitant un engagement long terme, 2) la majorité des sites <200°C sont trop petits ou trop dispersés pour justifier une installation dédiée et 3) le prix cible de 50-70€/MWh_{th} est acceptable mais constitue un prix plancher pour un investissement d'un horizon de temps aussi long terme, 4) des freins d'acceptabilité, réglementaires et d'absence de subventions sont à anticiper. **Après analyse des critères d'achat, le marché industriel maximal pour les applications industrielles à basse et moyenne température (<200°C) est estimé à 4-8 TWh**, principalement dans l'agroalimentaire, les industries papetières et de fibres, et la chimie basse et moyenne température. Ce marché est de l'ordre de quelques

clusters, dont les 2 principaux sont Fos-Sur-Mer et Dunkerque.

Concernant les **applications industrielles à haute température (200-500°C)**, le marché industriel maximal après analyse des critères d'achats est estimé à 10-15 TWh. Il se limite aux besoins thermiques inférieurs à 500°C (température maximale délivrable par un SMR calogène) et suppose des engagements d'achat de long terme (> 20 ans). Dans ce cadre, les secteurs de la distillation et la chimie apparaissent comme les plus compatibles avec ces exigences. Au-delà de ces deux critères structurants, les attentes sont globalement similaires d'un secteur à l'autre : une taille critique de site (souvent > 30-45 MW_{th}), des profils de charge stables, une forte sensibilité au prix (plutôt < 50€/MWh), dans un contexte où la rentabilité tend à primer de plus en plus sur les objectifs de décarbonation. Enfin, le contexte socio-réglementaire reste un frein important, de nombreux sites redoutant les contraintes supplémentaires liées au statut SEVESO et à celui d'« opérateur nucléaire ».

Pour rendre ces applications industrielles possibles, le prérequis est de constituer des clusters de demande, c'est-à-dire parvenir à aligner jusqu'à cinq industriels autour d'une même table, tout en identifiant un tiers capable de porter le risque d'achat de la chaleur à long terme. A ce jour, deux modèles peuvent être envisagés : un « pooling » des industriels formant un groupement d'achat, ou un opérateur public garantit par la puissance publique. Les défis inhérents au montage de ces deux modèles complexifient encore davantage la possibilité d'une solution SMR pour la basse température.

Figure 1 - Matrice de synthèse de l'attractivité de chaque segment



Réalisation du livre blanc

Nous avons souhaité estimer l'attractivité des SMR calogènes basse température pour les différentes applications possibles, que l'on peut regrouper en deux grands ensembles : (1) les réseaux de chaleur urbains et (2) les applications industrielles.

Pour ce faire, nous avons travaillé en deux temps : nous avons tout d'abord estimé la **consommation en chaleur** sur les principaux segments de la chaleur en France (réseaux de chaleur urbains et chaleur industrielle), puis nous avons interrogé une quarantaine d'acteurs afin d'évaluer sur une **grille de critères d'achats** fine l'attractivité réelle du segment, et ainsi en déduire un **potentiel marché pondéré par ces critères**.

ESTIMATION DE LA CONSOMMATION EN CHALEUR EN FRANCE

Un SMR ayant une taille conséquente, nous avons identifié uniquement les réseaux ou sites ou ensembles de sites ayant une consommation de chaleur supérieure à **160 GWh_{th}/an**.

La **consommation de chaleur urbaine** a été estimée grâce aux données publiques, en libre accès, des consommations des réseaux de chaleur urbains, accessible sur France Chaleur Urbaine.

La **chaleur industrielle**, émanant principalement de groupes privés, n'étant pas une donnée publique, nous avons utilisé la seule clef d'entrée accessible à la maille site, les émissions carbone reportées dans le système de quotas carbone européen (ETS), à laquelle nous avons utilisé des coefficients moyens d'émissions par industrie. Pour avoir la demande en chaleur par plage de température, nous avons ensuite

utilisé des coefficients pour distribuer la demande estimée. Enfin, nous avons croisé les résultats de nos travaux avec le rapport E-Cube pour la SFEN ainsi que le rapport de la CRE.

EVALUATION DE L'ATTRACTIVITÉ DES SEGMENTS IDENTIFIÉS

Fort de l'éclairage de la distribution de la demande en chaleur en France, **37 entretiens ont été réalisés entre les 10 novembre et 11 décembre 2025**, avec des exploitants ou responsables de réseau de chaleur urbains et des industriels (e.g. directeurs d'usine, directeurs énergie ou achats CapEx), dont les réponses ont été anonymisées. Les entretiens menés dans le cadre de cette étude ont au maximum ciblé les sites dont les plages de température (<200°C et 200-500°C) et les besoins thermiques (seuil minimal de 160 GWh_{th}/an) sont compatibles avec des SMR purement calogènes. Plus de 950 responsables industriels et exploitants de réseaux de chaleur ont été sollicités par email et via LinkedIn durant le moins de novembre 2025. Parmi eux, 37 ont accepté de participer à un entretien téléphonique ou visioconférence de 30 minutes à 1 heure.

Nous les avons interrogés sur leurs **critères d'achat, en matière de durée d'engagement, de taille minimale, d'adéquation technique, de profil de charge, de prix et de contexte socio-réglementaire** – ce afin d'évaluer l'attractivité par segment. L'analyse et la synthèse des retours nous ont permis d'établir un scoring comparatif de l'attractivité de chaque segment pour un SMR basse température, et un potentiel marché pondéré.

L'échantillon couvre tous les secteurs étudiés, mais reste indicatif. Les résultats doivent être interprétés comme des tendances, sans généralisation, invitant à des investigations complémentaires pour affiner la stratégie de positionnement.



01

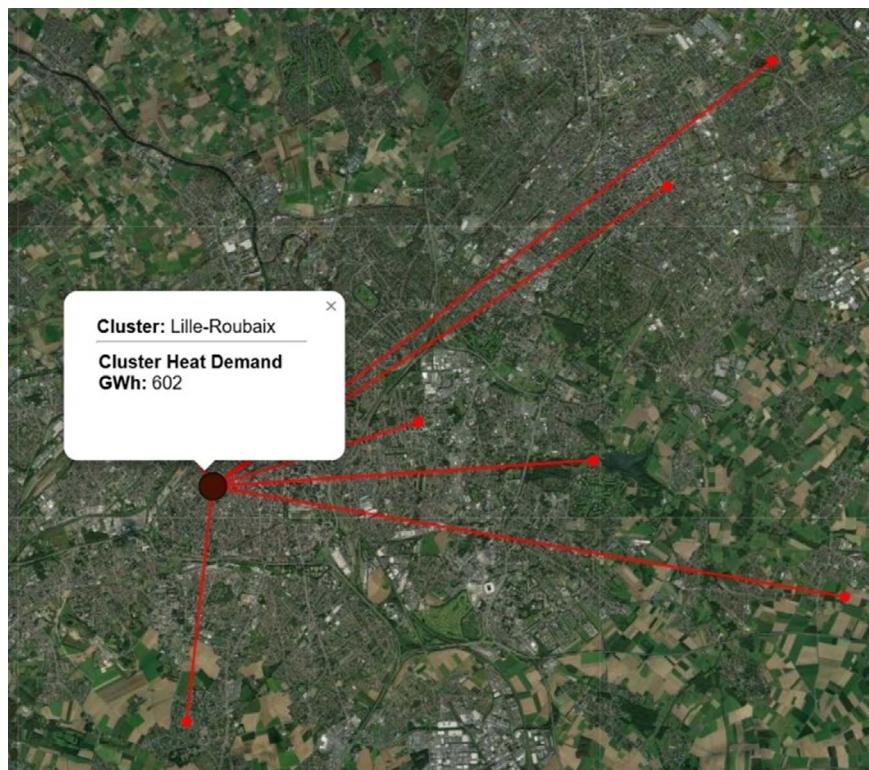
Nous avons observé une forte compatibilité de la chaleur nucléaire basse température avec les réseaux de chaleur urbains (RCU)

Le marché français des RCU représente 30TWh_{th}, dont 12TWh_{th} (région parisienne incluse) atteignant une taille critique, concentrés dans 19 clusters

Le marché français des réseaux de chaleur urbains (RCU) représente actuellement un volume de **30 TWh_{th}**. Porté par les impératifs nationaux de décarbonation, ce secteur devrait tripler pour atteindre **90 TWh_{th}** d'ici 2035, soit une croissance annuelle d'environ 12 %. Cette dynamique est soutenue par l'extension des infrastructures existantes et la création de nouveaux réseaux, une tendance accélérée par les récentes crises énergétiques.

Une mutation technique majeure favorise l'adoption du nucléaire modulaire : la filière généralise la **basse température (BT)**. Comme l'indique un expert d'une grande société de services énergétiques, « les extensions se font systématiquement en basse température, même quand l'ancien réseau est en haute température » et « à terme, tous les réseaux fonctionneront à 110°C aller / 90°C retour, 3 à 5 bars ». Cette évolution répond à une logique économique : les réseaux BT enterrés en pleine terre présentent des coûts d'investissement et d'exploitation significativement inférieurs aux anciennes galeries vapeur.

Figure 2 - Exemple du cluster de Lille-Roubaix : 600GWh annuels



Pour garantir la viabilité économique, un seuil minimal de consommation de **160 GWh_{th}/an** est requis. Si seules quelques grandes agglomérations tels que Bordeaux, Nancy ou Strasbourg atteignent individuellement cette taille, une analyse identifie un potentiel significatif via la mutualisation. **19 clusters** géographiques respectent ce seuil. Leur production annuelle s'échelonne de ~160 GWh_{th}/an (Aix-Marseille) à ~5 000 GWh_{th}/an pour le cluster de la région parisienne, avec une moyenne d'environ 570 GWh/an.

L'étude révèle que ces pôles représentent un marché adressable de **12 TWh/an**, dont 5TWh/an pour la région parisienne seule. Ce modèle est facilité par la présence d'un interlocuteur unique (collectivité ou délégataire), ce qui simplifie le déploiement de cette source de chaleur stable et décarbonée.

Chauffage et eau chaude : les critères d'achat des RCU sont très compatibles avec un SMR calogène

L'intégration de petits réacteurs nucléaires modulaires dans les réseaux de chaleur urbains (RCU) présente une **adéquation stratégique et technique élevée**. Les contrats de délégation de service public, s'étendant généralement sur **25 à 30 ans**, s'alignent parfaitement sur les cycles d'amortissement long terme des actifs nucléaires. Sur le plan technique, les températures requises (autour de 110°C en entrée de réseau) correspondent à la plage de température d'un réacteur calogène basse température. De plus, une puissance unitaire faible (autour de **30 à 45 MW_{th}**) s'insère sans rupture dans les architectures existantes, équivalant à la taille d'une grosse chaufferie urbaine. Économiquement, le prix cible de **50-70€/MWh_{th}** est jugé compétitif et attractif par sa stabilité prévisible face à la volatilité des énergies fossiles. Néanmoins, le succès du déploiement reste conditionné à l'acceptabilité sociale locale et à une évolution du cadre réglementaire, pour permettre à cette chaleur décarbonée d'accéder aux subventions publiques.

Figure 3 - Grille de critères d'achat des RCU

Réseaux de chaleur urbains et de froid							
	Durée d'engagement	Taille critique	Adéquation technique	Profil de charge	Prix	Cont. socio-réglementaire	Adéquation générale
RCU Chaud n=10	●	●	●	●	●	●	DSP alignées avec invest. longs, adéquation tech. et prix alignés
RCU Froid pas d'interview	●	●	●	●	●	●	Taille de marché plus petite et rendement plus faible vs. chaud

Critères d'achat des gestionnaires de RCU

Durée d'engagement : les délégations de service public (DSP) pour les RCU sont sur 20 à 30 ans, aligné avec les investissements long terme

Les délégations de service public (DSP) pour la chaleur se distinguent par des **horizons temporels longs, généralement compris entre 25 et 30 ans**. Un responsable d'une régie énergétique locale souligne que « les concessions sur 30 ans sont aujourd'hui la norme », ce qui s'aligne parfaitement avec les cycles d'amortissement de l'industrie nucléaire. Certains projets d'envergure pouvant atteindre 40 ans.

La structure de ces contrats permet de porter des **investissements capitalistiques (CapEx)** élevés. Le recours à des sociétés de projet dédiées (SPV) est un modèle déjà éprouvé pour la géothermie ou la biomasse, permettant de mutualiser les risques. En cas de changement de délégataire, le mécanisme de reprise de la valeur résiduelle par la collectivité sécurise la pérennité de l'actif sur le long terme.

Taille minimale : la taille des réseaux et la demande annuelle des RCU sont compatibles avec un SMR de 30-45 MW_{th}

Une puissance unitaire de 30 à 45 MW_{th} proposée par ces réacteurs modulaires correspond aux standards actuels des grandes métropoles. Un expert d'un opérateur majeur de services énergétiques précise, par exemple, que « 30 MW, c'est la taille d'une grosse chaufferie », une configuration couramment intégrée dans les réseaux urbains. À titre d'exemple, certaines régies exploitent déjà des chaudières de puissance équivalente pour répondre à des appels de puissance pouvant grimper jusqu'à 190 MW en période hivernale.

Adéquation technique : les niveaux de température des RCU (~110°C) sont alignés avec la basse température nucléaire

L'évolution technologique des réseaux urbains favorise l'intégration de la chaleur nucléaire. La filière opère une **transition généralisée vers la basse température (BT)**, y compris pour les extensions de réseaux historiques fonctionnant initialement en haute température. Les experts prévoient qu'à terme, « tous les réseaux fonctionneront à 110°C aller / 90°C retour », une plage de température strictement identique à celle du réacteur étudié.

D'un point de vue réglementaire, **opérer sous le seuil des 120°C est un avantage majeur**, car cela réduit les contraintes liées aux équipements sous pression et simplifie les coûts d'intégration.

Profil de charge : la monotone consommation est compatible avec une fourniture nucléaire en base voire semi-base

La consommation des RCU est marquée par une **forte saisonnalité, nécessitant une source stable pour couvrir la charge de base**. Dans ce schéma, le réacteur nucléaire remplace avantageusement d'autres sources continues comme l'incinération ou la géothermie. Un appoint flexible (souvent au gaz) reste nécessaire pour gérer les pics hivernaux.

Toutefois, **le réacteur doit être capable de réduire sa puissance en été pour ne pas saturer le réseau** lorsque la demande se limite à l'eau chaude sanitaire. Contrairement à l'industrie, les RCU offrent une plus grande souplesse, car ils ne sont pas soumis à des impératifs de continuité de process absolu.

Adéquation prix : 50-70€/MWh_{th} est un prix compatible, notamment car stable sur le long-terme

Le prix cible de **50-70€/MWh_{th}** est jugé **attractif**, principalement en raison de **sa stabilité prévisible sur 20 à 30 ans**. Cette prévisibilité est un argument de poids face à la volatilité du gaz et aux incertitudes pesant sur la biomasse. Bien que la biomasse soit compétitive aujourd’hui, les opérateurs s’inquiètent de sa disponibilité future en raison de conflits d’usage croissants. De plus, le coût complet du gaz (incluant les taxes et le carbone) dépasse souvent les 55€/MWh_{th}, rendant l’option nucléaire immédiatement pertinente.

Contexte socio-réglementaire : l’acceptabilité locale, la complexité réglementaire et l’absence de subventions restent les principaux points à anticiper

L’acceptabilité locale demeure le principal point de vigilance. Dans certaines villes où le nucléaire fait déjà partie du paysage industriel, **les élus sont favorables en raison des retombées financières et de la réduction des nuisances sonores** (absence de camions de livraison par rapport à la biomasse). À l’inverse, l’implantation en zone urbaine dense soulève des craintes et se heurte à des calendriers électoraux qui peuvent freiner les décisions politiques à court terme.

Enfin, l’absence actuelle de subventions publiques pour le nucléaire (contrairement aux EnR soutenues par l’ADEME) constitue un désavantage économique structurel qu’il conviendra de lever pour assurer le déploiement massif de ces solutions.



02

**Les industriels
ont en majorité
une demande
en chaleur peu
compatible avec
le nucléaire**

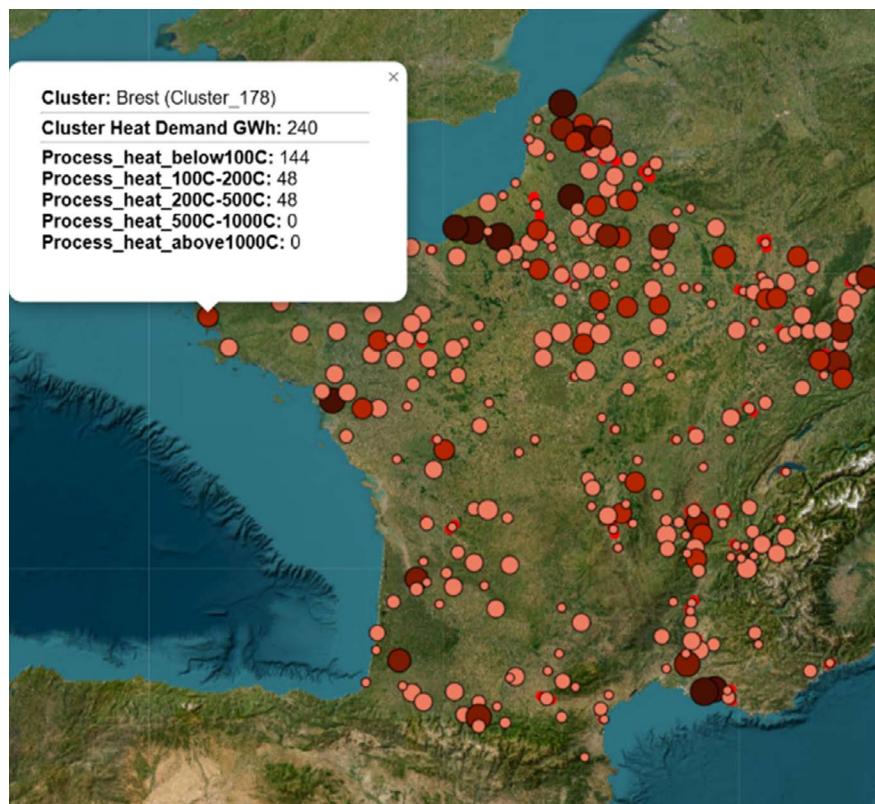
A partir de 160GWh_{th} par site ou cluster et avec des critères d'achat compatibles, la chaleur industrielle théoriquement adressable en France est de 4-8 TWh en BT et MT (0-200°C) et de 10-15 TWh en intégrant la HT (0-500°C)

Une estimation *top-down* avait été réalisée par le cabinet E-Cube pour la SFEN³, qui donnait une **consommation totale de 170TWh thermiques sur la France, dont 70 TWh théoriquement adressables par les SMR** – ces 70TWh étant ceux correspondant aux industries dont la plage de température utilisée est compatible, et dont les clusters d'entreprises voisines (éloignement maximal de 20km) ainsi formés ont une consommation supérieure à 160GWh annuels de chaleur adressable.

Nous avons reconstitué la demande de manière *bottom-up* en nous basant sur les données d'émissions de systèmes européens ETS et EPRTR, avec des facteurs d'émissions par industrie, données provenant du projet européen Citiwatts⁴. Nous avons enrichi la base de données avec les industries manquantes comme les produits laitiers, le raffinage d'huiles alimentaires, les amidonneries-sucreries-distilleries – mais nous n'avons pas ajouté toutes les industries agroalimentaires car celles-ci sont très dispersées.

Pour identifier la part accessible aux petits réacteurs modulaires, l'étude a ciblé **542 sites industriels majeurs représentant un volume de consommation de 100 TWh**. Cette évaluation pourrait être complétée avec les données ETS⁵ des nombreux industriels de l'agroalimentaire, dont la plage de température utilisée pour l'approvisionnement est le plus souvent inférieure à 200°C, donc intéressante pour un réacteur basse température, mais dont les consommations sont faibles, en-dessous de 50GWh annuels.

Figure 4 - 542 sites et 113 clusters industriels (<15km)



3- Etude E-Cube pour la SFEN – marché des SMR et AMR en France

4- Citiwatts - <https://citiwatts.eu/>

5- EU-ETS – Union Registry public website

Nous avons ensuite regroupé les industriels dans des clusters d'un diamètre de 15km, afin de calculer la demande en chaleur maximale théorique cumulée si ceux-ci étaient amenés à mutualiser leurs achats autour d'un même réseau de chaleur (sans pour autant mutualiser avec les RCU). **Nous avons trouvé 113 clusters de plus de 2 sites, représentant 374 sites sur les 542 au total, plus 168 sites isolés.** Si on filtre sur la plage de température jusqu'à 500°C, et avec une consommation supérieure à 160GWh_{th}/an, on trouve une demande en chaleur de l'ordre de 65TWh.

Toutefois, les industriels ainsi identifiés, nous ont fait part d'un certain nombre de contraintes, que l'on a regroupées en **6 critères d'achat** (voir grilles de critères d'achat et encadrés). Nous avons pondéré la demande en chaleur par ces critères d'achat afin d'obtenir une demande pondérée, plus proche du potentiel réel en chaleur industrielle adressable par des réacteurs calogènes.

En définitive, en filtrant les besoins avec une consommation supérieure à 160GWh_{th}/an, et en appliquant les critères d'achat industriels, **le marché adressable réel sur la plage 0-200°C est estimé entre 4 et 8 TWh**. Ce potentiel est particulièrement concentré dans les sociétés agroalimentaires, les industries papetières et de fibres, ainsi que la chimie de basse et moyenne température.

Suivant la même méthodologie (consommation >160GWh_{th}/an et pondération par les critères d'achat industriels), **le marché adressable réel sur la plage 0-500°C est estimé entre 10 et 15 TWh**. En comparaison au segment inférieur à 200°C, l'élargissement à la plage 200-500°C comprend les besoins supplémentaires dans la chimie et la distillation, venant s'ajouter aux usages déjà couverts à basse température. A titre d'illustration, la start-up Jimmy Energy étudie un projet de SMR sur le site industriel de Bazancourt (Marne) afin de fournir de la chaleur décarbonée à l'usine du groupe Cristal Union, ce qui constitue l'un des premiers projets concrets de ce type en France.

Figure 5 - Carte des clusters industriels (>160 GWh/an) jusqu'à 500 °C

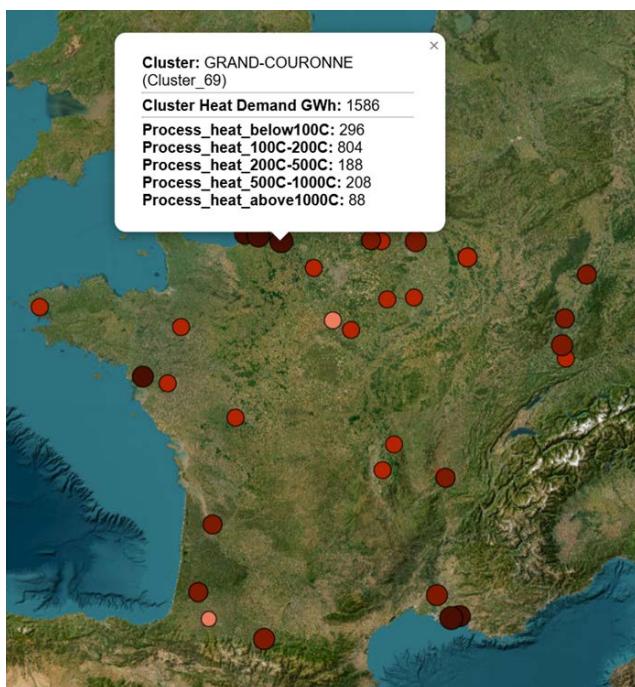
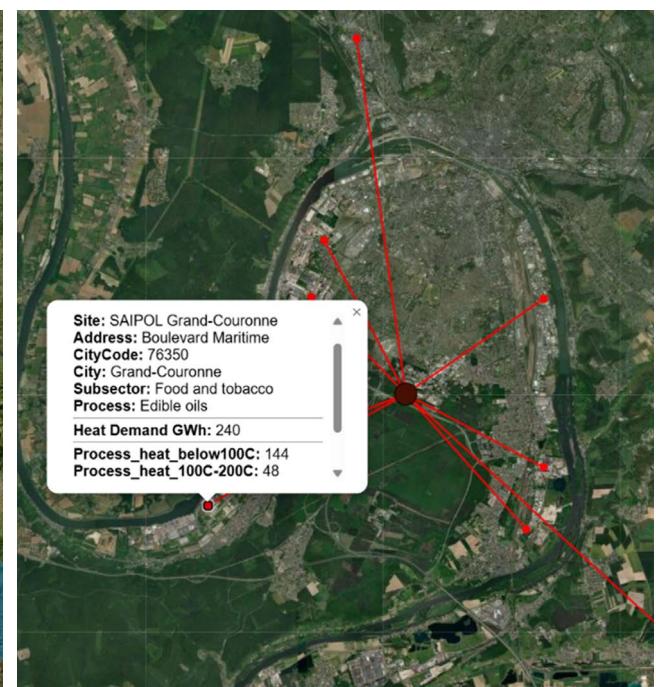


Figure 6 - Zoom sur un cluster, ici à Grand-Couronne, à côté de Rouen



Chaleur industrielle basse et moyenne température (BT et MT, <110°C et 110-200°C) : les critères d'achat sont globalement défavorables, sauf cas précis ou en cas de cluster dense

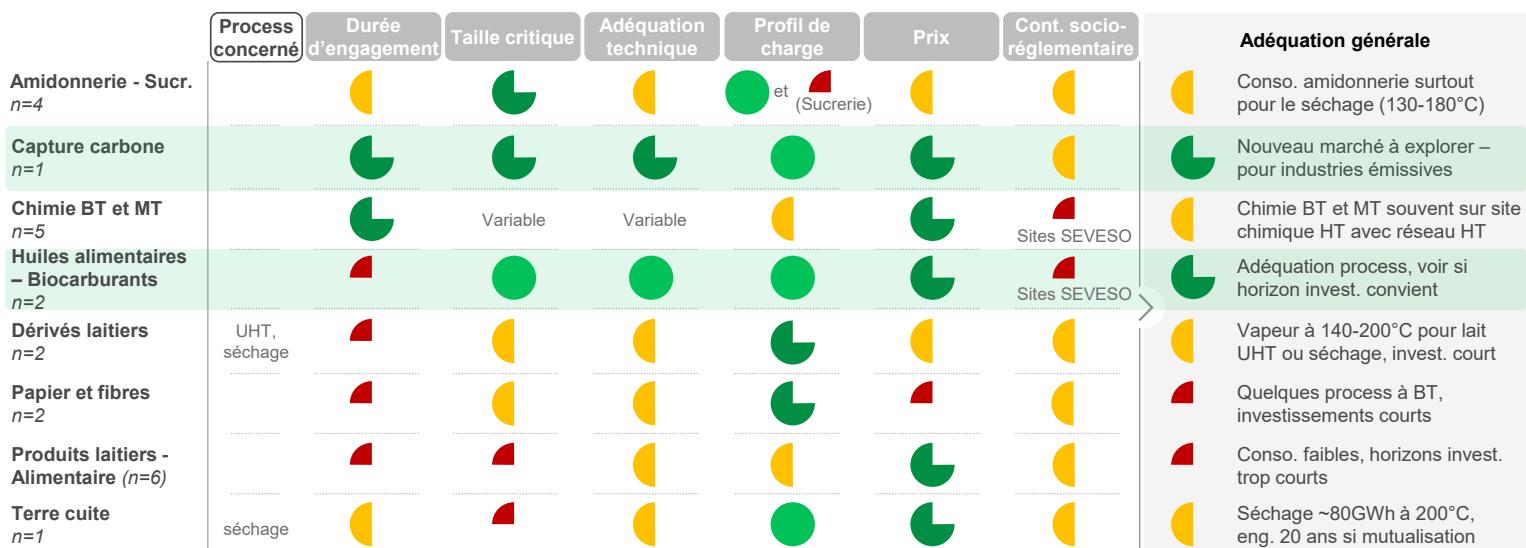
L'adéquation des réacteurs modulaires avec les industries opérant à basse et moyenne température (< 200°C) se heurte à des obstacles structurels majeurs. Alors que le nucléaire exige des engagements sur vingt à trente ans, les industriels de ces segments privilégident des retours sur investissement courts, idéalement entre trois et huit ans. Un responsable d'une société de produits laitiers souligne ainsi que « **les projets sont à horizon 7-9 ans [...] car le business est trop volatil** ».

De plus, les puissances supérieures à 30-45 MW_{th} s'avèrent souvent **surdimensionnées pour des sites isolés**, imposant une mutualisation complexe au sein de clusters. Techniquement, si la chaleur à basse température couvre certains besoins de préchauffage dans les procédés industriels, l'atteinte de températures supérieures nécessite des équipements de recompression vapeur ou des solutions de chauffe d'appoint qui augmentent le coût et la complexité de l'installation.

Économiquement, le prix de 50-70€/MWh_{th} est jugé acceptable mais **peu incitatif pour dépasser l'ensemble des contraintes associées**, notamment face à des alternatives encore subventionnées par l'ADEME comme la biomasse.

Enfin, les contraintes de sûreté, liées au risque de durcissement des classements SEVESO, et le refus d'endosser le statut d'opérateur nucléaire constituent des freins réglementaires et réputationnels décisifs.

Figure 7 - Grille de critères d'achat des industriels basse et moyenne températures (<200°C)



Critères d'achat des industriels basse et moyenne température (<200°C)

Durée d'engagement : les industriels BT et MT privilégient des investissements avec ROI à 3-8 ans, et plus rarement jusqu'à 20 ans

Le principal frein réside dans l'incompatibilité des cycles économiques. Alors que le secteur nucléaire nécessite des engagements d'achat sur 20 à 30 ans pour amortir des actifs capitalistiques lourds, les industriels de la BT et MT privilégient des **retours sur investissement (ROI) extrêmement courts, compris entre 3 et 8 ans**.

Dans la majorité des secteurs, les arbitrages sont court-termistes. Une société papetière souligne que « **20 ans, c'est bien trop long** », tandis qu'un responsable d'une entreprise de produits laitiers explique que « **le business est trop volatil** » pour prédire les besoins au-delà de 15 ans, les habitudes de consommation évoluant trop rapidement. Seul le secteur du captage de CO₂ fait exception, avec des contrats déjà habitués à des durées de 20 à 25 ans.

Des acteurs des secteurs de l'amidonnerie/sucrierie/distillerie ont mentionné pouvoir accepter **des contrats de fourniture d'énergie sur 20 ans à condition que le CapEx soit exclusivement porté par un tiers**, comme pour les installations biomasse ou géothermie. Certains acteurs sont eux aussi ouverts à un « **Steam Purchase Agreement sur 20 ans** », à condition de ne pas exploiter eux-mêmes le nucléaire.

Taille minimale : une puissance minimale de 30MW_{th} est généralement trop élevée ce qui nécessite d'avoir des clusters (sauf pour certains procédés laitiers ou la capture carbone)

Une puissance supérieure à 30 MW_{th} d'un SMR type s'avère souvent surdimensionnée pour les sites isolés de ce segment. Par exemple, les besoins sur la plage 0-200°C d'une sucrerie ou d'une amidonnerie plafonnent souvent à 10 MW_{th}, rendant le réacteur inadapté sans mutualisation ou solution de chauffe complémentaire.

Dans l'agroalimentaire, de nombreux sites consomment des volumes jugés négligeables par rapport à la puissance du réacteur (le plus souvent en-dessous de 50 GWh/an). **La constitution de clusters industriels est donc une nécessité absolue, mais elle se heurte à des contraintes de distance**. Un expert d'une société agroalimentaire estime que « **7 km, c'est déjà trop pour mutualiser** », ce qui restreint considérablement le nombre de zones géographiques éligibles.

Adéquation technique : alors qu'un SMR à 500°C peut couvrir l'intégralité des besoins caloriques, un SMR à 110°C peut en couvrir une partie, avec des adaptations supplémentaires pour générer de la vapeur jusqu'à 200°C

Sur le plan technique, un réacteur délivrant une chaleur à 110°C peut **couvrir les besoins de préchauffage, mais une grande partie des procédés industriels** (notamment le séchage ou l'évaporation) **requiert de la vapeur entre 130°C et 200°C**. Pour atteindre ces niveaux, l'installation de systèmes de recompression mécanique de vapeur (RMV) ou de pompes à chaleur haute température est nécessaire, ce qui implique un « **CapEx client [additionnel] important** » et une complexité opérationnelle accrue.

En revanche, des **huiles alimentaires et des biocarburants présentent un processus autour de « 100-110°C**

quoique l'intérêt soit freiné par d'autres critères d'achat, notamment réglementaires. Par ailleurs, le **process de recapture du CO₂** requiert une vapeur de reboiler de solvant à **110 à 135°C**, compatible avec des SMR très basse température.

Profil de charge : les industries BT fonctionnent le plus souvent en continu, mais avec un profil de charge variable

Les industries de basse température présentent des besoins énergétiques contrastés. Les secteurs thermointensifs comme **la chimie ou les huiles fonctionnent en continu**, offrant une demande stable idéale pour une fourniture nucléaire en base, à condition de synchroniser rigoureusement les calendriers de maintenance.

Cependant, le **segment agroalimentaire subit une forte variabilité** avec des appels de puissance non linéaires et des pics soudains. Des opérations spécifiques (e.g., la pasteurisation) exigent des montées en température ultra-rapides que seules les chaudières gaz assurent grâce à leurs « ramp rates » élevés. Cette exigence de flexibilité limite l'attrait d'un réacteur nucléaire, qui nécessite un taux d'utilisation élevé pour amortir les forts CapEx.

Adéquation prix : un LCoH de 50-70€/MWh_{th} hors subventions se situe dans la moyenne – mais les industriels voudraient des prix inférieurs en contrepartie de l'engagement d'investissement long

Le LCoH (Levelized Cost of Heat) cible de **50-70€/MWh_{th}** est jugé acceptable dans l'absolu, mais il manque d'attractivité face aux alternatives locales. Pour accepter un engagement de 20 ans, les industriels exigent une décote significative par rapport au prix du marché. Actuellement, la biomasse (30-40€/MWh_{th}) et certaines pompes à chaleur industrielles (~50€/MWh_{th}) offrent des coûts variables de production compétitifs, pour un LCoH comparable. De plus, contrairement aux énergies renouvelables, le nucléaire ne bénéficie pas des subventions de l'ADEME, qui peuvent représenter 30 à 40 % de l'investissement initial, créant un désavantage structurel majeur.

Par ailleurs, ce niveau de prix n'est jugé attractif que sous plusieurs conditions opérationnelles. Les industriels soulignent notamment que le SMR doit pouvoir couvrir seul la charge thermique, sans nécessiter une solution de secours coûteuse, fonctionner sans systèmes additionnels de recompression, et garantir des arrêts de maintenance limités, tant en fréquence qu'en durée.

Contexte socio-réglementaire : les contraintes SEVESO, le niveau d'acceptabilité sociale et le manque d'accès aux subventions sont les points à anticiper

L'installation d'un réacteur sur un site industriel soulève des **inquiétudes majeures liées aux contraintes SEVESO**. Les industriels craignent qu'une unité nucléaire ne « rajoute du risque au risque existant » ou ne durcisse les exigences de sûreté et d'organisation humaine. Enfin, le risque réputationnel est explicite : une société de sucrerie affirme ainsi : « nous ne voudrions pas être les premiers à tester un SMR ». Dans tous les cas, les industriels préféreraient ne pas porter l'investissement, mais avoir une structure légale dédiée tel un SPV.



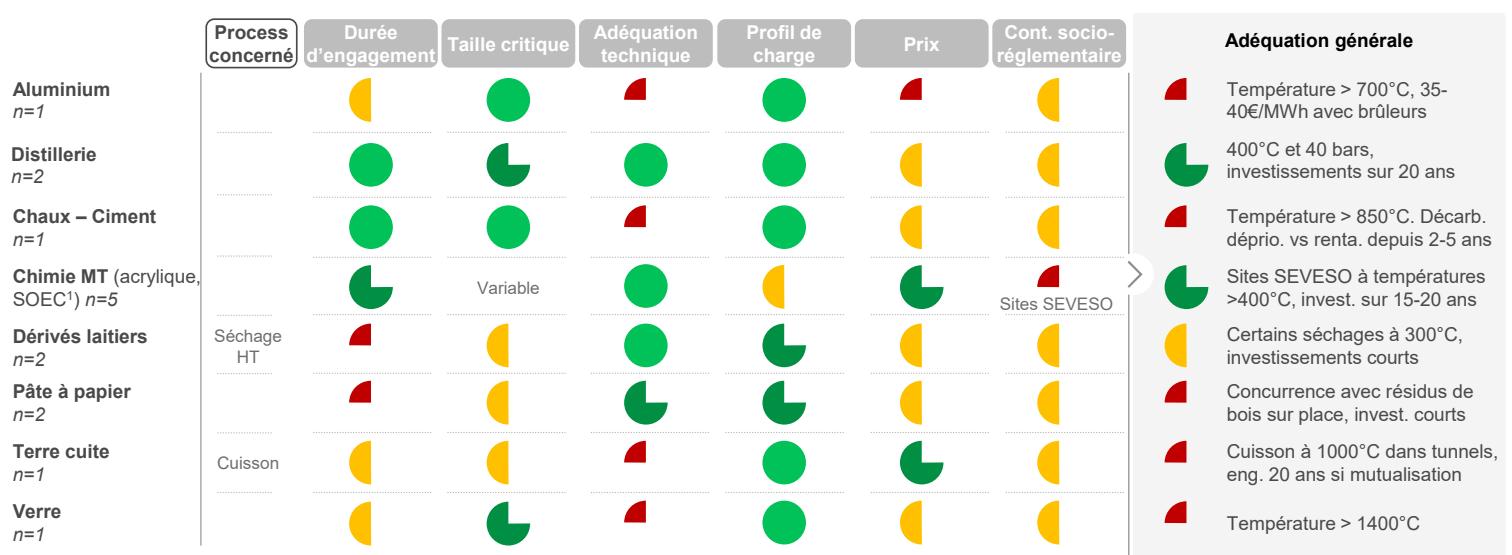
Chaleur industrielle HT (200-500°C) : le cadre d'achat est plus propice que pour la BT et MT, sans toutefois atteindre le niveau observé pour les RCU

Les réacteurs modulaires (SMR) à basse température apparaissent **plus adaptés aux industries à besoins thermiques élevés** qu'aux industries strictement basse température, dès lors que les **besoins en chaleur n'excèdent pas 500°C** (température maximale pour un SMR). Comme pour les industries basse température, une seconde condition s'impose : **des durées d'engagement supérieures à 20 ans, a fortiori dans un schéma de mutualisation**, comme l'ont souligné plusieurs responsables interrogés.

Dans ce périmètre, les secteurs qui réunissent simultanément la compatibilité thermique et des durées d'engagement suffisantes sont **la distillerie et la chimie à température moyenne**. Certains secteurs ne satisfont qu'une partie des conditions. Les dérivés laitiers présentent une adéquation satisfaisante du point de vue des températures, mais les durées d'engagement observées sont trop faibles pour constituer un socle contractuel robuste. La chaux, à l'opposé, s'inscrit généralement dans des horizons d'engagement supérieurs à 20 ans, mais ses besoins thermiques excèdent les capacités visées, avec des températures de procédé typiquement supérieures à 850°C.

Au-delà de ces deux critères structurants, température requise et durée d'engagement, **les autres paramètres d'achat ne se distinguent pas suffisamment selon les secteurs pour créer une différenciation nette**. La majorité des sites exprime une taille critique correspondant à des puissances supérieures à 30-45 MW_{th} et privilégie des profils de charge stables. La sensibilité au prix est élevée, avec une attente généralement inférieure à 50€/MWh ; comme le résume un dirigeant d'une entreprise de chimie, « l'indicateur économique prend désormais le dessus sur l'indicateur décarbonation ». Enfin, le contexte socio-réglementaire demeure un facteur limitant : la plupart des sites ne méfient des contraintes supplémentaires potentielles associées au statut SEVESO et ne souhaitent pas assumer les contraintes associées au statut d'« opérateur nucléaire ».

Figure 8 - Grille de critères d'achat des industriels haute températures (200-500°C)



1. Solide oxide electrolyzer cell

Critères d'achat des industriels haute température (200-500°C)

Durée d'engagement : les industriels HT n'acceptent que rarement les engagements dépassant 15 ans, sauf lorsque certaines conditions sont réunies

La majorité des industriels de la haute température n'accepte que rarement des engagements d'achat de chaleur dépassant **10 à 15 ans**. Pour certains secteurs comme l'aluminium, les projets sont limités à des **retours sur investissement (ROI) de 10 ans maximum**. Dans la sucrerie, l'horizon est encore plus court avec un « payback de 4-5 ans », aligné sur les projets biomasse subventionnés.

Cependant, des engagements sur **20 ans deviennent envisageables sous conditions strictes** : le portage financier par un tiers, la mise à disposition simple du terrain sans exploitation directe du nucléaire, ou la mutualisation entre plusieurs acteurs. Un responsable dans le secteur de la chaux précise qu'un tel engagement serait « possible mais surtout dans le cadre d'une mutualisation ». En chimie, des acteurs se disent ouverts à des contrats de vapeur sur 20 ans si le **prix est extrêmement compétitif**.

Taille minimale : une puissance de 30 à 45 MW_{th} et une consommation de 160GWh_{th} sont compatibles pour les industriels HT

Contrairement aux sites de basse et moyenne températures, les industries HT opèrent généralement à **grande échelle**, ce qui les rend aptes à absorber des puissances supérieures à 30 à 45 MW_{th}.

De nombreux sites dépassent largement le seuil critique de **160 GWh/an** requis pour la viabilité du réacteur. À titre d'exemple, les fours de fusion dans l'aluminium peuvent consommer jusqu'à

700 GWh/an, tandis que les besoins dans le secteur de la chaux atteignent **320 à 450 GWh/an**. Cette concentration de la demande simplifie théoriquement le déploiement en évitant la complexité de clusters multi-acteurs.

Adéquation technique : un SMR à 500°C couvrirait une partie des besoins industriels à haute température

Certains procédés coeurs de la HT, comme ceux des **distilleries** (200-400°C), de la **chimie MT** (300°C) ou des **dérivés laitiers** (80-200°C), représentent des niveaux thermiques adressables par un réacteur à 500°C. D'autres, tels que **l'aluminium** (700°C), **la chaux** (850 °C) et **le verre** (1600°C), ne le sont pas. Pour ces industries, le réacteur modulaire ne peut répondre qu'à des besoins secondaires comme le préchauffage, l'eau chaude sanitaire ou la capture de CO₂ - déjà couverts par la récupération de chaleur fatale ou la détente du réseau de vapeur existant.

Profil de charge : les profils de consommation stable des industries haute température sont compatibles avec un SMR, complétés au besoin par des appoints modulants

Les industries HT offrent les profils de consommation les plus compatibles avec une source nucléaire continue. Les secteurs thermointensifs comme **les distilleries ou la chimie opèrent en 3×8, 24h/24**, avec une demande de chaleur extrêmement stable. Certains sites sucriers ou amidonniers ne prévoient que « moins de 10 jours d'arrêt tous les 18 mois ». Cette stabilité garantit un facteur de charge élevé, **à condition toutefois d'aligner rigoureusement les calendriers de maintenance** du réacteur avec ceux de l'industriel pour éviter toute perte d'exploitation.

Adéquation prix : les industriels haute température attendent des prix compétitifs, inférieurs à 50€/MWh, hors coût du carbone

Bien qu'un prix de **50–70€/MWh_{th}** soit jugé acceptable par les acteurs exposés à la hausse du coût du carbone (ETS), il reste trop élevé pour la majorité des industriels HT face à leurs références internes. Dans l'aluminium, par exemple, des brûleurs gaz performants ramènent le coût marginal à **35–40€/MWh_{th}**.

Le réacteur modulaire souffre également de la comparaison avec la biomasse subventionnée dont les coûts sont « quasiment imbattables » autour de 50€/MWh_{th}. Un gain de compétitivité, via des économies d'échelle sur des modules plus puissants ou un facteur de charge optimisé, est jugé nécessaire pour ouvrir réellement ces débouchés.

Contexte socio-réglementaire : au-delà des réserves déjà identifiées, la pression pour décarboner baisse au profit de la rentabilité

L'implantation sur site se heurte aux **contraintes SEVESO** et à la crainte d'un

durcissement des exigences de sûreté. Les industriels refusent catégoriquement d'endosser le statut d'**«opérateur nucléaire»**. Dans le secteur de la sucrerie, la volonté est claire : « ne pas devenir exploitant nucléaire ».

De plus, on observe depuis le début des années 2020 une **baisse de la pression à décarboner** au profit de la rentabilité immédiate. Trois raisons principales expliquent ce recul :

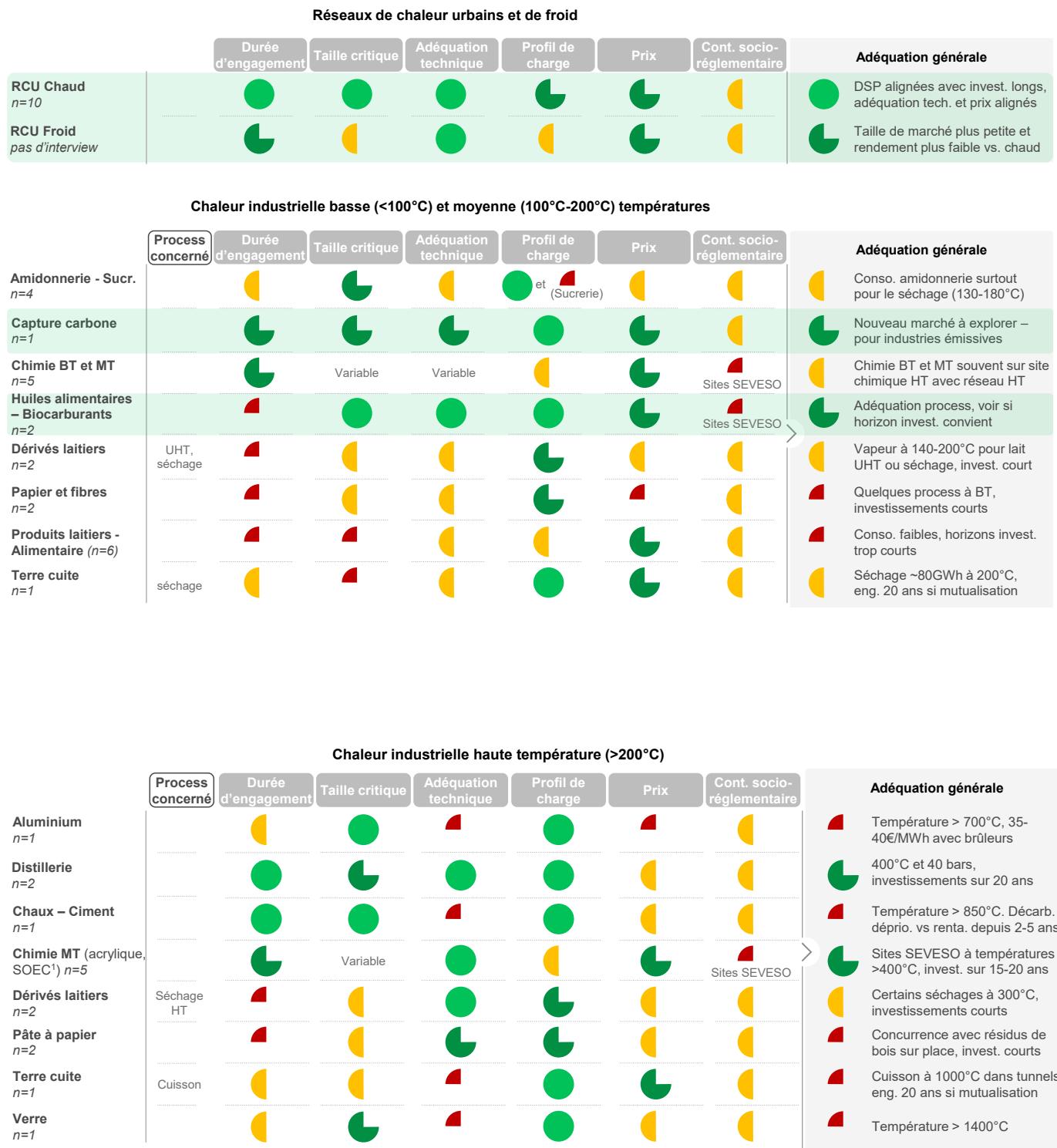
1. L'intensification de la **concurrence internationale** (USA, Chine) qui fragilise la compétitivité européenne et impose des ROI courts.
2. La réduction des budgets décarbonation dans les groupes détenus par des fonds d'investissement ou des actionnariats privés.
3. L'anticipation d'une **trajectoire ETS basse**, réduisant l'incitation économique à abandonner le gaz.

Un dirigeant d'une société de chimie résume ainsi la situation : « **l'indicateur économique prend désormais le dessus sur l'indicateur décarbonation** ».

Annexe

**Grilles des critères d'achat
pour les RCU et les industriels**

Grilles des critères d'achat pour les RCU et les industriels



1. Solide oxide electrolyzer cell

