

Cogénération nucléaire

Intérêts et potentiels d'une offre de chaleur basse température pour l'industrie française

Rapport final d'étude



Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

Consortium de Valorisation Thématique ANCRE

Auteur : S. SYLVESTRE



Synthèse du rapport et des résultats d'étude

La cogénération nucléaire – soit l'utilisation de l'énergie thermique des réacteurs nucléaires à des fins autres que la production électrique – a été mise en œuvre depuis les années 1960 principalement dans les pays de l'ex-Union Soviétique. Quelque 70 réacteurs nucléaires dans le monde fournissent aujourd'hui encore à la fois de l'électricité et de la chaleur, essentiellement pour le chauffage urbain et le dessalement d'eau de mer. En France, l'option d'un petit réacteur dédié, Thermos, a été étudiée de 1977 à 1981 pour le chauffage de Grenoble puis celui de Paris depuis le site de Saclay, avant d'être abandonnée pour des raisons économiques.

Face à la nécessité de décarboner l'ensemble des usages énergétiques, l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCRE) s'est ré-intéressée à partir de 2012 aux économies de combustibles fossiles qui pourraient être permises par une utilisation de chaleur extraite des centrales nucléaires du parc français, illustrant sa pertinence au travers d'un scénario¹ de transition énergétique retenu pour l'une des quatre trajectoires dessinées dans le cadre du Débat National de 2013 sur la Transition Énergétique. La présente étude du Consortium de Valorisation Thématique de l'ANCRE vise à évaluer les perspectives d'utilisation de la cogénération nucléaire pour satisfaire certains besoins de chaleur industrielle. Elle s'attache à caractériser le besoin de l'industrie française en chaleur à une température inférieure à 250°C – température maximum permise par la technologie de réacteurs à eau pressurisée – et à évaluer la part de ce besoin susceptible d'être couverte par une offre issue de cogénération nucléaire.

Réalisée en 2014 et 2015, cette étude a été menée par le Service de Bibliométrie et d'Études Marketing du CEA. Elle a été supervisée par des représentants de l'IFPEN, du CNRS, des Universités (CPU) et de la Direction de l'Énergie Nucléaire du CEA.

Les **principales conclusions de l'étude** sont les suivantes :

- **Il existe bien en France un marché important, qui plus est avec un potentiel de croissance significatif, pour une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire**

Sur 103 TWh² de chaleur consommés à moins de 250°C par l'industrie française, le potentiel du marché accessible à la chaleur nucléaire produite par cogénération est évalué a minima à 22 TWh annuels, répartis pour l'essentiel entre trois secteurs : l'agro-alimentaire, la chimie et la papeterie. Des secteurs dans l'économie desquels la chaleur pèse lourd et dont les acteurs interrogés apparaissent particulièrement réceptifs.

De plus, le besoin à couvrir présente un profil de grande régularité à court terme – principalement un régime en « 3x8 » week ends compris – et d'équilibres saisonniers décorrélés des besoins de chauffage, soit un profil à faibles fluctuations de demande *a priori* bien adapté au fonctionnement des centrales. Le marché évalué correspond pris dans son ensemble à 1,8% de la capacité thermique du parc nucléaire avant conversion électrique, soit un volume susceptible de permettre une optimisation du facteur de charge des centrales – en particulier en envisageant le déploiement de certaines capacités de stockage thermique – sans atteindre des niveaux trop nettement problématiques pour l'équilibre de la production électrique.

L'équilibre des productions reste évidemment à évaluer pour chaque site de production électronucléaire : décliné par site, le marché atteindrait près de 5 TWh à Gravelines, de 2 à 3 TWh pour 7 autres sites, et excéder 1 TWh pour 3 autres centrales.

¹ Scénario « Vecteurs diversifiés » (DIV) du rapport de l'ANCRE « Les scénarios énergétiques » (2013)

² Tous les chiffres s'appuient sur les données 2012 de l'enquête annuelle du CEREN, voir détails ci-après.

Enfin ce marché devrait rester durablement en développement, des relais de croissance se trouvant d'abord dans l'alimentation de réseaux de chaleur intégrés à une logique d'infrastructure partagée (« autoroutes de chaleur ») voire d'éco-parcs industriels – ouvrant l'offre à des clients aux besoins plus modestes – puis dans le service de filières industrielles émergentes telles qu'agro-carburants, chimie verte, hydrogène pour le transport ou le stockage d'énergie, matériaux bio-sourcés ou composites, biomasse combustible sèche, etc.

- **La France, seule et a fortiori avec l'appui d'autres acteurs européens, dispose bien aujourd'hui des capacités technologiques et industrielles pour déployer une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire à destination de l'industrie**

La France dispose d'acteurs sur toute la chaîne de valeur et sous-traitance de la chaleur industrielle, ainsi que d'un savoir-faire d'ensemble reconnu au meilleur niveau mondial, avec notamment deux industriels de premier rang pour les réseaux de chaleur : EDF-Dalkia et Engie-Cofely. Même si le pays n'apparaît pas dans le peloton de tête de l'innovation technologique dans la chaleur industrielle, les acteurs français apparaissent pleinement en mesure de construire et administrer un réseau de chaleur cogénérée à destination de l'industrie. Qui plus est, les capacités européennes – allemandes en particulier – apparaissent bien au meilleur niveau mondial.

Dans le détail du procédé, aucun verrou technologique n'est apparu dans l'étude, l'innovation technologique toujours souhaitable apparaissant plutôt comme levier de facilitation que comme nécessité. L'étape clé demeure le transport de plusieurs dizaines de Mégawatts d'eau chaude ou de vapeur, à assurer sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres, pour un nombre de sites clients limités (de l'ordre de 260 sites, dont une moitié de sites consommant plus de 50 GWh annuels). Soit un besoin fortement concentré qui impliquera la constitution d'un réseau limité de puissantes « autoroutes thermiques » qui nécessiteront des investissements importants dont le modèle économique est à trouver mais dont le rapport coût/énergie transportée devrait permettre d'envisager une offre de chaleur compétitive.

Cet aspect financier s'exprime d'ailleurs à travers l'expérience des collectivités sur les réseaux de chaleur territoriaux – particulièrement ceux qui intégrant des sources ou consommations industrielles – qui révèle une véritable difficulté à bâtir des modèles de financement, d'affaire et de partage des risques permettant à des industriels de s'y intégrer dans la durée. Une difficulté qui appelle la mise en place de politiques incitatives voire contraignantes sur ces sujets mais permet en miroir d'envisager la cogénération nucléaire comme un facilitateur voire un catalyseur du développement de réseaux de chaleur nouveaux et à grand potentiel de décarbonation énergétique, comme l'étude a permis de le mesurer dans des territoires déjà engagés sur l'extension des réseaux de chaleur historiques, tels que Dunkerque ou la métropole lyonnaise.

- **La chaleur industrielle issue de cogénération nucléaire présente assurément une forte pertinence à la fois pour la transition énergétique et la réindustrialisation nationale**

Etant donné la concentration du besoin pertinent, il est à noter que l'offre de chaleur à l'industrie vient en complément des recherches de progrès sur l'efficacité énergétique des procédés industriels ou la valorisation des énergies récupérables sur un même site, bien plus qu'en concurrence. La chaleur issue de cogénération nucléaire viendrait donc directement en substitution de capacités aujourd'hui principalement assurées par des combustibles hydrocarbures, gaz et fioul principalement. Dans ce sens, la fourniture de 22 TWh de chaleur décarbonée permettrait de réduire de plus de 6 millions de tonnes les émissions annuelles de CO₂, soit 7,4% des émissions de l'industrie française. Parallèlement, l'économie de combustibles fossiles importés qui en résulterait allègerait d'au moins 700 M€ la facture énergétique nationale.

De plus, si l'évaluation du prix de distribution envisageable pour la chaleur cogénérée implique des études technico-économiques hors cadre de l'étude, il est probable que la chaleur offerte présente une compétitivité réelle avec l'utilisation d'énergies fossiles. En ce sens, elle pourrait contribuer à soutenir en cascade la compétitivité de secteurs-clients évoluant dans un environnement international très concurrentiel comme l'agro-alimentaire et/ou en difficulté chronique comme la papeterie et la chimie. Ce faisant, elle soutiendrait des secteurs importants pour l'économie, l'emploi voire la souveraineté nationale.

Parallèlement, les acteurs de la chaleur industrielle pourraient, à l'occasion du déploiement des infrastructures de transport et de distribution soutenir un savoir-faire valorisable à l'export, y compris bien sûr en soutien aux offres à l'international de la filière nucléaire française.

Enfin et peut-être surtout, les filières d'avenir citées plus haut – agro-carburants, chimie verte, matériaux bio-sourcés, biomasse, hydrogène, recyclage – présentent a priori un profil de consommation dans lequel la chaleur à une température inférieure à 250°C jouera un rôle important. La cogénération nucléaire peut donc contribuer de manière décisive au développement et aux choix d'implantation de ces nouvelles filières d'économie circulaire.

Au total, l'étude réalisée pour l'ANCRE aura permis de caractériser l'intérêt du déploiement d'une offre de chaleur issue de cogénération à destination de l'industrie pour l'opérateur des centrales nucléaires françaises, dans la perspective de la transition énergétique, ainsi que de préciser les premiers éléments de faisabilité. Pour aller plus loin, il importera de réaliser des analyses notamment technico-économiques plus poussées, en les intégrant dans une approche territorialisée et plus complète de l'approvisionnement de réseaux de grands réseaux de chaleur urbains, industriels et mixtes.

Table des matières

I. Quelques éléments introductifs	9
a. La cogénération nucléaire dans le monde, bref point de contexte	9
b. Contexte et objectifs de l'étude menée pour le CVT de l'ANCRE.....	10
c. Pilotage et réalisation de l'étude.....	12
d. Phasage et calendrier de l'étude	13
II. Evaluation et caractérisation du besoin de chaleur de l'industrie française	14
a. Chaleur industrielle : périmètre de l'analyse.....	14
▪ Industries manufacturières et énergétiques.....	14
▪ Activités para-industrielles	15
b. Besoins des industries manufacturières – méthodologies d'analyse	16
▪ La source CEREN	16
▪ Les secteurs / segments porteurs d'un besoin significatif	17
▪ Consolidation d'analyse et sources complémentaires	21
▪ Complément d'analyse : régularité du besoin.....	22
▪ Complément d'analyse : poids économique de la chaleur en deçà de 250°C	23
c. Besoin des industries manufacturières, résultats d'ensemble	24
▪ Distribution en température	24
▪ Mode d'utilisation en procédé	24
▪ Forme d'énergie	25
▪ Vision sectorielle a priori.....	26
d. Besoin des industries manufacturières : distribution géographique du besoin	27
e. Besoin des industries énergétiques, analyse d'ensemble.....	28
▪ Méthodologie déployée concernant les produits énergétiques	28
▪ Besoins de chaleur pour la production de produits énergétiques.....	29
III. Faisabilité technique et capacités industrielles, en France et en Europe.....	32
a. Méthodologie d'évaluation des éléments de faisabilité et conditions de succès	32
▪ Acteurs et technologies de la chaleur industrielle, en France et en Europe	32
▪ Réception de l'offre dans certains territoires-test	33
b. Evaluation de la faisabilité technique.....	34
▪ Le soutirage de vapeur : pas d'obstacle identifié.....	35
▪ Transport et distribution : de véritables autoroutes thermiques.....	35
▪ Le stockage de chaleur : un enjeu limité pour des circuits à forte inertie thermique.....	36
▪ Usage et conversion de la chaleur de procédé pour l'industrie	37
c. Capacités industrielles françaises et européennes	39
▪ Une chaîne de valeur industrielle française complète et au meilleur niveau.....	39
▪ Des capacités nationales d'innovation technologique... suffisantes.....	40
IV. Du besoin au marché, établissement de scénarios d'offre	43
a. Identification des cibles commerciales : notion de sites industriels pertinents.....	43
▪ Consommation de chaleur à une température majoritairement inférieure à 250°C... ..	44
▪ Poids de la chaleur dans les coûts	44
▪ Consommation par site	46
b. Distribution géographique des sites pertinents.....	47
c. Température de procédé, distance aux centrales et scénarios d'offre	48
▪ Scénario eau chaude	48
▪ Scénario eau surchauffée	49

▪ Scénario vapeur.....	49
▪ Scénario grands sites	50
d. Evaluation d'ensemble et dynamique du marché atteignable.....	51
▪ Un marché de 22 TWh accessible dès aujourd'hui et appelé à croître	52
▪ Les approches complémentaires pour remplacer les énergies fossiles pour répondre au besoin de chaleur industrielle	53
e. Leviers et barrières au déploiement d'une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire.....	54
▪ Une réglementation à adapter	54
▪ Un rôle structurant des collectivités locales	55
▪ Modèle économique et risques financiers	55
▪ Perception des acteurs concernant la « chaleur nucléaire ».....	55
V. Impacts potentiels d'une mise en œuvre réussie.....	56
a. Conséquences et opportunités pour l'opérateur des centrales nucléaires	56
b. Effet attendu sur les filières et les acteurs industriels.....	57
c. Impact environnemental et économique pour la France.....	59

Table des illustrations

Figure 1- Schéma type d'une cogénération d'électricité et de fluides de chauffage urbain par prélèvement de calories dans le circuit secondaire d'un réacteur nucléaire (Source : Cogeneration with District Heating and Cooling, H. Safa 2011)	9
Figure 2- Réacteur à neutron rapide soviétique BN-350 de Shevchenko (auj. Aktau, Kazakhstan), en opération de 1973 à 1999 pour cogénérer de l'électricité et 120,000m3 d'eau dessalée par jour	10
Figure 3- La cogénération nucléaire, « Game Changer » de la transition énergétique	11
Figure 4- Le GP3 de l'ANCRE pilote les travaux de l'alliance sur la cogénération nucléaire	11
Figure 5 – Les acteurs de la réalisation et du pilotage de l'étude	12
Figure 6 – Phasage de l'étude	13
Figure 7 - Le CEREN, source d'information sur les consommations énergétiques de l'industrie prise en compte dans l'étude	16
Figure 8 - Première analyse des données sectorielles de consommation	17
Figure 9 – Liste des segments sélectionnés comme a priori pertinents.....	19
Figure 10 – Eléments de caractérisation des segments tels que partagés lors de la réunion du comité de pilotage du 13 janvier 2015 (indicatif, informations alors non consolidées)	20
Figure 11 – Extrait des profils sectoriels de consommation - secteur agroalimentaire (partiel)	21
Figure 12 – Extrait des régimes sectoriels de consommation - secteur agroalimentaire (partiel)	22
Figure 13 – Méthode d'évaluation du poids de la chaleur consommée en deçà de 250°C dans l'économie des secteurs	23
Figure 14 – Répartition en température de la chaleur consommée en procédé dans l'industrie française en 2012, en TWh	24
Figure 15 – Répartition des consommations de chaleur <250°C par type d'opérations thermiques, 2008	24
Figure 16 – Répartition des consommations de chaleur <250°C par forme d'énergie utilisée par les équipements de procédé.....	25
Figure 17 – Répartition des consommations de chaleur <250°C par secteur industriel.....	26
Figure 18 – Distribution géographique des sites industriels de plus de 50 salariés dans les secteurs identifiés comme pertinents sur le territoire de France métropolitaine.....	27
Figure 19 – Analyse des températures de procédé pour les différentes voies de production de bio/agro-carburants.....	29
Figure 20 – Extrait de l'évaluation du besoin théorique de chaleur en deçà de 250°C pour la production française d'agro-carburants, en 2013 et 2020 – éléments approximatifs à finalité indicative.....	30
Figure 21 – Extrait de l'évaluation du besoin théorique de chaleur en deçà de 250°C pour la production d'hydrogène.....	30
Figure 22 – Extrait de l'évaluation du besoin de chaleur en deçà de 250°C pour la production de carburants pétroliers.....	31
Figure 23 – Extrait de l'évaluation du besoin de chaleur en deçà de 250°C pour la production de produits énergétiques divers, énergies renouvelables thermiques et autres.....	31
Figure 24 – Extrait du rapport final de l'analyse réalisée par le cabinet TKM – constitution de la base de référence brevets	32
Figure 25 – Acteurs interrogés dans le cadre de la phase terrain de l'étude concernant les acteurs et technologies de la chaleur industrielle.....	33
Figure 26 – Acteurs interrogés dans le cadre de l'évaluation de la réception par les acteurs de l'offre envisagée sur trois territoires test	34

Figure 27 – Distribution des brevets pris en compte dans l'analyse sur les quatre grandes étapes du processus	35
Figure 28 – Analyse comparative des principales technologies de transport de chaleur	36
Figure 29 – Segmentation technologique du stockage et transport de chaleur.....	37
Figure 30 – Segmentation des technologies de conversion thermique	38
Figure 31 – Des acteurs industriels français sur toute la chaîne de valeur (liste non exhaustive, pour illustration uniquement).....	39
Figure 32 – Des acteurs industriels français visibles également sur l'ensemble des technologies passées en revue pour le transport et stockage de la chaleur.....	40
Figure 33 – Extrait de la présentation des résultats de l'étude au Colloque de l'ANCRE du 21 janvier 2016 sur la chaleur dans la transition énergétique – la France dispose d'acteurs dédiés à tous les maillons de la chaîne industrielle.....	40
Figure 34 – La France en 7 ^{ème} position mondiale sur les dépôts de brevets concernant la chaleur industrielle... loin derrière les pays leaders	41
Figure 34 – Les académiques français bien positionnés sur ces problématiques... particulièrement les membres de l'ANCRE.	41
Figure 36 – Concernant les publications scientifiques traitant de chaleur utilisée en procédés industriels, la position de la France apparaît meilleure que sur les brevets.....	42
Figure 37 – Extrait du détail de la détermination de l'indicateur d'intensité en chaleur <250°C par secteurs et segments.....	45
Figure 38 – Plus de 2000 sites industriels des secteurs pertinents à moins de 100km d'au moins une des centrales françaises.....	47
Figure 39 – Carte des sites clients potentiels d'une offre de chaleur scénario « eau chaude »	48
Figure 40 – Carte des sites clients potentiels d'une offre de chaleur scénario « eau surchauffée »	49
Figure 41 – Carte des sites clients potentiels d'une offre de chaleur scénario « vapeur ».....	49
Figure 42 – Carte des sites clients potentiels d'une offre de chaleur scénario « grands sites »	50
Figure 43 – Projection pour l'exercice d'une possible arborescence (en jaune) de distribution de chaleur à partir de la centrale de Gravelines	51
Figure 44 – Carte des sites clients potentiels d'une offre de chaleur intégrant tous les scénarios	52
Figure 45 – Marché atteignable et nombre de sites clients pertinents par centrale.....	53
Figure 46 – Principaux textes réglementaires applicables au moment de la réalisation de l'étude	54
Figure 47 – Des infrastructures partagées entre sites clients proches (projections pour l'exercice) – Cas de Gravelines.....	56
Figure 48 – Des infrastructures partagées entre sites clients proches (projections pour l'exercice) – Cas de Paluel.....	57
Figure 49 – Distribution des sites pertinents et du marché atteignable par secteur	57

I. Quelques éléments introductifs

a. La cogénération nucléaire dans le monde, bref point de contexte

On appelle cogénération nucléaire l'utilisation de la chaleur engendrée par les réactions de fission nucléaire pour générer conjointement au moins deux types de ressources énergétiques, généralement en priorité de l'électricité puis de l'eau chaude ou de la vapeur destinées soit au chauffage résidentiel ou tertiaire, soit à des procédés thermiques industriels.

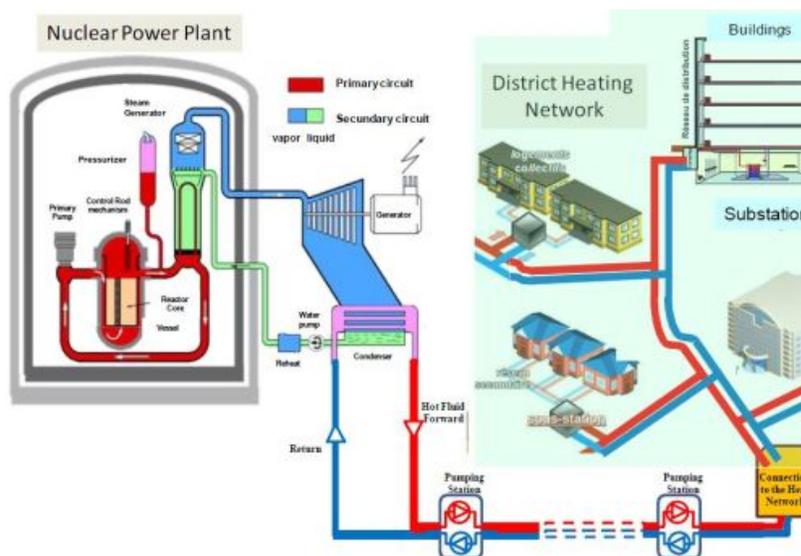


Figure 1- Schéma type d'une cogénération d'électricité et de fluides de chauffage urbain par prélèvement de calories dans le circuit secondaire d'un réacteur nucléaire (Source : Cogeneration with District Heating and Cooling, H. Safa 2011)

Envisagé dès les débuts du nucléaire civil, la cogénération d'électricité et de chauffage urbain – parfois de dessalement d'eau de mer – a été mise en œuvre en particulier dans l'espace soviétique puis ex-soviétique.

Elle a également été expérimentée très tôt en Europe, avec notamment le premier réacteur électrogène en opération, à Calder Hall dans le nord-ouest de l'Angleterre, qui produisait de l'électricité mais aussi de la chaleur pour l'usine proche de retraitement de combustible de Sellafield. Ou plus tard avec la centrale d'Ågesta, qui a chauffé une partie de Stockholm de 1963 à 1973 et celle de Beznau en Suisse, en service depuis 1969 et qui approvisionne toujours près de 18 000 habitants de 10 communes proches. Ou encore depuis 2002 avec la centrale de Temelin en République Tchèque.

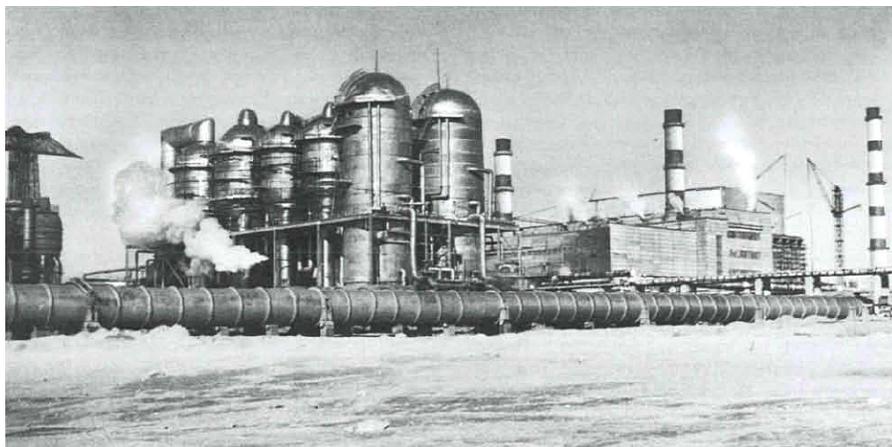


Figure 2- Réacteur à neutron rapide soviétique BN-350 de Shevchenko (auj. Aktau, Kazakhstan), en opération de 1973 à 1999 pour cogénérer de l'électricité et 120,000m³ d'eau déssalée par jour

Le projet de construction d'un troisième réacteur sur le site de Loviisa en Finlande a été récemment abandonné, mais le projet prévoyait l'alimentation en chauffage urbain d'Helsinki, à 80km de la centrale. Au total, plus de 15% des réacteurs opérationnels dans le monde (soit plus de 70 réacteurs) fonctionnent actuellement en cogénération.

En France, l'option d'un petit réacteur dédié de 90MW thermique, Thermos, a été étudiée de 1977 à 1981 pour le chauffage de Grenoble puis celui de Paris depuis le site de Saclay. Les deux projets ont ensuite été abandonnés, dans le contexte politique spécifique et le contre-choc pétrolier du début des années 1980.

A noter que les eaux tièdes (à 40°C environ) du refroidissement final des centrales sont parfois mises à disposition d'horticulteurs afin de chauffer des serres, voir utilisées pour chauffer des fermes aquacoles, des piscines municipales ou d'autres équipements urbains. Et depuis 2015 celles de la centrale de Gravelines sont canalisées en direction du terminal méthanier de Dunkerque afin de regazéifier le gaz naturel liquéfié.

Une grande partie des centrales françaises est concernée par ce type de valorisation des effluents thermiques terminaux à basse température. Pour autant, il ne s'agit que d'une valorisation ex post limitée, pas d'une *cogénération* au sens où ces centrales ne sont pas optimisées pour une double production d'électricité et de chaleur.

Dans l'ensemble du présent rapport, le terme de cogénération nucléaire exclut cette valorisation des eaux de refroidissement final des centrales et ne concerne que le soutirage envisageable dans le circuit secondaire des réacteurs à eau pressurisée du parc français, sous forme de vapeur d'eau à plus de 250°C.

b. Contexte et objectifs de l'étude menée pour le CVT de l'ANCRE

Le retour d'une réflexion sur les économies de combustibles fossiles engendrées par une utilisation de chaleur extraite des centrales nucléaires françaises a été encouragé sur la période récente par les travaux menés en termes de transition énergétique.

Dès 2012, l'ANCRE et ses membres ont s'y sont ré-intéressés et en ont illustré l'efficacité en particulier à travers le scénario énergétique « Vecteurs Diversifiés » qui a été retenu dans le cadre du Débat National de 2013 sur la Transition Energétique³.

³ Rapport de l'ANCRE « Les scénarios énergétiques » (2013)

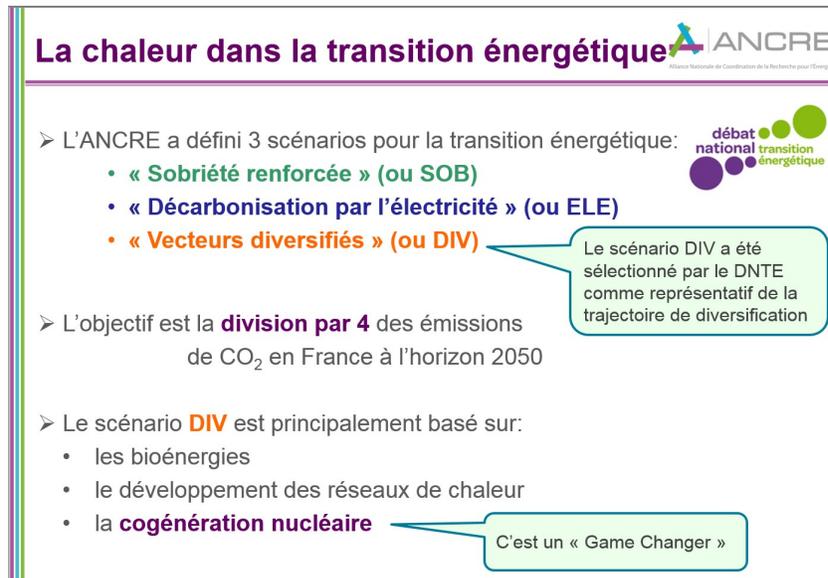


Figure 3- La cogénération nucléaire, « Game Changer » de la transition énergétique

Par la suite, c'est en particulier le Groupe Programmatique numéro 3 « Energies Nucléaires » de l'ANCRE qui a pris en charge les réflexions de l'alliance autour du possible déploiement d'une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire dans le contexte français actuel.

Groupes programmatiques

Neuf Groupes Programmatiques thématiques, véritables organes fonctionnels de l'ANCRE, sont constitués pour conduire les réflexions et aboutir à des propositions concrètes en matière de programmes de R&D. Leurs travaux sont structurés autour des chaînes de valeur (matières premières, transformation primaire, vecteurs, distribution, stockage, utilisation, impacts) des thématiques suivantes :

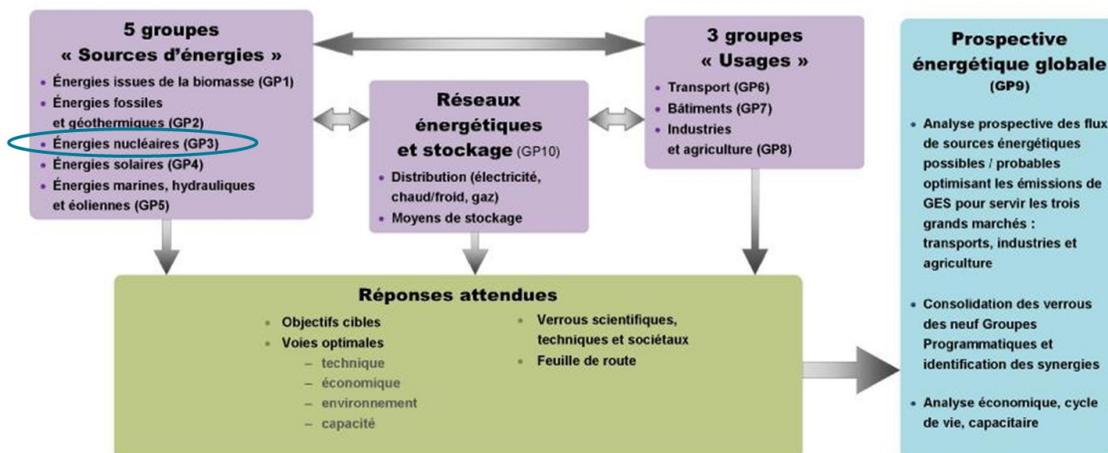


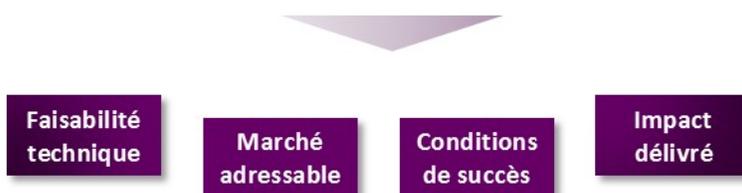
Figure 4 - Le GP3 de l'ANCRE pilote les travaux de l'alliance sur la cogénération nucléaire

C'est dans ce cadre que le **GP3** de l'ANCRE a demandé au Consortium de Valorisation Thématique (CVT) de l'alliance de diligenter une étude visant à évaluer les **intérêts et potentiels d'une offre de chaleur basse température⁴ issue de cogénération nucléaire pour l'industrie française.**

⁴ Chaleur à moins de 250°C, borne haute des températures susceptibles d'être fournie à partir des réacteurs à eau pressurisée du parc nucléaire français

Objectifs de l'étude

Caractériser le besoin de chaleur <250°C de l'industrie française et évaluer la part de ce besoin susceptible d'être couverte par une offre issue de cogénération nucléaire.



- **Faisabilité** : quels sont les besoins et les capacités technologiques pour fournir et distribuer à l'industrie française de la chaleur issue de cogénération nucléaire ?
- **Marché adressable** : quelle est la réalité du besoin industriel de chaleur et quel est le marché correspondant pour l'exploitant des centrales électronucléaires françaises ?
- **Conditions de succès / d'accès** : à quelles conditions une telle offre a-t-elle des chances de rencontrer son marché ?
- **Impact délivré / Service rendu** : quelles industries, matures ou émergentes, pourraient bénéficier d'une telle offre et quel serait l'impact potentiel sur le bilan énergétique et environnemental national ?

c. Pilotage et réalisation de l'étude

Mi-2014, le CVT de l'ANCRE a confié au **Service de Bibliométrie et d'Etudes Marketing du CEA** la réalisation de cette étude, sous la supervision d'un comité de pilotage réunissant des représentants du **CEA**, de l'**IFPEN**, du **CNRS** et des **universités** françaises :



Figure 5 – Les acteurs de la réalisation et du pilotage de l'étude

Quatre des cinq membres de ce comité de pilotage participent aux travaux du Groupe Programmatique Energies Nucléaires (GP3) de l'ANCRE, le cinquième (L. Forti) participant à ceux du GP8 Industries et Agriculture.

Membres du Comité de Pilotage	Fonction principale
Franck Carré	Directeur Scientifique, Direction de l'Énergie Nucléaire du CEA
Sylvain David	Directeur Adjoint Scientifique en charge des accélérateurs et des recherches aux interfaces à l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, CNRS
Laurent Forti	Responsable Programmes, Direction de la Stratégie d'IFP Energies Nouvelles
Henri Safa	Directeur Adjoint de L'institut International de l'Énergie Nucléaire I2EN
Bernard Tamain	Professeur émérite en physique nucléaire, ENSI Caen

d. Phasage et calendrier de l'étude

Les travaux, menés en quatre phases, ont commencé en septembre 2014 et se sont terminés en octobre 2015, avant d'ouvrir sur une phase de valorisation des résultats obtenus.

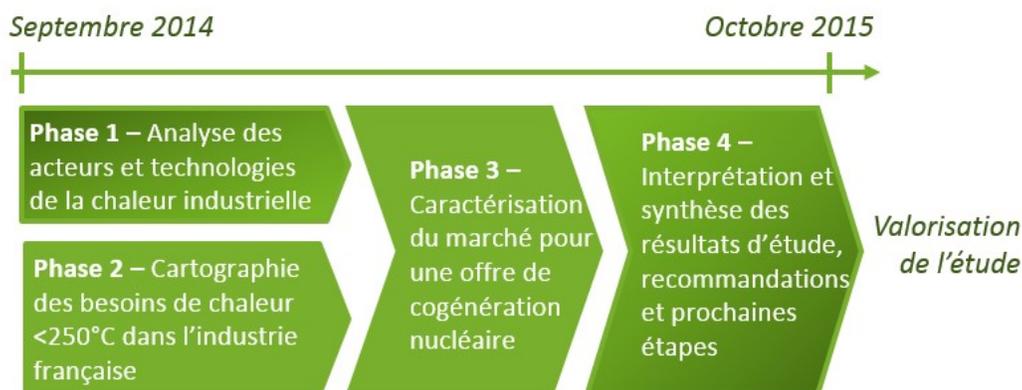


Figure 6 – Phasage de l'étude

Sans reprendre formellement – pour des raisons de lisibilité – la structuration correspondant à ce phasage, le présent rapport détaille les sources consultées, la méthodologie employée et les résultats obtenus à chaque étape de l'analyse.

II. Evaluation et caractérisation du besoin de chaleur de l'industrie française

a. Chaleur industrielle : périmètre de l'analyse

Afin de permettre une réflexion sur l'existence et la caractérisation d'un marché accessible à une offre de chaleur issue de cogénération à partir du parc électronucléaire français et pour des applications autres que le chauffage des bâtiments et l'eau chaude sanitaire, l'étude devait d'abord établir la connaissance du besoin de chaleur en deçà de 250°C pour un usage en procédé dans l'industrie française.

▪ Industries manufacturières et énergétiques

La chaleur industrielle ciblée se réfère aux consommations d'une industrie à entendre en considérant principalement le secteur secondaire de l'économie nationale :

- les **industries manufacturières** (E12 à E38 dans la nomenclature NCE des activités consommatrices d'énergie⁵, à l'exclusion de l'activité cokéfaction et raffinage C19 mais y compris la production de sel et minéraux divers et l'extraction de minerais métalliques de la classe NCE E19).

Secteurs NCE dans l'industrie manufacturière
E12 - Industrie laitière
E13 - Sucrieries
E14 - Industries agricoles et alimentaires (solde)
E16 - Sidérurgie
E18 - Métallurgie de 1ère transformation des métaux non ferreux
E19 - Production de minéraux divers
E20 - Fabrication de plâtres, produits en plâtre, chaux et ciments
E21 - Production d'autres matériaux de construction et de céramique
E22 - Industrie du verre
E23 - Fabrication d'engrais
E24 - Autres industries de la chimie minérale
E25 - Matières plastiques, caoutchouc synthétique autres élastomères
E26 - Autres industries de la chimie organique de base
E28 - Parachimie et industrie pharmaceutique
E29 - Fonderie et travail des métaux
E30 - Construction mécanique
E31 - Construction électrique et électronique
E32 - véhicules automobiles et autres matériels de transport terrestre
E33 - Construction navale et aéronautique, armement
E34 - Industrie textile, du cuir et de l'habillement
E35 - Industrie du papier et du carton
E36 - Industrie du caoutchouc
E37 - Transformation des matières plastiques
E38 - Industries diverses

- les **industries productrices de produits énergétiques** (cokéfaction et raffinage du code NAF C19, mais aussi des activités plus disséminées en termes de codification comme les industries gazières, les charbons de bois et combustibles biomasse, les agro-carburants et autres bioénergies).

Les **autres industries énergétiques**, production d'électricité et de vapeur, évidemment hors cadre de la présente réflexion sur la cogénération nucléaire, n'ont pas été considérées dans l'étude.

⁵ Soit C10 à C33 dans la nomenclature d'activité française NAF rev.2 de l'INSEE

▪ Activités para-industrielles

Dans le secteur primaire :

- **les activités agricoles et aquacoles ont été écartées** : si elles peuvent bénéficier significativement d'apports de chaleur (chauffage de serres et bassins) et bénéficier dans certains cas des eaux tièdes de refroidissement final des centrales nucléaires françaises, la fragmentation de ces activités économique et les faibles températures de besoin – inférieures à 50-70°C – ont amené à considérer dans l'étude que cela ne constituerait pas des secteurs clients pertinents pour une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire.
- Les **activités extractives** ont en revanche été prises en compte de plusieurs manières :
 - **la production de sel et l'extraction de minerais métalliques ou autres ressources minérales** (NCE E19) a été étudiée parmi les industries manufacturières
 - **Les gravières, sablières, argiles et kaolin** de la classe NAF B08.12, non comprises dans la NCE E19, n'ont pas été étudiées, mais ne sont *a priori* pas consommatrices de chaleur.
 - **L'extraction d'hydrocarbures liquides et gazeux** (NAF B06) pourrait techniquement constituer un sujet pertinent (l'apport de vapeur issue de cogénération nucléaire pour l'extraction de sables bitumineux a par exemple été sérieusement envisagé dans l'Alberta au Canada), mais l'absence de volumes significatifs d'activité dans ce domaine en France métropolitaine a amené à ne pas les prendre en compte.

Dans le secteur tertiaire, les activités d'assainissement, gestion des déchets et dépollution ont été en partie intégrées aux analyses :

- **Le démantèlement d'épave et la récupération/recyclage de déchets triés**, intégré aux industries manufacturières diverses (NCE E38), a été considéré.
- **La gestion et le traitement des eaux, le traitement et élimination des déchets et les services de décontamination / assainissement / dépollution** (NAF E36, E37, E38.1, E38.2, E39), activités de type industriel mais aux besoins énergétiques faibles, à basse température, peu concentrés et sous très forte contrainte de coût, n'ont été que superficiellement évalués, la conclusion de cette évaluation rapide étant que ces activités ne constituaient pas un marché potentiel pour une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire.
- **Les autres activités tertiaires** n'ont pas été considérées « industrielles » et donc non prises en compte dans l'étude.

b. Besoins des industries manufacturières – méthodologies d'analyse

▪ La source CEREN

L'étude s'est appuyée sur l'**étude EMIE** (Étude du Marché Industriel de l'Énergie) réalisée par le CEREN⁶ (Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie).



Figure 7 - Le CEREN, source d'information sur les consommations énergétiques de l'industrie prise en compte dans l'étude

L'**enquête sur les consommations énergétiques de l'industrie**, réalisée par rotation sectorielle sur quatre ans, combine l'envoi d'enquêteurs de terrain sur un large échantillon représentatif de l'industrie avec un questionnaire envoyé aux industriels non interrogés et les résultats de l'enquête EACEI (enquête sur les consommations d'énergie dans l'industrie) de l'INSEE. Sur le plan des consommations d'énergie en procédé (donc hors chauffage de locaux notamment), elle renseigne à un niveau très fin – équipement par équipement – les fonctions et types d'opérations énergétiques (assemblage, distillation, fusion, séchage, électrolyse...), quantités d'énergie, puissances, cadences et régimes d'utilisation (batchs ou continu, régime hebdomadaire, régime saisonnier), types de vecteurs énergétiques (gaz, vapeur, électricité...), âge des équipements et – pour les opérations thermiques – gammes de températures concernées.

Les industries considérées sont les **industries manufacturières** (secteurs NCE E18 à E38⁷) subdivisées en **131 « segments »** correspondant à des regroupements ad hoc de catégories d'activités principales d'établissement (codes APE de la NAF Rev2 de l'INSEE). C'est par conséquent à ce niveau « segment » – amidonneries, brasseries, métallurgie du cuivre, colles, carton ondulé, pneumatiques, ennoblissement textile, etc. – qu'ont été effectuées toutes les analyses et projections sectorielles de l'étude. La liste complète des segments est disponible en annexe, et dans le cadre de l'étude 30 des 131 segments – a été considérée suffisamment pertinente a priori pour faire l'objet d'une analyse détaillée (voir ci-après).

Par ailleurs, dès que disponibles, les données utilisées ont été celles établies de 2008 à 2011 pour 4600 sites industriels et extrapolées sur **32000 sites industriels de plus de 10 employés**, soit la quasi-totalité du tissu national dans les secteurs concernés. Seules les premières analyses de présélection sectorielle – nécessitant peu de précision actualisée – ont fait usage de chiffres plus anciens.

Ces consommations de chaleur de l'année 2011, les plus récentes disponibles, ont été utilisées dans l'étude en sachant qu'un léger recul de la consommation a eu lieu entre

⁶ Les membres du GIE CEREN sont l'ADEME, RTE, GRTgaz, ERDF, GrDF, EDF, Engie. L'INSEE et le CGDD sont également représentés au conseil d'administration du GIE.

⁷ Industries laitières, sucreries et autres industries agro-alimentaires, sidérurgie, fonderie et travail des métaux, ciments, chaux, plâtre, minéraux divers et autres matériaux de construction, industrie du verre, fabrication d'engrais et autres industries de la chimie minérale et organique de base, fabrication et transformation de matières plastiques, de caoutchoucs synthétiques et d'autres élastomères, parachimie et industrie pharmaceutique, construction mécanique, électrique et électronique, automobile, aéronautique et navale, armement, textile, papier – Carton, industrie du caoutchouc, industries diverses.

2011 et 2012 (-5 TWh de combustibles et 10 TWh d'énergie), mais qu'ensuite entre 2012 et 2014 la consommation d'ensemble a été très stable, vraisemblablement sans évolutions structurelles importantes (source enquête INSEE EACEI, citée par B. Millet lors du colloque de l'ANCRE sur la chaleur le 21 janvier 2016).

▪ Les secteurs / segments porteurs d'un besoin significatif

Dans l'objectif de limiter l'effort d'analyse détaillée, une **sélection des segments pertinents** a été réalisée, sur la base d'une sélection en plusieurs étapes:

1. *Analyse des données de consommation mises à disposition par le CEREN au niveau des secteurs NCE.*

Les **secteurs présentant des besoins en deçà de 250°C** totaux très faibles (<1 TWh/an) ET/OU nettement minoritaires (<10% de la consommation de chaleur toutes températures du secteur) ET/OU très faibles en regard du nombre de site (inférieures en moyenne à 1GWh/an/site) ont été exclus à priori d'une analyse plus fine.

Secteurs exclus : sidérurgie ; ciments, chaux et plâtres ; verre ; fonderie et travail des métaux ; construction mécanique ; construction électrique et électronique ; aéronautique, naval, armement ; industries diverses.

Pour les autres secteurs, il est apparu nécessaire d'identifier plus finement le besoin au niveau des **segments**.

Consommations 2008 (GWh/an)					
Secteurs	Conso ttes T° (hors non renseigné)	Consommation <250°C	Part de la conso <250°C	Consommation <250°C moy par site	Nombre de sites
Industrie laitière	8326	8163	98%	15,7	520
Sucreries	7891	6237	79%	18,7	333
Autre agro-alimentaire	25375	20930	82%	5,1	4089
Sidérurgie	49914	539	1%	7,8	69
Métaux non ferreux	11393	2528	22%	23,4	108
Minéraux divers	997	644	65%	3,7	175
Ciments, chaux et plâtre	30227	2536	8%	23,9	106
Autres mat. construction	9790	2847	29%	1,5	1953
Industrie du verre	12630	326	3%	1,0	333
Fabrication d'engrais	6253	1563	25%	27,4	57
Autres chimie minérale de base	8010	3575	45%	24,8	144
Plastiques, caoutchoucs, élastomères	7103	2342	33%	19,7	119
Autres chimie organique de base	40469	16605	41%	34,0	488
Parachimie et pharma	1896	1666	88%	2,0	826
Fonderie et travail des métaux	11312	2883	25%	0,4	6783
Construction mécanique	2533	1300	51%	0,3	4486
Construction électrique et électronique	2893	1087	38%	0,4	2767
Construction automobile	3510	2748	78%	2,7	1008
Aéronautique, naval et armement	902	214	24%	0,4	564
Textile	2672	2517	94%	1,3	1937
Papier - Carton	26669	25163	94%	28,9	871
Industrie du caoutchouc	1238	1205	97%	4,8	249
Transformation plastiques	4071	3416	84%	1,6	2099
Industries diverses	7464	5616	75%	0,8	6861

Figure 8 - Première analyse des données sectorielles de consommation

2. Identification d'une liste de segments a priori intéressants à creuser

Une analyse des autres secteurs – segment par segment – a ensuite visé à identifier dans lesquels les procédés employés et la structure économique du secteur (existence de sites de grande taille ou éparpillement en nombreuses PME) permettaient d'**anticiper des opportunités**.

Cette analyse s'est basée sur plusieurs sources :

- les recherches de l'équipe projet ;
- la connaissance des procédés industriels disponible au sein du service de bibliométrie et d'études marketing du CEA ;
- surtout, l'expertise énergétique des interlocuteurs de l'équipe projet au CEREN, en la personne surtout de Bruno Millet, responsable du département industrie et de l'étude EMIE ;
- une revue d'ensemble de la liste de segments à analyser lors de la réunion du comité de pilotage de l'étude le 13 janvier 2015

Cet exercice a permis de dresser une liste de **39 segments a priori** pertinents, sur lesquels il a été demandé au CEREN d'extraire l'information de consommation de chaleur en procédé disponible.

A noter :

- *cet exercice a mené à évaluer le besoin dans certains segments des secteurs Construction aéronautique, naval, armement et industries diverses, malgré une évaluation ex ante négative.*
- *Par soustraction, une vingtaine d'autres segments moins pertinents a priori a pu également être évaluée.*

Segments a priori pertinents, étudiés en détail
E14 : Solde des IAA : <ul style="list-style-type: none"> - Fruits et légumes (6) - Corps gras (7) - Travail des grains (9) - Produits amylacés (10) - Aliments pour animaux (11) - Malterie (19) - Brasserie (21) - Thé et café (15) - Cidrerie, eau de table, jus de fruit, boissons (20)
E18 : Métaux non ferreux <ul style="list-style-type: none"> - Métallurgie du cuivre (23) - Métallurgie de plomb, de zinc ou d'étain (24)
E19 : Minéraux divers <ul style="list-style-type: none"> - Production de sel (28)
E21 : Les autres matériaux de construction <ul style="list-style-type: none"> - Produits minéraux non métalliques (39)
E24 : Autres industries de la chimie minérale de base <ul style="list-style-type: none"> - Autres produits de la chimie minérale (46) - Matières plastiques de base (47) - Caoutchouc synthétique (48)
E26 : Autres industries de la chimie organique de base <ul style="list-style-type: none"> - Colorants et pigments (50) - Produits pharmaceutiques de base (52) - Autres produits chimiques organiques de base (54) - Savons, détergents et produits d'entretien (55)
E28 : Parachimie et industrie pharmaceutique <ul style="list-style-type: none"> - Peintures et vernis (56) - Fabrication de préparations pharmaceutiques (57) - Produits explosifs (59) - Colles (60)
E32 : Construction automobile <ul style="list-style-type: none"> - Véhicules automobiles (89) - Fabrication d'autres équipements automobiles (94)
E33 : Construction aéronautique, navale et armement <ul style="list-style-type: none"> - Construction navale (96) - Construction aéronautique et spatiale (97) - Armement (98)
E34 : Le Textile <ul style="list-style-type: none"> - Tissage (100) - Ennoblement textile (101) - Apprêt et tannage des cuirs (106)
E35 : Papier – Carton <ul style="list-style-type: none"> - Pâte à papier (108) - Papier et carton (109) - Carton ondulé (110)
E36 : Industrie du caoutchouc <ul style="list-style-type: none"> - Pneumatiques (115)
E38 : Industries diverses <ul style="list-style-type: none"> - Panneaux de bois (125) - Edition, imprimerie, reproduction (127) - Récupération (131)

Figure 9 – Liste des segments sélectionnés comme a priori pertinents

Chimie

Gaz industriels	A priori besoins de chaleur faibles, mais mal connu, à creuser	?
Autres chimie minérale (ex: chlore, soude...)	Besoin hétérogène, HT ou BT, mais des sites à gros besoin	✓
Colorants et pigments	Quelques éléments à besoins importants (ex: oxyde de titane)	✓
Produits chimiques à usage industriel ou agricole, parfums, huiles essentielles	Petits besoins par unité	✗
Bases et préparations pharmaceutiques, savons et détergents, peintures et vernis, colles	Hétérogène mais des unités importantes	✓
Produits de la chimie organique	Très grosses unités intégrées, peut-être complexes à pénétrer	?
Explosifs	Surtout des fours, substitution sans doute complexe	✗

Agro-alimentaire

Produits amylacés	Peu de sites, mais importants et utilisant uniquement de la vapeur	✓
Huiles, brasseries, malteries, conserveries	Plus hétérogène, mais tout de même de nombreux sites importants	✓
Viande, poisson, légumes et fruits, boissons, alimentation animale, grains, thé/café, chocolat, confiserie, pâtes	Beaucoup de procédés intéressants, mais très majoritairement de petites et moyennes unités	✗
Meunerie (et autres déshydratations)	Procédés à haute température	✗
Pain, pâtisserie, biscuiterie	Des sites importants et <250°C mais pas sûr que la chaleur vapeur puisse convenir	?

Textiles, papèterie, matières plastiques

Pâte à papier	Très peu de sites, utilisant de grandes voire très grandes quantités de chaleur BT° en vapeur. Mais il s'agit souvent d'autoconsommation (combustion de « liqueur noire », résidu du procédé)	?
Fabrication de papier et carton	Besoins BT° en vapeur (très) importants sur peu de sites	✓
Ennoblement textile / teintures	Utilise beaucoup de chaleur (imprégnation, séchage)	✓
Tissage, apprêt/tannage des cuirs	Moins énergétique que l'ennoblement, mais des sites ont une consommation notable	✓
Préparation fibres, maroquinerie, habillement, etc.	Peu de besoins et très éclatés	✓
Pneumatiques	≈20 sites qui pratiquent la vulcanisation par vapeur à 200-300° (les autres articles en caoutchouc, sur ≈230 sites, sont plus petits et divers)	✗
Emballages, produits extrudés et autres segments plasturgie	Les température de fusion des plastiques varient et l'électricité est bien plus utilisée que la vapeur	?
Panneaux de bois (cf. aussi « Industries diverses » p. 16)	Parmi les activités du bois (sciage, charpentes, jouets...), les panneaux et placages seuls consomment beaucoup de chaleur, avec 10-20 très grosses usines à fort usage de vapeur	✓

Minéraux et matériaux de construction

Calcaire industriel, ciment, chaux, plâtre Verre creux, plat ou technique, céramiques	Les besoins BT° sont colocalisés avec les besoins HT°, très largement prédominants => peu d'intérêt a priori pour une solution spécifique BT°	✗
Production de sel	Utilisation d'évaporateurs dans les salines en saumure (cf carte page suivante)	✓
Ouvrages et produits béton, fibres-ciment, tuiles, briques, mortiers, pierres, ardoise, sable, abrasifs	Besoins surtout à HT° et surtout des sites de petite taille, mais des opportunités possibles, à préciser	?

Industries d'assemblage et diverses

Fabrication d'équipements automobiles	Quelques équipementiers de ce segment font 20 à 30% du besoin de l'automobile	✓
Autres fabrications de véhicules et armement, appareils électriques et électronique, machinerie ou meubles, robinetterie, chaudronnerie, lunetterie, articles de musique, décoration, sport, jeux et jouets, activité de réparation, récupération et retraitement	Peu de besoins de chaleur, et très éclatés	✗
Edition, imprimerie, reproduction	Des besoins potentiellement importants sur certains sites, à vérifier	?
Panneaux de bois	Peu de sites mais de grands besoins	✓

Figure 10 – Eléments de caractérisation des segments tels que partagés lors de la réunion du comité de pilotage du 13 janvier 2015 (indicatif, informations alors non consolidées)

▪ Consolidation d'analyse et sources complémentaires

Pour l'ensemble des secteurs et segments sélectionnés, un tableau semblable à celui indiqué ci-dessous a alors été consolidé, intégrant non seulement le **profil de consommation de chaleur** tel que dessiné par les données du CEREN, mais également complété à partir :

- De **données économiques sectorielles**, issues de l'étude ESANE de l'INSEE, sur l'économie des entreprises françaises (chiffres 2012) ;
- De **l'analyse des sites clients pertinents et du marché accessible** pour une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire telle que détaillée au chapitre 0.

Segments sectoriels	Données et dynamique secteur	Conso BT° / # sites	T° de process (>75% de conso BT°)	Sites pertinents et marché brut	BT° / Ttes T°	Poids économique chaleur BT°	Régularité du besoin	Marché accessible
Laiteries	CA: 28Mds€ ; 55000 salariés ; →	5,8 TWh / 520 sites	≤150°C	63 sites et 1480 GWh	94%	Intensité moyenne	92% tps plein + Saisonnier	1110 GWh
Sucreries	CA: 4,5Mds€ ; 7000 salariés ; ↗	6TWh / 333 sites	100% ≤150°C	8 sites et 950 GWh	82%	Intensité très forte	99% tps plein + Très saisonnier	850 GWh
Fruits et légumes	CA: 7Mds€ ; 22000 salariés ; ↘	1,7 TWh / 226 sites	≤150°C	3 sites et 65 GWh	93%	Intensité moyenne	72% tps plein + Saisonnier	50 GWh
Corps gras	CA: 8Mds€ ; 3800 salariés ; ↗↗	1,3 TWh / 46 sites	≤150°C	2 sites et 165 GWh	78%	Intensité moyenne	97% tps plein + Saisonnier	110 GWh
Travail des grains	CA: 1,5Mds€ ; 3300 salariés ; ↗	0,3TWh / 38 sites	≤150°C	Aucun site pertinent	97%	Intensité moyenne	87% tps plein + Saisonnier	Aucun
Produits amylacés	CA: 3,2Mds€ ; 5000 salariés ; ↗	5 TWh / 9 sites	≤150°C	5 sites et 4180 GWh	76%	Intensité très forte	100% tps plein + Saisonnier	3760 GWh
Aliments animaux	CA: 13Mds€ ; 18000 salariés ; ↗	2,5 TWh / 345 sites	≤150°C	10 sites et 390 GWh	51%	Intensité moyenne	89% tps plein + Saisonnier	290 GWh
Thé et café	CA: 1,7Mds€ ; 4500 salariés ; →	0,3 TWh / 72 sites	100-250°C	1 site et 30 GWh	76%	Intensité moyenne	89% tps plein + Saisonnier	20 GWh

Sources: données CEREN 2014 et INSEE 2015, analyse BEM

Figure 11 – Extrait des profils sectoriels de consommation - secteur agroalimentaire (partiel)

Lecture du tableau :

- **Données et dynamique secteur** : chiffre d'affaire 2012 et indicatif d'évolution 2008-2012
- **Conso BT°/# sites** : consommation <250°C du segment et nombre de sites employant plus de 10 salariés
- **T° de process** : gamme de température dominante (c'est-à-dire représentant plus de 75% du besoin en deçà de 250°C total) dans les procédés du segment
- **Sites pertinents et marché brut** : nombre de sites clients potentiels et valeur de leur consommation <250°C cumulée hors pondération (cf. chapitre 0)
- **T°/Ttes T°** : part de la chaleur <250°C dans la consommation totale de chaleur du segment
- **Poids économique chaleur BT°** : poids de la chaleur <250°C dans l'économie du secteur
- **Régularité du besoin** : régime hebdomadaire moyen en % de temps plein (168 h/sem.) et saisonnalité
- **Marché accessible** : marché évalué en pondérant les besoins de chaleur par une estimation de la probabilité qu'ils puissent être couverts par la cogénération nucléaire compte tenu du contexte (cf. chapitre 0)

A noter que l'ensemble des tableaux d'analyse par secteur sont joints en annexe.

▪ Complément d'analyse : régularité du besoin

1. *Régularité hebdomadaire*

Les chiffres du CEREN indiquent pour chaque secteur/segment la distribution des consommations observées sur sites par régimes d'utilisation⁸. A partir de cette distribution, il a été possible d'établir un indicateur synthétique représentant le temps moyen de consommation hebdomadaire, traduit ensuite pour comparaison en pourcentage d'une semaine de 7x24=168 heures.

A noter que « moyen » s'entend ici rapporté à la quantité de chaleur consommée en deçà de 250°C, non au nombre de sites.

Régime hebdomadaire	1*8h	2*8 h	3*8 h avec arrêt WE	3*8 h ss arrêt WE	Régime horaire hebdo moyen	Régularité hebdo (% tps plein)
12 : Industrie laitière	1%	7%	14%	78%	154	91,6%
13 : Sucrieries	0%	2%	0%	98%	166	98,9%
14 : Solde des IAA	2%	11%	22%	65%	145	86,1%
Industrie des fruits et des légumes (6) : 1031Z-1039(A-B)	1%	25%	49%	26%	122	72,4%
Industrie des corps gras (7) : 1041(A-B)-1042Z	1%	1%	5%	93%	163	97,3%
Autres activités de travail des grains (9) : 1061B	0%	19%	9%	72%	147	87,3%
Produits amylacés (10) : 1062Z	0%	0%	0%	100%	168	100,0%
Aliments pour animaux (11) : 109(1Z-2Z)	1%	3%	30%	66%	150	89,2%
Transformation du thé et du café (15) : 1083Z	0%	17%	7%	76%	150	89,1%
Malterie (19) : 1106Z	0%	0%	0%	100%	168	100,0%
Cidrierie, eau de table, jus de fruits, boissons rafraîchissantes (20) : 1032Z-1103Z-1107(A-B)	0%	10%	45%	45%	137	81,6%
Brasserie (21) : 1105Z	1%	5%	81%	13%	123	73,4%
Autres IAA (3) (4) (5) (8) (12) (13) (14) (16) (17) (18)*	6%	22%	31%	41%	126	74,8%

Figure 12 – Extrait des régimes sectoriels de consommation - secteur agroalimentaire (partiel)

Cet indicateur va de 36% pour l'apprêt et tannage des cuirs (régime « 1x8h » dominant dans ce segment) à 100% pour le caoutchouc synthétique (secteur fonctionnant entièrement en 3x8h avec week end).

A noter que les sites ayant la plus forte consommation absolue de chaleur sont des grands sites industriels très susceptibles de fonctionner sur un régime « 3x8h », ce qui fait que dans cette logique de moyenne rapportée à la consommation réelle de chaleur il n'est pas surprenant qu'hormis dans les industries d'assemblages où le régime apparaît plus faible, presque tous les secteurs sont « en moyenne » à plus de 75% du régime temps plein et même souvent 90% du temps plein hebdomadaire.

2. *Saisonnalité*

L'information de saisonnalité a été évaluée à partir de la distribution du nombre d'heures de fonctionnement annuel des équipements⁹ de chaque secteur/segment telle qu'indiquée par le CEREN. Le principe de cette évaluation, mathématiquement approximatif, est celui d'une mesure agrégée des écarts entre la part de consommation du secteur/segment correspondant à un régime hebdomadaire et le nombre d'heures de fonctionnement annuel correspondant, suivant les clés de correspondance suivantes :

Régime hebdomadaire	Nb d'heures de fonctionnement / an
1x8h	<2000h/an
2x8h	2000-4000h/an
3x8h arrêt WE	4000-7000h/an
3x8h 7j/7	>7000h/an

⁸ 1x8h, 2x8h, 3x8h avec arrêt week end, 3x8h sans arrêt week end, intermittent dans la journée, utilisé en secours ou non connu (les 3 derniers représentent des pourcentages inférieur à 10% de la consommation dans presque tous les segments)

⁹ <2000h/an, 2000-4000h/an, 4000-7000h/an, >7000h/an et non renseigné.

Il est bien noté que cette mesure est d'autant plus pertinente que le secteur est homogène et que les écarts constatés peuvent s'expliquer autant par la saisonnalité réelle que par des taux élevés d'arrêt pour maintenance ou d'autres raisons non précisées.

Ces précautions posées, on constate qu'hormis pour les sucreries et plusieurs segments de l'agro-alimentaire (en rapport aux saisons et rythmes sociaux tels que les fêtes de fin d'année), et à un moindre niveau pour la production d'engrais et certaines activités textiles ou mécaniques, la saisonnalité apparaît très peu marquée dans les secteurs les plus consommateurs de chaleur.

▪ Complément d'analyse : poids économique de la chaleur en deçà de 250°C

Les secteurs et segments intensifs en consommation de chaleur en deçà de 250°C sont *a priori* particulièrement susceptibles d'être sensibles aux modalités de leur approvisionnement en chaleur, et donc présentent une probabilité plus forte d'intérêt pour une offre de chaleur décarbonnée et de coût potentiellement faible car issue de cogénération nucléaire. Sur la base de cette hypothèse, validée en fin d'étude par entretiens d'acteurs industriels, il a été décidé dans l'étude d'évaluer le poids de la chaleur consommée en deçà de 250°C dans l'économie de chaque secteur/segment.

Pour cela, la consommation de chaleur telle qu'informée par les données du CEREN a été rapportée aux données économiques de chaque secteur et segment telles qu'établies par l'enquête ESANE 2012 de l'INSEE, de manière à établir une information d'intensité à 5 niveaux :



Figure 13 – Méthode d'évaluation du poids de la chaleur consommée en deçà de 250°C dans l'économie des secteurs

L'information économique considérée prioritairement pour l'établissement de cet indicateur a été le chiffre d'affaire du secteur/segment, mais un regard complémentaire a également été posé sur la valeur ajoutée et les achats de matières premières et marchandises de chaque secteur.

Le principal résultat de cette analyse est la mise en valeur du fait que si certaines industries d'assemblage – automobile, aéronautique, équipements électriques ou électroniques – peuvent avoir des consommations de chaleur <250°C assez importantes, ces consommations n'ont qu'un poids limité dans leur économie.

A l'inverse, dans des industries de procédé comme la chimie, papèterie, panneaux de bois, certains segments agro-alimentaires, la chaleur revêt souvent une importance économique cruciale (la consommation de chaleur en deçà de 250°C représenterait notamment plus d'un tiers du chiffre d'affaire de l'activité de fabrication de pâte à papier).

c. Besoin des industries manufacturières, résultats d'ensemble

La consommation de chaleur dans les procédés de 32,000 sites industriels métropolitains de plus de 10 salariés – hors secteur de l'énergie – a représenté en 2012 une **consommation finale en procédé totale agrégée de 278 TWh, dont 103 TWh de chaleur à une température inférieure à 250°C**¹⁰.

▪ Distribution en température

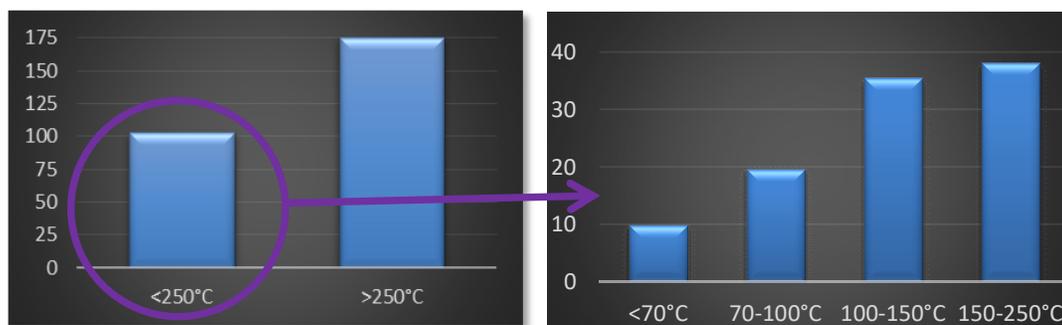


Figure 14 – Répartition en température de la chaleur consommée en procédé dans l'industrie française en 2012, en TWh

La consommation de chaleur en deçà de 250°C représente donc 37% de la consommation de chaleur de procédé dans l'industrie française en dehors du secteur de l'énergie, et **5.7% de la consommation finale d'énergie du pays**.

A noter que le besoin en deçà de 250°C est concentré à plus de 70% sur des températures supérieures à 100°C (et d'après des éléments qualitatifs communiqués par les enquêteurs du CEREN, avec une forte concentration entre 150 et 200°C) soit au-dessus des températures communément servies par les réseaux de chaleur urbains et correspondant si l'on parle de transport par eau à un service en vapeur, ou au moins en eau surchauffée en pression.

▪ Mode d'utilisation en procédé

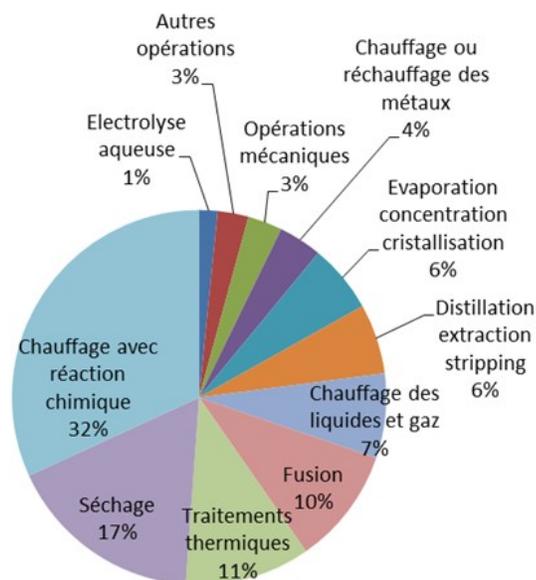


Figure 15 – Répartition des consommations de chaleur <250°C par type d'opérations thermiques, 2008

¹⁰ Source : étude EMIE (Étude du Marché Industriel de l'Énergie) 2014 du Centre d'étude et de recherche économique sur l'énergie (CEREN), données 2009-2012. Sauf mention contraire, tous les chiffres ci-après proviennent de cette étude.

L'analyse des procédés répertoriés comme consommateurs de chaleur en deçà de 250°C révèle une grande variété d'opérations thermiques. Toutefois, l'analyse des technologies de conversion de chaleur industrielle réalisée en première phase de l'étude par le cabinet TKM a permis de souligner la grande variété et maturité technique des échangeurs thermiques sur le marché et disponibles aux acteurs français, si bien que cette variété a pu ne pas être considérée dans l'étude comme un frein à l'accessibilité des besoins correspondant à ces différents procédés à une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire.

▪ Forme d'énergie

Les données du CEREN permettent de connaître le vecteur énergétique utilisé par les équipements réalisant les procédés industriels consommateurs de chaleur. On parle ici bien de l'utilisation actuelle finale des équipements, non de l'énergie agrégée de ces équipements à l'entrée d'un site industriel. Le rendement énergétique des chaudières et les pertes thermiques sur site ne sont donc pas considérées.

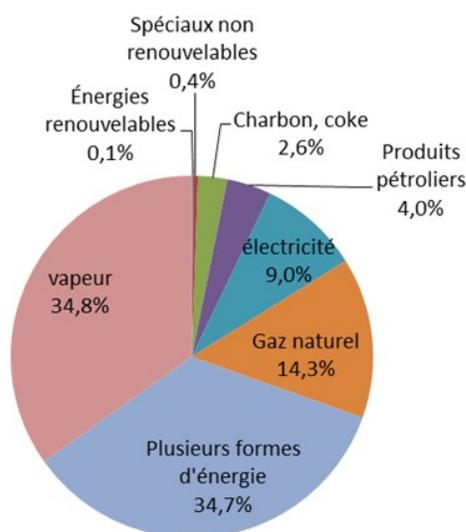


Figure 16 – Répartition des consommations de chaleur <250°C par forme d'énergie utilisée par les équipements de procédé

On constate :

- Qu'un tiers (34,8%) des consommations est administrée sur les différents équipements d'un site industriel à partir d'un réseau d'eau chaude ou le plus souvent de vapeur, de fait produite par une chaudière centrale fonctionnant elle-même le plus souvent au gaz, encore parfois au fioul ou au charbon, et rarement à biomasse.

A noter : les arrêtés des 26 août et 24 septembre 2013 transposant la directive relative aux Emissions Industrielles dite IED de 1996 a imposé un renforcement des valeurs limite d'émissions de gaz à effet de serre des installations de combustion supérieures à 2MW. Cette évolution de la réglementation, applicable au 1^{er} janvier 2016, a de fait amené sur la période récente nombre d'industriels à opter pour des solutions gaz (principalement) ou biomasse.

- Qu'un autre tiers (34,7%) est produit en mélange de plusieurs formes d'énergie, et dans ce cas presque toujours à partir d'un mélange de combustibles (gaz et fioul ou bois et pétrole notamment). Une part notable de ces cas de mélange provient notamment de l'autoconsommation de sous-produits combustibles de l'activité industrielle telle que la liqueur noire papetière ou les marcs de café.

d. Besoin des industries manufacturières : distribution géographique du besoin

La distribution de chaleur nécessitant des infrastructures dont le coût est directement lié aux distances de transport, la distribution géographique du besoin relativement aux sources est un facteur décisif pour évaluer le marché atteignable d'une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire. Elle a été prise en compte dans l'étude à partir d'une distribution géographique ¹¹ des sites industriels des secteurs et segments consommateurs de chaleur en deçà de 250°C.

Distribution géographique des sites industriels >50 employés, par clusters sectoriels

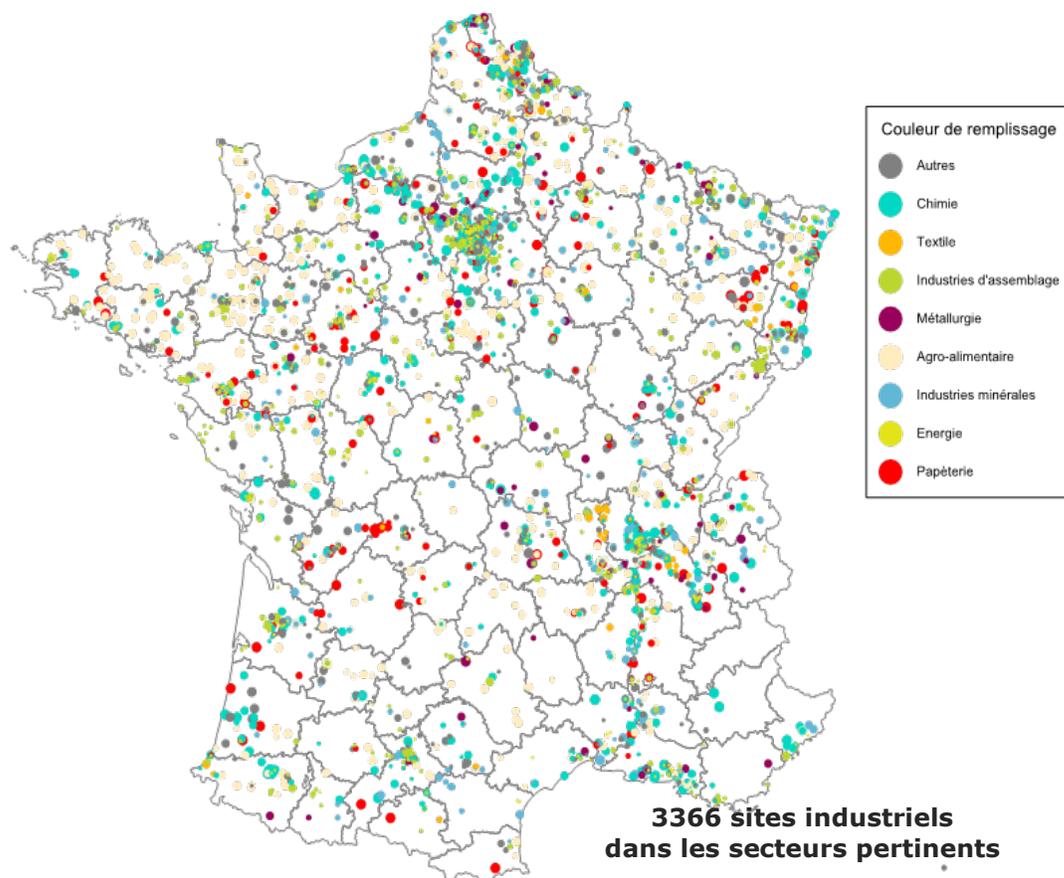
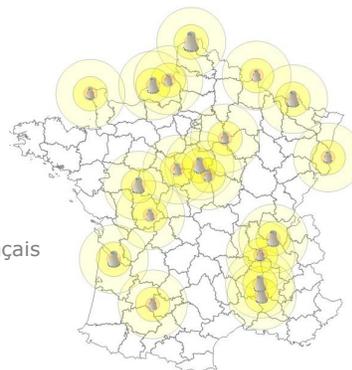


Figure 18 – Distribution géographique des sites industriels de plus de 50 salariés dans les secteurs identifiés comme pertinents sur le territoire de France métropolitaine

Cette distribution pourra ensuite être rapprochée de la position des 19 centrales nucléaires de production d'électricité.

Carte des 19 centrales
électronucléaires du parc français
en 2015



¹¹ Cartographie réalisée à l'aide du logiciel Cartes & Données (Groupe Artique), sur la base de coordonnées d'établissements industriels issues de l'annuaire d'entreprises Géosociétés

e. Besoin des industries énergétiques, analyse d'ensemble

D'après l'étude menée pour l'établissement des scénarios de l'ANCRE en 2010, le secteur de l'énergie en France avait cette année-là consommé 21.8 Mtep (253TWh) de chaleur, soit un chiffre équivalent aux 24,46Mtep (284TWh) consommé par l'industrie hors secteur de l'énergie.

Toutefois, ce besoin des industries énergétiques ne fait pas l'objet d'une enquête de consommation détaillée comparable à celle du CEREN, interdisant d'employer une approche similaire. De plus, dans le contexte de transition énergétique, il est rapidement apparu dans l'étude que les procédés en usage dans ce secteur, et par conséquent les consommations afférentes, sont en évolution rapide.

A noter : les industries énergétiques considérées ici sont celles qui visent à la production de **produits énergétiques**, combustibles et vecteurs énergétiques solides, liquides ou gazeux, et non pas la production d'électricité – hors de propos évidemment dans une logique de cogénération nucléaire – ou la production d'eau chaude et de vapeur telle que mise en œuvre dans les réseaux de chaleur – intégrée déjà aux consommations des secteurs industriels ou destinée à des applications de chauffage urbain, hors cadre de la présente étude.

▪ Méthodologie déployée concernant les produits énergétiques

Dans ce cadre, le besoin de chaleur en deçà de 250°C dans les industries énergétiques a été évalué au travers de quatre étapes :

1. Analyser les principaux procédés en usage pour la production de chacun des produits énergétiques
2. Déterminer les gammes de température ordinaires de mise en œuvre de ces procédés, afin de préciser lesquels ont un besoin en deçà de 250°C
3. Pour ceux-ci, rechercher des statistiques ou évaluations disponibles du besoin de chaleur correspondant aux procédés, ou à défaut construire une méthode d'estimation ad hoc
4. Projeter la méthode retenue sur les volumes du produit aujourd'hui et dans une projection 2020-2025, ou *a minima* déterminer une dynamique d'évolution

Il est à noter que cette analyse diffère ainsi nettement de celle menée pour les industries manufacturières hors énergie. D'une part car la précision, l'exhaustivité, l'homogénéité et la fiabilité de l'exercice sont *a priori* nécessairement bien moindres, et d'autre part car la projection 2020-2025 possible pour l'énergie dans le cadre des logiques de transition énergétique, l'est bien moins pour les autres secteurs, qui ne bénéficient pas de plans de transition du même type.

Les conclusions d'étude tiennent compte de ces spécificités des deux volets de l'analyse.

- Besoins de chaleur pour la production de produits énergétiques

Bois de chauffe et pellets de bois

Le séchage à l'air libre du bois de chauffe et surtout des pellets de bois ne permet d'abaisser le taux d'humidité résiduelle qu'à environ 30%, un niveau trop élevé pour obtenir une bonne combustion. Ce séchage représenterait aujourd'hui un besoin de chaleur à basse température d'environ 100 GWh annuels, concentré aujourd'hui sur une dizaine de sites en France.

Même si les projections indiquent que le marché de cette biomasse devrait quintupler d'ici à 2020, cela demeure un besoin modeste.

Agro-carburants

Parmi les procédés de production d'agro-carburants, les voies organiques ont un besoin de chaleur en deçà de 250°C très significatif et amené à croître.

1ère génération	Bioethanol 	Fermentation	30-70°C	
		Distillation- déshydratation	130-150°C	
	Biodiesel 	Préparation de la biomasse	200-320°C	
		Transestérification,	50-70°C	
		Hydrogénation	<100°C	
2nde génération	Voie thermochimique 	Torréfaction / pyrolyse biomasse	200-500°C	
		Gaséification	500-1000°C	
		Synthèse Fischer Tropsch	200-350°C	
	Voie biochimique 	Fermentation	30-70°C	
		Transesterification	20-80°C	
3ème génération	Voie biologique 	Croissance micro-algues	Ambiante	
		Fermentation	20-40°C	
		Transesterification	50-70°C	
		Hydrolyse	20-40°C	
		Liquéfaction/hydrotraitement	40-120°C	

Figure 19 – Analyse des températures de procédé pour les différentes voies de production de bio/agro-carburants

Considérant les différentes voies susceptibles d'avoir l'usage d'un apport de chaleur externe en deçà de 250°C, il est possible de dresser une évaluation très approximative mais qui donne un ordre de grandeur du besoin actuel autant que des projections raisonnables d'évolution si les objectifs gouvernementaux sont atteints.

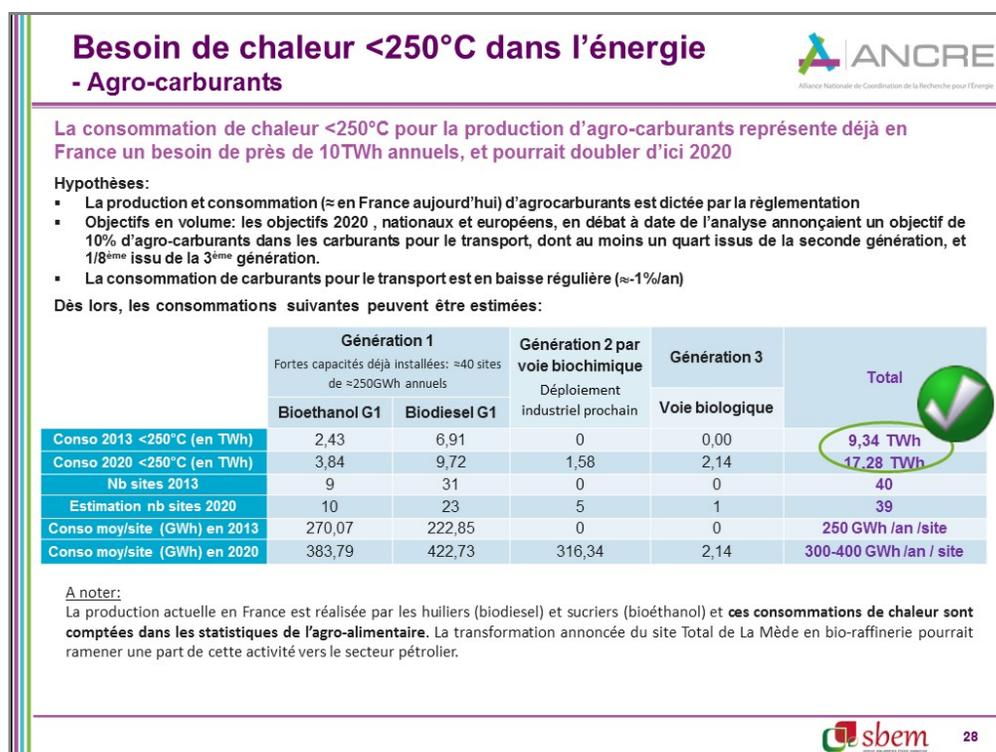


Figure 20 – Extrait de l'évaluation du besoin théorique de chaleur en deçà de 250°C pour la production française d'agro-carburants, en 2013 et 2020 – éléments approximatifs à finalité indicative.

Il est important de noter que les besoins actuels sont comptablement intégrés aux consommations des secteurs sucrier et huilier.

Hydrogène

La production actuelle d'hydrogène, par raffinage pétrolier ou gazier, cokéfaction ou gazéification du charbon ou électrolyse, ne nécessite pas d'apport indépendant de chaleur en deçà de 250°C. Toutefois par la dynamique propre de son marché industriel actuel, en complément au gaz naturel ou comme base d'opérations de méthanation, et plus encore à partir de l'essor des usages en stockage d'énergie mobile ou stationnaire, le marché de l'hydrogène devrait connaître une croissance très significative dans les années à venir.

Aujourd'hui, 5 voies principales de production d'hydrogène :

	Réformage du gaz naturel	Raffinage pétrolier	Cokéfaction ou gazéification du charbon	Electrolyse du sodium	Electrolyse de l'eau
Production mondiale 2008 ¹	24Mt	15Mt	9Mt	1,8Mt	0,2Mt
Besoin de chaleur BT	T°>250°C ❌	T°>250°C ❌	T°>250°C ❌	Sous-produit chimie minérale (cf segment CEREN)	Sur eau chauffée (50-90°) ou vapeur (rare encore ²), par voie électrique ✅
Marché adressé	Marché de l'hydrogène industriel et/ou énergétique: 53Mt en 2010, 83MT en 2025 ²				Electrolyseurs petite / moyenne capacité pour besoins industriels locaux ❌

Figure 21 – Extrait de l'évaluation du besoin théorique de chaleur en deçà de 250°C pour la production d'hydrogène

Or l'une des voies de production d'hydrogène les plus prometteuses économiquement et en terme de bilan énergétique est celle de l'*Electrolyse Haute Température*. Cet intérêt prend toutefois tout son sens à la condition d'un apport de chaleur important pour la mise en phase vapeur de l'eau à électrolyser (environ 1kWh pour 1Nm³ de vapeur), la montée en température opérationnelle de cette vapeur pouvant ensuite être réalisée en grande partie par optimisation des électrolyseurs autour de l'opération exothermique de l'électrolyse elle-même.

L'existence d'une offre de chaleur décarbonée pourrait en ce sens et sur la base de cette technologie être un levier conséquent d'efficacité économique et environnementale dans le cadre de l'essor des usages et marchés de l'hydrogène.

Carburants pétroliers

La production de carburants pétroliers implique des procédés sur une large plage de températures, mais avec la nécessité d'un apport important entre 300 et 400°C, alimenté par autoconsommation. La chaleur dissipée par les procédés les plus thermiques couvre amplement les besoins en deçà de 250°C et l'optimisation thermique des raffineries, déjà poussée, demeure économiquement bien préférable à l'apport d'une chaleur externe. Considérant cela, il apparaît qu'une offre de chaleur à moins de 250°C ne trouvera pas de marché dans ce secteur.



Raffinerie pétrolière, pas de besoin adressable

Les apports de chaleur exogène – aujourd'hui couverts par auto-consommation – sont très majoritairement >350°C et **les besoins <250°C, bien que très significatifs en volume, sont couverts par circulation thermique depuis ces procédés >350°C.**

Pour apporter de la valeur aux raffineries il faudrait fournir de la chaleur >>>300°C.

C'est d'ailleurs semble-t-il l'une des difficultés rencontrée par les essais de valorisation de chaleur fatale industrielle : on peut trouver beaucoup de chaleur <150-200°C, mais une part importante des besoins se situe plus haut en T°.

Figure 22 – Extrait de l'évaluation du besoin de chaleur en deçà de 250°C pour la production de carburants pétroliers

Autres produits énergétiques

Les biogaz, gaz de synthèse, cokeries, le charbon de bois, le traitement/séchage des déchets, la production de méthane/gaz naturel et le cycle du combustible nucléaire n'ont pas ou très peu de besoin d'apport de chaleur en deçà de 250°C.

Produits énergétiques	Intérêt à creuser
 Charbons, coke	Besoins >>>250°C
 Charbon de bois	Uniquement de petites structures et besoins >250°C
 Biogaz, méthanisation déchets	Besoins pour le séchage de la biomasse et l'accélération de la méthanisation, mais installations de petite taille + emploi du séchage solaire gratuit.
 Gaz naturel	Très peu de de besoins de chaleur, pas de besoin <250°C et une activité en phase d'extinction en France (fin du gisement de Lacq)
 Combustible nucléaire	Exothermiques, la production comme le retraitement du combustible nucléaire ne présentent pas de besoin d'apport externe de chaleur.
 Incinération des déchets	Besoin sur séchage et préchauffage mais autoconsommation par circulation énergétique sur site et trop faible valeur ajoutée pour envisager un apport de chaleur
 Liqueur noire papetière	Résidu de papeterie, traité dans industrie hors énergie

Figure 23 – Extrait de l'évaluation du besoin de chaleur en deçà de 250°C pour la production de produits énergétiques divers, énergies renouvelables thermiques et autres

Au total, l'analyse des besoins de chaleur en deçà de 250°C dans les industries énergétiques révèle un besoin limité à la production d'agro-carburants (besoin important mais pris en compte dans les industries des sucres et corps gras) et au séchage de biomasse (besoin faible). A horizon 2020 et 2025, on peut estimer que ces besoins aujourd'hui très modestes évoluent fortement à la hausse, une hypothèse raisonnable apparaissant être un doublement du besoin pour les agro-carburants, un quintuplement pour le séchage de biomasse. Il existerait également un important besoin potentiel associé à l'une des voies techniques prometteuses pour la production d'hydrogène, mais dont l'estimation repose sur des hypothèses faibles. Les autres domaines énergétiques ne représentent pas un besoin adressable par une offre de chaleur issue de cogénération par le parc nucléaire français.

III. Faisabilité technique et capacités industrielles, en France et en Europe

a. Méthodologie d'évaluation des éléments de faisabilité et conditions de succès

Au-delà de l'analyse des besoins de chaleur des industries françaises, l'étude avait pour objectif d'explorer les éléments de faisabilité notamment technique et des conditions à réunir pour envisager un déploiement réussi d'une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire.

Objectifs de l'étude

Caractériser le besoin de chaleur <250°C de l'industrie française et évaluer la part de ce besoin susceptible d'être couverte par une offre issue de cogénération nucléaire.



▪ Acteurs et technologies de la chaleur industrielle, en France et en Europe

Dans cet objectif, une phase d'étude de cartographie des acteurs et technologies de la chaleur industrielle a été confiée au cabinet grenoblois TKM. Réalisée entre octobre 2014 et février 2015, cette étude s'est articulée en deux phases :

- Une **phase bibliométrique**, centrée principalement sur l'analyse de la propriété intellectuelle, également des publications scientifiques ;

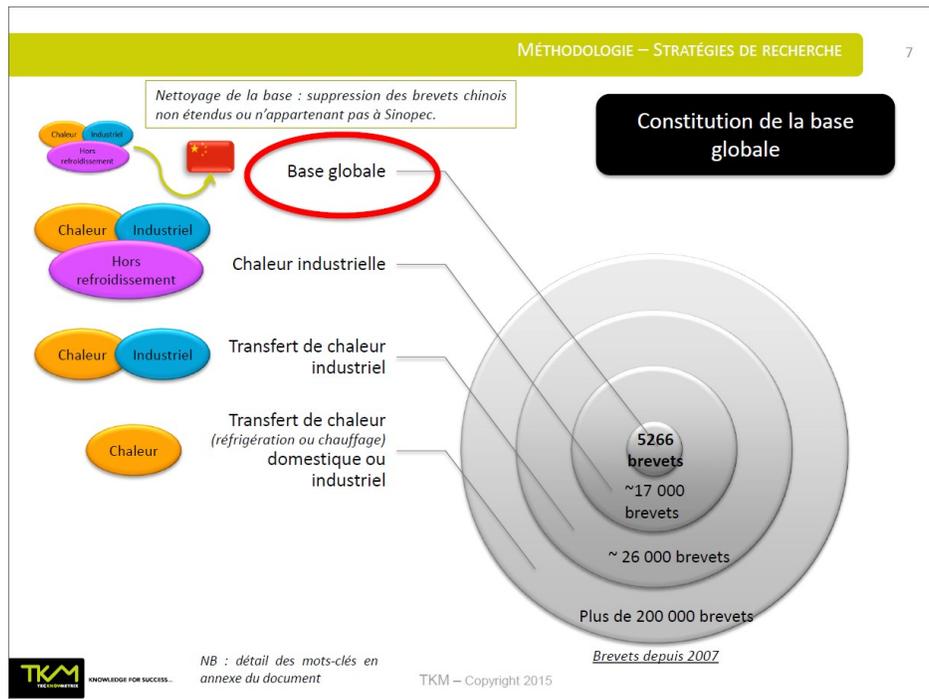


Figure 24 – Extrait du rapport final de l'analyse réalisée par le cabinet TKM – constitution de la base de référence brevets

- Une **phase « terrain »**, constituée de plus de vingt entretiens téléphoniques avec des acteurs issus des différentes étapes de la chaîne de valeur de la chaleur industrielle, choisis pour leur positionnement spécifique sur la problématique et/ou la visibilité de leur propriété intellectuelle dans le domaine.



Figure 25 – Acteurs interrogés dans le cadre de la phase terrain de l'étude concernant les acteurs et technologies de la chaleur industrielle

- Réception de l'offre dans certains territoires-test

En fin d'étude, à l'issue de l'analyse du marché accessible à une offre à l'industrie de chaleur issue de cogénération nucléaire, le comité de pilotage a décidé de trois sites pertinents pour une exploration plus avancée de la première réception de l'offre envisagée par les acteurs locaux : autorités politiques et administratives locales (collectivités urbaines principalement) en charge de l'action locale sur l'énergie, clients industriels potentiels et acteurs de réseaux industriels (pôles, centres techniques) situés dans les territoires et concernés par la problématique de l'énergie et de la chaleur.

Considérant les résultats de l'évaluation du marché accessible depuis chacune des centrales françaises (cf. partie 0), les trois territoires test retenus ont été ceux des environs de Dunkerque (centrale de Gravelines), le Havre-Dieppe (Penly et Paluel) et Lyon (Saint Alban). Sur chacun de ces territoires, des acteurs politiques et/ou administratifs et industriels ont été interrogés, ces derniers choisis dans les acteurs de la Chimie, de l'agro-alimentaire et de la papèterie.

Ces entretiens, menés en septembre et octobre 2015, ont permis non seulement de valider les hypothèses faites pour l'évaluation du marché accessible (à nouveau, cf. partie 0), mais également de recueillir des éléments concernant la faisabilité (principalement non technique dans ce cas) et les conditions de succès du déploiement d'une telle offre.



Figure 26 – Acteurs interrogés dans le cadre de l'évaluation de la réception par les acteurs de l'offre envisagée sur trois territoires test

Les résultats de ces deux phases d'entretien, mis en regard des enseignements tirés lors des autres phases de l'étude ont permis d'établir les éléments de conclusion ci-après.

b. Evaluation de la faisabilité technique

L'étude réalisée par TKM sur la propriété intellectuelle en matière de chaleur industrielle s'est appuyée notamment sur une segmentation par grandes étapes du procédé :

- soutirage de la chaleur cogénérée à la source
- transport de la chaleur, en considérant un transport à grandes puissances / quantités d'énergie
- stockage de la chaleur, où que ce stockage se place dans la chaîne de distribution, là encore en grande puissance / quantité d'énergie
- conversion en procédé, dans l'optique d'un usage industriel

A noter que pour les analyses de la propriété intellectuelle comme au cours des entretiens, deux « filtres » a priori ont été appliqués à l'analyse :

- la gamme pertinente de température, quand elle pouvait être précisée, en deçà de 250°C et bien sûr hors applications de froid
- les puissances/quantités d'énergies ciblées, sans limites clairement définies mais devant être suffisamment importantes pour avoir une pertinence économique à la hauteur d'une fourniture issue d'une cogénération par des réacteurs du parc électronucléaire national.

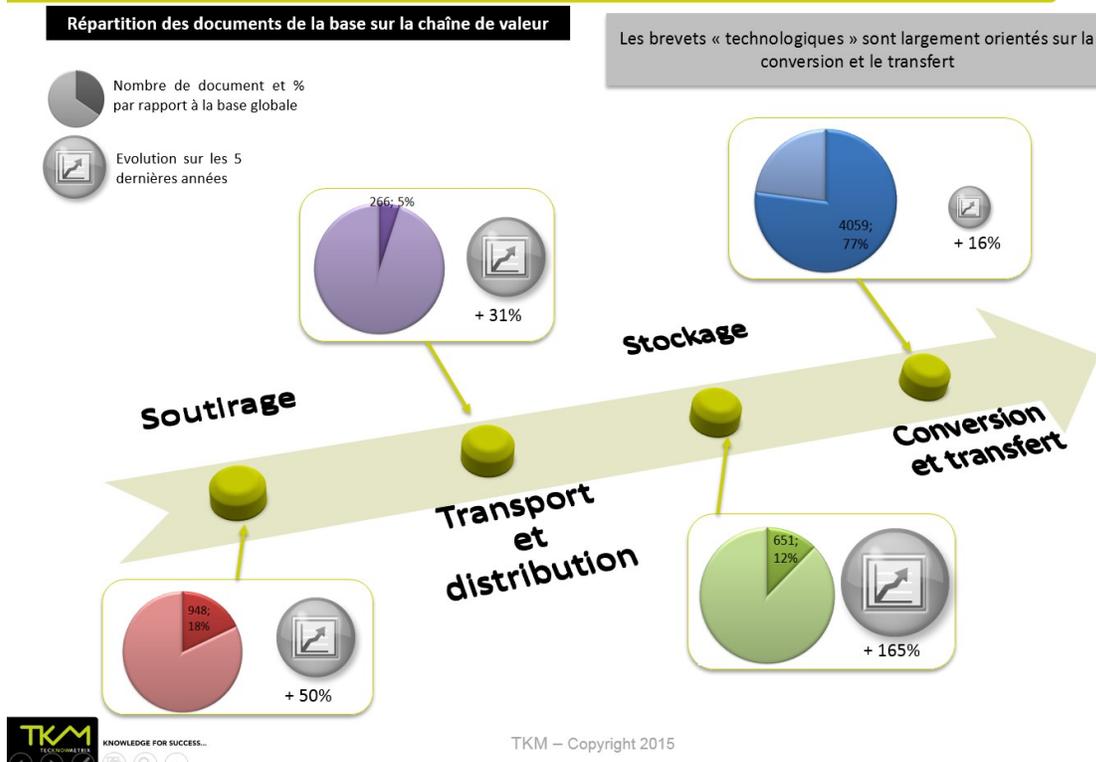


Figure 27 – Distribution des brevets pris en compte dans l'analyse sur les quatre grandes étapes du processus

- Le soutirage de vapeur : pas d'obstacle identifié

S'il constitue un investissement significatif et nécessite des études d'ingénierie aux normes nucléaires, ainsi qu'une révision du décret de création de l'installation nucléaire, un soutirage de vapeur d'ampleur limitée dans le circuit secondaire des réacteurs à eau pressurisée – quelques points de pourcentage de la capacité de production du réacteur – ne comporte aucune impossibilité technique.

- Transport et distribution : de véritables autoroutes thermiques

La fourniture de plusieurs TWh de chaleur depuis un ou plusieurs réacteurs d'une même centrale électronucléaire implique d'avoir la capacité de transporter des puissances thermiques de plusieurs dizaines de Mégawatts, jusqu'à une centaine de kilomètres dans certains cas.

Aux niveaux de puissance considérés, aucune technologie de transport de la chaleur existante ou en développement ne semble à même de rivaliser en terme de ratio coût/avantage avec l'eau chaude, surchauffée ou en vapeur.

Comparaison des technologies de transport		
Type de transport	Priorisation	Explication
Transport classique GWh	Eau chaude/Vapeur	1 Le plus mature et économique mais pertes thermiques importantes et température limitée. <i>! Réglementation française du 8 Août 2014 sur le transport à T>120°C -> impact sur le coût !</i>
	Huile thermique	3 Peu utilisée : préférence pour l'eau chaude
Réactions catalytiques réversibles	Décomposition et synthèse du méthanol	4 Stade de recherche : pas d'acteurs identifiés travaillant sur la thématique
Systèmes à sorption MWh ?	Absorption solide-gaz	2 Prometteur : permettant un transport sans pertes sur de longue distance mais à un stade recherche
	Absorption liquide-gaz	
Systèmes à conteneurs MWh	Alliage absorbant d'hydrogène	4 Température limitée et à un stade recherche
	Chemical Heat Pump Container (CHCP)	4 Transport par voie terrestre ou maritime et à un stade recherche
	Matériaux à changement de phase	2 Niveau pré-industriel mais transport par voie terrestre ou maritime

Figure 28 – Analyse comparative des principales technologies de transport de chaleur

Cet avantage de l'eau chaude s'accompagne d'un besoin de recherche dans au moins trois directions :

- **L'optimisation de la distribution d'eau chaude** : il s'agit d'améliorer les infrastructures aux plans de la sûreté, de l'isolation, de la maintenabilité et d'augmenter si possible la densité de chaleur transportée (par l'ajout d'additifs notamment).
- **La gestion des réseaux de distribution** : la France compte des industriels de premier rang pour la conception, l'installation et la maintenance de réseaux de chaleur (EDF Dalkia et Engie GDF-Suez Cofely), à même d'étendre leur savoir-faire aux spécificités de la fourniture de chaleur industrielle qui appelle à mettre en œuvre des réseaux thermiques de forte puissance, à des températures variables et potentiellement soumis à des appels de puissance variables. Autant d'exigences qui en appellent à des « smart grids thermiques », assis sur des modèles économiques encore à préciser.
- **L'exploration d'autres modes de transport de chaleur que l'eau chaude** : il s'agit d'évaluer les potentialités à grande échelle d'autres technologies que l'eau chaude susceptibles d'être mises en œuvre en complément ou en remplacement, telles que systèmes à sorption, matériaux à changement de phase, etc.

▪ Le stockage de chaleur : un enjeu limité pour des circuits à forte inertie thermique

S'il apparaît que l'emploi de capacités de **stockage de courtes et moyennes durées** (quelques heures voire quelques jours) pourrait offrir une souplesse d'usage très favorable au recours plus fréquent à un développement des réseaux de chaleur notamment industriels, l'indisponibilité de solutions économiques aux températures pertinentes et à de fortes puissances demeure peu problématique a priori, pour trois raisons :

- **Les régimes d'utilisation** des principaux secteurs clients sont majoritairement en 3x8 heures quotidiennes, fin de semaines comprises, donc plutôt stables.

- **Le réseau de distribution lui-même**, par l'importance des volumes en cours de circulation à chaque instant, a un potentiel – à évaluer techniquement mais considéré significatif par les acteurs interrogés – d'amortissement dynamique des fluctuations d'offre ou de demande.
- **Le soutirage envisagé**, si l'on peut le considérer important d'un point de vue thermique, reste limité à quelques pourcents de la puissance d'un réacteur nucléaire. A noter que les conséquences de ce soutirage en termes de production électrique appellent des compléments d'étude.

Le **stockage saisonnier**, s'il peut dans son principe contribuer à lisser la demande des industries agro-alimentaires et celle du chauffage résidentiel, reste d'un emploi limité aux performances des technologies disponibles :

- stockage de capacité limitée dans la roche, le béton, les huiles thermiques, voire dans des matériaux à changement de phase ou par thermochimie
- stockage en aquifères de plus grande capacité mais à basse température.

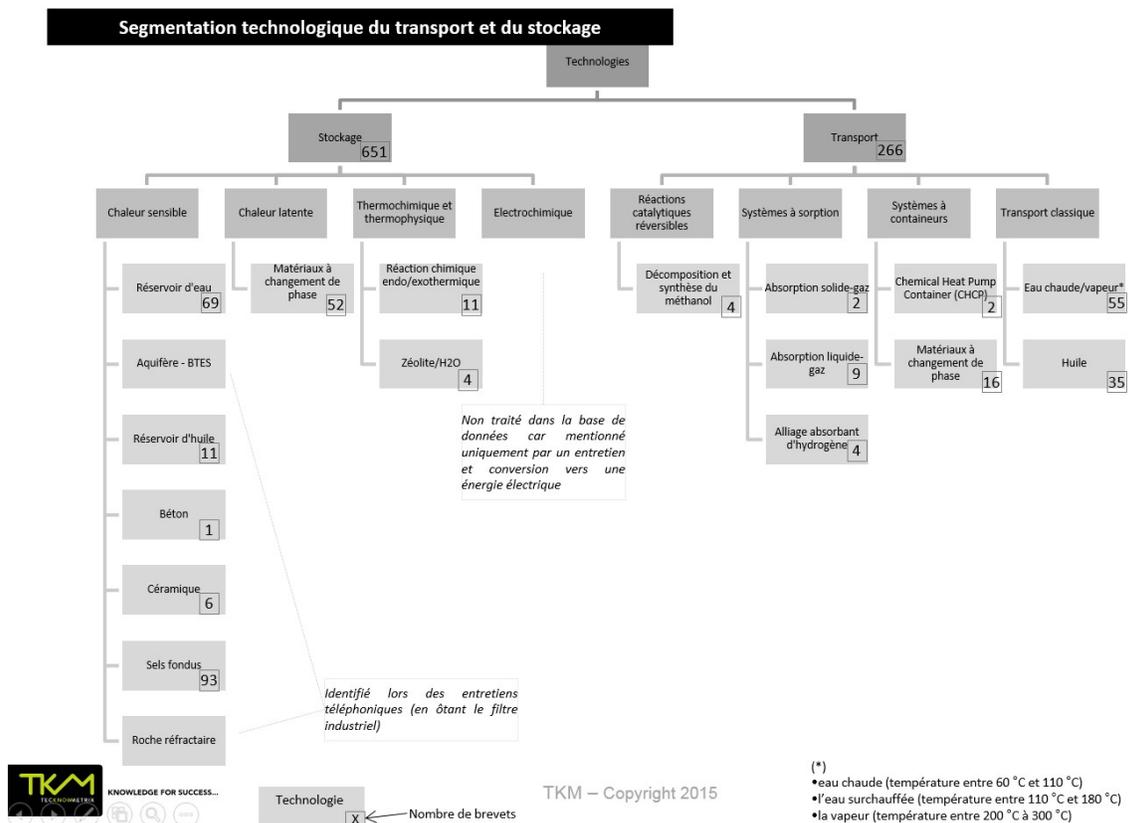


Figure 29 – Segmentation technologique du stockage et transport de chaleur

▪ Usage et conversion de la chaleur de procédé pour l'industrie

Hormis des cas de traitement thermique nécessitant des dynamiques de chauffe spécifiques, le remplacement d'équipements à combustion (fours, séchoirs, etc.) par des systèmes à échangeurs thermiques puisant leur énergie dans des réseaux de vapeur ou d'eau n'est pas problématique.

De nombreuses familles d'échangeurs de chaleur – à plaques, ailettes, tubes, etc. – ont déjà été développées pour l'industrie et font encore l'objet de recherches pour améliorer les coefficients d'échange, la résistance à la corrosion ou à l'encrassement, ou

pour permettre leur usage combiné. Les technologies existantes devraient permettre de répondre à l'essentiel des besoins identifiés.

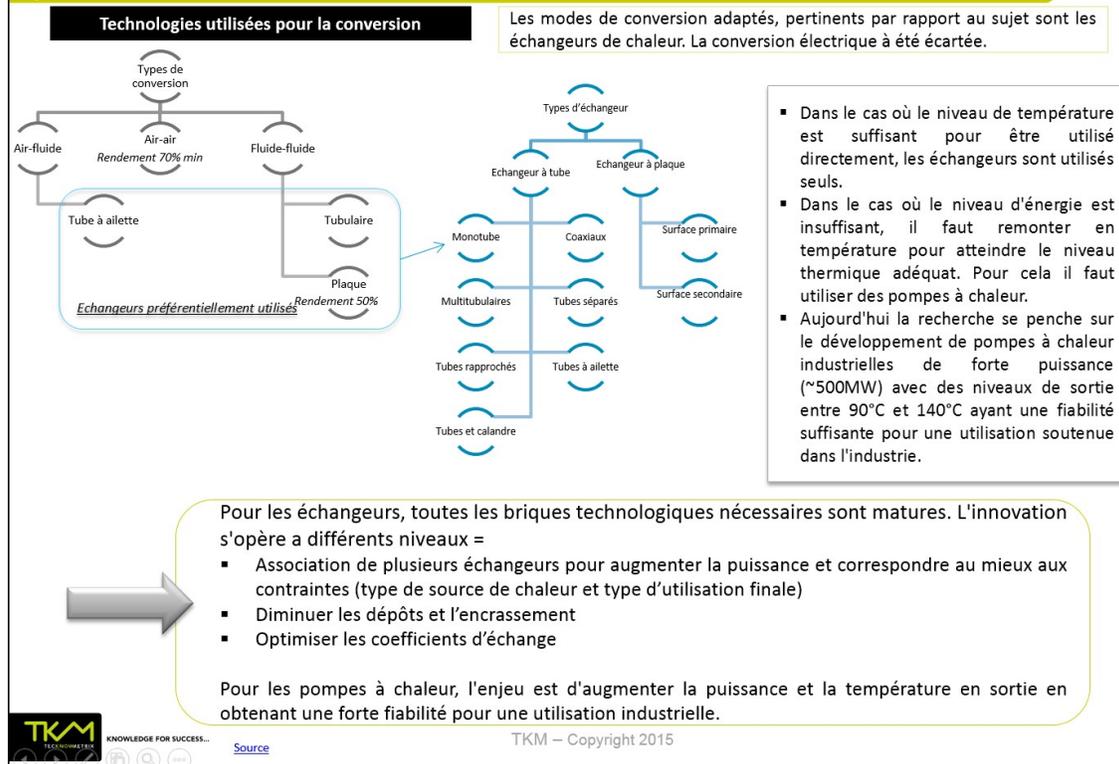


Figure 30 – Segmentation des technologies de conversion thermique

Un développement qui changerait la donne : les Pompes à Chaleur (PAC) haute puissance haute température

Les échangeurs permettent de transférer des puissances thermiques avec une baisse de température que l'on cherche à limiter, mais en aucun cas avec une élévation de température. Moyennant une certaine consommation d'électricité, les PAC disponibles aujourd'hui permettent de relever la température jusqu'à un maximum d'environ 120°C, ce qui est insuffisant pour satisfaire une partie significative des besoins de chaleur industrielle. Plusieurs des acteurs interrogés ont souligné le fait que l'existence de PAC de puissance permettant d'atteindre et même dépasser 250°C serait un levier majeur pour démultiplier le marché atteignable par toute offre de chaleur. Pour l'heure, aucune voie technologique n'est apparue dans l'étude proche de concrétiser cette rupture...

Depuis le soutirage de la vapeur jusqu'à la distribution, il n'y a donc pas de verrous technologiques... et l'eau chaude, liquide ou en vapeur, reste pour la distribution de chaleur la « technologie » de référence.

c. Capacités industrielles françaises et européennes

Sans avoir procédé à une revue de détail des capacités industrielles françaises, l'étude a permis d'établir l'existence en France d'une chaîne de valeur industrielle complète et de haut niveau, assorties de capacités de recherche et d'innovation moins complètes sans doute, mais toutefois bien réelles.

- Une chaîne de valeur industrielle française complète et au meilleur niveau

Le déploiement d'une infrastructure de distribution de chaleur à usage industriel implique l'existence d'un savoir-faire en termes de conception, installation, exploitation et maintenance de réseaux de chaleur, et d'une chaîne complète d'équipementiers. Sans disposer du potentiel industriel allemand en la matière, la France dispose d'acteurs reconnus sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Pour l'exploitation de réseaux de chaleur, elle dispose même de deux industriels de premier rang au plan international, Dalkia (ex groupe Veolia et désormais EDF) et Cofely (groupe Engie, ex GDF-Suez).

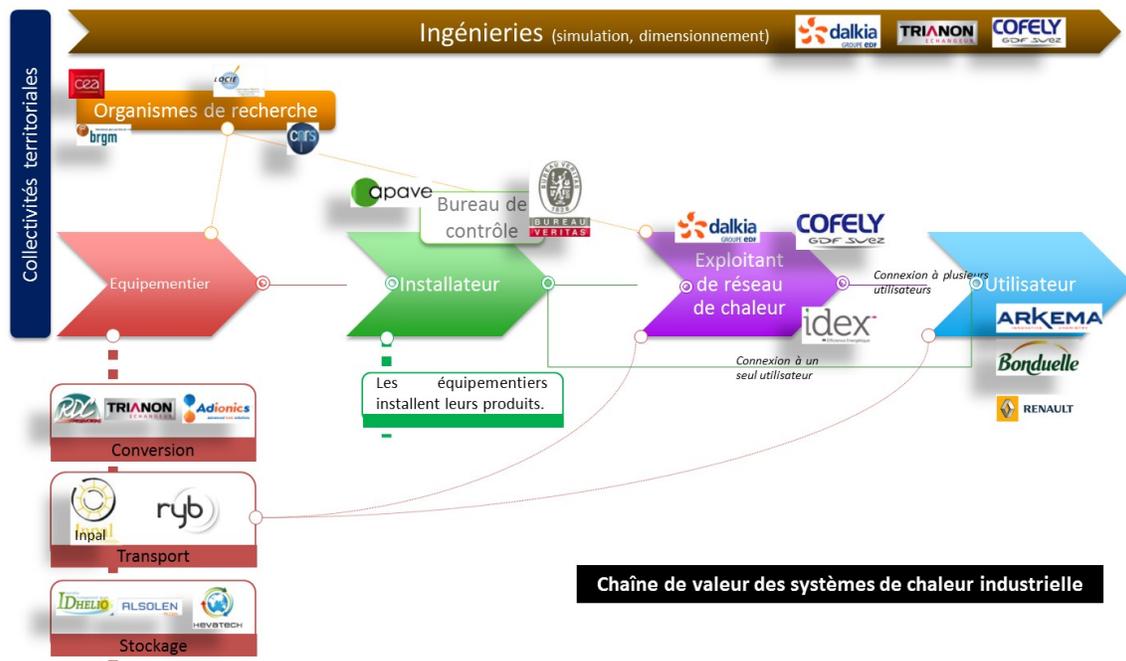


Figure 31 – Des acteurs industriels français sur toute la chaîne de valeur (liste non exhaustive, pour illustration uniquement)

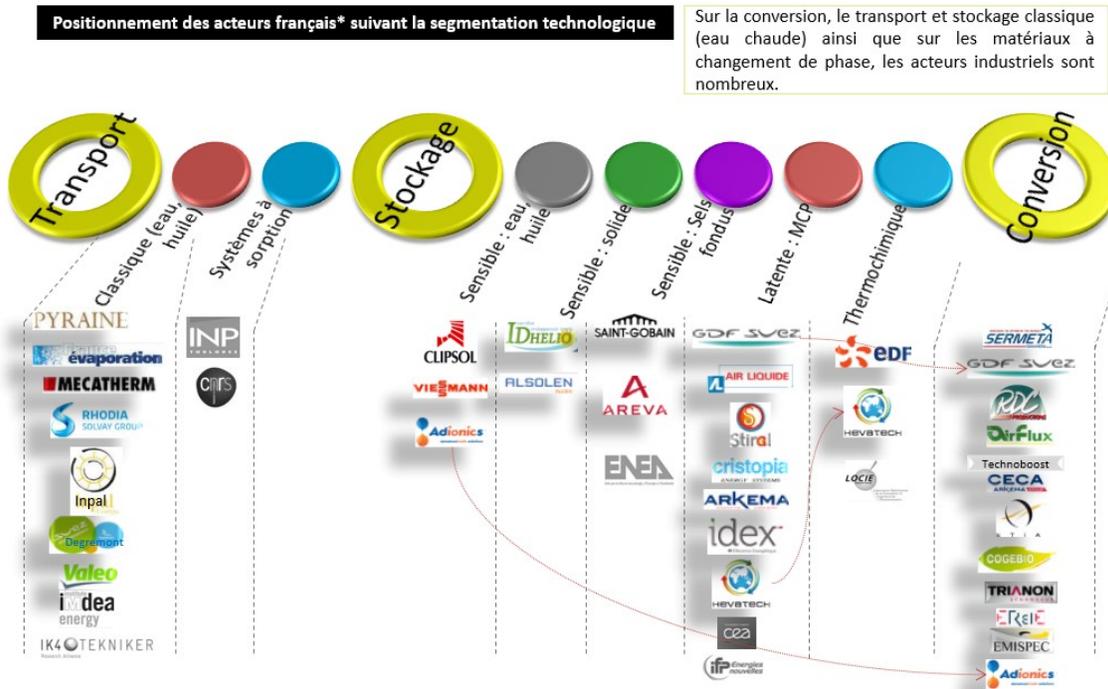


Figure 32 – Des acteurs industriels français visibles également sur l'ensemble des technologies passées en revue pour le transport et stockage de la chaleur

Sur les autres maillons de la chaîne, les grands industriels utilisateurs apparaissent assez présents dans la conception, l'usage et même la fabrication des échangeurs et d'autres équipements thermiques associés à leurs procédés. Pour le reste émerge un nombre important de PME et ETI spécialisées.



Figure 33 – Extrait de la présentation des résultats de l'étude au Colloque de l'ANCRE du 21 janvier 2016 sur la chaleur dans la transition énergétique – la France dispose d'acteurs dédiés à tous les maillons de la chaîne industrielle

▪ Des capacités nationales d'innovation technologique... suffisantes.

La France a déposé sur les 5 dernières années 2,6% des brevets mondiaux sur les technologies de la chaleur industrielle¹², ce qui la place parmi les pays de rang 2 dans ce domaine, derrière les Etats-Unis, le Japon, l'Allemagne, la Russie, la Corée du Sud et la Chine. Une position sensiblement en retrait de ce que l'on pourrait attendre, qui n'empêche pas les acteurs nationaux – et singulièrement les membres de l'ANCRE que sont l'IFPEN, le CEA et le CNRS, actifs et bien visibles sur ces sujets – d'être présents sur l'ensemble des voies technologiques du transport, stockage et conversion de chaleur.

¹² Source : rapport d'étude TKM sur les acteurs et technologies de la chaleur industrielle, 2015

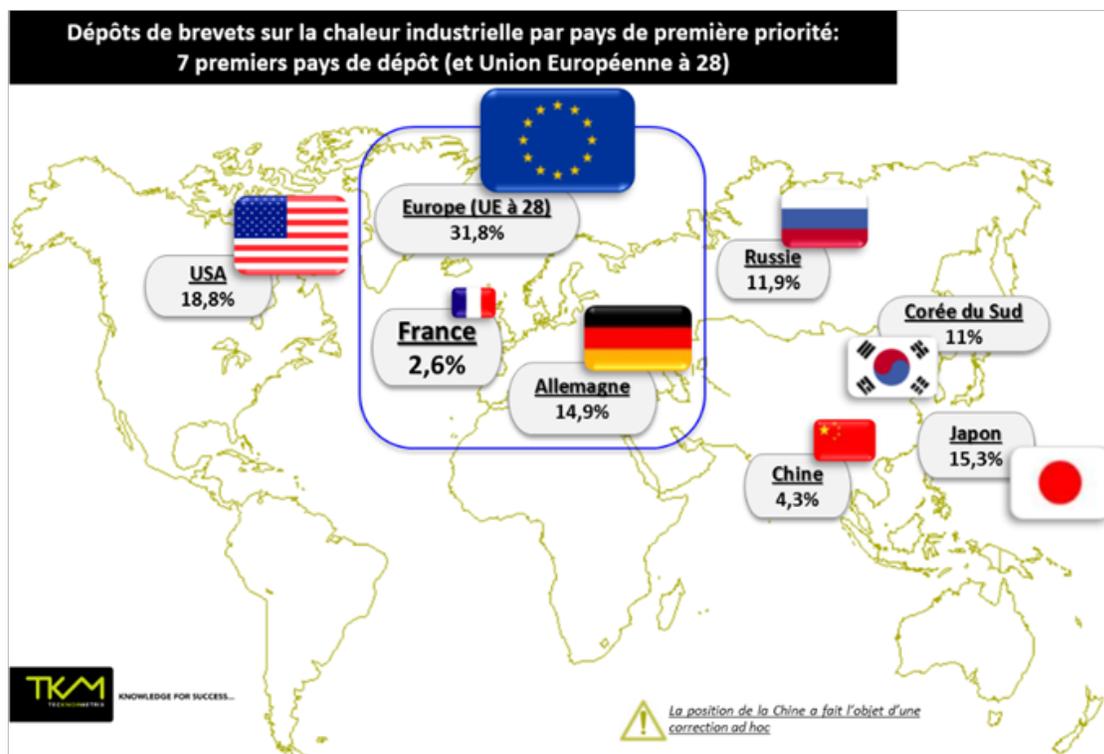


Figure 34 – La France en 7^{ème} position mondiale sur les dépôts de brevets concernant la chaleur industrielle... loin derrière les pays leaders

Pays	Nom	Nombre de brevets
RUSSIA	UNIV RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL	29
SOUTH KOREA	INST KOREA ENERGY RESEARCH	24
CHINA	INST FUSHUN PETROLEUM PETROCHEMICALS	23
FRANCE	IFPEN	11
GERMANY	DLR	10
CHINA	INST BEIJING RESEARCH CHEMICAL IND	9
CHINA	INST SHANGHAI RES PETROCHEMICAL TECH	9
UKRAINE	UNIV NATL FOOD TECH	8
FRANCE	CEA	7
GERMANY	FRAUNHOFER	7
USA	INST GAS TECH	6
CHINA	INST KOREA TEXTILE MACHINERY RES	6
CHINA	INST RES PETROLEUM PROCESSING	5
GERMANY	CTR JULICH	5
SOUTH KOREA	INST KOREA MACHINERY MATERIALS	5
JAPAN	INST TECH TOKYO	4
SLOVENIA	INST KOLEKTOR NANOTESLA	4
CHINA	INST TIANHUA CHEMICAL MACHINERY AUTOMATION	4
FRANCE	CNRS	4
RUSSIA	INST FIZICA APLICATA STIINTE	4
USA	INST BATTELLE MEMORIAL	4

Figure 35 – Les académiques français bien positionnés sur ces problématiques... particulièrement les membres de l'ANCRE.

Les acteurs industriels français visibles sur ces technologies sont plutôt des industriels utilisateurs - Alstom, Air Liquide, Areva, Saint Gobain ou Degremont. Les exploitants de réseaux de chaleur – y compris les leaders mondiaux que sont EDF-Dalkia ou Engie-Cofely, ainsi que les équipementiers français du domaine, ne sont pas visibles sur les listes de brevets.

Toutefois les acteurs interrogés dans l'étude ont unanimement considéré que les acteurs français disposent bien du savoir-faire technologique suffisant pour offrir des services de la meilleure qualité.

Etrangement, le seul point où il faut nuancer ce constat est celui de l'ingénierie – apanage pourtant des deux champions nationaux – où la complexité croissante des réseaux semble appeler à une techniques de modélisation, simulation et dimensionnement.

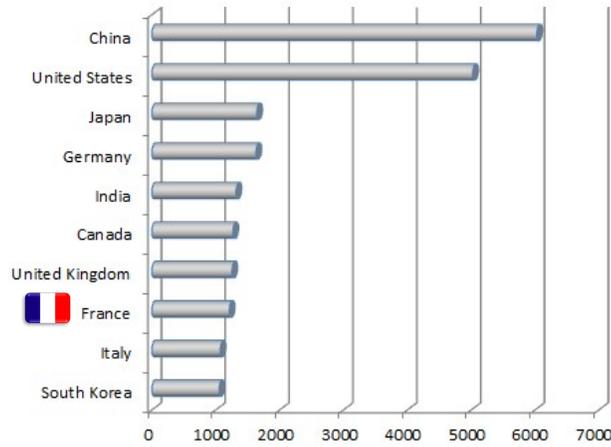


Figure 36 – Concernant les publications scientifiques traitant de chaleur utilisée en procédés industriels, la position de la France apparaît meilleure que sur les brevets.

A noter enfin que remise dans un contexte européen, la France dispose avec l'Allemagne d'un partenaire – et néanmoins concurrent – industriel situé aux premières places des classements d'acteurs, avec une chaîne industrielle plus complète encore que la chaîne française.

IV. Du besoin au marché, établissement de scénarios d'offre

Les parties de l'étude évoquées dans les chapitres précédents ont permis de caractériser le besoin de chaleur en deçà de 250°C dans l'industrie française et d'établir la faisabilité technique et l'existence de capacités industrielles *a priori* suffisantes en France et en Europe.

Les étapes suivantes, dont la démarche et les résultats sont détaillés ci-après, ont permis de déterminer le marché raisonnablement accessible en France à une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire.

Objectifs de l'étude

Caractériser le besoin de chaleur <250°C de l'industrie française et évaluer la part de ce besoin susceptible d'être couverte par une offre issue de cogénération nucléaire.



a. Identification des cibles commerciales : notion de sites industriels pertinents

En considérant les **profils sectoriels de consommation** d'énergie thermique et la **distribution géographique** des sites industriels français, ont été considérés comme **clients potentiels pertinents** pour une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire ceux qui satisfont à la fois aux trois conditions suivantes :

- Une consommation de chaleur qui se situe à des températures majoritairement inférieures à 250°C
- Un poids de la chaleur dans les coûts élevé
- Une forte consommation thermique annuelle du site en deçà de 250°C

L'interprétation de ces trois conditions et la manière dont elles ont été vérifiées dans l'étude est détaillée ci-après.

▪ Consommation de chaleur à une température majoritairement inférieure à 250°C

Il a été considéré dans l'étude – hypothèse testée lors des entretiens de la dernière partie des travaux – qu'un site industriel consommant une part importante de chaleur à plus de 250°C dimensionne son approvisionnement énergétique pour ses procédés haute température et dispose a priori de ressources d'optimisation thermique. Il se trouve par conséquent moins accessible à une offre externe de chaleur.

Pour rendre compte de cet écart d'accessibilité dans l'évaluation du marché potentiel pour la fourniture de chaleur par cogénération, un **facteur de pondération fonction de la part relative de chaleur en deçà de 250°C** a été appliqué au besoin de chaleur dans cette gamme de température de chaque site industriel potentiellement client (*cf. valeur de ce facteur en encart*).

Pondération du besoin en fonction du ratio entre consommations en deçà de 250°C et consommations toutes températures

Les facteurs suivants ont été appliqués :

- **>90% du besoin est <250°C** : tout le besoin <250°C est réputé « accessible »
⇒ *facteur de 100%*
- **66 à 90% du besoin <250°C** : l'accessibilité à ce marché doit être très peu problématique ⇒ *facteur de 90%*
- **50 à 66% du besoin <250°C** : encore peu problématique ⇒ *facteur de 75%*
- **25-50% du besoin <250°C** : la majorité du besoin est à plus de 250°C, l'accessibilité est problématique ⇒ *facteur de 10%*
- **<25% du besoin <250°C** : très problématique ⇒ *facteur de 0%*

De fait, l'application de ce facteur a exclu des clients potentiels les sites de secteurs tels que la sidérurgie, la verrerie ou la cimenterie, qui ont des besoins de chaleur en-deçà de 250°C (notamment pour le préchauffage) mais les couvrent généralement – ou peuvent/pourraient certainement le faire et l'on considère ici que ce serait écologiquement et économiquement préférable – par récupération d'une partie de la quantité bien supérieure de chaleur rejetée par leurs procédés opérant à plus haute température.

▪ Poids de la chaleur dans les coûts

Pour mieux rendre compte de l'attractivité d'une offre de fourniture par cogénération, les besoins de chaleur en-deçà de 250°C des différents secteurs industriels ont été pondérés également en fonction de la part que représente la consommation de chaleur en deçà de 250°C dans l'économie de chaque secteur, à partir d'un indicateur synthétique à cinq niveaux (Très faible ; Faible ; Normal ; Fort ; Très fort) constitué à partir des ratios entre dépenses liées à la consommations de chaleur dans chacun des secteurs (source : volumes d'après données CEREN de consommation et prix d'après enquête annuelle de l'INSEE sur la consommation d'énergie dans l'industrie, 2012) et les données de chiffre d'affaire, valeur ajoutée et volumes d'achats de marchandises et matières premières (source : Données enquête ESANE, INSEE 2012). La valeur des facteurs de pondération correspondants est indiquée en encart.

Facteur de pondération du besoin en fonction du poids des consommations de chaleur en deçà de 250°C dans l'économie du secteur

Les facteurs suivants ont été appliqués :

- **Poids très fort** ⇒ *facteur de 100%*
- **Poids fort** ⇒ *facteur de 90%*
- **Poids moyen** ⇒ *facteur de 75%*
- **Poids faible** ⇒ *facteur de 25%*
- **Poids très faible** ⇒ *facteur de 10%*

Des secteurs comme l'aéronautique, pour lesquels les procédés thermiques (séchage de peintures ou traitements thermiques) pèsent très peu dans la valeur ajoutée produite sont ainsi a priori nettement pondérés à la baisse.

Consommations annuelles 2012		Coûts		Données enquête ESANE, INSEE 2012				Analyse			
Secteurs et segments		Estimation de dépenses correspondantes (k€)	CA HT (k€)	VA HT - hors autres produits et autres charges (k€)	Achats de marchandises (k€)	Achats de matières premières (k€)	Part des achats de mat. prem. dans le CA 2012	Dépenses de chaleur / VA HT	Dépenses de chaleur / Achats marchandises et mat. prem.	Poids des coûts de chaleur <250°C dans l'économie du secteur	
12 : Industrie laitière		263 271	27667094	4404976	1021459	16150500	58,4%	1,0%	6,0%	Moyen	
13 : Sucreries		296 309	4470888	1202962	153555	4926159	43,1%	6,6%	24,6%	Très fort	
14 : Solde des IAA		872 875	146303634	32204685	13566348	70476419	48,2%	0,6%	2,7%	Faible	
Industrie des fruits et des légumes (6) : 1031Z-1039(A-B)		78 542	6931825	1417784	500691	3469251	50,0%	1,1%	5,5%	Moyen	
Industrie des corps gras (7) : 1041(A-B)-1042Z		62 736	8084644	449353	2993728	3836734	47,5%	0,8%	14,0%	Moyen	
Autres activités de travail des grains (9) : 1061B		12 622	1553772	285359	90730	794566	51,1%	0,8%	4,4%	Moyen	
Produits amyliacés (10) : 1062Z		229 903	3166718	634272	117091	1547370	48,9%	7,3%	36,2%	Très fort	
Aliments pour animaux (11) : 1091Z-2Z)		111 844	12963187	1694233	1564649	7674472	59,2%	0,9%	6,6%	Moyen	
Transformation du thé et du café (15) : 1083Z		11 991	1711016	351527	228336	585173	34,2%	0,7%	3,4%	Moyen	
Maiterie (19) : 1106Z		20 482	642703	69266	136866	325465	50,6%	3,2%	29,6%	Fort	
Cidre, eau de table, jus de fruits, boissons rafraichissantes (20) : 1032Z-1103Z-1107(A-B)		28 839	9190794	1982873	1193761	3567445	38,8%	0,3%	1,5%	Faible	
Brasserie (21) : 1105Z		14 614	2675774	979458	163669	747466	27,9%	0,5%	1,5%	Faible	
Autres IAA (3) (4) (5) (8) (12) (13) (14) (16) (17) (18)*		301 302	99383201	24430560	6566827	47930477	48,2%	0,3%	1,2%	Très faible	
Total IAA			178441617	37902223	1,5E+07	88555076					
16 : Sidérurgie		26 127	1324294	1412001	262884	7709331	58,2%	0,2%	1,8%	Très faible	
18 : Métaux non ferreux		89 321	6761424	1260118	200691	4035110	59,7%	1,3%	7,1%	Moyen	
Métallurgie de plomb, de zinc ou d'étain (24) : 2443Z		32 826	711552	154143	68588	380413	53,5%	4,6%	21,3%	Fort	

Figure 37 – Extrait du détail de la détermination de l'indicateur d'intensité en chaleur <250°C par secteurs et segments

- Consommation par site

A partir du profil sectoriel moyen, d'un ajustement proportionnel à la taille (effectifs) des sites et des deux facteurs de pondération précédents, une consommation moyenne annuelle a pu être estimée pour chaque site industriel français des secteurs retenus comme a priori pertinents. Cette liste a été établie à partir d'un annuaire 2013 des sites industriels employant plus de 50 personnes (seuil bas disponible, pertinent au vu de l'objectif de cibler les lieux de forte consommation de chaleur), fourni par l'annuaire Géosociétés.

Considérant les investissements d'infrastructure nécessaire à la distribution de chaleur, une hypothèse prudente a alors été de considérer comme cibles a priori pertinentes les seuls sites consommant après pondération plus de 10 GWh annuels. L'hypothèse d'une barrière plus basse à 5GWh annuels a également été testée, avec un impact très faible en termes d'évolution du marché accessible in fine à l'offre considérée.

A noter : Effets de co-localisation

La possibilité de desservir plusieurs sites industriels situés dans la même direction par rapport à une centrale et ayant des besoins annuels inférieurs à 10 GWh permettrait d'augmenter le marché atteignable et de partager les coûts d'infrastructure entre plusieurs clients. Mais la prise en compte de ces co-localisations est complexe et pose des questions de température de fourniture de puissance appelée et de gestion de la distribution.

Trop complexes à traiter en première analyse, ces effets n'ont pas été pris en compte dans cette étude. Il en résulte une possible minoration du marché accessible.

Au total, la carte des sites clients pertinents a donc été constituée en sélectionnant les sites industriels :

- **dont la consommation de chaleur en deçà de 250°C estimée est d'au moins 10 GWh annuels,**
- **qui appartient à des secteurs pour lesquels cette gamme de température est dominante,**
- **et qui appartient à des secteurs pour lesquels cette gamme de température est d'un poids économique important.**

A noter : Saisonnalité du besoin

La saisonnalité aurait pu constituer un autre filtre applicable ex ante pour déterminer les sites industriels pertinents. Il s'agit toutefois d'un effet complexe, difficile à prendre en compte. A énergie donnée, un besoin concentré en saison réduit l'effet de lissage du besoin mais augmente les appels de puissance.

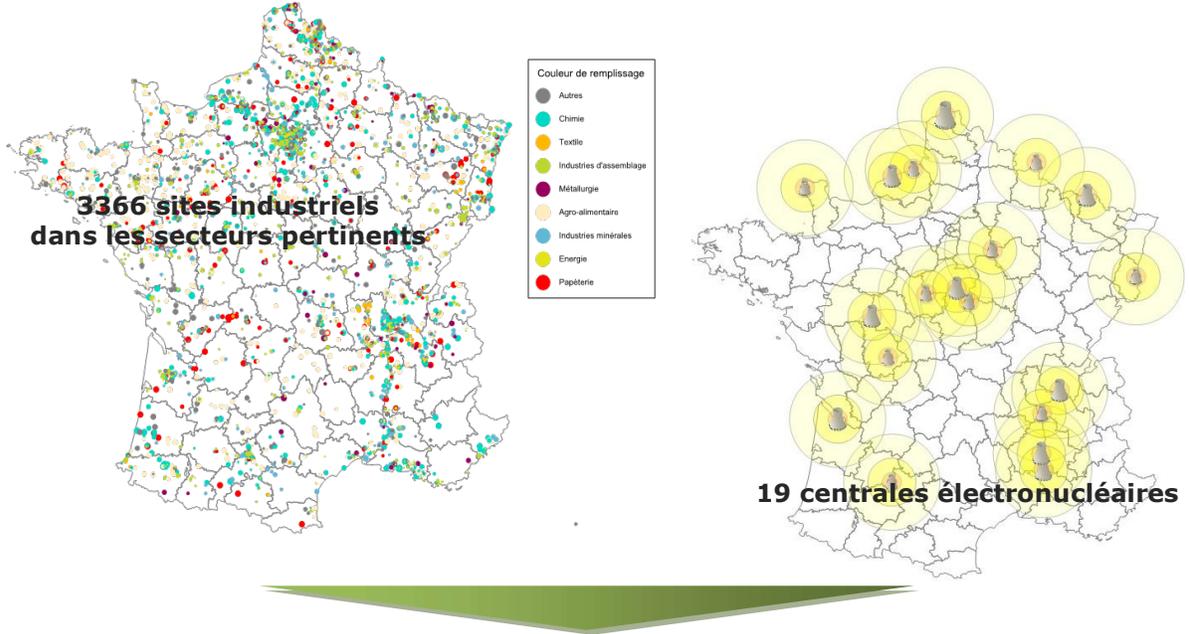
Une étude technico-économique plus approfondie serait nécessaire pour réellement évaluer l'impact d'une saisonnalité marquée sur la pertinence des sites potentiellement clients de l'offre envisagée.

Pour plus de détails sur l'analyse de saisonnalité, voir page 1722.

b. Distribution géographique des sites pertinents

Comme précisé plus haut, il a été procédé dans l'étude à un rapprochement de la distribution géographique des sites industriels a priori pertinents pour être clients d'une offre de chaleur issue de cogénération par le parc nucléaire français et de celle des centrales.

Distribution géographique des sites industriels >50 employés, par clusters sectoriels



Tous sites >10GWh et moins de 100km d'une centrale

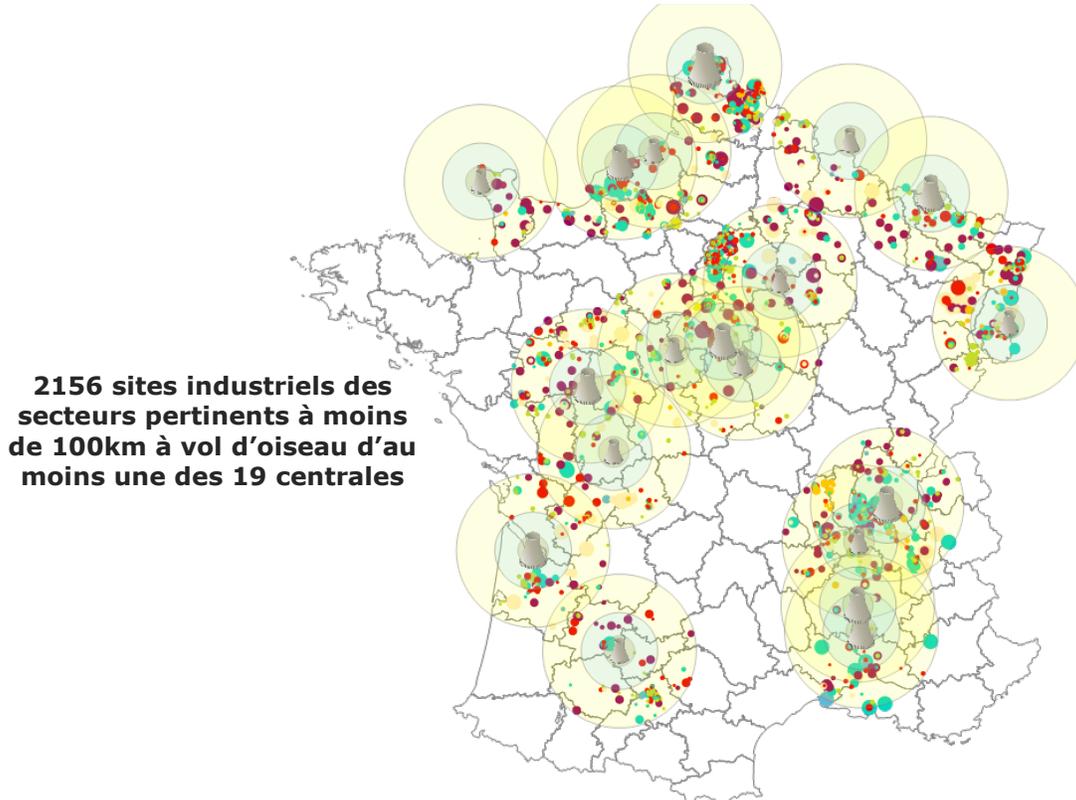


Figure 38 – Plus de 2000 sites industriels des secteurs pertinents à moins de 100km d'au moins une des centrales françaises

La distance de 100km a été retenue comme limite haute de faisabilité technique d'un transport à grande puissance de fluide calorifique dans l'état des techniques actuelle, en considérant bien sûr un niveau de pertes thermiques acceptable. Cette distance de faisabilité technique a été établie par analyse bibliographique et entretiens avec des acteurs du domaine lors de la phase d'étude confiée au cabinet TKM.

La dimension économique d'une telle infrastructure est évidemment un facteur clé, qui ne pouvait être étudié de manière chiffrée dans le cadre de la présente étude mais qui a été pris en compte en première approximation à partir d'une logique de scénarios, détaillés ci-après. Plus de détail à ce sujet en partie III.

c. Température de procédé, distance aux centrales et scénarios d'offre

La réglementation française impose des contraintes lourdes au transport de fluides thermiques à des températures supérieures à 120°C (et la transposition au droit français de la directive européenne 2014/068 sur les équipements sous pression abaissera ce seuil à 109°C). Considérant cet aspect, de même que les contraintes de résistance aux températures et pressions, variables suivant les puissances transportées, le coût du transport de chaleur en eau dépend fortement de sa température.

Or si tout site industriel complexe emploie une variété de procédés à des températures différentes, les données de consommation par secteur industriel permettent de déterminer s'il nécessite surtout de l'eau chaude (<100°C), de l'eau « surchauffée » (eau sous pression <150°C) ou de la vapeur (<250°C). Cela influe sur les coûts de transport et détermine donc la distance de distribution envisageable, ce qui amène à comparer différentes techniques de transport pour la fourniture de chaleur :

▪ Scénario eau chaude

Scénario de livraison à 100°C maximum jusqu'à 100 km, correspondant à un marché atteignable de 1,7 TWh annuels, desservant jusqu'à 77 sites industriels autour de 12 des 19 centrales, à ces températures principalement dans le domaine agro-alimentaire.

Scénario "eau chaude": sites des secteurs à process dominant <100°C et de besoin <100°C supérieur à 10 GWh annuels, à moins de 100km d'une centrale

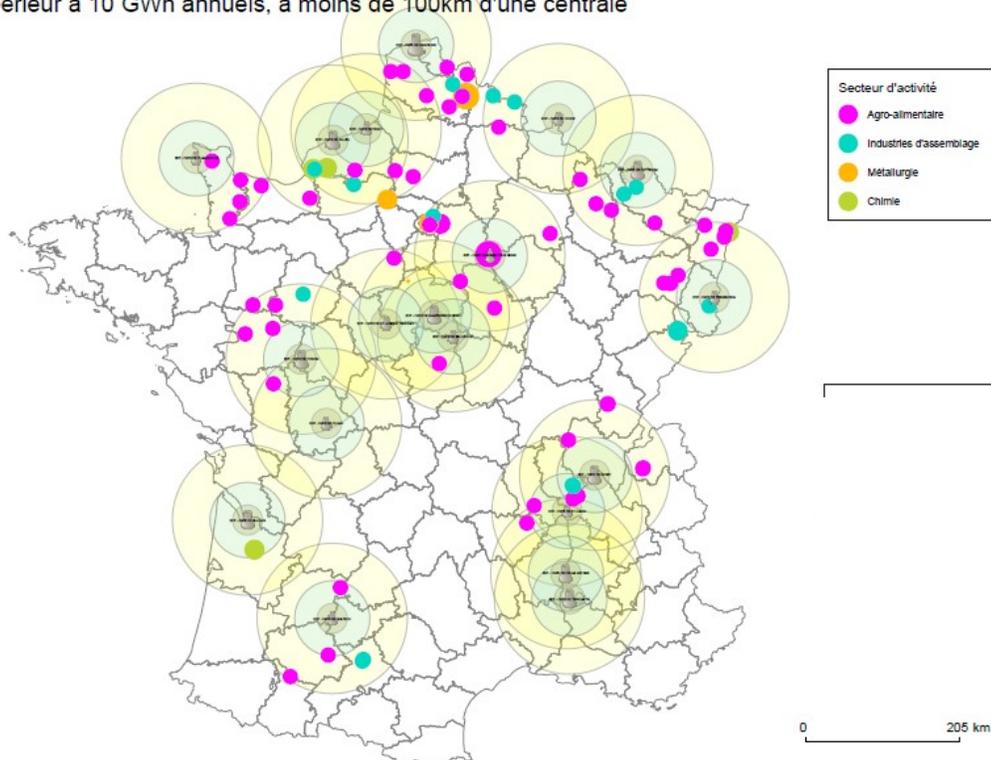


Figure 39 – Carte des sites clients potentiels d'une offre de chaleur scénario « eau chaude »

▪ Scénario eau surchauffée

Scénario de livraison à 150°C maximum jusqu'à 50 km. Correspond à un marché atteignable de 4,2 TWh annuels, desservant jusqu'à 106 sites industriels autour de 17 des 19 centrales.

Scénario "eau surchauffée": sites avec des besoins <150°C de plus de 10GWh annuels et à moins de 50km d'une centrale

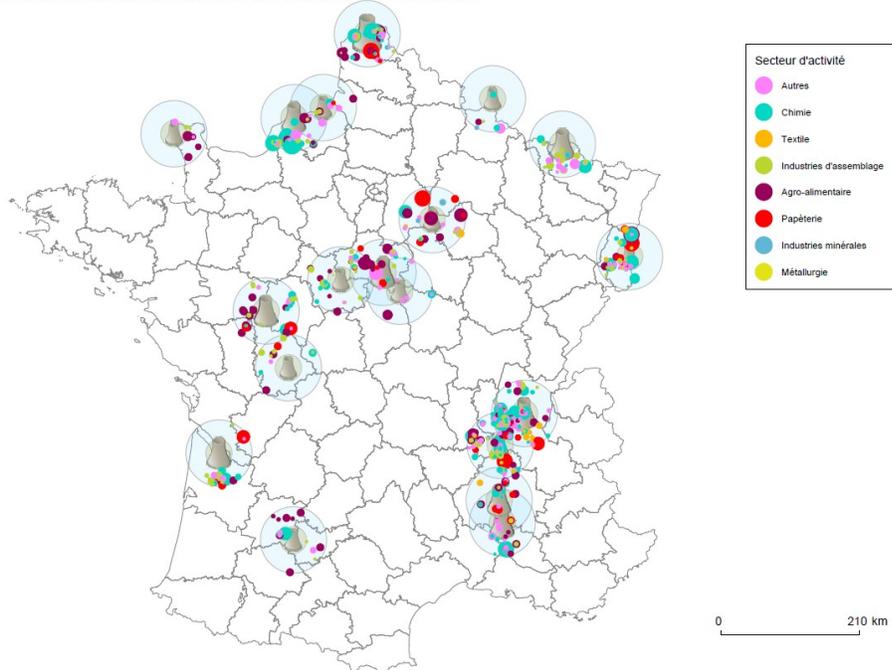


Figure 40 – Carte des sites clients potentiels d'une offre de chaleur scénario « eau surchauffée »

▪ Scénario vapeur

Scénario de livraison à 250°C maximum jusqu'à 20 km, correspond à un marché atteignable de 1,1 TWh annuels, desservant 22 sites industriels autour de 16 des 19 centrales, avec notamment le service de quelques sites chimiques à grand besoin.

Scénario "vapeur": sites avec des besoins toutes T° <250°C >10GWh annuels et à moins de 20km des centrales

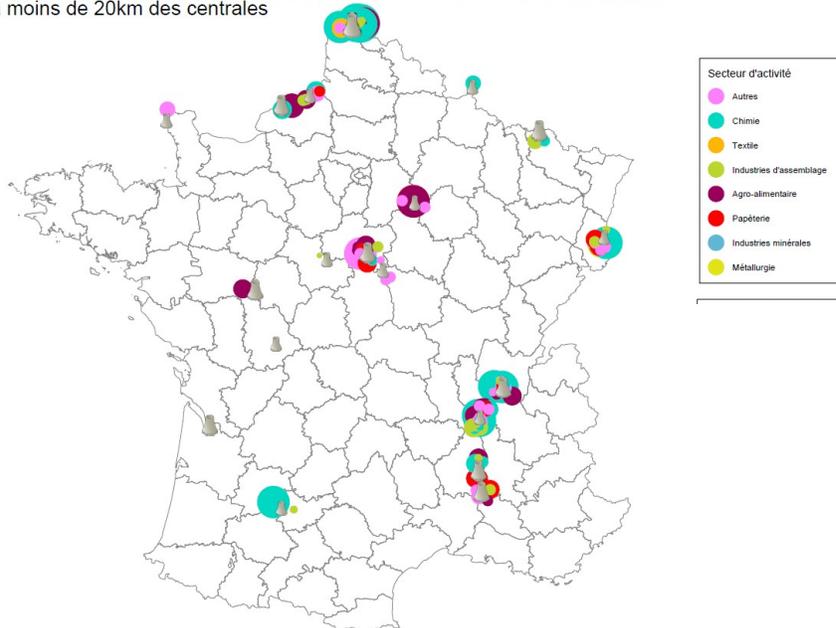


Figure 41 – Carte des sites clients potentiels d'une offre de chaleur scénario « vapeur »

- Scénario grands sites

Scénario de livraison à 250°C maximum jusqu'à 50 km si la puissance demandée est d'au moins 50 GWh annuels ou 100 km si la puissance est d'au moins 100 GWh annuels. Correspond à un marché atteignable de 20,2 TWh¹³ annuels, desservant jusqu'à 133 grands sites industriels autour des 19 centrales.

Scénario "grands sites": sites tous secteurs consommant plus de 50 et 100GWh et respectivement à moins de 50 et 100km des centrales

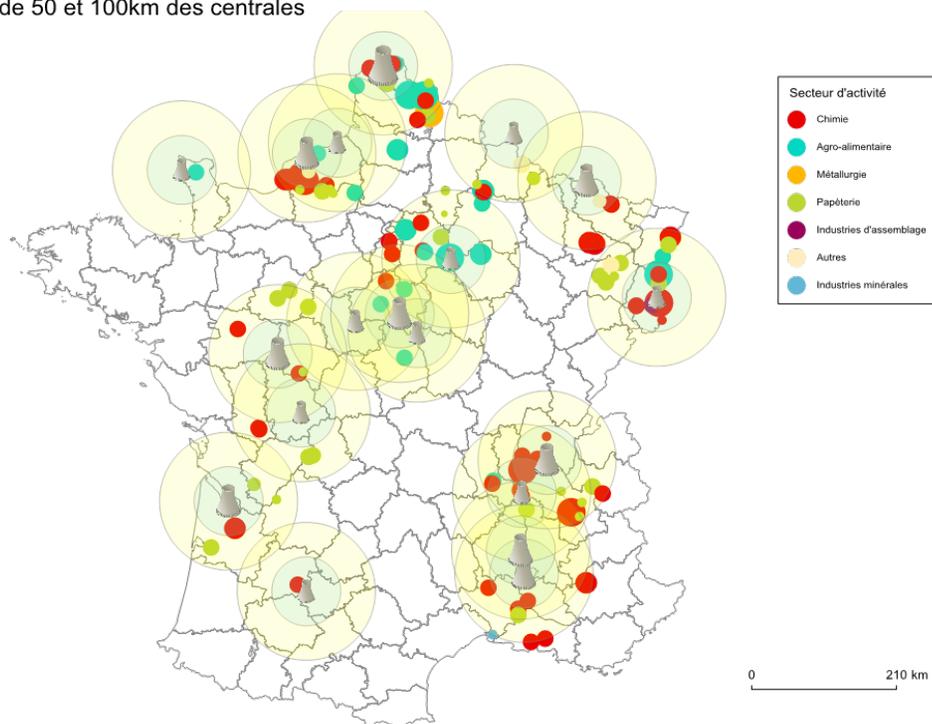


Figure 42 – Carte des sites clients potentiels d'une offre de chaleur scénario « grands sites »

On note que ce scénario de service de très grands besoins de chaleur en deçà de 250°C à grande distance seul permet d'accéder aux très importants besoins du secteur de la papèterie... et plus globalement permet d'adresser un marché potentiel bien supérieur à celui des autres scénarios.

¹³ Dont 4 TWh à moins de 100°C, 8,8 TWh entre 100 et 150°C, 7,4 TWh entre 150 et 250°C

d. **Evaluation d'ensemble et dynamique du marché atteignable**

- Des scénarios qui révèlent le besoin de chaleur de grands sites individuels, à envisager dans le cadre d'une infrastructure de distribution partagée

Les évaluations associées ci-dessus aux différents scénarios d'offre sont toutes conçues avec pour horizon une distribution vers des « clients uniques ». Considérant les difficultés – avérées lors des entretiens menés dans l'étude avec des acteurs industriels et institutionnels engagé dans des déploiements ou projets de déploiement de réseaux de chaleur à finalité industrielle – pour sécuriser financièrement et juridiquement des infrastructures coûteuses dont la rentabilisation ne peut être assurée qu'à moyen et long terme, cette première hypothèse simplificatrice n'est pas apparue aux acteurs interrogés comme dépourvue de pertinence.

Il n'en reste pas moins qu'elle apparaît très restrictive, la distribution géographique des sites et zones industrielles à distance de pertinence des centrales révélant dans nombre de cas la possibilité d'envisager au moins théoriquement la mise en place d'**infrastructures distribuées autour d'une « autoroute de chaleur »** centrale. Ce type d'infrastructure partagée, dont le modèle existe à plus petite échelle dans certains parcs industriels hors de France, devrait trouver son modèle juridique et économique, en particulier en ce qui concerne les risques de défaillance des acteurs, mais plusieurs collectivités locales interrogées dans l'étude explorent d'ores et déjà, ou entendent le faire prochainement, les modalités d'un tel déploiement.

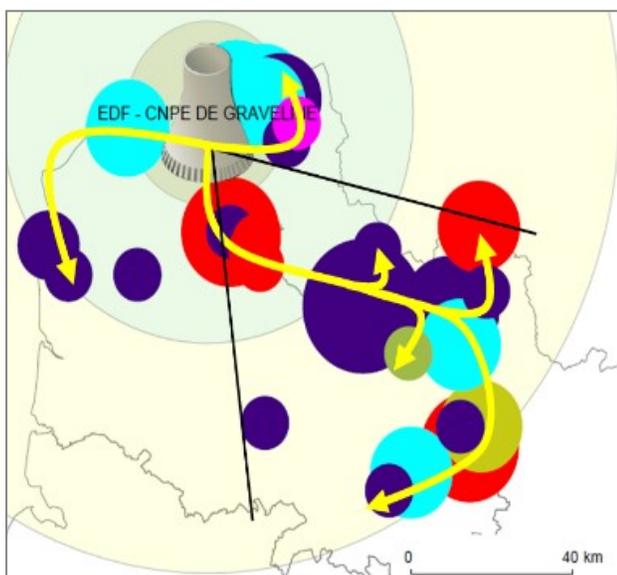


Figure 43 – Projection pour l'exercice d'une possible arborescence (en jaune) de distribution de chaleur à partir de la centrale de Gravelines

L'intérêt de telles infrastructures ne peut être évalué qu'au travers d'un travail minutieux d'analyse de terrain sur le cas précis de l'un des territoire cible, mais il apparaît clairement qu'elles ouvrent le potentiel d'une desserte d'acteurs industriels à partir de critères moins restrictifs que ceux utilisés dans les scénarios détaillés précédemment – ouvrant des marchés potentiellement plus importants – et peuvent en outre présenter l'intérêt d'interconnexions, à préciser, avec des réseaux de chaleur dédiés au chauffage d'aires urbaines ou à l'alimentation d'éco-parcs industriels.

A plus long terme, la levée de verrous technologiques sur la pompe à chaleur fonctionnant à plus de 250°C ou le stockage saisonnier pourraient encore accroître ce potentiel de mutualisation et d'interconnexion à même de déverrouiller des marchés plus conséquents en volume.

▪ Un marché de 22 TWh accessible dès aujourd'hui et appelé à croître

Si l'on s'en tient aux quatre scénarios dévoilés précédemment, appliqués aux 103 TWh de consommation de l'industrie française en deçà de 250°C en 2012, il apparaît qu'ils permettent – suivant donc une logique de client unique - d'envisager un **marché total atteignable de 22 TWh** et plus de **260 sites clients** (dont une moitié dépassant les 50 GWh annuels).

Réunion des scénarii eau chaude, eau surchauffée, vapeur et grands sites

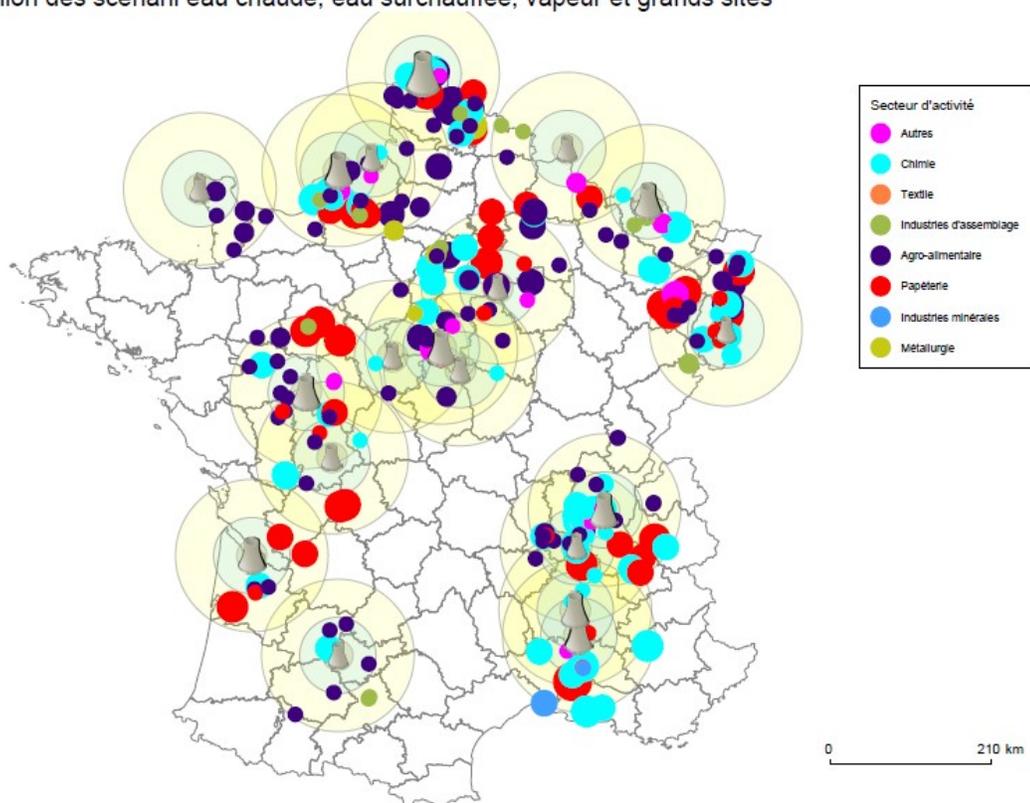


Figure 44 – Carte des sites clients potentiels d'une offre de chaleur intégrant tous les scénarios

A noter par ailleurs que la prise en compte des projections de besoin dans les **secteurs des produits énergétiques** (cf. p. 28 et suivantes) ou autres **filiales nouvelles** et fortement consommatrices de chaleur basse température (agro-carburants, chimie verte, matériaux bio-sourcés ou séchage de biomasse particulièrement), qui dépendent notamment de choix de politique industrielle que la cogénération nucléaire pourrait accompagner, permet d'envisager un marché appelé à croître de manière notable à horizon 2020-2025.

Décliné par centrale, ce marché atteignable potentiel dépasse déjà 1 TWh annuel pour 11 des 19 sites. Avec un tissu industriel diversifié d'agro-alimentaire, de papeterie, un peu de chimie et même de la métallurgie et de l'automobile qui conduit à un besoin cumulé de 4,9TWh annuels, Gravelines se détache nettement.

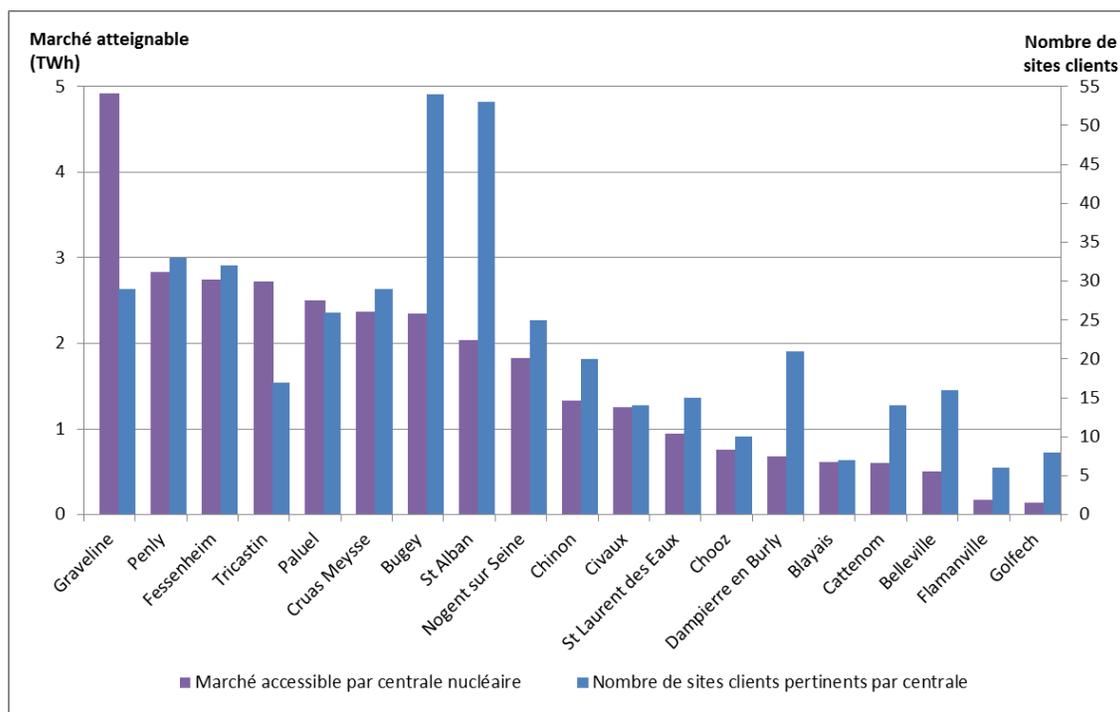


Figure 45 – Marché atteignable et nombre de sites clients pertinents par centrale

A noter : le recouvrement des zones de couverture géographique des centrales interdit de sommer pour obtenir le marché d'ensemble.

Les centrales frontalières – Chooz, Cattenom et Gravelines – pourraient peut-être également accéder à un marché hors des frontières hexagonales, non évalué dans l'étude.

- Les approches complémentaires pour remplacer les énergies fossiles pour répondre au besoin de chaleur industrielle

L'usage de chaleur de procédé à une température inférieure à 250°C dans l'industrie n'est pas, à court comme à long terme, menacé de manière significative par l'essor de voies de substitution. Au contraire, le développement de procédés bio/thermochimiques dans nombre de secteurs invite à parier sur son accroissement. Par ailleurs, les efforts engagés ou encouragés pour améliorer l'**efficacité énergétique** ou la **récupération et la valorisation de chaleur perdue/fatale** amène des territoires urbains comme le Grand Lyon ou la Communauté Urbaine de Dunkerque – interrogés dans l'étude – à envisager le déploiement de réseaux de chaleur à finalité industrielle. En alimentation de tels réseaux, l'offre de cogénération nucléaire apparaît directement complémentaire pour contribuer à réduire l'empreinte carbone de l'industrie de ces territoires.

Les grands sites fortement consommateurs identifiés sont déjà relativement optimisés au plan énergétique et ils conserveront des besoins incompressibles importants. Les 22 TWh susceptibles d'être fournis par cogénération nucléaire représentent moins de 8% du besoin global de chaleur de l'industrie, 20% du besoin en deçà de 250°C, et les approches visant à optimiser les flux thermiques des sites industriels restent essentielles pour réduire davantage leur empreinte carbone.

e. Leviers et barrières au déploiement d'une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire

A partir des entretiens menés au cours de l'étude, il a également été possible d'identifier un certain nombre des leviers à actionner ou barrières à lever pour envisager le succès du déploiement en France d'une offre de chaleur cogénérée à partir du parc électronucléaire français.

Objectifs de l'étude

Caractériser le besoin de chaleur <250°C de l'industrie française et évaluer la part de ce besoin susceptible d'être couverte par une offre issue de cogénération nucléaire.



▪ Une réglementation à adapter

Une barrière immédiate au développement possible d'une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire est de nature réglementaire : dans les textes applicables, et contrairement à la chaleur des usines d'incinération des déchets ou à celle des industries de biogaz, la chaleur nucléaire ne possède pas de statut reconnu par l'Etat. Sans statut et non considérée comme commercialisable dans les décrets régissant l'exploitation des centrales électronucléaires, elle ne saurait aujourd'hui être déployée en France sans adoption préalable d'une législation adéquate.

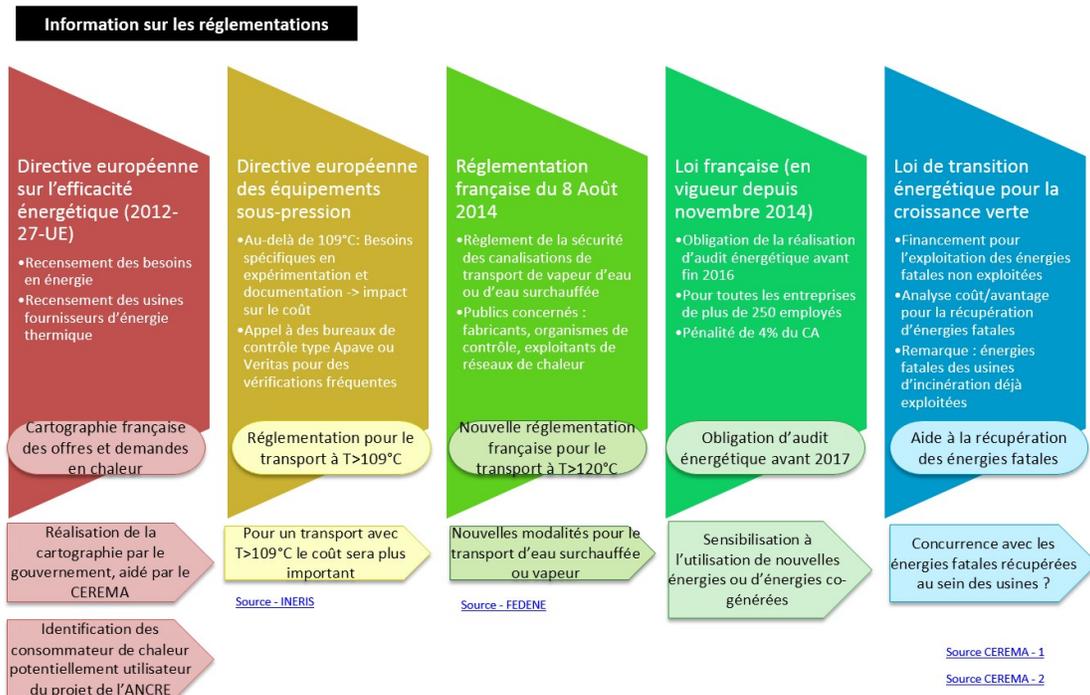


Figure 46 – Principaux textes réglementaires applicables au moment de la réalisation de l'étude

L'aspect incitatif de la réglementation en vigueur sur la chaleur industrielle apparaît également comme un facteur décisif dans la prise de décision des acteurs, ainsi qu'il a pu être constaté avec les directives européennes relatives aux installations de combustion (2001/80/CE) et émissions industrielles (2010/75/UE), ainsi que leurs transpositions en droit national, qui ont amené les industriels à moderniser leurs installations thermiques, pour cette dernière avant le 1^{er} janvier 2016.

▪ Un rôle structurant des collectivités locales

Si tous les territoires n'en sont pas au même point d'avancement, plusieurs zones urbaines françaises ont des réflexions avancées sur le déploiement d'infrastructures de chaleur sur leur territoire, y compris à partir de chaleurs fatales récupérées sur sites industriels ou pour approvisionner des sites consommateurs. De nombreux cas sont à l'étude à différentes échelles en France mais aussi ailleurs en Europe comme à Mannheim ou Amsterdam-Rotterdam-Anvers. Dans tous les cas, l'hétérogénéité des approvisionnements et consommations comme des acteurs concernés semble imposer une implication forte des autorités territoriales.

Dans les territoires de Lyon et Dunkerque abordés dans l'étude, il apparaît que non seulement certaines actions sont déjà lancées, mais en plus il apparaît que la question de valoriser la chaleur des centrales nucléaires proches ait déjà fait l'objet de réflexions.

▪ Modèle économique et risques financiers

Face à l'hétérogénéité évoquée plus haut, le montage financier et opérationnel à construire pour chaque réseau doit être capable de prendre en charge les différentiels de capacité d'investissement et d'engagement dans la durée des différents acteurs, avec une grande difficulté observée sur le terrain à convenir d'un schéma de partage et mitigation des risques de défaillance de l'un ou l'autre des offreurs ou demandeurs du réseau. La mise en place de fonds locaux de garantie pourrait porter une partie de la solution, mais il apparaît aussi que l'intégration à ces réseaux d'une offre pérenne et à forte puissance telle que celle issue de cogénération nucléaire puisse être de nature à faciliter l'identification d'une voie de déblocage de ce verrou.

▪ Perception des acteurs concernant la « chaleur nucléaire »

La prévenance qui peut exister dans certains milieux à l'égard de l'énergie nucléaire n'est pas apparue auprès des industriels interrogés dans l'étude, nettement plus sensibles aux facteurs du coût et de la décarbonation de leur mix énergétique.

Du côté des autorités locales, il apparaît que dans les territoires ayant des réflexions avancées sur la chaleur les autorités locales ont souvent envisagé – même préalablement à la présente étude – la valorisation des calories perdues ou susceptibles d'être disponibles auprès de la centrale la plus proche.

Dès lors, et dans le contexte de grande sensibilité aux enjeux énergétiques et climatiques, l'hypothèse de cogénération nucléaire envisagée a été unanimement saluée par les acteurs interrogés comme méritant d'être étudiée.

V. Impacts potentiels d'une mise en œuvre réussie

a. Conséquences et opportunités pour l'opérateur des centrales nucléaires

▪ Capacités de production

L'exploitant du parc électronucléaire français est aujourd'hui positionné sur une offre d'électricité, de gaz et de services. Commercialiser de l'énergie thermique impliquera donc une entrée dans de nouveaux métiers et des contraintes nouvelles sur l'administration des réseaux, qu'il importera de préciser.

Le marché de 22 TWh thermique envisagé à moyen terme représente **1,8% de la capacité du parc avant conversion électrique**.

Le profil de cette demande sera d'une grande régularité hebdomadaire (régime 3x8 heures très dominant dans les secteurs clients) adaptée au mode de fonctionnement de la production nucléaire. Par ailleurs, la diversité des besoins saisonniers (travail de laiterie accru au printemps, campagne sucrière d'automne, production agro-alimentaire accrue avant les fêtes de fin d'année, etc.) devrait contribuer à lisser les fluctuations de la demande globale de chaleur industrielle sur l'année, du moins en dehors de la période des pointes hivernales de consommation pour chauffage. De plus, dans un contexte de réduction probable du facteur de charge¹⁴ du parc nucléaire, l'offre de chaleur pourrait agir en contrepoint et participer à le maintenir.

Au-delà de ces premières analyses liées aux caractéristiques du besoin anticipé, une étude experte spécifique sur tous ces points semble indispensable.

▪ Infrastructure de transport et distribution

La structure du marché potentiel révélé par l'étude – environ 260 sites clients avec un besoin annuel de plusieurs dizaines de GWh, parmi lesquels 130 « grands sites » avec un besoin supérieur à plus de 50 GWh/an, parfois assez distants des centrales – laisse prévoir la nécessité de déployer **une infrastructure de transport de chaleur capable de véhiculer des puissances de plusieurs dizaines de Mégawatts sur des distances de 50, voire 100 km**.

On peut cependant remarquer que les grandes installations industrielles à proximité relative des centrales se situent fréquemment dans un secteur angulaire limité, ce qui permet d'envisager des infrastructures partagées¹⁵.

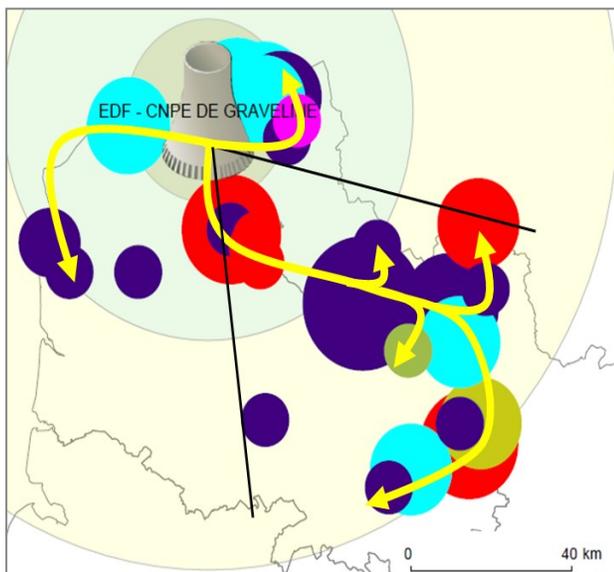


Figure 47 – Des infrastructures partagées entre sites clients proches (projections pour l'exercice) – Cas de Gravelines

¹⁴ Facteur de charge ou coefficient de production (Kp) : ce facteur oscillant aujourd'hui entre 70 et 80% est représentatif de la production électrique nucléaire effective rapportée à la production nominale théorique. L'accroissement de la part des énergies renouvelables dans le mix électrique en situation de demande électrique stable ou en décroissance, implique une décroissance de ce facteur pour la production nucléaire ou une réduction de la puissance installée.

¹⁵ A condition de savoir gérer la complexité de réseaux ayant des besoins de température et rythmes d'appel de puissance potentiellement différents.

A moyen et plus long terme, l'implantation volontariste de sites industriels le long des infrastructures de distribution existantes, comme l'alimentation de réseaux de chaleur ouverts à des clients industriels plus modestes, dans le cadre d'éco-parcs industriels par exemple, pourraient constituer des moyens d'alimenter des sites plus nombreux et de fournir plus de puissance sans multiplier les infrastructures.

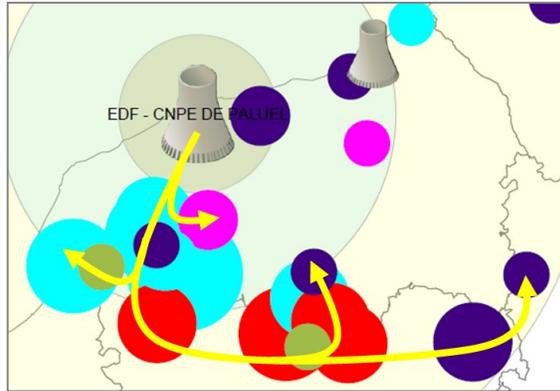


Figure 48 – Des infrastructures partagées entre sites clients proches (projections pour l'exercice) – Cas de Paluel

Finalement, la forte concentration et le partage des infrastructures, qui s'ajoute à la quantité importante de chaleur distribuée, laisse penser que le coût élevé de l'infrastructure de transport ne devrait pas être un obstacle pour **offrir aux industriels une chaleur décarbonée à un tarif compétitif**, et que de plus ce coût pourrait être assez vite amorti.

b. Effet attendu sur les filières et les acteurs industriels

- *Gain de compétitivité pour les secteurs clients*

Après sélection des sites pertinents et pondération du marché accessible comme détaillé précédemment, la polarisation du besoin de chaleur à moins de 250°C sur les trois secteurs de l'agro-alimentaire, de la chimie et de la papeterie ressort encore renforcée :

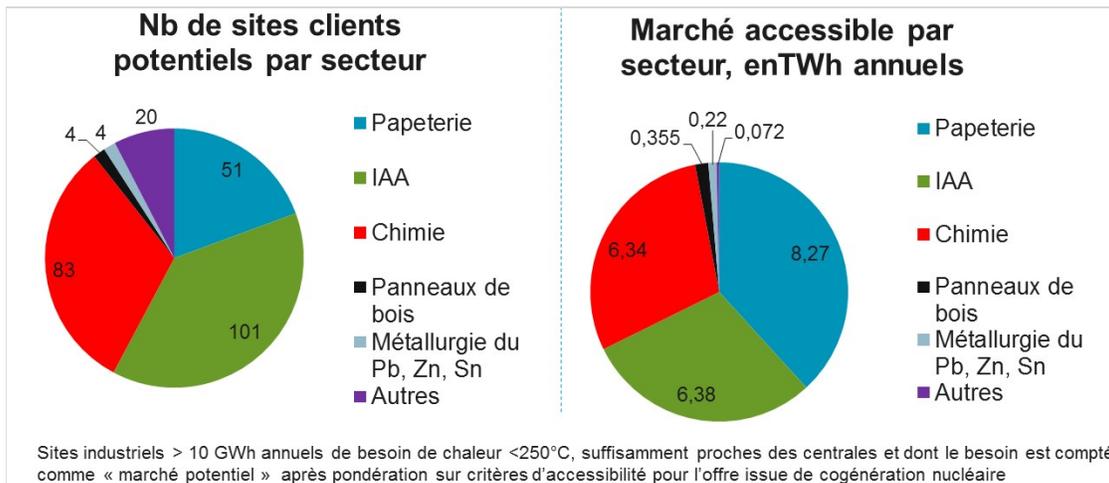


Figure 49 – Distribution des sites pertinents et du marché atteignable par secteur

Dans l'**agro-alimentaire**, les cibles pertinentes sont d'abord les laiteries (63 sites sur 101), puis des sucreries et huileries (dont les sites de production d'agro-carburants attachés à ces filières), malteries, amidonneries et fabriques de boisson ou alimentation animale.

Dans la **chimie**, le potentiel pourrait être bien plus élevé mais les besoins en température – dans la pétrochimie notamment – sont en limite haute, voire souvent au-dessus, de ce que la cogénération nucléaire est à même de fournir avec les réacteurs actuels.

Dans la **papeterie** enfin, le besoin individuel par site est particulièrement important, centré notamment sur les procédés de séchage. Les initiatives en cours pour améliorer l'efficacité énergétique des sites et pour développer l'utilisation des énergies renouvelables ne devrait pas réduire sensiblement le marché accessible à la cogénération nucléaire. La difficulté en revanche réside dans le fait que les sites papetiers sont presque tous à plus de 50 km des centrales nucléaires les plus proches, ce qui exige un transport de vapeur à grande distance.

Réception de l'offre par les industriels clients

Les entretiens menés dans le cadre de l'étude avec des industriels des secteurs cibles ont confirmé l'intérêt a priori pour une offre qui pourrait être issue de cogénération nucléaire de ces acteurs aux forts besoins énergétiques et en recherche de solutions pour s'adapter à des contraintes et attentes croissantes en matière d'émissions.

- *Expérience acquise valorisable pour les filières du nucléaire et de la chaleur*

Partout le travail sur la chaleur – à finalité résidentielle ou industrielle – est en train de s'affirmer comme un élément important de la transition énergétique. Au-delà de l'évaluation faite dans cette étude des potentialités de la cogénération nucléaire, les marchés et investissements associés à la récupération, la conversion et surtout la distribution de chaleur promettent d'être considérables. Ils nécessiteront des savoir-faire solides et éprouvés.

Dans ce cadre, **l'expérience acquise par les acteurs français** à l'occasion du déploiement d'une offre de chaleur issue de cogénération nucléaire peut représenter un sérieux **atout concurrentiel**. Cela vaut tant pour les développeurs, concepteurs et exploitants de réseaux de chaleur, que pour les équipementiers et sous-traitants de toute la chaîne.

Par ailleurs, cela vaut également pour la **filière nucléaire** française. Plus de 70 réacteurs nucléaires dans le monde fonctionnent aujourd'hui en cogénération, généralement pour le chauffage urbain ou pour le dessalement de l'eau de mer, qui est bien une application industrielle. Il y a un marché à l'export – qu'il faut évaluer – pour des réacteurs intégrant la cogénération dès la conception ou en cours de vie. Connaissant le poids de l'expérience acquise dans ce secteur, l'intérêt commercial pour l'export d'un déploiement opérationnel en France serait indéniable.

- *Effet structurant sur les nouvelles filières industrielles*

Les filières industrielles émergentes déjà évoquées plus haut comme ayant a priori des besoins de chaleur basse température significatifs – agro-carburants, hydrogène décarboné, chimie verte, matériaux bio-sourcés ou composites, biomasse combustible sèche, hydrométallurgie de recyclage, etc. - pourraient grâce à la cogénération nucléaire avoir accès à une énergie-chaleur peu chère et décarbonée. Suivant le poids économique de la chaleur dans chacune de ces filières, il peut s'agir d'un **facteur de soutien important à ces nouvelles filières** – à même de les aider à passer du démonstrateur à l'échelle industrielle – et d'un **signal pour les investisseurs domestiques ou internationaux**, les invitant à se positionner sur ces filières sur le territoire français.

Les atouts de la cogénération nucléaire, en termes d'économie d'énergies fossiles importées et d'émissions de CO₂ évitées, pourraient à terme encourager l'implantation de nouvelles industries à proximité des centrales reliées à une infrastructure de distribution. Cet aspect mériterait une réflexion d'aménagement du territoire coordonnée au moins entre politique industrielle, politique énergétique et politiques locales ou régionales de développement économique.

c. Impact environnemental et économique pour la France

▪ Le gaz naturel comme référence

La ventilation par source d'énergie de la consommation énergétique finale à fin de production de chaleur industrielle à moins de 250°C n'est pas connue, mais on peut estimer qu'elle se compose pour moitié de gaz naturel, et pour moitié d'un mix équilibré d'électricité, de produits pétroliers, de charbon et d'énergies renouvelables thermiques. Aussi, pour estimer l'impact de la substitution par de la chaleur issue de cogénération nucléaire sur les émissions de gaz à effet de serre et sur la balance commerciale du pays, on considèrera une **référence 100% gaz naturel**. Le gaz étant parmi les combustibles les moins émetteurs de CO₂, l'estimation à cet égard constituera un bas de fourchette.

En prenant en compte une perte de 22,5% entre le contenu énergétique du gaz naturel et l'énergie thermique restituée par sa combustion¹⁶, les 22 TWh de besoins finaux de chaleur à moins de 250°C couverts par la cogénération nucléaire reviennent à éviter la combustion de 28 TWh de gaz naturel.

▪ Au moins 6 millions de tonnes de CO₂ évitées chaque année

Avec un contenu en CO₂ de 200 kg/MWh, la combustion de gaz pour 28 TWh de contenu énergétique correspond à 6 millions de tonnes de CO₂, à rapporter aux 81 Mt CO₂ des émissions totales de l'industrie française en 2012 (dont 65 Mt par combustion).

De fait, l'usage de gaz induit des fuites qui – étant donné le pouvoir de réchauffement du méthane bien supérieur à celui du CO₂ – ont un impact de réchauffement « équivalent CO₂ » potentiellement considérable. On estime à 98 Mteq.CO₂ les émissions de l'industrie française en tenant compte des autres gaz à effet de serre¹⁷. Les émissions d'autres gaz dépendant fortement du schéma d'approvisionnement n'ont pas été prises en compte. Par conséquent, la réduction d'émissions estimée ici doit être comprise comme une estimation basse par défaut, le gain effectif réel avec prise en compte des autres énergies et facteurs correctifs se trouvant plus élevé.

▪ Plus de 700 M€ économisés sur la facture énergétique française

Sur la base de gaz importé à 98% à un prix de 25 € par MWh, la substitution opérée par la cogénération nucléaire permettrait d'alléger annuellement la facture énergétique nationale de 700 millions d'euros, soit 1,3% du déficit commercial national.

Encore cette estimation n'intègre-t-elle que la substitution d'importation et ne tient pas compte de la possibilité de vente de chaleur à des clients européens proches des 4 centrales frontalières.

Au total, la substitution par de la chaleur issue de cogénération nucléaire permettrait de réduire d'au moins 6 millions de tonnes les émissions de CO₂, soit 7.4% des émissions de CO₂ de l'industrie, et de 700 M€ la facture énergétique nationale.

A noter : ces évaluations ne concernent que les impacts directs de substitution, mais le plein potentiel de la cogénération nucléaire doit être évalué en complémentarité avec d'autres approches de décarbonation des consommations finales de chaleur en chauffage et dans l'industrie. Comme indiqué précédemment, les investigations de terrain menées dans l'étude ont révélé l'effet stabilisateur d'une offre durable de grandes puissances thermiques issues de cogénération nucléaire, avec un effet de levier – à préciser – sur le déploiement effectif de réseaux de chaleur à dimension industrielle dans les territoires urbains.

¹⁶ Le ratio considéré est celui d'un réseau de chaleur alimenté par des chaudières à gaz

¹⁷ Source : CITEPA, Rapport SECTEN Avril 2014, cité par « Les Chiffres Clés 2014 Climat, Air Energie », ADEME

