

# Efficacité énergétique pour l'industrie : des technologies existantes aux solutions innovantes

Laurent LEVACHER<sup>1\*</sup>, Denis CLODIC<sup>2\*\*</sup>, François MARECHAL<sup>3\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> EDF-R&D-ECLEER (European Center Laboratories for Energy Efficiency Research)

1 avenue des Renardières, Ecuelles - 77 818 Morêt sur Loing

<sup>2</sup>Mines de Paris-Centre Energétique et Procédés

60, boulevard Saint-Michel - 75 272 Paris Cedex 06

<sup>3</sup>EPFL-STI-ISE-LENI (Laboratoire d'Energétique Industrielle)

ME A2 402 - Station 9 - 1015 Lausanne – SUISSE

\* [laurent.levacher@edf.fr](mailto:laurent.levacher@edf.fr)

\*\* [denis.clodic@ensmp.fr](mailto:denis.clodic@ensmp.fr)

\*\*\* [francois.marechal@edfl.ch](mailto:francois.marechal@edfl.ch)

**Résumé** - Face aux inévitables tensions sur les ressources pétrolières et fossiles, avec une raréfaction progressive des ressources fossiles et des contraintes sur les émissions de CO<sub>2</sub> qui ne peuvent que se renforcer, les grands industriels ainsi que les PME-PMI doivent poursuivre les efforts en matière d'efficacité énergétique. Le potentiel d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, se fera tant par une meilleure gestion de l'énergie, l'implantation de nouveaux usages à haute performance énergétique utilisant des énergies à faible contenu en carbone, que par des re-conceptions de procédés, et la récupération et valorisation de chaleur aujourd'hui perdue.

## 1. Nouveaux enjeux, nouveaux défis de recherche

Après les deux premiers chocs pétroliers de 1973 et 1982, le monde s'était ré-accoutumé à une énergie peu chère, souvent gaspillée et non suffisamment valorisée. Son renchérissement récent, la prise de conscience de sa raréfaction inéluctable et l'impact climatique pointent à nouveau le besoin de la maîtrise de la consommation d'énergie. La prise de conscience est quasi planétaire, traduite par des accords internationaux (protocoles Kyoto et Montréal), des actes politiques (livres blancs, débats parlementaires) et des lois et réglementations.

L'Europe a une position particulièrement pro-active dans le monde et s'est notamment dotée de normes et de directives pour encourager un accroissement de l'efficacité énergétique dans les états membres (Directives : 2006 Efficacité Energétique et Services, 2003 performance énergétique des bâtiments, 2003 permis d'émission négociables). La majorité des états membres a d'ailleurs transcrit cette volonté en lois nationales.

L'industrie, parce que sa motivation est avant tout économique, a été le « bon élève » en matière d'efficacité énergétique et d'importants résultats ont été engrangés durant les trente dernières années. Cependant il subsiste des potentiels d'efficacité énergétique très significatifs dans ce secteur consommant 1/3 de l'énergie en Europe. En effet, si l'intensité énergétique dans l'industrie a décru de 2 à 3 % par an avant 1990, elle est revenue ensuite à une décroissance plus modérée de 1 % par an. Le potentiel d'économie d'énergie avec les meilleures technologies existantes (Best Available Technologies) c'est-à-dire hors ruptures technologiques, est évalué en Europe à 15 à 20 % de la consommation de l'industrie.

L'évolution du contexte et la volonté d'accéder à des gisements plus étendus d'économie d'énergie nécessitent de reprendre l'ensemble des acquis et de développer des analyses plus ambitieuses notamment du point de vue de ses frontières d'analyse. Cette nouvelle approche analyse les procédés de transformation en partant des matières premières (ou de semi-

produits) jusqu'aux produits finaux en prenant en compte non seulement les produits eux-mêmes mais les co-produits, les déchets, les effluents gazeux et liquides pour tous secteurs.

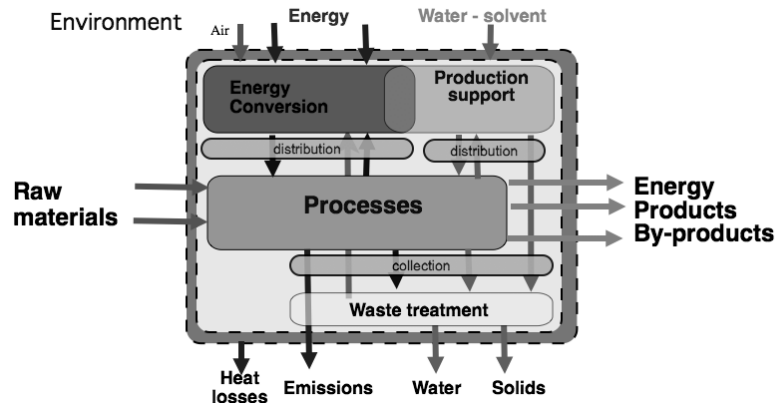


Figure 1 : Représentation systémique d'un procédé de production

La vision systémique d'un site de production présentée à la figure 1 définit le système concerné par l'efficacité énergétique. Dans ce système, le ou les procédés transforment la matière première en produits et sous-produits valorisables. Cette transformation est réalisée à l'aide de supports de production différents en fonction du secteur. Le moteur de la transformation est l'énergie. Pour ce faire, il est nécessaire de convertir l'énergie achetée et de la distribuer sous la forme la plus adéquate pour satisfaire les besoins du procédé. La transformation des matières premières en produits et sous-produits n'étant pas parfaite, le procédé produit des déchets ensuite traités et/ou recyclés et de l'énergie dégradée.

Les analyses énergétique et exergetique intègrent l'ensemble des composantes des processus de transformation. La démarche doit s'effectuer au niveau de détail nécessaire pour mettre en perspective le procédé étudié vis-à-vis de procédés concurrents et intégrer la limitation des émissions de polluants de toute nature. Le champ d'analyse est celui de la transformation des matériaux pour aboutir à un produit final, l'optimisation énergétique porte sur le meilleur chemin de transformation accessible [1].

## 2. Les gisements d'économies d'énergies selon les secteurs d'activité

Les sources principales d'économie aujourd'hui identifiées portent d'une part sur la gestion des utilités, c'est-à-dire la vapeur, le froid, l'air comprimé ou le conditionnement d'ambiance des locaux, et d'autre part sur la gestion technique centralisée de l'énergie, c'est-à-dire l'optimisation globale de la consommation énergétique [2].

Les procédés industriels recèlent eux-même des gisements d'efficacité énergétique très élevés parfois mal estimés. Des gains unitaires vont de 20 à 90 %, (gains importants dans l'exemple de l'utilisation des membranes ou de sècheurs performants). Le choix d'une technologie lors d'un investissement sera dicté par différents facteurs techniques et économiques, dont l'efficacité énergétique mais après la qualité, la productivité et la flexibilité. L'emploi de techniques électriques performantes [3] conduit bien souvent à un coût d'investissement supérieur, mais contribue, non seulement à une efficacité énergétique améliorée, mais aussi à plus de compacité, de précision, de fiabilité et de rapidité du procédé d'où une meilleure maîtrise de la qualité et un accroissement de la productivité.

L'analyse technico-économique des gisements d'économies d'énergie dans l'industrie (base France) permet de dégager, dans la complexité et la diversité des procédés industriels, les grandes cibles techniques de l'efficacité énergétique : production de chaleur (chaudières,

34 % des consommations et 14 % des gisements), usages thermiques (fours et séchage, 28 % conso. et 31 % gisements), et conditionnement d'ambiance des locaux (seulement 8 % des consommations mais 13 % des gisements). La récupération de chaleur fatale avec les technologies classiques sur les chaudières et le froid représente déjà 26 % des gisements [4].

### **3. Méthodes et outils de modélisation pour le management de l'énergie**

#### **3.1. La dimension « produit » et énergie minimale requise (EMR)**

Dans la mesure où l'objectif final est la réduction du coût énergétique mais également la diminution des externalités environnementales de l'ensemble du système allant de la matière première énergétique au produit final, au sein desquelles les émissions de CO<sub>2</sub> occupent une large place, des approches de type analyse du cycle de vie des produits doivent être intégrées aux méthodes développées pour l'analyse des transformations de procédés industriels.

Il s'agit cependant d'un changement des frontières usuelles des analyses énergétique et exergetique. Ce changement amène à de nombreux développements et impose souvent une approche multidisciplinaire, en particulier lorsqu'il s'agit d'intégrer le développement d'un nouveau produit ou d'une nouvelle technologie dans un système qui concerne tant les aspects contrats et choix de fournisseurs que traitement ou valorisation des déchets et conversion optimale de l'énergie. Prenons l'exemple de la valorisation thermique des effluents liquides : de nombreux effluents sont liés à des opérations de lavage et/ou de rinçage qui emportent de manière diluée un certain nombre de produits dont la toxicité ou l'impact devient acceptable du fait de la dilution, mais qui utilise généralement des quantités extraordinairement élevées d'eau, ces eaux de lavage ayant souvent des potentiels énergétiques non négligeables.

L'intérêt de centrer l'analyse sur le produit, et non pas simplement sur un procédé particulier, est d'intégrer dans les frontières de l'analyse l'ensemble des procédés disponibles pour réaliser un produit donné. Dans certains cas, lorsqu'un produit doit changer de phase (solidification, fusion, vaporisation, condensation, etc.) l'énergie minimale requise (EMR) [5] de la transformation est relativement facile à quantifier. Dans d'autres cas, il est beaucoup plus difficile de quantifier l'EMR, par exemple, pour sécher un produit où les opérations mécaniques de pressage et de centrifugation évitent le changement de phase et donc modifient radicalement le bilan énergétique. Dans tous les cas, analyser et comparer les procédés en visant à définir l'EMR pour la transformation constitue un fil rouge qui va permettre d'établir la référence idéale de consommation énergétique pour réaliser un produit donné. La méthode utilisant l'EMR est aussi un extraordinaire traceur d'innovations puisque, si une nouvelle transformation à très bas coût énergétique est possible, elle pourra alors changer la référence de l'énergie minimale de transformation. Ce concept est à la fois une heuristique et un résultat.

#### **3.2. L'Audit Energétique et Exergetique de Procédés (AEEP)**

L'analyse des procédés de transformation passe par la collecte des mesures, la définition d'indicateurs de performance et l'évaluation des performances du ou des procédés. Cette analyse sert ensuite de base pour identifier les pistes d'amélioration des procédés, des potentiels d'efficacité et des goulots dans les procédés. Ce qui permet ensuite d'établir tant des mesures de « targeting-monitoring » pour l'opération et le suivi de performance des procédés que des mesures de rénovation et/ou d'intégration de nouvelles technologies.

Il est alors nécessaire de développer des méthodologies afin de réaliser l'audit des procédés qui viseront à définir l'état du procédé puis définir les potentiels d'amélioration. Ceux-ci concernent tant l'optimisation des performances du procédé existant que de sa rénovation

et/ou l'intégration de nouvelles technologies. Pour les procédés de transformation, compte tenu de leur extrême variété, les descriptions approfondies de procédés basées sur des mesures et analyses sur le terrain constituent une composante essentielle de la méthodologie : ce sont les audits énergétiques et exergétiques de procédés (AEEP) [5]. La méthodologie diffère des audits énergétiques usuels dont la frontière d'analyse se limite trop souvent aux utilités et considère le procédé comme hors de portée de l'audit. Ils ne remettent pas en question la séparation utilités et procédés et visent à l'optimisation locale de chaque sous-système [6]. Les gisements d'économies d'énergies identifiés, portent alors sur le développement d'utilités à haute efficacité énergétique avec une bonne gestion des réseaux de vapeur, d'eau glacée, d'air comprimé et d'électricité.

#### **4. Technologies de chauffage à haute performance énergétique**

70 % de l'énergie est utilisée dans l'industrie en France à des fins de chauffage, essentiellement pour la fabrication des produits, marginalement pour les locaux industriels. Il convient donc d'améliorer les usages de la chaleur.

Dans le domaine du chauffage, de la fusion et des traitements thermiques, des progrès significatifs ont été réalisés sur les brûleurs, en particulier grâce aux brûleurs régénératifs. De plus, de nouvelles options techniques avec des objectifs très différents voient le jour : oxy-combustion et combustion sans flamme. Ces technologies présentent des avantages et des désavantages extrêmement contrastés, mais permettent de limiter drastiquement la production de certains polluants et/ou d'accéder à de très hautes efficacités de restitution thermique.

L'induction est la meilleure technologie disponible de chauffage de solides en IAA et en métallurgie (traitement thermique des métaux et fusion). Précis et de bon rendement, l'induction est utilisable soit pour chauffer directement des métaux, soit pour chauffer des fluides dans une cuve grâce aux avantages suivants :

- La chaleur est générée au sein même du matériau à chauffer, d'où une minimisation drastiques des pertes énergétiques dues aux transferts.
- L'inertie thermique est très faible et la densité de puissance élevée (jusqu'à  $4 \text{ MW/m}^2$ ),
- La modulation de la puissance, la reproductibilité des cycles de traitement et l'automatisation sont aisées et apportent une grande flexibilité.
- Les pertes de matière sur le produit par oxydation sont réduites, gains de productivité.

Surtout, le chauffage par induction a un rendement énergétique élevé par rapport au chauffage à flamme ou à la vapeur, il peut diviser par 2 la consommation en énergie finale. Son utilisation en «Stop and Go» (pas de préchauffage, ni de mise en veille) permet aussi l'obtention de gains énergétiques substantiels [7].

Selon l'application, le chauffage par induction est en concurrence avec le chauffage à flamme (fours oxygaz ou gaz) ou le chauffage par résistances. La pénétration de l'induction dans l'industrie comme mode de chauffage performant n'en est qu'à ses débuts, même si elle est déjà implantée en fonderie, dans les premières transformations de l'acier en mécanique, en production automobile, et, plus marginalement en parachimie et IAA. En France, le potentiel d'économies d'énergie grâce à l'induction sur ses marchés actuels est de l'ordre d'une douzaine de TWh, évitant l'émission de plusieurs millions de tonnes de  $\text{CO}_2$  [8]

Cette technique électrothermique recèle encore des possibilités importantes de progrès technologique. Ainsi le concept « d'inducteur universel », développement de couples générateurs / inducteurs permettant une plus grande adaptabilité à la charge, rend les

équipements beaucoup plus génériques, donc moins chers et aptes à de nouvelles applications. Cette rupture technologique pourrait entrer sur le marché entre 2010 et 2015, et, à terme, doubler le marché de l'induction.

## 5. Les technologies récupératrices et amplificatrices

Comme indiqué précédemment, la valorisation de chaleur fatale représente des gisements d'efficacité énormes, à condition de disposer de technologies adaptées [9]. Trois technologies de récupération de chaleur fatale doivent être améliorées :

- Echangeurs de chaleur, par exemple en investiguant les échangeurs à micro-canaux,
- Techno. Thermo. : pompe à chaleur (PAC), compression mécanique de vapeur (CMV),
- Cycles de Rankine organiques ou à basse pression de vapeur d'eau.

Les CMV et PAC présentent un potentiel de diffusion sur leurs applications actuelles en IAA et parachimie, avec des potentiels d'économie d'énergie en France de plusieurs TWh.

Dans le domaine du séchage et de la concentration, les différentes variantes de CMV offrent aussi de forts potentiels, certains pouvant d'ailleurs être couplés avec des PAC pour des étages de températures définis. Grâce à la CMV, la consommation d'énergie finale peut être diminuée d'un facteur 10 à 20, selon qu'elle est ou non implantée sur des applications déjà performantes (concentrateur multi-effets).

Les développements de cette technologie mature portent sur les nouvelles applications. La principale est la concentration des effluents, en raison des contraintes environnementales par exemple pour l'industrie mécanique. La standardisation des matériels est nécessaire pour conduire à des gains sur l'investissement sensibles (verrou principal).

Pour la PAC, au-delà de ses quelques applications actuelles, son véritable intérêt est la valorisation de chaleur en sortie de procédés. En récupérant la majeure partie de son énergie dans l'air, l'eau ou dans les fluides et rejets industriels, cette technologie est considérée comme une énergie renouvelable. Le nombre de PAC implantées dans l'industrie est encore faible.

Les effluents thermiques, liquides aussi bien que gazeux, doivent être l'objet d'une vision intégrée de valorisation énergétique et de dépollution. Les PAC méritent d'être analysées et développées [10] pour relever le niveau énergétique des effluents liquides : valorisation des chaleurs perdues dont le niveau se situe entre 30 et 35 °C vers des niveaux se situant entre 80 et 120 °C. Selon les niveaux de température des sources et des puits, les coefficients de performance (COP) atteignables varient entre 2 et 4.

Il convient de revisiter des travaux de recherche menés dans les années 80-90 et de développer des analyses sur des îlots industriels avec des stratégies de mutualisation de la gestion de la chaleur: par exemple l'installation d'une PAC sur un site aéronautique pour chauffer des locaux industriels à partir de la récupération et remontée en température de l'eau en sortie d'un four électrique.

Afin de favoriser la pénétration du marché, deux développements sont nécessaires pour élargir le gisement accessible de la récupération de chaleur dans l'industrie à ce jour évalué à plus d'une dizaine de TWh :

- le développement de fluides frigorigènes à très faible impact environnemental,

- l'augmentation du niveau de température de restitution de la chaleur ( $T > 120^{\circ}\text{C}$ ), avec de hautes performances énergétiques des installations, pour étendre le domaine d'application. Des avancées sont attendues à partir de 2010 sur ce sujet.

Enfin, il existe un lien technologique possible entre la récupération d'énergie sur les effluents gazeux et la mise en place de cycles Rankine organiques ou à basse pression de vapeur d'eau, qui sont des technologies de machines pouvant utiliser des composants de base de structure très proche de celles développées pour les PAC ou les systèmes frigorifiques.

## 6. En conclusion trois grands axes de recherches doivent être investigués

Les développements de méthodes et d'outils numériques pouvant contribuer à l'optimisation des lignes de fabrications industrielles, en allant jusqu'à envisager leur re-conception pour viser une forte intégration énergétique et en étendant ces analyses à des secteurs industriels jamais investigués par ces méthodes : analyse des flux d'énergie, re-conception de procédés prise en compte l'analyse du cycle de vie, des éléments économiques, le pilotage et contrôle,

les développements de technologies à haute performance énergétique avec une intégration énergétique ad hoc pour chaque procédé industriel comme le chauffage par induction, les fours ultra rapides, l'intégration des énergies renouvelables dans les procédés et leurs stockages, les chaînes de mesure à coût réduit,

la recherche sur la valorisation de toute calorie perdue dans l'industrie, en développant des technologies récupératrices et amplificatrices : PAC industrielle, CMV, échangeurs innovants.

### Références

- [1] Maréchal F., Muller D., "Energy management methods for the food industry", in "Handbook of water and energy management in food processing", Woodhead Publishing Ltd, 2008
- [2] IEA report, 2007, "Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions"
- [3] Bamberger Y., "Davantage d'électricité pour moins de CO<sub>2</sub>", Réalités Industrielles, nov 2008
- [4] Terrien P., 2008, "ECLEER and Energy Efficiency in Industry", Electricité de France Workshop Printemps de la Recherche, Les Renardières, June
- [5] Abou-Khalil B., Berthou M., Clodic D., "A method for energy optimization of industrial product transformation in Small and Medium-Size Enterprises". PRES 2008, Praha, Czech Rep., 2008
- [6] Linnhoff and March, 1998, Introduction to pinch technology
- [7] Baake E., "Energy efficient use of electricity in metallurgical processes", XVI int. congress on Electricity applications in a modern world, UIE'08 Krakow (Poland), May 19-21, 2008
- [8] Paya B., "Investigation on energy recovering in an induction coil for continuous through heating billet", Przegląd Elektrotechniczny (Elec. Rev.), ISSN0033-2097, R.84 NR11/2008, p.129-133
- [9] Palandre L., Clodic D., 2007, "Alternative thermodynamic Cycles for a high efficiency heat pump dryer", IIF-IIR Int Refrigeration congress, Beijing
- [10] Favrat D., 2008, "Progress and perspective in heat pumping technologies and applications". 9th International IEA Heat Pump Conference, Zurich, Switzerland

### Remerciements

Nous tenons à remercier particulièrement M. Pascal TERRIEN directeur d'ECLEER, le Professeur Daniel FAVRAT (EPFL) ainsi que les équipes EDF-R&D-EPI qui ont participé à l'élaboration de cet article.