



HAL
open science

Projet SECCO : Stockage Energie-Chaleur pour un Chauffage Optimisé

J.M. Loiseaux, J.L. Belmont, M. Fruneau, D. Heuer, M. Lieuvin

► **To cite this version:**

J.M. Loiseaux, J.L. Belmont, M. Fruneau, D. Heuer, M. Lieuvin. Projet SECCO : Stockage Energie-Chaleur pour un Chauffage Optimisé. 2006, 16 p. in2p3-00098376

HAL Id: in2p3-00098376

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00098376>

Submitted on 25 Sep 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

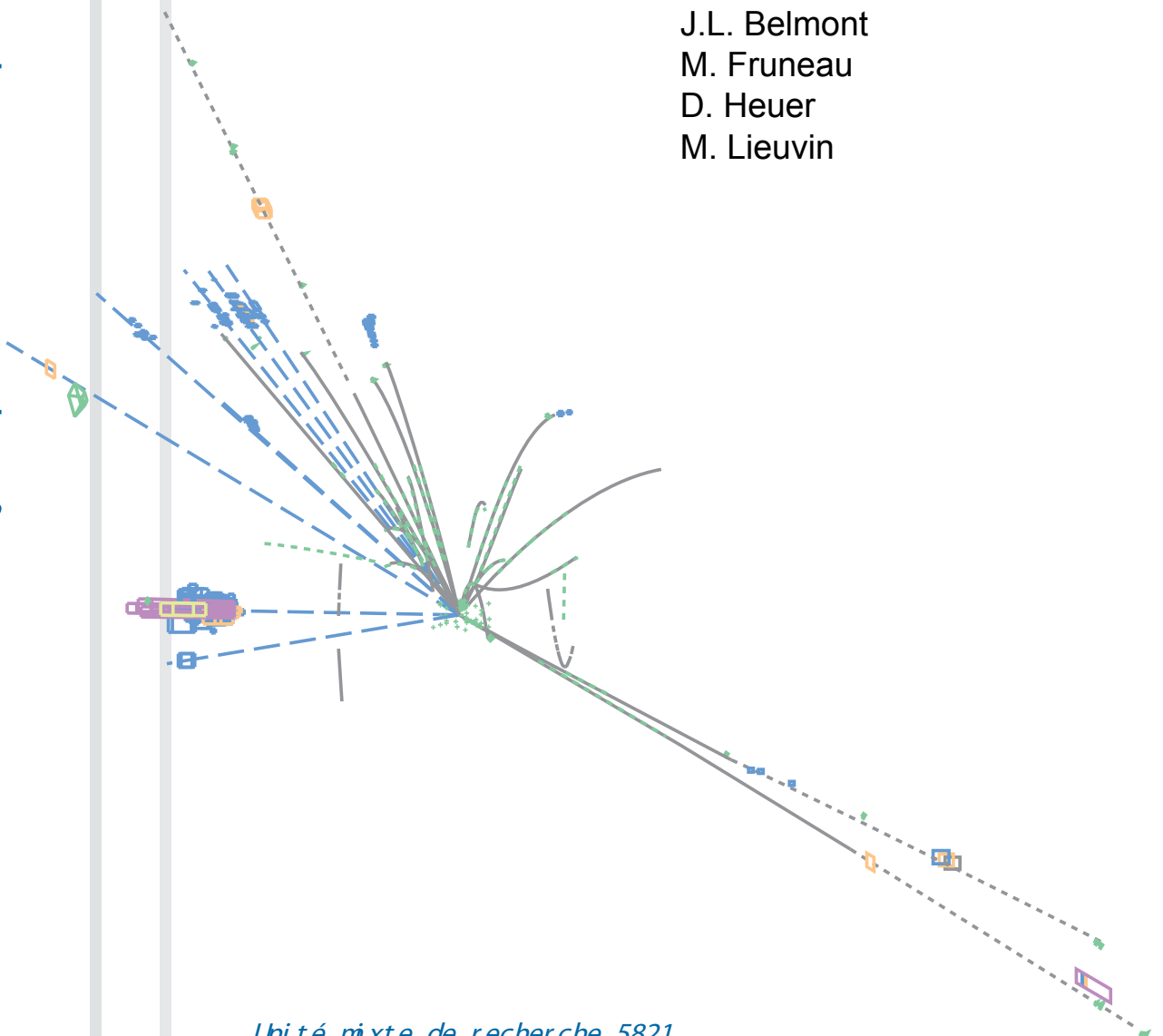
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Projet SECCO

Stockage Energie-Chaleur pour un Chauffage Optimisé

J.M. Loiseaux
J.L. Belmont
M. Fruneau
D. Heuer
M. Lieuvin



Projet SECCO

Stockage Energie-Chaleur pour un Chauffage Optimisé

J.M. Loiseaux, J.L. Belmont, M. Fruneau, D. Heuer, M. Lieuvin

Contact : J.M. Loiseaux tél. : 06 63 72 08 53 - D. Heuer tél. : 04 76 28 41 60

53, avenue des Martyrs 38026 GRENOBLE CEDEX Téléphone 04 76 28 40 00 Télécopie 04 76 28 40 04

Projet SECCO

Stockage Energie-Chaleur pour un Chauffage Optimisé

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble

Résumé

Idée de base du projet

Le projet SECCO est basé sur un stockage saisonnier de chaleur qui permet d'utiliser pour le chauffage, de la chaleur qui est rejetée dans l'atmosphère car produite hors saison de chauffe ou pas produite au moment précis du besoin de chaleur. L'utilisation de cette chaleur fatale permet d'éviter l'emploi d'énergies fossiles et génère donc des réductions notables d'émission de gaz à effet de serre. Dans le projet SECCO le stockage de chaleur se fait dans des grands réservoirs d'eau portée à 100 °C. L'énergie – chaleur tirée de 1 m³ d'eau passant de 100 °C à 14 °C correspond à 100 kWh, elle est utilisable directement entre 100 et 50 °C puis, à l'aide d'une pompe à chaleur, de 50 °C à 14 °C. Seuls des volumes de stockage supérieurs à quelques milliers de m³ permettent de limiter les pertes à quelques pour-cent avec une isolation raisonnable.

Les objectifs du projet

Ce projet vise à réduire d'au moins un facteur 2 la consommation d'énergie fossile pour le chauffage des bâtiments du Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (LPSC). Ce n'est pas son seul objectif, il vise à être une sorte de « maquettage » ou démonstrateur pour aider à concevoir d'autres installations basées sur le même principe. Par ailleurs, bien équipé en capteurs et en visualisation il est conçu pour être démonstratif, didactique et pourra être une plate forme d'essai. Il devra aussi pouvoir servir à des fins d'enseignement sur l'énergétique.

Objectif recherche : La recherche liée à ce projet a déjà démarré lors de la pré-étude ici présentée. Elle consiste d'abord à optimiser le système (capacité de stockage, pompe à chaleur, process et exploitation). Elle cherchera aussi à dégager les concepts généraux qui lui permettront de pouvoir s'adapter de façon rationnelle aux diverses sources de chaleur et à leurs disponibilités temporelles.

Réalisation proposée

Nous proposons de réaliser un stockage saisonnier de chaleur pour subvenir à la moitié des besoins de l'ensemble des quatre bâtiments de 10 000 m² de bureau et des 2 000 m² de hall et locaux techniques qui constituent le LPSC.

Très conscient des enjeux énergétiques mondiaux et des risques climatiques, le LPSC a décidé de s'intéresser à des initiatives concrètes pour réduire rapidement et de façon significative les émissions de gaz à effet de serre.

Le chauffage du laboratoire nécessite annuellement l'équivalent de 200 Tep en gaz. Le volume de stockage retenu est de 6 000 m³. Les sources de chaleur envisagées proviennent pour une partie d'un incinérateur d'ordures ménagères, gérées par le chauffage urbain de Grenoble – Agglomération, et pour une autre partie de l'énergie solaire avec des capteurs appropriés. Le budget de réalisation est estimé à 1 million d'euros avec une économie annuelle de 50 k€ réalisée sur l'achat du gaz au prix gaz de fin 2005.

Le LPSC ayant déjà assuré la complète maîtrise d'œuvre de nombreux projets dépassant largement la somme de 1 million d'euros pourrait être le maître d'œuvre de cette opération.

Déroulement du projet

La réalisation du projet est envisagée en trois phases, sur 4 ans :

- Etudes et caractérisation des installations existantes, consultation d'experts.
- Conception et construction d'une maquette.
- Réalisation du projet.

PROJET SECCO

Stockage d'Énergie-Chaleur pour un Chauffage Optimisé

Jean-Marie Loiseaux, Professeur ; Jean-Loup Belmont, Ingénieur ; Michel Fruneau, Ingénieur ; Daniel Heuer, Directeur de Recherche ; Marcel Lieuvin Ingénieur.

Avant propos

La majorité des installations de chauffage, aujourd'hui en France, utilisent les énergies fossiles pour produire les calories nécessaires pendant la saison froide. La source principale de calories est fournie par le pétrole sous forme de fuel, suivie par le gaz naturel qui a fait l'objet de campagnes de promotion importantes ces dernières années (et également d'augmentations de prix notables) et enfin par quelques survivances d'installations de chauffage au charbon.

Or, l'utilisation des énergies fossiles pour produire de la chaleur s'apparente à un gaspillage de ressources essentielles qu'il serait très important de préserver pour les usages où elles sont quasiment incontournables. Les avantages de ces formes d'énergie résident principalement dans leur coût relativement modéré (jusqu'à présent) et dans leur facilité de mise en œuvre.

Mais des difficultés pointent clairement à l'horizon. Elles sont maintenant assez bien connues, on peut citer :

- La fin prévisible des réserves dont on sait aujourd'hui qu'elles se mesurent en quelques dizaines d'années pour le gaz et le pétrole (un peu plus pour le charbon) au rythme de la consommation actuelle.
- Une demande accrue de ces richesses par les pays émergents à fort peuplement, en particulier la Chine et l'Inde, ce qui ne manquera pas d'entraîner mécaniquement une augmentation notable des prix et, à réserves constantes, une diminution du temps de disponibilité.
- La combustion de ces réserves fossiles produit des quantités très importantes de CO_2 , puissant gaz à effet de serre, dont la concentration dans l'atmosphère augmente vertigineusement depuis le début de l'ère industrielle et dont on commence à mesurer les effets probablement dévastateurs sur le climat terrestre (à noter que la combustion du charbon, qui produit presque exclusivement du CO_2 , est plus nocive que celle du pétrole ou du gaz, or le charbon constitue la réserve la plus abondante).

L'utilisation des combustibles fossiles pour le chauffage devrait être limitée autant qu'il se peut ; dans nos régions tempérées, plusieurs pistes existent pour parvenir à ce résultat :

- Augmenter l'isolation thermique des locaux et des habitations : les solutions techniques existent et devraient être appliquées systématiquement à tous les locaux neufs. Mais il n'est pas pensable de raser le parc existant avec lequel il faut bien continuer à vivre. C'est donc une solution dont la mise en œuvre ne peut être très rapide.
- Mieux gérer nos flux d'énergie, stocker la chaleur en excès à certaines périodes, en particulier l'été, pour la restituer pour le chauffage des bâtiments à la saison froide.

C'est cette seconde possibilité qui est explorée ici, appliquée à une structure existante, le Laboratoire de Physique Subatomique et Corpusculaire (LPSC) installé depuis une quarantaine d'années dans le « polygone scientifique » de Grenoble, entre le CENG et l'ILL.

Si ce projet voit le jour, il se veut expérimental, démonstratif et didactique. En effet, si le fonctionnement s'avère satisfaisant et les économies d'émission de CO₂ substantielles (ce que nous entendons bien démontrer), les principes de cette réalisation pourront par la suite facilement être étendus et appliqués à des immeubles ou groupes d'habitations existants.

1. Le Laboratoire de Physique Subatomique et Corpusculaire (LPSC)

Le LPSC, autrefois connu sous le sigle ISN (Institut des Sciences Nucléaires), situé au N° 53 de l'avenue des Martyrs à Grenoble a été construit dans les années 1960, dans la suite des installations déjà existantes du CENG et des tout nouveaux bâtiments du CNRS. En continuant vers le confluent du Drac et de l'Isère, le réacteur de l'ILL et le synchrotron ESRF, sont venus par la suite compléter ces installations de recherche scientifique très performantes de la région grenobloise.

Conçu à l'origine pour l'étude et la recherche académique en physique nucléaire, l'ISN comprenait de nombreux bureaux, ateliers et laboratoires, deux très grands halls de montage et des salles de cours pour l'enseignement de la physique et, en particulier l'enseignement de la physique nucléaire et des techniques associées dans le cadre de l'enseignement de troisième cycle du « génie atomique ». Le Laboratoire possédait également un bâtiment composé d'une casemate blindée de grande taille qui abritait un cyclotron destiné à la production et l'accélération de protons de 60 MeV et un hall d'expérience pour l'utilisation de ces protons.

Dans les années 1970, le cyclotron à protons a été modifié pour permettre l'accélération des ions lourds, puis un post-accélérateur constitué d'un second cyclotron lui a été adjoind, l'ensemble constituant SARA (Système Accélérateur Rhône-Alpes) qui a fonctionné avec succès, attirant de nombreuses équipes de recherche françaises et étrangères, jusqu'en 1998 où l'exploitation a cessé. Depuis, une partie des équipements a été démontée pour laisser la place à d'autres expériences, mais le cyclotron et le post-accélérateur demeurent et des projets de création d'un musée de la science nucléaire en Rhône-Alpes sont évoqués.

Ces vastes locaux, conçus à l'époque du pétrole abondant, éternel et très bon marché sont munis de vastes baies vitrées à vitres simples et ne comportent aucune isolation thermique particulière. La surface totale des locaux à chauffer s'élève à 12 000 m².

Le chauffage central est classique : la centrale de chauffe est équipée de chaudières fonctionnant au gaz naturel, l'eau est chauffée à 80 °C et revient à 72 °C ($\Delta t = 8$ °C), des vannes trois voies permettent de réguler la température des radiateurs en fonction des besoins et limitent leur température à un maximum de 65 °C.

Un paramètre important pour la définition d'une installation de chauffage est le nombre de degrés x jours ($^{\circ}\text{J}$), définis comme suit :

$$^{\circ}\text{J} = (18\text{ }^{\circ}\text{C} - \text{Température ext. Moyenne journalière}) \times \text{Nbr de jours où } T \leq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$$

A Grenoble, $^{\circ}\text{J} = 2400$

Les chaudières sont en service pendant 15 h, de 4 à 19 h, de 160 à 190 jours par an, selon la clémence du temps à l'automne et surtout au printemps. La réduction nocturne des chaudières entraîne un Δt de l'ordre de 3 $^{\circ}\text{C}$ en moyenne.

Aux jours les plus froids, les chaudières consomment 20 MWh/jour et la consommation annuelle moyenne se monte à 2 000 MWh pour un coût de 80 000 € en 2005, hors maintenance et entretien. Ce budget pèse très lourd sur le budget de fonctionnement du laboratoire et deviendra rapidement insupportable si le coût du gaz continue de croître au rythme actuel.

Pour nous rapprocher d'unités plus usuelles en énergie, le chauffage du LPSC consomme annuellement 200 Tep (Tonnes équivalent pétrole), pour un total de 50 MTeP pour la production de chaleur de la France entière et produit de l'ordre de 390 tonnes de CO_2 .

Pourquoi le LPSC est-il un bon candidat pour une installation de chauffage expérimentale innovante ?

- Les bâtiments constituant le laboratoire, peu ou pas isolés, munis de vastes baies vitrées à vitres simples sont assez représentatifs du parc immobilier moyen en France. Des efforts d'isolation sont prévus, mais ils ne peuvent avancer que lentement pour des raisons de budget (le budget total disponible étant constant, l'augmentation du prix du gaz a même pour résultat paradoxal de freiner les travaux d'isolation).
- La surface totale des locaux (12 000 m^2) correspond environ à des ensembles d'habitations abritant 400 à 500 personnes, soit l'équivalent d'un groupe d'immeubles ou un petit village.
- Le LPSC a la chance de disposer d'espaces disponibles importants susceptibles de recevoir des installations techniques volumineuses.
- Enfin, bien qu'évidemment non spécialisé dans le chauffage, le LPSC a l'expérience et la capacité technique lui permettant de mener à bien des réalisations novatrices et d'envergure. Il l'a démontré dans le passé par la réalisation de l'ensemble SARA et, plus récemment, par une participation notable à la construction du détecteur ATLAS au CERN.

Le projet propose d'utiliser l'installation de chauffage existante avec très peu de modifications pour chauffer les bâtiments tels qu'ils sont. Ceci n'interdit pas, bien entendu, de poursuivre les travaux d'isolation à un rythme conditionné par le budget.

Une autre donnée à prendre en compte est l'existence à Grenoble de la Compagnie de Chauffage qui alimente une bonne partie de la ville en chauffage urbain et, en particulier, comme nous le verrons dans la suite, la plus grande partie des Laboratoires existants dans le « polygone scientifique » ou est implanté le LPSC.

2. Comment stocker la chaleur ?

L'idée, on l'a vu, est de collecter la chaleur en excès l'été pour la restituer pour les besoins du chauffage à la saison froide. Plusieurs solutions ont été envisagées :

- Stockage dans le sol : c'est une des solutions de chauffage proposée par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) aux particuliers. On sait en effet que la température du sous sol varie peu avec les saisons, à 3 m de profondeur, la température est même en opposition de phase avec la température de surface (mais avec une amplitude 23 fois

moindre), il suffit de disposer un réseau de tubes avec circulation d'eau à environ 1m de profondeur pour collecter les calories. Cependant, ces calories sont à basse température (environ 13 °C dans les sous sols du LPSC), inutilisables telles qu'elles pour le chauffage du laboratoire qui, nous l'avons vu, utilise de l'eau atteignant 80°C. Les pompes à chaleur utilisées pour les habitations individuelles permettent d'élever la température de 30 °C avec un rendement (COP) supérieur ou égal à 3, ces pompes permettent en conséquence de disposer d'eau à 45-50 °C, température suffisante pour un chauffage par le sol, par exemple.

Cette solution n'est pas applicable au LPSC car la surface de collecte nécessaire serait comprise entre 20 000 et 25 000 m², la température de l'eau serait trop basse pour s'adapter à l'installation existante.

- Stockage dans une pyramide de terre (de sable, de graviers...) : c'est une possibilité, mais le volume nécessaire pour stocker la même quantité d'énergie est presque le double du volume d'eau, pour le même Δt . En outre, ce stockage nécessiterait un maillage important de tubes (1 tube tous les 50 cm, de 50 à 100 km de tubes au total) pour récupérer les calories. Les problèmes de corrosion seraient importants, en cas de fuite sur un tube, une intervention serait problématique.
- Stockage dans l'eau : Comparée à de nombreux autres matériaux, l'eau présente de nombreux avantages : abondante et (relativement) bon marché, l'eau a une chaleur spécifique élevée (voir table 1) et une mise en œuvre simple. La seule limitation est la température de changement de phase de 100 °C, à ne pas dépasser pour demeurer à la pression atmosphérique.

	kWh / m ³ C° ($\rho \cdot c$)	kWh / kg C° (c)	Densité (ρ) kg/l
Eau	1.161	1.161 10 ⁻³	1
Sable	0.51	0.22 10 ⁻³	2.3
Argile	0.64	0.27 10 ⁻³	2.4
Calcaire	0.68	0.24 10 ⁻³	2.8
Sol	≤ 1.05	≤ 0.5 10 ⁻³	2,0
Matière sèche du sol		0.19 à 0.23 10 ⁻³	

Table 1 : Capacités calorifiques de quelques matériaux usuels.

C'est donc naturellement vers le stockage des calories dans de l'eau que s'est orienté cet avant projet. Pour un Δt utile de 85 °C (entre 100 °C, température maximum et 15 °C, température minimum envisagée si toutefois elle peut être atteinte), 1m³ d'eau emmagasine ou restitue pratiquement 100 kWh. A titre d'exemple un réservoir de 10 000 m³ permettrait, dans ces conditions de stocker 1 000 MWh soit 50% de la consommation annuelle d'énergie pour le chauffage du LPSC.

3. Quelles sources de chaleur utiliser ?

Les sources de chaleur disponibles en été sont multiples et leur utilisation dépendra généralement du lieu d'implantation de l'installation envisagée.

Pour Grenoble, les sources envisageables sont au nombre de trois :

- Les sources industrielles : certains processus industriels fonctionnent en permanence et rejettent tout au long de l'année de grandes quantités d'énergie sous forme de chaleur ; c'est par exemple le cas des cimenteries.
- Le chauffage urbain : Le chauffage urbain (CU) alimente ses abonnés via un réseau d'eau sous pression à 185 °C muni d'échangeurs de chaleur. La température de retour est de 80 °C. 775 000 MWh sont produits annuellement dont une partie (270 000 MWh) par l'incinérateur des ordures ménagères d'ATHANOR qui fonctionne en permanence. En plus de la chaleur, ATHANOR produit également 21 000 MWh d'électricité par an. La puissance de l'incinérateur est de 45 MW, soit plus de 1 000 MWh par jour. Une partie de cette énergie est turbinée pour produire de l'électricité, mais une partie est rejetée, principalement en été, par la cheminée de l'incinérateur. Les responsables du CU rencontrés se sont montrés sensibles à une possibilité de stocker une partie de cette énergie perdue. Notons au passage que, même en période de chauffage, une partie de l'énergie produite est perdue car, pour des raisons d'inertie il n'est pas possible d'ajuster finement en temps réel la production et la demande, nous verrons par la suite que l'utilisation de cette énergie présente un intérêt aux yeux des responsables du CU. Une boucle d'eau chaude alimente le polygone scientifique (CENG, ILL, ESRF), les travaux de raccordement du LPSC seraient par conséquent modestes.
- Le solaire : Les statistiques d'ensoleillement moyen dans la région Grenobloise sont connues et indiquent l'énergie reçue par m² tout au long de l'année (la figure 1 donne, en fonction de la date et de l'inclinaison des capteurs, la moyenne journalière prise sur plusieurs années de la puissance solaire globale, rayonnement direct plus diffus) reçue à Grenoble sur un capteur fixe pour quelques inclinaisons sur l'horizontale. L'énergie solaire (rayonnement direct avec poursuite) reçue à Grenoble par m² est de l'ordre de 900 kWh par an. En supposant un rendement de capteurs solaires réaliste de 60%, c'est plus de 500 kWh/m²/an qui peuvent être collectés. Pour illustrer l'exemple évoqué précédemment, 1 000 m² de capteurs solaires permettraient de collecter 500 MWh d'énergie solaire sur les 1 000 MWh de capacité thermique d'un réservoir de 10 000 m³.

Une considération également importante est la pérennité des sources de chaleur choisies car, bien entendu, l'installation doit être conçue pour durer.

La solution proposée pour le chauffage du LPSC ferait appel à un mixte de chauffage urbain et de solaire. La proportion relative de solaire reste à déterminer, elle pourrait être progressive en fonction des résultats obtenus et participerait au côté expérimental et à l'aspect démonstratif du programme.

Une négociation devra être menée avec le CU pour l'acquisition bon marché de l'énergie rejetée par ce dernier en été et pendant les heures creuses.

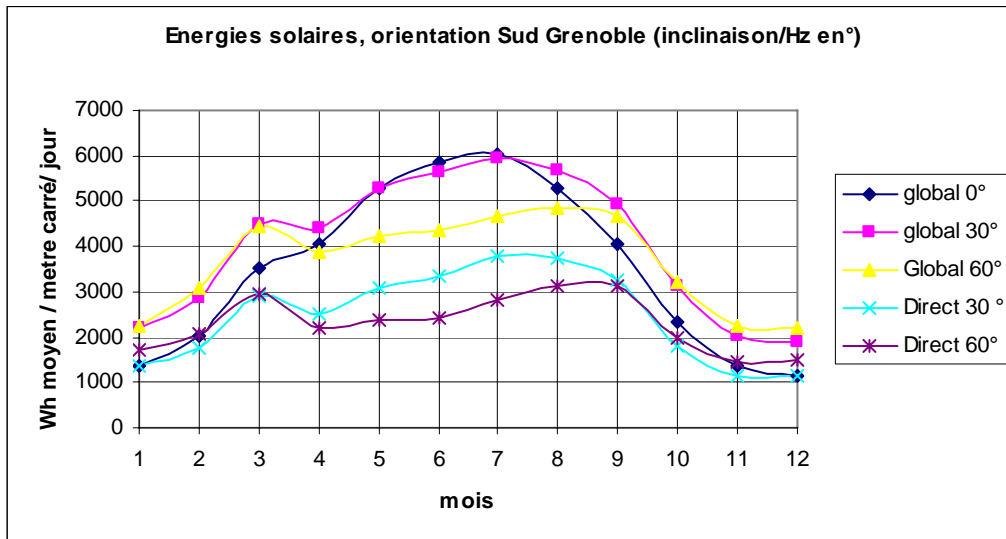


Fig 1 : énergie solaire moyenne reçue à Grenoble.

Dans un souci de simplicité, nous préconisons d'abandonner le gaz et de limiter les sources d'énergie pour le chauffage au CU et au solaire ce qui allègera d'autant le budget de maintenance.

4. Stockage saisonnier ou hebdomadaire ?

L'idée de départ, qui paraissait la plus naturelle, consistait en un stockage saisonnier qui permettait de stocker l'énergie solaire ou la chaleur disponible l'été pour la restituer en hiver. On a vu précédemment qu'une capacité de 10 000 m³ d'eau permettait théoriquement de fournir la moitié des besoins de chauffage du LPSC, à condition toutefois de disposer d'une isolation suffisante du réservoir pour garder les calories sur une période de plusieurs mois et de savoir utiliser la totalité des calories stockées dans l'eau jusqu'à une température basse de 15 °C, ce qui nécessite l'usage d'une pompe à chaleur.

Au cours des échanges avec les responsables de la compagnie de chauffage, il est apparu que ces derniers étaient peu réceptifs à cette solution de stockage à long terme mais qu'ils étaient au contraire intéressés par une capacité de stockage à court terme - typiquement hebdomadaire - qui permettrait dans une certaine mesure d'effacer les pointes de besoins.

En effet, la situation spécifique au polygone scientifique est que les pointes de consommation sont fournies par une centrale au fuel du CENG, productrice de gaz à effet de serre et probablement d'un coût de fonctionnement élevé.

Les responsables de la compagnie de chauffage verraient ainsi un grand intérêt à l'existence d'une capacité de stockage qui pourrait leur permettre de ne pas utiliser la centrale au fuel.

Ces deux conceptions sont en fait complémentaires car le stockage hebdomadaire répond à un besoin spécifique local et ne répond pas au souhait de démonstration exprimé en préambule. Il nous est apparu souhaitable de proposer une solution mixte qui, pour une part conserve la capacité de démonstration de l'utilisation de l'énergie solaire et, pour une autre part, permette de lisser l'apport de chaleur de chauffage urbain à l'échelle de la semaine.

Un compromis envisageable nous semble être le suivant :

- Capacité de stockage totale : **6 000 m³** dont :
 - **3 000 m³** de stockage hebdomadaire (suffisant pour le chauffage du LPSC pendant la semaine la plus froide,
 - **3 000 m³** de stockage saisonnier alimenté pour moitié par le solaire, ce qui demande **300 m²** de panneaux solaires, et pour moitié par les excédents de chauffage urbain.

On note que la capacité totale de stockage est réduite par rapport au tout saisonnier (6 000 m³ contre 10 000 m³), c'est normal puisqu'une partie de la capacité est régulièrement rechargée ; par ailleurs, il est clair que ces chiffres sont encore putatifs et demandent à être affinés.

5. Solutions techniques

La solution proposée nécessite un stockage de **6 000 m³** d'eau. Si une solution mono cuve était retenue, cette dernière pourrait être un cylindre de 10 m de hauteur et de 28 m de diamètre. Pour le stockage saisonnier, une attention toute particulière doit être portée à l'isolation thermique, pour que les pertes par échange avec l'atmosphère soient inférieures ou égales à 10% en 6 mois, le coefficient d'isolation thermique K (W/m²/s) doit être inférieur à 0,1, ce qui est atteint par 40 cm de laine de verre ou de polyuréthane expansé. Pour le stockage hebdomadaire, l'isolation peut être réduite, 10 cm d'isolant suffiraient.

Deux variantes ont été examinées pour la réalisation du réservoir de stockage :

- L'usage d'une cuve unique,
- Un stockage fractionné faisant intervenir un certain nombre de cuves de capacité réduite, installées dans un bâtiment unique isolé, et réunies par un dispositif de tuyaux et de vannes.

C'est cette dernière solution qui est préconisée car, comparée à la cuve unique, elle présente de nombreux avantages :

- La sécurité : bien que l'hypothèse de l'explosion d'une cuve en acier ou béton soit fortement improbable, 6000 m³ d'eau bouillante nécessitent des mesures de sécurité notables que la préfecture exigeraient et qui obéneraient sérieusement le coût, voire la faisabilité du projet.
- L'exploitation : Selon les périodes de chauffe, il sera souhaitable d'utiliser de l'eau plus ou moins chaude ; en particulier il sera sans doute souhaitable de garder de l'eau très chaude pour les périodes les plus froides.
- La modularité permettra de bien faire la distinction entre l'apport saisonnier et l'apport hebdomadaire, elle permettra l'évolutivité de l'installation, par exemple vers plus de solaire, et sa démonstrabilité.
- La nécessité d'utiliser toute l'énergie stockée, jusqu'à une température de l'eau aussi basse que 15 °C, inutilisable telle qu'elle pour le chauffage, nécessite la présence d'un réservoir tampon maintenu à température élevée et d'une pompe à chaleur. Ce réservoir tampon pourrait avantageusement être constitué d'un ou plusieurs modules de l'ensemble de stockage (l'usage d'une pompe à chaleur doit permettre en effet de descendre la température de l'eau jusqu'à 15 °C. En effet, sans PAC, la température minimum serait de l'ordre de 40° ce qui diminuerait de 30% la capacité de stockage à volume égal).

La figure 2 montre le schéma de principe général de l'installation proposée utilisant un réservoir tampon et une pompe à chaleur.

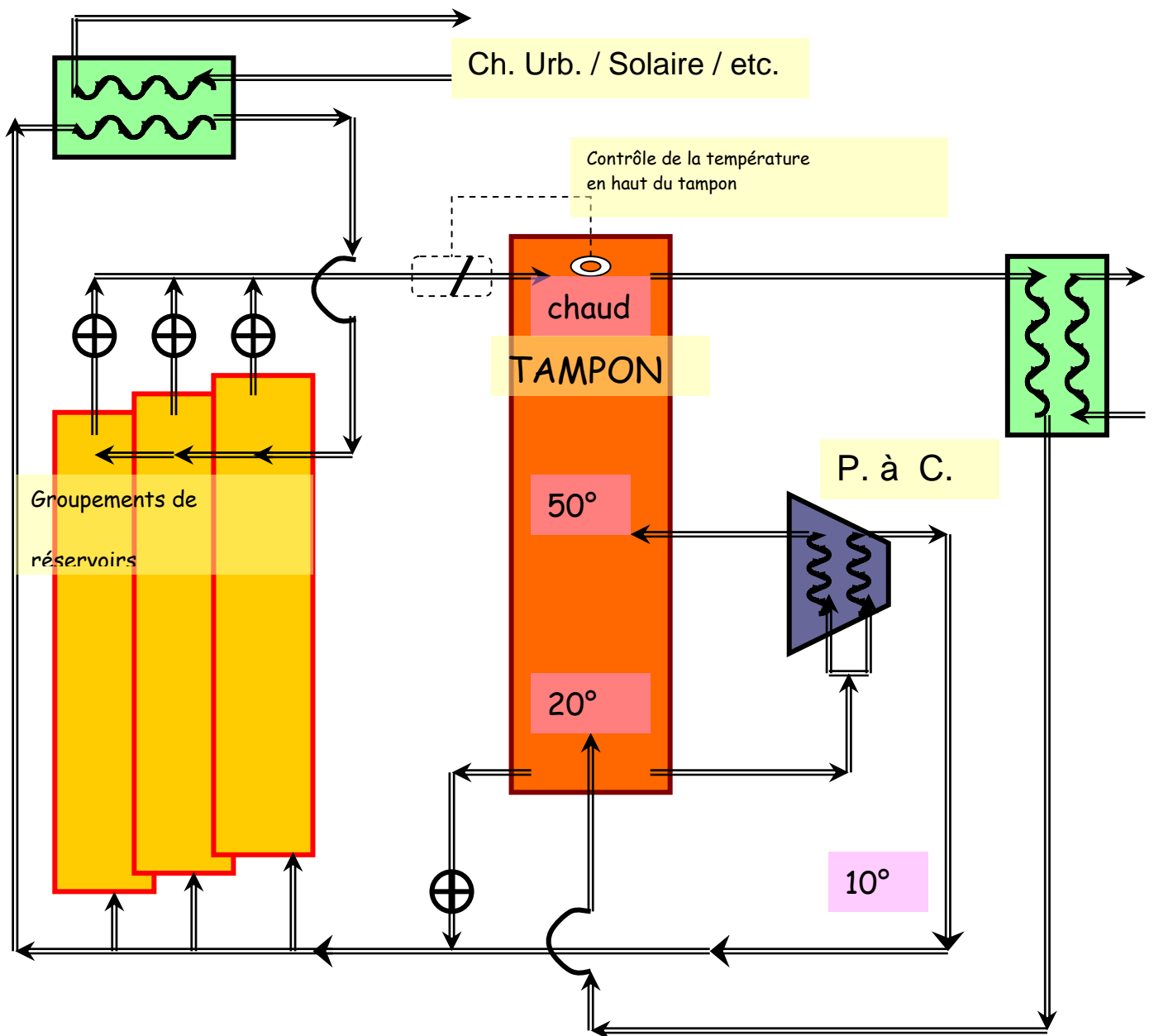


Fig 2 : schéma de principe du stockage de chaleur.

Réalisation de la cuve de stockage : Le principe d'une cuve monolithique étant abandonné pour les raisons évoquées précédemment, on a recherché s'il existait des solutions industrielles pour la réalisation de cuves fractionnées.

Des entreprises (ex : ALAMANS à Voiron) commercialisent par exemple des cuves en acier de 3 m de diamètre, à fond bombé et de longueur ajustable pouvant atteindre une trentaine de mètres. Une cuve de 3 m de diamètre et de 14,2 m de haut offre un volume d'environ 100 m³ pour un prix (indicatif) de 10 k€. Il faudrait 60 cuves identiques pour atteindre 6 000 m³ et le prix serait au total certainement inférieur à 600 k€ (à cause des effets de série et de la mise en concurrence de plusieurs constructeurs potentiels).

Ces cuves, fabriquées en usine, sont transportables par la route ce qui simplifie la mise en oeuvre du chantier sur place.

Placées verticalement et au contact les unes des autres, entourées d'une structure légère recevant l'isolation, on aboutirait par exemple à une structure parallélépipédique de 30 m x 20 m et de 15 m de haut.

Les risques de rupture d'une cuve individuelle étant négligeables, on peut considérer que le risque de rupture simultanée de plusieurs cuves est nul. Dans ces conditions la capacité du bassin de rétention est très limitée puisqu'il lui faudrait contenir seulement 100 m³. Un socle en béton supportant les 60 cuves et muni d'un rebord de quelques dizaines de cm serait suffisant.

Chaque cuve serait munie à la partie supérieure d'un bouchon démontable (pouvant faire office de trappe de visite) et muni de 2 tubes permettant d'atteindre le fond et la partie supérieure de la cuve et d'autant de sondes de température.

Un groupement de telles cuves par 10 en parallèle permettrait par exemple de constituer des « unités » indépendantes de 1 000 m³ chacune. C'est une solution qui peut être envisagée (et financièrement optimisée) mais elle doit être mise en concurrence avec, par exemple, la construction in situ de 6 cuves de capacité 1000 m³ chacune ou davantage.

Le fractionnement permet également de différencier une partie du stockage qui recevrait son énergie du CU de l'autre partie qui serait uniquement solaire. Ceci devant permettre à terme de dresser un bilan économique de l'utilisation du solaire.

Capteurs solaires : Le marché des capteurs solaires est en pleine expansion pour répondre, en particulier, à la demande des propriétaires de maisons individuelles qui font de plus en plus appel au solaire pour la production de l'eau chaude sanitaire, pour le chauffage de l'eau des piscines et des bassins et également, encore dans une faible proportion, pour le chauffage individuel. En 2005, ce sont plus de 100 000 m² de panneaux solaires qui ont été installés en France, c'est dire si le marché est actif et le choix de constructeurs étendu.

Les capteurs solaires sont des machines thermiques auxquelles est associé un rendement.

- 3 types de capteurs existent :
 - paraboliques à poursuite (ne captent que le rayonnement direct),
 - plans,
 - évolués (semi paraboliques et sous vide)

Le rendement est fonction du Δt entre le fluide du capteur et l'air ambiant à cause du rayonnement et de la conduction à travers le verre. Pour des capteurs plans simples, il atteint 80% pour un $\Delta t = 0$ (début du chauffage) et chute vers 50% pour $\Delta t = 75$ °C. (Voir figure 3)

COMPARAISON capteurs plans et a concentration pour 3 irradiances globales

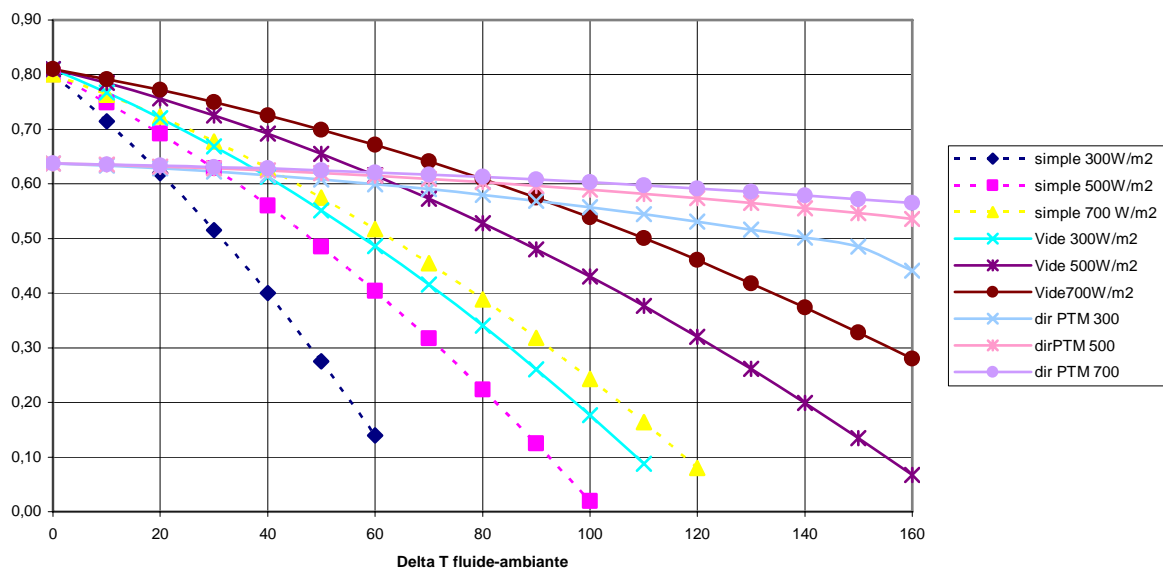


Fig. 3 : Rendement comparé des capteurs solaires.

Les capteurs paraboliques à poursuite zénithale paraissent a priori bien adaptés à nos besoins. Ils permettent en effet d'atteindre une température élevée du fluide même avec un faible ensoleillement et ils peuvent au contraire être rendus pratiquement inopérants lorsqu'on ne désire plus recevoir d'énergie (c'est un paramètre à considérer car avec 300 m² de capteurs installés, c'est une puissance de l'ordre de 300 kW qui est délivrée aux heures les plus ensoleillées et qu'il faut savoir évacuer en cas de nécessité).

De tels capteurs sont, par exemple, fabriqués par la firme allemande SOLITEM GmbH à Aachen pour les besoins d'un hôtel en Turquie. Le fluide caloporteur est de l'eau sous pression dont la température atteint, pour cette application particulière, 180 °C en sortie.

Le fluide des panneaux doit être mû par une pompe de circulation et cède ses calories au réservoir au travers d'un échangeur.

A noter que le toit du bâtiment de stockage aurait la superficie suffisante pour recevoir les panneaux solaires.

Réservoir tampon : Le projet nécessite de pouvoir utiliser toute l'énergie stockée sous forme de chaleur dans le réservoir de stockage jusqu'à la température la plus basse atteinte par ce dernier, à savoir 15 °C. Cette température est trop basse pour être utilisable pour le chauffage, il apparaît donc nécessaire de prélever les calories de l'eau stockée tout en disposant d'eau chaude dont la température pourra varier, par exemple de 95 °C pour les périodes très froides à 45-50 °C pour les périodes où le chauffage est réduit.

Ceci est possible en utilisant un réservoir tampon alimenté par une pompe à chaleur qui puise les calories dans le réservoir principal. La gestion de cet ensemble pompe à chaleur/réservoir tampon doit cependant être précautionneuse car une pompe à chaleur n'a un bon rendement (de l'ordre de 4) que si le Δt est inférieur ou égal à 40 °C.

- Dimensionnement du réservoir tampon : le réservoir tampon doit, par exemple, pouvoir fournir la totalité de l'énergie de chauffage requise pour une journée entière à la période la plus froide, soit 20 MWh. Si cette énergie résulte d'un Δt de 35 °C de l'eau du réservoir tampon (100 °C en début de journée, 65 °C, température maxi des radiateurs en fin de journée), le réservoir tampon doit avoir un volume d'environ 500 m³. Ce réservoir tampon sera constitué par une partie des cuves constituant le stockage avec un système de vannes particulier et,

éventuellement une légère isolation thermique par rapport aux cuves voisines (pas nécessairement obligatoire dans la mesure où la différence de température est limitée à 40 °C et le temps limité à une journée).

- Dimensionnement de la pompe à chaleur (PAC) : toujours dans les mêmes hypothèses : 20MWh en une journée, en supposant un rendement de PAC de l'ordre de 4 et en utilisant la PAC toute la journée, on obtient une puissance électrique de la PAC de 210 kW. Une PAC de cette puissance n'est pas disponible sur catalogue, les PAC usuellement commercialisées (par CIAT, par exemple) conviennent au chauffage individuel et ont une puissance de quelques kW à quelques dizaines de kW. Cela ne pose cependant pas de problème particulier car il existe des entreprises capables de construire ces équipements à la demande.

A noter cependant que les pompes à chaleur usuelles ne permettent pas d'élever la température de l'eau à plus de 50 °C ; les températures supérieures, nécessaires pour le chauffage en période froide demanderont donc un apport de calories provenant soit du stockage tant que ce dernier contiendra de l'eau très chaude, soit du chauffage urbain.

L'opération de l'ensemble serait facilitée si l'installation de chauffage du LPSC pouvait se contenter d'eau moins chaude. Ceci serait possible en accroissant l'efficacité des radiateurs existants par un carénage et une circulation d'air forcée au moyen de petits ventilateurs électriques ; de telles réalisations ne devraient pas excéder quelques dizaines d'euros par radiateurs.

Une étude économique détaillée est nécessaire pour trancher entre ces options.

6. Investissement, fonctionnement et amortissement

On se place dans les hypothèses suivantes : les cuves de stockage de 6 000 m³ ont, on l'a vu, une capacité de stockage de 600 MWh soit 30% de la consommation annuelle d'énergie pour le chauffage du LPSC. On suppose qu'une partie de cette énergie : 150 MWh sera achetée l'été au chauffage urbain, à un tarif très préférentiel, 150 MWh provenant des capteurs solaires. Pendant la période de chauffage, le complément de la chaleur nécessaire, soit 1 700 MWh (2000 - 300) seraient acquis au chauffage urbain au tarif en vigueur. (Ces chiffres sont cependant à optimiser dans la mesure où les courbes d'ensoleillement montrent que pendant la période de chauffage d'octobre à mai, la puissance solaire incidente demeure non négligeable et donc les capteurs solaires continuent d'apporter de l'énergie au stockage ; le solaire pourrait procurer au total environ 10% de l'énergie de chauffage au laboratoire).

Une première estimation du coût total d'investissement de cette installation se monte à 1 M€ se répartissant comme suit :

- | | |
|---------------------------------------|---------|
| • Cuves de stockage et bâtiment : | 0,6 M€ |
| • Capteurs solaires : | 0,12 M€ |
| • Pompe à chaleur : | 0,10 M€ |
| • Raccordements, vannes, échangeurs : | 0,08 M€ |
| • Système de pilotage : | 0,10 M€ |

Le coût de fonctionnement et de maintenance de l'installation est estimé hors main d'œuvre (ou plus exactement sans augmentation de la M.O. existante aujourd'hui au LPSC pour la gestion de l'installation en place).

Le coût de fonctionnement et de maintenance de l'installation est estimé à un maximum de 20 k€ par an auquel il faudra ajouter le prix de l'énergie facturée par le chauffage urbain.

- Consommation électrique de la PAC : 8 k€
- Consommation des pompes de circulation : 2 k€
- Entretien et maintenance de la PAC : 6 k€
- Entretien des vannes et échangeurs 4 k€

Le prix d'achat de l'énergie au chauffage urbain n'a pas été chiffré à ce stade, SECCO devrait pouvoir bénéficier de tarifs très attractifs de la part du chauffage urbain de Grenoble qui pourrait par ailleurs prendre à sa charge une part non négligeable du coût de l'installation.

Pour que l'installation soit acceptée et finalement se réalise, il faut que le coût annuel de fonctionnement supporté par le LPSC soit immédiatement réduit de 30 à 40 % et que la pérennité de l'approvisionnement lui procure une augmentation continue du gain par rapport au système actuel de chauffage au gaz naturel.

Notons pour conclure que des réalisations de ce type existent déjà en Suisse et en Allemagne. A Friedrichshafen en Allemagne, c'est un ensemble de 280 logements pour une superficie de 21 300 m² utilisant un réservoir unique de 12 000m³ dont l'eau est portée à 90 °C uniquement par 2 700 m² de capteurs solaires.

Enfin, il faut souligner que le stockage, par le fait qu'il utilisera de la chaleur perdue, permettra de réduire de façon très importante (d'un facteur 2 à la totalité) la production de gaz à effet de serre induite par le chauffage du LPSC.

7. Proposition de réalisation d'une maquette

N'oublions pas que notre objectif premier est la démonstration du stockage saisonnier en utilisant l'énergie solaire de l'été.

Nous proposons une expérience limitée dans un premier temps à une capacité de stockage de 100 m³ d'eau portée à 100 °C par 20 m² de panneaux solaires et équipée d'une pompe à chaleur de 2 à 3 kW de puissance électrique. Cette installation servirait au chauffage de quelques pièces sélectionnées du LPSC dont les radiateurs seraient auparavant carénés et munis d'un petit ventilateur pour en augmenter l'efficacité.

Le coût d'une telle installation serait compris entre 40 et 60 k€ :

- Réservoir (s) 15 k€
- Panneaux solaires 8 k€
- Pompe à chaleur 3 k€
- Installation, raccords 15 k€
- Carénage des radiateurs 5 k€

Auxquels il convient d'ajouter environ 2 hommes x an de conception, installation et mise en service.

Une telle expérience, qui semble à la portée du LPSC seul, permettrait de valider les principes proposés avant de passer à une réalisation de taille industrielle.

8. Calendrier de réalisation

Le besoin de conforter nos hypothèses, tout d'abord par des mesures précises des conditions actuelles, puis par la construction d'une maquette conduit à un planning s'étendant sur plusieurs années et résumé dans le tableau ci-dessous : (à noter qu'une attribution plus rapide de crédits devrait permettre le gain d'une année).

Calendrier

Action	2006				2007				2008				2009				2010			
	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Budget d'étude (15 k€)																				
Etudes (mesures Températures, débits, expertise...)																				
Budget de réalisation maquette (60 k€)																				
Construction maquette																				
Expérimentation maquette																				
Budget de réalisation (1 M€)																				
Réalisation projet SECCO																				
Mise en service SECCO																				

9. Perspectives d'extension du stockage d'énergie pour le chauffage

Notre propos à moyen terme est de démontrer par cette installation au Laboratoire de physique subatomique et corpusculaire de Grenoble la faisabilité et l'efficacité du stockage d'énergie dans de l'eau pour le chauffage de bâtiments existants, bâtiments réalisés dans les années passées et ne disposant pas nécessairement d'une isolation thermique efficace.

L'expérience acquise au LPSC sera, à partir de 2010, facilement transposable à tout ensemble de locaux (administrations, écoles, entreprises ...), voire à des groupes d'habitations individuelles.

Seules 2 conditions devront être remplies pour ces applications :

- disposer d'un espace suffisant pour recevoir les cuves de stockage,
- disposer dans l'environnement proche d'une source de chaleur, produisant en continu, et généralement perdue car évacuée. (Ces sources sont diverses, variées et finalement assez courantes : industries de transformation telles que les cimenteries, incinérateurs de déchets, sans oublier naturellement le solaire).

Il nous paraît que de telles conditions sont assez fréquemment réunies et que ces équipements de stockage induiraient de substantielles économies en terme de consommation d'énergie fossile, et donc de rejet de gaz à effet de serre.

Ces réalisations sont bien entendu compatibles et complémentaires de l'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments et devront être menées de pair. L'isolation thermique des bâtiments est nécessaire mais sa réalisation ne peut pas être très rapide vu l'importance et l'âge du parc immobilier existant.