

**SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT**  
FRANÇAIS / ENGLISH

**POTENTIEL D'AMELIORATION DE LA VALORISATION  
ENERGETIQUE DES DECHETS PAR UTILISATION DE CYCLES  
VAPEUR EN CHAUDIERES SUPERCRITIQUES  
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET ENTRETIENS D'EXPERTS**

***POTENTIAL FOR IMPROVING WASTE ENERGY RECOVERY  
BY USING STEAM CYCLES IN SUPERCRITICAL BOILERS  
BIBLIOGRAPHICAL STUDY AND EXPERT INTERVIEWS***

décembre 2019

**B. LEGROS** – Innovation Fluides Supercritiques  
**C. CHUBILLEAU** – Inovertis  
**F. PONCELET** – Panabee



Centre  
**INOVERTIS**  
*Technologie progrès*



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

**Avertissement :**

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :  
**RECORD**, Potentiel d'amélioration de la valorisation énergétique des déchets par utilisation de cycles vapeur en chaudières supercritiques. Etude bibliographique et entretiens d'experts, 2019, 65 p, n°18-0253/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

© RECORD, 2019

## **RESUME**

Les technologies supercritiques actuellement mises en œuvre dans les chaudières des centrales à charbon de grande capacité permettent d'augmenter les rendements des cycles vapeur et donc l'efficacité énergétique. La présente étude s'intéresse au potentiel de transfert de cette technologie vers des installations de traitement thermique des déchets.

Les principaux verrous bloquant ce transfert sont :

- l'augmentation des contraintes mécaniques (conditions de pression et température plus élevées) => augmentation des coûts d'investissement
- l'augmentation de la sévérité et de la diversité des phénomènes de corrosion (milieu eau supercritique / incinérateur) => augmentation des coûts de fonctionnement
- l'adaptation des équipements de conversion énergétique en particulier le dimensionnement des turbines à des installations de plus faibles capacité. => limitation technique

Le panorama mondial des centrales montre que les installations supercritiques sont toutes des installations de forte puissance constituées d'une ou plusieurs chaudières de 500 à 1 000 MW d'électricité en moyenne. L'alimentation de ces systèmes requiert donc des matières possédant un contenu énergétique élevé et un coût relativement bas pour assurer une balance économique positive. Le surcoût engendré par le recours au cycle eau supercritique n'est pas justifié par le gain d'efficacité attendu pour la gamme de puissance des installations de valorisation énergétique des déchets.

L'étude a permis d'identifier une technologie plus flexible qui pourrait être appliquée aux centrales énergétiques de faible ou moyenne capacité : Les cycles CO<sub>2</sub> supercritique. Combinant les avantages des cycles de Rankine (liquide/vapeur) et de Brayton (gaz), ils devraient permettre de réaliser des installations plus compactes et compatibles avec le captage du CO<sub>2</sub>. Cette technologie est en cours de développement.

## **MOTS CLES**

Cycles vapeur supercritique, valorisation énergétique, déchets, CO<sub>2</sub> supercritique.

---

## **SUMMARY**

Supercritical technologies currently used in boilers in large coal-fired power plants can increase steam cycle efficiencies and thus energy yields. This study focuses on the potential for the transfer of this technology to waste incinerator-type facilities.

The main technological keys limiting this transfer are:

- increase of mechanical stress (higher pressure and temperature conditions) => increase investment costs
- increase of the severity and diversity of corrosion phenomena (supercritical water environment / incinerator) => increase in operating costs
- the adaptation of energy conversion equipment, in particular the sizing of turbines for smaller capacity installations. => technical limitation

The global overview of power plants shows that supercritical installations are all high-power installations consisting of one or more boilers of 500 to 1,000 MW of electricity on average. The supply of these systems therefore requires materials with a high energy content and a relatively low cost to ensure a positive economic balance.

The additional cost generated by the implementation of supercritical cycles is not justified by the expected efficiency gain for the power range of waste-to-energy installations.

The study identified a more flexible technology that could be applied to low and medium capacity power plants: Supercritical CO<sub>2</sub> cycles. Combining the advantages of the Rankine (liquid/steam) and Brayton (gas) cycles, they should make it possible to build more compact installations that are compatible with CO<sub>2</sub> capture. This technology is under development.

## **KEY WORDS**

Supercritical steam cycles, waste energy recovery, waste, supercritical CO<sub>2</sub>

## Contexte et objectifs

L'importance de la prise en compte des enjeux environnementaux dans le développement des filières de gestion des déchets incitent à une réflexion sur l'amélioration de l'efficacité de l'incinération. Le plan de réduction et de valorisation des déchets 2014-2020 fixe d'ailleurs, pour les usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM), un objectif d'amélioration de leur efficacité énergétique en prévoyant d'une part l'arrêt d'ici 2025 des unités d'incinération sans valorisation énergétique et, d'autre part, demande à ce que 50% des unités de valorisation énergétique à trop faible rendement améliorent leur efficacité.

L'optimisation du cycle vapeur est une des solutions pointées par l'ADEME dans son étude de novembre 2016 pour améliorer l'efficacité des systèmes. En effet, alors qu'une unité conventionnelle présente un rendement thermodynamique théorique limité à environ 40%, l'utilisation de cycles dits « supercritiques » tels que mis en œuvre dans les centrales à charbon permettrait de dépasser ce seuil pour atteindre des rendements proches de 50%.

A l'heure actuelle aucune installation d'incinération de déchets ne mets en œuvre de chaudières supercritiques.

L'étude a pour objectif d'évaluer le potentiel d'émergence de la technologie cycles vapeur en chaudière supercritique dans le domaine du traitement des déchets. Elle a été conduite sur la base de recherche bibliographique (articles scientifiques, livres, rapports et sites web). Des entretiens téléphoniques ont été réalisés avec des experts de différents domaines afin d'enrichir le rapport d'éléments pratiques.

La première partie de l'étude concerne les notions théoriques liées au sujet traité et apporte les éléments permettant de répondre aux questions suivantes :

- Qu'est-ce que l'eau supercritique ?
- Quels sont les grands principes des cycles vapeurs et pourquoi les cycles supercritiques permettent-ils d'obtenir des rendements supérieurs ?
- Les matériaux actuels permettent-ils de résister à des phénomènes de corrosion associant les contraintes d'un incinérateur à celle d'une chaudière supercritique ?
- Quelles seraient les différences entre un incinérateur muni d'une chaudière à cycle supercritique par rapport à une chaudière conventionnelle ? (avantages/inconvénients)

Dans une deuxième partie un panorama technologique a été réalisé sur les installations supercritiques existantes dans le monde. L'objectif : Evaluer le développement du marché mais aussi référencer les conditions de mise en œuvre et le type d'intrant adressé. Nous le verrons, l'enjeu pour ces technologies est de répondre en premier lieu à une demande énergétique en forte croissance en particulier en Asie. L'énergie ne peut être dissociée des problématiques environnementales puisque sa production est fortement émettrice de polluants impactant entre autres le changement climatique et la santé. Nous verrons donc dans quelle mesure les installations supercritiques permettent de concilier ces deux enjeux.

La troisième partie de ce rapport apporte des éléments de discussion sur les principaux verrous technologiques identifiés ainsi que des pistes d'alternatives.

Enfin pour mettre en perspective les éléments de la littérature par rapport à la réalité du terrain, des experts ont été interviewés (experts du domaine de la corrosion, de l'énergie et responsables de services de recherches et développement). Les comptes-rendus de ces interviews ont été synthétisés par thématique et viennent enrichir et corroborer les éléments des parties précédentes.

## Context and Objectives

*The importance of taking environmental issues into account in the development of waste management systems encourages reflection on improving the efficiency of incineration. The 2014-2020 waste reduction and recovery plan also sets a target for household waste incineration plants (MWIPs) to improve their energy efficiency by shutting down incineration units without energy recovery by 2025 and requiring that 50% of inefficient energy recovery units improve their efficiency.*

*Optimization of the steam cycle is one of the solutions pointed out by ADEME in its November 2016 study to improve system efficiency. Indeed, whereas a conventional unit has a theoretical thermodynamic efficiency limited to about 40%, the use of so-called "supercritical" cycles such as those used in coal-fired power plants would allow this threshold to be exceeded to reach efficiencies close to 50%. At present, no waste incineration plants use supercritical boilers.*

*The objective of the study is to evaluate the potential for the emergence of steam cycle technology in supercritical boilers in the field of waste energetic valorization. It was conducted on the basis of bibliographic research (scientific articles, books, reports and websites). Telephone interviews were conducted with experts from different fields to enrich the report with practical elements.*

*The first part of the study concerns the theoretical notions related to the subject matter and provides the elements to answer the following questions:*

- *What is supercritical water?*
- *What are the main principles of steam cycles and why do supercritical cycles lead to higher yields?*
- *Do current materials allow to resist corrosion phenomena combining the stresses of an incinerator with those of a supercritical boiler?*
- *What would be the differences between an incinerator with a supercritical cycle boiler and a conventional boiler? (advantages/disadvantages)*

*In the second part, a technological panorama was carried out on the existing supercritical installations in the world. The objective: Evaluate market development but also reference the conditions of implementation and the type of input addressed. As we will see, the challenge for these technologies is to first meet a rapidly growing energy demand, particularly in Asia. Energy cannot be dissociated from environmental issues since its production is highly emitting pollutants that impact, among other things, climate change and health. We will therefore see to what extent supercritical installations make it possible to reconcile these two issues.*

*The third part of this report provides elements for discussion on the main technological bottlenecks identified and possible alternatives.*

*Finally, to put the elements of the literature in perspective with the reality on the ground, experts were interviewed (experts in the field of corrosion, energy and managers of research and development departments). The reports of these interviews have been summarized by theme and enrich and corroborate the elements of the previous sections.*

L'étude a pour objectif d'évaluer le potentiel d'émergence de la technologie cycles vapeur en chaudière supercritique dans ce domaine.

The objective of the study is to evaluate the potential for the emergence of steam cycle technology in supercritical boilers in this field.

## Notions préliminaires

Tout corps pur possède un point critique correspondant à une pression et une température donnée au-delà de laquelle il se trouve en phase dite "supercritique". Il présente alors un comportement intermédiaire entre l'état liquide et l'état gazeux, avec des propriétés particulières : une masse volumique élevée comme celle des liquides, un coefficient de diffusivité intermédiaire entre celui des liquides et des gaz, et une faible viscosité (comme celles des gaz). A l'état supercritique l'eau remplit l'espace comme un gaz mais possède des propriétés physico-chimiques bien différentes de son état gazeux (vapeur). Les études du comportement de l'eau supercritique ont été réalisées pour plusieurs domaines d'application : dans l'énergie pour les cycles vapeur de chaudière charbon et comme fluide caloporteur de réacteur nucléaire ou dans la gestion de déchets (destruction de déchets organiques).

## Preliminary notions

Any pure body has a critical point corresponding to a given pressure and temperature beyond which it is in the so-called "supercritical" phase. It then exhibits an intermediate behaviour between the liquid and gaseous states, with particular properties: a high density such as that of liquids, an intermediate diffusivity coefficient between that of liquids and gases, and a low viscosity (such as those of gases). In the supercritical state, water fills the space like a gas but has very different physico-chemical properties from its gaseous state (vapour).

Studies of the behaviour of supercritical water have been carried out for several fields of application: in energy for coal boiler steam cycles and as a heat transfer fluid for nuclear reactors or in waste management (destruction of organic waste).

### Les cycles vapeurs conventionnels et supercritiques

Dans les centrales thermiques, la production d'énergie électrique se fait à partir d'une source d'énergie calorifique (combustible) qui est convertie en énergie thermique, puis mécanique et enfin électrique. Le rendement de cette conversion doit être le plus élevé possible pour optimiser et rentabiliser l'installation de production énergétique. Les cycles vapeur permettent cette conversion et peuvent être optimisés de différentes manières. Les lois de la thermodynamique limitant de fait le rendement maximum atteignable. La mise en œuvre de ces cycles théoriques doit être confrontée à la pratique (contraintes physiques) afin de trouver des solutions technologiques optimales.

### Conventional and supercritical vapour cycles:

In thermal power plants, electrical energy is produced from a source of calorific energy (fuel) that is converted into thermal energy, then mechanical and finally electrical energy. The efficiency of this conversion must be as high as possible to optimize and make the power plant more efficient. Steam cycles allow this conversion and can be optimized in different ways. The laws of thermodynamics effectively limit the maximum achievable yield. The implementation of these theoretical cycles must be confronted with practical (physical constraints) in order to find optimal technological solutions.

Les cycles supercritiques (ou ultrasupercritiques) avec resurchauffe présentent les rendements théoriques les plus élevés (47% contre 38 à 40% pour les chaudières classiques). La plupart des installations de grandes capacités sont de ce fait supercritiques.

Supercritical (or ultrasupercritical) cycles with resuperheating have the highest theoretical efficiency (47% compared to 38 to 40% for conventional boilers). Most large capacity installations are therefore supercritical.

Les schémas de la Figure 1 illustrent comment sont gagnés les pourcentages de rendement théoriques par l'augmentation des conditions opératoires, par l'ajout de boucles de surchauffe/resurchauffe ou encore par le passage à un cycle supercritique.

The diagrams in Figure 1 illustrate how the theoretical performance percentages are achieved by increasing operating conditions, adding superheat/resuperheat loops or switching to a supercritical cycle.

Le choix des conditions de pression et température est alors un compromis entre rendement et contraintes associées.

The choice of pressure and temperature conditions is then a compromise between efficiency and associated constraints.

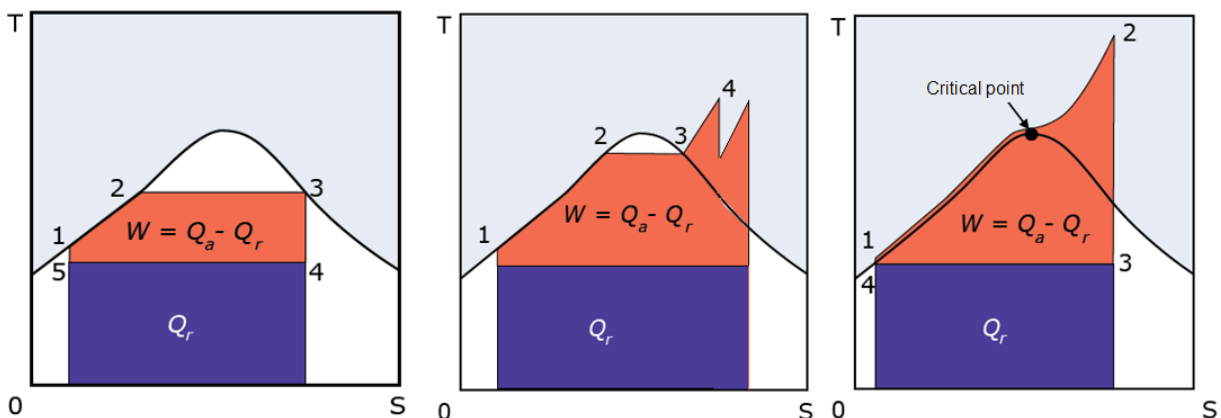


Figure 1. Exemples de diagrammes entropiques (Température (T) en fonction de l'Entropie (S) de cycles vapeur classique, avec resurchauffe et supercritique

Figure 1. Examples of entropic diagrams (Temperature (T) as a function of the Entropy (S) of conventional steam cycles, with resuperheating and supercritical



Les installations industrielles peuvent être classées en fonction des conditions de pression et température de la vapeur en entrée de turbine :

- Conditions subcritiques : 540°C 170-220 bar. Ces installations classiques ont un rendement inférieur 38%.
- Conditions supercritiques : 600-615°C 250 bar. Ces installations peuvent avoir des rendements allant jusqu'à 42%
- Conditions ultra supercritiques 620°C 300 bar. Ces installations ont des rendements compris entre 42 et 46%.
- Conditions ultra supercritiques avancées : 700-760°C 350 bar. Ces conditions seront atteignables pour la prochaine génération de centrales. Elles peuvent dépasser les 50% de rendement.

En pratique, voici sur la Figure 2 comment se présente une centrale thermique supercritique au charbon :

- En marron : la chambre de combustion dans laquelle est pulvérisée le charbon pour y être brûlé,
- En bleu, rouge et vert pale les différents circuits de fluides en provenance des surchauffeurs et alimentant les différents étages de la turbine,
- En violet la turbine et ses différents étages,
- En jaune, le générateur de 912 MW.

*Industrial installations can be classified according to the pressure and temperature conditions of the steam at the turbine inlet :*

- *Subcritical conditions: 540°C 170-220 bar. These conventional installations have a lower efficiency of 38%.*
- *Supercritical conditions: 600-615°C 250 bar. These installations can have efficiencies of up to 42%.*
- *Ultra supercritical conditions 620°C 300 bar. These installations have efficiencies ranging from 42 to 46%.*
- *Advanced ultra supercritical conditions: 700-760 °C 350 bar. These conditions will be achievable for the next generation of power plants. They can exceed 50% efficiency.*

*In practice, here is how a supercritical coal-fired power plant looks like in Figure 2 :*

- *Brown: the combustion chamber in which coal is pulverized and burned,*
- *In blue, red and pale green, the different fluid circuits from the superheaters supplying the different stages of the turbine are shown in blue, red and pale green,*
- *In purple the turbine and its different stages,*
- *In yellow, the 912 MW generator.*



**Figure 2. Vue 3D de la centrale RDK8 - Image credit: GE Power**  
**Figure 2. 3D-view of RDK8 Power Plant (Germany) - Image credit: GE Power**

Les Usines d'Incineration d'Ordures Ménagères (UIOM) quant à elle utilisent la chaleur produite par la combustion des déchets pour produire de l'énergie électrique et/ou calorifique (possibilité de cogénération). Elles sont dimensionnées en fonction de la quantité de déchets produite dans un périmètre donné. Leur implantation dépend d'avantage du coût du transport des déchets que de celui de la distribution de l'électricité (ce qui est moins vrai par exemple pour une centrale nucléaire).

*Household Waste Incineration Plants (HWI) use the heat produced by the combustion of waste to produce electrical and/or calorific energy (possibility of cogeneration). They are sized according to the amount of waste produced in a given area. Their location depends more on the cost of transporting waste than on the cost of distributing electricity (which is less true, for example, for a nuclear power plant).*

Contrairement aux centrales à charbon les incinérateurs ne sont pas équipés de chaudières à cycles supercritiques. Les conditions de fonctionnement de ces cycles sont en effet beaucoup plus complexes à mettre en œuvre puisqu'au lieu de travailler avec de la vapeur surchauffée à 40 bar 250°C, l'eau est portée à plus de 200 bar et 600°C. Cette augmentation de pression et température génère des contraintes mécaniques mais aussi chimiques plus importantes.

En particulier, on s'intéresse aux phénomènes de corrosion auxquels seraient exposés une installation qui devraient résister à la fois aux conditions de pression et température compatibles avec un cycle supercritique, mais également à des polluants générés par la combustion des déchets.

Plus que les autres combustibles, les déchets présentent en effet des compositions très variées et génèrent des gaz hautement agressifs tels que les NOx, SOx et HCl (On estime à plus de 500 000 le nombre de molécules différentes générées par l'incinération). L'augmentation des températures au niveau des tubes de Chaudière peut avoir un effet de levier très important sur la sévérité de l'agressivité chimique du milieu.

### **Corrosion des métaux**

Le coût économique lié à la dégradation des matériaux par la corrosion est considérable. L'estimation couramment faite est 3 à 4% du Produit National Brut. Les phénomènes de corrosion (corrosion humide ou sèche) se retrouvent en effet dans la plupart des procédés et domaines d'application tels que la marine, le secteur du bâtiment (corrosion dans le béton) l'aéronautique, le biomédical, l'incinération d'ordures ménagères, etc.).

Les stratégies permettant de limiter l'impact de la corrosion prennent en compte plusieurs approches dont :

- Limitation de la cinétique de corrosion en jouant sur le procédé (éviter les fluctuations de température, limiter la présence de certaines espèces, travailler à des températures moins élevées, etc.). Les installations industrielles sont en général équipées de systèmes de traitement de l'eau (pureté, désaération, pH, etc.) plus ou moins performant selon les applications.
- Prédiction / contrôle de l'évolution de la corrosion, lors de la conception de l'équipement, son épaisseur est calculée pour pouvoir résister aux conditions opératoires et une surépaisseur de corrosion est ajoutée. Cette surépaisseur est égale à la vitesse de corrosion multipliée par la durée de vie de l'équipement. Des mesures d'épaisseurs résiduelles sont effectuées au cours de la vie de l'équipement afin de vérifier que la vitesse de corrosion est conforme aux prévisions.
- Le choix du matériau (et de son éventuel traitement de surface) qui permet de résister à l'ensemble des mécanismes de corrosion identifiés. Ce choix doit se faire en fonction de l'agressivité du milieu, mais reste largement tributaire des conditions budgétaires. Dans certains cas, le surcoût peut être tellement important qu'il est envisageable d'utiliser des matériaux moins résistants qui sont alors considérés comme du « consommable ». Il est à noter qu'en pratique, le matériau est choisi avant tout pour ses propriétés mécaniques. Dans le cas des équipements sous pression la composition des alliages utilisés leur confère naturellement une résistance à la corrosion souvent suffisante (Présence de Cr et Mo). Un traitement de surface ou une protection contre la température peut être envisagé en fonction des applications pour renforcer leur résistance à un milieu spécifique.

*Unlike coal-fired power plants, incinerators are not equipped with supercritical cycle boilers. The operating conditions of these cycles are indeed much more complex to implement since instead of working with superheated steam at 40 bar 250°C, the water is increased to more than 200 bar and 600°C. This increase in pressure and temperature generates greater mechanical and chemical stresses.*

*In particular, we are interested in the corrosion phenomena to which a facility would be exposed, which would have to withstand both the pressure and temperature conditions compatible with a supercritical cycle, but also pollutants generated by the combustion of waste.*

*More than other fuels, waste has a wide variety of compositions and generates highly aggressive gases such as NOx, SOx and HCl (it is estimated that more than 500,000 different molecules are generated by incineration). The increase in temperatures in the boiler tubes can have a very significant leverage effect on the severity of the chemical aggressiveness of the medium.*

### **Corrosion of metals:**

*The economic cost of corrosion degradation of materials is considerable. The current estimate is 3 to 4% of the Gross National Product. Corrosion phenomena (wet or dry corrosion) are found in most processes and fields of application such as marine, construction (corrosion in concrete), aeronautics, biomedical, household waste incineration, etc.).*

*Strategies to limit the impact of corrosion take into account several approaches including:*

- *Limitation of corrosion kinetics by using the process (avoid temperature fluctuations, limit the presence of certain species, work at lower temperatures, etc.) Industrial installations are generally equipped with water treatment systems (purity, deaeration, pH, etc.) that are more or less efficient depending on the application.*
- *Prediction / control of corrosion evolution, when designing the equipment, its thickness is calculated to resist operating conditions and an additional corrosion thickness is added. This excess thickness is equal to the corrosion rate multiplied by the service life of the equipment. Residual thickness measurements are made over the life of the equipment to verify that the corrosion rate is as expected.*
- *The choice of material (and its possible surface treatment) that allows to resist all the identified corrosion mechanisms. This choice must be made according to the aggressiveness of the environment, but remains largely dependent on budgetary conditions. In some cases, the extra cost may be so high that it is possible to use less resistant materials which are then considered as "consumable". It should be noted that in practice, the material is chosen primarily for its mechanical properties. In the case of pressure equipment, the composition of the alloys used naturally gives them a corrosion resistance that is often sufficient (Cr and Mo present). Surface treatment or temperature protection can be considered depending on the applications to enhance their resistance to a specific environment.*

La compréhension des mécanismes régissant ces différentes formes de corrosion est fondamentale pour protéger les matériaux métalliques et tenter d'allonger leur durée de vie en service. Il est important de préciser ici que les phénomènes de corrosion ne peuvent être totalement évités. Il est cependant possible de ralentir les vitesses de corrosion à des niveaux permettant l'utilisation des matériaux y compris dans des conditions extrêmement sévères.

De manière générale la capacité qu'a un matériau à résister à la corrosion et justement de pouvoir s'oxyder facilement et de créer à sa surface une couche d'oxyde suffisamment protectrice pour ralentir la progression de la corrosion.

Afin d'être efficace, la couche d'oxyde doit être : dense, couvrante, adhérente, métallurgiquement proche du métal de base, peu consommatrice de métal, stables chimiquement et mécaniquement.

On comprend ainsi rapidement que prédiction des propriétés de la couches d'oxyde en surface d'un nouveau matériau puisse être complexe.

Qu'elle soit généralisée ou localisée, la corrosion des métaux si elle est mal maîtrisée peut conduire à la ruine plus ou moins rapide d'une installation. Les modes d'actions sont très variés et peuvent donner lieu à des dégradations plus ou moins insidieuses et critiques.

Pour qu'elles aient lieu, les réactions de corrosion nécessitent des conditions chimiques et thermodynamiques bien spécifiques qui ne sont atteintes parfois que très localement. Le sens de la réaction est dicté par les lois de l'électrochimie ou de la thermodynamique et peut être prédit.

En général une première phase d'amorçage liée à la présence d'une espèce chimique, d'une irrégularité, d'un défaut de la couche d'oxyde ou d'une contrainte intervient. Cet amorçage peut alors donner lieu à des conditions localisées favorables à l'auto-entretien de la réaction de corrosion entraînant une propagation rapide et catastrophique de celle-ci (perforation, fissuration, perte de résistance mécanique, etc.).

Selon les conditions auxquelles le matériau est soumis l'un ou l'autre des phénomènes de corrosion peut prédominer.

A ce jour, la sélection de matériaux adaptés ne semble pas être un facteur limitant au développement des centrales supercritiques en milieu incinérateur pour les raisons suivantes (En revanche, le matériau choisi peut se révéler un facteur économique limitant).

(i) Les matériaux résistants aux contraintes des chaudières supercritiques à charbon sont disponibles avec un retour d'expérience de plusieurs décennies.

(ii) Le panel de solutions technologiques permettant de limiter les dommages de la corrosion sont nombreux (choix de l'alliage, traitement de surface, traitement thermique, etc.)

(iii) Les surcoûts liés à des matériaux plus qualitatifs sont souvent négligeables devant les coûts globaux des installations. De plus le coût d'un remplacement préventif de certaines pièces peut s'avérer moins coûteux que le passage à un grade plus élevé.

(iv) Les problèmes de corrosion habituellement rencontrés dans les chaudières d'incinérateurs pourront voir leur sévérité augmenter dans le cadre de chaudières supercritiques mais sans changer fondamentalement l'approche de lutte contre la corrosion.

*Understanding the mechanisms governing these different forms of corrosion is fundamental to protecting metallic materials and trying to extend their service life. It is important to note here that corrosion phenomena cannot be completely avoided. However, it is possible to slow corrosion rates to levels that allow the materials to be used even under extremely severe conditions.*

*In general, the ability of a material to resist corrosion and precisely to be able to oxidize easily and to create on its surface an oxide layer that is sufficiently protective to slow the progression of corrosion.*

*In order to be effective, the oxide layer must be: dense, covering, adherent, metallurgically close to the base metal, low metal consumption, chemically and mechanically stable. It is thus quickly understood that predicting the properties of the surface oxide layers of a new material can be complex.*

*Whether widespread or localized, metal corrosion, if poorly controlled, can lead to the more or less rapid failure of an installation. The modes of action are very wide and can lead to more or less insidious and critical degradation.*

*For corrosion reactions to occur, they require very specific chemical and thermodynamic conditions that are sometimes only reached very locally. The direction of the reaction is driven by the laws of electrochemistry or thermodynamics and can be predicted.*

*In general, a first initiation phase related to the presence of a chemical species, an irregularity, a defect in the oxide layer or a stress occurs. This initiation can then give rise to localized conditions leading to the self-maintaining of the corrosion reaction that degenerate to its rapid and catastrophic propagation (perforation, cracking, loss of mechanical strength, etc.).*

*Depending on the conditions to which the material is subjected, one or the other corrosion phenomenon may predominate.*

*To date, the selection of suitable materials does not seem to be a limiting factor in the development of supercritical power plants in incinerator environments for the following reasons. (However it may be an economic limiting factor)*

*(i) Materials resistant to the stresses of supercritical coal-fired boilers are available with decades of experience feedback.*

*(ii) There are many technological solutions to limit corrosion damage (choice of alloy, surface treatment, heat treatment, etc.)*

*(iii) The additional costs associated with more qualitative materials are often negligible compared to the overall costs of the installations. In addition, the cost of preventive replacement of certain parts may be less expensive than upgrading to a higher grade.*

*(iv) The corrosion problems usually encountered in incinerator boilers may increase in severity in supercritical boilers but without fundamentally changing the approach to corrosion control.*



# Quel est le développement du supercritique dans le monde ?

## Panorama des installations

### **Méthodologie**

L'objectif étant d'évaluer la faisabilité des technologies supercritiques pour un intrant déchet ou biomasse, le panorama a été réalisé en suivant une méthodologie en entonnoir en partant d'un recensement global puis en appliquant des critères de sélection pour réduire le champs d'étude.

Le travail a consisté à identifier les différents fournisseurs de technologie de chaudières et à référencer leurs installations dans le monde, via une recherche de publications industrielles ainsi qu'une consultation des sites internet des fournisseurs de chaudière. Les critères que choix ont ensuite été appliqués (conditions de mise en œuvre, type d'intrant) pour établir une classification permettant de répondre aux questionnements suivants :

- Quelles est la part d'installations supercritiques par rapport aux chaudières hautes puissances ?
- Quelle est la répartition des usines dans le monde ?
- Quel type d'intrant est utilisé ?
- Le développement de la technologie est-il croissant ?

Au total, 180 installations supercritiques et non supercritiques ont été recensées, dont 117 supercritiques. Les données collectées sont les suivantes :

- Fournisseur / Exploitant
- Nature de l'intrant
- Puissance d'installation
- Conditions P et T
- Supercritique ou non
- Débit de vapeur
- Date de mise en route
- Lieu/Pays d'installation
- Investissement

### **Identification des fournisseurs**

Il existe de nombreux fournisseurs différents pour seulement deux technologies sous licences, détenues par Siemens (procédé BENSON) et Alstom (procédé SULZER). Les fournisseurs sont généralement mis en place par partenariat entre une des deux entreprises détentrices des licences et une entreprise nationale. La liste des fournisseurs identifiés est détaillée dans le tableau ci-après.

# What is the supercritical market in the world?

## Overview of the installations

### **Methodology**

Since the objective was to assess the feasibility of supercritical technologies for a waste or biomass input, the panorama was carried out using a funnel methodology based on a global census and then applying selection criteria to reduce the scope of the study.

The work consisted in identifying the various suppliers of boiler technology and referencing their installations worldwide, through a search for industrial publications and a consultation of the boiler suppliers' websites. The criteria that were chosen were then applied (implementation conditions, type of input) to establish a classification to answer the following questions:

- What is the proportion of supercritical installations compared to high-power boilers?
- What is the distribution of factories in the world?
- What type of input is used?
- Is the development of technology increasing?

A total of 180 supercritical and non-super-critical installations have been identified, 117 of which are supercritical. The whole thing is complicated in an excel file including:

- Supplier / Operator
- Nature of the input
- Installation power
- P and T conditions
- Supercritical or not
- Steam flow rate
- Start-up
- Location
- Investment

### **Identification of suppliers**

There are many different suppliers for only two licensed technologies, owned by Siemens (BENSON process) and Alstom (SULZER process). Suppliers are generally set up by a partnership between one of the two licensed companies and a national company. The list of identified suppliers is detailed in the table below.

**Tableau 1. Liste des fournisseurs sous licence Benson ou Sulzer**  
**Table 1. List of licensed Benson or Sulzer suppliers**

<b>BENSON</b>	<b>SULZER</b>
AC Boilers (ex Ansaldo) – ITA	Bharat heavy electricals – IND
Babcock Hitachi – JPN	GE (Alstom)
Babcock Wilcox (B&W) – USA	Harbin electric company – CHN
BGR Energy Systems Limited – IND	L&T-MHI Boilers Private Limited – IND
Burmeister & Wain Energy (BWE) – DK	Mitsubishi Heavy Industries – JPN
Dongfang Boiler – CHN	Mitsubishi Hitachi Power Systems – JPN
Doosan heavy industries – KOR	Shanghai Boiler – CHN
Hitachi power systems – JPN	
IHI Corporation – JPN	
Power Machines - Taganrog – RU	
Sumitomo Foster Wheeler – JPN	
TechnoProm Exports (TPE) – RUS	
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp. - JPN	

### Description simplifiée des procédés Benson et Sulzer

Les chaudières supercritiques sont toutes développées sur le modèle des chaudières OTSG (Once-Through Steam Generator) c'est-à-dire sans recirculation. Ces chaudières sont les seules à pouvoir être opérées sur de larges gammes de pression et de température. Il existe principalement deux technologies : la technologie Benson et la technologie Sulzer.

Dans le cas du procédé Benson, l'eau est pressurisée par la pompe d'alimentation à la pression supercritique de 225 bar. Elle est ensuite préchauffée puis traverse l'évaporateur et le surchauffeur pour être convertie partiellement en vapeur. La température est augmentée à la température supercritique. Un mélange d'eau et de vapeur entre ensuite dans l'évaporateur radiant et est entièrement vaporisée (chaleur provenant du flux gazeux).

La température cible (environ 650°C) est ensuite atteinte après le passage de la vapeur dans le surchauffeur par convection. La vapeur est enfin détendue dans une turbine pour la production d'électricité. Dans une chaudière Benson, le lieu d'évaporation complète varie en fonction de la charge. En moyenne, les chaudières Benson sont opérées à 650°C et 250 bars pour des capacités de 135 t/h.

Le procédé Sulzer propose une configuration presque identique. La principale différence réside dans le mode de production de la vapeur et la présence d'un réservoir sous pression aussi appelé bouteille Sulzer disposée entre l'évaporateur et le surchauffeur. L'eau y est ainsi entièrement vaporisée quelle que soit la charge.

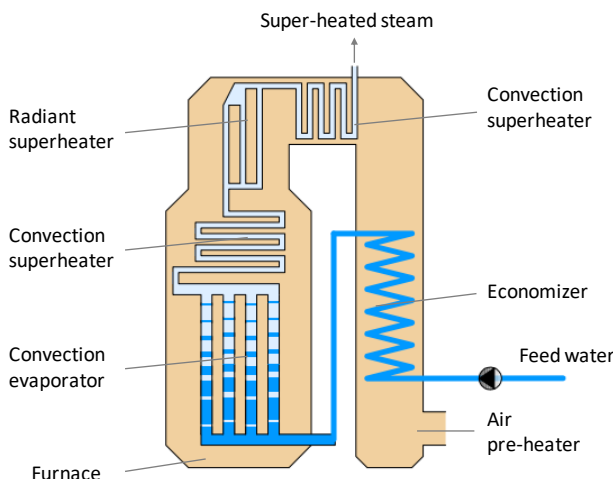


Figure 3. Procédé Benson  
Figure 3. Benson process

**Benson and Sulzer processes – simplified description**  
The supercritical boilers are all developed on the model of the OTSG (Once-Through Steam Generator) boilers, i. e. without recirculation. These boilers are the only ones that can be operated over a wide range of pressures and temperatures. There are two main technologies: Benson technology and Sulzer technology.

In the case of the Benson process, the water is pressurized by the feed pump at a supercritical pressure of 225 bar. It is then preheated and passed through the evaporator and superheater to be partially converted into steam. The temperature is increased to the supercritical temperature. A mix of water and steam enters the radiant evaporator and is completely vaporized (heat from the gas stream).

The target temperature (about 650°C) is reached after the steam has passed through the superheater by convection. Finally, the steam is expanded in a turbine for electricity production. In a Benson boiler, the complete evaporation location varies according to the load. On average, Benson boilers are operated at 650°C and 250 bar for 135 t/h capacities.

The Sulzer process offers an almost identical configuration. The main difference is the method of steam production and the presence of a pressurized tank, also called a Sulzer bottle, between the evaporator and the superheater. The water is thus completely vaporized regardless of the load

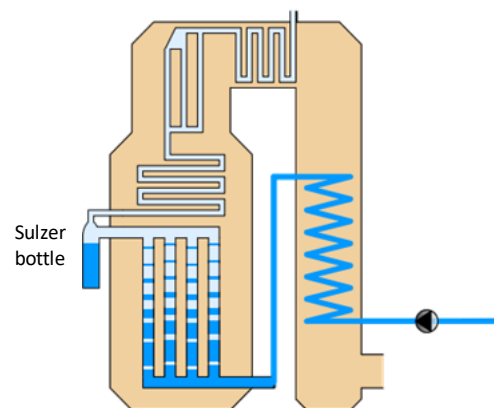


Figure 4. Procédé Sulzer  
Figure 4. Sulzer process

### Synthèse des principaux éléments du panorama

#### - Nature de l'intrant

Les installations supercritiques pour la production d'électricité et de chaleur sont historiquement dimensionnées pour un intrant de type charbon. Il n'est donc pas étonnant de retrouver majoritairement cette ressource ou ses dérivés (anthracite, lignite, gangue, etc.) comme intrant principal des installations inventoriées. Pour une unité supercritique, on estime la quantité de charbon nécessaire à 0,29 kg/kWh électrique produit contre 0,35 kg/kWh pour la filière conventionnelle.

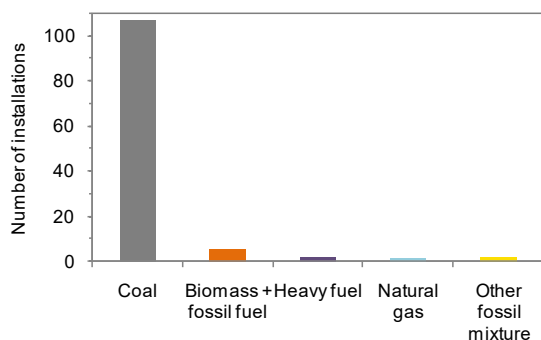
Seulement 5 installations fonctionnant avec de la biomasse ligno-cellulosique (bois, pellets, paille, résidus agroforestiers) en tant que co-intrant ont été recensées.

### Summary of the main elements of the panorama

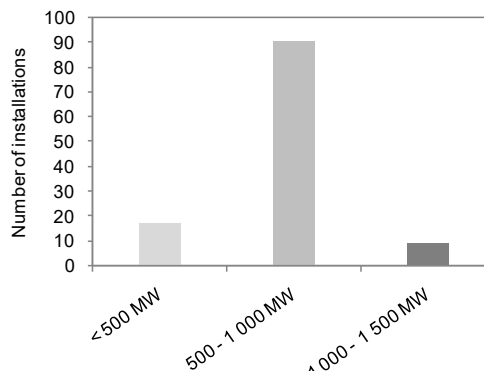
#### - Nature of the input

Supercritical installations for electricity and heat production have historically been sized for a coal-type input. It is therefore not surprising to find this resource or its derivatives (anthracite, lignite, gangue, etc.) as the main input for the inventoried installations. For a supercritical unit, the quantity of coal required is estimated at 0.29 kg/kWh of electricity produced compared to 0.35 kg/kWh for the conventional process.

Only 5 installations operating with ligno-cellulosic biomass (wood, pellets, straw, agroforestry residues) as a co-input have been identified.



**Figure 5. Classification par type d'intrant (RECORD 2019)**  
*Figure 5. Classification by input (RECORD 2019)*



**Figure 6. Classification par puissance de chaudière (RECORD 2019)**  
*Figure 6. Classification by power of boiler (RECORD 2019)*

**- Le supercritique et la biomasse**

En Europe, les centrales électriques faisant intervenir de la biomasse sont toutes d'anciennes centrales à charbon, converties pour fonctionner avec du bois dans un souci de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il n'en existe cependant aucune fonctionnant en conditions supercritique et alimentée exclusivement en biomasse. Un projet de construction dans le terminal portuaire de Gand d'une nouvelle centrale électrique (215 MWe-110 MWth) porté par Belgian Eco Energy devait voir le jour en 2019 avec l'ambition de devenir la plus grande centrale biomasse au monde. Le projet a dû être abandonné pour des raisons politiques.

**- Taille d'installation (puissance)**

Les installations couvrent une gamme de très haute puissances allant jusqu'à 4 000 MW. La puissance installée est très souvent répartie sur plusieurs chaudières. Nous les avons distinguées en trois catégories :

- P < 500 MW
- 500 MW < P < 1 000 MW
- 1 000 MW < P < 1 500 MW

65% des chaudières installées se trouve dans la gamme 500 MW – 1 000 MW.

A titre d'exemple, l'installation Sasan Ultra Mega Power Plant de Shanghai Boiler en Inde regroupe 6 chaudières de 660 MW, et l'installation de la CFE (Comision Federal de Electricidad) de Mitsubishi Hitachi Power System au Mexique regroupe 3 unités de 700 MW.

**- Supercritique vs. conventionnel dans la production d'électricité à partir de charbon**

La Chine est le premier exploitant mondial des chaudières supercritique pour la production d'énergie à partir de charbon loin devant les Etats-Unis et l'Europe ou le Japon. Sur les 867 GW de capacité de production d'électricité à partir de charbon en 2016, 25% proviennent d'installations supercritiques et 17% d'installations ultra-supercritiques.

Le Japon est un des pays leader dans le domaine des technologies de haute performance et faible émission (HELE – High Efficiency Low Emission) avec notamment la première centrale ultra-supercritique construite en 1993. Sur les 44 GW de capacité de production électrique à partir de charbon, la part des installations SC et U-SC représente respectivement 30% et 45% soit les taux les plus élevés au monde.

Aux Etats Unis, la capacité de production électrique s'élève à environ 307 GW pour les installations au charbon dont près de 30% sont générés par des centrales supercritiques. En 2016 le pays ne comptait aucune unité U-SC. Les projets développés ces

**- Supercritical fluid and biomass**

*In Europe, biomass power plants are all old coal-fired power plants, converted to run on wood in order to reduce greenhouse gas emissions. However, there are none operating under supercritical conditions and supplied exclusively with biomass. A project to build a new 215 MWe-110 MWth power plant in the Ghent port terminal, supported by Belgian Eco Energy, was due to be completed in 2019 with the aim of becoming the largest biomass plant in the world. The project had to be abandoned for political reasons.*

**- Installation size (power)**

*The installations cover a very high power range up to 4,000 MW. The installed power is very often distributed over several boilers. We have distinguished into three categories:*

- P < 500 MW
- 500 MW < P < 1,000 MW
- 1,000 MW < P < 1,500 MW

*65% of the boilers installed are in the 500 MW - 1,000 MW range.*

*As an example, in India Sasan Ultra Mega Power Plant de Shanghai Boiler is composed by 6 x 660 MW boilers and Mexico CFE (Comision Federal de Electricidad - Mitsubishi Hitachi Power System) has 3 x 700 MW. The pressures and temperatures used are between 230-320 bar and 530 and 600°C.*

**- Coal based electrical production: Supercritical vs. Conventional boiler**

*China is the world's leading operator of supercritical boilers for coal-fired power generation far ahead of the United States and Europe or Japan. Of the 867 GW of coal-fired power generation capacity in 2016, 25% came from supercritical installations and 17% from ultra-supercritical installations.*

*Japan is one of the leading countries in the field of high-performance and low-emission (HELE) technologies, with the first ultra-supercritical power plant built in 1993. Of the 44 GW of coal-fired power generation capacity, SC and U-SC facilities account for 30% and 45% respectively, the highest rates in the world.*

*In the United States, the electricity production capacity amounts to approximately 307 GW for coal-fired installations, of which nearly 30% is generated by supercritical power plants. In 2016 there were no U-SC units in the country. The projects developed in recent years have mainly focused on high-efficiency installations in order to reduce polluting emissions. The Obama measures defined in the "Clean Power Plan" also aimed to close the oldest and most*



dernières années étaient principalement tournés vers les installations à haut rendement afin de réduire les émissions polluantes. Les mesures Obama définies dans le « Clean Power Plan » avaient aussi pour ambition de faire fermer les sites les plus anciens et polluants. Cette position a été revue par le plan Trump « Affordable Clean Energy Rule », permettant la relance des centrales à charbon tout en encourageant l'amélioration de leur efficacité.

En Inde, dispose d'une capacité installée de l'ordre de 220 GWe dont près de 22% sont des unités SC et 4% U-SC. Du fait de ressources internes importantes, le mix énergétique indien repose aujourd'hui à environ 57% sur le charbon. Son engagement dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre explique l'intérêt fort pour les technologies supercritiques à court terme, mais pousse d'ores est déjà le pays à mettre en place des alternatives renouvelables (part du mix énergétique de 2 à 13% d'ici à 2040) et à freiner la construction de projets de centrales à charbon. Néanmoins, l'augmentation de la demande énergétique attendue d'ici à 2040 est telle (1 921 Mtep contre 724 Mtep en 2016), que les prévisions assurent la première place du mix énergétique au charbon. A noter que la moitié de l'augmentation nette de capacité de production des centrales au charbon prévue dans le monde devrait avoir lieu en Inde.

En Europe, la capacité de production est de l'ordre de 169 GWe avec une contribution respective de 10% et 11% des installations SC et U-SC, le tableau de synthèse en répertorie environ un tiers.

- Evolution du nombre d'unité installé dans le monde et cumul de puissance

Le développement des chaudières supercritiques a débuté dès les années 70 aux Etats-Unis (25 installations pour une puissance cumulée de 15 GWe) et en Europe (2 installations pour une puissance cumulée de 950 MWe). Dans la décennie suivante, la capacité de production a quasiment quadruplé aux Etats-Unis (69 installations pour un cumul de 56 GW), en Europe elle n'a connu que peu d'évolution avec seulement 1 installation supplémentaire de 350 MW. Le développement s'est ensuite élargi au Japon à partir de 1990 puis à la Chine dans les années 2000. Le nouveau millénaire marque le démarrage du marché de l'ultra-supercritique avec les premières centrales construites au Japon (cumul de 7 GW). Sur la période 2000-2010, l'essor est considérable grâce aux investissements énormes de la Chine dans les systèmes SC (180 installations) et U-SC (40 installations). Dans le même temps le Japon bâtit 13 centrales U-SC et 3 SC pour atteindre une capacité totale de production électrique de 30 GW répartie sur 41 usines. L'Europe quant à elle reste loin derrière avec 19 GW de puissance cumulée pour un total de 33 installations. A l'inverse, l'Inde encore invisible sur le marché du supercritique commence à investir massivement dans le charbon. En 2016, l'étude de l'IEA fait état d'un cumul de puissance de 90 GW (100% SC) pour les Etats-Unis, 35 GW (50% SC/50 % U-SC) pour l'Europe, 366 GW (60% SC/40% U-SC) pour la Chine et 33 GW pour le Japon, leader de l'ultra-supercritique avec 60% de ces installations U-SC contre 40% en SC.

Entre 2012 et 2017 l'Inde a construit des centrales supercritiques pour atteindre 40 GW de capacité de production électrique et prévoit 92 GWe supplémentaires d'ici 2027. En effet, si le développement en Inde a commencé plus tard, vers 2007, la progression a suivi une courbe exponentielle. Cette augmentation extrêmement forte peut trouver une explication dans le plan de développement Indien (pays porteur des technologies supercritiques). Cependant, la ratification de l'accord de Paris par l'Inde freine depuis le développement de centrales au charbon.

*polluting sites. This position has been reviewed by the Trump "Affordable Clean Energy Rule" plan, which allows coal-fired power plants to be relaunched while encouraging improvements in their efficiency.*

*In India, has an installed capacity of around 220 GWe, of which nearly 22% are SC and 4% U-SC units. Due to significant internal resources, India's energy mix is now about 57% coal-based. Its commitment to reducing greenhouse gas emissions explains the strong interest in supercritical technologies in the short term, but is already pushing the country to develop renewable alternatives (share of the energy mix from 2 to 13% by 2040) and to slow down the construction of coal-fired power plant projects. Nevertheless, the increase in energy demand expected by 2040 is such (1,921 Mtoe against 724 Mtoe in 2016) that the forecasts ensure the first place of the coal-fired energy mix. It should be noted that half of the net increase in coal-fired power plant capacity expected worldwide is expected to take place in India.*

*In Europe, the production capacity is around 169 GWe with a respective contribution of 10% and 11% of SC and U-SC installations, the summary table lists about one third.*

- Evolution of the number of units installed worldwide and cumulative power

*The development of supercritical boilers began in the 1970s in the United States (25 installations with a combined capacity of 15 GWe) and Europe (2 installations with a combined capacity of 950 MWe). In the following decade, production capacity almost quadrupled in the United States (69 installations for a total of 56 GW), in Europe it underwent little change with only 1 additional 350 MW installation. Development then expanded to Japan from 1990 and China in the 2000s. The new millennium marks the start of the ultra-supercritical market with the first power plants built in Japan (total of 7 GW). Over the period 2000-2010, the growth is considerable thanks to China's huge investments in SC (180 installations) and U-SC (40 installations) systems. At the same time, Japan is building 13 U-SC and 3 SC power plants to achieve a total power generation capacity of 30 GW spread over 41 plants. Europe is far behind with 19 GW of cumulative power for a total of 33 installations. On the other hand, India, which is still invisible on the supercritical market, is beginning to invest massively in coal. In 2016, the IEA study reports a cumulative power of 90 GW (100% SC) for the United States, 35 GW (50% SC/50% U-SC) for Europe, 366 GW (60% SC/40 % U-SC) for China and 33 GW for Japan, leader in ultra-supercritical with 60% of these U-SC facilities compared to 40% in SC.*

*Between 2012 and 2017 India built supercritical power plants to reach 40 GW of power generation capacity and plans to add 92 GWe by 2027. Indeed, if development in India started later, around 2007, the progression followed an exponential curve. This extremely strong increase can be explained by the Indian development plan (a country that supports supercritical technologies). However, India's ratification of the Paris Agreement has since slowed the development of coal-fired power plants.*



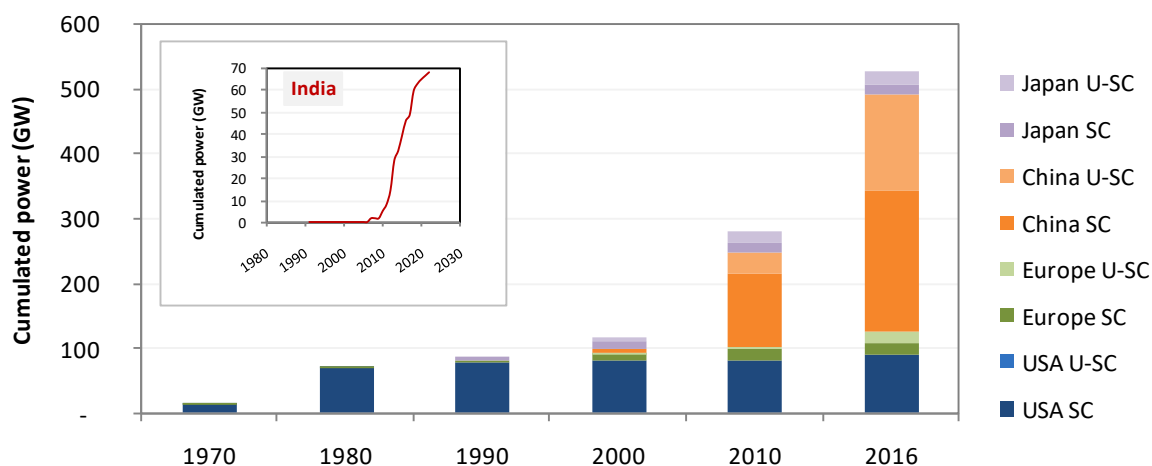


Figure 7 : Puissance installées cumulées par région géographique (RECORD 2019)  
 Figure 7. Cumulated power by geographical region (RECORD 2019)

- Investissement de l'intrant

Ces résultats montrent qu'à puissance équivalente, une installation supercritique coûte en moyenne 4% plus cher qu'une installation sous-critique pour des gammes de puissance de 400 et 600 MWe, et 2% plus cher pour des installations de l'ordre de 900 MWe de puissance. Pour les installations ultra-supercritiques, le surcoût à l'investissement est de 7% pour des installations de 400 et 600 MWe, et de 5% pour des installations de 900 MWe.

- Investment

These results show that for the same power, a supercritical installation costs on average 4% more than a subcritical installation for power ranges of 400 and 600 MWe, and 2% more expensive for installations of around 900 MWe power. For ultra-supercritical installations, the additional investment cost is 7% for 400 and 600 MWe installations, and 5% for 900 MWe installations.

Tableau 2. CAPEX (+/- 30%) pour différents types d'installation et puissance (\$2008/kWe)  
 Table 2. CAPEX (+/- 30%) for various types of installation and power (\$2008/kWe)

Input	\$/kWe net								
	Bituminous coal			Coal PRB			Lignite Texas		
MWe	400	600	900	400	600	900	400	600	900
subSC	4 523	3 844	3 190	4 186	3 555	2 951	4 760	4 045	3 357
SC	4 686	3 982	3 262	4 332	3 679	3 015	4 931	4 190	3 433
USC	4 835	4 109	3 362	4 466	3 792	3 105	5 090	4 325	3 540

## Identification des verrous technologiques et discussion

### Dimensionnement des turbines

Il apparaît qu'une contrainte majeure liée à l'utilisation des chaudières ultra-super-critique est le faible volume spécifique du fluide. Par conséquent, seules des turbines capables de fonctionner avec des débits importants peuvent atteindre des rendements suffisants. Le dimensionnement actuel des turbines ne permet pas d'envisager d'appliquer cette technologie sur des installations de faible puissance (tels que les incinérateurs par exemple).

### Amélioration d'un rendement déjà élevé ? (Cas Lahti)

Convertir un système conventionnel en supercritique pour améliorer les rendements engendre un surcoût non négligeable qu'il convient de mettre en perspective du gain obtenu sur le rendement (matériaux, complexité de mise en œuvre).

## Technological bottlenecks – Identification and discussion

### Turbine sizing

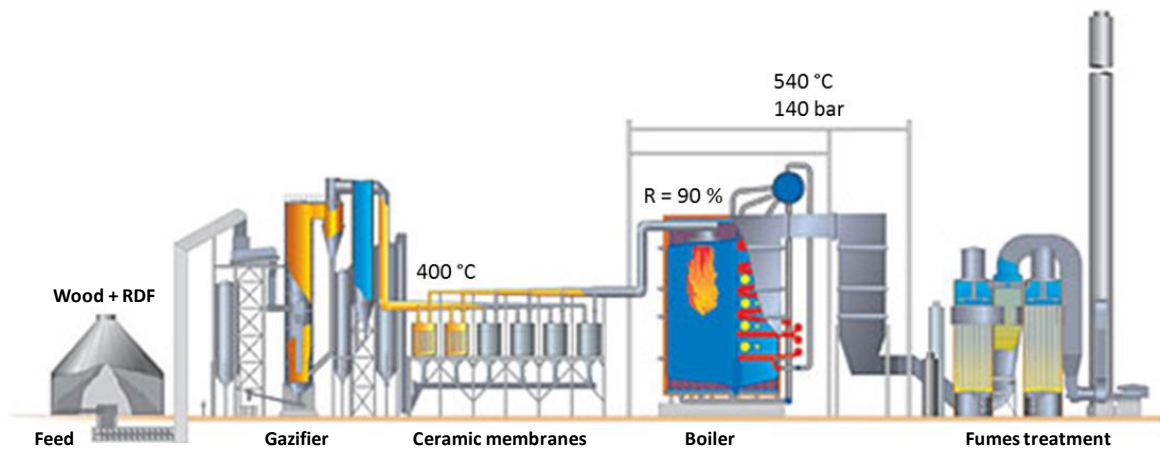
It appears that a major constraint related to the use of ultra-super-critical boilers is the low specific volume of the fluid. Therefore, only turbines capable of operating at high flow rates can achieve sufficient efficiencies. **The current size of the turbines does not allow applying this technology to low power installations (such as incinerators for example).**

### Improving an already high yield? (Lahti case)

Converting a conventional system into a supercritical one to improve yields generates a significant additional cost that must be put in perspective with the gain in yield (materials, complexity of implementation).

Pour une installation de faible puissance comme Lahti Energia's Kymijärvi II comprend une unité gazéification couplée à une cogénération de puissance 50 MWe et 90 MWth, l'investissement serait peu justifié. Le rendement global est de 87,5%, pour des rendements en électricité de 35 % et en chaleur de 65%. La marge de manœuvre est donc plus importante sur l'optimisation de la gazéification que du système « combustion + cogénération ».

The low-power facility Lahti Energia's Kymijärvi includes a gasification unit coupled with a 50 MWe and 90 MWth cogeneration. The cost of a supercritical system would be poorly justified. The overall efficiency is 87.5%, for electricity efficiencies of 35% and heat efficiencies of 65%. There is therefore more room for manoeuvre in optimising gasification than in the "combustion + cogeneration" system.



**Figure 8. Vue schématique de l'installation Lahti Energia - Valmet Power**  
**Figure 8. Schematic view of the Lahti Power installation (Energia – Valmet)**

A l'inverse, le cas de l'installation Avedøre (Danemark), la combustion de la biomasse et du charbon était déjà assez optimisée pour qu'il soit difficile de gagner encore en conversion (90%), ce qui justifiait le passage en supercritique pour gagner en rendement électrique. La chaudière principale est une chaudière Benson de puissance 800 MWth dont la vapeur est amenée à 582 °C et 305 bars (condition ultra-supercritiques). Le rendement énergétique global est de 94% et rendement électrique de 49%. La puissance très élevée assure par ailleurs un retour sur investissement plus court.

On the other hand, in the case of the Avedøre plant (Denmark), biomass and coal combustion was already optimised enough to make it difficult to gain further conversion (90%), which justified the switch to supercritical to improve electrical efficiency. The main boiler is a Benson boiler with a capacity of 800 MWth whose steam is brought to 582°C and 305 bar (ultra-supercritical conditions). The overall energy efficiency is 94 % and the electrical efficiency is 49%. The very high power also ensures a shorter return on investment.

**Quel coût environnemental pour quelle technologie ?**

**Which environmental cost for which technology?**

L'un des arguments en faveur du développement des chaudières supercritiques est la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par kWh électrique produit. On estime que pour 1 kWh produit 1,06 kg CO<sub>2</sub> est généré par une chaudière conventionnelle contre 0,86 kg en supercritique soit une réduction de 19 % des émissions de CO<sub>2</sub>. La mise en œuvre des chaudières supercritiques pour la production d'électricité montre un intérêt dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> lorsque les mix énergétiques sont fortement liés à l'utilisation de charbon et émetteurs direct de CO<sub>2</sub>. C'est donc le cas pour l'Inde ou les Etats-Unis où la production d'1 kWh génère respectivement 1,31 kg CO<sub>2</sub> et 0,62 kg CO<sub>2</sub>. En effet, par rapport à un système conventionnel, les émissions de CO<sub>2</sub> peuvent être réduites de 15 à 30%. Cette amélioration est due au meilleur rendement énergétique obtenu via la combustion en chaudière supercritique. En France, le mix énergétique est faiblement carboné en raison de la part importante du nucléaire (60%). La production d'1 kWh émet 0,04 kg CO<sub>2</sub>.

One of the arguments in favour of the development of supercritical boilers is the reduction of CO<sub>2</sub> emissions per kWh of electricity produced. It is estimated that for every 1 kWh produced 1.06 kg of CO<sub>2</sub> is generated by a conventional boiler compared to 0.86 kg in supercritical mode, representing a 19 % reduction in CO<sub>2</sub> emissions. The use of supercritical boilers for power generation shows an interest in reducing CO<sub>2</sub> emissions when the energy mix is strongly linked to the use of coal and direct CO<sub>2</sub> emitters. This is therefore the case for India or the United States where the production of 1 kWh generates 1.31 kgCO<sub>2</sub> and 0.62 kgCO<sub>2</sub> respectively. Indeed, compared to a conventional system, CO<sub>2</sub> emissions can be reduced by 15 to 30%. This improvement is due to the higher energy efficiency obtained through combustion in supercritical boilers. In France, the energy mix is low in carbon due to the high proportion of nuclear energy (60 %). The production of 1 kWh emits 0.04 kgCO<sub>2</sub>.

Le CO<sub>2</sub> n'est cependant pas la seule émission. La combustion génère également des particules fines ainsi que des NOx et SOx ayant un impact sur la formation de pluies acides par exemple ou sur la santé humaine, ces émissions sont également à prendre en compte dans le bilan environnemental.

However, CO<sub>2</sub> is not the only emission. Combustion also generates fine particles as well as NOx and SOx, which have an impact on the formation of acid rain, for example, or on human health.

L'Asie représente aujourd'hui le plus gros marché du supercritique, en taille, et il devrait encore croître de manière extrêmement forte. Pour répondre à une demande de puissance toujours plus importante, il est considéré que la Chine augmente chaque année ses capacités de production de 70 à 90 GW et l'Inde de 10 à 20 GW. Le défi pour la communauté mondiale se résume en trois points essentiels : assurer aux populations un accès à l'énergie, maintenir un prix compétitif, contrôler les émissions de par une évolution conjointe de la réglementation et des contrôles. Cela passera nécessairement par l'introduction de solutions renouvelables dans les mix énergétiques mais aussi par l'amélioration des performances du parc de centrales. Le charbon, devraient en effet rester le principal vecteur énergétique pour les 30 à 50 prochaines années.

### **Captage, utilisation ou séquestration du carbone**

Les technologies de captage et stockage du carbone (CCS – Carbon Capture and Storage) peuvent capter jusqu'à 90% des émissions de CO<sub>2</sub> des centrales électriques alimentées par des intrants fossiles comme le charbon ou le gaz mais également des industries cimentières ou des secteurs de la chimie et de la métallurgie fortement émettrices de dioxyde de carbone.

Leur contribution est estimée à 7% de réduction des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> d'ici à 2050 soit environ 2,3 Gt CO<sub>2</sub>.

Le CCS est déjà mis en œuvre avec succès dans le monde. Il existe à ce jour 18 installations de grande capacité en opération (soit 1% seulement de la capacité nécessaire pour atteindre l'objectif de réduction des émissions fixé dans les accords de Paris), 5 sont en construction et 20 sont à des stades variés de développement. L'utilisation première de la technologie (75% des installations) est tournée vers l'extraction pétrolière. Elle n'est appliquée que dans deux cas aux centrales de la production électrique à charbon.

Si la technologie n'est pas le frein principal au déploiement mondial puisqu'elle bénéficie d'un niveau de maturité important, le coût reste l'enjeu principal. L'acceptabilité sociétale est également un obstacle et a conduit à l'avortement de plusieurs projets suites à l'opposition des populations.

En France, de par la nature faiblement carbonée du mix énergétique, l'intérêt pour le CSS est limité quant à une application au domaine de l'énergie mais il est identifié comme potentiellement intéressant pour les cimenteries ou aciéries.

### **Cycles de Brayton – CO<sub>2</sub> supercritique**

Une des pistes pour développer des centrales significativement plus efficaces serait d'utiliser du CO<sub>2</sub> à l'état supercritique (sa densité est environ le double de celle de la vapeur d'eau). Sa faisabilité et sa viabilité à échelle industrielle n'ont cependant pas encore été démontrées. D'après le NETL (*National Energy Technology Laboratory à Pittsburgh*) à puissance égale les dimensions de la turbine pourraient être réduites d'un facteur 10 avec un gain très important sur son coût ; typiquement une turbine CO<sub>2</sub>-SC de 4 étages pourrait avoir la même puissance qu'une turbine à vapeur de 10 ou 15 étages. Plusieurs projets de démonstrateurs sont en cours au Canada (pilote de 50-250 kW) et aux Etats-Unis (10 MWe dédié au solaire).

Un des attraits de cette technologie est celui de la flexibilité que ne possèdent pas les installations de grande dimension actuelle. Si cette technologie devait voir le jour, elle pourrait être adaptée à des installations de taille très variable.

*Asia is now the largest supercritical market in terms of size and is expected to continue to grow extremely strongly. To meet an ever-increasing demand for power, it is considered that China increases its production capacity each year from 70 to 90 GW and India from 10 to 20 GW. The challenge for the global community can be summed up in three essential points: ensuring people's access to energy, maintaining a competitive price, and controlling emissions through joint regulatory and control developments. This will necessarily require the introduction of renewable solutions in the energy mix but also the improvement of the performance of the power plant fleet. Coal is expected to remain the main energy carrier for the next 30 to 50 years.*

### **Carbon capture, use or storage**

*Carbon Capture and Storage (CCS) technologies can capture up to 90% of the CO<sub>2</sub> emissions from power plants powered by fossil fuels such as coal or gas, but also from the cement industries or from the chemical and metallurgical sectors that emit high levels of carbon dioxide.*

*Their contribution is estimated at 7% reduction in global CO<sub>2</sub> emissions by 2050, or about 2.3 Gt CO<sub>2</sub>.*

*The CCS is already being successfully implemented worldwide. To date, there are 18 large-capacity installations in operation (only 1% of the capacity required to achieve the emission reduction target set out in the Paris Agreements), 5 are under construction and 20 are at various stages of development. The primary use of technology (75% of the installations) is focused on oil extraction. It is only applied in two cases to coal-fired power plants.*

*While technology is not the main obstacle to global deployment since it has a high level of maturity, cost remains the main issue. Societal acceptability is also an obstacle and has led to the abortion of several projects following opposition from the population.*

*In France, due to the low carbon nature of the energy mix, the interest for CSS is limited in its application to the energy sector but is identified as potentially interesting for cement or steel plants.*

### **Brayton Cycles - Supercritical CO<sub>2</sub>**

*One of the ways to develop significantly more efficient power plants would be to use CO<sub>2</sub> in a supercritical state (its density is about twice that of water vapour). However, its feasibility and viability on an industrial scale have not yet been demonstrated. According to NETL (*National Energy Technology Laboratory in Pittsburgh*) for the same power, the turbine dimensions could be reduced by a factor of 10 with a very significant saving on its cost; typically a 4-stage CO<sub>2</sub>-SC turbine could have the same power as a 10 or 15-stage steam turbine. Several demonstrator projects are underway in Canada (50-250 kW pilot) and the United States (10 MWe dedicated to solar energy).*

*One of the advantage of this technology is the flexibility that today's large installations do not have. If this technology were to be developed, it could be adapted to installations of very different sizes.*



## Conclusion

L'amélioration de la production énergétique et de la gestion des déchets font parties des enjeux majeurs actuels au même titre que la réduction des émissions de gaz à effets de serre. La présente étude évalue le potentiel d'émergence des cycles chaudières supercritiques sur des installations de production énergétique de petite taille tels que les incinérateurs de déchets.

Les technologies supercritiques actuellement mises en œuvre dans les chaudières supercritiques de type centrales à charbon permettent d'augmenter les rendements des cycles vapeur et ainsi d'améliorer l'efficacité énergétique globale des installations ; jusqu'à 10% pour les technologies les plus avancées. Les émissions de CO<sub>2</sub> sont également réduites via l'amélioration des performances des chaudières mais également grâce à des systèmes de traitement des fumées plus efficaces.

Les conditions de pression et de température dans les chaudières à cycles supercritiques sont beaucoup plus contraignantes que dans les chaudières à vapeur conventionnelles. Ainsi le maintien en fonctionnement d'installations supercritiques requiert des efforts spécifiques en termes de choix de matériaux, de pilotage des installations et de gestion de la maintenance.

L'étude a détaillé les enjeux de la lutte contre la corrosion dans le cas où dans une même installation les contraintes des incinérateurs (attaques chimiques) seraient couplées aux contraintes des installations supercritiques. Bien que des matériaux spécifiques puissent être adaptés à ces contraintes, ils nécessiteraient une augmentation du capex rarement consenti par les investisseurs. Par ailleurs, le changement de gamme de température modifierait de façon significative la typologie des mécanismes de corrosion nécessitant des compétences spécifiques à la haute température peu disponibles dans les industries conventionnelles.

L'étude dresse un panorama de l'utilisation de ces technologies dans le monde pour la production d'électricité et fait le constat que le charbon est la ressource principale utilisée pour alimenter les chaudières. Les intrants de type biomasse sont étudiés pour des projets industriels mais aucun n'a vu le jour pour l'instant. En effet, les centrales supercritiques sont des installations de forte puissance constituées d'une ou plusieurs chaudières de 500 à 1 000 MW d'électricité en moyenne. L'alimentation de ces systèmes requiert donc des matières possédant un contenu énergétique élevé et un coût relativement bas pour assurer une balance économique positive. Les unités supercritiques sont principalement exploitées en Asie (Inde) et aux Etats-Unis où le charbon est massivement disponible. L'Europe en compte également quelques-unes mais ne prévoit pas à notre connaissance de plan de déploiement d'ampleur pour ce type de système contrairement aux deux précédents qui modernisent leurs anciennes unités et investissent dans de nouvelles usines.

L'application de ces technologies à des puissances dites « faibles » c'est à dire équivalentes à 150-200 MW et inférieures est aujourd'hui limitée par des verrous technologiques et économiques. Les turbines fonctionnant en supercritique ne sont pas développées pour les basses puissances. En effet, la faible densité de l'eau supercritique nécessite des débits volumiques importants pour les actionner. Ces débits ne sont pas atteints par les unités courantes.

De plus, les conditions de pression et température sévères nécessitent soit la mise en œuvre de matériaux spécifiques, soit l'adaptation des conditions d'exploitation et des plannings de maintenance. Le surcoût engendré n'est pas justifié par le gain d'efficacité attendu pour cette gamme de puissance.

## Conclusion

*Improving energy production and waste management are among the major current challenges, as is reducing greenhouse gas emissions. This study assesses the potential for supercritical boiler cycles to emerge on small energy production facilities such as waste incinerators.*

*The supercritical technologies currently used in supercritical coal-fired power plant boilers make it possible to increase steam cycle efficiencies and thus improve the overall energy efficiency of the installations; up to 10% for the most advanced technologies. CO<sub>2</sub> emissions are also reduced through improved boiler performance and more efficient smoke treatment systems.*

*Pressure and temperature conditions in supercritical cycle boilers are much more important than in conventional steam boilers. Thus, maintaining supercritical installations in operation requires specific efforts in terms of choice of materials, facility management and maintenance management.*

*The study detailed the challenges of corrosion control in the event that, in the same installation, the constraints of incinerators (chemical attacks) would be coupled to the constraints of supercritical operating conditions. Although specific materials can be adapted to these constraints, they would require an increase in the capex rarely granted by investors. In addition, the change in temperature range would significantly change the typology of corrosion mechanisms requiring specific high temperature skills not available in conventional industries.*

*The study provides an overview of the use of these technologies worldwide for power generation and notes that coal is the main resource used to power boilers. Biomass inputs are being studied for industrial projects, but none have yet been developed. Indeed, supercritical power plants are high-power installations consisting of one or more boilers with an average electricity output of 500 to 1,000 MW. The supply of these systems therefore requires materials with a high energy content and a relatively low cost to ensure a positive economic balance. Supercritical units are mainly operated in Asia (India) and the United States where coal is widely available. Europe also has a few, but to our knowledge does not foresee any major deployment plans for this type of system, unlike the two previous ones, which are modernizing their old units and investing in new plants.*

*The application of these technologies to so-called "low" powers, i.e. equivalent to 150-200 MW and below, is today limited by technological and economic barriers. Supercritical turbines are not developed for low power applications. Indeed, the low density of supercritical water requires large volume flows to drive them. These flows are not achieved by the current low powers units.*

*In addition, severe pressure and temperature conditions require either the use of specific materials or the adaptation of operating conditions and maintenance schedules. The additional cost generated is not justified by the expected efficiency gain for this power range.*

*In the event that technological barriers are removed through process innovations and supercritical fluids are implemented to improve the efficiency of waste incinerators, the estimated gain would be in the order of 400 to 500 GWh per year. It would also mean agreeing to investment for each of the 90 MWIPs in the French fleet. Their relevance should be*



Dans le cas où les verrous technologiques seraient levés grâce à des innovations sur les procédés et si les fluides supercritiques étaient mis en œuvre pour améliorer l'efficacité des incinérateurs de déchets, le gain estimé serait de l'ordre de 400 à 500 GWhe annuel. Cela signifierait également, consentir à investissement pour chacune des 90 UIOM du parc français. Leur pertinence serait à étudier, le retour sur investissement étant relativement lent du fait des faibles productions énergétiques.

Enfin, bien que la technologie soit actuellement en développement, l'étude a permis d'identifier une technologie plus flexible qui pourrait être appliquée aux centrales énergétiques de faible ou moyenne capacité. Il s'agit des cycles CO<sub>2</sub> supercritique. Ces cycles combinent les avantages des cycles de Rankine (liquide/vapeur) et de Brayton (gaz). Ils devraient permettre de réaliser des installations plus compactes, plus efficaces énergétiquement et pouvant être compatibles avec le captage du CO<sub>2</sub>.

*studied, as the return on investment is relatively slow due to low energy production.*

*Finally, although the technology is currently under development, the study identified a more flexible technology that could be applied to low and medium capacity power plants. These are the supercritical CO<sub>2</sub> cycles. These cycles combine the advantages of the Rankine (liquid/steam) and Brayton (gas) cycles. They should make it possible to build more compact, energy-efficient installations that can be compatible with CO<sub>2</sub> capture.*