

# **Une transition énergétique optimisée pour la chaleur de l'habitat et du secteur tertiaire.**

**J-M Loiseaux\***, J-L Belmont\*\*, M Fruneau\*\*, M Lieuvin\*\* et J-C Ravel\*\*

\*Professeur Université. Ancien directeur du LPSC Grenoble, \*\*Ex Ingénieurs au LPSC  
(LPSC : Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie 53 Av des Martyrs 38026 Grenoble)  
avec la collaboration de Shie Xin et Ronnie Knikker Cethyl INSA Villeurbanne

**Résumé:** La transition énergétique pour le secteur du chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS) de l'habitat et du tertiaire paraît difficile (techniquement et financièrement) à obtenir par la seule réduction des consommations d'énergie fossiles (avec émissions de CO<sub>2</sub>) pour le chauffage via une amélioration drastique des performances énergétiques du bâti et d'usages d'énergies sans émissions de CO<sub>2</sub>. Pensant que d'autres voies doivent être considérées, nous montrons ci-dessous que le même résultat peut être obtenu via une opération d'isolation modérée (facteur de réduction de 1,5) combinée à une utilisation importante de chaleur fatale et de cogénération. Cette utilisation est revisitée afin d'être compatible avec la répartition des besoins de chaleur au cours de l'année et les impératifs de production d'électricité, notamment en période hivernale. Cette compatibilité est obtenue par l'usage d'un important stockage saisonnier de chaleur qui se révèle possible pour cet usage particulier, moyennant certaines conditions. Ce stockage saisonnier permet notamment d'utiliser à 100 % les sources disponibles de chaleur fatale et de minimiser la baisse de production d'électricité associée à la cogénération en période hivernale.

Ce document est une présentation simplifiée, mais quantitative de cette approche, qui se révèle particulièrement efficace et séduisante. Le coût de cette solution alternative pourrait être quatre fois moins élevé que celui anticipé pour le facteur 4 de réduction des émissions associées au chauffage via l'amélioration des performances thermiques du bâti. Il s'agit donc d'une option utile à considérer.

*Une recherche sur le stockage saisonnier de chaleur a été soutenue par le programme interdisciplinaire du CNRS sur l'énergie.*

## **Introduction**

Vouloir réduire la consommation d'énergie dans le secteur du chauffage pour l'habitat et le tertiaire est un objectif ambitieux et légitime, car il permet de réduire très nettement nos importations d'énergies fossiles, de même que nos émissions de gaz à effet de serre (EGES) et d'augmenter notre efficacité énergétique. La proposition généralement retenue est une réduction importante des consommations d'énergie avec émissions de CO<sub>2</sub>, pour le chauffage de l'habitat et du secteur tertiaire. Cependant une approche principalement fondée sur l'amélioration des qualités thermiques de notre parc immobilier ne nous paraît pas optimale car économiquement coûteuse et difficile à réaliser. Elle peut s'avérer une dépense économiquement peu efficace. En effet, l'objectif d'une réduction très importante des besoins par amélioration de l'isolation s'avère très difficile à atteindre, les expériences de rénovation thermique montrent en effet que les facteurs de réduction anticipés sont loin d'être toujours atteints, pour des raisons techniques ou des raisons liées au comportement des occupants des logements concernés (notamment lorsque l'on veut atteindre des consommations de 50 KWh/m<sup>2</sup>-an). Par ailleurs, l'isolation par l'extérieur n'est pas toujours possible ou envisageable, une isolation importante par l'intérieur entraîne alors une réduction significative de la surface habitable ce qui représente un coût supplémentaire que l'on ne peut négliger.

Nous montrons ci-dessous qu'une opération combinant une isolation modérée des bâtiments (habitat et tertiaires) associée à un usage important de chaleur de cogénération (produite conjointement avec l'électricité) et de chaleurs fatales actuellement disponibles, conduirait à une solution nettement plus sûre pour ce qui concerne l'objectif à atteindre et nettement moins coûteuse, voire économiquement rentable dès à présent. Enfin le parti pris de ce papier est d'être aussi quantitatif que possible pour bien en expliciter la logique sous-jacente. Pour des raisons explicitées plus loin en §B2, nous considérerons, la somme des besoins de chaleur pour chauffage et Eau Chaude Sanitaire.

## **Partie A L'état des lieux en France**

La consommation d'énergie pour les besoins du chauffage et Eau Chaude Sanitaire (Chal-Chauf-ECS) était d'environ 580 TWh en 2011 qui se répartissent en 80 TWh pour l'ECS et 500 TWh pour le chauffage de l'habitat et du tertiaire.

Nous nous situons ici dans l'hypothèse d'une réduction par 4 de la consommation énergétique pour le chauffage qui ramènerait celle-ci à 125 TWh pour le chauffage, (les 80 TWh pour l'ECS restant inchangées) soit un total pour ECS et Chauffage de 205 TWh. Le facteur de réduction pour l'ensemble chauffage et ECS est alors de  $580/205 = 2,83$ .

En supposant un coût moyen par logement de 30 000 € pour 33 millions de logements équivalents, cela représenterait pour le secteur de l'habitat et locaux à usage tertiaire, un coût de 1000 Milliards d'€, ou encore un investissement de 15 380 €/habitant. D'autres estimations donnent 800 Milliards d'€. Rappelons que, malgré ce coût élevé, le résultat n'est pas garanti tant les défauts cachés sont difficiles à détecter et à corriger, et le comportement des usagers des locaux difficile à imposer. La rentabilité économique de cet investissement augmenté des frais d'entretien apparaît très loin d'être assurée. Par ailleurs environ 70 TWh de chaleur dites fatales (voir Note 1) restent peu ou non utilisées, et près de 1000 TWh de chaleur sont rejetés dans l'environnement par les centrales thermiques de production d'électricité.

## **Partie B Proposition d'une réduction équivalente de la consommation énergétique**

*par une isolation modérée accompagnée  
d'un usage important de chaleur de cogénération et de chaleurs fatales.*

**B1 :** Nous supposons en premier lieu, qu'une réduction de la consommation pour le chauffage d'un facteur 1,5 est obtenue par isolation, soit une énergie consommée pour le chauffage de l'habitat et secteur tertiaire de  $500\text{TWh}/1,5 = 333 \text{ TWh}$ . Un optimum économique serait à rechercher pour limiter le nombre de logements à isoler pour atteindre ce but. Ce pourrait être en quelque sorte une remise en ordre du parc actuel des logements de façon à corriger les situations les plus défavorables en matière d'isolation thermique.

Le bilan de cette opération dite «Opération réduction facteur 1,5» conduirait à une consommation de 333 TWh pour le chauffage et 80 TWh pour l'ECS soit au total **413 TWh** pour le **chauffage et ECS de l'habitat et du tertiaire**.

**B2 :** En parallèle, un usage massif de chaleur de cogénération et de chaleur fatale est proposé avec des contraintes particulières brièvement décrites ci-dessous.

Pour pouvoir utiliser ces sources de chaleur, il faut en effet préciser que la chaleur de cogénération ou fatale doit être transportée sur les lieux de consommation sur des distances variant de 50 à 200 km, entre le lieu de production et le lieu de consommation et préciser aussi que cette chaleur doit être distribuée vers les locaux à desservir, par un réseau de chaleur qui ne peut s'envisager que pour un habitat assez dense. On a estimé ici que **70 %** des besoins du territoire national pourraient relever d'un tel mode de distribution de chaleur. *L'usage de réseaux de chaleur conduit naturellement à la fourniture de chaleur à la fois pour le chauffage et l'ECS.*

Une autre contrainte, bien connue des opérateurs de réseaux de chaleur, est la nécessité, notamment en période de chauffe, de pouvoir répondre à une demande fortement fluctuante. Cette contrainte est prise en compte en prévoyant que 30 % de la consommation annuelle de chaleur (distribuée par le réseau de chaleur) est fournie à partir de chaudières locales alimentées en énergie fossiles et énergies renouvelables tels que le bois notamment. Ceci limite à **70 %** la contribution des sources de chaleur fatales ou de cogénération aux besoins de chaleur des zones alimentées par ces sources.

In fine la chaleur de cogénération ou chaleur fatale pourrait ainsi subvenir à **70% \* 70%** des besoins de chaleur (ECS + Chauffage) des zones à habitat dense, soit 49 % des 413 TWh c'est à dire 202 TWh. En supposant que 70 TWh (**Note 1**) de chaleurs fatales sont disponibles en France, il en résulte qu'une production de chaleur de cogénération (avec l'électricité) de 132 TWh serait suffisante.

*Notons ici que la quantité d'énergie consommée annuellement hors la chaleur fatale ou de cogénération est de  $413 \text{ TWh} - 202 \text{ TWh} = 211 \text{ TWh}$  à comparer aux  $205 \text{ TWh}$  qui correspondrait à une réduction par 4 des dépenses énergétiques pour le seul chauffage.*

La production de cette chaleur de cogénération (132TWh) entraînerait cependant une baisse de la production électrique d'environ 22 TWh électriques (Ref1). On verra par la suite (Note 2) que cette chaleur de cogénération peut ne pas avoir de coût énergétique significatif sous certaines conditions. Si l'on utilisait la chaleur de cogénération pendant seulement 3 mois sur 12, comme cela est souvent proposé, alors la baisse de production d'électricité deviendrait assez pénalisante. Cette baisse de production électrique serait de  $22 \text{ TWh} / [550 \text{ TWh} * 3 / 12]$  soit 16 % sur la période la plus critique pour la production d'électricité. Un tel fonctionnement peut paraître inacceptable pour les producteurs d'électricité et ceci explique probablement en partie pourquoi l'usage de la chaleur de cogénération n'est pas envisagé.

## **Partie C Une production continue (sur l'année) de chaleur fatale et de cogénération rendue possible grâce à un stockage saisonnier de chaleur.**

### **C1: L'hypothèse d'une production continue de chaleur de cogénération change la donne!**

Cette hypothèse ramènerait la baisse de production d'électricité de 16 % à 4% tout au long de l'année, ce qui est déjà beaucoup moins contraignant et n'est réellement gênant que pendant seulement 3 à 4 mois d'hiver. Pour remédier à cela, on peut envisager de reconverter une proportion « ad hoc » de chauffage électrique direct en chauffage via le réseau de chaleur pour compenser cette baisse de production d'électricité. On pourrait alors considérer que si la production de chaleur de cogénération était constante sur l'année, celle-ci aurait alors un coût énergétique négligeable. **Voir Note 2.**

Cette rapide analyse tend à montrer que la chaleur de cogénération n'est utilisable en pratique que si elle peut être produite en continu sur l'année, ce qui ne correspond pas du tout à la demande de chaleur qui est à 80% concentrée sur 4 à 5 mois de l'année. Cette saisonnalité de la demande fait donc que l'usage de chaleur de cogénération ou de chaleur fatale est de fait très restreint.

La solution logique est donc celle d'un Stockage Saisonnier de Chaleur (SSC) qui adapterait la production à la demande en stockant la chaleur qui, produite et livrée en excédent durant la période de non-chauffe, serait restituée en période de chauffe. Une simulation simple montre que la capacité de stockage nécessaire est en pratique de l'ordre de 20 % de la quantité totale de chaleur produite annuellement, avec les paramètres décrits en section **B2.**

### **C2 : La technique du SSC (Stockage Saisonnier de Chaleur), son dimensionnement. Voir Note 3**

Une approche très concrète de cette problématique a été d'abord de dimensionner une installation desservant une agglomération de 0,5 Million d'habitants pour l'habitat et le tertiaire avec les paramètres suivants :

Consommation annuelle pour chauffage et ECS de  $413 \text{ TWh} * [0,5 \text{ Million} / 65 \text{ millions}] = 3,17 \text{ TWh}$   
Les chaleurs fatales et issues de la cogénération contribue pour  $2,22 \text{ TWh} = 70\% * 3,17 \text{ TWh}$  et l'énergie « des combustibles » consommée par les chaudières est de  $0,95 \text{ TWh}$ . Les températures choisies entre les températures T-arrivée et T-retour du caloduc sont de  $135^\circ\text{C}$  et  $50^\circ\text{C}$  soit un  $\Delta T$  de  $85^\circ\text{C}$ .

Le SSC doit stocker et déstocker 20 % de la chaleur annuelle utilisée soit  $20\% * 3,17 \text{ TWh} = 0,634 \text{ TWh}$ . Après avoir considéré plusieurs façons de stocker une telle quantité d'énergie, la solution la plus praticable semble bien être un stockage dans le sol. Avec un  $\Delta T$  de  $85^\circ\text{C}$ , la capacité calorifique théorique d'un  $\text{m}^3$  de sol (ici le granit) est de  $0,048 \text{ MWh}/\text{m}^3$ . On a montré, par simulation numérique, que la capacité calorifique utilisable était un peu inférieure à 80% de la capacité théorique soit environ  $0,035 \text{ MWh} / \text{m}^3$  de sol après prise en compte des pertes. Ceci conduit à un volume de sol mobilisé de 18 millions de  $\text{m}^3$ . Pour une hauteur de sol utilisé de 100m, la surface de la zone de stockage est de 18 ha soit  $0,36 \text{ m}^2/\text{habitant}$ .

## **Partie D – Fonctions, avantages et faisabilité d'un stockage saisonnier de chaleur**

**Fonctions et avantages :** En supposant maintenant une fourniture continue sur l'année de chaleur fatale et de cogénération, le stockage saisonnier de chaleur (SSC) a pour fonction de stocker la chaleur de cogénération qui arrive en excès en dehors de la période de chauffe et de la restituer lors de la période de chauffe. Il présente les avantages suivants :

→ Utilisation des chaleurs fatales à 100% de leur potentiel

→ *Utilisation de la chaleur de cogénération à puissance constante sur toute l'année*, ce qui diminue, de façon sensible, les investissements pour sa *collecte* et son *transport* par caloduc vers les chauffages urbains.

→ L'utilisation de la chaleur fatale ou de cogénération - pour satisfaire les besoins d'ECS et la compensation des pertes thermiques, devient opérante à 100% sur toute l'année.

→ *Contribution au lissage des pointes de consommation* et diminution corrélative de la puissance de la chaudière d'appoint locale par la possibilité de moduler rapidement la vitesse de déstockage.

→ *Accroissement notable de la sécurité d'approvisionnement*. (Une réserve est disponible)

→ *Répartition sur l'année de la baisse de production électrique* due à la production de chaleur cogénérée qui devient ainsi plus aisée à gérer, voire à compenser complètement durant la période hivernale, comme indiqué précédemment.

→ *Pas de changement de mode de fonctionnement en cours d'année pour les centrales concernées par la cogénération*.

La capacité utilisable du stockage (20% de la chaleur totale annuelle) dépend de la part de la cogénération ou fatale dans la fourniture totale de chaleur; elle doit prendre aussi en compte la consommation de chaleur pour l'ECS et la compensation des pertes thermiques. Cette part, ECS plus pertes thermiques, est pratiquement constante durant l'année et évaluée à 25% de l'énergie thermique totale à fournir annuellement dans les conditions actuelles. On notera en particulier que si la contribution de la chaleur pour le chauffage diminue à ECS constant, cette capacité de stockage diminue. *Ainsi, une réduction de la consommation de 30% pour le seul chauffage par une isolation limitée, diminue la capacité de stockage nécessaire de façon significative (d'environ 30%).*

**Faisabilité du SSC :** Nos études montrent clairement que la faisabilité technique d'un *stockage saisonnier de chaleur* est quasiment assurée si l'on dispose d'un sous-sol de type granitique de bonne qualité: on stocke principalement la chaleur dans le sol, sur une profondeur de 100 à 150 m. Le transfert de chaleur pour le stockage ou le déstockage de chaleur du sol, se fait par une importante circulation d'eau dans un réseau de puits de type « géothermie semi profonde». L'écart envisagé des températures est de l'ordre de 85°C, (entre 50 et 135°C, soit environ 0,1 MWh/m<sup>3</sup> d'eau et 0,048 MWh/m<sup>3</sup> de sol). L'agencement de ce réseau de puits correspond à un pavage de type hexagonal. La distance entre les axes de 2 puits voisins, (distance qui a été choisie après simulation) est de 3,3 m. Le diamètre des puits dans lesquels circule l'eau étant de 275 mm, la plus grande partie du stockage de chaleur est stockée dans le sol qui environne les puits. Une simulation numérique détaillée\*\* montre que les opérations de stockage et déstockage successives sont reproductibles et efficaces, grâce à une procédure de déstockage particulière. « Voir note 4 ». Nous avons mentionné plus haut que la capacité thermique utilisable n'est en fait que de 0,035MWh/m<sup>3</sup> de sol au lieu de 0,048 MWh/m<sup>3</sup> théorique

Dans ces conditions, à chaque puits est associée une surface de 10m<sup>2</sup> environ et si les puits ont une hauteur utile de 100 mètres, le nombre de puits est de 18000 et la section horizontale du volume de stockage est de 18 ha ou 180000m<sup>2</sup>

Le prix estimé à partir des coûts pratiqués pour la géothermie semi profonde, est de 10 000 € par puits équipé et raccordé, soit un investissement de 180 M€ pour 500 000 habitants ou 360 €/habitant

Pour les sols de nature sédimentaire, des études particulières sont à poursuivre notamment pour voir comment lutter ou se prémunir du «lessivage» éventuel du volume de stockage par des nappes souterraines. D'autres solutions nécessitant des travaux souterrains ont aussi été explorées. Enfin, la «Note 5 » discute de la pérennité de la production de chaleur de cogénération.

On notera enfin que, pour des raisons de pertes thermiques à la surface du volume de stockage, le stockage saisonnier de chaleur ne peut être envisagé que pour des quantités de chaleur à stocker supérieures ou égales à environ 0,04TWh ce qui correspond à une capacité de stockage suffisante

pour une population de 40.000 habitants. Mais ceci ne paraît pas trop contraignant car il paraît possible de mutualiser un stockage saisonnier de chaleur sur un rayon de 20 à 30 Km.

Le schéma présentée en fin de texte est une illustration d'une installation de chauffage utilisant la cogénération et dotée d'un stockage saisonnier pour une agglomération d'environ 500 000 habitants.

\*\* Etude réalisée par Shie Xin et Ronnie Knikker Cethyl INSA Villeurbanne.

Voir Schémas à la fin du texte

### Partie E -Analyse économique préliminaire.(On reprend le MWh comme unité d'énergie pour les coûts).(1TWh = 1Million de MWh)

La question économique est aussi au cœur de la problématique de la transition énergétique. Nous avons d'abord tenté de dimensionner une installation pour une agglomération de 0,5 million d'habitants de façon à se rendre compte de l'importance des équipements et de leurs caractéristiques principales. Nous avons ensuite chiffré les différents coûts (-Soutirage de la chaleur de cogénération ; - Transport de chaleur par caloduc sur une distance typique de 100 Km ; - Stockage saisonnier de chaleur ; Réseau de chaleur). On a supposé une consommation de 3,17 TWh/an dont 70% soit 2,22 TWh issus de la chaleur fatale ou de cogénération et 0,95 TWh issu de chaudières à combustibles (fossiles et renouvelables) et à puissance rapidement modulable.

#### **E1 -Les hypothèses retenues pour les coûts (Calcul pour 0,5 million d'habitants):**

→**Soutirage de chaleur** (modification des installations de turbinage) : Nous avons supposé que l'opérateur de la centrale électrique finançait cet investissement, moyennant une rémunération de **15 € par MWh délivré** sur son site de production. Nous avons supposé que le prix de revient de la chaleur fatale serait équivalent.

Pour les équipements (Caloduc, Stockage saisonnier de chaleur, réseau de chaleur pour la distribution) nous avons supposé que le coût annuel d'amortissement augmenté du coût annuel de fonctionnement était égal à 1/10 de l'investissement.

→ **Transport de chaleur sur 100 Km en continu sur un an de 2,22 TWh** issus de chaleur fatale ou de cogénération vers le lieu de consommation par caloduc à 2 tubes : **Investissement de 300 M€** (Estimation à partir de pipelines pour le pétrole) et H. SAFA (Réf. 1)

Coût annuel (amortissement sur 30 ans + Fonctionnement) = Investissement/10 = **30 M€** soit 30 M€ / 2,22\*millions de MWh = **13,5 € par MWh** de chaleur de cogénération et fatale.

→ **Stockage saisonnier de chaleur** pour 0,5 million d'habitants : **Investissement de 180 M€**, chiffre issu d'un coût de 10 000 €/puits stockant 35 MWh utiles. *Voir partie D*

Coût annuel (amortissement sur 30 ans + Fonctionnement) = Investissement/10 = **18 M€** soit 18 M€ / 2,22\*millions de MWh = **8,1€ par MWh** de chaleur de cogénération ou fatale. *Ici le coût est rapporté à la quantité de chaleur totale issue de la cogénération ou de chaleurs fatales.*

→ **Coût de la chaleur issue de chaudières (30% du total)** = **60 €/MWh**  
*avant distribution par Réseau de Chaleur*

→ **Coût de la chaleur de cogénération ou fatale (70% du total) sur site** = **36,6 €/MWh**  
*avant distribution par Réseau de Chaleur(15+13,5 +8,1)*

→ **Coût de distribution : Réseau de chaleur pour distribution : Investissement estimé à 300 M€** soit un coût annuel (amortissement sur 30 ans + Fonctionnement) = Investissement/10 = **30 M€**  
30 M€ / 3,17\*millions de MWh = **9,5 € par MWh** de chaleur (cogénération + fatale + Chaudières)  
*Ce poste est difficile à chiffrer précisément*

Voir aussi Réf (3) : « Valeur d'usage + gros entretien 6 €/MWh distribué » en 2006

<b>Coût moyen du MWh avant distribution par le Réseau de Chaleur</b> ( <sup>++</sup> en période d'amortissement)	$0,7 * 36,6 \text{ €} + 0,3 * 60 \text{ €} =$	<b>43,6 €/MWh <sup>++</sup></b>
<b>Coût moyen du MWh distribué au consommateur</b> ( <sup>++</sup> en période d'amortissement)	$43,6 \text{ €} + 9,5 \text{ €} =$	<b>53,1 €/MWh<sup>++</sup></b>

**Cette analyse, bien que préliminaire, laisse penser que l'opération est économiquement « jouable »**

## **E2 -Transposition au niveau national et évaluation approximative des investissements. :**

Les données établies pour une agglomération de 0,5 million d'habitants peuvent facilement être converties pour des équipements desservant 70 % de la population française prise égale à 65 Millions d'habitants.

**Ceci donne un investissement global de 0,8 Milliard d' € \*70%\*65 millions / 0,5 million = 72,8 Milliards d'€** pour l'opération dite **Usage massif de chaleurs de cogénération et fatales.**

Tenant compte d'impondérables nous avançons le chiffre de **100 Milliards d'€.**

Dans l'opération globale de réduction des dépenses énergétiques par un facteur 2,83 il faut aussi prendre en compte le coût de l'opération dite «isolation modérée, facteur de réduction de 1,5 ». Nous avançons pour l'«opération de réduction par un facteur 1,5», un investissement de l'ordre de **100 Milliards d'€.**

In fine, l'ensemble de l'opération (isolation modérée Facteur 1,5 et utilisation intensive de chaleur fatale ou de cogénération se monterait donc à **200 Milliards d'€**, à comparer à un coût avancé de 800 à 1000 Milliards d'€ pour la réduction par 4 des émissions de CO2 par le seul renforcement de l'isolation thermique pour l'habitat et le tertiaire.

## **Conclusion**

L'opération d'isolation des bâtiments (isolation modérée avec réduction de l'énergie pour chauffage par un facteur 1,5) combinée à l'utilisation intensive de chaleur fatale ou de cogénération, permet d'obtenir une réduction de la consommation effective d'énergie avec émissions de CO2 pour l'ECS et le chauffage de l'habitat et du tertiaire par un facteur équivalent à celui que l'on obtiendrait par réduction d'un facteur 4 pour les seules consommations du chauffage (par amélioration des qualités thermiques de l'ensemble du parc national de logements et de locaux à usages tertiaires).

L'intervention d'un stockage saisonnier de chaleur permet une utilisation optimale du potentiel d'énergies fatales. Pour la chaleur de cogénération, il permet aussi de se libérer de la contrainte d'une baisse importante de la production d'électricité pendant la période hivernale. Ceci a pour effet de rendre opérationnellement possible un usage optimal des chaleurs de cogénération et des chaleurs fatales. La perte de production électrique répartie sur toute l'année est faible et apparaît pouvoir être compensée par la reconversion d'une partie du chauffage électrique « direct » actuel grâce à l'utilisation de chaleur disponible via les réseaux de chaleur.

Naturellement une telle option pour transition énergétique nécessite d'importants investissements mais la rentabilité économique apparaît tout à fait intéressante Cette opération apparaît comme techniquement assez aisée à réaliser. La voie choisie, qui est fondée sur une isolation modérée **et** sur un usage important de chaleurs fatales et de cogénération, introduit une intéressante dynamique de flexibilité et d'optimisation des coûts.

D'un point de vue énergétique, le fait que la chaleur de cogénération ou chaleur fatale n'ait pas de coût énergétique notable est parfaitement justifié. En effet elle permet d'utiliser 70 TWh de chaleurs fatales actuellement rejetées dans l'environnement et 132 TWh de chaleur de cogénération. Comme indiqué ci-dessus la perte de production électrique associée à la cogénération paraît assez facilement compensable.

Ceci correspond donc globalement à une optimisation de notre efficacité énergétique qui concerne à la fois le secteur de la production électrique et celui de l'usage de chaleur. On remarquera enfin que l'exploitation du parc de production électrique est alors peu perturbée par cette fourniture de chaleur constante sur l'année grâce au stockage saisonnier de chaleur qui, rappelons le, permet l'utilisation de chaleurs fatales à leur potentiel maximal.

L'ensemble de cette proposition nous paraît à classer dans le registre d'un saut très significatif de l'efficacité énergétique, puisque 200 TWh sont ainsi « récupérés » annuellement à un coût très raisonnable et un coût énergétique quasi-nul. *Le rôle de l'Etat ne serait-il pas d'arbitrer entre les différentes solutions qui prétendent arriver au même facteur de réduction des émissions de CO2 pour le chauffage du bâti. Les enjeux économiques, de compétitivité, de déficit extérieur, de réchauffement climatique plaident clairement pour une solution optimisée.*

Une expérimentation du principe du Stockage Saisonnier de Chaleur peut être envisagée avec un nombre très restreint de puits, de même qu'une installation pilote complète avec une source de chaleur fatale proche d'une agglomération.

**Note 1 :** Un chiffrage réalisé par un groupe de travail de l'Académie des Technologies donne ce chiffre de 70 TWh/an d'énergies fatales utilisables qui proviennent des incinérateurs d'ordures ménagères et de sites industriels notamment la sidérurgie, les raffineries, les cimenteries etc. Ces chaleurs fatales sont généralement à débit constant sur l'année, et leur utilisation directe pour le chauffage ne peut se faire que sur 4 mois environ, ce qui réduit leur potentiel par un facteur 3. Le Stockage Saisonnier de Chaleur permet l'utilisation de ces chaleurs fatales à leur plein potentiel.

**Note 2 :** La baisse de consommation d'électricité pour le chauffage (la part de consommation électrique consacrée au chauffage, est estimée aujourd'hui à 20 %), entraînée par l'opération d'isolation (facteur 1,5) serait de l'ordre d'environ 20 TWh. A propos de la cogénération, un récent papier de H SAFA Ref (1) indique que pour un soutirage à 130°C, et pour un réacteur de type N4, le rapport entre l'énergie thermique soutirée et l'énergie électrique non produite est de l'ordre de 5 à 6. Voir Ref (1) H Safa.

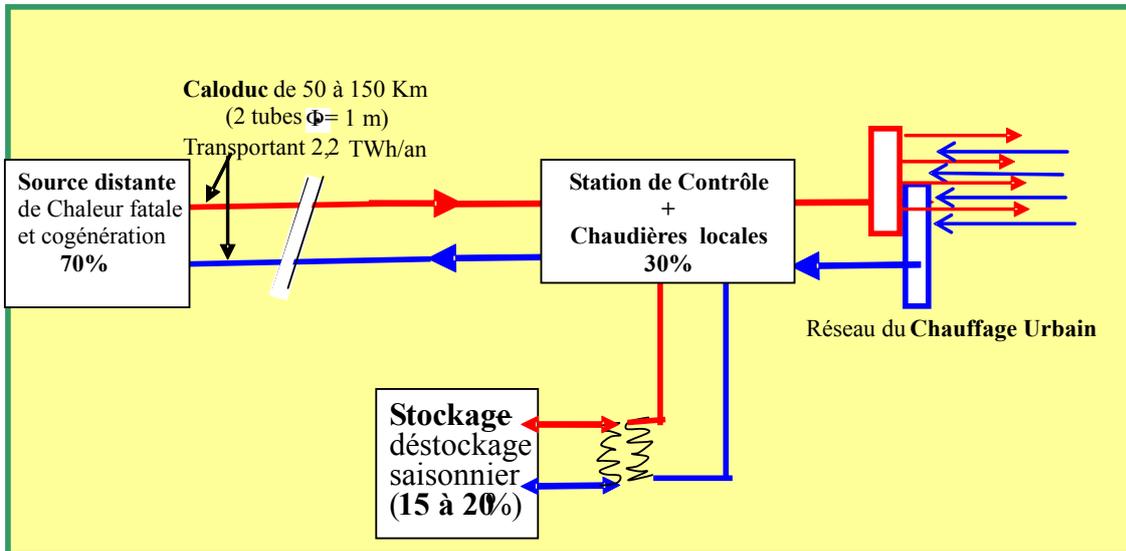
**Note3 :** Des informations complémentaires sur la technique du SSC sont disponibles et notamment les résultats des études réalisées par simulations thermiques qui montrent que ce stockage peut se faire plutôt facilement avec une efficacité de 80% de l'efficacité nominale. Par ailleurs, le stockage saisonnier doit être suffisamment important pour que les pertes thermiques par les parois extérieures du volume de stockage soient relativement faibles.

*Si la faisabilité semble quasiment assurée dans des sols granitiques, qu'en est-il de la faisabilité d'un SSC dans des sols de nature sédimentaire ? La principale difficulté semble être d'éviter le lessivage du volume de stockage par des nappes souterraines. Des techniques déjà employées pour les tunnels pourraient être utilisées.*

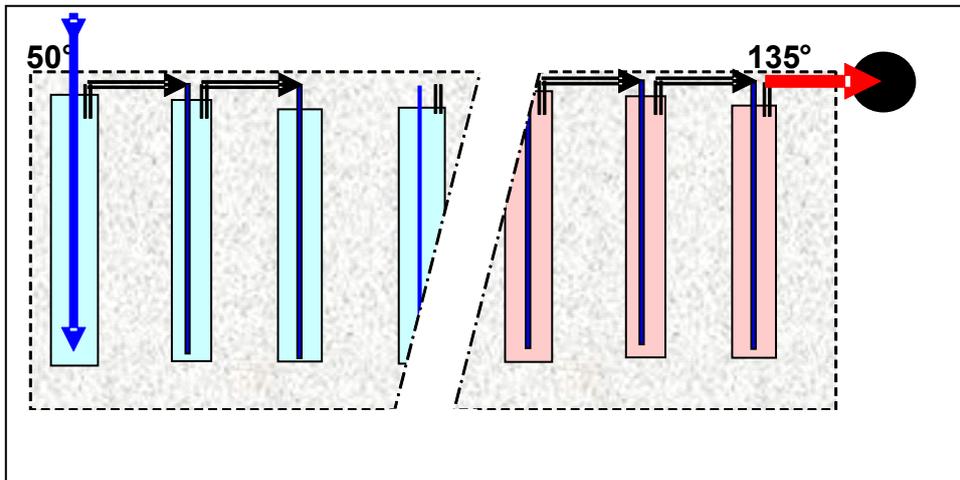
**Note 4 :** La procédure particulière utilisée pour le déstockage, consiste à augmenter au maximum la vitesse du déstockage (compte tenu des besoins réels de chaleur) quitte à avoir une température de l'eau sortante du stockage, inférieure à 135°C qui est celle du réseau de chaleur. Cette eau qui peut sortir du stockage à 70°C par exemple est alors réchauffée à 135°C avant utilisation par un complément d'apport d'énergie provenant des chaudières. Cette procédure permet ainsi d'avoir en fin de période de chauffage, l'ensemble du volume de stockage à 50°C. Ce retour annuel à 50°C dans tout le volume de stockage assure la reproductibilité des performances année après année. Les simulations montrent cette reproductibilité.

**Note 5 :** La ressource «chaleur de cogénération» est-elle durable ? La réponse est raisonnablement oui. En effet tous les scénarios énergétiques prévoient un développement de la production électrique. La production d'électricité par des centrales thermiques restera toujours très largement suffisante pour répondre aux besoins de chaleur de cogénération considérés ici.

**Fig 1** Synoptique des installations correspondant à un usage optimisé des chaleurs fatales et/ ou de cogénération qui sont distribuées par un réseau de chaleur



**Fig 2** Déstockage de chaleur  
Circulation du fluide caloporteur (eau) dans des puits de h=100m en série



Références:

- (1) H Safa : *Electrical Power and Energy Systems* 42 (2012) 553–559 Elsevier
- (2) Académie des technologies, Communication privée
- (3) Rapport du Conseil général des Mines 29 mars 2006 sur les réseaux de chaleur  
Rapport d'Henri Prévot Ingénieur général des Mines avec la collaboration de Jean Orselli :  
« Un réseau moyennement dense dessert 500 à 1000 logements par kilomètre, à qui il livre 6 à 12 GWh/an par kilomètre. Dans ces conditions le « coût d'usage » du réseau est d'environ 4 €/MWh, à quoi s'ajoute le gros entretien pour 2 €/MWh ».