



Juin  
2020

---

# PREMIERE ANALYSE DU **POTENTIEL TECHNIQUE** **D'ÉLECTRIFICATION** DES PROCÉDES INDUSTRIELS THERMIQUES PAR DES TECHNOLOGIES MATURES

---

## SYNTHÈSE

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie

En partenariat avec :



## CITATION DE CE RAPPORT

**ADEME, Bruno MILLET (CEREN), Antoine MONNET (CEREN), Tindaro SIRAGUSANO (CEREN). 2020.**  
Première analyse du potentiel technique d'électrification des procédés industriels thermiques par des technologies matures – 35 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque)

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

### **Ce document est diffusé par l'ADEME**

20, avenue du Grésillé

BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 18MAR001348

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME, EDF et GRDF par : Ceren

Coordination technique - ADEME : PADILLA Sylvie

Direction/Service : DETI/Service Industrie



# SOMMAIRE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>AVERTISSEMENT .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1. Présentation de l'étude et principaux éléments méthodologiques .....</b>  | <b>5</b>  |
| 1.1. <i>Principes d'estimation du potentiel d'électrification par couple « opération – technique électrique » .....</i>                 | <i>5</i>  |
| 1.2. <i>Périmètre de l'exercice.....</i>  | <i>5</i>  |
| <b>2. Principaux résultats .....</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1. <i>Détails par technique électrique - liste par potentiel décroissant.....</i>   | <i>8</i>  |
| 2.2. <i>Analyse sectorielle .....</i>   | <i>10</i> |
| <b>3. Analyse détaillée du potentiel d'électrification des procédés industriels thermiques .....</b>                                    | <b>11</b> |
| 3.1. <i>Champ du potentiel d'électrification .....</i>  | <i>11</i> |
| 3.2. <i>Consommation actuelle des techniques électriques dans les procédés thermiques en 2014</i>                                       | <i>13</i> |
| 3.3. <i>Combustibles potentiellement substituables par technique électrique .....</i>   | <i>15</i> |
| 3.4. <i>Décomposition du potentiel d'électrification : substitution de vapeur ou de combustion directe.....</i>                         | <i>16</i> |
| 3.5. <i>Consommation des techniques électriques de substitution.....</i>  | <i>17</i> |
| <b>4. Note méthodologique et détails sur les gains énergétiques .....</b>   | <b>19</b> |
| 4.1. <i>Données de consommation énergétique utilisées.....</i>  | <i>19</i> |
| 4.2. <i>Périmètre de l'analyse (secteurs, opérations énergétiques, techniques électriques).....</i>                                     | <i>19</i> |
| 4.3. <i>Calcul des taux de pénétration.....</i>   | <i>20</i> |
| 4.3.1. <i>Intégration du critère « puissance électrique » dans l'évaluation du gisement .....</i>                                       | <i>20</i> |
| 4.3.2. <i>Cas particulier des pompes à chaleur .....</i>  | <i>20</i> |
| 4.4. <i>Concept de gain énergétique entre deux techniques .....</i>   | <i>21</i> |
| 4.5. <i>Cumul de la consommation de combustibles substituable et des consommations d'électricité induites par la substitution .....</i> | <i>23</i> |
| <b>5. Annexe .....</b>  | <b>24</b> |



## AVERTISSEMENT

La stratégie nationale bas carbone (SNBC) définit la trajectoire qu'entend prendre la France pour atteindre la neutralité carbone en 2050, engagement qu'elle a pris suite à la 21<sup>e</sup> conférence des parties (COP 21) de la convention cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC). Pour l'industrie, cette trajectoire se traduit par une diminution de 81 % des émissions par rapport à 2015 avec l'hypothèse d'une électrification passant d'environ 25 % à 70 % de ses consommations. Il est à noter qu'il existe des voies alternatives à l'électrification des usages combustibles pour atteindre les objectifs de la SNBC comme l'amplification de l'efficacité énergétique, le développement des EnR.

Quoi qu'il en soit dans la SNBC, l'hypothèse d'électrification prise dans le cadre de cet exercice « normatif » se doit d'être maintenant objectivée pour déterminer les conditions de sa mise en œuvre concrète : pour quels usages ? avec quelles technologies ? sous quelles conditions économiques ?

Une première ébauche de ces travaux consiste à identifier les potentiels technologiques d'implémentation de solutions existantes matures dans les procédés industriels, sur la base de réalisations existantes. C'est l'objectif de cette 1<sup>ère</sup> étude qui permet ainsi de déterminer des contributions possibles de l'électricité à l'objectif global de décarbonation. La présente étude identifie sur la base des technologies électriques connues à ce jour, des potentiels théoriquement accessibles d'électrification de certains usages combustibles industriels.

Elle ne couvre pas entièrement la production de vapeur (chaudières). Elle ne traite pas plus des technologies de rupture ou innovations qui pourraient émerger dans les années à venir et ce, quel que soit le vecteur énergétique (combustible ou électrique).

Le cadre proposé reste purement technologique sans élément d'analyse complémentaire sur la faisabilité économique des propositions, notamment à l'échelle de chaque site industriel, y compris en termes d'accès à la puissance électrique depuis le réseau. Elle fait abstraction des spécificités de certains procédés pour lesquels la combustion d'un combustible entre dans la qualité du produit fini (fusion du verre, céramique, etc.). Mais elle permet de lancer le dialogue entre Pouvoirs Publics et communauté industrielle, sur une des voies pouvant apporter une contribution positive à l'atteinte des objectifs de la transition bas carbone. Ainsi avec toutes les réserves méthodologiques précédentes, elle estime un potentiel théorique de 24 TWh électrique supplémentaire en substitution de 42 TWh de combustibles fossiles, soit 18% de ces usages. Ce potentiel est à mettre en regard de l'objectif de la SNBC d'environ 90 TWh électrique supplémentaire nécessaire à déployer dans l'industrie à horizon 2050. Ces premières conclusions soulèvent toutes les difficultés de conversion de ce gisement théorique en gisement atteignable au regard des considérations technico-économiques non examinées dans ces travaux. Cela confirme donc la nécessité d'ouvrir d'autres champs d'analyse sur l'électrification y compris via le développement de technologies de rupture sur tout type d'énergies (combustibles, électricité), en complément des initiatives sur les autres voies de décarbonation comme le recours à la chaleur renouvelable : valorisation de la chaleur fatale, recours aux EnR.

Par ailleurs, comme les autres études du CEREN sur les potentiels d'économies d'énergie, de chaleur fatale..., les valeurs obtenues dans ce cadre méthodologique ne peuvent être utilisées directement dans une étude de potentiel d'électrification d'un site industriel. Cette étude ne se substitue donc pas à un audit spécifique mené en concertation avec chaque industriel concerné.



# 1. Présentation de l'étude et principaux éléments méthodologiques

---

## 1.1. Principes d'estimation du potentiel d'électrification par couple « opération – technique électrique »

Cette étude vise à évaluer un 1<sup>er</sup> potentiel des techniques électriques susceptibles de substituer les consommations de combustibles dans les process thermiques de l'industrie<sup>1</sup>.

**L'étude évalue ce potentiel technique d'électrification, en dehors notamment de toute considération économique. En particulier, elle considère uniquement la possibilité de mettre en place des techniques électriques matures, à savoir déjà implantées et disponibles sur le marché, et sans considérer d'autres alternatives de décarbonation ni les techniques combustibles plus performantes que celles du parc actuel.**

Pour chaque usage ou opération, dès lors qu'une technique électrique représente 1% de la consommation totale ou plus, l'hypothèse retenue est que la substitution par cette technique électrique dite mature est possible.

La consommation électrique générée par la substitution de la consommation de combustibles<sup>2</sup> est ainsi analysée pour chaque technique. Cependant, plusieurs techniques électriques de substitution sont parfois possibles. Aussi, pour évaluer le potentiel d'électrification global et par branche d'activité industrielle (NCE), on retient la technique électrique la plus performante énergétiquement (c'est-à-dire minimisant l'énergie finale nécessaire).

Par ailleurs, en analysant les résultats de l'enquête sur les consommations dans l'industrie menée par le Ceren, on constate que certaines techniques électriques ne sont pas utilisées dans des puissances élevées. Pour tenir compte de cette réalité des usages, le calcul du potentiel, réalisé par secteur NCE et par opération, intègre des seuils qui limitent le potentiel de chaque secteur – opération selon les tranches de puissances où l'on observe réellement des techniques électriques matures.

## 1.2. Périmètre de l'exercice

L'analyse est basée sur la décomposition de la consommation d'énergie dans l'industrie en 2014 par forme d'énergie, en 131 segments d'activité et en **10 opérations énergétiques** qui sont :

- L'évaporation
- Le séchage
- La distillation
- Les autres opérations d'élimination d'eau
- Le chauffage de liquides et de gaz
- Le chauffage ou réchauffage de métaux
- La fusion
- Les traitements thermochimiques
- Les traitements thermiques
- Les autres opérations thermiques.

Le chauffage des locaux n'entre pas dans le champ de cette étude. Il n'a pas non plus été envisagé la substitution de chaudières électriques aux chaudières combustibles<sup>3</sup>. Il pourrait donc exister dans l'industrie un potentiel d'électrification non couvert par cette étude.

---

<sup>1</sup> Au sens des secteurs E12 à E38 de la NCE, c'est-à-dire hors secteur de l'énergie et hors bâtiment-génie-civil.

<sup>2</sup> La puissance électrique supplémentaire nécessaire à cette substitution n'a pas été évaluée de façon consolidée.

<sup>3</sup> Toutefois, l'électrification de certains procédés utilisant de la vapeur a été prise en compte, impactant donc la consommation de combustible des chaudières existantes.



## 11 techniques électriques matures étudiées :

- Les résistances
- Les pompes à chaleur
- La conduction
- L'induction
- La compression mécanique de vapeur
- L'infrarouge
- Les membranes
- L'arc
- L'ultra-violet et laser
- Le plasma
- Les HF et UHF (hautes et ultra hautes fréquences).

Ces onze techniques électriques ont des performances énergétiques différentes. Dans cette étude, ces performances sont évaluées **en énergie finale par un gain énergétique, différence entre la consommation électrique des techniques de substitution et la quantité de combustible ou de vapeur qu'elles remplacent**. Les hypothèses de performances énergétiques retenues dans l'étude (cf. § 4.4) sont basées sur une compilation de documents techniques, retours d'expérience et dires d'experts dont EDF et l'Ademe.

Pour les pompes à chaleur, on retient tous les besoins de chaleur en process à moins de 100°C, dès lors qu'il y a une quantité suffisante d'énergie à la source froide mobilisable. On utilise pour estimer la source froide, le volume de chaleur récupérable disponible à partir des besoins en froid (et en air comprimé) déclarés par les industriels dans les enquêtes sectorielles menées chaque année par le Ceren sur un quart de l'industrie.

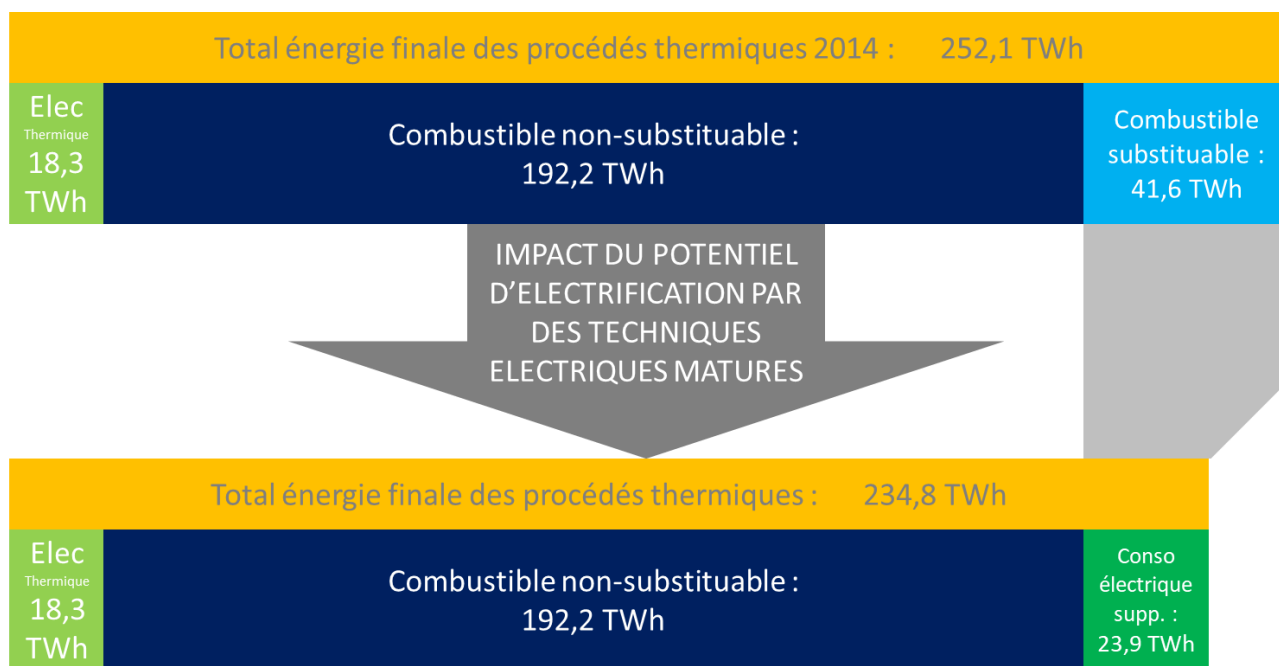
## 2. Principaux résultats

En préalable, il est rappelé qu'**aucun frein de nature économique n'a été pris en compte** dans cette étude et tous les freins de nature technique n'ont pas été considérés, notamment les contraintes de maintien de la production industrielle et du niveau de qualité, les contraintes d'encombrement des nouveaux équipements à mettre en place, les contraintes d'approvisionnement électrique (au niveau du réseau ou sur le site au niveau du poste de transformation).

Pour autant, des freins à l'adoption de techniques électriques, même matures, subsistent et peuvent être de différentes natures : techniques ou économiques.

**En dehors de toute considération économique et pour le parc d'équipements industriels estimé en 2014, 18% de la consommation de combustibles pour les process thermiques, soit 41,6 TWh, sont substituables en recourant à des techniques électriques.** En privilégiant les techniques électriques les plus performantes actuellement, **l'ensemble de ces substitutions conduirait à une consommation électrique supplémentaire de 23,9 TWh.**

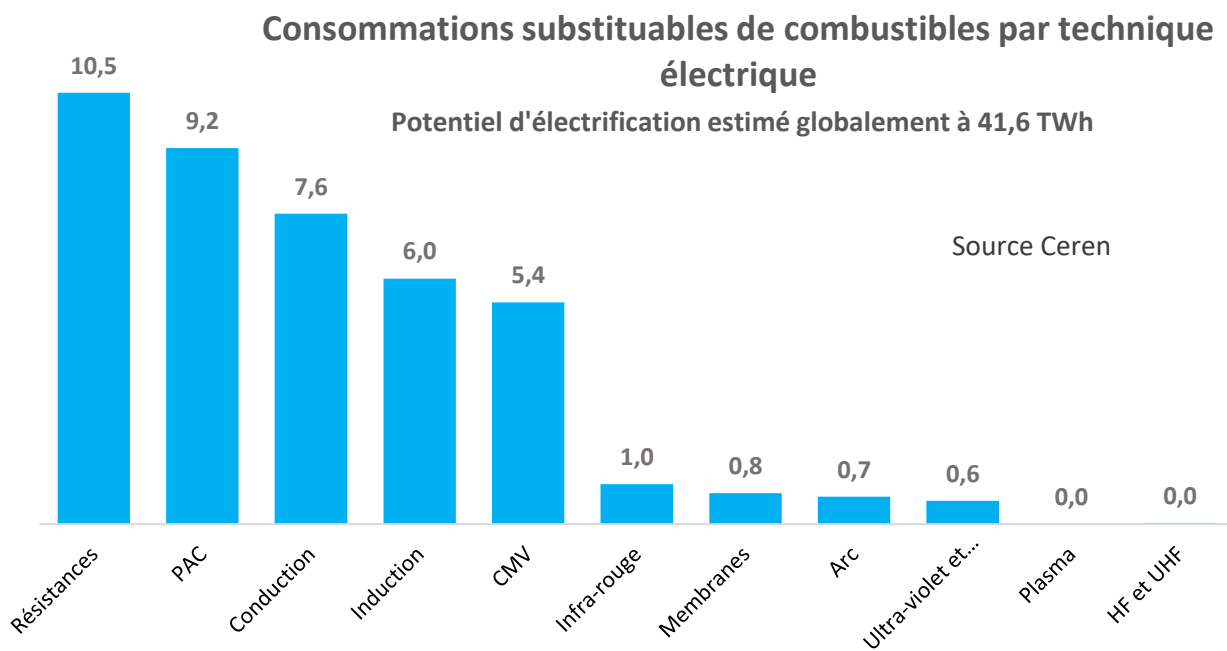
Ces résultats – construits avec les hypothèses méthodologiques reportées ci-avant – restent donc une 1<sup>ère</sup> évaluation du potentiel technique d'électrification des procédés industriels par des technologies matures.



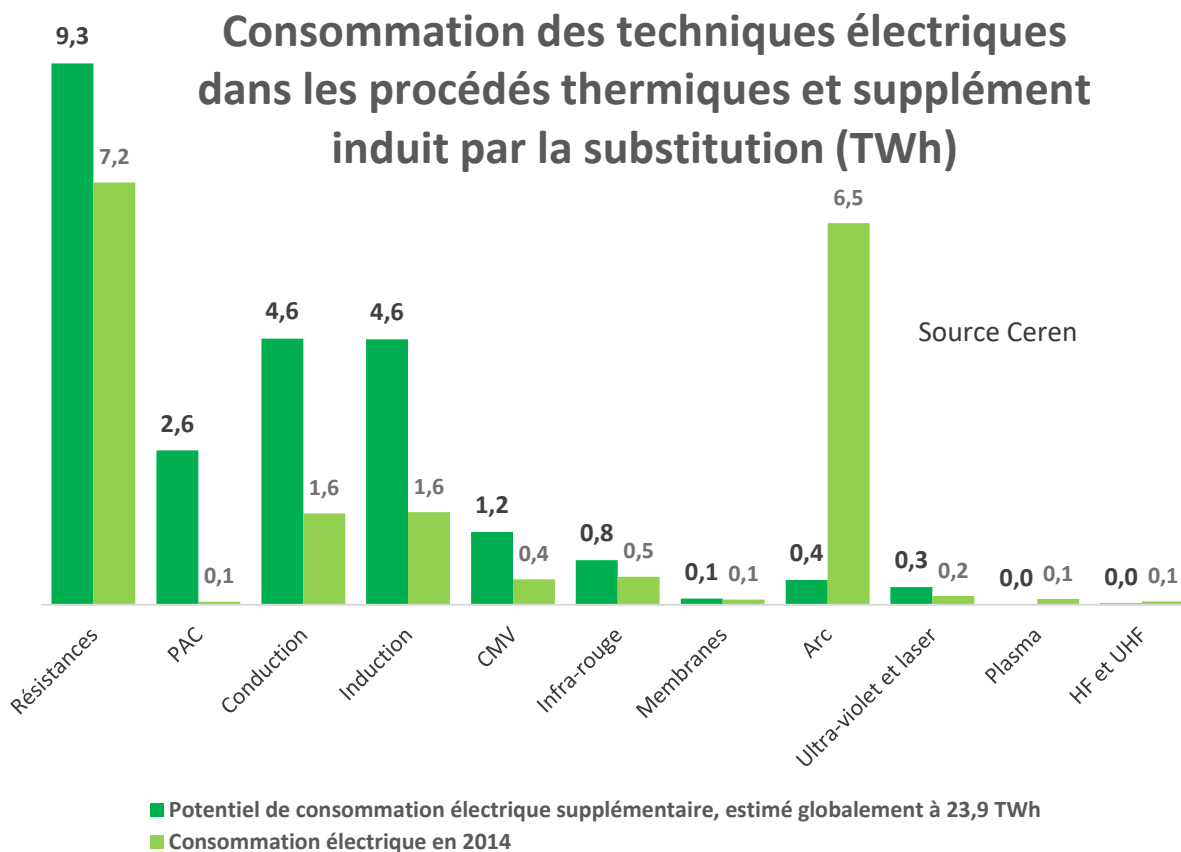
Données Ceren



## 2.1. Détails par technique électrique - liste par potentiel décroissant



NB : Les contributions des techniques électriques matures au potentiel d'électrification sont calculées sur la base de la technique électrique la plus performante, par segment et par opération thermique de process (cf. note méthodologique § 4). Ce potentiel d'électrification est évalué sur la base du parc actuel d'équipements, sans prendre en compte des technologies combustibles plus performantes.





Des **résistances** peuvent se substituer aux combustibles pour des usages couvrant la plupart des secteurs de l'industrie. La consommation de combustibles substituable représente 10,5 TWh et ces substitutions entraîneraient une consommation électrique supplémentaire de 9,3 TWh.

Le recours aux **pompes à chaleur** (PAC) pour l'électrification concerne pour une très large part l'agroalimentaire, la chimie organique et le papier. Très peu exploité actuellement, le potentiel de déploiement supplémentaire représente une substitution de 9,2 TWh de combustibles et une sur-consommation électrique de 2,6 TWh grâce au gain énergétique élevé de cette technique.

La **conduction** peut principalement être mobilisée dans le secteur du verre avec un triplement de la consommation, actuellement à 1,6 TWh (consommation supplémentaire de 4,6 TWh en substitution de 7,6 TWh de combustibles).

L'**induction** peut se substituer à 6,0 TWh de combustibles dans la sidérurgie et la fonderie. La consommation supplémentaire induite de 4,6 TWh serait importante au regard de la consommation actuelle (1,6 TWh) et apporterait une contribution significative au potentiel d'électrification total.

Le recours à la **compression mécanique de vapeur** (CMV) pour l'électrification concerne surtout l'agroalimentaire et le papier. Le potentiel de déploiement supplémentaire (1,2 TWh) est modeste, comme la consommation électrique actuelle (0,4 TWh), mais compte tenu de son gain énergétique élevé, le volume de combustible substituable correspondant est non négligeable (5,4 TWh).

L'**infrarouge** électrique intervient aussi dans un nombre limité de secteurs : il peut se diffuser essentiellement dans les industries agro-alimentaires hors lait et sucre. La consommation électrique actuelle est de 0,5 TWh et le potentiel supplémentaire de 0,8 TWh (en substitution de 1,0 TWh de combustibles).

Les **membranes** qui représentent actuellement une faible consommation de 0,1 TWh sont un substitut applicable uniquement dans l'industrie laitière. Le potentiel de déploiement additionnel est faible, de l'ordre de 0,1 TWh, même si cela représenterait 0,8 TWh de combustibles.

Les **fours à arc** sont mobilisables uniquement dans la fonderie. La technique étant déjà largement adoptée, le potentiel de déploiement supplémentaire est très faible (de l'ordre de 0,4 TWh électriques, en substitution de 0,7 TWh de combustibles) comparé à la consommation électrique actuelle de 6,5 TWh.

Les utilisations potentielles de l'**ultra-violet et du laser** pour l'électrification sont concentrées dans l'industrie du bois ainsi que dans l'édition-imprimerie. Les consommations électriques concernées ne représentent actuellement que 0,1 TWh et le potentiel de consommation supplémentaire est de 0,3 TWh (en substitution de 0,6 TWh de combustibles).

Les plasmas, HF et UHF représentent à la fois une consommation actuelle faible (< 0,1 TWh) et un potentiel de substitution de combustibles (< 0,1 TWh) négligeables par rapport aux autres techniques.

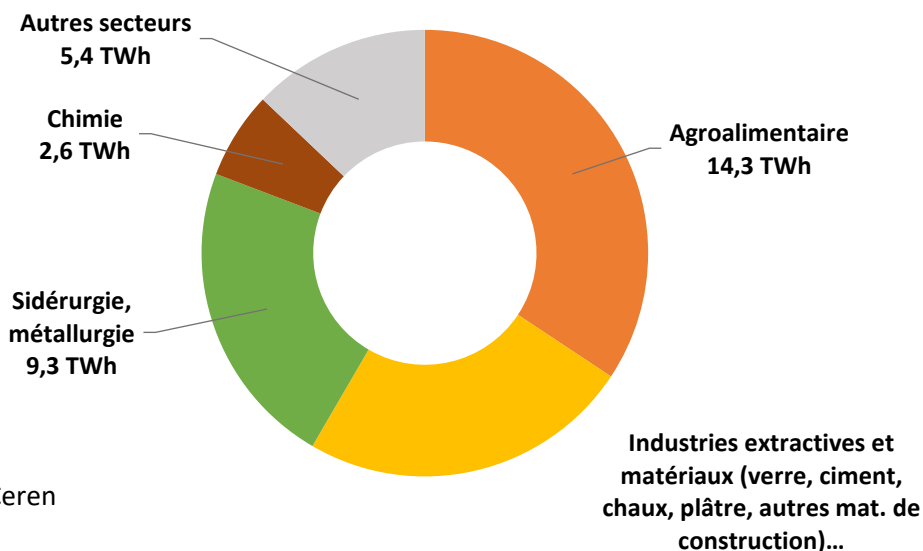


## 2.2. Analyse sectorielle

L'analyse sectorielle montre que trois grands secteurs concentrent 80% des consommations de combustibles substituables et de la consommation électrique supplémentaire induite : l'agroalimentaire, les industries extractives groupées avec celles des matériaux, ainsi que la métallurgie.

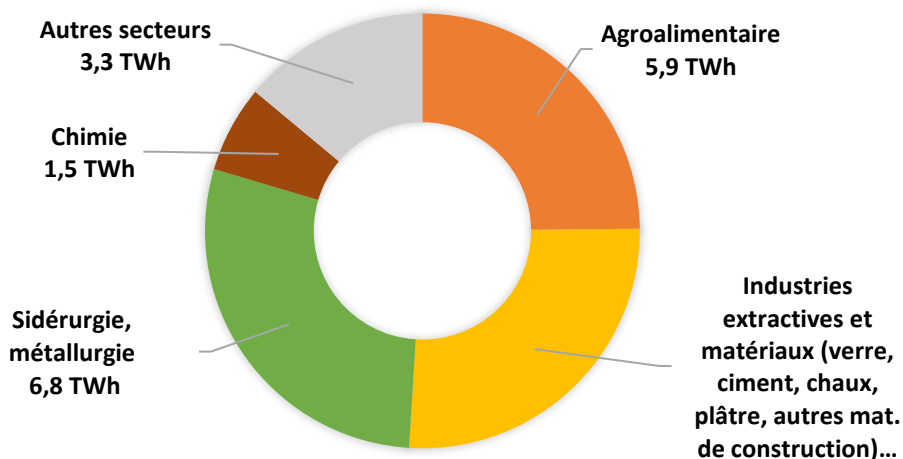
### Combustibles substituables par secteur

Potentiel d'électrification global : 41,6 TWh



Source Ceren

### Consommation électrique supplémentaire induite par la substitution : 23,9 TWh



Source Ceren

*NB : les sites appartenant à la catégorie des Industries Grandes Consommatrices d'Énergie<sup>4</sup> (IGCE) représentent environ un tiers du potentiel d'électrification et de la consommation d'électricité induite.*

<sup>4</sup> Les IGCE sont regroupent 9 secteurs : l'acier, l'aluminium, le clinker, l'éthylène, le chlore, l'ammoniac, le verre, le papier et le sucre.

### 3. Analyse détaillée du potentiel d'électrification des procédés industriels thermiques

#### 3.1. Champ du potentiel d'électrification

En 2014, l'industrie française<sup>5</sup> a consommé 441,7 TWh, dont 382,4 TWh pour un usage énergétique (ce qui exclut les combustibles utilisés comme matières premières<sup>6</sup>). Plus des deux tiers de cette consommation à usage énergétique, soit 252,1 TWh en énergie finale (hors pertes de production et de distribution pour la vapeur), sont utilisés pour satisfaire les besoins thermiques des procédés.

Soulignons que le champ étudié exclut donc le chauffage des locaux (évalué à 17 TWh de combustibles d'après l'étude Ceren sur le gisement d'efficacité énergétique dans les opérations transverses de l'industrie en 2015). Il n'a pas non plus été envisagé la substitution de chaudières électriques aux chaudières combustibles (dont la consommation totale représente 80 TWh hors biomasse). En revanche, l'électrification de certaines techniques utilisant de la vapeur a été prise en compte, impactant donc une partie de la consommation de combustibles des chaudières existantes. **Il pourrait donc exister dans l'industrie un potentiel d'électrification supplémentaire non couvert par cette étude.**

Tableau 1 : Consommation d'énergie thermique de process en 2014.

| <i>Année 2014 - TWh</i>  | <i>Tous usages</i> | <i>dont process thermique (énergie finale)</i> |                    |
|--------------------------|--------------------|--|--------------------|
| <b>Toutes énergies</b>   | 441,7              | 252,1  |                    |
| <b>dont combustibles</b> | 327,7              | 233,7  | ← champ de l'étude |
| <b>dont électricité</b>  | 118                | 18,3   |                    |

Note : les consommations tous usages de combustibles et d'électricité ne sont pas sommables, une partie des combustibles étant utilisée pour produire de l'électricité

L'analyse du potentiel d'électrification par des techniques électriques matures est traitée :

- par opération énergétique (10 au total) ;
- pour chacun des 131 segments d'activités constitutifs de l'industrie (cf. note méthodologique, § 4) ;
- sur le champ des opérations de procédés thermiques pour lesquels des techniques électriques sont opérationnelles et déjà utilisées par une partie des industriels.

Les principales opérations énergétiques de process sont, par consommation d'énergie décroissante, les opérations de traitements thermo-chimiques, les opérations de séchage, de traitements thermiques, de chauffage de produits liquides et gazeux, et de fusion et maintien en fusion (Tableau 2).

<sup>5</sup> Hors secteurs de l'énergie et du bâtiment, au sens des NCE E12 à 38

<sup>6</sup> Par exemple, le coke utilisé comme agent réducteur en sidérurgie, le gaz naturel utilisé pour produire de l'hydrogène, puis de l'ammoniac.

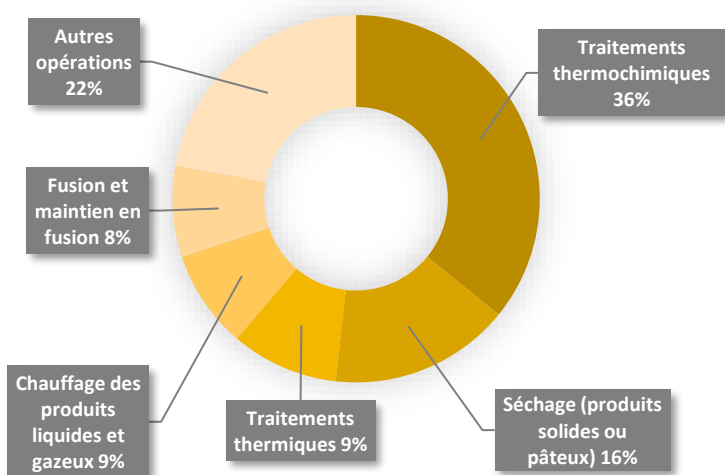


Concentrés dans la sidérurgie (E16), les cimenteries (E20) et la chimie organique de base hors plastique (E26), les traitements thermochimiques représentent à eux seuls 36% de la consommation thermique de process.

Si l'on y ajoute le séchage (16% du total), particulièrement présent dans l'industrie papetière (E35), l'agroalimentaire hors lait et sucre (E14) et l'industrie du bois (E38), on appréhende avec ces deux opérations un peu plus de la moitié de la consommation thermique de process (soit 52%) de l'industrie.

Les opérations de traitements thermiques, de chauffage des produits liquides et gazeux, et de fusion, se partagent ensuite à parts sensiblement égales (26% de l'énergie thermique de process).

**Consommation d'énergie finale des procédés thermiques en 2014 : 252,1 TWh**



Source Ceren

**Tableau 2** : Consommation d'énergie finale des principales opérations énergétiques pour les procédés thermiques industriels (en TWh)

|   |              |
|---|--------------|
| Traitements thermochimiques               | 90,4         |
| Séchage (produits solides ou pâteux)      | 40,1         |
| Traitements thermiques                    | 23,8         |
| Chauffage des produits liquides et gazeux | 21,8         |
| Fusion et maintien en fusion              | 20,2         |
| Autres opérations                         | 55,7         |
| <b>Toutes opérations</b>                  | <b>252,1</b> |

Source Ceren

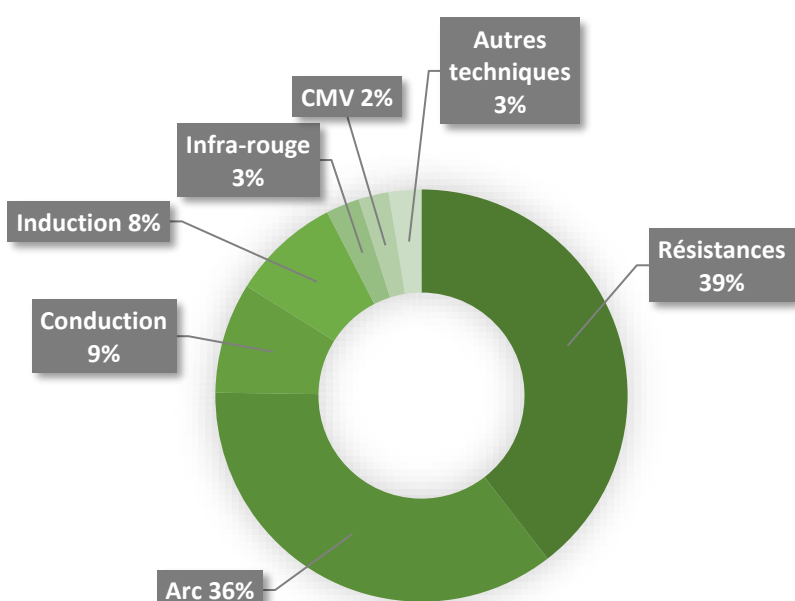
### 3.2. Consommation actuelle des techniques électriques dans les procédés thermiques en 2014

Des techniques électriques sont déjà utilisées pour les procédés thermiques industriels. En 2014, la consommation des techniques électriques pour ces procédés était de 18,3 TWh sur une consommation totale d'énergie finale de 252,1 TWh. Cela représente **à peine plus de 7% de la consommation des procédés thermiques (18,3 TWh)** contre 93% pour les techniques combustibles (233,7 TWh) et correspond à 15,5% de la consommation électrique dans l'industrie.

Ces techniques électriques sont particulièrement présentes dans les opérations de fusion (7,4 TWh), les traitements thermiques (3,2 TWh) et les traitements thermochimiques (2,9 TWh).

Les résistances (7,2 TWh) et les fours à arc (6,5 TWh) représentent les trois quarts des consommations électriques, loin devant la conduction et l'induction (toutes deux à 1,6 TWh). Les autres techniques électriques représentent une consommation relativement marginale (Tableau 3).

**Consommation actuelle électrique dans les procédés thermiques en 2014 : 18,3 TWh**



Source Ceren

**Tableau 3 : Consommation des principales techniques électriques pour les procédés thermiques (en TWh)**

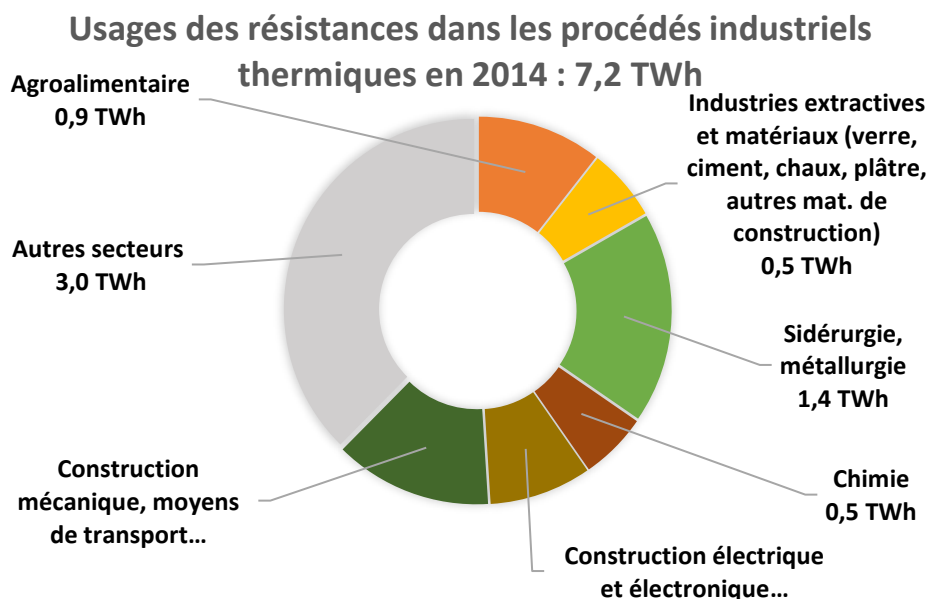
|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| Résistances              | 7,24         |
| Arc                      | 6,54         |
| Conduction               | 1,59         |
| Induction                | 1,56         |
| Infra-rouge              | 0,48         |
| CMV                      | 0,43         |
| Autres techniques        | 0,47         |
| <b>Toutes techniques</b> | <b>18,32</b> |

Source Ceren



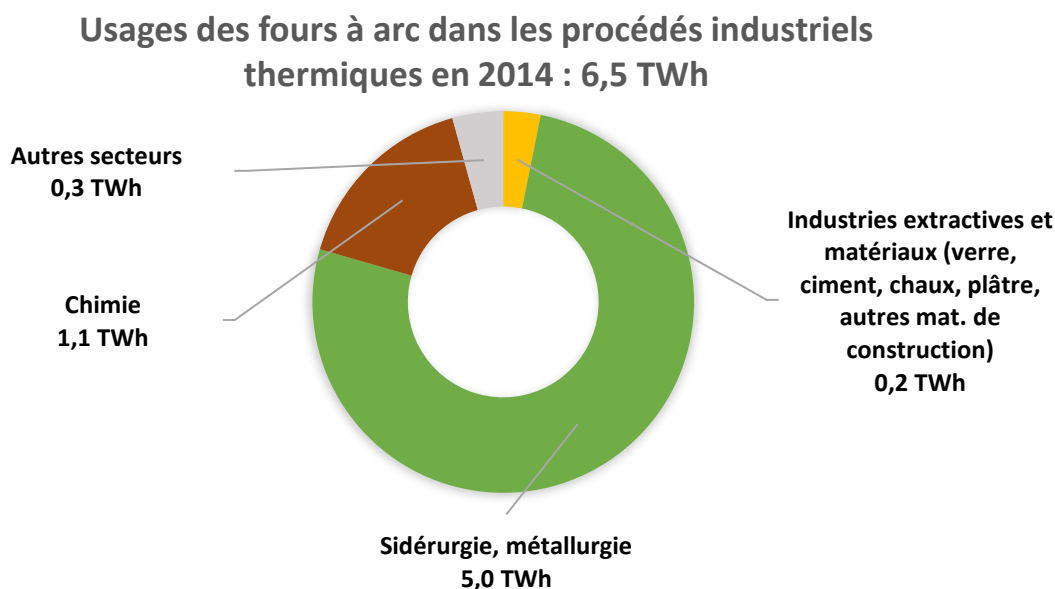
### Zoom sur les résistances (39% des consommations électriques actuelles dans les procédés thermiques)

Les résistances sont utilisées dans la plupart des secteurs NCE, notamment dans ceux traitant des métaux, mais également dans la plasturgie et dans l'agro-alimentaire. Il est important de noter qu'elles sont principalement utilisées dans des équipements de faible puissance.



### Zoom sur la technologie arc (36% des consommations électriques actuelles dans les procédés thermiques)

L'arc est utilisé principalement dans la sidérurgie, dans les aciéries électriques et dans les usines de ferroalliages. Il sert aussi à la fabrication de silicium et de produits électrochimiques.



*NB : En dehors des procédés thermiques industriels, il existe dans l'industrie des consommations de certaines techniques électriques comme les résistances et les pompes à chaleur pour le chauffage des locaux (environ 1,5 TWh sur une consommation toutes énergies de près de 19 TWh pour cet usage<sup>7</sup>). Ne s'agissant pas de procédés industriels, ces consommations sont exclues du périmètre de l'étude.*

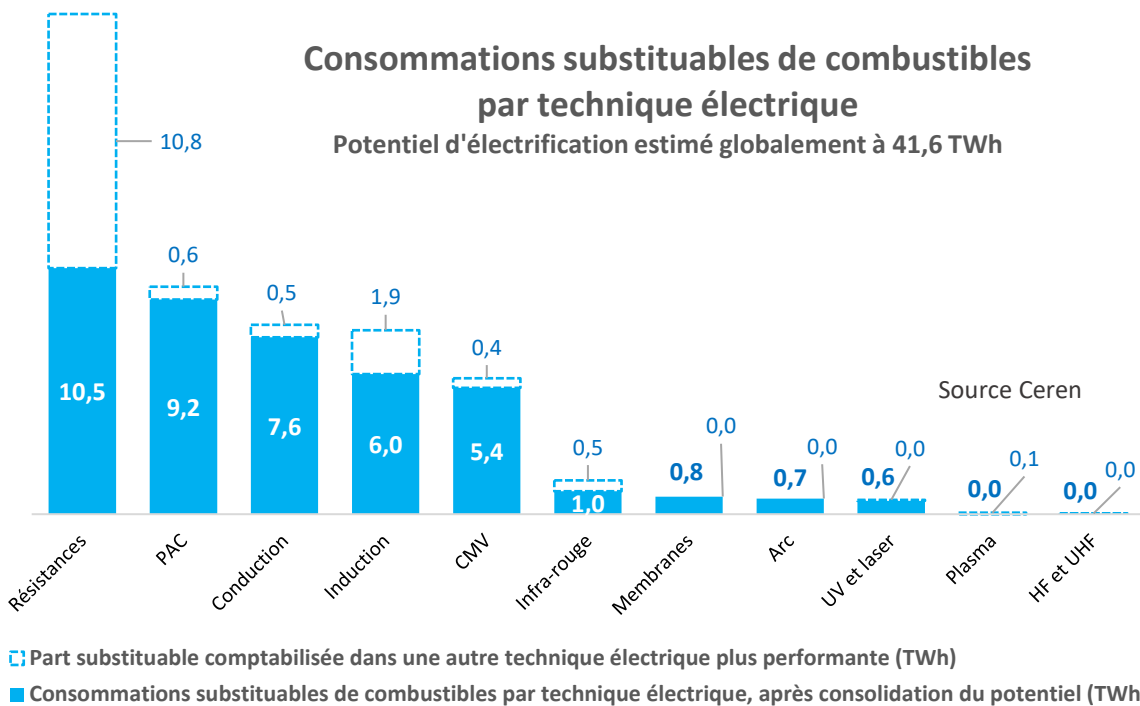
<sup>7</sup> Étude Ceren sur le gisement d'efficacité énergétique dans les opérations transverses de l'industrie en 2015.

### 3.3. Combustibles potentiellement substituables par technique électrique

Les substitutions possibles de combustibles vers l'électricité dans les opérations thermiques des procédés industriels concernent potentiellement 41,6 TWh, soit 18% de la consommation actuelle de combustibles destinée à ces opérations.

**Dans cette étude, l'hypothèse retenue est que la technique électrique de substitution doit être déjà utilisée comme alternative à l'équipement combustible considéré dans le même secteur (NCE) et dans la même gamme de puissance que celui-ci (1% de part de marché minimum<sup>8</sup>).**

En analysant les consommations de combustibles potentiellement substituables par chaque technique électrique, on constate que les **résistances électriques** constituent le gisement le plus important (10,5 TWh), devant les **pompes à chaleur (PAC)** (9,2 TWh), la **conduction** (7,6 TWh) et **l'induction** (6,0 TWh).



*Rappel : Les contributions des techniques électriques matures au potentiel d'électrification sont calculées sur la base de la technique électrique la plus performante (cf. note méthodologique § 4). A titre indicatif, le graphique précédent indique en pointillés la consommation de combustible supplémentaire que chaque technique pourrait potentiellement substituer sans tenir compte des alternatives plus performantes.*

<sup>8</sup> Ce seuil est un choix méthodologique fait pour cette étude. Il pose problème pour les équipements bi-énergies (consommant électricité et combustibles) qui sont de fait considérés substituables alors qu'ils ne le sont pas toujours.

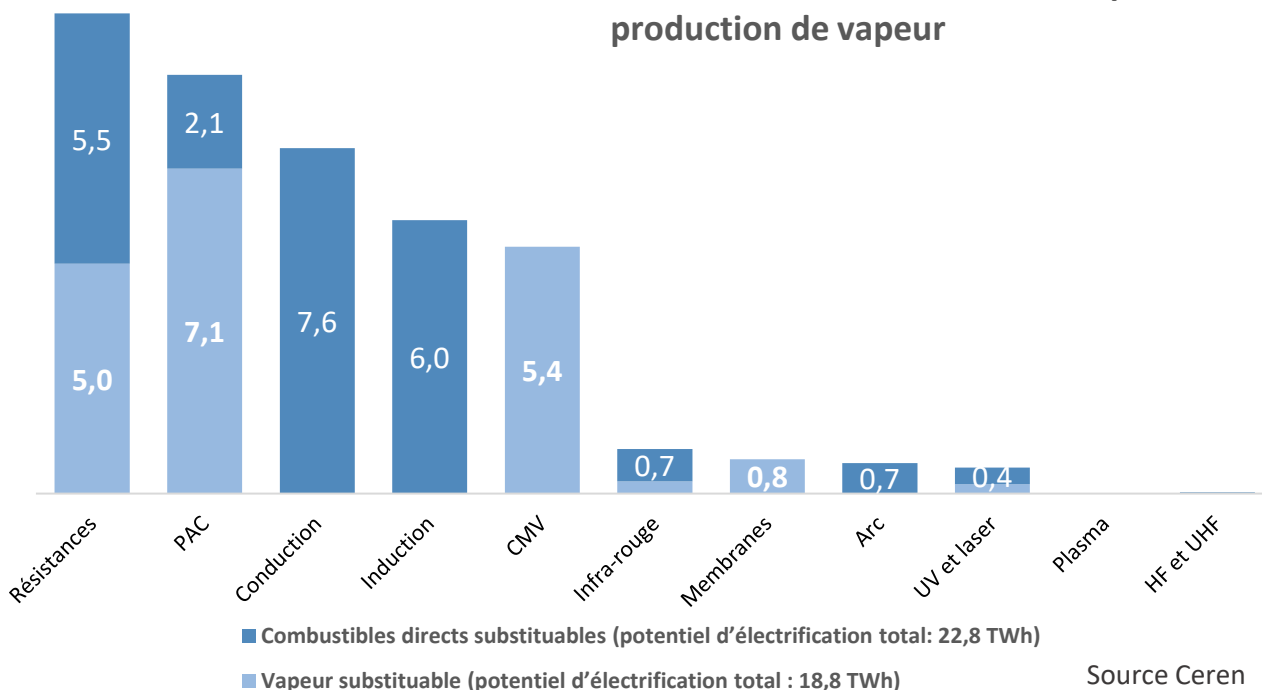


### 3.4. Décomposition du potentiel d'électrification : substitution de vapeur ou de combustion directe

Il convient de noter que certaines consommations de combustibles potentiellement substituables incluent un changement de vecteur énergétique. En effet, 55% de ces consommations concernent une utilisation directe des combustibles (22,8 TWh consommés hors chaudières) et 45% utilisent des fluides caloporteurs achetés ou produits sur le site comme vecteur (18,8 TWh). **Ce dernier cas portant essentiellement sur de la vapeur, on parlera dorénavant de substitution vapeur, même pour les autres caloporteurs.**

En prenant en compte les rendements de production et les pertes de distribution de vapeur, la consommation de 18,8 TWh de vapeur correspond à une consommation de combustibles potentiellement remplaçable de plus de 20 TWh. Les combustibles remplaçables, pertes incluses, méritent d'être évalués plus finement et pourrait s'avérer supérieurs au potentiel d'électrification global estimé précédemment (41,6 TWh).

Consommations remplaçables de combustibles : poids respectif des combustions directes et des combustibles utilisés pour la production de vapeur



On note que l'induction, la conduction et les fours à arcs remplacent exclusivement des combustions directes (opérations de fusion, de traitements thermiques, de chauffage ou réchauffage des métaux dans des fours).

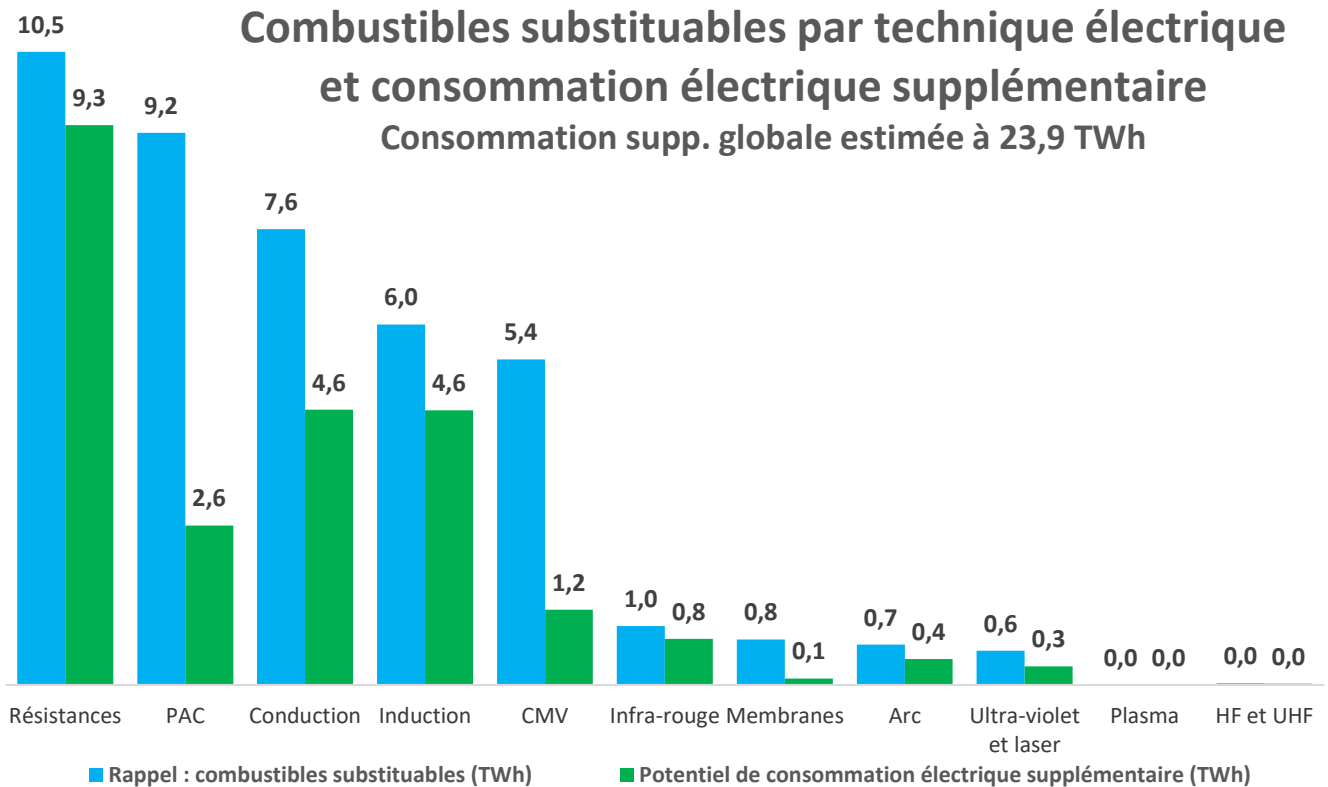
A l'inverse, les PAC, la CMV et les membranes remplacent principalement ou exclusivement des combustibles utilisés pour produire des fluides caloporteurs, plutôt que des combustibles utilisés directement.



### 3.5. Consommation des techniques électriques de substitution

En raisonnant en énergie finale, les techniques électriques considérées consomment moins que les techniques qu'elles remplacent. Cela s'explique souvent par la dissipation d'énergie dans les fumées des combustions, absente dans les techniques électriques<sup>9</sup>. On associe ainsi une notion de gain énergétique (détaillée au § 4.4) aux techniques électriques, ce qui permet d'estimer les consommations électriques supplémentaires induites par la substitution.

Le graphique suivant présente des écarts assez variables selon les techniques électriques entre les consommations de combustibles substituables et les nouvelles consommations d'électricité.

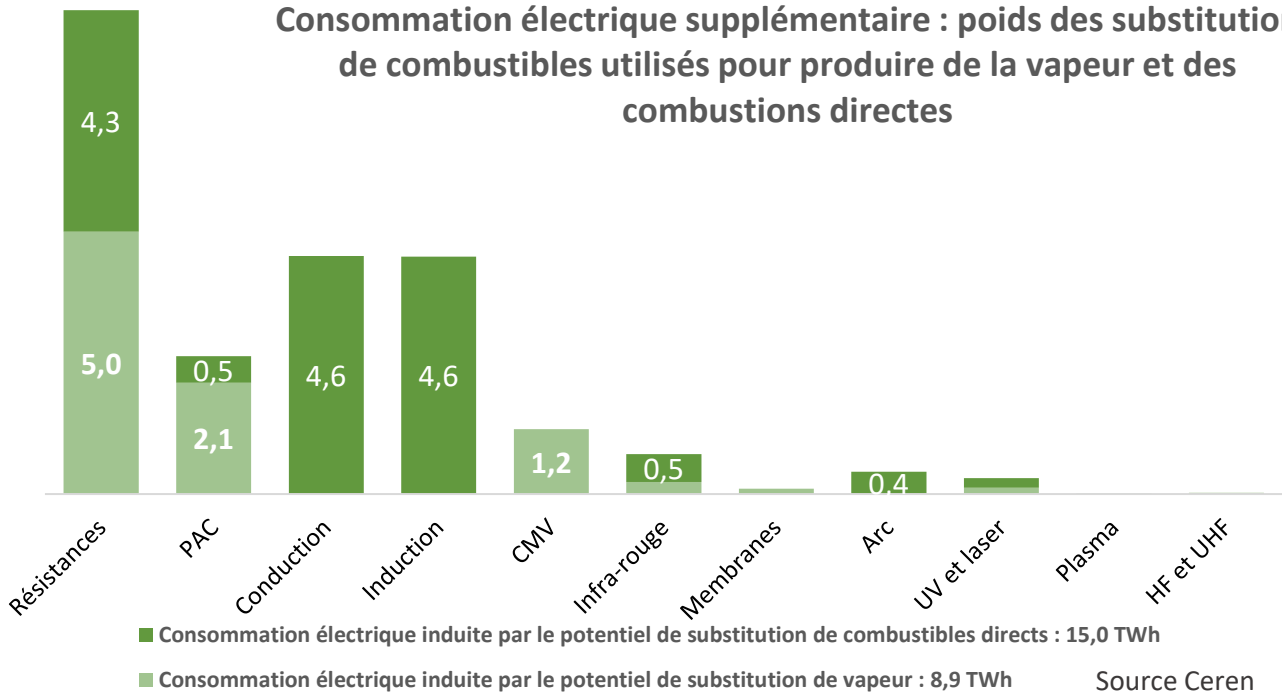


Source Ceren

**Si l'on retient la technique électrique la plus performante parmi les techniques « disponibles matures », l'impact de ces substitutions se traduirait par une consommation électrique finale supplémentaire de 23,9 TWh. On rappelle que cette estimation ne prend pas en considération la concurrence avec d'éventuelles technologies combustibles plus performantes que celles du parc des équipements industriels de 2014.**

<sup>9</sup> La situation peut être différente en raisonnant en énergie primaire puisqu'il y a des déperditions d'énergie lors de la production thermique d'électricité.

### Consommation électrique supplémentaire : poids des substitution de combustibles utilisés pour produire de la vapeur et des combustions directes



On note aussi que la consommation d'électricité supplémentaire viendrait davantage de la substitution de combustions directes (15 TWh) que de la substitution de vapeur produite à partir de combustibles (8,9 TWh).

## 4. Note méthodologique et détails sur les gains énergétiques

---

### 4.1. Données de consommation énergétique utilisées

La réalisation de cette étude repose sur les données de consommations des enquêtes du Ceren permettant de couvrir l'ensemble de l'industrie<sup>10</sup> sur un cycle de quatre ans. Dans cette étude, ont été utilisées :

- L'enquête sur les consommations 2014 pour les secteurs de la chimie, de la plasturgie et de la transformation du caoutchouc ;
- L'enquête sur les consommations 2013 pour les secteurs de l'agro-alimentaire et du papier-carton ;
- L'enquête sur les consommations 2012 pour les secteurs des matériaux de construction, du verre, de la construction électrique et électronique, du textile et des industries diverses ;
- L'enquête sur les consommations de 2011 pour les secteurs de la métallurgie et de la mécanique.

Ces enquêtes ont permis de constituer une base de données des consommations finales thermiques des procédés industriels, par segment d'activité, par opération énergétique, par énergie et par tranche de puissance.

Le principe consiste à utiliser les structures détaillées observées en 2011 ou 2012 ou 2013 par activité principale (APE) et par forme d'énergie dans les enquêtes, puis à reporter à 2014 tous ces niveaux de consommation en les ajustant (prolongement des observations statistiques). Ce prolongement est fait en suivant l'évolution du total de consommation par énergie et par activité, sur la base du bilan annuel du Ceren pour l'industrie.

Un traitement particulier est appliqué aux consommations de vapeur (et aux autres fluides caloporteurs) : le prolongement est fait en suivant l'évolution des différents postes d'utilisation de la vapeur (source étude sectorielle du Ceren), des combustibles du segment considéré (APE ou groupe d'APE) et des consommations par type de combustible dans ce segment.

### 4.2. Périmètre de l'analyse (secteurs, opérations énergétiques, techniques électriques)

131 segments d'activité à partir de la nomenclature d'activité NAF pour l'ensemble de l'industrie (voir § 5 Annexe) ont été considérés, pour les dix opérations énergétiques suivantes :

- L'évaporation
- Le séchage
- La distillation
- Les autres opérations d'élimination d'eau
- Le chauffage de liquides et de gaz
- Le chauffage ou réchauffage de métaux
- La fusion
- Les traitements thermochimiques
- Les traitements thermiques
- Les autres opérations thermiques.

Les onze techniques électriques étudiées sont les suivantes :

- Les résistances
- Les pompes à chaleur
- La conduction
- L'induction
- La compression mécanique de vapeur
- L'infrarouge
- Les membranes
- L'arc
- L'ultra-violet et laser
- Le plasma
- Les HF et UHF (hautes et ultra hautes fréquences).

---

<sup>10</sup> Au sens des secteurs NCE E12 à 38, hors secteurs de l'énergie et du bâtiment, et en excluant les usages non énergétiques, c'est-à-dire les produits énergétiques utilisés comme matières premières (ex : coke utilisé comme agent réducteur en sidérurgie, gaz naturel utilisé pour produire de l'hydrogène, puis de l'ammoniac).



Du fait de l'hétérogénéité des autres opérations thermiques, le potentiel d'électrification associé aux autres opérations n'est pas pris en compte.

### 4.3. Calcul des taux de pénétration

Pour les 131 segments de l'industrie et les 10 opérations énergétiques de process, les **taux de pénétration des techniques électriques ont été calculées**. Ces taux correspondent au rapport de la consommation électrique de la technique dans l'opération énergétique considérée et de la consommation totale d'énergie de process thermique sur ce même champ.

À l'exception des pompes à chaleur (PAC), **toute technique électrique existante qui représente au moins 1%<sup>11</sup> de la consommation thermique du champ considéré (champ défini par un secteur, une opération et une gamme de puissance), est susceptible de se généraliser sur ce champ**. Dans le cas contraire, le potentiel d'électrification est nul. Une limite à cette hypothèse forte concerne les techniques bi-énergies qui sont considérées substituables, alors que ce n'est pas toujours le cas.

#### 4.3.1. Intégration du critère « puissance électrique » dans l'évaluation du gisement

L'étude du parc des équipements industriels, réalisée par le Ceren pour l'année de constat 2011, montre qu'en pratique il est courant que les techniques électriques fassent l'objet de réalisations industrielles pour les faibles puissances, et beaucoup moins pour les puissances élevées. **Nous ne considérons la substitution de techniques électriques à des techniques utilisant des combustibles uniquement lorsque des équipements ont éprouvé ces techniques électriques dans la même gamme de puissance que les techniques combustibles, c'est-à-dire s'il existe des applications industrielles révélées par les enquêtes du Ceren.**

Si une technique est effective dans une tranche de puissance, nous avons considéré qu'elle restait possible **dans toutes les tranches de puissances inférieures**, qu'elle y soit observable ou pas. Pour les pompes à chaleur, nous avons retenu une puissance électrique maximale de 2 500 kW sur la base d'informations techniques d'EDF.

#### 4.3.2. Cas particulier des pompes à chaleur

**Pour les pompes à chaleur (PAC)**, le champ associé à leur pénétration potentielle est déterminé par la consommation finale de combustibles et de vapeur couvrant des besoins de chaleur d'une température inférieure ou égale à 100 °C, quel que soit le taux de pénétration de la technique. Les enquêtes Ceren donnent en effet la répartition de la consommation finale thermique par activité – opération – niveau de température. À la demande des commanditaires de l'étude, le champ d'application des PAC a été réduit en fonction de la disponibilité d'une source froide dans le segment. Cette disponibilité a été estimée par défaut par la chaleur récupérable sur les compresseurs d'air et les groupes de production de froid dans le segment.

Pour les compresseurs d'air, on a pris comme hypothèse que la chaleur récupérable est égale à 70% de leur consommation électrique. Pour les groupes de production de froid, la récupération de chaleur peut se faire à 3 niveaux : sur le refroidissement du ou des compresseur(s), au condenseur, et à l'éventuel échangeur de désurchauffe. On retient comme hypothèse (comme dans la fiche de calcul des certificats d'économie d'énergie sur la récupération de chaleur) que la chaleur récupérable est égale à 2,2 fois la consommation électrique. On calcule ainsi une chaleur totale récupérable qui constitue le potentiel de source froide des pompes à chaleur potentielles.

Comme dans les études précédentes du gisement d'économies d'énergie dans l'industrie, **on prend comme hypothèse un COP moyen de 4 pour les PAC, ce qui correspond à un gain énergétique moyen de 75% en énergie finale**. La source froide doit représenter alors 75% des besoins de chaleur. Si la source froide calculée est inférieure à 75% des besoins de chaleur à une température inférieure ou égale à 100°C, le gisement des PAC est diminué en proportion de la quantité disponible en source froide.

---

<sup>11</sup> Ce taux bas permet d'évincer des techniques électriques marginales tout en conservant dans la plupart des cas, plusieurs techniques électriques de substitutions (2 à 7 techniques électriques selon le champ considéré).

#### 4.4. Concept de gain énergétique entre deux techniques

Les gains énergétiques sont définis comme la différence entre la consommation électrique des techniques de substitution (les techniques électriques étudiées) et la consommation de combustibles ou de vapeur que ces techniques remplacent. Ces gains sont normalisés (rapportés à la consommation de combustible ou de vapeur de départ). Il s'agit donc de rapports d'énergies finales.

On retient deux gains d'énergie finale pour chaque technique électrique : l'un défini par rapport aux techniques remplaçables qui utilisent un fluide caloporteur<sup>12</sup> et l'autre par rapport aux techniques remplaçables qui utilisent directement des combustibles, comme présenté dans le Tableau 4.

**Tableau 4** : Gains énergétiques en énergie finale, par technique électrique, dans le process thermique.

|  | <i>par rapport aux techniques « vapeur »</i> | <i>par rapport aux techniques « combustibles directs »</i> | <b>REMARQUES CAS PARTICULIERS</b>   |
|--|--|--|---|
| <b>Résistances</b>                           | 0%   | 20%  | 30% pour le recuit du verre par rapport aux techniques « combustibles directs »   |
| <b>Pompe à chaleur (PAC)</b>                 | 70%  | 75%  |   |
| <b>Conduction</b>                            | N.A.   | 15%  | 40% dans le verre   |
| <b>Induction</b>                             | N.A.   | 20%  | Taux différenciés pour les opérations de fusion, traitements thermiques et chauffage-réchauffage des métaux de certains secteurs NCE : 5% E18 / 30% E29 à E32 / 23% E33 |
| <b>Compression mécanique de vapeur (CMV)</b> | 77%  | N.A.   |   |
| <b>Infrarouge</b>                            | 12%  | 25%  |   |
| <b>Membranes</b>                             | 86%  | N.A.   | L'osmose inverse pour la concentration du lait n'est considérée que sur 75% du champ de l'opération d'évaporation (les membranes n'assurent qu'une préconcentration)    |
| <b>Arc</b>                                   | N.A.   | 36%  | Exclusivement dans la fonderie  |
| <b>Ultra-violet et laser</b>                 | 40%  | 50%  |   |
| <b>Plasma</b>                                | N.A.   | 20%  |   |
| <b>HF et UHF</b>                             | 15%  | 30%  | 73% pour la vulcanisation de produits profilés en caoutchouc par rapport aux techniques « vapeur »  |

<sup>12</sup> Ces techniques sont désignées par « techniques vapeur » par simplification.



On note que les gains énergétiques sont en plus importants lorsqu'une technique électrique remplace une technique utilisant directement des combustibles que lorsqu'il s'agit d'une technique utilisant un fluide caloporteur. Ceci s'explique par la dissipation d'énergie par les fumées de la combustion au niveau du procédé. Comme le raisonnement se fait en énergie finale, les pertes en amont du procédé ne sont pas prises en compte : ainsi, le rendement de production de la vapeur n'est pas comptabilisé alors que les pertes fumées des combustions directes le sont.

On note que des techniques comme les **PAC**, la **CMV** ou les **membranes** ont des gains énergétiques particulièrement élevés, mais ne s'appliquent qu'à un champ restreint (cf. § 3.3), alors que les **résistances** ont un champ d'application large, un rendement électrique élevé, mais un gain énergétique plus faible.

Pour les techniques électriques comme la **compression mécanique de vapeur (CMV)**, les **membranes**, les **pompes à chaleur (PAC)**, **l'induction dans l'industrie des métaux**, les **résistances et la conduction dans l'industrie du verre**, les **UHF** (ultrahaute fréquence) dans la vulcanisation du caoutchouc, les hypothèses de gains énergétiques des techniques électriques étudiées sont issues des 3 dernières études de gisement d'économies d'énergie menées par le Ceren dans l'industrie de 2012 à 2014.

Pour les autres techniques, d'autres sources ont été utilisées :

- Pour les **fours à arc**, les gains ont été calculés à partir des consommations spécifiques 2011 du secteur de la fonderie, données issues de l'enquête ECEI du Ceren sur ce secteur.
- Pour la **conduction (hors verre)**, les **HF et UHF et l'infrarouge** ce sont les études Ceren sur les placements énergétiques de procédé qui ont été utilisées.
- **Pour les fours à résistances, on a estimé que le gain énergétique était celui du poste pertes fumées des fours à combustibles qui, estimé à 19%, a été arrondi à 20%** dans les études récentes réalisées par le Ceren sur le potentiel de récupération de chaleur fatale.
- **Pour les applications à résistances hors fours (en général à basse température), on a estimé que le gain en énergie finale sur la vapeur est nul.** Si l'on considère que cette vapeur est produite par une combustion avec 15 à 20% de des pertes de production et de pertes de distribution de la vapeur, on retrouve un gain énergétique rapporté à la consommation de combustible du même ordre de grandeur que le précédent.

Enfin, une recherche sur des fiches techniques réalisées par EDF et par l'Ademe décrivant des installations de matériels électriques performants a fourni les gains retenus pour **le plasma, et pour l'ultra-violet et le laser**. Les données sont rares et fragiles, mais ce sont des techniques ayant un gisement faible.

#### 4.5. Cumul de la consommation de combustibles substituables et des consommations d'électricité induites par la substitution

Plusieurs techniques électriques peuvent être utilisées sur un champ commun et de ce fait les quantités de combustibles substituables (potentiel d'électrification) ou les consommations électriques induites par la substitution ne sont pas sommables. Afin de calculer des quantités agrégées par NCE puis pour l'ensemble de l'industrie, nous avons calculé pour chaque segment d'activité et opération énergétique **un potentiel d'électrification et une consommation électrique induite en retenant pour la substitution, la technique électrique ayant le gain énergétique le plus élevé.**

On obtient ainsi des quantités de combustibles substituables et des consommations d'électricités induites sommables. Le Tableau 5 agrège par exemple les quantités substituables par technique. Les autres résultats agrégés sont présentés au § 2.

**Tableau 5** : Consommation de combustibles substituables par technique électrique\*

| <i>En TWh – par importance décroissante</i> | <b>Vapeur substituable</b> | <b>Combustibles directs substituables</b> | <b>Toutes énergies</b> |
|---|----------------------------|---|------------------------|
| <b>Résistances</b>                          | 5,0                        | 5,5                                       | 10,5                   |
| <b>PAC</b>                                  | 7,1                        | 2,1                                       | 9,2                    |
| <b>Conduction</b>                           | 0,0                        | 7,6                                       | 7,6                    |
| <b>Induction</b>                            | 0,0                        | 6,0                                       | 6,0                    |
| <b>CMV</b>                                  | 5,4                        | 0,0                                       | 5,4                    |
| <b>Infra-rouge</b>                          | 0,3                        | 0,7                                       | 1,0                    |
| <b>Membranes</b>                            | 0,8                        | 0,0                                       | 0,8                    |
| <b>Arc</b>                                  | 0,0                        | 0,7                                       | 0,7                    |
| <b>Ultra-violet et laser</b>                | 0,2                        | 0,4                                       | 0,6                    |
| <b>Plasma</b>                               | 0,0                        | 0,0                                       | 0,0                    |
| <b>HF et UHF</b>                            | 0,0                        | 0,0                                       | 0,0                    |
| <b>TOUTES OPÉRATIONS</b>                    | <b>18,8</b>                | <b>22,8</b>                               | <b>41,6</b>            |

\* sur la base de la technique électrique disponible ayant le gain énergétique le plus élevé



## 5. Annexe

Liste des segments d'activité (131 segments)

| Segment   | NCE       | Activité                                 |
|---|-----------|--|
| <b>Industrie laitière (1)</b>                         | <b>12</b> |  |
| 1051A   |           | Fab. de lait liquide & de produits frais |
| 1051B   |           | Fabrication de beurre                    |
| 1051C   |           | Fabrication de fromage                   |
| 1051D   |           | Fabrication d'autres produits laitiers   |
| 1052Z   |           | Fabrication de glaces et sorbets         |
| <b>Sucrieries (2)</b>                                 | <b>13</b> |  |
| 1081Z   |           | Fabrication de sucre                     |
| <b>Industrie des viandes (3)</b>                      | <b>14</b> |  |
| 1012Z   |           | Transf. & conserv. de viande de volaille |
| 1011Z   |           | Transf. & conserv. viande de boucherie   |
| <b>Préparation à base de viandes, charcuterie (4)</b> |           |  |
| 1013A   |           | Prépa. indust. produits à base de viande |
| 1013B   |           | Charcuterie                              |
| 1085Z   |           | Fabrication de plats préparés            |
| <b>Industrie du poisson (5)</b>                       |           |  |
| 1020Z   |           | Transf. & conserv. poisson, crust., etc. |
| <b>Industrie des fruits et des légumes (6)</b>        |           |  |
| 1031Z   |           | Transf. et conserv. de pommes de terre   |
| 1039A   |           | Autre transf. et conserv. de légumes     |
| 1039B   |           | Transformation et conservation de fruits |
| <b>Industrie des corps gras (7)</b>                   |           |  |
| 1041A   |           | Fabrication d'huiles et graisses brutes  |
| 1041B   |           | Fab. d'huiles et graisses raffinées      |
| 1042Z   |           | Fab. de margarine & graisses similaires  |
| <b>Meunerie (8)</b>                                   |           |  |
| 1061A   |           | Meunerie                                 |
| <b>Autres activités de travail des grains (9)</b>     |           |  |
| 1061B   |           | Autres activités du travail des grains   |
| <b>Produits amylacés (10)</b>                         |           |  |
| 1062Z   |           | Fabrication de produits amylacés         |
| <b>Aliments pour animaux (11)</b>                     |           |  |
| 1091Z   |           | Fabric. d'aliments pour animaux de ferme |
| 1092Z   |           | Fab. aliments pour animaux de compagnie  |
| <b>Fabrication de pâtes alimentaires (12)</b>         |           |  |
| 1073Z   |           | Fabrication de pâtes alimentaires        |



| Segment  | NCE | Activité                                 |
|--|-----|--|
| <b>Pain, pâtisserie, biscuiterie (13)</b>                                    |     |  |
| 1071A  |     | Fab. indus. de pain & pâtisserie fraîche |
| 1071B  |     | Cuisson de produits de boulangerie       |
| 1071C  |     | Boulangerie et boulangerie-pâtisserie    |
| 1071D  |     | Pâtisserie                               |
| 1072Z  |     | Fab. pain, biscuit & pâtiss. de conserv. |
| <b>Chocolaterie, confiserie (14)</b>   |     |  |
| 1082Z  |     | Fabric. de cacao, chocolat & confiseries |
| <b>Transformation du thé et du café (15)</b>                                 |     |  |
| 1083Z  |     | Transformation du thé et du café         |
| <b>Autres industries alimentaires (16)</b>                                   |     |  |
| 1084Z  |     | Fabric. de condiments et assaisonnements |
| 1086Z  |     | Fab. d'aliment homogénéisé & diététique  |
| 1089Z  |     | Fab. d'autres prod. alimentaires n.c.a.  |
| <b>Prod. de boissons alcooliques distillées (17)</b>                         |     |  |
| 1101Z  |     | Prod. de boissons alcooliques distillées |
| <b>Spiritueux, champagne, vermouths, vinification (18)</b>                   |     |  |
| 1102A  |     | Fabrication de vins effervescents        |
| 1102B  |     | Vinification                             |
| 1104Z  |     | Prod. aut. boisson fermentée non distil. |
| <b>Malterie (19)</b>   |     |  |
| 1106Z  |     | Fabrication de malt                      |
| <b>Cidrerie, eau de table, jus de fruits, boissons rafraîchissantes (20)</b> |     |  |
| 1032Z  |     | Préparation de jus de fruits et légumes  |
| 1103Z  |     | Fabrication de cidre & de vins de fruits |
| 1107A  |     | Industrie des eaux de table              |
| 1107B  |     | Production de boissons rafraîchissantes  |
| <b>Brasserie (21)</b>  |     |  |
| 1105Z  |     | Fabrication de bière                     |
| <b>Sidérurgie (22)</b>   |     |  |
| 2410Z  | 16  | Sidérurgie                               |
| <b>Métallurgie du cuivre (23)</b>  |     |  |
| 2444Z  | 18  | Métallurgie du cuivre                    |
| <b>Métallurgie de plomb, de zinc ou d'étain (24)</b>                         |     |  |
| 2443Z  | 18  | Métallurgie du Pb, du Zn ou du Sn        |
| <b>Métallurgie de l'aluminium (25)</b>                                       |     |  |
| 2442Z  | 18  | Métallurgie de l'aluminium               |
| <b>Métallurgie des autres non ferreux (26)</b>                               |     |  |
| 2441Z  | 18  | Production de métaux précieux            |
| 2445Z  |     | Métallurgie autres métaux non ferreux    |
| <b>Extraction de calcaire industriel (27)</b>                                |     |  |
|  | 19  |  |



| Segment  | NCE       | Activité                                 |
|--|-----------|--|
| 0811Z  |           | Extr. pierre ornement. & construct. etc. |
| 0891Z  |           | Extr. minéraux chimiq. & engrais min.    |
| 0899Z  |           | Autres activités extractives n.c.a.      |
| <b>Production de sel (28)</b>                            | <b>19</b> |  |
| 0893Z  |           | Production de sel                        |
| <b>Ciment (29)</b>                                       | <b>20</b> |  |
| 2351Z  |           | Fabrication de ciment                    |
| <b>Chaux et plâtres (30)</b>                             | <b>20</b> |  |
| 2352Z  |           | Fabrication de chaux et plâtre           |
| <b>Éléments en plâtre pour la construction (31)</b>      | <b>20</b> |  |
| 2362Z  |           | Fab. élément en plâtre pour la construc. |
| <b>Extraction de pierres, d'ardoises, de sable (32)</b>  | <b>21</b> |  |
| 0812Z  |           | Exploit. gravière & sabl., extr. argile  |
| <b>Ouvrages en béton (33)</b>                            | <b>21</b> |  |
| 2361Z  |           | Fab. élément en béton pour la construct. |
| 2363Z  |           | Fabrication de béton prêt à l'emploi     |
| 2369Z  |           | Fab. aut. ouvrage béton, ciment, plâtre  |
| <b>Mortiers, fibre-ciment, travail de la pierre (34)</b> | <b>21</b> |  |
| 2364Z  |           | Fabrication de mortiers et bétons secs   |
| 2365Z  |           | Fabrication d'ouvrages en fibre-ciment   |
| 2370Z  |           | Taille, façonnage & finissage de pierres |
| <b>Tuiles et briques en terre cuite (35)</b>             | <b>21</b> |  |
| 2332Z  |           | Fab. produit construct. en terre cuite   |
| <b>Produits réfractaires (36)</b>                        | <b>21</b> |  |
| 2320Z  |           | Fabrication de produits réfractaires     |
| <b>Produits en céramiques (37)</b>                       | <b>21</b> |  |
| 2331Z  |           | Fabrication de carreaux en céramique     |
| 2341Z  |           | Fab. art. céramiq. usage domest. & déco. |
| 2342Z  |           | Fab. appareil sanitaire en céramique     |
| 2343Z  |           | Fab. isolateur & pièce isolante céramiq. |
| 2344Z  |           | Fab. aut. prod. céram. à usage technique |
| 2349Z  |           | Fabrication d'autres produits céramiques |
| <b>Abrasifs (38)</b>                                     | <b>21</b> |  |
| 2391Z  |           | Fabrication de produits abrasifs         |
| <b>Produits minéraux non métalliques (39)</b>            | <b>21</b> |  |
| 2399Z  |           | Fab. aut. prod. minéraux non métal. nca. |
| <b>Fabrication de verre plat (40)</b>                    | <b>22</b> |  |
| 2311Z  |           | Fabrication de verre plat                |
| <b>Façonnage et transformation du verre plat (41)</b>    | <b>22</b> |  |

| Segment  | NCE       | Activité                                 |
|--|-----------|--|
| 2312Z  |           | Façonnage & transformation du verre plat |
| <b>Verre creux (42)</b>                                  | <b>22</b> |  |
| 2313Z  |           | Fabrication de verre creux               |
| <b>Verre technique et fibres de verre (43)</b>           | <b>22</b> |  |
| 2314Z  |           | Fabrication de fibres de verre           |
| 2319Z  |           | Fab. & façonnage aut. article en verre   |
| <b>Engrais (44)</b>                                      | <b>23</b> |  |
| 2015Z  |           | Fabric. de produits azotés et d'engrais  |
| <b>Gaz industriels (45)</b>                              | <b>24</b> |  |
| 2011Z  |           | Fabrication de gaz industriels           |
| <b>Autres produits de la chimie minérale (46)</b>        | <b>24</b> |  |
| 2013B  |           | Fab. aut. prod. chim. inorg. base n.c.a. |
| <b>Matières plastiques de base (47)</b>                  | <b>25</b> |  |
| 2016Z  |           | Fabric. de matières plastiques de base   |
| <b>Caoutchouc synthétique (48)</b>                       | <b>25</b> |  |
| 2017Z  |           | Fabrication de caoutchouc synthétique    |
| <b>Textiles artificiels et synthétiques (49)</b>         | <b>25</b> |  |
| 2060Z  |           | Fab. fibre artificielle ou synthétique   |
| <b>Colorants et pigments (50)</b>                        | <b>26</b> |  |
| 2012Z  |           | Fabrication de colorants et de pigments  |
| <b>Produits agrochimiques (51)</b>                       | <b>26</b> |  |
| 2020Z  |           | Fab. pesticide & aut. prod. agrochimique |
| <b>Produits pharmaceutiques de base (52)</b>             | <b>26</b> |  |
| 2110Z  |           | Fab. de produits pharmaceutiques de base |
| <b>Produits chimiques à usage industriel (53)</b>        | <b>26</b> |  |
| 2059Z  |           | Fabric. autres produits chimiques n.c.a. |
| <b>Autres produits chimiques organiques de base (54)</b> | <b>26</b> |  |
| 2014Z  |           | Fab. aut. prod. chimique org. de base    |
| <b>Savons, détergents et produits d'entretien (55)</b>   | <b>28</b> |  |
| 2041Z  |           | Fab. savon, détergent & prod. entretien  |
| <b>Peintures et vernis (56)</b>                          |           |  |
| 2030Z  |           | Fab. de peinture, vernis, encre & mastic |
| <b>Fabrication de préparations pharmaceutiques (57)</b>  |           |  |
| 2120Z  |           | Fabric. de préparations pharmaceutiques  |
| <b>Parfums (58)</b>                                      |           |  |
| 2042Z  |           | Fab. parfum & produit pour la toilette   |
| <b>Produits explosifs (59)</b>                           |           |  |
| 2051Z  |           | Fabrication de produits explosifs        |
| <b>Colles (60)</b>                                       |           |  |



| Segment   | NCE       | Activité   |
|---|-----------|--|
| 2052Z   |           | Fabrication de colles                                |
| <b>Huiles essentielles (61)</b>   |           |  |
| 2053Z   |           | Fabrication d'huiles essentielles                    |
| <b>Tubes en acier (62)</b>  |           |  |
|   | <b>29</b> |  |
| 2420Z   |           | Fab. tube, profilé creux etc. en acier               |
| <b>Étirage et profilage à froid (63)</b>  |           |  |
| 2431Z   |           | Étirage à froid de barres                            |
| 2433Z   |           | Profilage à froid par formage ou pliage              |
| <b>Laminage et tréfilage à froid (64)</b>   |           |  |
| 2432Z   |           | Laminage à froid de feuillards                       |
| 2434Z   |           | Tréfilage à froid                                    |
| <b>Fonderie de fonte et d'acier (65)</b>  |           |  |
| 2451Z   |           | Fonderie de fonte                                    |
| 2452Z   |           | Fonderie d'acier                                     |
| <b>Fonderie de métaux légers et non ferreux (66)</b>                              |           |  |
| 2453Z   |           | Fonderie de métaux légers                            |
| 2454Z   |           | Fonderie d'autres métaux non ferreux                 |
| <b>Découpage, emboutissage (67)</b>   |           |  |
| 2550B   |           | Découpage, emboutissage                              |
| <b>Radiateurs et chaudières (68)</b>  |           |  |
| 2521Z   |           | Fab. radiat. & chaudière pr chauff. central          |
| <b>Traitement et revêtement des métaux (69)</b>                                   |           |  |
| 2561Z   |           | Traitement et revêtement des métaux                  |
| <b>Forge, estampage, matriçage, métallurgie des poudres (70)</b>                  |           |  |
| 2550A   |           | Forge, estampage, matriçage, métallurgie des poudres |
| <b>Décolletage (71)</b>   |           |  |
| 2562A   |           | Décolletage  |
| <b>Fabrication des produits métalliques (72)</b>                                  |           |  |
| 2571Z   |           | Fabrication de coutellerie                           |
| 2572Z   |           | Fabrication de serrures et de ferrures               |
| 2573B   |           | Fabrication d'autres outillages                      |
| 2591Z   |           | Fab. fût & emballage métalliq. similaire             |
| 2592Z   |           | Fabric. d'emballages métalliques légers              |
| 2593Z   |           | Fab. art. fil métal., chaîne & ressort               |
| 2594Z   |           | Fabrication de vis et de boulons                     |
| 2599A   |           | Fabric. d'articles métalliques ménagers              |
| 2599B   |           | Fabric. d'autres articles métalliques                |
| <b>Fabrication de structures métalliques, de portes et fenêtres en métal (73)</b> |           |  |
| 2511Z   |           | Fab. structure métal. & partie structure             |
| 2512Z   |           | Fabric. de portes et fenêtres en métal               |

| Segment   | NCE | Activité                                   |
|---|-----|--|
| <b>Mécanique industrielle (74)</b>  |     |  |
| 2562B   |     | Mécanique industrielle                     |
| <b>Machines agricoles et machines outils (75)</b>   |     |  |
| 2830Z   | 30  | Fab. machines agricoles et forestières     |
| 2841Z   |     | Fab. de machines de formage des métaux     |
| 2849Z   |     | Fabrication d'autres machines-outils       |
| <b>Robinetterie (76)</b>  |     |  |
| 2812Z   |     | Fab. équipement hydraulique & pneumatique  |
| 2813Z   |     | Fabric. d'autres pompes et compresseurs    |
| 2814Z   |     | Fabric. autres articles de robinetterie    |
| <b>Réservoirs, générateurs de vapeur, chaudronnerie nucléaire, tuyauterie (77)</b>  |     |  |
| 2529Z   |     | Fab. aut. réservoir, citerne, etc. métal.  |
| 2530Z   |     | Fab. générat. vapeur sf pr chauff. central |
| <b>Fours, brûleurs, équipements aérauliques et frigorifiques, emballage, conditionnement et autres machines d'usage spécifique (78)</b> |     |  |
| 2821Z   |     | Fabrication de fours et brûleurs           |
| 2822Z   |     | Fab. matériel de lavage & de manutention   |
| 2824Z   |     | Fab. Outillage portatif à moteur incorp.   |
| 2825Z   |     | Fab. éqipt aérauliq. & frigorifiq. ind.    |
| 2829A   |     | Fab. éqpt emballage condition. & pesage    |
| 2829B   |     | Fab. d'autres machines d'usage général     |
| 2573A   |     | Fabrication de moules et modèles           |
| 2891Z   |     | Fabric. de machines pour la métallurgie    |
| 2892Z   |     | Fab. machine pour extraction ou constr.    |
| 2893Z   |     | Fab. machine pour l'indus. agro-aliment.   |
| 2894Z   |     | Fab. machine pour industries textiles      |
| 2895Z   |     | Fab. machine pr indus. papier & carton     |
| 2896Z   |     | Fab. machine pr trav. du caoutch, plast.   |
| 2899A   |     | Fabrication de machines d'imprimerie       |
| 2899B   |     | Fabric. d'autres machines spécialisées     |
| 3312Z   |     | Répar. machine & équipement mécaniques     |
| <b>Instruments scientifiques et de contrôle industriel (79)</b>   |     |  |
| 2651B   |     | Fab. instrumentation scientif. & tech.     |
| 3320C   |     | Instal. éqpts ctrlé des processus indus.   |
| <b>Matériels d'optique et de photographie, horlogerie et supports magnétiques (80)</b>  |     |  |
| 2652Z   |     | Horlogerie                                 |
| 2670Z   |     | Fab. matériel optique et photographique    |
| 2680Z   |     | Fab. de supports magnétiques et optiques   |
| <b>Roulements (81)</b>  |     |  |
| 2815Z   |     | Fab. engrenage & organe méca. transmis.    |



| Segment  | NCE       | Activité  |
|--|-----------|---|
| <b>Appareils domestiques (82)</b>  | <b>31</b> |   |
| 2751Z  |           | Fabrication d'appareils électroménagers             |
| 2752Z  |           | Fab. appareils ménagers non électriques             |
| <b>Machines de bureau et informatique (83)</b>                               |           |   |
| 2611Z  |           | Fabrication de composants électroniques             |
| 2612Z  |           | Fab. de cartes électroniques assemblées             |
| 2620Z  |           | Fab. ordinateur & équipement périphériq.            |
| 2640Z  |           | Fab. produit électronique grand public              |
| 2823Z  |           | Fab. machine équipt bureau (sf ordinat.)            |
| <b>Moteurs, génératrices et transformateurs électriques (84)</b>             |           |   |
| 2711Z  |           | Fab. moteur génér. transfo. & mat. élec.            |
| 3314Z  |           | Réparation d'équipements électriques                |
| <b>Matériels électriques (85)</b>  |           |   |
| 2712Z  |           | Fab. mat. de distrib. & de cde électri.             |
| 2720Z  |           | Fabric. pile & accumulateur électrique              |
| 2733Z  |           | Fabric. matériel installation électrique            |
| 2740Z  |           | Fabric. appareils d'éclairage électrique            |
| 2790Z  |           | Fabric. d'autres matériels électriques              |
| 2931Z  |           | Fab. équipt électriq. & électron. auto.             |
| <b>Fils et câbles isolés (86)</b>  |           |   |
| 2731Z  |           | Fabrication de câbles de fibres optiques            |
| 2732Z  |           | Fab. aut. fil & câble éltron. ou éltriq.            |
| <b>Matériel médico-chirurgical et de radiologie (87)</b>                     |           |   |
| 2660Z  |           | <i>Fab. éqpt irradi. médic. &amp; électromedic.</i> |
| 3250A  |           | Fab. matériel médico-chirurg. & dentaire            |
| <b>Fabrication d'équipements de communication (88)</b>                       |           |   |
| 2630Z  |           | Fabric. d'équipements de communication              |
| <b>Véhicules automobiles (89)</b>  |           |   |
|  | <b>32</b> |   |
| 2910Z  |           | Construction de véhicules automobiles               |
| <b>Carrosseries et remorques (90)</b>  |           |   |
| 2920Z  |           | Fabrication de carrosseries et remorques            |
| <b>Matériel ferroviaire roulant (91)</b>                                     |           |   |
| 3020Z  |           | Const. loco. & autre mat. ferro. roulant            |
| 3317Z  |           | Répar. & maint. d'aut. équipt transport             |
| <b>Motocycles et bicyclettes, véhicules divers (92)</b>                      |           |   |
| 3091Z  |           | Fabrication de motocycles                           |
| 3092Z  |           | Fab. bicyclette & véhic. pour invalides             |
| 3099Z  |           | Fab. aut. équipement de transport n.c.a.            |
| <b>Fabrication de moteurs &amp; turbines sauf avion &amp; véhicules (93)</b> |           |   |
| 2811Z  |           | Fab. moteur & turb. sf pr avion & véhic.            |
| <b>Fabrication d'autres équipements automobiles (94)</b>                     |           |   |

| Segment  | NCE       | Activité                                 |
|--|-----------|--|
| 2932Z  |           | Fabric. d'autres équipements automobiles |
| <b>Équipements d'aide à la navigation (95)</b>         | <b>33</b> |  |
| 2651A  |           | Fab. équipement d'aide à la navigation   |
| <b>Construction navale (96)</b>                        |           |  |
| 3011Z  |           | Construct. navires & structure flottante |
| 3012Z  |           | Construction de bateaux de plaisance     |
| 3315Z  |           | Réparation et maintenance navale         |
| <b>Construction aéronautique et spatiale (97)</b>      |           |  |
| 3030Z  |           | Construction aéronautique et spatiale    |
| 3316Z  |           | Répar. & maint. aéronef & eng. spatiaux  |
| <b>Armement (98)</b>                                   |           |  |
| 2540Z  |           | Fabrication d'armes et de munitions      |
| 3040Z  |           | Constr. véhicules militaires de combat   |
| <b>Préparation de fibres textiles et filature (99)</b> | <b>34</b> |  |
| 1310Z  |           | Prépa. de fibres textiles et filature    |
| <b>Tissage (100)</b>                                   |           |  |
| 1320Z  |           | Tissage                                  |
| <b>Ennoblement textile (101)</b>                       |           |  |
| 1330Z  |           | Ennoblement textile                      |
| <b>Articles textiles sauf habillement (102)</b>        |           |  |
| 1392Z  |           | Fab. d'article textile, sauf habillement |
| <b>Autres industries textiles (103)</b>                |           |  |
| 1393Z  |           | Fabrication de tapis et moquettes        |
| 1394Z  |           | Fabric. de ficelles, cordes et filets    |
| 1395Z  |           | Fabric. de non-tissés, sauf habillement  |
| 1396Z  |           | Fab. autre textile techniq. & industriel |
| 1399Z  |           | Fabrication d'autres textiles n.c.a.     |
| <b>Étoffes et articles à maille (104)</b>              |           |  |
| 1391Z  |           | Fabrication d'étoffes à mailles          |
| 1431Z  |           | Fabric. d'articles chaussants à mailles  |
| 1439Z  |           | Fabrication d'autres articles à mailles  |
| <b>Habillement et fourrures (105)</b>                  |           |  |
| 1411Z  |           | Fabrication de vêtements en cuir         |
| 1412Z  |           | Fabrication de vêtements de travail      |
| 1413Z  |           | Fabrication de vêtements de dessus       |
| 1414Z  |           | Fabrication de vêtements de dessous      |
| 1419Z  |           | Fabric. autres vêtements et accessoires  |
| 1420Z  |           | Fabric. d'articles en fourrures          |
| <b>Apprêt et tannage des cuirs (106)</b>               |           |  |
| 1511Z  |           | Prépa. cuirs; prép. & teinture fourrures |
| <b>Maroquinerie et chaussures (107)</b>                |           |  |



| Segment  | NCE       | Activité                                 |
|--|-----------|--|
| 1512Z  |           | Fab. art. voyage, maroquin., & sellerie  |
| 1520Z  |           | Fabrication de chaussures                |
| <b>Pâte à papier (108)</b>   | <b>35</b> |  |
| 1711Z  |           | Fabrication de pâte à papier             |
| <b>Papier et carton (109)</b>  |           |  |
| 1712Z  |           | Fabrication de papier et de carton       |
| <b>Carton ondulé (110)</b>   |           |  |
| 1721A  |           | Fabrication de carton ondulé             |
| <b>Cartonnages (111)</b>   |           |  |
| 1721B  |           | Fabrication de cartonnages               |
| <b>Emballages, papiers peints et autres articles en papier ou carton (112)</b>                             |           |  |
| 1721C  |           | Fabrication d'emballages en papier       |
| 1724Z  |           | Fabrication de papiers peints            |
| 1729Z  |           | Fab. aut. article en papier ou en carton |
| <b>Articles sanitaires (113)</b>   |           |  |
| 1722Z  |           | Fab. article papier sanit. ou domestique |
| <b>Articles de papeterie (114)</b>   |           |  |
| 1723Z  |           | Fabrication d'articles de papeterie      |
| <b>Pneumatiques (115)</b>  | <b>36</b> |  |
| 2211Z  |           | Fabrication et rechapage de pneumatiques |
| <b>Autres articles en caoutchouc (116)</b>   | <b>36</b> |  |
| 2219Z  |           | Fabric. d'autres articles en caoutchouc  |
| <b>Plaques, feuilles, tubes et profilés (117)</b>  | <b>37</b> |  |
| 2221Z  |           | Fab. plaque, feuille, tube, etc. plast.  |
| <b>Emballages (118)</b>  |           |  |
| 2222Z  |           | Fab. d'emballage en matière plastique    |
| <b>Éléments pour la construction (119)</b>   |           |  |
| 2223Z  |           | Fab. élément mat. plastiq. pr construct. |
| <b>Autres articles (120)</b>   |           |  |
| 2229B  |           | Fab. prod. conso. courante en plastique  |
| <b>Pièces techniques (121)</b>   |           |  |
| 2229A  |           | Fab. pièce techniq. base mat. plastiq.   |
| <b>Réparation d'ouvrages en métaux, de matériel électronique &amp; optique et autres équipements (122)</b> | <b>38</b> |  |
| 3311Z  |           | Réparation d'ouvrages en métaux          |
| 3313Z  |           | Répar. matériel électronique & optique   |
| 3319Z  |           | Répar. d'autres équipements              |
| <b>Installation d'équipements électriques et à structure métallique (123)</b>                              |           |  |
| 3320D  |           | Inst. éqpt élec. électro. optiq. ou aut. |
| 3320A  |           | Instal. struct. métal., chaudi. & tuyau. |



| Segment  | NCE | Activité                                 |
|--|-----|--|
| <b>Sciage (124)</b>  |     |  |
| 1610A  |     | Sciage & rabotage bois, sf imprégnation  |
| 1622Z  |     | Fabrication de parquets assemblés        |
| <b>Panneaux de bois (125)</b>  |     |  |
| 1621Z  |     | Fabric. placage et panneaux de bois      |
| <b>Charpentes, emballages, divers en bois (126)</b>                            |     |  |
| 1623Z  |     | Fab. charpentes et autres menuiseries    |
| 1624Z  |     | Fabrication d'emballages en bois         |
| 1629Z  |     | Fab. objet div. bois, liège, vann., etc. |
| <b>Edition, imprimerie, reproduction (127)</b>                                 |     |  |
| 1811Z  |     | Imprimerie de journaux                   |
| 1812Z  |     | Autre imprimerie (labeur)                |
| 1813Z  |     | Activités de pré-presse                  |
| 1814Z  |     | Reliure et activités connexes            |
| 1820Z  |     | Reproduction d'enregistrements           |
| <b>Meubles (128)</b>   |     |  |
| 3101Z  |     | Fab. de meubles de bureau et de magasin  |
| 3102Z  |     | Fabrication de meubles de cuisine        |
| 3103Z  |     | Fabrication de matelas                   |
| 3109A  |     | Fabric. sièges d'ameublement d'intérieur |
| 3109B  |     | Fab. aut. meub. & ind. connexe ameublmt  |
| <b>Fabrication de lunettes (129)</b>   |     |  |
| 3250B  |     | Fabrication de lunettes                  |
| <b>Bijoux, instruments de musique, articles de sport, jeux et jouets (130)</b> |     |  |
| 3211Z  |     | Frappe de monnaie                        |
| 3212Z  |     | Fab. article de joaillerie et bijouterie |
| 3213Z  |     | Fab. art. bijout. fantaisie & similaire  |
| 3220Z  |     | Fabrication d'instruments de musique     |
| 3230Z  |     | Fabrication d'articles de sport          |
| 3240Z  |     | Fabrication de jeux et jouets            |
| 3291Z  |     | Fabrication d'articles de broserie       |
| 3299Z  |     | Autres activités manufacturières n.c.a.  |
| <b>Récupération (131)</b>  |     | <b>38</b>                                |
| 3831Z  |     | Démantèlement d'épaves                   |
| 3832Z  |     | Récupération de déchets triés            |



## LE CEREN EN BREF

Créé en 1958, le CEREN (Centre d'études et de recherche économiques sur l'énergie) est un observatoire statistique dont l'objectif est de connaître et de suivre les évolutions des consommations de l'énergie en France.

Une de ses missions consiste à mieux comprendre les flux et les usages de l'énergie dans l'industrie. Pour remplir cette mission, le CEREN s'appuie sur un réseau d'ingénieurs enquêteurs qui analysent en détail les consommations de 700 industriels chaque année, lors de visites sur site. Les informations recueillies sont complétées par les enquêtes EACEI (Enquêtes Annuelles sur les Consommations d'Énergie dans l'Industrie) de l'INSEE.

Le Ceren a ainsi construit une base solide sur les consommations d'énergie de plus de 30 000 sites industriels. Les 7 000 plus gros consommateurs y sont caractérisés de façon plus fine : sont notamment renseignés les flux et usages par opération et par forme d'énergie, ainsi que les caractéristiques techniques des équipements.

Plus d'information sur :

<https://www.ceren.fr/>

## L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources. Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse. Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, gaspillage alimentaire, déchets, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

<https://www.ademe.fr/>

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### ILS L'ONT FAIT

*L'ADEME catalyseur* : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

*L'ADEME expert* : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous un regard.



#### FAITS ET CHIFFRES

*L'ADEME référent* : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

*L'ADEME facilitateur* : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation



#### HORIZONS

*L'ADEME tournée vers l'avenir* : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



# PREMIÈRE ANALYSE DU POTENTIEL TECHNIQUE D'ÉLECTRIFICATION DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS THERMIQUES PAR DES TECHNOLOGIES MATURES

En dehors de toute considération économique et pour le parc d'équipements industriels estimé en 2014, 18 % de la consommation de combustibles pour les process thermiques, soit 41,6 TWh, sont substituables en recourant à des techniques électriques.

En privilégiant les techniques électriques les plus performantes actuellement, l'ensemble de ces substitutions conduirait à une consommation électrique supplémentaire de 23,9 TWh.



[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

