



Ecointesys SA  
Life Cycle Systems



## Projet PACOGEN

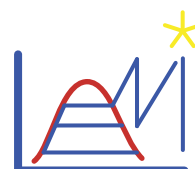
Evaluation économique et environnementale de systèmes énergétiques  
à usage résidentiel

élaboré par Ecointesys LCS SA

**DENIS BOCHATAY**  
**DR. ISABELLE BLANC**  
**PROF. OLIVIER JOLLIET**

en collaboration avec le LENI - EPFL

**DR. FRANÇOIS MARÉCHAL**  
**TIANA MANASSE-RATSIMANDRESY**



pour le compte du ScanE

**RÉMY BECK**, directeur-adjoint



Contact : 2ni.bochatay@gmail.com  
Isabelle.Blanc@ecoinsys.ch  
URL : www.ecoinsys.ch

Octobre 2005



# Table des matières

---

<b>Résumé</b> . . . . .	1
<b>Introduction</b> . . . . .	9
<b>1.1 Contexte fédéral</b> . . . . .	9
<b>1.2 Objectifs stratégiques genevois</b> . . . . .	10
<b>1.3 Le fonctionnement de la pompe à chaleur (PAC)</b> . . . . .	12
<b>1.4 Le principe de la cogénération</b> . . . . .	14
<b>1.5 Le couplage PACOGEN</b> . . . . .	15
<b>1.6 Objectifs de l'étude</b> . . . . .	16
<b>Influence des paramètres-clés</b> . . . . .	19
<b>2.1 L'enjeu des niveaux de température pour la PAC</b> . . . . .	19
<b>2.2 Le rendement du moteur de cogénération</b> . . . . .	21
<b>2.3 L'origine de l'électricité</b> . . . . .	22
2.3.1 Le <i>Mix UCTE</i> . . . . .	22
2.3.2 Le <i>Mix Swiss</i> . . . . .	22
2.3.3 Le <i>Mix NGCC</i> . . . . .	23
2.3.4 Le <i>Mix genevois</i> . . . . .	24
2.3.5 Récapitulatif . . . . .	26
<b>2.4 Ecobilan de la phase d'utilisation</b> . . . . .	28
<b>Méthodologie de combinaison du MTE et de l'approche ACV</b> . . . . .	33
<b>3.1 Le modèle thermo-économique</b> . . . . .	33
<b>3.2 L'analyse de cycle de vie</b> . . . . .	35
3.2.1 La base de données Ecoinvent . . . . .	35
3.2.2 Les méthodes d'analyse de l'impact . . . . .	36
<b>3.3 Méthodologie de calcul dynamique de l'impact</b> . . . . .	38
3.3.1 Méthode . . . . .	38
3.3.2 Liens entre les paramètres du MTE et ACV . . . . .	39
<b>3.4 Application au cas d'étude</b> . . . . .	40
3.4.1 Détermination de l'unité fonctionnelle (UF) . . . . .	40

3.4.2	Définition des limites des systèmes . . . . .	41
3.4.3	Choix des scénarios. . . . .	43
	<b>Interprétation comparative des résultats . . . . .</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Présentation des résultats . . . . .</b>	<b>45</b>
4.1.1	Paramètres de dimensionnement des systèmes énergétiques. . . . .	45
4.1.2	Présentation des résultats issus de l'optimisation bi-objectif . . . . .	45
4.1.3	Présentation des résultats ACV . . . . .	46
<b>4.2</b>	<b>Interprétation des résultats ACV . . . . .</b>	<b>48</b>
4.2.1	Apport de l'approche d'analyse de cycle de vie . . . . .	48
4.2.2	Phase d'utilisation vs structure des systèmes . . . . .	49
4.2.3	Interprétation comparative des scénarios. . . . .	52
<b>4.3</b>	<b>Discussion des résultats sur le plan économique . . . . .</b>	<b>55</b>
	<b>Conclusions et recommandations . . . . .</b>	<b>57</b>
	<b>Annexe 1 : moteur de cogénération, données fabricants. . . . .</b>	<b>1</b>
	<b>Annexe 2 : calcul de l'inventaire d'émissions par méthode matricielle . . . . .</b>	<b>3</b>
	<b>Annexe 3 : méthodologie de calcul de l'impact ACV . . . . .</b>	<b>5</b>
	<b>Annexe 4 : routines de <i>dynamisation</i> des processus économiques de l'inventaire d'ACV. . . . .</b>	<b>9</b>
A4.1	La pompe à chaleur . . . . .	9
A4.2	Le moteur de cogénération. . . . .	16
A4.3	La chaudière à gaz . . . . .	21
A4.4	Les réservoirs . . . . .	22
A4.5	La chaufferie . . . . .	23
A4.6	L'électricité. . . . .	23
A4.7	Le réseau de chauffage à distance . . . . .	24
	<b>Annexe 5 : paramètres des PAC utilisées . . . . .</b>	<b>25</b>
	<b>Annexe 6 : paramètres des chaudières à condensation utilisées . . . . .</b>	<b>27</b>
	<b>Annexe 7 : variables échangées entre le MTE et la routine de calcul de l'impact ACV . . . . .</b>	<b>29</b>
	<b>Annexe 8 : fonctions de coût d'investissement des différents systèmes</b>	<b>31</b>
	<b>Annexe 9 : profils journaliers de consommation énergétique . . . . .</b>	<b>33</b>

<b>Annexe 10 : paramètres de dimensionnement défini par le modèle thermo-économique</b> . . . . .	35
<b>Annexe 11 : émissions directes issues de la combustion d'1 MJ de gaz naturel</b> . . . . .	39

## Liste des figures

<b>Fig. 0.1 :</b> évaluation économique et environnementale (indicateur ACV: Changement climatique) de 4 systèmes utilisés à plusieurs niveaux de température et avec des <i>mix</i> électriques diversifiés. . . . .	3
<b>Fig. 0.2 :</b> évaluation économique et environnementale (indicateur ACV: Santé humaine) de 4 systèmes utilisés à plusieurs niveaux de température et avec des <i>mix</i> électriques diversifiés. . . . .	4
<b>Fig. 1.1 :</b> évolution des émissions de CO <sub>2</sub> en Suisse. 1990-2010. . . . .	10
<b>Fig. 1.2 :</b> vente et consommation de combustible. Canton de Genève. 1990-1999. . . . .	11
<b>Fig. 1.3 :</b> schéma d'une PAC et des flux énergétiques correspondant à un COPA de 3 (BOW65). . . . .	13
<b>Fig. 1.4 :</b> principe du couplage PACOGEN. Valeurs d'exemple. . . . .	16
<b>Fig. 2.1 :</b> COP d'une PAC en fonction des températures des sources froides et chaudes à rendement constant (0.5). . . . .	20
<b>Fig. 2.2 :</b> rendement électrique et thermique des CCF. . . . .	21
<b>Fig. 2.3 :</b> filière de production du <i>mix</i> européen. . . . .	22
<b>Fig. 2.4 :</b> filière de production du <i>mix</i> swiss, incluant les importations. . . . .	23
<b>Fig. 2.5 :</b> origine du courant vendu par les SIG. Manque biomasse (0.004%). . . . .	25
<b>Fig. 2.6 :</b> comparaison des 6 mix utilisés après normalisation pour un kWh au réseau. . . . .	27
<b>Fig. 2.7 :</b> évaluation en terme d'émission de CO <sub>2</sub> de scénarios PAC MIX ÉLECTRIQUE et PACOGEN. . . . .	30
<b>Fig. 2.8 :</b> évaluation en terme de consommation d'énergie primaire de scénarios PAC MIX ÉLECTRIQUE et PACOGEN. . . . .	31
<b>Fig. 3.1 :</b> configuration du système . . . . .	33
<b>Fig. 3.2 :</b> sélection des résultats optimaux parmi l'ensemble des configurations testées par le QMOO pour deux fonctions-objectifs. . . . .	34
<b>Fig. 3.3 :</b> arbre des processus. . . . .	36
<b>Fig. 3.4 :</b> étapes de l'analyse de l'impact. . . . .	37
<b>Fig. 3.5 :</b> méthodologie de couplage des outils MTE et ACV . . . . .	40
<b>Fig. 3.6 :</b> limites du système et de l'étude . . . . .	42
<b>Fig. 4.1 :</b> résultats de l'optimisation sur les sept groupes de scénarios. <i>Mix</i> utilisé : <i>Mix</i> NGCC. . . . .	46

<b>Fig. 4.2:</b>	calcul des indicateurs ACV « Changement climatique » et « Epuisement des ressources » sur les 7 scénarios de l'optimisation (Mix NGCC) et analyse de sensibilité sur les autres scénarios (Mix UCTE, Swiss, Bleu). . . . .	47
<b>Fig. 4.3:</b>	calcul des indicateurs ACV « Santé humaine » et « Qualité de l'écosystème » pour les 7 scénarios de l'optimisation (Mix NGCC) et analyse de sensibilité sur les autres scénarios (Mix UCTE, Swiss, Bleu).. . . . .	48
<b>Fig. 4.4:</b>	pourcentage de l'impact de la structure par rapport à l'impact total (structure + phase d'utilisation) pour l'occurrence la plus économique de chaque scénario . . . . .	50
<b>Fig. A1:</b>	méthodologie de calcul de l'impact . . . . .	8
<b>Fig. A2:</b>	poids de la PAC en fonction de la puissance thermique (B0W35). . . . .	10
<b>Fig. A3:</b>	part du forage dans l'impact de la sonde géothermale. . . . .	12
<b>Fig. A4:</b>	poids du fluide en fonction de sa puissance nominale. . . . .	16
<b>Fig. A5:</b>	fonction de poids d'une unité de cogénération en fonction de la puissance absorbée (GN). . . . .	18
<b>Fig. A6:</b>	poids de la chaudière en fonction de la puissance. . . . .	22
<b>Fig. A7:</b>	profils journaliers monitorés heure par heure des besoins en électricité, en chauffage et en eau chaude sanitaire . . . . .	34

## Liste des tableaux

<b>Tab. 1.1:</b>	coefficient de performance moyen de différents types de PAC. . . . .	14
<b>Tab. 2.1:</b>	récapitulatif des offres d'électricité des SIG. . . . .	25
<b>Tab 2.2:</b>	récapitulatif des prix et de deux indicateurs ACV pour les mix électriques retenus . . . . .	26
<b>Tab. 3.1:</b>	catégories intermédiaires et de dommage, méthode Impact 2002+. . . . .	38
<b>Tab. 3.2:</b>	scénarios retenus pour l'optimisation thermo-économique et l'analyse environnementale . . . . .	44
<b>Tab. 4.1:</b>	récapitulatifs des paramètres-clés permettant le dimensionnement des systèmes . . . . .	45
<b>Tab. 4.2:</b>	importance de la structure par rapport à l'impact total en fonction des mix électriques. Moyenne des solutions les plus économiques des scénarios quel que soit le système utilisé. . . . .	49
<b>Tab. 4.3:</b>	importance de la structure par rapport à l'impact total en fonction des systèmes. Moyenne des solutions les plus économiques de chaque scénario quel que soit le mix utilisé. . . . .	50
<b>Tab. A1:</b>	liste de moteurs de cogénération . . . . .	1
<b>Tab. A2:</b>	exemple de fichier contenant les flux technologiques intermédiaires pour l'UF suivante : sonde géothermale, profondeur de 1m, durée de vie de 50 ans. . . . .	6
<b>Tab. A3:</b>	combustion d'1 MJ de diesel dans une machine de construction. . . . .	13
<b>Tab. A4:</b>	découpage des éléments de l'unité de cogénération pour 100'000 heures de services. . . . .	17

<b>Tab. A5 :</b>	objets de l'unité de cogénération regroupés en fonction de formule de dimensionnement en fonction de la puissance absorbée $Q_{abs}$ . . . . .	18
<b>Tab. A6 :</b>	objets de la micro-cogénération, pour 100'000 heures de service . . . . .	20
<b>Tab. A7 :</b>	paramètres pour la solution la moins chère de chaque de scénario issu de l'optimisation . . . . .	35
<b>Tab. A8 :</b>	paramètres pour la solution la plus chère de chaque scénario issu de l'optimisation. . . . .	36

## Abbréviations

<b>PAC :</b>	pompe à chaleur
<b>CCF :</b>	couplage chaleur force
<b>kWh :</b>	kilowattheure
<b>MWh :</b>	mégawattheure
<b>MJ :</b>	mégajoule
<b>GJ :</b>	gigajoule
<b>TJ :</b>	terajoule
<b>W :</b>	watt
<b>kW :</b>	kilowatt
<b>MW :</b>	mégawatt
<b>ACV :</b>	analyse de cycle de vie (LCA - Life Cycle Analysis)
<b>UIOM :</b>	usine d'incinération des ordures ménagères
<b>gCO<sub>2</sub> :</b>	gramme de CO <sub>2</sub>
<b>LEni :</b>	Laboratoire d'énergétique industrielle
<b>EPFL :</b>	Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
<b>AWP :</b>	Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen
<b>UF :</b>	Unité fonctionnelle
<b>PM<sub>2.5</sub> :</b>	Particules de diamètres inférieur à 2.5 $\mu$
<b>TEG :</b>	triéthylène glycol
<b>DALY :</b>	année équivalente de vie perdue
<b>PDF*m<sup>2</sup>*an :</b>	fraction d'espèce perdue sur un m <sup>2</sup> et pour une année
<b>UCTE :</b>	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity
<b>CAD :</b>	réseau de chauffage à distance
<b>ScanE :</b>	Service cantonal de l'Energie, Genève
<b>ECS :</b>	eau chaude sanitaire
<b>QMOO :</b>	Queueing Multi Objective Optimiser (algorithme génétique)
<b>B0W65 :</b>	conditions nominales de la PAC sol/eau. Source froide (saumure-Brine) : 0°C Source chaude (circuit de chauffage-Water) : 65°C.
<b>W10W35 :</b>	conditions nominale d'une PAC eau/eau. Source froide : 10°C. Source chaude (circuit de chauffage) : 35°C.
<b>MTE :</b>	Modèle thermo économique
<b>GN :</b>	gaz naturel
<b>NGCC :</b>	centrale à cycle combiné (natural gas combined cycle)
<b>PCI :</b>	pouvoir calorifique inférieur





# Résumé

---

## Contexte et objectifs

Le projet PEEQ du canton de Genève, en cherchant à planifier et optimiser les aspects énergétiques de l'évolution urbaine, vise à contribuer aux objectifs de Kyoto. Dans le domaine des combustibles, cela consiste à programmer une réduction de 15 % des émissions à effet de serre d'ici à 2010 par rapport au niveau d'émissions de 1990.

Cependant, le seul objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre peut induire une exportation des émissions, ou l'émission d'autres types de substances pouvant par exemple être nocives pour la santé humaine. En conséquence, une approche systémique de type « cycle de vie » est nécessaire pour correctement appréhender cette question stratégique de recherche d'alternatives pertinentes pour les systèmes énergétiques de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ECS). L'objectif de cette étude est de proposer une approche méthodologique permettant l'évaluation simultanée des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie et des coûts pour un ensemble de solutions énergétiques identifiées comme optimales. L'identification de paramètres clés en terme de choix technologiques de systèmes de chauffage et de production d'ECS adaptées au contexte technico-économique est ainsi possible.

Cette étude a consisté dans un premier temps à réaliser un couplage de deux modèles : le premier est un modèle thermo-économique permettant de dimensionner des systèmes de conversion d'énergie en fonction des besoins. Le second est l'outil d'analyse de cycle de vie, qui calcule l'ensemble des impacts des émissions produites par un système, où qu'elles le soient, et sur toute le cycle de vie du produit.

Leur couplage permet d'évaluer les performances économiques et environnementales de plusieurs systèmes énergétiques « d'avenir » comme les pompes à chaleur ou le moteur en cogénération et de les comparer à des systèmes plus traditionnels comme la chaudière à gaz.

Dans un second temps, une application de ce nouvel outil au cas concret d'un bâtiment a permis d'identifier les paramètres clés et d'ébaucher un certain nombre de recommandations en terme de choix de systèmes énergétiques pertinents aussi bien dans le cadre de nouvelles installations que dans le cadre de réhabilitation

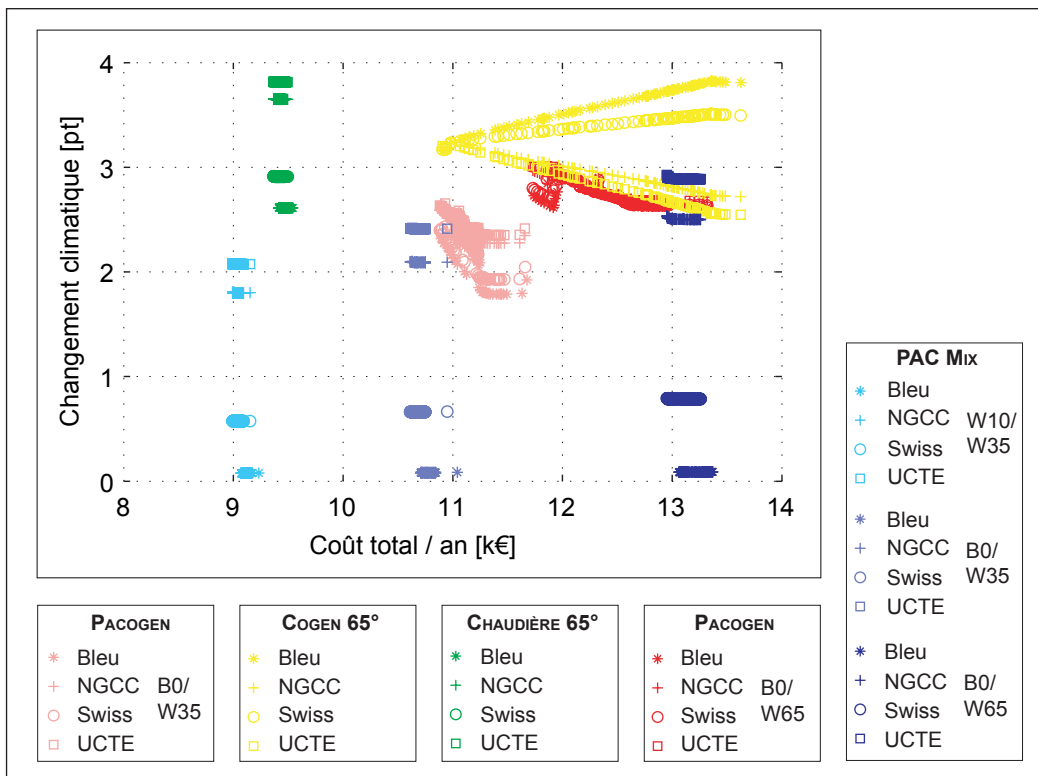
de quartiers. Cette méthodologie est donc appliquée ici pour couvrir les besoins en chauffage, en eau chaude sanitaire et en électricité d'un bâtiment résidentiel de 650 m<sup>2</sup>. Quatre groupes de scénarios sont pris en compte. PAC MIX est une pompe à chaleur connectée au réseau électrique. PACOGEN est le couplage d'une pompe à chaleur alimentée en électricité par un moteur à gaz de cogénération, dont la production de chaleur est également utilisée pour satisfaire les besoins du bâtiment. COGEN est un moteur de cogénération seul. Enfin, CHAUDIÈRE est l'utilisation d'une chaudière à gaz. Chaque scénario est connecté au réseau électrique pour compléter ses besoins si nécessaires et évalué en fonction de l'origine de l'électricité et en fonction du niveau de température de la distribution de chaleur.

## Résultats

La méthodologie de couplage de l'outil thermo-économique et de l'approche d'analyse de cycle de vie est performante et offre de belles perspectives pour l'évaluation économique et environnementale de différents systèmes énergétiques.

Notamment, l'apport de l'analyse de cycle de vie est fondamental, puisqu'elle apporte des aspects souvent ignorés d'autres études thermo-économiques. Elle prend en compte l'ensemble des impacts environnementaux sous forme d'un nombre restreint d'indicateurs environnementaux, mettant en évidence le comportement parfois opposé de ceux-ci. Elle permet aussi de prendre en compte l'impact relatif de la structure des systèmes, qui, dans certains cas bien précis, occasionne un impact non-négligeable.

Les résultats sont présentés graphiquement sur les fig. 0.1 et 0.2. Ces graphiques représentent l'évaluation économique et environnementale des quatre groupes de scénarios précités, utilisés à des niveaux de température différents (chauffage et source froide), selon des *mix* électriques diversifiés. Il faut savoir que Genève achète en majeure partie (85 %) son électricité à des centrales hydraulique (*mix bleu*) et le reste à des centrales à gaz (*Mix NGCC*). Seulement deux indicateurs d'analyse de cycle de vie sont représentés ici. Il s'agit premièrement de l'indicateur « changement climatique », qui évalue le potentiel à effet de serre du système analysé, et de l'indicateur « santé humaine ». Le choix de ces deux indicateurs met en évidence le comportement différencié des systèmes selon l'impact considéré.

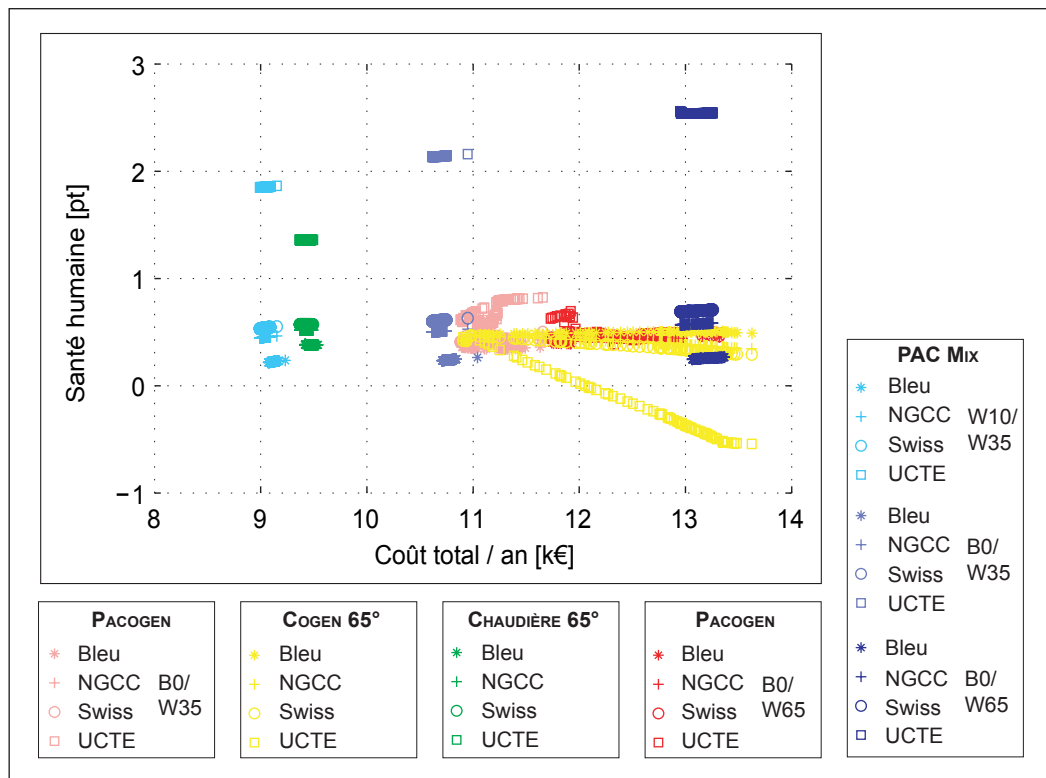


**Fig. 0.1 :** évaluation économique et environnementale (indicateur ACV : Changement climatique) de 4 systèmes utilisés à plusieurs niveaux de température et avec des *mix* électriques diversifiés.

### Paramètres clés

Les systèmes énergétiques considérés, soit la pompe à chaleur, le moteur à gaz en cogénération et la chaudière à gaz, ne peuvent pas être évalués de façon générale. Leur performance environnementale et thermo-économique sont en effet fortement liés à leurs paramètres d'utilisation.

Concernant la pompe à chaleur, l'écart de température entre la source froide qu'est le sol – ici B0 – ou l'eau – ici W10 – et la source chaude qu'est le circuit de chauffage – ici W35 ou W65 – est un élément déterminant complètement la performance de la pompe. Quant au moteur de cogénération, bien moins sensible aux écarts de température, la puissance de celui-ci est un paramètre essentiel. En effet, plus le moteur est gros, plus son rendement électrique est élevé et ses performances économiques comme environnementales s'améliorent. La prise en compte de ces paramètres d'échelle est fondamentale puisque leur variation peut reléguer ou au contraire reclasser un système par rapport à un autre.



**Fig. 0.2:** évaluation économique et environnementale (indicateur ACV : Santé humaine) de 4 systèmes utilisés à plusieurs niveaux de température et avec des *mix* électriques diversifiés.

### *Priorité aux pompes à chaleur à basse température*

[Houillon, 2001] avait mis en évidence l'avantage environnemental des PAC par rapport aux chaudières à gaz ou à mazout, avantage toutefois dépendant de la provenance de l'électricité. Ici, les résultats sont interprétables pour le contexte genevois (*mix bleu* et *mix NGCC*) ou suisse et confirme la forte influence des paramètres d'utilisation.

Le meilleur système semble réellement être la PAC fonctionnant à basse température de source chaude. Le faible écart entre les niveaux de température de source froide (0 ou 10 °C) et de source chaude (max. 35 °C) fait de la PAC le système le plus performant. En conséquence, on ne peut souhaiter qu'une utilisation fortement accrue de PAC fonctionnant à basse température.

Seulement, ce système ne s'applique qu'à des zones en construction où en rénovation. En effet, si les bâtiments sont déjà construits et que l'objectif n'est que le remplacement d'un système de chauffage vieillissant, les paramètres architecturaux sont des contraintes majeures. Si le système en place est un système de distribution

de chaleur à haute température (CAD ou radiateurs), la PAC perd une large partie de son attrait. Les graphiques ci-dessus mettent en effet en évidence que les scénarios PAC MIX B0W65, c'est-à-dire utilisant une pompe à chaleur géothermique pour chauffer un bâtiment utilisant un circuit de distribution de chaleur à haute température (65°C), coûte très cher pour un bilan environnemental mitigé.

A haute température, les chaudières à gaz sont les solutions les plus économiques, mais engendrent de forts impacts environnementaux, en particulier par ses émissions de CO<sub>2</sub>. Ce dernier peut être réduit par l'utilisation d'un moteur de cogénération à haut rendement, c'est-à-dire un moteur de grande taille, probablement raccordé à un réseau de chauffage à distance.

Une seconde solution est, dans le cas d'une rénovation de bâtiment, l'évaluation économique et environnementale du remplacement du système de distribution de chaleur vers un système à basse température. A long terme, les coûts supplémentaires d'investissement seront tout ou partie compensés par l'économie annuelle des frais d'exploitation, tout en améliorant sensiblement les aspects environnementaux du service demandé.

### *Exploitation du potentiel énergétique lémanique*

Toujours au sujet des niveaux de température, l'exploitation par des pompes à chaleur de l'énorme quantité de chaleur contenue dans les eaux du Léman pourrait encore améliorer le bilan environnemental des PAC (scénario PAC W10W35), sous réserve des coûts économiques et environnementaux de la mise en oeuvre d'un projet de cet ordre et de grande envergure, absents de cette première étude.

Ceci est vrai sans même utiliser le potentiel de climatisation qu'offre les pompes à chaleur géothermiques et encore plus à eau. Leur connection sur la source froide peut être exploitée en été pour refroidir des volumes sans grande installations ni frais supplémentaires. Puisque la climatisation devient année après année un enjeu croissant, le bilan total des pompes à chaleur eau/eau pourrait encore s'améliorer comparativement à un système utilisant en plus de son unité de chauffage un climatiseur électrique par exemple.

### *Quel mix électrique pour Genève ?*

Le mix genevois actuel favorise pleinement les pompes à chaleur, puisque l'énergie hydraulique, majoritairement utilisée à Genève, est, en terme d'analyse de cycle de vie, le meilleur type d'électricité du point de vue environnemental. Cependant,

une croissance des nouvelles installations de pompes à chaleur engendrera sans nul doute une croissance de la demande électrique cantonale si des économies ne sont pas réalisées ailleurs. Comme quasiment l'ensemble des possibilités hydrauliques sont exploitées en Suisse, de nouvelles sources d'approvisionnement seront nécessaires. Or, pour que les pompes à chaleurs, dépendant du mode de production électrique, restent favorables du point de vue de l'environnement et pour permettre à Genève de satisfaire aux objectifs du protocole de Kyoto sans exporter ailleurs ses émissions de gaz à effet de serre, une réflexion doit être entreprise sur l'avenir de l'approvisionnement électrique cantonal.

Si en plus des énergies renouvelables marginalement utilisées aujourd'hui, le gaz devait devenir une solution plus importante qu'aujourd'hui (15 %), de grosses unités de moteur à gaz en cogénération sont sans nul doute une alternative environnementalement intéressante par rapport aux centrales à gaz à cycle combiné. En effet, la chaleur produite pourrait être utilisée par des réseaux de chauffage à distance pour remplacer à Genève des chaudières à mazout ou à gaz, dans des quartiers ne disposant de chauffage par le sol à basse température.

#### **Les conclusions de Pacogen, en bref ...**

- Favoriser l'installation de pompes à chaleur à faible écart de température entre la source chaude et la source froide ;
  - Conversion des systèmes de chauffage de la haute à la basse température (chauffage au sol)
  - Exploiter de préférence le potentiel thermique du lac Léman par des PAC eau/eau et ensuite l'énergie géothermique par des PAC sol/eau.
- Gérer la croissance de la consommation d'électricité due aux PAC sans recourir à des modes de production électrique réduisant l'attrait environnemental des PAC.
  - Favoriser de nouvelles énergies renouvelables (solaire, éolien, ...)
  - Dans le cas où le gaz est une option, les grosses unités de moteurs à gaz de cogénération peuvent concurrencer l'achat d'électricité de centrales à gaz à cycle combiné.
- A haute température, le moteur de cogénération doit être préféré à la chaudière, et à basse température être associé à un cycle organique de Rankine.

---

### *Perspectives*

D'une part, dans la perspective d'une gestion énergétique à l'échelle d'un quartier par l'exploitation de grande ampleur mérite la prise en compte des aspects d'analyse de cycle de vie des infrastructures à mettre en place.

D'autre part, les aspects de physique du bâtiment sont capitaux, et pas seulement la température du circuit de chauffage. En effet., des améliorations dans l'enveloppe du bâtiment permet de substantielles économies des besoins d'énergie thermique. Les standards les plus récents de la SIA ou mieux les labels Minergie et Minergie-P permettent une réduction impressionnantes des besoins thermiques. Il serait donc souhaitable d'accélérer le plus possible la reconversion du domaine bâti. Couplées à l'installation de systèmes énergétiques efficaces, ces mesures peuvent prendre un effet considérable sur les impacts dus aux combustibles, en particulier les émissions à effet de serre soumis aux objectifs de Kyoto. Ainsi, il est utile d'élargir les limites de l'étude en incluant l'analyse de cycle de vie des paramètres architecturaux tels que l'enveloppe du bâtiment.





### 1.1 Contexte fédéral

Le contexte légal énergétique suisse est défini notamment par la Loi sur l'énergie suisse (LEne) du 26 juin 1998. Selon l'art. 1, al. 2, elle a pour but

- a. *d'assurer une production et une distribution de l'énergie économiques et compatibles avec les impératifs de la protection de l'environnement;*
- b. *de promouvoir l'utilisation économe et rationnelle de l'énergie;*
- c. *d'encourager le recours aux énergies indigènes et renouvelables.*

De plus, en signant puis ratifiant le Protocole de Kyoto, la Suisse ajoute des contraintes supplémentaires pour définir sa politique énergétique. La Loi sur le CO<sub>2</sub> du 8 octobre 1999 transcrit légalement ses obligations internationales (art. 2):

- 1 *D'ici à l'an 2010, les émissions de CO<sub>2</sub> dues à l'utilisation énergétique des agents fossiles doivent être dans l'ensemble réduites de 10 % par rapport à 1990. La moyenne des années 2008 à 2012 est déterminante.*
- 2 *Les émissions dues à l'utilisation énergétique des combustibles fossiles doivent être dans l'ensemble réduites de 15 % et les émissions dues à l'utilisation énergétique des carburants fossiles (sans le kérosène utilisé pour les vols internationaux), de 8 %.*

Les moyens privilégiés par la Confédération pour atteindre ces objectifs étaient en premier lieu les mesures librement consenties par les consommateurs. Or, plusieurs années après l'entrée en vigueur de la Loi sur le CO<sub>2</sub>, la tendance actuelle de consommation d'énergie ne laisse pas de doute sur l'insuffisance des efforts volontaires et des incitations étatiques consentis pour atteindre ces objectifs, même si la consommation de combustibles s'est légèrement réduite par rapport à l'année de référence (fig. 1.1).

C'est pourquoi un communiqué de presse du Département fédéral des transports, de l'énergie et des communications (DETEC-23 mars 2005) annonce qu'il a « décidé d'introduire une taxe sur le CO<sub>2</sub> applicable aux combustibles : dès 2006, une taxe de 35 francs sera prélevée sur chaque tonne de CO<sub>2</sub>, ce qui correspond à environ 9 centimes par litre d'huile de chauffage » et 7 centimes par mètre cube de gaz naturel.

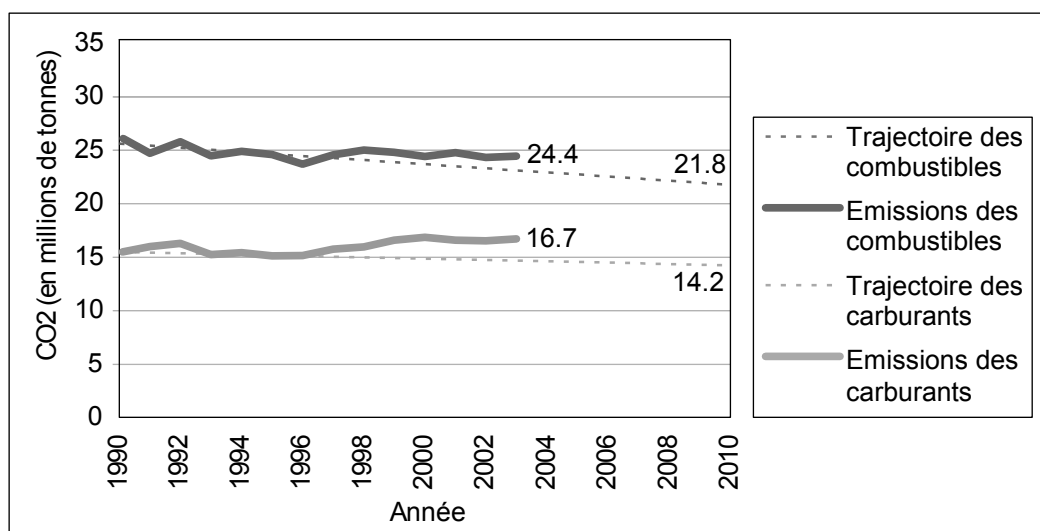


Fig. 1.1 : évolution des émissions de CO<sub>2</sub> en Suisse. 1990-2010.

Tiré de [www.buwal.ch](http://www.buwal.ch).

Ce contexte fédéral rend encore plus actuel l'article 9 (bâtiments) de la LEne :

*Les cantons créent dans leur législation des conditions générales favorisant une utilisation économe et rationnelle de l'énergie ainsi que le recours aux énergies renouvelables.*

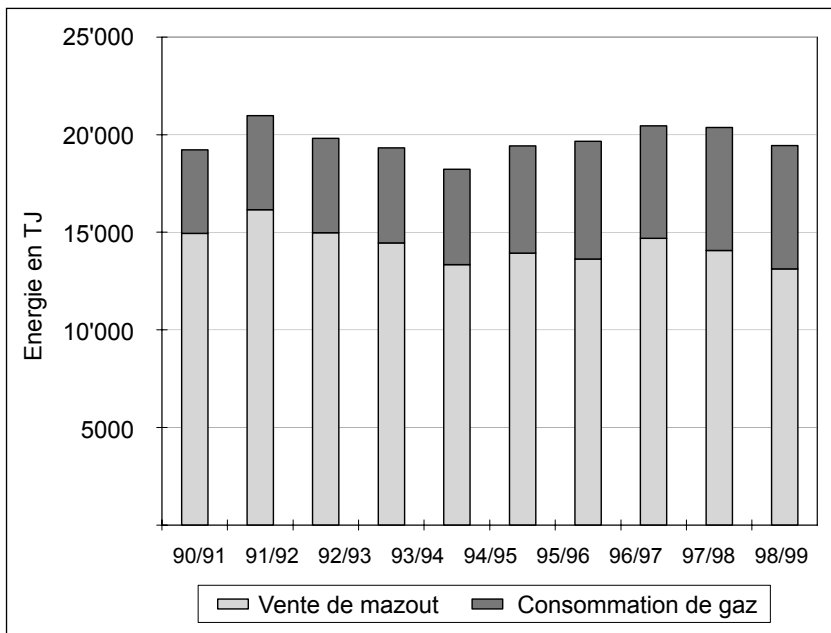
Notons par ailleurs qu'énergies renouvelables signifient au sens légal suisse « la force hydraulique, l'énergie solaire, la géothermie, la chaleur ambiante, l'énergie éolienne et la biomasse » (Ordonnance sur l'énergie du 7 décembre 1998).

## 1.2 Objectifs stratégiques genevois

La Loi sur l'énergie (18 septembre 1986) du canton de Genève reprend tels quels les principes généraux et précités de la LEne. De plus, cette loi oblige le Conseil d'Etat à proposer au Parlement une fois par législature sa vision stratégique à moyen et long terme de sa politique énergétique qu'est la Conception générale en matière d'énergie (CGE0105). L'outil opérationnel qui en découle est le Plan directeur de l'énergie (PDE0105), l'actuel ayant été approuvé le 17 décembre 2003.

Les objectifs chiffrés de réduction des émissions de gaz à effet de serre sont les mêmes à l'échelle genevoise. En excluant les carburants, Genève cherche donc à réduire de 15% ses émissions de CO<sub>2</sub>, par rapport aux chiffres de 1990. Or, Genève est un canton où la surface bâtie, et donc chauffée, est en augmentation. Cette situation ne semble d'ailleurs pas prête à s'inverser au vu de la crise du logement actuel sur l'arc lémanique et plus spécialement dans la Cité de Calvin. Les ressources énergétiques utilisées pour répondre aux besoins de chauffage sont principalement

les ressources non renouvelables que sont le mazout et le gaz naturel. On peut encore ajouter l'électricité permettant le fonctionnement de pompes à chaleur et de chauffages d'appoint et la récupération des rejets de chaleur, issus par exemple de la combustion des déchets de l'UIOM des Cheneviers. Par contre, les énergies renouvelables comme le solaire thermique, le bois ou la géothermie, si elles sont en forte croissance, restent marginales.



**Fig. 1.2:** vente et consommation de combustible. Canton de Genève. 1990-1999.

Tiré de [CGE0105, 2003].

Le graphique 1.2 illustre l'évolution de la demande en combustibles fossiles. Notons deux éléments. Le premier est la stabilité de la demande en énergie primaire. Le second est le transfert progressif du mazout vers le gaz naturel. En effet, selon la [CGE0105, 2003 : 17], « la part du gaz dans la consommation totale de gaz et de mazout est passée de 24 % à 35 % » de 1990 à 2000. « Le gaz présente un intérêt notable en matière de  $\text{CO}_2$  puisque ses émissions sont de 198  $\text{gCO}_2/\text{kWh}$  alors que celles du mazout sont de 263  $\text{gCO}_2/\text{kWh}$  » [idem] soit une réduction de près d'un quart.

Cependant, le rythme de substitution des huiles lourdes par le gaz naturel n'est pas encore suffisant pour atteindre les objectifs genevois. Bien que la taxe sur le  $\text{CO}_2$  – entrée en vigueur : 1er janvier 2006 – favorise le gaz naturel au détriment du mazout, l'Etat de Genève ne peut ni ne veut se contenter de cette substitution entre deux énergies fossiles. Dans le respect des principes du développement durable, en plus des efforts de promotion des énergies renouvelables et de l'amélioration de l'indice

de dépense chaleur des bâtiments, Genève cherche à promouvoir le développement des énergies indigènes [CGE0105, 2003: 36].

Résumons alors les objectifs qui nous intéressent ici de la politique énergétique genevoise à l'horizon 2010:

- réduction de 10 % des émissions de CO<sub>2</sub> et de consommation d'énergie fossile;
- croissance nulle de la consommation d'électricité et élimination du pourcentage d'électricité d'origine nucléaire;
- augmentation de la quote-part des énergies indigènes renouvelables de 1 % pour l'électricité et de 3 % pour la production de chaleur [CGE0105, 2003:38].

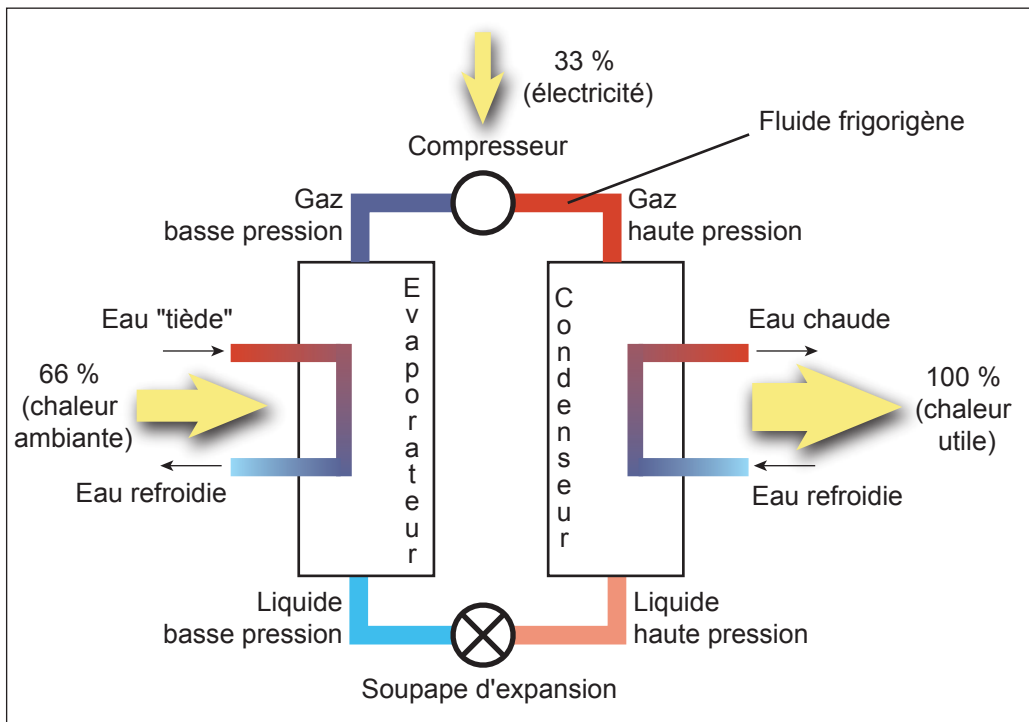
La promotion de la technologie des pompes à chaleur (PAC) et du couplage chaleur-force (CCF) – dans cette étude, un moteur de cogénération à gaz – prend alors tout son sens. C'est pourquoi les articles 21 et 22 de la loi genevoise sur l'énergie encouragent la récupération des rejets de chaleur et les systèmes chaleur-force. Les PAC utilisent la chaleur ambiante définie comme énergie renouvelable. D'autre part, le CCF produit à partir de gaz naturel un ensemble d'électricité et de chaleur avec un meilleur rendement que si elles étaient produites séparément, par exemple par une chaudière au gaz naturel et par une centrale nucléaire. Le couplage CCF/PAC devrait alors théoriquement avoir le potentiel de contribuer à la réduction de la consommation d'énergie fossile comme à l'augmentation de la quote-part des énergies indigènes pour l'électricité et la chaleur.

### 1.3 Le fonctionnement de la pompe à chaleur (PAC)

Le principe de la PAC est de soutirer de la chaleur à basse température dans l'environnement pour la transmettre à l'aide d'une énergie additionnelle à haute température au bâtiment. Les PAC peuvent être de trois types: prélèvement de chaleur dans le sol à l'aide d'une sonde géothermique de faible ou de moyenne profondeur et d'un circuit d'eau glycolée, prélèvement de chaleur par le biais de l'eau de lac, de rivière ou de nappe phréatique et enfin prélèvement de chaleur dans l'air.

Le circuit de captage amène la chaleur de l'environnement dans un échangeur de chaleur connecté à l'évaporateur. L'apport de chaleur occasionne l'évaporation du fluide frigorigène. Le fluide vaporisé, à basse pression, est comprimé par le compresseur et sa température augmente. Le fluide est alors mis en contact dans le condenseur avec le circuit de chauffage du bâtiment qui diffuse le plus souvent la chaleur

par un système de chauffage au sol. La pression dans le condenseur étant constante et le gaz étant refroidi par l'arrivée du circuit de chauffage, le fluide se condense à nouveau. La pression et la température du fluide frigorigène sont à nouveau abaissées en transitant par un détendeur. Cela permet au liquide de se vaporiser à nouveau en contact avec la chaleur de l'environnement amenée par le circuit de captage dans l'évaporateur. Un nouveau cycle peut commencer.



**Fig. 1.3:** schéma d'une PAC et des flux énergétiques correspondant à un COPA de 3 (B0W65).

L'avantage important de la pompe à chaleur est qu'elle puise l'essentiel de l'énergie dans l'environnement. La seule énergie consommée est l'électricité nécessaire au fonctionnement du compresseur. Le coefficient de performance (COP) quantifie le rapport entre l'énergie transmise au bâtiment et l'énergie consommée. Comme le COP varie fortement en fonction des variations de température de la source froide, on lui préfère le coefficient de performance annuel (COPA). Beaucoup plus stable, il est un meilleur indicateur de la performance de la PAC. Le COPA est le rapport entre l'énergie totale annuellement consommée pour l'entraînement du compresseur et l'énergie délivrée au bâtiment durant la même année. Le tableau 1.1 donne des chiffres sur les COPA que les trois types de PAC peuvent atteindre, selon le centre de test de Töss, en 1994 ([www.ntb.ch](http://www.ntb.ch)). Les progrès étant constant dans cette techno-

logie, les coefficients annoncés par les constructeurs aujourd'hui sont plus élevés de l'ordre de 10 à 15 %.

**Tab. 1.1:** coefficient de performance moyen de différents types de PAC.

Tiré de [Huber & al., 1996]

Type	COPA
Air ambiant/eau	2.0-2.5
Sol (2 °C)/eau	3.0-3.5
Eau (10 °C)/eau	3.5-4.0
Température du circuit de chauffage : 35 °C	

Quel que soit le type de PAC et sans comptabiliser l'énergie de la source ambiante, le rendement énergétique de la PAC est dans tous les cas supérieur à 100 %. Mais il ne faut pas oublier que l'énergie transmise à la PAC est de l'électricité, soit une énergie à haute exergie, alors que celle transmise par la PAC au bâtiment est la forme la plus dégradée de l'énergie, la chaleur.

Ainsi, la chaleur fournie par les PAC n'a un plus faible impact environnemental que si l'approvisionnement électrique de la PAC le permet. Selon [Houillon, 2001], qui a réalisé une étude d'analyse de cycle de vie comparant une PAC alimentée électriquement par le réseau européen UCTE, auquel la Suisse est connecté, et des chaudières à gaz et à mazout, l'avantage environnemental de la PAC sur les chaudières est contrasté. S'il permet de réduire la consommation énergétique et les émissions à effet de serre, les émissions en terme de toxicité du réseau électrique UCTE, notamment en raison de la part majoritaire de production d'origine thermique (houille, lignite, ...) en Europe, majore l'impact de la PAC. Ainsi,

*la PAC n'offre des performances plus favorables pour l'effet de serre et la toxicité que si des mesures d'accompagnement sont étudiées et prises, en particulier pour s'assurer que l'augmentation du nombre de PAC ne contribue pas d'abord au maintien de centrales à charbon en Europe. L'approvisionnement électrique à partir de centrale à gaz offrant des performances proches de l'approvisionnement direct au gaz, il serait intéressant d'évaluer l'intérêt de couplage chaleur-force qui permettrait une meilleure valorisation du gaz qu'une centrale thermique [Houillon, 2001:69].*

#### 1.4 Le principe de la cogénération

Le couplage chaleur-force (CCF), aussi nommé cogénération, signifie « production combinée de chaleur et de force (surtout pour la production d'électricité) » [Eicher, 1995: 7]. Le système est composé d'une pile à combustible ou d'un moteur

ou d'une turbine à gaz. Il produit de l'énergie mécanique transformée en électricité. Or, le second principe de la thermodynamique empêche la transformation intégrale d'une forme d'énergie sous une autre sans une dégradation d'une partie d'elle-même. Le principe de la centrale combinée est alors de récupérer l'énergie perdue sous forme de chaleur par le circuit de refroidissement et par les gaz d'échappement et de la valoriser pour le chauffage.

Ce principe ne serait pas intéressant pour produire de la chaleur uniquement. En effet, les rendements des chaudières sont identiques à au rendement totaux des moteurs de cogénération (0.9-1, ratio PCI/énergie délivrée), à meilleur prix.

Par contre, la production d'électricité n'atteint de loin pas de tels rendements. Le rendement d'une centrale nucléaire, calculé par Ecoinvent 1.1 et Impact 2002+, soit le ratio entre l'énergie primaire consommée sur tout le cycle de vie (extraction matière première, transport, construction centrale, ...) et l'énergie électrique délivrée au réseau est 0.29. Celui d'une centrale à gaz à cycle combiné est de 0.47 (Ecoinvent 1.1, Impact 2002+). Sans la prise en compte de l'analyse de cycle de vie (extraction et acheminement du gaz naturel, réseau de distribution, pertes réseaux électriques, ...), le rendement d'une centrale à cycle combiné atteint 0.6 (PCI/énergie délivrée).

Le CCF permet d'éviter le gaspillage d'énergie primaire lié à la production énergétique en produisant de l'électricité avec une valorisation de l'essentiel de l'énergie dégradée sous forme de chaleur.

Sans inclure l'analyse de cycle de vie, les moteurs de cogénération transforment aujourd'hui entre 0.27 et 0.45 environ de l'énergie (gaz naturel) en électricité, selon la taille du moteur. Le rendement total approche les 0.9, à haute température, sans condensation. En-dessous de 59°C, il est encore possible de récupérer jusqu'à environ 7 % d'énergie supplémentaire grâce à la condensation.

## 1.5 Le couplage PACOGEN

L'idée du couplage entre une PAC et un moteur en cogénération est de tirer profit du haut rendement du moteur, en multipliant l'électricité produite par le coefficient multiplicateur de la PAC qu'est le COPA. Ceci est symbolisé par la figure 1.4. Dans les conditions d'exemple inscrites sur le schéma, on s'aperçoit que seul 48 % de l'énergie transmise au bâtiment provient d'une source d'énergie fossile, comme le gaz naturel. Si le même service était assuré par une chaudière à gaz à condensation avec un rendement de 100 %, il faudrait utiliser 100 % d'énergie sous forme de gaz naturel.

D'autre part, un second argument en faveur du couplage CCF/PAC est la simultanéité des besoins énergétiques. En effet, un reproche qui est fait aux PAC est d'être un *gouffre* de consommation électrique en hiver, la saison pendant laquelle la demande électrique est la plus forte et ne peut être comblée que par la libération de l'énergie potentielle des bassins d'accumulation hydrauliques et par les importations européennes, moins « propres » que l'électricité suisse. Dans le cas d'un couplage CCF/PAC idéal, où toute l'énergie produite par le CCF sert directement ou indirectement au chauffage des bâtiments, aucun apport électrique supplémentaire en provenance du réseau n'est nécessaire. Les surplus de production électrique peuvent de surcroît être vendu au réseau.

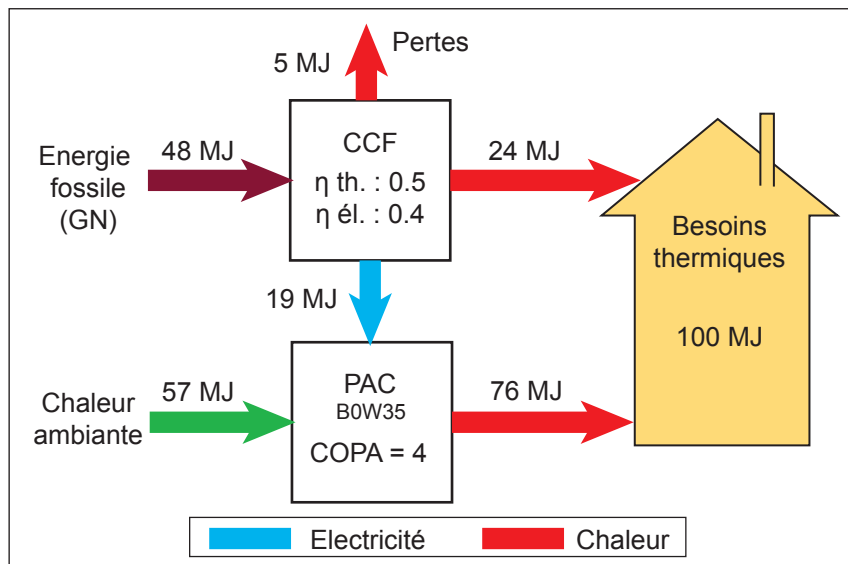


Fig. 1.4: principe du couplage PACOGEN. Valeurs d'exemple.

## 1.6 Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude est de proposer une approche méthodologique permettant l'évaluation simultanée des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie et celle des coûts pour un ensemble de solutions énergétiques identifiées comme optimales. L'identification de paramètres clés en terme de choix technologiques de systèmes de chauffage et de production d'ECS adaptées au contexte technico-économique est ainsi possible.

Pour ce faire, deux outils sont utilisés et liés. D'une part, le LENI (Laboratoire d'énergétique industrielle – EFPL) développe des algorithmes d'optimisation thermo-économique multi-objectifs pour la conception de systèmes de conversion éner-



gétique, comme des PAC ou des modules de cogénération (moteurs, piles à combustibles, ...). Ces modèles incluent un petit nombre de paramètres environnementaux lors de la phase d'utilisation du système énergétique, en particulier les émissions de CO<sub>2</sub>.

De son côté, le champ d'étude d'Ecointesys SA est l'analyse de cycle de vie (ACV) et les méthodes d'analyse de l'impact. Ces méthodes permettent de calculer, d'analyser et d'interpréter les impacts environnementaux de produits ou services en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie du système, « du berceau à la tombe ». Cela signifie que toutes les phases – production, transport, utilisation, fin de vie – sont prises en compte.

Lier les champs de recherches du LENI et de Ecointesys permet de coupler l'approche thermo-économique et le dimensionnement dynamique de systèmes énergétiques à une analyse environnementale globale intégrant des bases de données d'ACV et des méthodes d'analyse de l'impact.

Dans un second temps, cet outil est testé pour évaluer des scénarios approchant les conditions réelles de consommation de chauffage et d'électricité d'un bâtiment résidentiel. Le contexte abritant ces cas d'étude est la situation genevoise. Toutefois, un élargissement est effectué dans un but comparatif, en utilisant aussi des données suisses et européennes.

Les résultats obtenus doivent permettre d'évaluer, dans les conditions retenues, différents types de systèmes énergétiques, en particulier la pompe à chaleur et le moteur en cogénération. Ils doivent permettre d'aboutir à des recommandations applicables au canton de Genève et servir de base à des prises de décision pour définir des politiques énergétiques, en incluant des paramètres technologiques, économiques et environnementaux.

La structure du rapport est la suivante. Une analyse antérieure [Bochatay, 2005] a pu mettre en évidence l'importance-clé de certains facteurs, comme le niveau de température des sources froides et chaudes de la PAC, le *mix* électrique utilisé ou encore le rendement du moteur. Le chapitre 2 est donc consacré à une analyse préliminaire simplifiée et à une discussion sur l'importance de ces différents facteurs.

Puis, le chapitre 3 présente de manière simplifiée la méthodologie de couplage entre les outils d'optimisation thermo-économique du LENI et d'analyse de cycle de vie.

Le chapitre 4 propose des résultats issus de la mise en œuvre complète de la méthode appliquée à un cas d'étude comprenant plusieurs scénarios. Ces résultats permettront les conclusions et recommandations finales.

Une analyse préalable a mis en évidence l'influence majeure des paramètres suivant pour les deux systèmes énergétiques principalement étudiés ici, à savoir la pompe à chaleur et le moteur de cogénération.

#### 2.1 L'enjeu des niveaux de température pour la PAC

Le COP, et par suite le COPA, est un élément déterminant de la PAC. Il a en effet un rôle multiplicateur, puisque le produit du COP et de l'électricité consommée par la PAC donne l'énergie fournie par la PAC sous forme de chaleur à chaque instant. Ainsi, une légère variation de la valeur du COP se répercute beaucoup plus fortement sur l'énergie fournie par la PAC, ou sur l'électricité consommée par celle-ci.

Or, le COP est fortement influencé par les niveaux de température de la source froide – air, sol, eau – et de la température de la source chaude – circuit de chauffage. C'est la raison principale de la variation des COPA du tableau 1.1, dans des conditions réelles d'utilisation. La température de l'air est négative en hiver, celle du sol est nulle, celle de l'eau est positive. Quant à la température de distribution de chaleur, elle est conditionnée par les paramètres architecturaux. Historiquement, les chauffages centraux alimentés par une chaudière à bois, mazout ou gaz (ou un moteur de cogénération) produisent de la chaleur à haute température distribuée par un réseau de radiateurs (p.e. 65 °C). Par contre, les chauffages au sol fréquemment installés dans les nouvelles constructions, ne nécessitent qu'une température de l'ordre de 35 °C pour atteindre la même température ambiante, en raison de la grande surface couverte par les serpents disposés sous le plancher.

On a :

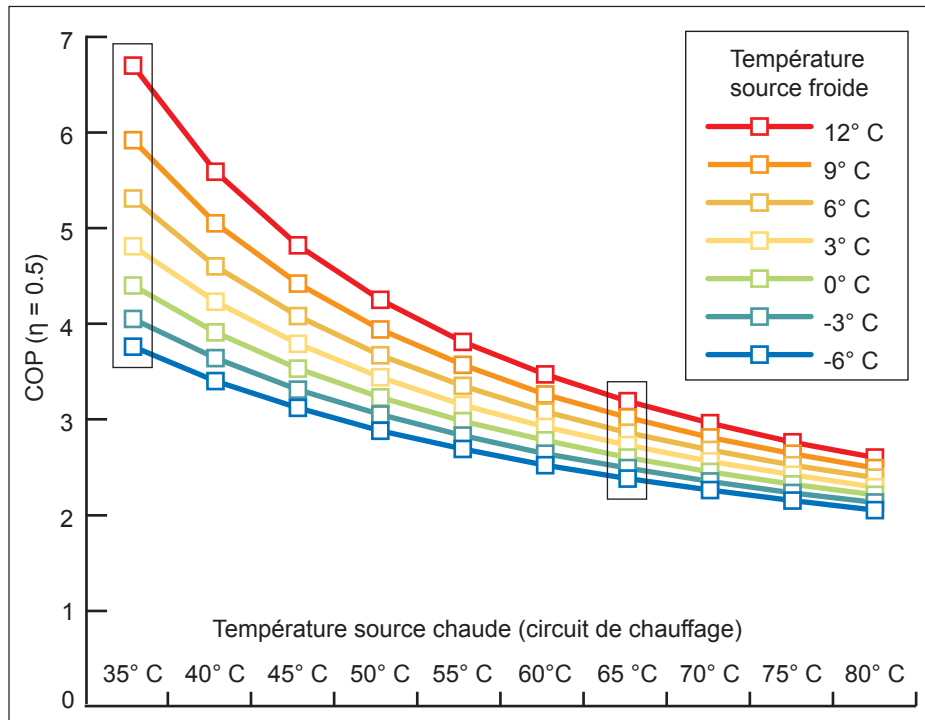
$$\eta = \text{COP}/\text{COP}_{\text{max, id}} \quad [2.1]$$

et :

$$\text{COP}_{\text{max, id}} = (1 - T_B/T_W)^{-1} \quad [2.2]$$

où  $\text{COP}_{\text{max, id}}$  est le COP d'une PAC idéale,  $T_B$  est la température de la source froide et  $T_W$  est la température de l'eau du circuit de chauffage.

Ces formules permettent de créer le graphique 2.1, où le COP théorique atteint par les PAC est indiqué en fonction des températures. Un rendement constant, égal à 0.5, est utilisé pour ce graphe.



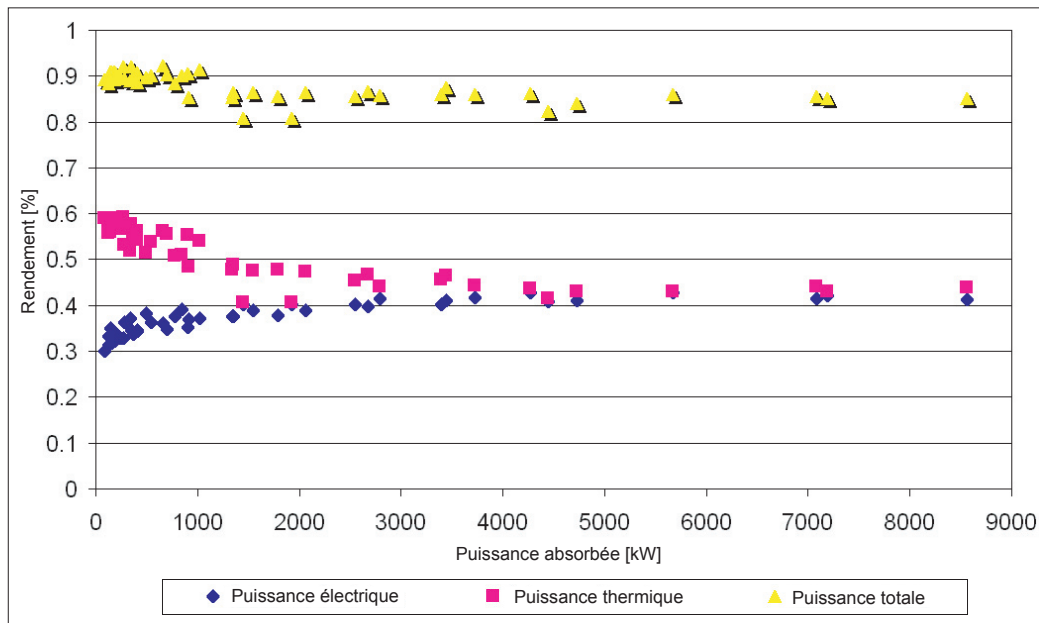
**Fig. 2.1 :** COP d'une PAC en fonction des températures des sources froides et chaudes à rendement constant (0.5).

Le graphique 2.1 permet d'une part de constater l'énorme différence qu'il y a entre les deux niveaux de température sus-mentionné. On peut d'hors et déjà affirmer que ce paramètre est essentiel et pèse de tout son poids pour l'installation ou non d'une PAC en fonction de critères économiques ou environnementaux.

D'autre part, la variation de température de la source froide a aussi une forte influence sur l'efficacité de la PAC. Bien que la température du sol soit de l'ordre de 8°C en valeur moyenne pour le Moyen-Pays suisse [www.geothermal-energy.ch...], il faut utiliser la courbe à 0°C pour la température du fluide réfrigérant et un rendement de 0.5 pour une PAC géothermique. Pour une PAC utilisant l'eau du lac Léman, une température de 10°C environ peut-être retenue.

## 2.2 Le rendement du moteur de cogénération

L'annexe 1 et la figure 2.2 qui s'y rapporte mettent en évidence les variations de rendement électrique et de rendement thermique pour une gamme de moteur à gaz en cogénération, selon les indications fournies sur les sites web de leur fabricant. Plus le moteur est gros, plus le rendement électrique s'élève, dans un intervalle 0.3-0.43. La somme du rendement électrique et du rendement thermique est relativement constante, proche de 0.9.



**Fig. 2.2:** rendement électrique et thermique des CCF.

Source des données : Echantillon de 46 unités collectées sur les sites web des fabricants Dimag, Royce & Partners et GE Jenbacher (juillet 2005). Données présentées à l'annexe 1

Pour des micro-cogénération, de puissance inférieure à  $10 \text{ kW}_{\text{el}}$ , seul le modèle Dachs de Senertec ( $Q_{\text{el}} = 5.5 \text{ kW}$ ) a été disponible. Son rendement électrique est 0.31 et celui thermique 0.62, sans condensation. L'énergie de condensation récupérée à basse température ( $35^\circ\text{C}$ ) porte le rendement thermique de ce modèle à 0.69

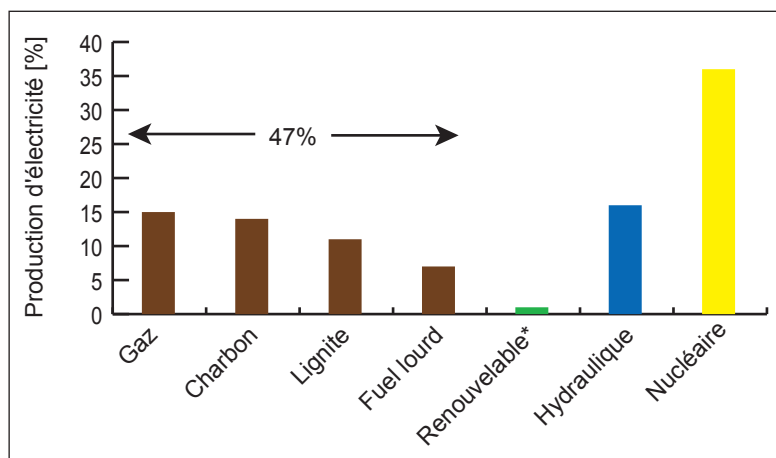
Dans le cas du couplage PACOGEN, l'intérêt est évidemment de bénéficier d'un rendement électrique maximal, puisque celui est multiplié par l'effet multiplicateur du COP de la PAC.

## 2.3 L'origine de l'électricité

[Houillon, 2001:68] a mis en évidence l'impact déterminant que peut avoir l'électricité sur le bilan ACV d'un système énergétique comme une PAC, selon la provenance de l'électricité. C'est la raison pour laquelle plusieurs *Mix électriques* seront utilisés dans cette étude, à la fois pour la discussion sur les paramètres clés comme pour les scénarios d'étude de cas ultérieurs.

### 2.3.1 Le *Mix UCTE*

Le *mix UCTE*, tel qu'il est mis à disposition par Ecoinvent [Frischknecht, Faist Emmenegger, 2003], correspond à l'électricité produite par 23 pays européens (www.ucte.org). L'impact environnemental de ce *mix* est très élevé, que ce soit à la fois en terme de santé humaine ou de changement climatique, en raison de la forte proportion (47%) de centrales thermiques, brûlant des ressources fossiles (lignite, charbon, fuel lourd et gaz naturel ou industriel) [Frischknecht, Faist Emmenegger, 2003]. En plus du CO<sub>2</sub> et à part le gaz naturel, ces combustibles émettent de forte quantité de SO<sub>2</sub>, des PM<sub>2,5</sub> et des NOx. La figure 2.3 renseigne sur les sources de production du *Mix UCTE*.



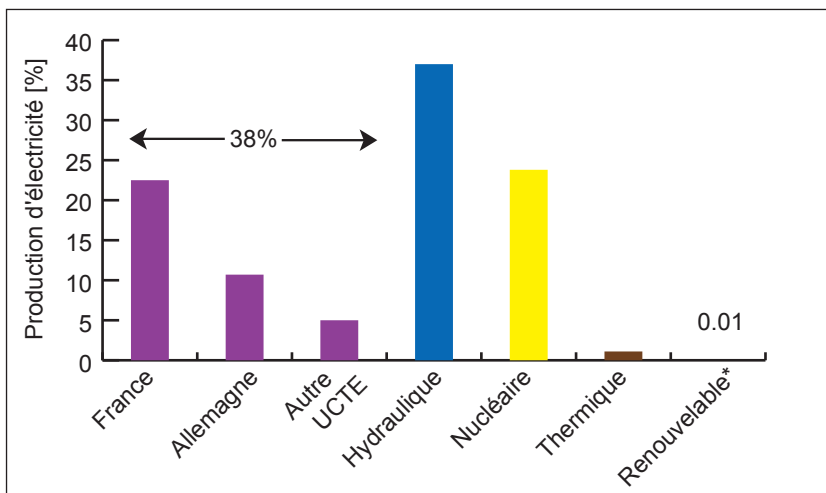
**Fig. 2.3:** filière de production du *mix* européen.

Source des données : Ecoinvent 1.1 [Frischknecht, Faist Emmenegger, 2003]

### 2.3.2 Le *Mix Swiss*

Le *Mix Swiss*, tel qu'il est défini par Ecoinvent [Frischknecht, Faist Emmenegger, 2003], prend en compte l'ensemble de la production sur territoire helvétique, ainsi que le total des importations en provenance de différents pays européens, même si

celles-ci ne sont que transportées par les réseaux à très haute tension à destination d'un autre pays européen. En ce sens, le *Mix Swiss* est de point de l'ACV de moins bonne qualité, puisque la Suisse est exportatrice nette d'électricité vers l'Europe. Or, le bilan ACV de la production helvétique, est très bon puisque ses deux sources principales de production (59 % hydraulique, 38 % nucléaire) n'émettent quasiment pas d'émissions toxiques ni de CO<sub>2</sub>.



**Fig. 2.4:** filière de production du *mix swiss*, incluant les importations. \* = éolien + photovoltaïque.

Source des données : Ecoinvent 1.1 [Frischknecht, Faist Emmenegger, 2003]

### 2.3.3 Le *Mix NGCC*

Le *Mix NGCC* correspond à l'électricité produite par une centrale à gaz à cycle combiné. La combinaison d'une turbine à gaz et d'une turbine à vapeur permet d'obtenir de plus hauts rendements qu'une centrale à gaz classique. L'installation modélisée dans Ecoinvent 1.1 et utilisée ici a un rendement de 58 % [Faist Emmenegger & al., 2003 : 121].

La première raison justifiant de la création de ce *mix* virtuel a trait à une évolution probable du futur approvisionnement helvétique.

En effet, on peut s'attendre à des changements potentiellement important des sources de production électriques suisses. D'une part, le taux annuel de croissance de la demande électrique suisse de 1.8 % depuis une décennie [OFEN, 2004:12] associés aux prévisions de [Axpo, 2005] à l'horizon 2050 s'échelonne entre 2 % (scénario bas : 1 %) jusqu'en 2010, 1.5 % (0.5 %) jusqu'en 2030 et 1 % (0.5 %) ensuite.

D'autre part, les capacités de production suisse baisseront prochainement de manière importantes sans nouvelles constructions. En effet, 40 % de la production électrique suisse est nucléaire. Or, les 5 réacteurs nucléaires, mis en service entre 1969 et 1979, sont vieillissants et seront arrêtés de manière échelonnée vraisemblablement dès la prochaine décennie.

Ainsi, selon les prévisions de [Axpo, 2005], les premières pénuries hivernales d'alimentation auront lieu avant 2020.

En conséquence, la Suisse va devoir se doter de nouvelles installations électriques. Le renouvelable devrait croître fortement, mais restera pendant encore longtemps une solution secondaire en terme de quantité de kWh produit : guère plus de 6 %, toujours selon [Axpo, 2005]. La voie du nucléaire reste une possibilité, mais le scepticisme politique à son égard rend très improbable que l'entier du déficit électrique suisse soit comblé par cette voie. La solution sera probablement diversifiée. Le gaz semble devoir prendre une importante place dans ce futur panachage. Par exemple, un projet est d'hors et déjà bien avancé pour reconverter l'ancienne centrale thermique à huile lourde de Chavalon en centrale à gaz naturel.

C'est la raison pour laquelle le *Mix NGCC*, exclusivement composé d'électricité en provenance d'une centrale à cycle combiné, est également évalué.

La seconde raison de la création du *Mix NGCC* est qu'il correspond de manière très proche à l'une des offres disponibles sur le marché genevois (SIG initiale, voire ci-dessous). Le *Mix NGCC* va alors la remplacer, en lui empruntant toutefois le tarif pratiqué.

#### 2.3.4 Le *Mix* genevois

Le canton de Genève se distingue de l'ensemble de la Suisse par sa politique électrique, ce qui rend impossible l'utilisation du *Mix swiss* pour représenter la situation genevoise. En effet, il a fourni de gros efforts pour éliminer sa consommation d'origine nucléaire (dès octobre 2004) et pour favoriser les énergies renouvelables (déchets, photovoltaïque, biomasse, ...) et hydraulique. Les SIG (Services Industriels de Genève) proposent à ses clients différentes offres de courant, dans le but d'encourager la consommation d'électricité « verte ».

Les offres proposées aux clients sont les suivantes (communication personnelle avec Robert Edinger des SIG, 17.10.05) :

- SIG Vitale Bleu. Elle est composée à 100 % d'électricité d'origine hydraulique, de provenance, genevoise, suisse ou française et certifiée par le label TÜV EE01.



- SIG Vitale Jaune. Elle composée d'électricité d'origine genevoise, soit à 49 % d'électricité en provenance de l'UIOM des Cheneviers (valorisation de l'énergie du déchets) et de 51 % d'électricité d'origine hydraulique.
- SIG Vitale Vert. Elle est composée d'électricité certifiée par le label *nature-made star*. 97.2 % de son origine est hydraulique suisse, 2.5 % est solaire. Le reste est produit par la biomasse.
- SIG Initale. Elle est composée d'électricité produite par des centrales à gaz naturel à haut rendement.

Le tableau 2.1 résume ces offres en mentionnant la part de marché de chacune d'elle ainsi que le prix de vente par les SIG.

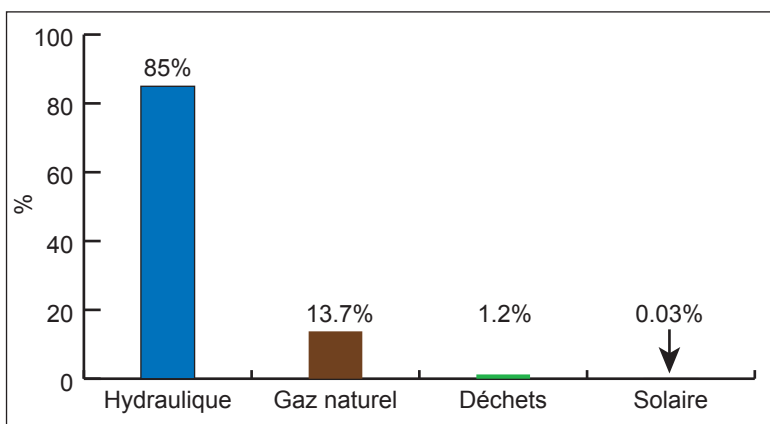
**Tab. 2.1 :** récapitulatif des offres d'électricité des SIG.

Sources des données : SIG. Le tarif est mentionné TVA incluse.

	Volume (GWh)	%	Tarif (ct CHF)
Vitale Bleu	2158	82.5	25.6
Vitale Jaune	66	2.5	27.8
Vitale Vert	33	1.3	31
SIG Initial	360	13.8	25.3
Mix genevois	2617	100	25.7
Mix genevois*	0.059 grCO <sub>2</sub> /kWh 0.31 kWh énergie primaire non renouvelable		

\* hors déchets et biomasse. Source : Ecoinvent 1.1 et Impact 2002+ (voir tab. 2.2)

La provenance de l'électricité de l'ensemble du mix genevois est représentée à la fig. 2.5 :



**Fig. 2.5 :** origine du courant vendu par les SIG. Manque biomasse (0.004%).

Source : SIG.

### 2.3.5 Récapitulatif

Contrairement aux *Mix UCTE* et *Swiss* qui concernent la puissance délivrée à l'utilisateur, les données fournies par Ecoinvent 1.2 pour l'électricité selon la source concernent les kWh produits à la centrale. En conséquence, il faut ajouter la part d'analyse de cycle de vie correspondant au réseau de distribution basse tension, au réseau de transport moyenne tension et aux transformateurs, ainsi que les émissions ( $SF_6$ ) qui y sont associés. Des valeurs identiques à celle modélisée par Ecoinvent pour le *Mix swiss* ont été utilisées. En particulier, les pertes de transport et de distribution de 7.5 %, correspondant à la moyenne suisse estimée, ont été incluses [Frischknecht, Faist, 2003 : 75].

En résumé, quatre mix sont utilisés ici. Le *Mix UCTE*, le *Mix Swiss* comprenant les importations européennes, le *Mix NGCC* pouvant être considéré identique à l'offre SIG initiale à laquelle il emprunte les tarifs et le *Mix GE Bleu* correspondant à l'offre SIG Vitale Bleu. La somme des *Mix NGCC* et *GE Bleu* représente 96 % de l'électricité vendue par les SIG.

Le tableau 2.2 recense pour chacun de ces *mix* deux valeurs issues de calcul d'ACV, ainsi que le prix de vente actuel des SIG ou les valeurs utilisées pour les *mix* non genevois. De même, ce tableau indique les valeurs pour le gaz naturel acheté et brûlé à des fins de chauffage.

Les valeurs de  $CO_2$  et tarifaires seront utilisées par le modèle thermo-économique pour optimiser les systèmes énergétiques en fonction de deux objectifs, l'un environnemental et l'autre économique.

**Tab 2.2:** récapitulatif des prix et de deux indicateurs ACV pour les mix électriques retenus

1 kWh	kg CO <sub>2</sub> -éq*	kWh énergi- primaire*	Tarif (ct. CHF)**
Mix UCTE	0.519	3.25	25.3 (1)
Mix swiss (+import)	0.129	2.19	25.3 (1)
Mix NGCC	0.431	2.29	25.3 (2)
Mix GE Bleu	0.0085	0.03	25.6
Mix solaire	0.0237	0.439	
Mix éolien	0.00746	0.138	
Gaz naturel brûlé en cogénération	0.238	1.25	Vente : 7.6 (3)
			Rachat : 9 (4)

1 kWh	kg CO2-éq*	kWh énergi- primaire*	Tarif (ct. CHF)**
-------	------------	--------------------------	-------------------

\* : source des données : Ecoinvent 1.1 et Impact 2002+

\*\* : source des données : SIG (R. Erdinger, 17.10.05)

(1) : correspond au tarif le plus bas disponible à Genève.

(2) : correspond au tarif de l'offre SIG initiale, à la composition quasiment identique à celle du Mix NGCC

(3) : correspond au prix de vente par les SIG de 1 kWh de gaz naturel pour le chauffage

(4) : correspond au prix de rachat par les SIG de 1 kWh d'électricité produit de manière décentralisée par un moteur en cogénération

A ces quatre *mix*, la figure 2.6 ajoute deux autres sources d'électricité renouvelable, qui permettent de dégager des tendances si ces sources d'électricité devaient prendre une place plus importante à l'avenir. Il y a d'une part l'électricité photovoltaïque et d'autre part l'électricité d'origine éolienne. Les catégories mentionnées à la figure 2.6 sont les quatre catégories de dommage proposées par la méthode d'analyse de l'impact Impact 2002+ (§ 3.2.2, tab. 3.1), et s'appliquent à tout le cycle de vie des processus.

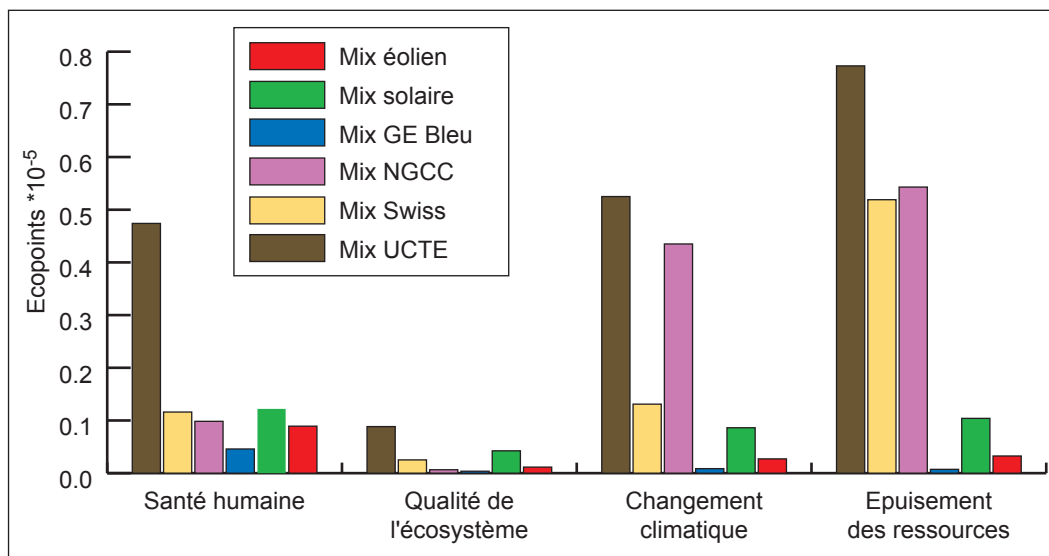


Fig. 2.6: comparaison des 6 mix utilisés après normalisation pour un kWh au réseau.

Sources : Ecoinvent 1.1, Impact 2002+

Une importante source d'électricité manque encore. Il s'agit de l'électricité issue de la valorisation de l'incinération des déchets en UIOM, comme celle des Chevriers, à Genève. En Suisse et en 2004, le déchet a permis de produire beaucoup plus d'électricité (env. 3000 TJ) que le vent (23) ou le solaire (60) [OFEN, 2005: 5]

et possède encore du potentiel de croissance. Cependant, il est difficile d'évaluer en ACV l'électricité produite par le déchet. [Doka, 2005] s'y est essayé en soustrayant à l'écobilan d'une UIOM valorisant énergétiquement la combustion de ses déchets, l'écobilan d'une UIOM équivalente ne le faisant pas. Les résultats sont publiés de manière agrégée en suivant la méthode d'analyse de l'impact Ecoindicator 99 (voir § 3.2.2): 13  $\mu$ pt par kWh électrique issue d'une UIOM, contre 400 par une centrale hydraulique ou 27'900 par une NGCC [Doka, 2005 : 21]. Si la méthode est intéressante, l'aggrégation des données rend impossible son utilisation en l'état et nécessiterait des compléments d'information.

Puisque l'électricité en provenance de l'UIOM des Cheneviers vendue par les SIG ne représente que 1 % de la vente du courant par les SIG et que cette question n'est pas centrale dans cette étude, le courant en provenance d'une UIOM ne sera pas utilisé ci-dessous.

## 2.4 Ecobilan de la phase d'utilisation

Les trois paramètres clés discutés au §2.4, soit les températures des sources froides et chaudes de la PAC, le rendement du moteur de cogénération et de la provenance d'électricité sont testés ci-dessous. Combinés, ceux-ci permettent d'évaluer différents scénarios, en ne prenant en compte que l'analyse de cycle de vie de la phase d'utilisation. En d'autres termes, seule la consommation d'électricité et la consommation-combustion de gaz naturel sont pris en compte dans ces scénarios, incluant l'ensemble de leur cycle de vie, calculé à l'aide de la base de données Ecoinvent 1.1 (voire § 3.2.1).

L'unité fonctionnelle (UF) c'est-à-dire le service rendu par le système et pris en compte dans l'analyse de cycle de vie, correspond aux besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ECS) d'un bâtiment de 650 m<sup>2</sup> (env. 16 habitants) durant une année, soit :

- 76 MWh de besoin de chauffage,
- 14 MWh de besoin d'ECS (voir § 3.4.1).

Les besoins électriques domestiques, omis ici, sont considérés dans l'étude de cas dont les résultats sont présentés au chapitre 4.

Deux systèmes énergétiques ont été évalués. Le premier est le système PACOGEN, composé d'un moteur à gaz naturel en cogénération et d'une PAC. L'hypothèse utilisée dans ce cas est que l'ensemble de l'électricité produite par le moteur est utilisée par la PAC. La chaleur produite par la PAC ou par le moteur chauffe le bâtiment.

Le second est PAC MIX ELECTRIQUE. L'ensemble des besoins de chaleur de l'immeuble est couvert par la PAC, alimentée en électricité par l'un des 6 *mix* représentés à la fig. 2.6.

Deux températures de distribution de chaleur pour la PAC ont été évaluées : 35 °C (W35) pour simuler le comportement d'un chauffage au sol et 65 °C (W65) pour représenter un système de distribution de chaleur par radiateurs.

Deux températures de source froide pour la PAC ont été testées : 0 °C (B0) pour évaluer le comportement d'une PAC géothermique et 10 °C (W10) pour une PAC fonctionnant à l'eau du lac. Dans le cas de PACOGEN, l'eau chaude sanitaire est chauffée par le moteur. Dans le cas de PAC MIX ELECTRIQUE, la température de l'eau chaude est celle de la température du chauffage, jusqu'à une limite inférieure de 50 °C.

Enfin, une large gamme de rendement de moteurs en cogénération a été utilisée, afin d'illustrer l'influence du rendement du moteur. L'intervalle de rendement électrique ( $0.29 \leq \eta_{el} \leq 0.44$ ) de l'annexe 1 a été choisi. Le rendement total du moteur est soit de 0.90 ( $T = 65$  °C, sans condensation), soit de 0.97 ( $T = 35$  °C, avec condensation).

Deux indicateurs ACV ont été utilisés et sont issus de la méthode de calcul de l'impact Impact 2002+ (cf § 3.2.2) dont les valeurs utilisées ici sont données au tableau 2.2. Il s'agit des tonnes de CO<sub>2</sub>-équivalent et des MWh d'énergie primaire. Les coefficients sont données dans le tableau 2.3. D'autres indicateurs compléteront l'étude dans l'analyse complète (§ 4), prenant en plus en compte l'analyse de cycle de vie de la structure des systèmes.

Le lecteur peut se rendre compte de l'importance relative de chacun des paramètres discutés ci-dessus sur les graphiques 2.7 et 2.8, pour ces deux indicateurs.

La méthode de calcul de ces graphes est la suivante. Pour les valeurs de CO<sub>2</sub> des scénarios PAC :

$$CO2_{tot} = (COPA_{chauffage} * En_{chauffage} + COPA_{ECS} * En_{ECS}) * coeff_{CO2-mix} \quad [2.3]$$

où COPA est estimé 10 % inférieur au COP calculé selon à les équations 2.1 et 2.2 pour les différentes températures,  $coeff_{CO2-mix}$  est la valeur de CO<sub>2</sub> émises par kWh d'électricité selon tab. 2.3,  $En$  est l'énergie consommée annuellement pour satisfaire les besoins du bâtiment. Les coefficients sont données dans le tableau 2.2.

La démarche est similaire pour le calcul des MJ d'énergie primaire non-renouvelable et pour les scénarios PACOGEN, où l'ECS est chauffée par le moteur, le bâtiment par la PAC et le moteur, et où toute l'électricité consommée par la PAC est produite par le moteur.

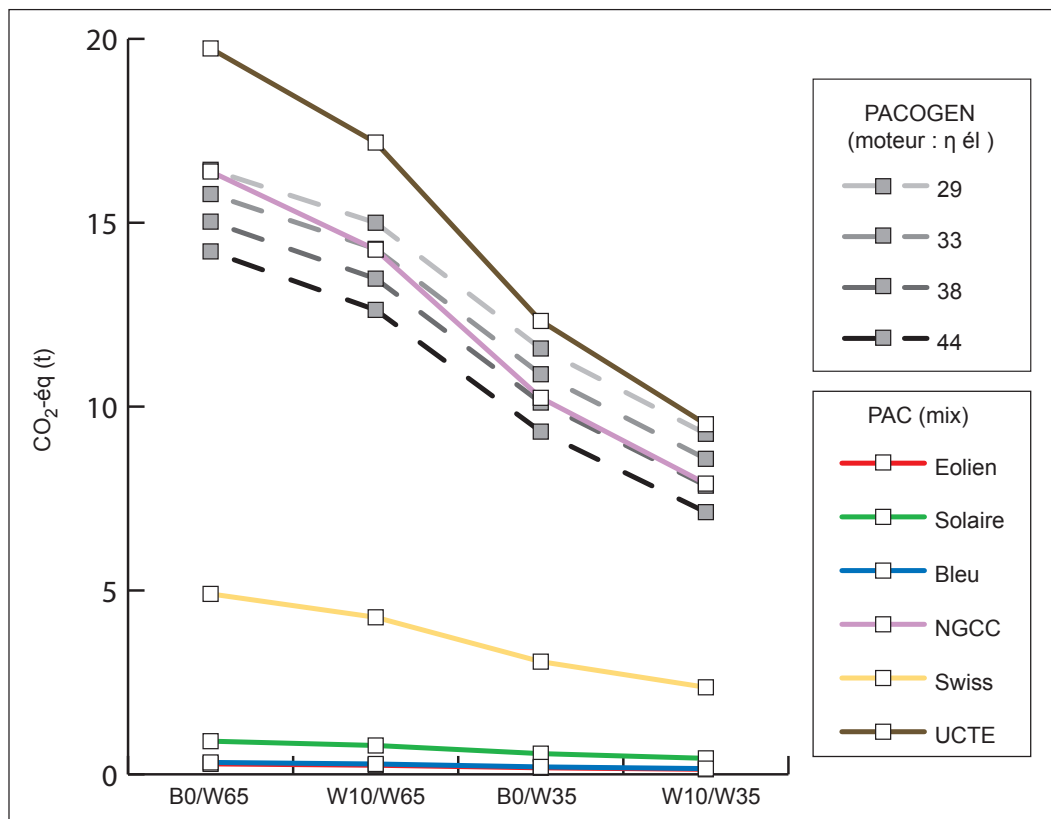


Fig. 2.7: évaluation en terme d'émission de CO<sub>2</sub> de scénarios PAC MIX ÉLECTRIQUE et PACOGEN.

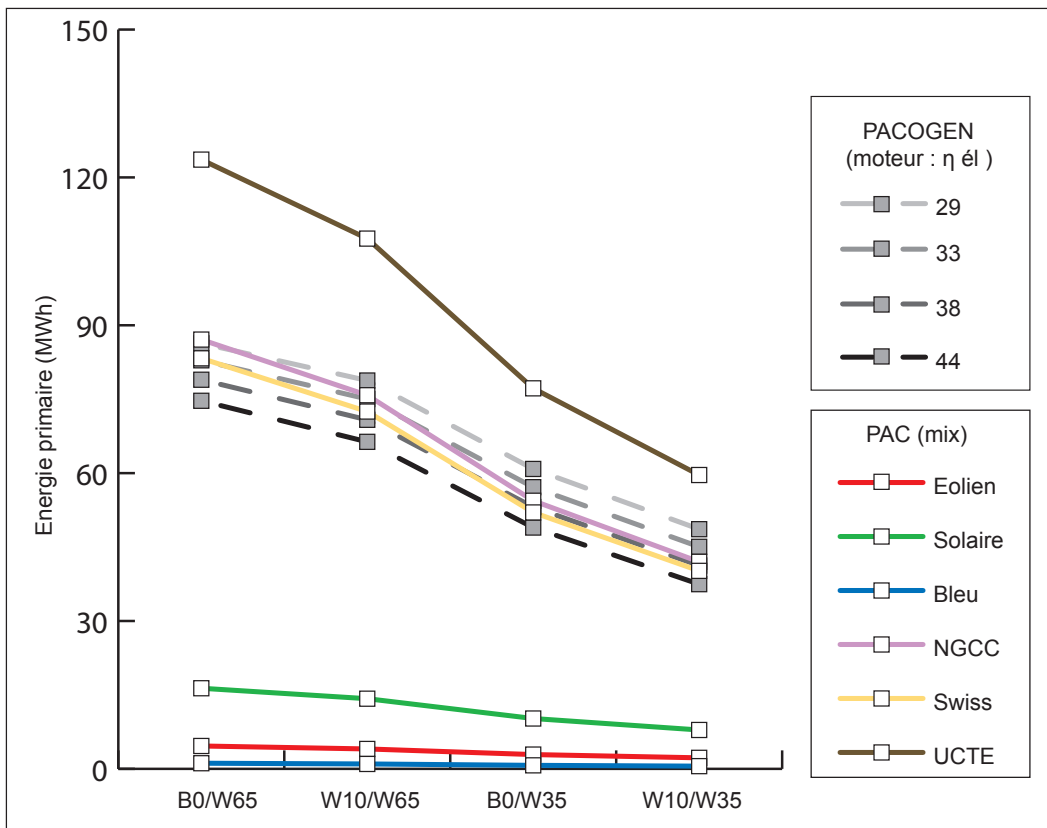
Source des données : Ecoinvent 1.1, Impact 2002+

Ici, nous nous contenterons de quelques constatations ou remarques :

- la variation de la position relative du *Mix swiss* est due à sa composition. Le nucléaire comme l'énergie hydraulique n'émettent que très peu de CO<sub>2</sub>. Par contre, le nucléaire consomme de l'énergie fissile, et cela augmente son bilan de consommation d'énergie primaire.
- le système PAC MIX ÉLECTRIQUE a globalement de meilleures performances que le système PACOGEN, alimenté énergétiquement en gaz naturel. Cependant, la forte variation de l'impact sur les deux indicateurs ACV de PAC MIX ÉLECTRIQUE souligne l'importance du choix du *mix*.
- les deux scénarios utilisant la même source d'énergie, à savoir le gaz naturel par le biais du moteur en cogénération ou de la PAC alimentée en électricité par une centrale NGCC, ont des impacts proches. Le rendement du moteur en cogénération est alors déterminant. Les gros moteurs ( $\eta_{el} > 0.4$ ), sont plus

intéressants que la PAC Mix NGCC; alors que les petits ( $\eta_{el} < 0.3$ ) ne le sont pas.

- la température de la source chaude, pour les deux températures choisies ici, a une très grosse influence. En effet, dans le cas du système PACOGEN, la basse température cause de 30 à 44 % d'impact en moins que la haute température. Ce chiffre s'élève même de 38 à 45 % pour le système PAC MIX ÉLECTRIQUE.
- de la même façon, l'utilisation d'une température de 10 °C (eau du lac) pour la source froide à la place de 0 °C (géothermie) permet d'éviter de 9 à 24 % de l'impact pour PACOGEN et de 13 à 23 % pour PAC MIX ÉLECTRIQUE.



**Fig. 2.8 :** évaluation en terme de consommation d'énergie primaire de scénarios PAC MIX ÉLECTRIQUE et PACOGEN.

Source des données : Ecoinvent 1.1, Impact 2002+





### Méthodologie de combinaison du MTE et de l'approche ACV

Ce chapitre explicite la méthodologie de couplage entre le modèle thermo-économique (MTE) et l'analyse de cycle de vie (ACV), dont l'intérêt repose sur une optimisation des systèmes énergétiques sur des critères de coûts et d'impacts environnementaux.

#### 3.1 Le modèle thermo-économique

Le LENI développe plusieurs modèles d'optimisation thermo-économiques pour des systèmes énergétiques (moteurs, piles à combustibles, pompes à chaleur, ...) et leur intégration pour délivrer des services énergétiques.

Les paramètres d'entrée du MTE sont des profils de consommation pour des bâtiments donnés. Les besoins de chaleur, d'eau chaude sanitaire et d'électricité du bâtiment sont pris en compte comme des paramètres externes de même que la courbe de température extérieure.

Le MTE fonctionne en deux temps. Premièrement, un algorithme d'optimisation multi-objectif (QMOO) définit la taille des équipements dans le système. Puis, un second algorithme détermine la meilleure stratégie d'utilisation afin de minimiser le prix de revient des services énergétiques délivrés.

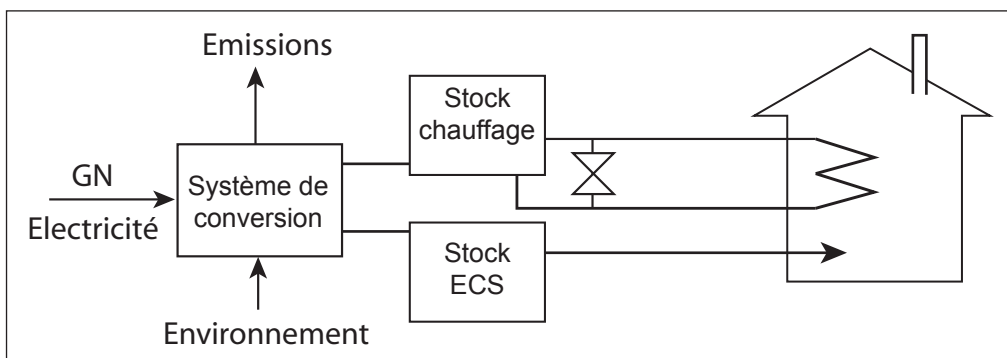


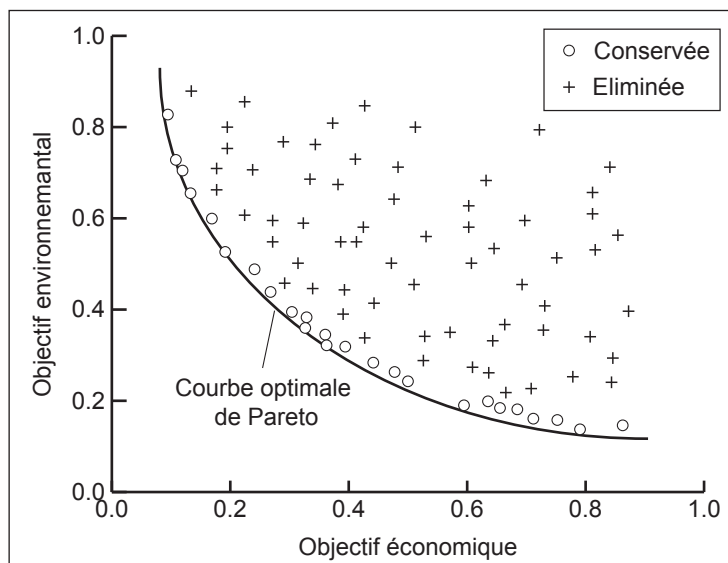
Fig. 3.1 : configuration du système

Dans cette approche, une fonction-objectif est économique et représente le coût annuel de la production des services énergétiques. La seconde est écologique et définie par le rapport  $CO_2/SE$ , où le SE (Service Energétique) est la somme de l'électri-

ité produite en kWh et de l'énergie calorifique produite exprimée en exergie, afin de ne pas surpondérer la chaleur par rapport à l'électricité.

La méthode utilisée considère également un réservoir (fig. 3.1) qui permet de diminuer la taille de l'unité de conversion d'énergie.

Le résultat est l'obtention d'une liste de solutions optimales situées théoriquement sur une courbe de Pareto [Manasse-Ratsimandresy, 2004: 27-28]. Selon les priorités du décideur, celui-ci peut alors sélectionner une configuration parmi ce panel de solutions.



**Fig. 3.2:** sélection des résultats optimaux parmi l'ensemble des configurations testées par le QMOO pour deux fonctions-objectifs.

La fonction-objectif  $CO_2/SE$  a été modifiée dans cette étude pour permettre la comparaison entre différents systèmes. En effet, si le moteur produit de l'électricité en telle quantité qu'elle doit être vendue, il n'est plus possible de le comparer à un scénario sans moteur, où rien ne sort du système. En conséquence, la fonction-objectif est adaptée comme suit :

$$\frac{CO_2}{SE} = \frac{CO_2 \text{ gaz naturel} + CO_2 \text{ mix acheté} - CO_2 \text{ mix vendu}}{Energie_{\text{électrique domestique consommée}} + Exergie_{\text{chaleur consommée}}} \quad [3.3]$$

Les valeurs de  $CO_2$  utilisées ici sont les valeurs d'analyse de cycle de vie mentionnée dans le tableau 2.2.

L'étude devrait permettre de vérifier la pertinence de la deuxième fonction-objectif. A cet effet, les solutions optimales proposées par le MTE seront analysées sous l'angle du cycle de vie. Si l'indicateur  $CO_2/SE$  est un bon indicateur environnemental,

les courbes générées par la première fonction-objectif et les indicateurs ACV calculés auront la même allure et on pourra estimer que l'indicateur  $\text{CO}_2/\text{SE}$  est compatible avec l'ACV. Si au contraire une ou plusieurs courbes ACV se démarquent clairement par rapport à la courbe  $\text{CO}_2/\text{SE}$ , il pourrait être indiqué de remplacer la deuxième fonction-objectif par l'un des indicateurs ACV (ou un agrégat) ou de rajouter une troisième fonction-objectif.

L'objectif économique comprend les coûts d'investissement des systèmes énergétiques (annexe 8), de maintenance, d'achat du gaz naturel (tab. 2.2) et enfin d'achat ou de vente (si le moteur produit plus d'énergie consommée par le système) de l'électricité sur le réseau (tab. 2.2). Concernant les autres valeurs, prière de se référer à [Manasse-Ratsimandresy, 2004].

## 3.2 L'analyse de cycle de vie

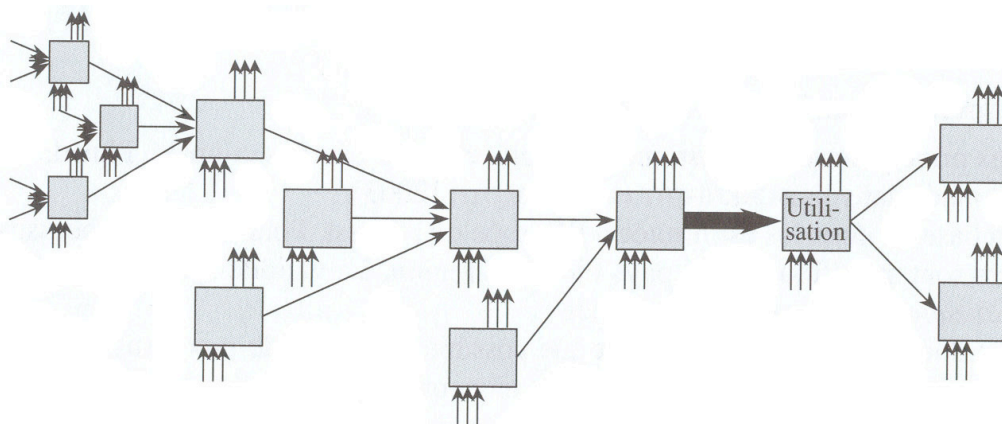
Les phases du cycle de vie sont la production, incluant l'extraction des matières premières et la construction du système, la phase d'utilisation, qui est la consommation d'énergie ou d'autres services durant l'utilisation du système, et enfin la fin de vie, qui est l'élimination du système.

Pour cette étude, nous ne distinguerons sémantiquement que deux phases : la « structure » représente les phases de production et de fin de vie, alors que la phase d'utilisation représente la consommation de combustible ou d'électricité par les systèmes.

### 3.2.1 La base de données Ecoinvent

Ecoinvent ([www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch)) est une base de données d'inventaire du cycle de vie. Elle répertorie un ensemble de plus de 400 émissions ou extractions de ressources pour une large gamme de services et de produits, appelés processus technologiques. Chaque valeur de cette base de données est validée par un groupe d'expert.

Le principe d'un inventaire ACV (Norme ISO 14041 : 1998) est le suivant. Chaque processus fait appel à des processus intermédiaires, nécessite des extractions de ressources naturelles et engendre des émissions directes. Il en est de même pour chaque processus intermédiaire, qui font à leur tour appel à d'autres processus intermédiaires, et ainsi de suite (fig. 3.3).



**Fig. 3.3:** arbre des processus. Chaque processus technologique utilise des ressources naturelles, émet des émissions et utilise d'autres processus technologiques. Ceux-ci font appel à leur tour à une chaîne identique. La chaîne des processus est alors théoriquement infinie.

Tiré de [Jolliet & al., 2005 : 55].

Par exemple, la production de chaleur issue du bois nécessite du bois et émet du  $\text{CO}_2$  ou des particules. Mais elle nécessite aussi des processus intermédiaires, comme la chaudière, l'abattage et le transport du bois, ... L'abattage nécessite la construction d'une tronçonneuse, et la production de l'essence qui lui permet de fonctionner, etc. Chaque processus intermédiaire est responsable de nouvelles émissions et extractions de ressources. Ces émissions sont comptabilisées dans l'ACV de la production de chaleur et sont appelées « émissions indirectes » par opposition aux « émissions directes » que sont les émissions de  $\text{CO}_2$  ou de particules provoqués par le processus « production de chaleur par combustion de bois ».

En pratique, la méthode de calcul pour remonter « à l'infini » la liste des processus est un calcul matriciel. Elle est décrite à l'annexe 2

Le résultat de la manipulation de ces matrices est un vecteur d'inventaire d'émissions et d'extractions. Actuellement, il contient 1061 lignes résultantes de la combinaison des substances répertoriées et de leur lieu ou milieu d'émission.

### 3.2.2 Les méthodes d'analyse de l'impact

Le vecteur d'inventaire d'émission n'est que très difficilement exploitable directement en raison du grand nombre de lignes qui le composent. Il est nécessaire de le réduire en un nombre restreint d'indicateurs ACV. Ceux-ci permettent ensuite d'interpréter et de comparer les systèmes étudiés. C'est précisément ce que font les méthodes d'analyse de l'impact, selon une démarche générale définie par la norme ISO 14042.

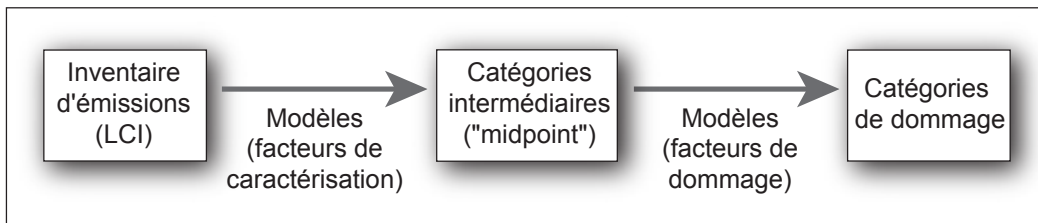


Fig. 3.4: étapes de l'analyse de l'impact.

Des modèles de migration, de diffusion et d'effets des émissions sont construits par ces méthodes afin de définir leur impact sur des catégories. Selon les méthodes, les modèles définissent plus ou moins de catégories, à un niveau intermédiaire (CML 2001) – par exemple l'écotoxicité terrestre ou aquatique, l'eutrophisation, l'occupation du sol, ... – ou à un niveau de dommage (Ecoindicator 99) – par exemple la qualité de l'écosystème – ou les deux (Impact 2002+).

Un troisième niveau est franchi par certaines méthodes (Ecoindicator 99) qui permet d'agréger les différentes catégories de dommage pour n'exprimer qu'un indicateur unique, exprimé en « écopoint ». Cela signifie pondérer différentes catégories de dommage, à savoir « santé humaine », « qualité de l'écosystème » et « ressources » pour la méthode Ecoindicator 99. Cette pondération est sujette à discussion, tant elle soulève de questions éthiques. A notre avis, elle ne peut être faite qu'en mentionnant très clairement qu'elle a été réalisée à titre indicatif.

Pour cette étude, seule la méthode Impact 2002+ a été utilisée. Elle regroupe les résultats de l'inventaire du cycle de vie en 14 catégories intermédiaires ou en quatre catégories de dommage, comme l'indique le tableau 3.1. La méthodologie définissant les facteurs de caractérisation et les facteurs de dommage est disponible dans [Jolliet & Al., 2003] et dans [Humbert & Al., 2004]. Impact 2002+ permet encore de normaliser les indicateurs de dommage en « points » – ou « pers\*an » –, où un point représente l'impact moyen causé par chaque Européen durant une année dans la catégorie donnée.

**Tab. 3.1:** catégories intermédiaires et de dommage, méthode Impact 2002+.  
Tiré de [Jolliet, 2005: 99]

Catégorie intermédiaire	Unité de référence intermédiaire	Catégorie de dommage	Unité de dommage
Toxicité humaine (cancérogène + non cancérogène)	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl éq. (air)	Santé humaine	DALYs
Effets respiratoires	kp PM <sub>2,5</sub> éq (air)		
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq. (air)		
Radiations ionisantes	Bq C-14 éq. (air)		
Formation de photo oxydants	kg éthylène éq. (air)		
Ecotoxicité aquatique	kg TEG éq. (eau)	Qualité de l'écosystème	PDF*m <sup>2</sup> *an
Occupation des sols	m <sup>2</sup> terre éq.		
Acidification/Eutrophisation terrestre	kg SO <sub>2</sub> éq. (air)		
Ecotoxicité terrestre	kg TEG éq. (sol)		En dvpt
Acidification aquatique	kg SO <sub>2</sub> éq. (air)		
Eutrophisation aquatique	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> éq (eau)		
Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> éq. (air)	Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> éq. (air)
Extraction de minerais	MJ d'énergie supplémentaire éq. ou kg de fer éq.	Ressources	MJ
Energie non-renouvelable	MJ totaux d'énergie non renouvelable éq.		

### 3.3 Méthodologie de calcul dynamique de l'impact

#### 3.3.1 Méthode

Une ACV classique définit *a priori* l'unité fonctionnelle (UF), c'est-à-dire le service ou le produit analysé, les limites du système et les scénarios étudiés. Le choix et la pondération des flux technologiques d'ACV est donc restreint à un nombre limité de cas. Plusieurs logiciels – Simapro, Gabi – plus ou moins conviviaux permettent de faire une telle analyse d'impact.

Or, dans notre cas, le MTE peut générer plusieurs dizaines voire centaines de configuration de dimensionnement possible des appareils. Les routines informatiques et les résultats sont traités avec le logiciel Matlab (calcul matriciel, programmation, ...). Chaque solution doit être évaluées par une méthode ACV. Il n'est donc pas possible d'utiliser les logiciels classiques d'ACV.

Ainsi, l'analyse de cycle de vie par Ecoinvent 1.2 et Impact 2002+ sera également entreprise par une routine Matlab. En plus de réduire fortement le temps de l'analyse, cela permettra à terme d'utiliser si besoin est les résultats de l'ACV, à savoir un ou plusieurs indicateurs ACV listés dans le tableau 3.1, comme fonction-objectif du MTE, en plus ou en remplacement de la fonction environnementale actuellement choisie ( $\text{CO}_2/\text{SE}$ ). La méthode de calcul de l'ACV est présente à l'annexe 3.

### 3.3.2 Liens entre les paramètres du MTE et ACV

Le MTE détermine la taille de chaque composant du système ainsi qu'un grand nombre de paramètres comme la quantité d'énergie utilisée ou le nombre d'heures d'utilisation du système, pour que le système fournisse le service qui lui est demandé.

Ces informations doivent ensuite être connectées à la base de données Ecoinvent 1.2. Cependant, le MTE et Ecoinvent ne vise pas les mêmes objectifs. En conséquence, le niveau de détail et la manière dont le système est considéré diffèrent le plus souvent.

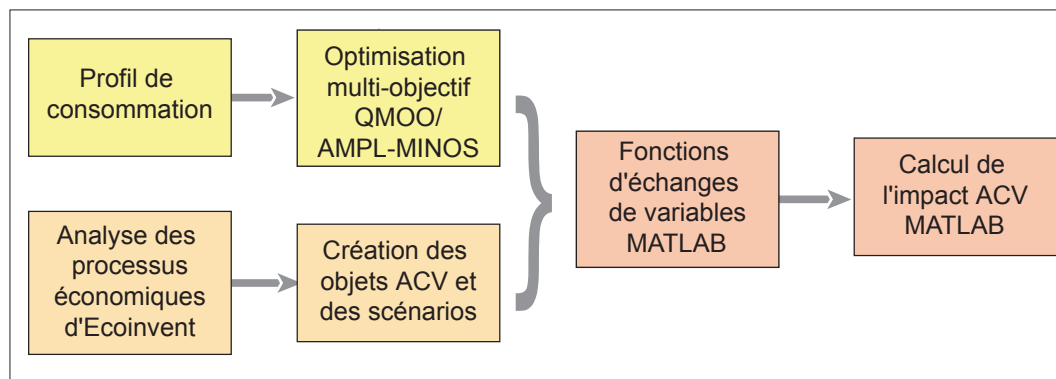
Par exemple, le processus technologique « Pompe à chaleur, 10 kW » de Ecoinvent recense tous les flux intermédiaires qui la composent, comme les kilos de différents composants de la PAC, l'énergie nécessaire à sa fabrication ou le transport qu'elle a engendré. Or, le MTE ne se préoccupe nullement de ces paramètres. Lui se préoccupe plutôt d'éléments comme la puissance électrique ou thermique de la PAC. Il est alors nécessaire de pouvoir lier ces approches.

La méthodologie utilisée est double. Premièrement, de nombreuses informations existent dans la littérature. On y trouve par exemple que la longueur de la sonde (processus Ecoinvent donné en mètre) est fonction de la puissance de l'évaporateur de la PAC (donnée du MTE en kWh). Quand ce type d'information n'est pas disponible, une analyse statistique sur un échantillon représentatif de systèmes est effectué. Par exemple, à l'aide de données-fabricants, le poids d'une PAC peut être défini si l'on connaît son COP nominal et sa puissance thermique, avec toutefois une certaine marge d'erreur.

Ces méthodes sont appliquées pour tous les éléments des systèmes considérés, en particulier la PAC (structure, sonde, fluide), le moteur, la chaudière à gaz, les

réservoirs, la chaufferie et les consommations d'énergie. Afin d'alléger le corps du rapport, le détail de la méthodologie et des modes de calculs pour chaque éléments des systèmes sont présentés à l'annexe 4.

En résumé, la méthodologie appliquée est représentée à la figure 3.5 :



**Fig. 3.5 :** méthodologie de couplage des outils MTE et ACV

Les variables échangées, calculées par le MTE et stockées dans un fichier de données, avant d'être lues par les « routines de liaison » entre les deux modèles, sont listées à l'annexe 7.

## 3.4 Application au cas d'étude

### 3.4.1 Détermination de l'unité fonctionnelle (UF)

L'unité fonctionnelle est définie selon certaines contraintes du MTE et des données utilisées pour l'approche ACV.

Développé pour un moteur de cogénération, le MTE optimise non seulement pour les besoins de chauffage, mais aussi d'eau chaude sanitaire (ECS) et d'électricité.

Un profil quotidien par saison des consommations d'ECS, de chauffage et d'électricité [Lopez, 2005] a été calculé pour un bâtiment de 650 m<sup>2</sup>, soit environ 16 habitants et extrapolés à l'année entière (annexe 9).

L'unité fonctionnelle peut alors être définie comme l'ensemble des besoins énergétiques – chaleur et électricité – de ce bâtiment pour un cycle d'une année, soit :

- 76 MWh de besoin de chauffage;
- 14 MWh de besoin d'ECS;
- 23 MWh de besoin d'électricité.



La température de confort du bâtiment est 22°C. Elle peut être atteinte selon deux scénarios : chauffage au sol à une température de 35°C ou chauffage central distribué par des radiateurs (65°C).

### 3.4.2 Définition des limites des systèmes

[Houillon, 2001] a mis en évidence l'évolution du parc de chaufferie pour les villas genevoises. Bien que les chaudières à mazout soient encore majoritaires (62 %, gaz : 29 %) dans le canton de Genève, un renversement de tendance s'effectue. Les chaudières à gaz sont aujourd'hui nettement plus populaires que les chaudières à mazout, puisque 85 % des nouvelles villas ont choisi le gaz entre 1995 et 2000, notamment pour des raisons de coûts.

D'autre part, les avantages environnementaux de la chaudière à gaz sur la chaudière à mazout sont évidents en terme d'énergie non renouvelable consommée, en terme d'émission de gaz à effet de serre ou encore en terme d'impact sur la santé humaine. Un rapide *screening* en LCA permet d'en témoigner et de confirmer les conclusions de [Houillon, 2001].

En conséquence, l'étude comparative ci-dessous ne prend pas en compte les chaudières à mazout pour comparaison. Le lecteur intéressé peut se référer à [Houillon, 2001 : 55-64]. L'objectif de cette comparaison est en effet de mettre en concurrence deux systèmes de valeur, tant du point de vue des coûts que du point de vue environnemental. Ce serait une forme de partialité que de comparer le couplage PAC-cogénération avec le scénario du pire qu'est la chaudière à mazout !

Cette étude prévoit alors quatre systèmes concurrents pour satisfaire l'UF susmentionnée.

1. **Système PACOGEN.** Ce scénario couple la pompe à chaleur avec un moteur de cogénération. La demande d'électricité pour la PAC ou pour les besoins domestiques sont assurés soit par le CCF, soit par un *mix* électrique. Une chaudière d'appoint peut être utilisée dans le cas où la chaudière proposée serait trop petite.
2. **Système COGEN.** Ce scénario est l'équivalent du scénario précédent sans la pompe à chaleur. Une chaudière d'appoint peut être utilisée
3. **Système PAC-MIX ÉLECTRIQUE.** Les besoins d'électricité pour les usages domestiques et pour le fonctionnement de la PAC sont assurés par un *mix* électrique. Une résistance électrique pour l'appoint peut être utilisée.

4. **Système CHAUDIÈRE À GAZ.** Les besoins de chauffage sont assurés par une chaudière à gaz modulante à condensation. Les besoins d'électricité sont couverts par un *mix* électrique. Une résistance électrique pour l'appoint peut être utilisée.

Les quatre configurations possibles incluent en outre un ballon ECS, un réservoir-tampon et le volume de bâtiment nécessaire pour contenir la chaufferie.

Limite du service 'chauffage' pour un bâtiment			
Limite du système dans la présente étude			
Production	Structure système énergétique	PAC, moteur à gaz, réservoirs, chaudière, sonde géothermale, fluide, volume de bâtiment pour chaufferie.	Extraction des matériaux, énergie de fabrication et d'assemblage, transport
Utilisation	Consommation d'énergie, maintenance	GN naturel, électricité, huile lubrifiante, maintenance	Emissions directes (combustion GN, perte fluide), transport
Fin de vie	Incinération Mise en décharge	Plastiques, ... Terre excavée, ...	
	Recyclage Structure	Métaux Circuit de distribution de chauffage, physique du bâtiment (isolation, ...) Structure PAC Eau/Eau	

Fig. 3.6: limites du système et de l'étude

Rappelons que nous appelons ici « structure » les phases de production et de fin de vie et « phase d'utilisation » la consommation d'électricité et de gaz naturel.

D'autre part, les scénarios 1 et 2 peuvent être producteur net d'électricité, puisque la seule contrainte présente dans le modèle est que le moteur doit fournir au minimum 75 % des besoins quotidien en électricité de la PAC dans le cas de PACOGEN, sans borne supérieure. Dans ce cas, l'impact de l'électricité *évitée* est retranché de l'impact total du scénario.

Le moteur est dimensionné par l'algorithme d'optimisation. La taille maximale, dépendante du système de stockage, sera déterminée pour satisfaire la demande maximum de chauffage. En conséquence, la taille de celui-ci a été limitée à la demande maximale de chaleur horaire, soit 25 kWh (annexe 9). En fonction du ren-

dement thermique à cette puissance (0.62), la taille maximale permise pour le de 15 kW<sub>el</sub>.

Pour chacun de ces éléments, l'ensemble du cycle de vie est pris en compte, de l'extraction des ressources à la fin de vie.

Par contre, les aspects de physique du bâtiment ne sont pas pris en compte. Cela signifie que les différences de construction d'un réseau de chauffage au sol ou d'un réseau de radiateurs ne sont pas inclus, bien qu'il influence le résultat final de l'analyse de cycle de vie des impacts. De façon identique, les aspects d'enveloppe du bâtiment sont aussi ignorés ici. Pourtant, une maison labellisée Minergie ou Minergie-P voit son besoin d'énergie diminuer fortement, en contrepartie d'un investissement économique et d'un impact environnemental plus important au départ, par exemple sous forme d'isolation ou d'un système automatique d'aération.

### 3.4.3 Choix des scénarios

L'ensemble des paramètres mis en évidence au § 2 permet de multiplier le nombre de scénarios étudiés. Un choix limitatif a été effectué afin de pouvoir présenter et exploiter les résultats. Les scénarios retenus sont listés au tableau 3.2.

Remarque: la température de source froide de 10 °C est utilisée ici pour simuler l'effet d'une PAC eau/eau (scénario 25 à 28). Cependant, la structure de la PAC utilisée pour réaliser l'analyse de cycle de vie de ces scénarios est la même que la structure de la PAC sol/eau modélisée à l'annexe 4.1, y compris la sonde géothermale. Cette imprécision se justifie d'une part par l'impact limité de la structure [Bochatay, 2005 : 49]. D'autre part, la diversité des situations possibles pour une PAC eau/eau, c'est-à-dire la provenance de l'eau (lac, nappe phréatique, ...) et de la distribution de chaleur (centrale de chauffage et CAD, travaux d'amenée d'eau et PAC privée, ...) nécessiterait de nouveaux développements qui ne sont pas compris dans cette étude. Le calcul avec 10 °C est introduit à des fins d'analyse de sensibilité.

De même, les coûts d'investissement de la PAC fonctionnant à 10 °C sont ceux de la PAC géothermique.

Il serait alors utile d'entreprendre une étude complémentaire pour simuler de façon plus exacte la structure de la PAC eau/eau.

**Tab. 3.2:** scénarios retenus pour l'optimisation thermo-économique et l'analyse environnementale

Scénario	Système	Mix électrique	Source chaude (°C)	Source froide (°C)								
SCNR 1	PACOGEN	UCTE	35	0								
SCNR 2		Swiss										
SCNR 3		NGCC										
SCNR 4		GE Bleu										
SCNR 5	PAC MIX ÉL.	UCTE			65	0						
SCNR 6		Swiss										
SCNR 7		NGCC										
SCNR 8		GE Bleu										
SCNR 9	PACOGEN	UCTE	65	0								
SCNR 10		Swiss										
SCNR 11		NGCC										
SCNR 12		GE Bleu										
SCNR 13	COGEN	UCTE					65	0				
SCNR 14		Swiss										
SCNR 15		NGCC										
SCNR 16		GE Bleu										
SCNR 17	PAC MIX ÉL.	UCTE							65	0		
SCNR 18		Swiss										
SCNR 19		NGCC										
SCNR 20		GE Bleu										
SCNR 21	CHAUDIÈRE	UCTE			65	0						
SCNR 22		Swiss										
SCNR 23		NGCC										
SCNR 24		GE Bleu										
SCNR 25	PAC MIX ÉL.	UCTE									35	10
SCNR 26		Swiss										
SCNR 27		NGCC										
SCNR 28		GE Bleu										

Remarque: le moteur de cogénération et la chaudière récupèrent l'énergie de condensation à basse température (35 °C). L'énergie récupérée est évaluée à 7%. Pour la gamme de puissance des moteurs utilisés, le rendement électrique est 0.31 et le rendement électrique est soit 0.62, soit 0.69.

## Interprétation comparative des résultats

### 4.1 Présentation des résultats

#### 4.1.1 Paramètres de dimensionnement des systèmes énergétiques

Quelques paramètres de dimensionnement sont rappelés ici pour faciliter la lecture des résultats.

**Tab. 4.1** : récapitulatifs des paramètres-clés permettant le dimensionnement des systèmes

	Unité	Quantité
Demande annuelle de chauffage	MWh	76
Demande annuelle d'ECS	MWh	14
Demande annuelle d'électricité	MWh	23
Taille PAC	kW <sub>th</sub>	3 - 45
Taille moteur	kW <sub>el</sub>	3 - 15
Taille minimale chaudière	kW <sub>th</sub>	1
Pic en moyenne horaire ECS + chauffage (5h, février)	kW	24.1
Pic en moyenne horaire électricité (19h, décembre)	kW	4.3

Un ensemble de données plus exhaustif, mais trop long pour paraître dans le corps du rapport, est donné à l'annexe 10. Il représente une série de paramètres donnés ou calculés par le MTE avant d'être utilisés par la routine ACV, pour la solution la plus économique de chaque scénario.

#### 4.1.2 Présentation des résultats issus de l'optimisation bi-objectif

Le graphique 4.1 représente les résultats de l'optimisation thermo-économique à l'aide des deux fonctions-objectifs, environnementales (CO<sub>2</sub>/SE) et économiques, discutées au § 3.1. Les dizaines de solutions conservées pour chaque scénario suivent théoriquement une courbe de Pareto, représentant les solutions optimales pour les deux objectifs. Les optimisations n'ont été effectuées que sur sept scénarios, à savoir le *Mix NGCC* appliqué à chaque groupe de scénarios (tab. 3.2). Les résultats sont ensuite « traduits » pour montrer l'influence du *mix* électrique choisi.

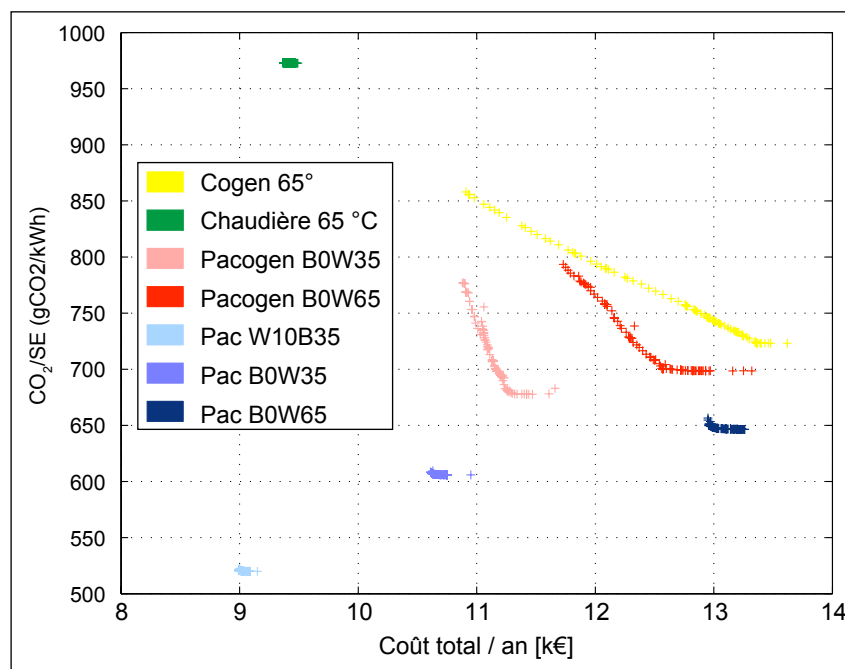


Fig. 4.1 : résultats de l'optimisation sur les sept groupes de scénarios. *Mix* utilisé : *Mix* NGCC.

Dans une configuration donnée, l'évolution le long de la courbe s'explique par les variations relatives des stocks, des puissances installées des équipements de conversion d'énergie, et dans les scénarios utilisant un moteur de cogénération, des variations des volumes d'électricité vendus au réseau.

#### 4.1.3 Présentation des résultats ACV

A partir de l'optimisation sur la base des objectifs rappelés ci-dessus, des analyses de sensibilité sont ensuite entreprises pour les autres *mix* électriques. Les paramètres de design définis par l'optimisation sur la fonction-objectif CO<sub>2</sub>/SE du *mix* NGCC sont conservés et appliqués aux autres *mix*. L'évaluation environnementale pour les quatre indicateurs ACV, soit « Santé humaine », « Qualité de l'écosystème » et « Epuisement des ressources », est représentée graphiquement (fig. 4.2 et 4.3) en conservant l'axe des abscisses (coût) de la fig 4.1.

Rappel : les résultats sont représentés en *points* (§3.2.2) pour chacun des indicateurs. Même si l'unité est identique, il n'est pas envisageable de sommer l'impact des catégories. En effet,

- la précision de la méthode n'est pas équivalente pour chacune des catégories. Si on estime que l'impact sur le changement climatique est bien connu aujourd'hui, l'ensemble de l'impact sur l'écosystème n'est pas encore norma-

lisé et exprimé en catégorie de dommage par Impact 2002+ (tab. 3.1). On peut estimer à entre un tiers et 50 % l'impact pas encore pris en compte sur cet indicateur. L'*update* de la méthode, certainement à fin 2005, permettra de combler cette lacune.

- comment résoudre la question éthique qui demanderait d'ajouter un indicateur d'épuisement des ressources et un indicateur de santé humaine ?

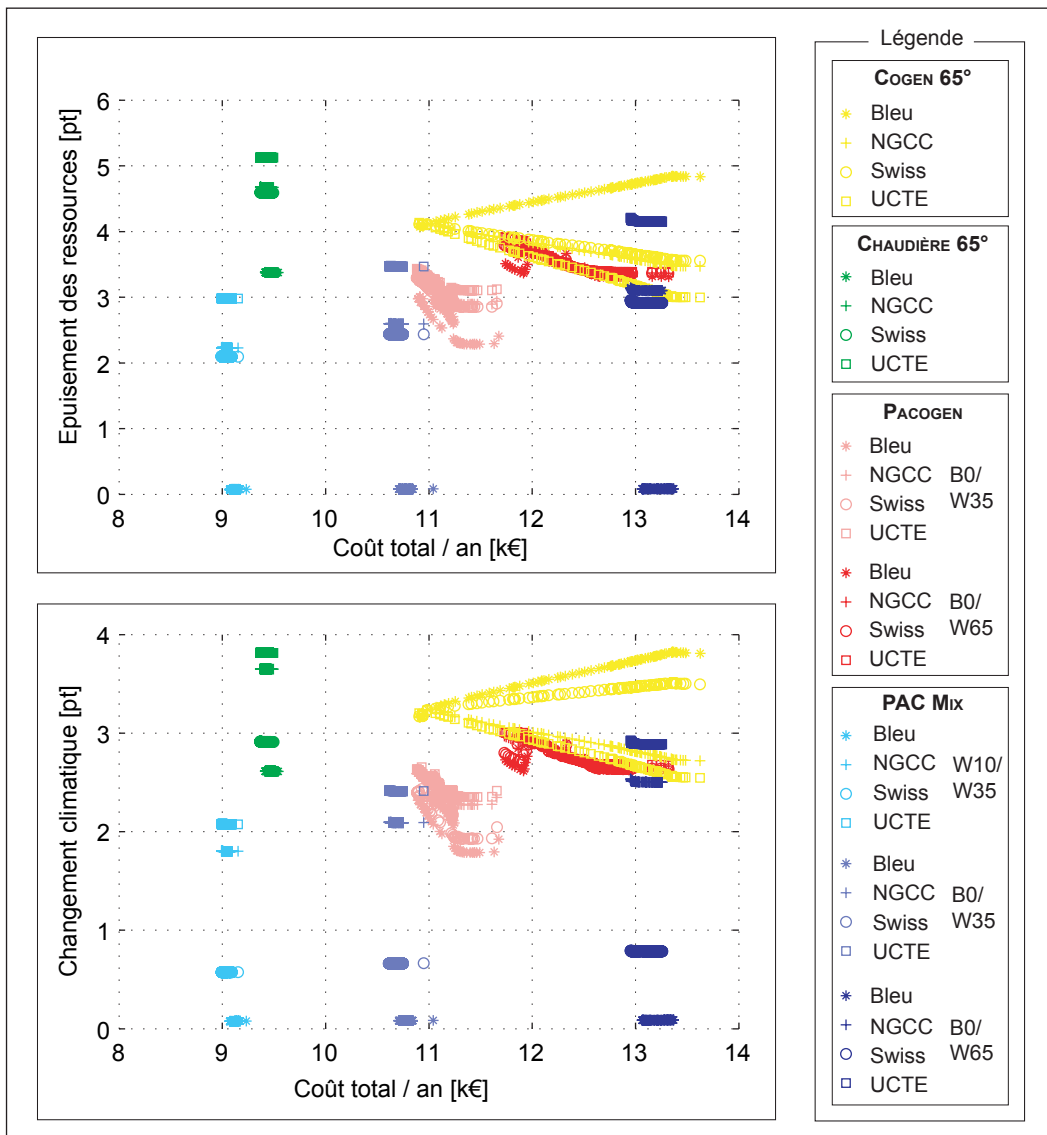


Fig. 4.2: calcul des indicateurs ACV « Changement climatique » et « Epuisement des ressources » sur les 7 scénarios de l'optimisation (Mix NGCC) et analyse de sensibilité sur les autres scénarios (Mix UCTE, Swiss, Bleu).

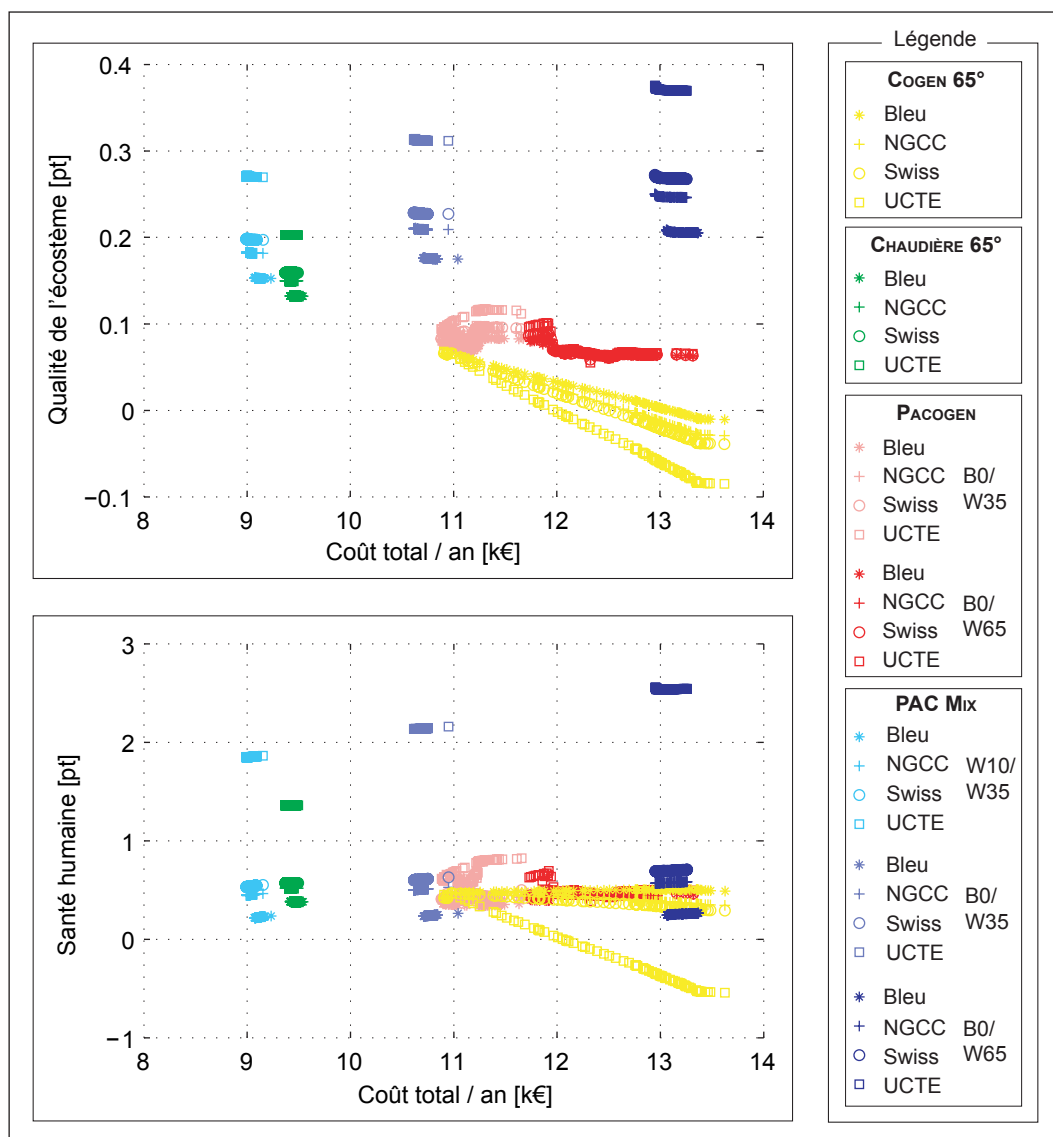


Fig. 4.3: calcul des indicateurs ACV « Santé humaine » et « Qualité de l'écosystème » pour les 7 scénarios de l'optimisation (*Mix NGCC*) et analyse de sensibilité sur les autres scénarios (*Mix UCTE, Swiss, Bleu*).

## 4.2 Interprétation des résultats ACV

### 4.2.1 Apport de l'approche d'analyse de cycle de vie

Par rapport à la fonction-objectif définie et utilisée au graphique 4.1, l'analyse de cycle de vie apporte des éléments supplémentaires de décision.

Les graphiques 4.1, 4.2 et 4.3 ne se ressemblent pas. Cela signifie que dimensionner des systèmes en vue de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> par la combustion de gaz naturel



et l'achat d'électricité ne dit rien sur les autres indicateurs. En particulier, le système PACOGEN réagit de façon inverse selon les indicateurs « santé humaine » et « changement climatique ». En d'autres termes, la diminution des émissions de gaz à effet de serre est simultanée à l'augmentation d'émission dangereuses pour la santé humaine !

D'autre part, mais cela est anticiper la discussion du § 4.2.2, l'impact de la structure n'est pris en compte que dans l'analyse de cycle de vie. Or, il s'avère que celle-ci n'est pas négligeable dans tous les cas.

En conséquence, il serait intéressant dans le futur d'utiliser un indicateur ACV au moins en remplacement de la fonction-objectif utilisée ici. Il serait peut-être même judicieux d'opérer l'optimisation sur une troisième fonction-objectif afin de prendre en compte le comportement opposé de certains indicateurs ACV entre eux.

#### 4.2.2 Phase d'utilisation vs structure des systèmes

Pour chaque indicateur ACV, la différence entre scénario est parfois très importante, au sein ou non du même système. Par exemple, les scénarios PAC MIX UCTE et PAC MIX NGCC se trouvent à des positions très éloignées, en particulier sur les graphiques « santé humaine » et « qualité de l'écosystème », les scénarios PAC MIX BLEU se démarquant encore plus, en particulier pour les graphiques « changement climatique » et « épuisement des ressources ». Cela illustre l'importance prédominante de la phase d'utilisation, voire très nettement prédominante, pour les différents scénarios étudiés. On entend par phase d'utilisation la consommation de gaz naturel et d'électricité des différents *mix*.

**Tab. 4.2:** importance de la structure par rapport à l'impact total en fonction des *mix* électriques. Moyenne des solutions les plus économiques des scénarios quel que soit le système utilisé.

	Qualité de l'écosystème	Santé humaine	Changement climatique	Epuisement des ressources
Total	11.06 %	18.39 %	7.06 %	7.19 %
Mix UCTE	9.38 %	8.35 %	1.38 %	1.13 %
Mix Swiss	10.97 %	16.46 %	3.34 %	1.38 %
Mix NGCC	11.42 %	18.35 %	1.50 %	1.33 %
Mix Bleu	12.46 %	30.41 %	22.03 %	24.91 %

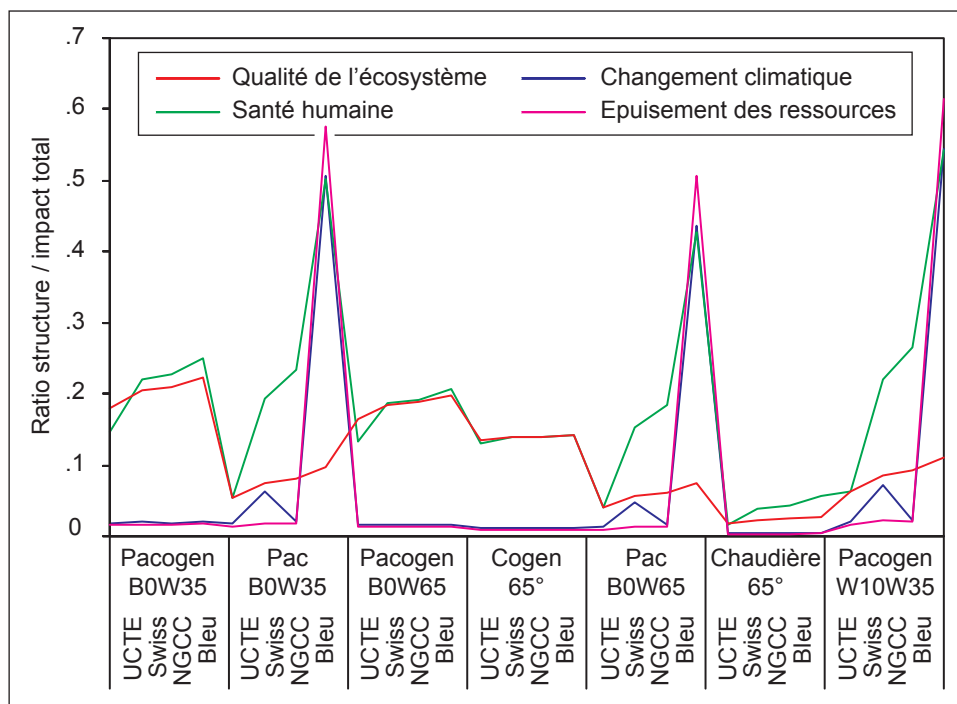
Cependant, les tableaux 4.2 et 4.3 mettent en évidence les différences significatives qu'il peut y avoir entre les scénarios étudiés, selon que l'on fasse varier le *mix* utilisé (tab 4.2) ou le système (tab. 4.3). Soyons clair : l'impact en terme absolu de la structure

est stable pour chaque système considéré. Mais comme l'impact de la phase d'utilisation varie fortement, l'impact relatif de la structure subit de fortes variations.

**Tab. 4.3:** importance de la structure par rapport à l'impact total en fonction des systèmes. Moyenne des solutions les plus économiques de chaque scénario quel que soit le *mix* utilisé.

Système	Qualité de l'écosystème	Santé humaine	Changement climatique	Epuisement des ressources
Total	11.1 %	18.4 %	7.1 %	7.2 %
Pacogen B0W35	20.4 %	21.1 %	1.9 %	1.6 %
PAC B0W35	7.7 %	24.6 %	15.2 %	15.7 %
Pacogen B0W65	18.5 %	17.9 %	1.5 %	1.4 %
Cogen 65°	13.9 %	13.8 %	1.10 %	0.9 %
PAC B0W65	5.8 %	20.7 %	12.8 %	13.6 %
Chaudière 65°	2.3 %	3.8 %	0.5 %	0.3 %
PAC W10W35	8.8 %	27.3 %	16.5 %	16.8 %

Le graphique 4.4 représente l'ensemble des solutions. Il souligne avant tout l'impact faible de la phase d'utilisation du *mix bleu*, révélé par l'impact relatif important de la structure.



**Fig. 4.4:** pourcentage de l'impact de la structure par rapport à l'impact total (structure + phase d'utilisation) pour l'occurrence la plus économique de chaque scénario

Un élément explicatif est donné par la figure 2.6. Par rapport aux autres *mix* électriques, l'électricité hydraulique est, en terme d'analyse de cycle de vie, extrêmement « propre ». La phase d'utilisation de la production électrique hydraulique est quasiment dépourvue d'émissions. Quant à elle, la phase de construction, par exemple l'édification d'un barrage, pèse très peu sur l'analyse de cycle de vie de chaque kWh. La « part de barrage » pour chaque kWh émis est très faible, en raison du volume produit sur la durée de vie du barrage, qui atteint, pour certaines parties de celui-ci, 150 ans [Bolliger & Al., 2004: 10]. De plus, certains désavantages des barrages, mis en avant par les concurrents de l'hydroélectricité, ne sont pas pris en compte avec les méthodes actuelles d'analyse de cycle de vie, comme les effets sociaux et économiques (pertes touristiques) qu'engendrent l'impact visuel du barrage ou l'altération des rivières influencées par le barrage.

En conséquence, la structure des systèmes prend une importance relative importante voire même dominante (PAC MIX BLEU). En particulier, la structure de la PAC joue un rôle, et plus spécifiquement la sonde géothermique, en raison des émissions dues au forage (voir annexe 4.1, en particulier fig. A3 et tab. A3). Dans le cas de la plus grosse PAC autorisée dans l'étude ( $Q_{el} = 11\text{kW}$ ), la somme des longueurs des sondes nécessaires excède 600 mètres (annexe 4.1, équation A10). Le forage de chaque mètre de sonde nécessite la combustion par une foreuse de 3.1 litres de diesel (« Epuisement des ressources »), avec de fortes émissions de  $\text{NO}_x$ , de  $\text{PM}_{2.5}$  et de  $\text{SO}_2$  (« Santé humaine ») ou de  $\text{CO}_2$  (« changement climatique ») soit, ramené à un cycle d'une année correspondant à l'UF de cette étude, près de 40 litres. Pour comparaison, ces 1450 MJ de diesel brûlé correspondent en terme de santé humaine à environ 27 MWh de *Mix Bleu* ou 13 MWh de *Mix NGCC* (Ecoinvent 1.2 et Impact 2002+). La situation est bien sûr toute autre sur les autres indicateurs ACV.

Cela signifie aussi que les scénarios 25 à 28, simulant la PAC eau/eau, pour lesquels la structure est considérée identique à celle de la PAC sol/eau, peuvent alors prendre des valeurs passablement erronées. Une étude supplémentaire devrait être menée pour pouvoir estimer correctement l'impact de la structure de la PAC eau/eau et utiliser les résultats.

Soulignons enfin l'impact négligeable du fluide réfrigérant sur les systèmes utilisant une PAC, même si l'électricité utilisée est le *mix bleu*. L'impact du forage de la sonde seul est de plusieurs ordres de grandeur supérieur à celui du fluide réfrigérant, sauf pour l'impact sur le changement climatique où l'impact est de l'ordre de 3 à 5 fois plus important.

L'impact environnemental relatif de la structure des systèmes dépend fortement du mix électrique et peut même atteindre 60% dans le cas du *mix bleu*. Une attention toute particulière pour la modélisation d'une nouvelle PAC eau/eau ne pourra pas être épargnée.

D'autre part l'incitation de certains systèmes énergétiques ne peut se justifier que si l'évaluation environnementale a rigoureusement intégré celle relative à la production électrique en amont (approche cycle de vie).

#### 4.2.3 Interprétation comparative des scénarios

##### *Evaluation comparative des sources d'énergie*

Ce paragraphe découle du §4.2.2 et doit être lu en gardant à l'esprit les paragraphes 2.3 et 2.4. Ce dernier met en évidence l'influence déterminante de la phase d'utilisation, que l'on considère ici comme l'ACV de la consommation du *mix* électrique et de celle de la combustion du gaz naturel.

Pour chaque scénario consommant de l'électricité sur le réseau, la variation – PAC MIX par exemple – des impacts environnementaux des scénarios découlent directement de la figure 2.6. Le *mix UCTE* est systématiquement le pire. Brièvement, la combustion d'énergie fossile, en particulier liquide (huiles lourdes, ...) ou solide (lignite, charbon, ...), est responsable de grandes quantités d'émissions sur chaque indicateur ACV [Bochatay, 2005: 43, 51]. Le *mix NGCC* ne s'apparente au *mix UCTE* que sur le plan du CO<sub>2</sub> et des ressources, puisque la source d'énergie est dans les deux cas la combustion d'une chaîne d'hydrocarbure.

Le *mix bleu*, majoritairement utilisé à Genève, est le *mix* qui provoque le moins d'impacts environnementaux et qui permet même de créer des scénarios extrêmement « propres » quand il est l'unique source d'énergie utilisée (PAC MIX). C'est la même explication qui justifie pourquoi le scénario CHAUDIÈRE MIX BLEU est meilleur en terme d'épuisement des ressources que le scénario COGEN : la totalité de l'énergie domestique consommée annuellement (23 MWh) est dans un cas fournie par le MIX BLEU, et dans l'autre est produite à partir de gaz naturel.

Ces variations suffisent à faire varier le classement d'un système par rapport à un autre. Par exemple, à 65 °C, le choix du *mix* décide à lui seul si PAC MIX est meilleur ou moins bon que PACOGEN sur tous les indicateurs.

### *Evaluation comparative des systèmes*

Remarquons en premier lieu que l'impact négatif du scénario COGEN s'explique par la vente d'électricité sur le réseau, s'échelonnant entre 2.6 et 25 MWh.. Comme cette vente « remplace » de l'électricité du réseau, les impacts « évités » sont retranchés de l'impact total du scénario. Or, si l'impact de l'électricité achetée sur le réseau, par exemple le *Mix UCTE*, est plus élevé que l'impact produit par la combustion de gaz naturel par le moteur de cogénération pour vendre de l'électricité, l'impact total du scénario décroît lorsque la consommation de gaz naturel croît pour vendre de l'électricité au réseau, et peut même devenir négatif lorsque les ventes deviennent importantes.

Les graphiques 4.2 et 4.3 mettent en évidence l'avantage de la PAC, qu'elle soit utilisée seule (PAC MIX ÉLECTRIQUE) de préférence ou couplée au moteur de cogénération (PACOGEN), par rapport à la chaudière ou au moteur en cogénération, sous réserve toutefois du *mix* utilisé.

Si aujourd'hui, la provenance électrique pour le canton de Genève est *grosso modo* un panachage de *Mix Bleu* (85 %) et de *Mix NGCC* (14 %) (fig. 2.5), une croissance de l'installation des PAC modifiera cette répartition. Une augmentation de la consommation d'électricité (§ 2.3.3) sera certainement compensée par une part plus importante de gaz, voire d'importations européennes. Alors même si le futur *mix genevois* conserve des proportions identiques à celles actuelles en signant de nouveaux contrats avec d'autres usines hydroélectriques, le bilan global s'orientera sans doute un peu plus dans la direction du *Mix NGCC*.

Un second argument parle en faveur de la PAC sol/eau ou eau/eau. Sans même être réversible, une PAC permet d'offrir un service de climatisation en été, puisqu'elle est connectée à un milieu de l'ordre de 5-10 °C. À l'avenir, l'installation de PAC peut permettre de réagir à la très forte croissance de la demande en climatisation des surfaces commerciales mais aussi des surfaces résidentielles et atténuer les pics d'été sur le marché électrique.

Les pompes à chaleur présentent un meilleur bilan environnemental dans le contexte du marché genevois de l'électricité ou de la production helvétique, sans même tenir compte de leur potentiel de climatisation estivale.

Le niveau de température et le mode de production électrique sont des facteurs de premier ordre sur le bilan environnemental des pompes à chaleur.

Ici, les scénarios COGEN et PACOGEN utilisent un très petit moteur, avec en conséquence un rendement électrique plutôt faible ( $\eta_{el} = 0.31$ ) (fig. 2.2). C'est la raison pour laquelle les scénarios COGEN ou PACOGEN n'atteignent pas les valeurs environnementales de la PAC MIX NGCC sur les indicateurs « changement climatique » et « épuisement des ressources », alors que le principe est exactement le même : convertir l'énergie du gaz naturel en chaleur et en électricité. Les fig. 2.7 et 2.8 mettent en évidence l'influence du rendement électrique du moteur à gaz. On peut en déduire qu'un gros moteur à gaz en cogénération peut avantageusement remplacer l'achat d'électricité produite à partir d'une centrale à gaz à cycle combiné. Selon les figures sus-mentionnées, un rendement électrique de l'ordre de 0.4 et au-dessus peuvent permettre de meilleurs résultats ACV que l'électricité en provenance d'une centrale à cycle combinée. Des incertitudes restent néanmoins quand à l'utilisation d'un très gros moteur à gaz : pertes par transport de l'électricité via le réseau, pertes de chaleur par un réseau CAD, cycles d'utilisation annuelle, ...

Une croissance du nombre de pompes à chaleur nécessiterait de nouveaux apports électriques. Si le gaz naturel est retenu, la combinaison d'une pompe à chaleur avec un moteur à gaz en cogénération à haut rendement électrique peut avantageusement remplacer l'achat d'électricité en provenance d'une centrale à gaz à cycle combiné pour alimenter ces mêmes pompes à chaleur.

Dans la mesure du possible, le système CHAUDIÈRE devrait être évité. Cette constatation devient encore plus forte si le combustible de la chaudière n'est pas le gaz, mais le mazout, à l'impact significativement plus important, par exemple pour l'indicateur « santé humaine » [Houillon, 2001 : 68].

### *Evaluation comparative des températures de source chaude et froide*

La comparaison des trois scénarios PAC MIX selon différents niveaux de température de source froide ou chaude permet de vérifier sur le cas d'étude les faits déjà mis en évidence aux paragraphes 2.1 et 2.4. Nous ne nous attarderons donc pas plus sur cette question.

Les niveaux de température de source froide et chaude des pompes à chaleurs sont responsables d'une variation significative de l'impact sur l'analyse de cycle de vie des systèmes utilisant une pompe à chaleur.

Améliorer les rendements signifie minimiser l'écart de température entre les sources froides et chaudes. L'utilisation de l'eau du lac est en conséquence une solution à mettre en œuvre.

Par exemple, sur l'indicateur «Epuisement des ressources» et le scénario PAC MIX NGCC, la passage de 35 à 65 °C de température de source chaude se traduit par 21 % d'impact supplémentaire. De même, à 35 °C de source chaude, l'utilisation d'une source froide à 0 °C génère 16 % d'impact sur l'environnement de plus qu'une source froide à 10 °C.

### 4.3 Discussion des résultats sur le plan économique

Des résultats économiques applicables au contexte genevois sont déductibles du graphique 4.1. En effet, le tarif du courant consommé est celui de l'offre SIG Initiale du canton de Genève; ceux du gaz naturel acheté et de l'électricité rachetée correspondent aux tarifs pratiqués par les SIG (tab. 2.2). Quand aux coûts d'investissement, ils se basent sur des données fabricants, obtenus sur leur site suisse ou européen.

Si l'effet du niveau de température avait une influence réelle sans être gigantesque sur l'impact environnemental, celui-là se fait par contre fortement sentir sur les coûts annuels du système, à tel point que le choix de PAC MIX oscille entre la solution la plus économique et la solution la plus chère, sans compter les installations de distribution de chaleur ni les investissements supplémentaires qu'engendreraient les travaux de pompage d'eau du lac pour PAC W10W35.

A l'image de l'impact environnemental, la majeure partie des coûts est lié à la phase d'utilisation, soit l'achat d'électricité (voire annexe 10). Ainsi, la solution la plus économique du système le plus gourmand en électricité (PAC B0W65) coûterait annuellement 44 % de plus que la solution la plus économique du système le moins gourmand en électricité qu'est la PAC W10W35. La taille différente de la PAC renforce l'écart de coût de ces deux systèmes. Rappelons que les niveaux de température sont déterminés par le contexte, si le milieu est déjà construit.

Les niveaux de température de source froide et chaude des pompes à chaleurs déterminent la rentabilité des systèmes PAC MIX, puisqu'ils définissent la quantité d'électricité à acheter sur le réseau.

La chaudière est la solution la moins chère, puisqu'elle concurrence même la PAC W10W35, alors qu'elle fonctionne ici à haute température, en raison du bas coût de la chaudière elle-même.

Le moteur à gaz est le système le plus cher. La raison principale est la suivante. La vente d'électricité sur le réseau n'est pas intéressante, puisque l'achat du gaz naturel (7.6 ct. de franc) et sa conversion en électricité ( $\eta_{el} = 0.31$ ) n'est pas compensé par le prix du rachat (9 ct.) par le réseau de l'électricité produite, même en prenant en compte le service de chaleur délivré.

Ainsi et avec les tarifs en vigueur, la vente d'électricité au réseau se fait à perte. Or, les solutions proposées vendent plus ou moins d'électricité au réseau: jusqu'à 2.8 MWh pour PACOGEN et jusqu'à 25 MWh pour la solution la plus chère de CO-GEN! Cela explique la grande variation sur l'axe des coûts des scénarios utilisant un moteur de cogénération.

Par contre, la production d'électricité à usage interne, par exemple par PACOGEN, est nettement plus intéressante puisque l'achat d'électricité est facturé 25 ct. L'installation d'une grosse installation, avec les économies d'échelle que cela permet, et l'élévation correspondante du rendement électrique (fig. 2.2), exploitée par exemple par un service public, en vendant l'électricité sur le réseau et la chaleur via un réseau de chauffage à distance peut devenir économiquement intéressante. Cela dépend fortement des fonds à investir pour les infrastructures.



### Conclusions et recommandations

La méthodologie de couplage de l'outil thermo-économique permettant le dimensionnement de systèmes énergétiques en fonction des besoins et de l'outil d'analyse de cycle de vie offre de belles perspectives pour l'évaluation environnementale et économique de systèmes énergétiques. En ce sens, il peut sans aucun doute devenir un outil extrêmement utile pour définir des politiques énergétiques.

#### *L'apport de l'analyse de cycle de vie*

L'apport de l'approche d'analyse de cycle de vie est fondamental, puisque des aspects ignorés dans plusieurs méthodes actuelles sont pris en compte dans la présente étude. Il s'agit par exemple du calcul de nouveaux indicateurs environnementaux à l'évolution différenciée par rapport à des indicateurs couramment utilisés jusqu'alors. Mais il s'agit aussi par exemple de la prise en compte des impacts de la structure des systèmes énergétiques, qui, même s'ils ne sont pas construits sur le lieu de leur exploitation, doivent systématiquement être considérés.

#### *Priorité aux pompes à chaleur à basse température*

Au sujet des résultats eux-mêmes, cette étude permet de compléter ceux de [Houillon, 2001]. Ce dernier avait mis en évidence l'avantage environnemental des PAC par rapport aux chaudières à gaz ou à mazout, avantage toutefois dépendant de la provenance de l'électricité. Ici, les résultats, interprétables pour le contexte genevois ou suisse, prennent en compte d'autres technologies potentiellement très intéressantes à l'avenir comme le moteur à gaz de cogénération. Ils établissent en outre la forte différence que des paramètres comme le niveau de température peuvent prendre sur les résultats économiques et environnementaux.

Le meilleur système semble réellement être la PAC eau/eau. Le faible écart entre les niveaux de température de source froide (10 °C) et de source chaude (max. 35 °C) fait de la PAC le système le plus approprié. En conséquence, on ne peut souhaiter qu'une utilisation fortement accrue de PAC fonctionnant à basse température.

Seulement, ce système ne s'applique qu'à des zones en construction où en rénovation. En effet, si les bâtiments sont déjà construits et que l'objectif n'est que le remplacement d'un système de chauffage vieillissant, les paramètres architecturaux sont des contraintes majeures. Si le système en place est un système de distribution de chaleur à haute température, la PAC perd une large partie de son attrait. Deux solutions doivent être étudiées. Si une rénovation du bâtiment est envisagée, la solution de modification du système de distribution de chaleur doit être évaluée. A long terme, l'investissement peut s'avérer rentable économiquement.

Si tel n'est pas le cas, la chaleur à haute température est produite de façon la plus économique par les chaudières à gaz. Par contre, l'impact environnemental peut être réduit par l'utilisation de moteurs de cogénération de grande taille dont la chaleur est distribuée à un réseau CAD.

### *Exploitation du potentiel énergétique lémanique*

Toujours au sujet des niveaux de température, l'exploitation par des pompes à chaleur de l'énorme quantité de chaleur contenue dans les eaux du Léman pourrait encore améliorer le bilan environnemental des PAC, sous réserve des coûts économiques et environnementaux de la mise en oeuvre de projet de grande envergure, absent de cette étude.

Ceci est d'autant plus vrai que, de plus en plus, l'énergie utilisée pour la climatisation devient un enjeu d'importance. Or, les pompes à chaleur, en particulier si celles-ci utilisent les eaux du lac, permettent également de remplir une fonction de refroidissement. En conséquence, le bilan total des pompes à chaleur eau/eau utilisée pour le chauffage et pour la climatisation s'améliorera encore par rapport à un autre système utilisant par exemple un climatiseur électrique.

#### **Les conclusions de Pacogen, en bref ...**

- Favoriser l'installation de pompes à chaleur à faible écart de température entre la source chaude et la source froide, moins chère et plus écologiques avec le *mix genevois*;
  - Conversion des systèmes de chauffage de la haute à la basse température (chauffage au sol)
  - Exploiter de préférence le potentiel thermique du lac Léman par des PAC eau/eau et ensuite l'énergie géothermique par des PAC sol/eau.

- A haute température, le moteur de cogénération doit être préféré à la chaudière, bien que meilleur marché. A basse température, il doit être associé à un cycle organique de Rankine.

### *Quel mix électrique pour Genève ?*

Le *mix* genevois actuel favorise pleinement les pompes à chaleur, puisque l'énergie hydraulique est, en terme d'analyse de cycle de vie, le meilleur type d'électricité du point de vue environnemental. Cependant, une croissance de nouvelles installations de pompes à chaleur engendrera sans nul doute une croissance de la demande électrique cantonale si des économies ne sont pas réalisées ailleurs. Comme quasiment l'ensemble des possibilités hydrauliques sont exploitées en Suisse, de nouvelles sources d'approvisionnement seront nécessaires. Or, puisque le mode de production est déterminant pour que les PAC restent favorables du point de vue de l'environnement et pour permettre à Genève de satisfaire aux objectifs du protocole de Kyoto sans exporter ailleurs ses émissions de gaz à effet de serre, une réflexion doit être entreprise sur l'avenir de l'approvisionnement électrique cantonal.

Si en plus des énergies renouvelables marginalement utilisées aujourd'hui, le gaz devait devenir une solution, des grosses unités de moteur à gaz en cogénération sont sans nul doute une alternative environnementalement intéressante aux centrales à gaz à cycle combiné. En effet, la chaleur produite pourrait être utilisée par des réseaux de chauffage à distance pour remplacer à Genève des chaudières à mazout ou à gaz, dans des quartiers ne disposant de chauffage par le sol à basse température.

### *Agir sur l'enveloppe du bâtiment*

En plus de la température du circuit de distribution de chaleur au sein d'un bâtiment, dont l'importance est déterminante pour l'utilisation d'une pompe à chaleur et dans une moindre mesure pour un moteur à gaz ou une chaudière (récupération de l'énergie de condensation à basse température), les aspects de physique du bâtiment sont capitaux.

En particulier, des améliorations dans l'enveloppe du bâtiment permet de substantielles économies des besoins d'énergie thermique. Les standards les plus récents de la SIA ou mieux les labels Minergie et Minergie-P permettent une réduction impressionnante des besoins thermiques. Il serait donc souhaitable d'accélérer le plus

possible la reconversion du domaine bâti. Couplées à l'installation de systèmes énergétiques efficaces, ces mesures peuvent prendre un effet considérable sur les impacts dus aux combustibles, en particulier les émissions à effet de serre soumis aux objectifs de Kyoto.

Ces recommandations aboutissent à des perspectives d'études complémentaires. En particulier, les aspects de physique du bâtiment, qui laissent espérer une réduction de la demande de chaleur à l'avenir devraient être analysés sous l'angle de l'analyse de cycle de vie.

De même, l'impact ACV et les coûts de l'exploitation à grande échelle de l'eau du lac méritent des éclaircissements.

Enfin, l'évolution de la demande électrique et les nouvelles sources de production électrique devraient être analysées plus dans le détail. Que ce soit des énergies renouvelables comme le déchet ou le solaire, ou des énergies non-renouvelables comme le gaz, les hypothèses émises ci-dessus méritent des approfondissements.

#### **Gestion environnementale de la gestion énergétique de quartier : priorités et perspectives**

- Conversion du domaine bâti de la haute à la basse température ;
- Exploitation accrue du potentiel thermique et de refroidissement des eaux du lac Léman ;
  - Analyser les coûts et les impacts environnementaux de l'exploitation à grande échelle des eaux lémaniques.
- Gérer la croissance de la consommation d'électricité due aux PAC sans recourir à des modes de production électrique réduisant l'attrait environnemental des PAC ;
  - Favoriser de nouvelles énergies renouvelables (solaire, éolien, ...);
  - Dans le cas où le gaz est une option retenue, les grosses unités de moteurs à gaz de cogénération peuvent concurrencer l'achat d'électricité de centrales à gaz à cycle combiné;
- Amélioration de l'enveloppe des bâtiments et de la consommation énergétique par unité de surface ;
  - Elargir les limites de la présente étude en intégrant en analyse de cycle de vie les paramètres de physique du bâtiment.





## Bibliographie

---

- ALTHAUS H.-J., CHUDACOFF M., HELLWEG S., HISCHIER R., JUNGBLUTH N., OSSES M. PRIMAS A. (2004) *Life cycle inventories of chemicals*. Ecoinvent report No. 8. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, p.803-807.
- AXPO (2005), *Medienorientierung "Stromperspektiven 2020"*, www.axpo.ch.
- BAILLIFARD M.-A. (2002), *Comparaison de technologies de conversion d'énergie*, travail de diplôme sous la direction du Prof. D. FAVRAT, LENI, EPFL, Lausanne.
- BOCHATAY D. (2005), *Combinaison d'un outil de modélisation thermo-économique et de l'approche d'analyse de cycle de vie*. Mémoire de diplôme, Cycle Postgrade en Environnement, EPFL, Lausanne.
- BOLLIGER, R., BAUER, C. (2004) *Wasserkraft*. In: DONES, R. (Ed.) et al., *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. Final report ecoinvent 2000 No. 6-VIII, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- BUWAL (2002), *Directive Protection de l'air sur les chantiers*, BUWAL, Berne.
- CGE0105 (2003), *Rapport du Conseil d'Etat sur la conception générale de l'énergie 1999 et projet de Conception générale en matière d'énergie pour la législature 2001-2005*, Secrétariat du Grand Conseil, Genève. Disponible sur : <http://www.geneve.ch/scane/home/welcome.asp>
- CURTI V., von SPAKOVSKY M., FAVRAT D. (2000), *An environomic approach for the modeling and optimization of a district heating network based on centralized and decentralized heat pumps, cogeneration and/or gas furnace*, Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS.
- DOKA G. (2005), *Ökobilanz für Energie aus Kehrrechtverbrennungsanlagen*, BUWAL, AWEL, Bern/Zürich ([www.awel.zh.ch/aktuell](http://www.awel.zh.ch/aktuell)).
- DONES R., BAUER C., BOLLIGER R., BURGER B., FAIST EMMENEGGER M., FRISCHKNECHT R., HECK T.,JUNGBLUTH N. AND RÖDER A. (2004) *Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries*. Ecoinvent report No. 5. Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- EICHER H., WEILENMANN J. (1995), *Couplage chaleur-force. Couplages chaleur-force compacts à moteur à gaz. Planification, construction et exploitation rationnelle*. Office fédéral des questions conjoncturelles Ravel dans le domaine de la chaleur. Cahier 4.

- FAIST EMMENEGER M., HECK T. and JUNGBLUTH N. (2003) *Erdgas*. In: DONES, R. (Ed.) et al., *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. Final report ecoinvent 2000 No. 6-V, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. Online: [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch). Teil XIV.
- FRISCHKNECHT R. (1999), *Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel. Ökobilanzen von Wärmepumpen and Kälteanlagen*, ESU, OFEN, disponible sur [www.waermepumpe.ch](http://www.waermepumpe.ch).
- FRISCHKNECHT R., FAIST EMMENEGGER M. (2003): *Strommix und Stromnetz*. In: *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz* (Ed. Dones R.). Final report ecoinvent 2000 No. 6, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).
- GILLI, P.V., STREICHER, W., HALOZAN, H., BREEMBROED, G. (1999), *Environmental benefits of heat pumping Technologies*. HPC-AR6, IEA Pump Centre, Sittard, The Netherlands.
- HECK T. (2004a) *Wärme-Kraft-Kopplung*. In: Dones, R. (Ed.) et al., *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. Final report ecoinvent 2000 No. 6-X, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. Online: [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch). Teil XIV.
- HOUILLOON G. et Al. (2001), *Evaluation du développement des PAC dans le canton de Genève*, Amstein + Walthert SA, Genève.
- HUMBERT S., MARGNI M., JOLLIET O. (2004), *Impact 2002+ : user guide*. Draft for version 2.0, Industrial Ecology & Life Cycle Systems Group, GECOS, EPFL, Lausanne.
- HUBER A. et Al. (1996), *Pour le bon usage de la chaleur de l'environnement. Chauffage par pompe à chaleur*, Office fédéral des questions conjoncturelles.
- IPCC (2001), *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*, Intergovernmental Panel on Climate Change, NY, Cambridge University Press.
- JOLLIET O., MARGNI M., CHARLES R., HUMBERT S., PAYET J., REBITZER G., ROSEMBAUM R. (2003), *Impact 2002+ : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology*. Int J LCAi (6), 324-330.
- JOLLIET O., SAADE M., CRETTAZ P. (2005), *Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan*, Coll. Gérer l'environnement, PPUR, Lausanne.



- JUNGBLUTH N. (2004) *Erdöl*. In: *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz* (Ed. Dones R.). Final report ecoinvent 2000 No. 6-IV, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, CH.
- KARLSSON A., GUSTAVSSON L. (2003), *External costs and taxes in heat supply systems*, Energy Policy 31.
- KELLENGBERGER D., ALTHAUS H.-J., JUNGBLUTH N. and KUNNIGER T. (2003) *Life Cycle Inventories of Building Products*. Final report ecoinvent 2000 No. 7. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch). Part XVIII Additional Products and Processes
- KNOEPFEL I. (n.d), *Fernwärmenetz*, Ökoinventare für Energiesysteme, Anhang E, ESU.
- LOPEZ J.-M. (2005), *Création d'une interface entre un logiciel d'informations géographiques et matlab afin de déterminer des profils de consommation énergétiques de quartier*, Travail de diplôme, LENI, EPFL, Lausanne.
- MANASSE-RATSIMANDRESY T. (2004), *Méthodologie du design optimal de systèmes de mirco-cogénération*, travail de diplôme cycle postgrade en génie électrique, LRE-LENI, EPFL, Lausanne.
- OFEN, Conti & Associés Ingénieurs SA (2002), *Utilisation optimale de l'énergie primaire et réduction de CO2 au moyen de systèmes combinés pompes à chaleur – couplages chaleur-force*, Versoix.
- OFEN (2004), *Statistique suisse de l'électricité 2004*, Berne, [www.ofen.ch](http://www.ofen.ch).
- OFEN (2005) *Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2004*, Urs Kaufmann, Dr. Eicher+Pauli AG.
- PELET X. (2004), *Optimisation de systèmes énergétiques intégrés pour des sites isolés en considérant les paramètres économiques, d'émissions gazeuses, de bruit et de cycle de vie*, communication n° 14 du LENI, EPFL, Lausanne.
- SCHWAB F., *Das Energiesparen der Elektrizitätswirtschaft am Beispiel der Transformatorenverluste*, Bulletin SEV/VSE 82(1991) Nr. 22, S. 19-21.
- ZEHNDER M. & al. (2002), *Pompes à chaleur air-eau à haute température*, sur mandat de l'OFEN, LENI, EPFL, Lausanne.
- [www.hoval.ch](http://www.hoval.ch) : fabricants de systèmes énergétiques Hoval
- [www.dalcalor.ch](http://www.dalcalor.ch) : spécialiste, vendeur et installateur de PAC
- [www.produits.batiweb.com](http://www.produits.batiweb.com) : fournisseurs de produits de la marque Viessmann
- [www.geothermal-energy](http://www.geothermal-energy) : programme suisse de promotion de l'énergie géothermale
- <http://gecos.epfl.ch/lcsystems/> : groupe LCS, EPFL
- [www.cogen.org](http://www.cogen.org) COGEN Europe, association commerciale de promotion de la cogénération

[www.energie-schweiz.ch/internet/?lang=fr](http://www.energie-schweiz.ch/internet/?lang=fr) : Office fédéral de l'énergie.

<http://www.gaz-naturel.ch/166.html> : association pour le gaz naturel

# Annexe 1

## Annexe 1 : moteur de cogénération, données fabricants.

Tab. A1 : liste de moteurs de cogénération

Type	Modèle	P. abs (kW)	P. el (kW)	P. th (kW)	P. tot (kW)	$\eta$ él.	$\eta$ th.	$\eta$ tot	Poids (kg)	Fabricant	
g 5.5	Dachs	20.5	5.5	12.5	18	0.27	0.61	0.88	520	Senertec	
g	924herbie	156	50	92	142	0.32	0.59	0.91	2000	Dimag, Swiss- motor, Liebherr, Dimos-s	
g	924	187	60	110	170	0.32	0.59	0.91	2900		
g	926	274	90	162	252	0.33	0.59	0.92	3600		
tg	924	187	60	107	167	0.32	0.57	0.89	3000		
tbg	924	244	80	138	218	0.33	0.57	0.89	3100		
tbg	924 agr	337	125	175	300	0.37	0.52	0.89	3400		
tbg	926	370	125	207	332	0.34	0.56	0.90	4000		
tbg	926 k	408	140	221	361	0.34	0.54	0.88	4100		
tbg	926 agr	497	190	256	446	0.38	0.52	0.90	5000		
tbg	9408	705	245	392	637	0.35	0.56	0.90	6300		
tbg	9408agr	843	330	430	760	0.39	0.51	0.90	7300		
tbg	203 3	83	25	49	74	0.30	0.59	0.89	1300		Dimag, Deutz motor, Ditom-d
tbg	229 4	128	40	73	113	0.31	0.57	0.88	2800		
tbg	229 6	157	50	90	140	0.32	0.57	0.89	3000		
tbg	616 v8 k	914	338	442	780	0.37	0.48	0.85	8300		
tbg	616 v12k	1346	507	642	1149	0.38	0.48	0.85	9700		
tbg	616v16k	1795	678	857	1535	0.38	0.48	0.86	11000		
tbg	616fv12	1446	580	588	1168	0.40	0.41	0.81	9600		
tbg	616fv16	1926	775	782	1557	0.40	0.41	0.81	10900		
tbg	620v12k	2545	1022	1156	2178	0.40	0.45	0.86	16500		
tbg	620v16k	3393	1365	1548	2913	0.40	0.46	0.86	20000		
tbg	620v20k	4443	1815	1841	3656	0.41	0.41	0.82	24000		
tbg	620fv12	2793	1160	1233	2393	0.42	0.44	0.86	16500		
tbg	620fv16	3724	1555	1645	3200	0.42	0.44	0.86	20000		
tbg	620fv20	4728	1938	2035	3973	0.41	0.43	0.84	24000		
tbg	632v12	7086	2931	3126	6057	0.41	0.44	0.85			
tbg	632v16	8560	3537	3748	7285	0.41	0.44	0.85			

Type	Modèle	P. abs (kW)	P. el (kW)	P. th (kW)	P. tot (kW)	$\eta$ él.	$\eta$ th.	$\eta$ tot	Poids (kg)	Fabricant
jms	208 gs-nl	782	294	397	691	0.38	0.51	0.88		GE Jenbacher
jms	212 gs-n.l	1357	511	661	1172	0.38	0.49	0.86		
jms	312 gs-n.l	1544	601	733	1334	0.39	0.47	0.86		
jms	316 gs-n.l	2058	802	975	1777	0.39	0.47	0.86		
jms	320 gsn.l	2671	1064	1248	2312	0.40	0.47	0.87		
jms	420 gs-n.l	3446	1416	1600	3016	0.41	0.46	0.88		
jms	612 gs-n.l	4269	1822	1859	3681	0.43	0.44	0.86		
jms	616 gs-n.l	5669	2430	2441	4871	0.43	0.43	0.86		
jms	620 gs-n.l	7195	3029	3097	6126	0.42	0.43	0.85		
Sokra-therm	GG43	129	43	72	115	0.33	0.56	0.89	1810	Royce & Partners
Sokra-therm	GG50	143	50	80	130	0.35	0.56	0.91	1950	
Sokra-therm	GG65	192	65	109	174	0.34	0.57	0.91	2030	
Sokra-therm	GG104	286	104	152	256	0.36	0.53	0.90	2500	
Sokra-therm	GG122	354	122	204	326	0.34	0.58	0.92	2710	
Sokra-therm	GG142	410	142	230	372	0.35	0.56	0.91	3050	
Sokra-therm	GG198	545	198	293	491	0.36	0.54	0.90	3400	
Sokra-therm	GG240	665	240	373	613	0.36	0.56	0.92	4650	
Sokra-therm	GG320	909	320	503	823	0.35	0.55	0.91	5920	
Sokra-therm	GG380	1020	380	551	931	0.37	0.54	0.91	5990	

Source des données : sites web des fabricants ou revendeurs Dimag, Royce & Partners, GE Jenbacher, en juillet 2005.

### Annexe 2: calcul de l'inventaire d'émissions par méthode matricielle

La méthode de calcul suivie par Ecoinvent et appliquée dans ce travail est la suivante. Ecoinvent découpe la chaîne des processus en deux systèmes, représentés sous forme de matrice. La matrice carrée  $A$  est la matrice technologique, où  $a_{ij}$  représente le flux intermédiaire d'intrant provenant du processus technologique  $i$  nécessaire au processus technologique  $j$ . La matrice  $B$  est la matrice environnementale, où  $b_{kj}$  est le flux de la substance  $k$  émises ou extraites de l'environnement par le processus technologique  $j$  [Joliet, 2005 : 55], soit :

$$A_{(2630 \times 2630)} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mm} \end{pmatrix} \quad B_{(1061 \times 2630)} = \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1m} \\ \vdots & b_{kj} & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nm} \end{pmatrix} \quad [A.1]$$

Ecoinvent 1.2 recense 2630 processus économiques (ou flux technologiques) et 1061 substances-émissions.

La matrice des facteurs d'émissions et d'extractions  $E$  peut alors être définies comme suit, en remontant la chaîne des flux intermédiaires à l'infini :

$$E = B(I + A + A^2 + A^3 + A^4 + \dots), \text{ soit } E = B(I-A)^{-1} \quad [A.2]$$

Remarquons toutefois que la chaîne est tronquée puisqu'un certain nombre de processus unitaires ne sont pas modélisés et inclus dans les matrices  $A$  et  $B$ .

Afin de déterminer l'impact environnemental d'un système, il ne reste alors qu'à multiplier la matrice  $E$  par le vecteur d'inventaire de production  $p$  du système considéré, qui réunit les quantités de chaque processus intermédiaires que contient le système étudié.



### Annexe 3: méthodologie de calcul de l'impact ACV

Le but de cette méthode est de pouvoir calculer sans l'aide d'un logiciel spécialisé l'impact d'un grand nombre de scénarios. Le langage de programmation Matlab permet de le faire pour l'ensemble des solutions proposées par le système à l'aide d'une seule routine. Le gain de temps est indéniable.

#### *Décomposition des processus technologiques en objets*

Calculer par la même routine l'ensemble des impacts ACV ne se fait que si ceux-ci peuvent-être calculés quelle que soit la taille des équipements.

Pour ce faire, chaque élément du système doit être décomposé à un niveau de détail judicieux pour qu'une extrapolation puisse être utilisée, afin de convertir le modèle Ecoinvent aux modèles issus du MTE.

Prenons un exemple fictif. Un processus technologique modélisé dans Ecoinvent est composé de deux flux technologiques intermédiaires. Or, le dimensionnement du système utilise ce processus à une échelle différente. Il convient alors de trouver la loi qui détermine le passage d'une échelle à l'autre, afin de pouvoir utiliser la base de données. Cependant, il se peut qu'en décomposant le processus en plusieurs sous-processus, on constate que des lois différentes s'appliquent pour chacun d'eux lors du changement d'échelle. Dans ce cas, on ne peut pas considérer le processus lui-même, mais bien les deux sous-processus qui pourront alors varier indépendamment selon le dimensionnement du système.

D'une part, il est alors important de déterminer à quel niveau de détail il faut s'arrêter. La réalisation d'un premier *screening* permet de connaître les processus du système qui ont un impact environnemental significatif. Il est inutile de décomposer les processus à un grand niveau de détail si leurs impacts environnementaux sont négligeables.

D'autre part, chaque sous-système doit pouvoir être défini dynamiquement selon le dimensionnement du système par une routine Matlab pour chaque objet créé.

### *Procédure de calcul dynamique de l'impact*

Pour chaque objet déterminé, deux fichiers – un pour les processus intermédiaires, un pour les émissions directes – doivent être générés, contenant la liste des processus ou émissions directes de l'objet. Un identifiant numérique fournit par Ecoinvent est joint à chaque ligne du tableau. Rajouter nom et unité permet de retrouver d'éventuelles erreurs ou de modifier certains paramètres si de nouvelles données sont disponibles.

**Tab. A2:** exemple de fichier contenant les flux technologiques intermédiaires pour l'UF suivante : sonde géothermale, profondeur de 1m, durée de vie de 50 ans.

Process	Unit	ID-dataset	Amount
ethylene glycol, at plant	kg	402	0.68
bentonite, at processing	kg	459	0.053
cement, unspecified, at plant	kg	484	0.22
reinforcing steel, at plant	kg	1141	0.22
polyethylene, LDPE, granulate, at plant	kg	1830	1.2
diesel, burned in building machine	MJ	559	118
Water, unspecified natural origin	m <sup>3</sup>	5739	0.068
transport, lorry 16t	tkm	1940	4.747
transport, van <3.5t	tkm	1948	0.667
disposal, inert waste, 5 % water, to inert material landfill	kg	2073	16.667
treatment, heat carrier liquid, 40% C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> , to wastewater treatment, class 2	m <sup>3</sup>	2266	0.002

Puis, la quantité de chaque processus est insérée dans un vecteur « inventaire total des processus » pour l'objet unitaire considéré. Ce vecteur contient autant de lignes que la matrice d'émissions E contient de colonnes. Ceci se fait à l'aide d'un fichier d'index des processus qui relie la colonne de la matrice E à l'identifiant ID-dataset. La matrice E peut alors être multipliée à ce vecteur pour obtenir l'inventaire total des émissions des flux technologiques intermédiaires de l'objet (émissions indirectes).

De même, le vecteur « inventaire total des émissions directes » est généré pour chaque objet unitaire, à l'aide d'un fichier d'index des émissions. Il contient autant de lignes que la matrice E.

A ce stade, on obtient deux vecteurs contenant la totalité des émissions directes et indirectes qu'il ne reste plus qu'à sommer. La dernière étape consiste à multi-



plier ce vecteur d'émission de l'objet unitaire par un facteur calculé préalablement par une routine Matlab. Dans l'exemple de la sonde, ce facteur donne simplement le nombre de mètres de sonde géothermique convenant au dimensionnement du système.

La même procédure s'applique à chacun des objets. Le résultat est pour chacun un vecteur contenant plus de mille émissions ou extractions. Avant de sommer les vecteurs de tous les objets du système, il est préférable de réduire l'information pour chacun d'eux et de déterminer l'impact de l'objet pour les catégories intermédiaires ou les catégories de dommage. Cela permet de retrouver l'information afin de connaître la part de chaque objet dans l'impact total du système.

Pratiquement, cela est réalisé en multipliant les matrices de caractérisation ou de dommage de la méthode retenue au vecteur d'émission de l'objet. Le résultat est un vecteur contenant un nombre restreint (3-15) d'indicateurs environnementaux. L'impact total du système s'effectue en sommant les vecteurs des catégories intermédiaires ou des catégories de tous les objets du système. Comme précédemment, des fichiers d'index identifient les émissions-colonnes et les catégories-lignes de cette matrice.

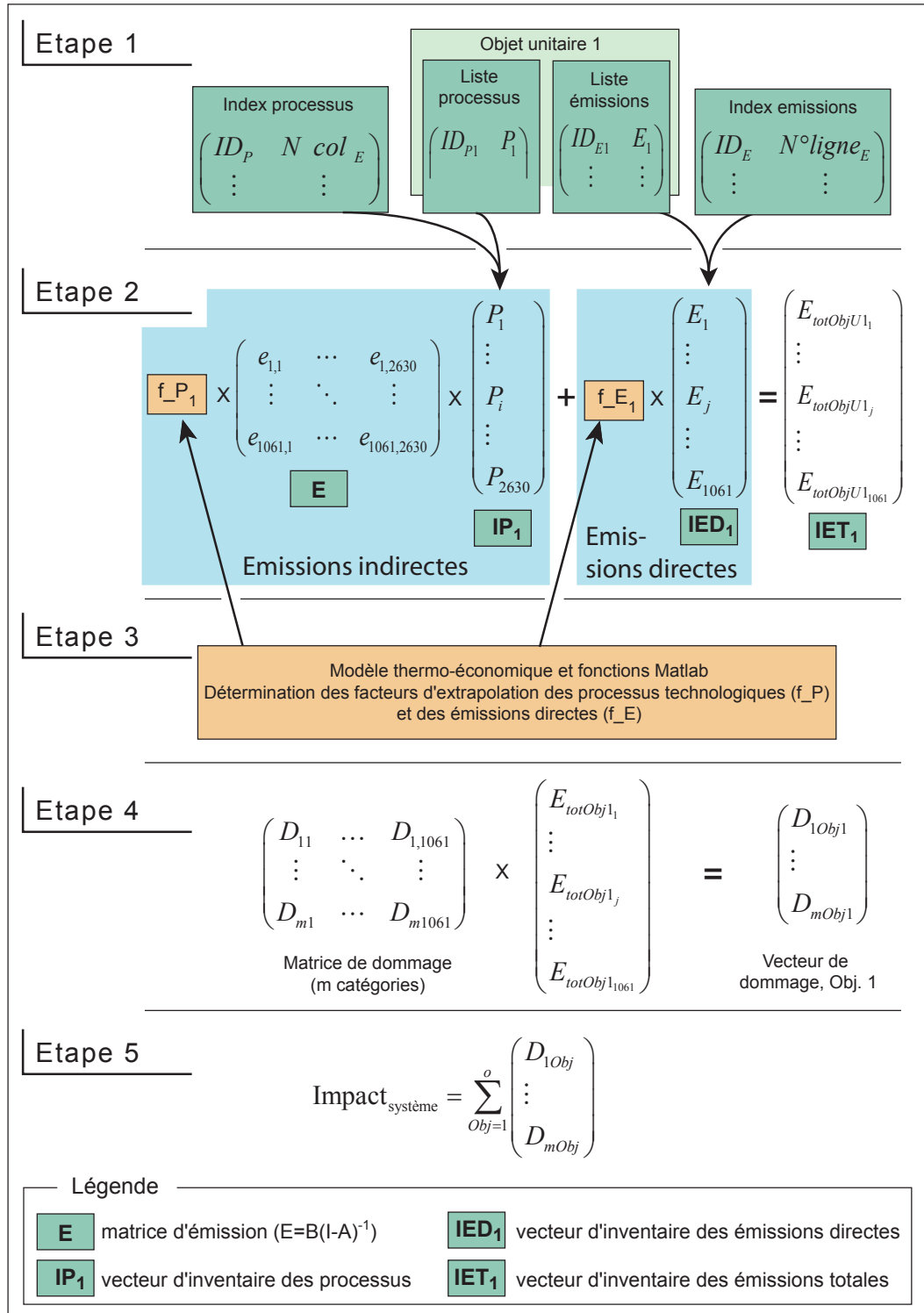


Fig. A1 : méthodologie de calcul de l'impact

### Annexe 4 : routines de *dynamisation* des processus économiques de l'inventaire d'ACV

Rappelons que le MTE produit une grande quantité de solutions de tailles d'équipement. A l'aide des paramètres et des variables de dimensionnement des systèmes définis par le modèle, des routines Matlab sont générées pour chaque objet retenu. Elles définissent en quelque sorte une fonction de liaison entre les deux modèles. Ainsi, le processus d'Ecoinvent peut être utilisé à des tailles différentes.

Ce paragraphe explique le découpage des processus Ecoinvent utilisés pour le cas d'étude en objets et la *fonction de liaison* entre les deux modèles.

#### A4.1 La pompe à chaleur

La pompe à chaleur choisie pour l'étude est une pompe à chaleur sol/eau. Le niveau de détail de découpage des objets de la PAC est le suivant :

- structure de la PAC et maintenance;
- infrastructure et creusement de la sonde géothermale;
- fluide réfrigérant;
- phase d'utilisation : consommation d'électricité et chaleur dans le sous-sol.

#### *La structure de la PAC et maintenance*

Ecoinvent 1.1 a utilisé une pompe à chaleur existante de puissance thermique de 10kW pour déterminer le bilan des matériaux et des processus. Les informations à disposition sont insuffisantes pour détailler la structure de la PAC au niveau de ses composants – compresseur, évaporateur, ...

On fera alors l'hypothèse que la composition relative de toutes les PAC correspondent à celle modélisée dans Ecoinvent. L'objet ACV produit est alors *un kilo de pompe à chaleur*.

Le poids de la PAC est fonction du poids de ses différents composants – condenseur, compresseur, évaporateur.

$$\text{On a : } P_{PAC} = f_1(\dot{Q}_{El}) + f_2(\dot{Q}_{th}) + f_3(\dot{Q}_{Ev}) + c \quad [A.3]$$

$$\text{or:} \quad \dot{Q}_{El} = \dot{Q}_{th} / \text{COP} \quad [\text{A.4}]$$

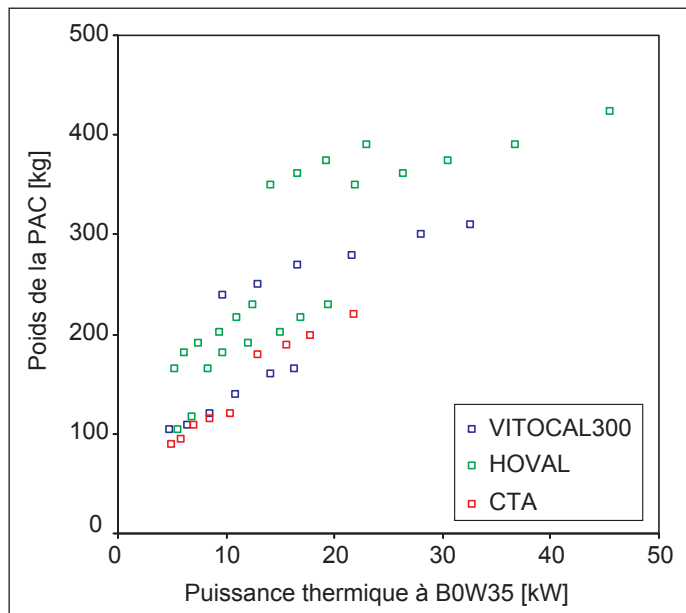
$$\text{et:} \quad \dot{Q}_{Ev} = \dot{Q}_{th} - \dot{Q}_{El} \quad [\text{A.5}]$$

$$\text{d'où:} \quad P_{PAC} = k_1 \dot{Q}_{th} / \text{COP} + k_2 \dot{Q}_{th} + k_3 \dot{Q}_{th} (1 - 1/\text{COP}) + c \quad [\text{A.6}]$$

$$\text{ainsi:} \quad P_{PAC} = \dot{Q}_{th} (a + b / \text{COP}) + c \quad [\text{A.7}]$$

avec  $Q_{el}$ , la puissance électrique;  $Q_{th}$ , la puissance nominale du compresseur à B0W35;  $Q_{ev}$ , la puissance de l'évaporateur en kW; COP, le coefficient de performance nominal à B0W35 (!) et  $P_{PAC}$ , le poids de la PAC.

La résolution de cette équation a été réalisée par la méthode des moindres carrés à l'aide d'un échantillon de 44 modèles de PAC utilisant le R407C, de puissance nominale B0W35, comprise entre 4.9 et 45 kW. Les données ont été obtenues sur les sites Internet de trois fabricants – Hoval, CTA Optiheat, Viessman Vitocal 300 – et sont disponibles à l'annexe 2 et présentée à la figure A2



**Fig. A2:** poids de la PAC en fonction de la puissance thermique (B0W35).

Source : sites fabricants Hoval, CTA Optiheat, Viessman Vitocal 300. Voir annexe 2.

Il s'agit de minimiser l'écart entre les résultats estimés par cette équation et les données de poids réels fournis par le fabricant.

$$\min_{a,b,c} \sum_{i=1}^{28} (P_{PAC_i}^* - P_{PAC_i})^2 \quad [A.8]$$

où  $P_{PAC}^*$  est le poids estimé de la PAC.

Le résultat est le suivant, avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0.71$  pas excellent, mais toutefois significatif pour  $\alpha = 1\%$  :

$$P_{PAC} = Q_{th} (31 - 102/COP) + 97 \quad [A.9]$$

La fréquence de maintenance de la pompe à chaleur est estimée égale au besoin de remplissage du fluide frigorigène en raison des pertes. Cela correspond à une seule révision pendant la durée de vie de la PAC. Le déplacement considéré est de 150 kilomètres en camionnette par un technicien.

### *La sonde géothermale*

Les PAC sol/eau sont peu sensibles aux variations des températures atmosphériques puisqu'elles prélèvent la chaleur de l'environnement dans le sol de deux façons possibles. La première est la disposition de serpentins à une faible profondeur mais sur une grande surface. Cette méthode est inappropriée en ville en raison de la rareté des terrains et de l'encombrement du sous-sol. La seconde est le forage d'une ou de plusieurs sondes géothermales de diamètre de l'ordre de la dizaine de centimètres et de profondeur pouvant dépasser 100 mètres. Cette solution est plus chère et doit obtenir une autorisation des autorités compétentes en raison de l'éventuelle présence de nappes phréatiques. Par contre, son encombrement est faible et sa durée de vie s'élève à 50 ans. Cette solution est modélisée ici.

Un mélange d'eau glycolée circule dans un circuit fermé en captant la chaleur du sous-sol. Il la transmet par un échangeur de chaleur au fluide frigorigène dans l'évaporateur. La température du sous-sol peut être considérée constante à 8°C tout au long de l'année [www.geothermal-energy.ch, 05.09.05].

Ecoinvent 1.0 met à disposition les données d'une sonde géothermale de 150 mètres. Les hypothèses sont disponibles dans [Heck, 2004: 17]. Les valeurs du bilan de matières et de ressources sont reprises telles quelles ici.

La longueur de la sonde dépend de la puissance de l'évaporateur, parfois aussi appelée puissance frigorifique ou encore puissance de la sonde, et de la conducti-

bilité thermique du sous-sol. Selon [www.geothermal-energy.ch, 25.07.05], la puissance soutirée varie entre 20 et 70 W par mètre de sonde. Selon l'AWP (Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen), on peut retenir pour le plateau suisse un chiffre moyen de 50 W par mètre de sonde.

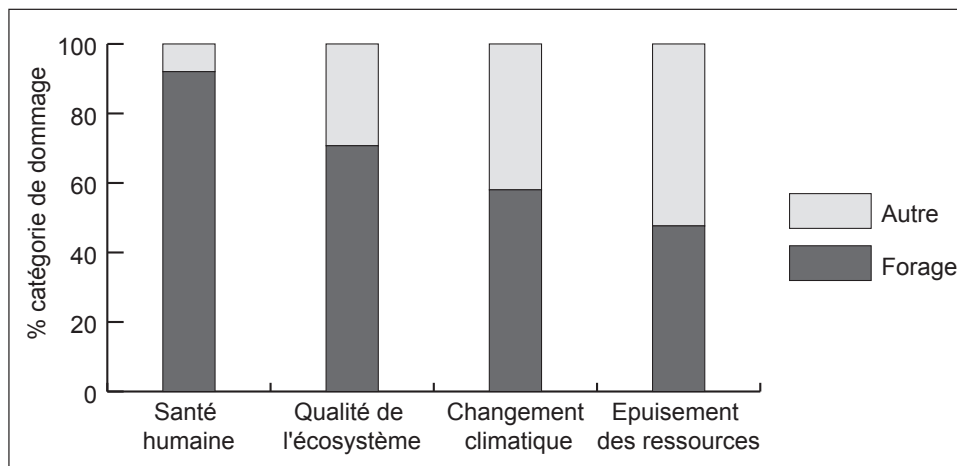
D'autres sources, notamment [Heck, 2004: 14] déterminent la longueur de la sonde en fonction de la puissance calorifique recherchée. La longueur de la sonde en mètres est déterminée en multipliant la puissance thermique recherchée par un facteur allant de 12 à 15. Cette deuxième méthode est une méthode indirecte dépendante du COP. Nous ne la retiendrons pas. C'est ainsi que la longueur de la sonde est déterminée par la formule suivante:

$$L_{sonde} = Q_{ev} / 0.05 \quad [A.10]$$

où  $Q_{ev}$  est la puissance de l'évaporateur, en kW et  $L_{sonde}$  est la longueur de la sonde, en m.

On remarque que selon le mix électrique utilisé par la PAC, l'impact de la sonde peut devenir comparativement important. C'est la raison pour laquelle l'impact de celle-ci est détaillée.

L'impact de la sonde est essentiellement due au forage (figure A3), en particulier pour la santé humaine (émission de NO<sub>x</sub>, de PM<sub>2,5</sub> et SO<sub>2</sub>):



**Fig. A3:** part du forage dans l'impact de la sonde géothermale.

Sources des données : damage assessment réalisé avec Ecoinvent 1.1 et Impact 2002+.

Selon [Heck, 2004: 18], 3.1 litres de diesel sont nécessaires pour le forage d'un mètre d'une sonde de diamètre moyen (12 cm). Ce chiffre a été validé par la société *Tecfor* à Collombey (communication personnelle, 17.10.05). Or, bien que l'émission des moteurs diesel sur les chantiers est un problème connu par les autorités suis-

ses, aucune mesure n'a encore été prise pour y remédier dans le cas d'une foreuse. En effet, la « Directive Air Chantiers de l'OFEFP » adoptée en 2002 durcit le ton en imposant un filtre à particules pour les moteurs diesel occupés sur des chantiers longs (> une année en ville) ou important (> 4'000 m<sup>2</sup> ou 10'000 m<sup>3</sup> en ville), pour des moteurs de puissance supérieure à 37 kW dans un premier temps, puis 18 kW dans un second temps [BUWAL, 2002]. Les travaux de forage pour des sondes géothermiques ne rentrent bien sûr pas dans ces catégories : une sonde de 150 mètres est forée en trois jours environ. C'est la raison pour laquelle les valeurs d'émission du diesel utilisées par [Heck, 2004] sont conservées (tab. A3).

**Tab. A3 :** combustion d'1 MJ de diesel dans une machine de construction.

Source : Ecoinvent 1.1

Emissions dans l'air	Quantité	Unité
Ammonia	0.000000467	kg
Benzo(a)pyrene	7.01E-10	kg
Cadmium	2.34E-10	kg
Carbon dioxide, fossil	0.073	kg
Carbon monoxide, fossil	0.000917	kg
Chromium	1.17E-09	kg
Copper	3.97E-08	kg
Dinitrogen monoxide	0.0000028	kg
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	1.4E-15	kg
Heat, waste	1.06	MJ
Methane, fossil	0.0000129	kg
Nickel	1.64E-09	kg
Nitrogen oxides	0.00356	kg
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	0.000418	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	7.85E-08	kg
Particulates, < 2.5 um	0.000361	kg
Selenium	2.34E-10	kg
Sulfur dioxide	0.0000236	kg
Zinc	2.34E-08	kg

### *Le choix du fluide réfrigérant*

La pompe à chaleur modélisée dans Ecoinvent 1.0 utilise le fluide réfrigérant R134a, un hydrofluorocarbure de formule chimique  $\text{CHF}_2\text{CF}_3$ . Mais celui-ci est de moins en moins utilisé aujourd'hui. Selon [Zehnder, 2004: 14], 75 % des PAC installées en 2002 et 2003 font recours au R407C. Il s'agit d'un mélange de trois fluides réfrigérants : R134a (52%), le R32 (23 % -  $\text{CH}_2\text{F}_2$ ) et le R125 (25 % -  $\text{CHF}_2\text{CF}_3$ ).

Le R407C permet d'obtenir un COP nettement plus élevé que le R134a à volume de compresseur constant. En contrepartie, le potentiel de réchauffement climatique du mélange est de l'ordre de 30 % supérieur à celui du R134a, que ce soit à 100 ou 500 ans [IPCC, 2001 : 388, Zogg, 1999 : 8]. Pour indication, on obtient par moyenne pondérée un GWP500 de 522  $\text{kg}_{[\text{CO}_2]}\text{éq.}$  pour le R407C et de 400  $\text{kg}_{[\text{CO}_2]}\text{éq.}$  pour le R134a.

Malheureusement, Ecoinvent 1.0 ne modélise pas le cycle de vie des trois composants du mélange R407C : seul le R134a est complètement modélisé. Quant au R32 et R125, seules les émissions atmosphériques sont modélisées. Les émissions dues à la synthèse de ces fluides doivent être estimées.

L'analyse de cycle de vie du R134a met en évidence deux impacts. Le premier est évidemment le réchauffement climatique. Le second, toutefois dans une moindre mesure, est les polluants respiratoires inorganiques, notamment les émanations d'oxyde de soufre, issu du HF utilisé pour synthétiser le R134a à partir de  $\text{CF}_3\text{CHCl}_2$ . Or, il semble que les principaux industriels synthétisent également le R32 et le R125 à partir de HF. Il resterait à connaître les proportions de HF utilisé par kilo de fluide et la nocivité des produits de base. Mais ce n'est pas nécessaire. En reprenant l'analyse de cycle de vie du R134a, et en le comparant avec l'impact de la sonde qui produit également des polluants respiratoires inorganiques, on constate que l'impact du fluide sur la catégorie Polluants respiratoires inorganiques, calculé en  $\text{kgPM}_{2.5\text{éq}}$  par Impact 2002+, est de quatre ordre de grandeur inférieur à celui de la sonde. Il est fort improbable que la différence d'impact entre le R32 et le R125 avec le R134a soit suffisamment importante pour être significative.

En conséquence, la modélisation du R407C à partir du R134a n'est faite que sur la base de l'effet de serre du fluide, En résumé, la synthèse du fluide R407C sera remplacée par l'équivalent en poids de la synthèse du R134a. Par contre, les émissions atmosphériques sont pondérées par le ratio entre le potentiel d'effet de serre à l'horizon 500 ans du R407C sur celui du R134a.



### *Estimation des pertes de fluide*

Comme pour les machines frigorifiques, un important problème est constitué par les fuites du fluide réfrigérant et leur action sur l'effet de serre, autrefois sur la couche d'ozone. Les progrès ont été importants à ce sujet. Selon [Frischknecht, 1999:97] qui se base sur un ensemble d'études préalables, les pertes annuelles s'échelonnent entre 1 % et 8 %. [Gilli et al., 1999:94] estime ces taux entre 0.6 % et 1.9 % par année, pour différents modèles de pompes à chaleur. Enfin, le contact avec une entreprise ([www.dalcalor.ch](http://www.dalcalor.ch), entretien téléphonique du 21.07.05) affirme que ces chiffres ont encore baissé avec les nouvelles technologies, notamment le compresseur Scroll, qui limite fortement les vibrations responsables de l'usure et des fuites. Elle propose des chiffres non consolidés entre 0.1 et 0.2 % par année pour les modèles actuellement vendus. Dans cette étude, on retiendra alors un chiffre moyen de 0.5 % par année, ce qui nécessite le déplacement d'une personne durant la durée de vie des pompes à chaleur de faibles puissance pour le remplissage.

En ce qui concerne l'installation et le démantèlement de l'infrastructure, les chiffres suivants sont tirés de [Frischknecht, 1999: 97] pour un état optimisé, plus proche des standards techniques actuels: 1 % de perte lors de l'installation, 5 % lors de la fin de vie. Le reste du fluide est recyclé.

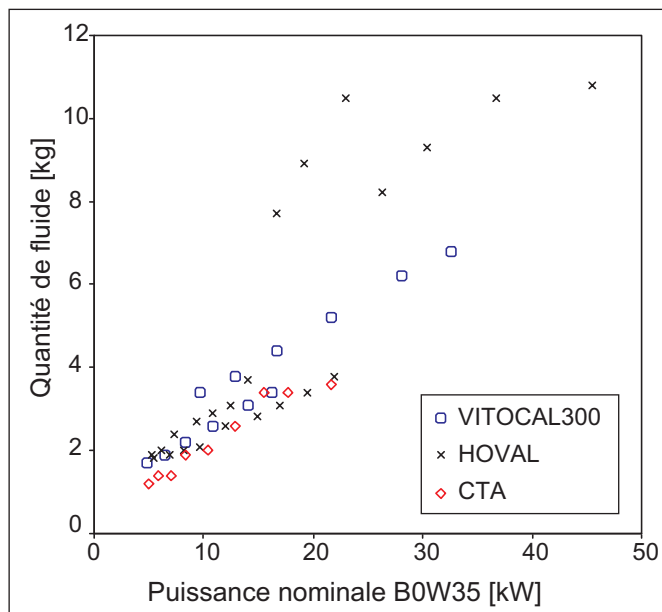
Selon ces hypothèses et pour une pompe à chaleur ayant une durée de vie de 20 ans, chaque kilo de fluide R407C nécessaire dans la pompe à chaleur est modélisé sous forme de production de 1.11 kg de R134a et de 0.16 kg de R407c émis dans l'atmosphère.

### *Estimation de la quantité de fluide*

Il s'agit encore de déterminer la quantité de fluide nécessaire à la PAC. A l'aide du même échantillon que ci-dessus, une fonction linéaire est observée entre la puissance thermique de la pompe à chaleur et la quantité en poids du fluide utilisé selon la relation :

$$P_{\text{fluide}} = 0.26 * Q_{\text{th}} + 0.09 \quad [\text{A.11}]$$

avec  $P_{\text{fluide}}$  le poids de fluide nécessaire à la PAC de puissance nominale B0W35  $Q_{\text{th}}$ . Le coefficient de corrélation  $R^2$  est de 0.75, significatif pour  $\alpha=1\%$ .



**Fig. A4:** poids du fluide en fonction de sa puissance nominale.

Sources des données: Hoval, CTA Optiheat, Viessman Vitocal 300.

## A4.2 Le moteur de cogénération

Ecoinvent 1.1 a modélisé une unité de cogénération à partir d'une installation existante de puissance électrique égale à 160 kW environ. Elle l'a décomposé en 16 éléments (tab. A4). Le choix du découpage permet d'allouer les impacts, puisque l'on a affaire à un processus multi-outputs. La raison pour laquelle le nombre d'unité de chacun de ces éléments n'est pas partout égale est liée à la durée de vie des éléments. De 100'000 heures pour la plupart des éléments, la durée de vie tombe à 80'000 pour le moteur, le générateur et l'échangeur de chaleur. Les catalyseurs ont eux une durée de vie de 20'000 heures de service [Heck, 2004: 49]. Le nombre d'unité des éléments est simplement corrigé d'un facteur correspondant. C'est la raison pour laquelle le nombre de générateur est égal à 1.25, puisque sa durée de vie est  $\frac{1}{4}$  moins longue que celle du moteur.

**Tab. A4:** découpage des éléments de l'unité de cogénération pour 100'000 heures de services

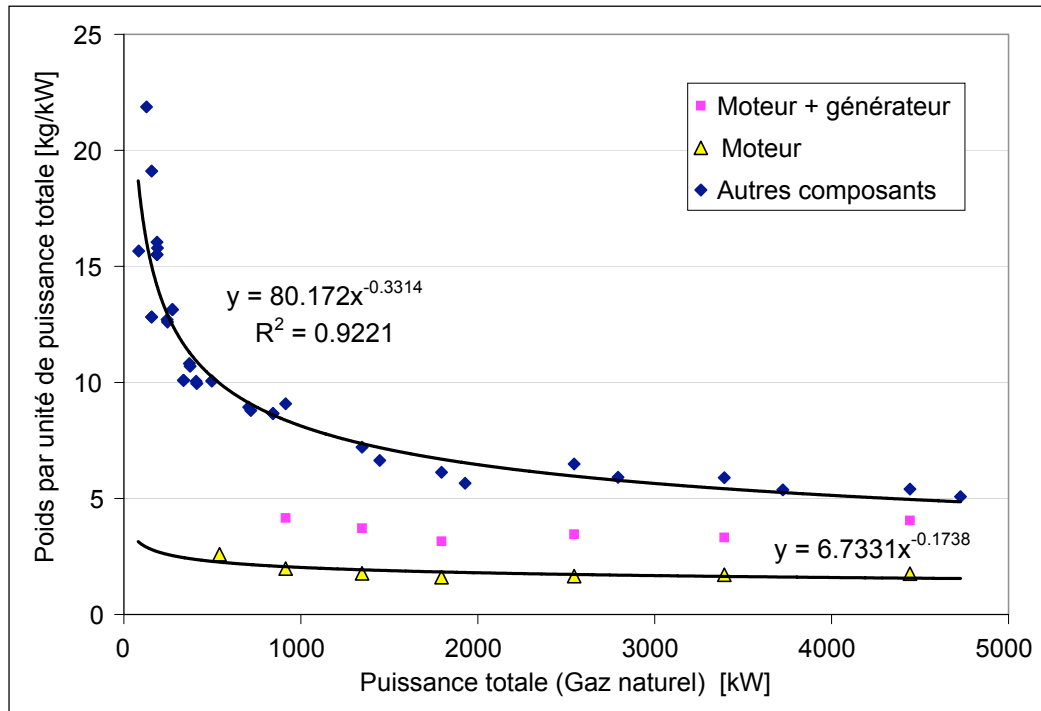
Source: Ecoinvent 1.1 [Heck, 2004]

<b>Unité de cogénération, 160 kWe, Jakobsberg</b>	
<b>Eléments liés à l'électricité seulement</b>	<b>Nombre</b>
Assembly, generator and motor, cogen unit 160kWe/RER/I U	1
Electric parts of cogen unit 160kWe/RER/I U	1
Generator 200kWe/RER/I U	1.25
<b>Eléments liés à la chaleur seulement</b>	
Heat exchanger of cogen unit 160kWe/RER/I U	1.25
Heating, sanitary equipment cogen unit 160kWe/RER/I U	1
Storage 10'000 l/RER/I U	2
<b>Eléments liés à l'électricité et à la chaleur</b>	
Assembly, module cogen unit 160kWe/RER/I U	1
Catalytic converter, three-way, 19.1 litre/RER/I U	5
Construction work, cogen unit 160kWe/RER/I U	1
Control cabinet cogen unit 160kWe/RER/I U	1
Gas motor 206kW/RER/I U	1.25
Maintenance, cogen unit 160kWe/RER U	1
Operation start, cogen unit 160kWe/RER/I U	1
Planning, cogen unit 160kWe/RER/I U	1
Sound insulation cogen unit 160kWe/RER/I U	1
Supply air input/spent air output cogen unit 160kWe/RER/I U	1

Ici cependant, un autre découpage est nécessaire, qui puisse permettre un certain dynamisme, en fonction de la puissance de l'unité de cogénération des scénarios envisagés.

Selon des informations obtenues de fabricants pour une trentaine d'installations de cogénération, [Heck, 2004: 21] a pu établir une relation entre la puissance absorbée de la cogénération et le poids spécifique (poids en kg par puissance absorbée en kW). Le résultat obtenu a été vérifié pour des données de 13 installations d'un autre fabricant. Les résultats concordent largement et les valeurs obtenues dans [Heck, 2004] seront utilisées pour la suite de ce travail (fig. A5).

Seul le processus *maintenance* ne suit pas l'une de ces courbes. [Heck, 2004: 52] détermine une fonction de proportionnalité entre le coût et la puissance électrique de l'installation.



**Fig. A5 :** fonction de poids d'une unité de cogénération en fonction de la puissance absorbée (GN).

Source : [Heck, 2004 : 21]

Dès lors, Heck utilise l'installation de référence de Jakobsberg (160 kWe) pour extrapoler les différents éléments de l'unité de cogénération à d'autres puissances. La même démarche est appliquée ici.

L'unité de cogénération est alors découpée comme suit :

**Tab. A5 :** objets de l'unité de cogénération regroupés en fonction de formule de dimensionnement en fonction de la puissance absorbée  $Q_{abs}$ .

Source : Ecoinvent 1.1, [Heck, 2004].

### Objets de la cogénération (>10kWe)

$$\text{Objet «moteur» : } n = n_{ref} * \dot{Q}_{abs} / \dot{Q}_{abs, ref}$$

Assembly, generator and motor, cogen unit 160kWe/RER/I U

Gas motor 206kW/RER/I U

Generator 200kWe/RER/I U

$$\text{Objet «maintenance» : } n = n_{ref} * (\dot{Q}_{abs} / \dot{Q}_{abs, ref})^{0.74}$$

Maintenance, cogen unit 160kWe/RER U

### Objets de la cogénération (>10kWél)

$$\text{Objet «structure» : } n = n_{\text{ref}} * (\dot{Q}_{\text{abs}} / \dot{Q}_{\text{abs, réf}})^{2/3}$$

Assembly, module cogen unit 160kWe/RER/I U

Catalytic converter, three-way, 19.1 litre/RER/I U

Construction work, cogen unit 160kWe/RER/I U

Control cabinet cogen unit 160kWe/RER/I U

Operation start, cogen unit 160kWe/RER/I U

Planning, cogen unit 160kWe/RER/I U

Sound insulation cogen unit 160kWe/RER/I U

Supply air input/spent air output cogen unit 160kWe/RER/I U

Electric parts of cogen unit 160kWe/RER/I U

Heat exchanger of cogen unit 160kWe/RER/I U

Heating, sanitary equipment cogen unit 160kWe/RER/I U

Un processus a été ôté de la liste. Il s'agit du réservoir d'eau chaude, puisqu'il est possible de s'en passer selon les scénarios envisagés. En effet, si l'unité de cogénération alimente un réseau de chauffage à distance, celui-ci devient le stock de chaleur et un réservoir devient dans ce cas inutile. Ainsi, deux objets supplémentaires doivent être créés, avec leurs propres règles de dimensionnement: le réservoir d'eau chaude et le réseau de chauffage à distance.

#### *Micro-cogénération*

Ecoinvent 1.1 a également modélisé une micro-cogénération. Elle se différencie de la cogénération notamment par une durée de vie du moteur réduite de moitié [Heck, 2004: 49] et par une structure compacte. Malheureusement, les données à disposition sont trop peu nombreuses pour pouvoir de la même façon extrapoler les données de l'unité de micro-cogénération modélisée à d'autres puissances. Une explication est la faible gamme de puissances pour lesquelles on parle de micro-cogénération. La faible quantité de modèles de micro-cogénération proposés sur le marché a des puissances très proches, ne permettant pas d'établir une courbe de tendance pour un échantillon représentatif.

Selon Cogen Europe [www.cogen.org], association commerciale de promotion des cogénérations, en lien avec de nombreux fabricants, les modèles de micro-cogénération ne s'étendent pas à des gammes de puissance supérieure à 10 kWél (ex: CHP XRGBI 12 NGAS Energy Solution proposé par EC Power).

Nous ferons donc les hypothèses suivantes. Au-dessus de 10 kWél, les objets de la cogénération de référence sont appliqués selon le tableau A5. Ayons conscience que [Heck, 2004: 21-22] ne garantissait ces formules que pour une gamme de puissance supérieure à 50 kWél environ. En deçà, l'incertitude s'accroît. Au-dessous de 10 kWél, les objets de la micro-cogénération de référence sont utilisés. Les formules de conversion en fonction de la puissance sont supposées être identiques à celles utilisées pour la cogénération. Les objets de la micro-cogénération sont disponibles sur le tableau A6.

**Tab. A6:** objets de la micro-cogénération, pour 100'000 heures de service

<b>Objets de la micro-cogénération (&lt;10kWél)</b>	
<b>Objet «moteur» : <math>n = n_{ref} * \dot{Q}_{abs} / \dot{Q}_{abs, réf}</math></b>	<b>Nombre</b>
Assembly, generator and motor, Mini-BHKW/CH/I U	1
Gas motor Mini-BHKW/CH/I U	2.5
Generator Mini-BHKW/CH/I U	1.25
<b>Objet «maintenance» : <math>n = n_{ref} * (\dot{Q}_{abs} / \dot{Q}_{abs, réf})^{0.74}</math></b>	
Maintenance, Mini-BHKW/CH U	1
<b>Objet «structure» : <math>n = n_{ref} * (\dot{Q}_{abs} / \dot{Q}_{abs, réf})^{2/3}</math></b>	
Catalytic converter, three-way, Mini-BHKW/CH/I U	5
Planning, cogen unit Mini-BHKW/CH/I U	1
Electric parts of Mini-BHKW/CH/I U	1
Heat exchanger of Mini-BHKW/CH/I U	1.25
Heating, sanitary equipment Mini-BHKW/CH/I U	1

La différence entre le nombre d'objets des deux types de cogénération n'est pas due à des oublis, mais à un « découpage » de la micro-cogénération moins fin en raison de la taille des éléments.

### *Combustion du gaz*

La combustion du gaz naturel est, sur l'ensemble du cycle de vie du moteur, largement l'impact le plus important. Le processus Ecoinvent peut-être pris sans modification, puisqu'il est exprimé en MJ de gaz naturel consommé. Les émissions directes sont indiquées à l'annexe 11.

### A4.3 La chaudière à gaz

#### *Structure*

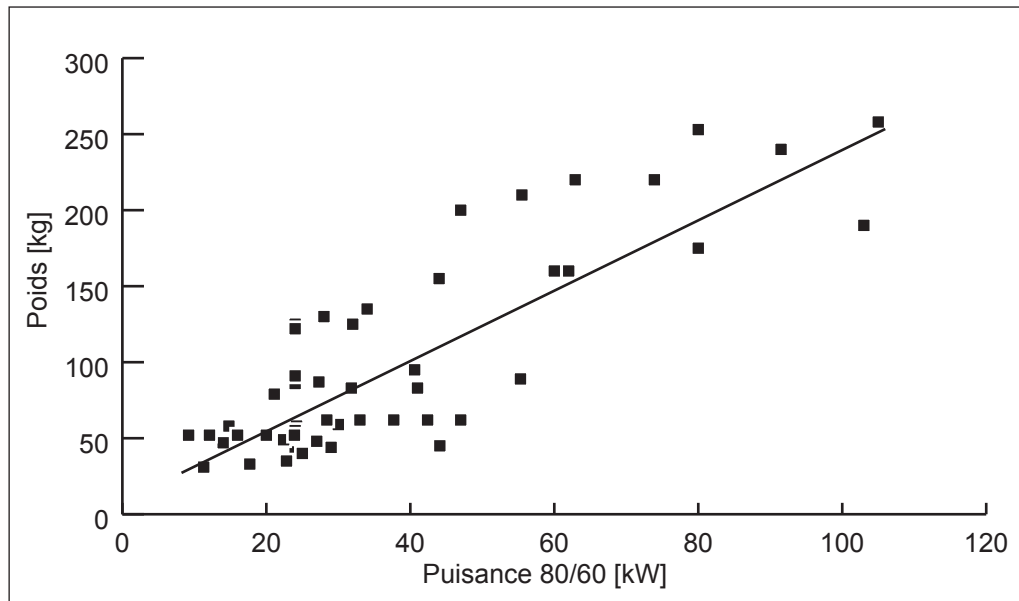
La chaudière à gaz choisie pour le scénario CHAUDIÈRE À GAZ est une chaudière modulante à condensation, valable pour des chaudières de puissance thermique inférieure à 100 kW de puissance nominale. Le rendement nominal de la chaudière est de 102 % [Heck, 2003b: 101]. Un rendement supérieur à 100 % est permis en récupérant la chaleur sensible issue de la combustion du gaz naturel et la chaleur latente en condensant la vapeur d'eau dégagée avec les gaz de combustion. Cependant, l'énergie de condensation ne peut-être récupérée qu'à basse température (< 59°C). D'autre part, le démarrage et l'arrêt de la chaudière occasionne des pertes. En conséquence, le rendement moyen de la chaudière est ici de 96 % si elle fonctionne à 35 °C et de 89 % si elle fonctionne à 65 °C.

A l'instar d'autres systèmes énergétiques, l'infrastructure de la chaudière à gaz n'a pas un impact environnemental élevé par rapport à l'utilisation de celle-ci. Ceci autorise d'importantes estimations. Par exemple, Ecoinvent 1.1 n'a pas modélisé de chaudière à gaz pour les modules produisant de la chaleur à l'aide de différents types de chaudière à gaz. Pour chacun, elle utilise le flux technologique intermédiaire *oil-boiler 10kW*, auquel elle applique des rendements et des émissions différentes selon la technologie retenue. Alors, on pourrait se contenter d'utiliser le flux technologique au moindre degré de détail, à savoir *Heat, natural gas, at boiler condensing modulating < 100kW*.

Mais par souci d'homogénéité d'avec le reste de la recherche, on a choisi d'aller à un niveau de détail supplémentaire. Pour cela, des données ont été récoltées auprès de six fabricants (50 modèles) de chaudières à condensation (annexe 6). Cela révèle une forte variance de poids par rapport à la puissance. La raison en est la variété des composants choisis par les fabricants pour construire les chaudières. En utilisant la régression linéaire représentée sur le graphe A6 et le process *Oil boiler* ramené à un kilo – on suppose que la composition relative de toutes les chaudières est identique – alors il est possible de définir le facteur de correction de l'objet chaudière en fonction de la puissance thermique nominale requise. En conséquence, le coefficient de corrélation de la formule ci-dessous est relativement faible (0.7).

$$P_{\text{chaudière}} = 2.4 * Q_{\text{th, nom}} + 11.6 \quad [\text{A.12}]$$

La durée de vie de la chaudière est de 20 ans [Jungbluth, 2004].



**Fig. A6:** poids de la chaudière en fonction de la puissance.

Source des données: Hoval, Guillot-Atlantic, Viessmann, Vaillant, Saunier Duval, Elco-therm.

### *Combustion du gaz*

La combustion du gaz naturel est, sur l'ensemble du cycle de vie d'une chaudière, largement l'impact le plus important. Le processus Ecoinvent peut-être pris sans modification, puisqu'il est exprimé en MJ de gaz naturel consommé. Les émissions directes sont indiquées à l'annexe 11.

#### A4.4 Les réservoirs

Ecoinvent 1.1 modélise un réservoir de 10 m<sup>3</sup> [Heck, 2004: 35]. En raison de l'aspect tout à fait négligeable de l'impact du réservoir sur l'analyse du cycle de vie de l'ensemble d'un système énergétique, nous nous contenterons ici de considérer que l'ensemble des flux intermédiaires du processus *réservoir* se comportent selon le poids du réservoir de hauteur (2 m) et de forme identique (cylindre). En prenant comme référence l'installation modélisée dans Ecoinvent, on déduit alors le nombre d'unité de réservoir de contenance différente par :

$$n_1 = n_2 * (V_1/V_2)^{0.6} \quad [A.13]$$

Ce processus économique est utilisé pour le réservoir tampon comme pour le ballon ECS.



#### A4.5 La chaufferie

Les systèmes de chauffage modélisés ci-dessous sont plus ou moins encombrants. En conséquence, l'espace construit qui leur est mis à disposition doit être inclus dans l'analyse LCA. Le bâtiment choisi parmi ceux modélisés par Ecoinvent est un bâtiment résidentiel de plusieurs étages, dont le processus unitaire est exprimé en  $m^3$  [Kellenberger & al., 2004: part XVIII].

Il est alors nécessaire de déterminer l'espace nécessaire au système de chauffage. Bien que la surface au sol requise pour des modèles de fabricants concurrents puissent varier considérablement, les données d'un seul fabricant par système énergétique n'ont été considérées ici (Hoval pour la chaudière à gaz et la PAC, Royce & Partners pour le moteur de cogénération).

En plus de la surface au sol requise par l'installation elle-même, des espaces de dégagement sont nécessaires autour de chaque objet. [www.hoval.ch] communique les informations en ce sens pour la PAC et pour la chaudière. Le rapport entre la surface totale et la surface au sol de l'appareil est de 2.5 environ, en tenant grossièrement compte de la superposition des surfaces de dégagement des appareils. Cette valeur a été utilisée également pour le moteur. Par contre, la valeur de 1.5 a été utilisée pour les réservoirs.

A l'image du bâtiment modélisé dans Ecoinvent, la hauteur de la pièce abritant la chaufferie a été choisie à 2.5 m.

La durée de vie du bâtiment est 80 ans [Kellenberger & al., 2004: part XVIII, p. 39].

#### A4.6 L'électricité

La question de l'électricité a déjà été abordée au § 2.3. Les pertes sur le réseau électrique sont considérées de 7.5 %, correspondant à la perte moyenne suisse, quelque soit l'origine de la production.

Par contre, dans le cas de la cogénération, le lieu de consommation d'électricité produite est proche du lieu de production. Étonnamment, cela ne signifie pas que les pertes sont moindres. Dans notre cas, nous considérons des pertes nulles entre la PAC et le moteur de cogénération, puisque la distance entre les deux installations est supposée nulle.

Mais dans le cas où un moteur de cogénération de grande taille approvisionne un quartier en courant par exemple pour alimenter des PAC, cette valeur ne peut pas être négligée. Des informations sur la tension des réseaux, de la résistance des

conducteurs et sur la charge moyenne des réseaux basses tensions ont été obtenues auprès des SIG [email Olivier Bissat, 02.09.05], des SIL [communication personnelle, 31.08.05] et du Laboratoire des réseaux d'énergie électrique de l'EPFL [Prof. Cherkaoui] ont permis de déterminer que la perte d'énergie électrique varie entre 0.6 % et 1.8 % par 100 m de réseau.

#### A4.7 Le réseau de chauffage à distance

L'étude de cas ne nécessite pas de réseau de chauffage à distance. Dans l'hypothèse où cette méthodologie serait appliquée à la planification d'un quartier comprenant un réseau de chauffage, celui-ci a tout de même été modélisé, bien que grossièrement.

Pour ce processus, nous nous fierons à la base de données préalable à Ecoinvent, à savoir ETH-ESU 96, qui avait modélisé différents types de réseau de chauffage à distance. Les données ayant permis cette modélisation datent un peu puisqu'elles ont plus de 10 ans. Elles proviennent de la littérature et des services industriels suisses gérant les plus importants réseaux de chauffage à distance. Toutefois, la durée de vie des réseaux de chauffage à distance et l'évolution lente des techniques dans ce domaine nous autorise à l'utiliser.

Le type de réseau retenu ici est composé de tuyaux composés d'acier, de mousse isolante en polyuréthane et de polyéthylène, soit le même type que l'ensemble du réseau genevois. La durée de vie de l'ensemble des éléments considérés est de 30 ans. Le diamètre du réseau permet de définir la taille de la plupart des flux intermédiaires de ce processus. Les valeurs retenues sont pour 70 % du kilométrage un diamètre nominal de 100 mm et pour le reste de 200 mm [Knöpfel, n.d].

Le processus unitaire est donné en TJ de chaleur utile transmise au bâtiment, en incluant une perte de chaleur de 7 % dans le réseau.

## Annexe 5

### Annexe 5 : paramètres des PAC utilisées

Marque	Modèle	Puissance thermique nominale B0W35 [kW]	Poids structure [kg]	Quantité fluide [kg]	COP (B0W35)
CTA	Opt 5	4.9	90	1.2	4.2
CTA	Opt 6	5.8	95	1.4	4
CTA	Opt 7	7	110	1.4	4.2
CTA	Opt 8.1	8.4	115	1.9	4
CTA	Opt 10	10.4	120	2	4.2
CTA	Opt 13	12.8	180	2.6	4.1
CTA	Opt 15.1	15.5	190	3.4	4
CTA	Opt 18	17.7	200	3.4	4
CTA	Opt 22	21.7	220	3.6	4
HOVAL	8H	5.2	165	1.9	4.42
HOVAL	10H	6.12	182	2	4.6
HOVAL	12H	7.38	192	2.4	4.63
HOVAL	15H	9.32	202	2.7	4.67
HOVAL	17H	10.88	217	2.9	4.69
HOVAL	19H	12.48	230	3.1	4.64
HOVAL	22H	14	350	3.7	4.42
HOVAL	26H	16.62	362	7.7	4.44
HOVAL	30H	19.19	375	8.9	4.45
HOVAL	37H	22.96	390	10.5	4.47
HOVAL	5	5.4	105	1.8	4.35
HOVAL	7	6.83	117	1.9	4.38
HOVAL	8	8.26	165	2	4.45
HOVAL	10	9.65	182	2.1	4.45
HOVAL	12	12	192	2.6	4.48
HOVAL	15	14.98	202	2.8	4.5
HOVAL	17	16.9	217	3.1	4.64
HOVAL	19	19.43	230	3.4	4.67
HOVAL	22	21.9	350	3.8	4.42
HOVAL	26	26.36	362	8.2	4.42

Marque	Modèle	Puissance thermique nominale B0W35 [kW]	Poids structure [kg]	Quantité fluide [kg]	COP (B0W35)
HOVAL	30	30.45	375	9.3	4.46
HOVAL	37	36.75	390	10.5	4.52
HOVAL	45	45.47	425	10.8	4.4
VITOCAL300	BW 104	4.8	105	1.7	4.1
VITOCAL300	BW106	6.4	110	1.9	4.13
VITOCAL300	BW 108	8.4	120	2.2	4.2
VITOCAL300	BW 110	10.8	140	2.6	4.24
VITOCAL300	BW 113	14	160	3.1	4.67
VITOCAL300	BW 116	16.3	165	3.4	4.53
VITOCAL300	BW208	9.6	240	3.4	4.35
VITOCAL300	BW 212	12.8	250	3.8	4.56
VITOCAL300	BW 216	16.6	270	4.4	4.6
VITOCAL300	BW 220	21.6	280	5.2	4.49
VITOCAL300	BW 226	28	300	6.2	4.57
VITOCAL300	BW 232	32.6	310	6.8	4.51

Source des données: [www.hoval.ch](http://www.hoval.ch), [www.viessmann.ch](http://www.viessmann.ch), [www.cta.ch](http://www.cta.ch)

## Annexe 6

### Annexe 6: paramètres des chaudières à condensation utilisées

Marque/fabri- cant	Nom	Modèle	Puissance 80/60 [kW]	Poids [kg]
Hoval	Topgas (murale)	15lp	14	47
Hoval	Topgas (murale)	25lp	23.6	52
Hoval	Topgas (murale)	14	14.8	58
Hoval	Topgas (murale)	24	24.2	58
Hoval	Topgas (murale)	35	31.8	83
Hoval	Topgas (murale)	45	41	83
Hoval	Topgas (murale)	60	55.3	89
Hoval	Ultragas	20	21.1	79
Hoval	Ultragas	30	27.3	87
Hoval	Ultragas	40	40.6	95
Hoval	Ultragas	50	47	200
Hoval	Ultragas	60	55.5	210
Hoval	Ultragas	70	62.9	220
Hoval	Ultragas	80	73.9	220
Hoval	Ultragas	100	91.5	240
Guillot-Atlantic	Aquacondens	1V 25R	24	41
Guillot-Atlantic	Aquacondens	2V 30 R	29	44
Guillot-Atlantic	Aquacondens	Pack mural 80 V	24	86
Guillot-Atlantic	Aquacondens	Pack sol 100 V	24	91
Guillot-Atlantic	Condensol	2v 24R	24	125
Guillot-Atlantic	Condensol	2V 28R	28	130
Guillot-Atlantic	Condensol	2V 34 R	34	135
Viessmann	Vitocrossal	300	24	122
Viessmann	Vitocrossal	300	32	125
Viessmann	Vitocrossal	300	44	155
Viessmann	Vitocrossal	300	60	160
Viessmann	Vitocrossal	300	80	253
Viessmann	Vitocrossal	300	105	258
Vaillant	Ecotop	VUW 286	22.4	49
Vaillant	Ecotop	VUW 286	27	48
Vaillant	Ecotop	VUW 286	25	40

Marque/fabri- cant	Nom	Modèle	Puissance 80/60 [kW]	Poids [kg]
Vaillant	Ecotop	VUW 286	44.1	45
Saunier-Duval	Isosplit Condens		24	55
Saunier-Duval	Isosplit Condens		30	59
Elcotherm	thision	10	9.2	52
Elcotherm	thision	13	12.1	52
Elcotherm	thision	17	16	52
Elcotherm	thision	21	20	52
Elcotherm	thision	25	23.9	52
Elcotherm	thision	30	28.4	62
Elcotherm	thision	35	33	62
Elcotherm	thision	40	37.7	62
Elcotherm	thision	45	42.4	62
Elcotherm	thision	50	47	62
Elcotherm	euron	hg12	11.3	31
Elcotherm	euron	hg 18	17.7	33
Elcotherm	euron	hg 24	22.8	35
Elcotherm	compact r	501	62	160
Elcotherm	compact r	502	80	175
Elcotherm	compact r	503	103	190

### Annexe 7: variables échangées entre le MTE et la routine de calcul de l'impact ACV

Nom	Unité	Explications
taille_moteur	kW	puissance électrique du moteur à gaz
taille_res_chauff	m <sup>3</sup>	taille du réservoir tampon pour le chauffage
taille_ballon	m <sup>3</sup>	taille du ballon d'ECS
taille_pac1	kW	puissance électrique de la PAC 1
Q_abs_UF_CCF	kWh	énergie absorbée sous forme de gaz naturel (PCI) par le moteur pour l'UF
el_achetee	kWh	énergie-électricité achetée au réseau pour l'UF
Q_th_UF_ccf_bat	kWh	énergie-chaleur fournie au bâtiment (chauffage + ECS) pour l'UF
H_util_pac_UF1	h	nombre d'heures d'utilisation de la PAC1 pour l'UF
Q_el_pac_UF1	kWh	énergie-électricité consommée par la PAC1 pour l'UF
Q_th_pac_UF1	kWh	énergie-chaleur fournie par la PAC1 pour l'UF
Q_abs_UF_chaud	kWh	énergie absorbée sous forme de gaz naturel par la chaudière pour l'UF
H_util_chaudiere_UF	h	nombre d'heures d'utilisation de la chaudière pour l'UF
COPA1		COP annuel de la PAC1
duree_ccf	h	nombre d'heures d'utilisation du moteur à gaz
taille_chaudiere	kW	puissance de la chaudière
chaleur_ccf	kWh	énergie chaleur produite par le moteur pour l'UF
elec_ccf	kWh	énergie-électricité produite par le moteur pour l'UF





## Annexe 8 : fonctions de coût d'investissement des différents systèmes

Les fonctions d'investissement des différents systèmes utilisés ici sont les suivantes :

- Pompe à chaleur (durée de vie: 40'000 heures)

$$\text{Coût}_{[e]} = 5247.5 * Q_{el}^{0.49} \quad [A.14]$$

Source : données fabricants (site internet de Hoval et Alphainnotec)

- Sonde et travaux de forage (durée de vie: 50 ans)

$$\text{Coût}_{[e]} = 7100 * Q_{el}^{0.74} \quad [A.15]$$

Source : données installateurs, communication privée, 09.05 (www.dalcalor.ch)

- Moteur à gaz de cogénération

$$\text{Coût}_{[e]} = 3872.5 * Q_{el}^{0.8322} + 125 * Q_{el}^{0.8} / 1.47 \quad [A.16]$$

$$\text{Coût}_{\text{maintenance}}_{[e]} = 0.0407 * Q_{el}^{-0.2058} \quad [A.17]$$

Source: LENI [Pelet X., 2004] et modèle Dachs de Senertec ( $Q_{el}=5.5$ ,  $\text{Coût}_{[e]}=16'000$ )

- Chaudière à gaz (annuel)

$$\text{Coût}_{[e]} = 110 * \text{actu\_stock} * Q_{th} + 1.6 * Q_{th} + 0.91 * \text{En} \quad [A.18]$$

où actu\_stock est le taux d'actualisation, En est l'énergie thermique fournie par la chaudière sur l'année en kWh

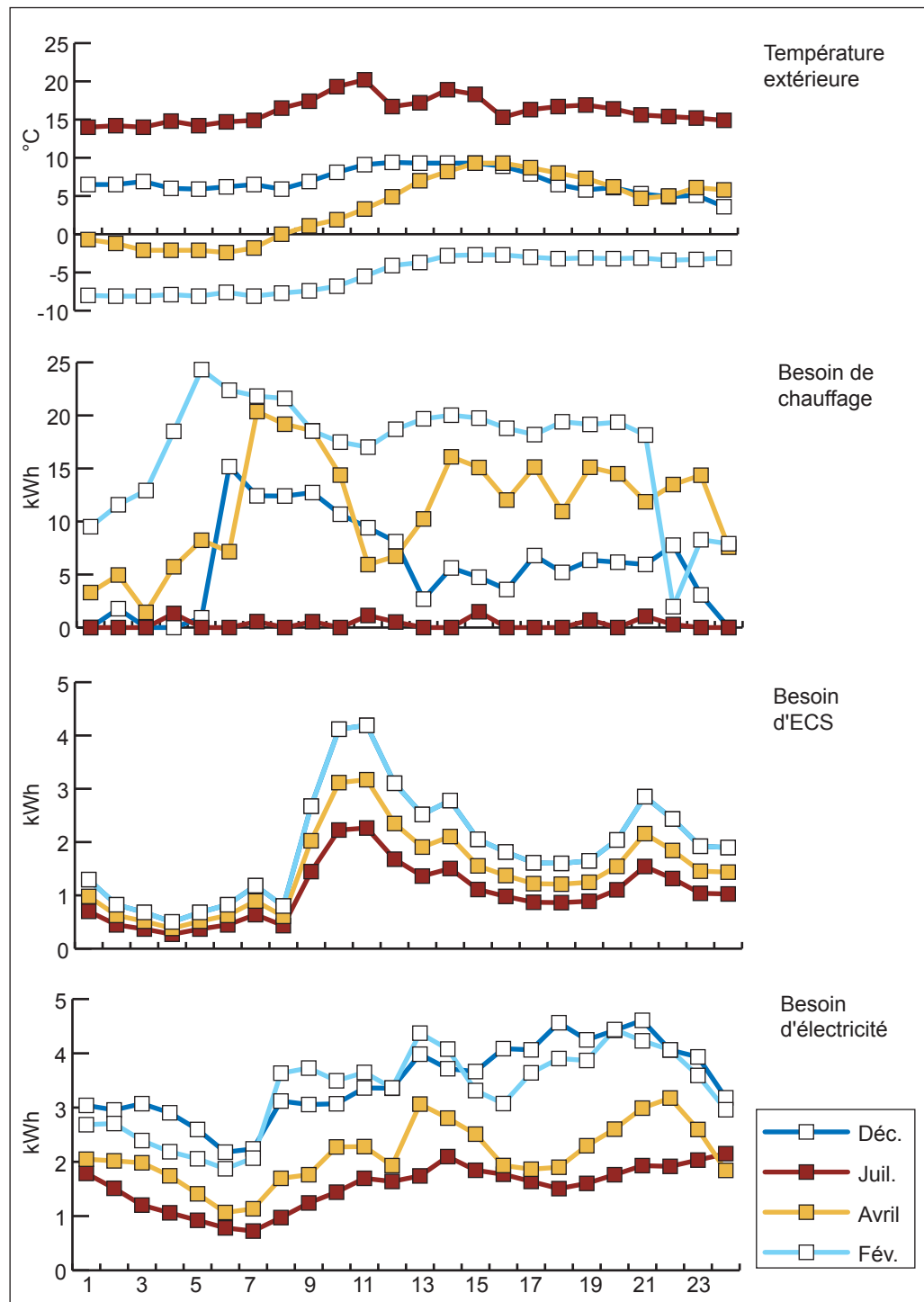
Source: LENI selon modèle [Karlsson-Gustavsson, 2002]



### Annexe 9: profils journaliers de consommation énergétique

Les profils de consommation d'ECS et de chauffage ont été obtenus de [Lopez, 2005]. Ils correspondent à une fraction d'un bâtiment *monitoré* en permanence dans la région de Martigny, soit 650 m<sup>2</sup>. Les données sources donnent les informations heure par heure, pour un jour par saison (fig. A7) et sont intégrés sur l'ensemble de l'année.

Les profils de consommation d'électricité de référence par habitant à disposition du LENI ont été combinés aux données de [Lopez, 2005], qui possédait le profil de consommation journalière. Les valeurs ont été multipliées pour correspondre au nombre d'habitants de ce bâtiment, à savoir approximativement 16 (fig. A7).



**Fig. A7:** profils journaliers monitorés heure par heure des besoins en électricité, en chauffage et en eau chaude sanitaire

Source des données: [Lopez, 2005]

## Annexe 10: paramètres de dimensionnement défini par le modèle thermo-économique

Tab. A7: paramètres pour la solution la moins chère de chaque de scénario issu de l'optimisation

	Unité	Scnr3	Scnr7	Scnr11	Scnr15	Scnr19	Scnr23	Scnr27
Demande chauffage	MWh	76.1						
Demande ECS	MWh	14						
Demande élec.	MWh	23						
Taille moteur	kW	3	0	3.02	3	0	0	0
Rend. électrique		0.31	0	0.31	0.31	0	0	0
Rend. thermique		0.69	0	0.62	0.62	0	0	0
GN consommé par moteur	kWh	70049	0	71619	71196	0	0	0
Utilisation moteur	h	7238	0	7340	7357	0	0	0
Chaleur totale fournie par CCF	kWh	483334	0	44404	44142	0	0	0
Elec produite par CCF	kWh	21715	0	22202	22071	0	0	0
Taille PAC	kWél	1	4.85	1	0	7.25	0	3.65
Utilisation PAC	h	4768	4455	4605	0	4206	0	4163
Elec consommée par PAC	kWh	4768	21617	4605	0	30492	0	15194
Chaleur fournie par PAC	kWh	23112	92919	16157	0	92914	0	92904
COP annuel		4.85	4.3	3.51	4	3.05	4	6.11
Taille BOILER	kW	13.55	0	18.55	22.98	0	19.65	0
GN consommé par BOILER	kWh	22155	0	37286	55449	0	103882	0
Chaleur fournie par BOILER	kWh	22155	0	33558	49905	0	93494	0
Cout total annuel	k€	10.88	10.61	11.73	10.91	12.95	9.37	8.99
Cout invest. annuel	k€	5.36	3.3	5.49	4.31	4.08	0.58	2.74
Cout GN annuel	k€	4.52	0	5.33	6.19	0	5.03	0
Cout élec achetée annuel	k€	1.02	7.31	0.93	0.56	8.87	3.76	6.26

	Unité	Scnr3	Scnr7	Scnr11	Scnr15	Scnr19	Scnr23	Scnr27
Cout élec ven- due annuel	k€	-0.01	0	-0.02	-0.15	0	0	0
Volume reser- voir chauffage	m3	1	1	1	1	1	1	1
Volume ECS	m3	1	1	1	1	1	1	1
Chaleur_ap- point_resistance	kWh	0	0	0	0	594.81	0	0

**Tab. A8:** paramètres pour la solution la plus chère de chaque scénario issu de l'optimisation

		Scnr3	Scnr7	Scnr11	Scnr15	Scnr19	Scnr23	Scnr27
Demande Chauffage	MWh	76.1						
Demande ECS	MWh	14						
Demande électricité	MWh	23						
Taille moteur	kW	3.15	0	9.14	14.53	0	0	0
rendement électrique		0.31	0	0.31	0.31	0	0	0
rendement thermique		0.69	0	0.62	0.62	0	0	0
GN consommée par moteur	kWh	73578	0	102628	151700	0	0	0
Duree utiliza- tion moteur	h	7230	0	3479	3236	0	0	0
Chaleur totale fournie par CCF	kWh	50769	0	63630	94054	0	0	0
Elec produite par CCF	kWh	22809	0	31815	47027	0	0	0
Taille PAC	kW él	4.95	7.29	6.07	0	10.15	0	4.71
Duree utiliza- tion PAC	h	1873	2940	1624	0	2996	0	3212
Elec consom- meee par PAC	kWh	9270	21446	9852	0	30410	0	15142
Chaleur four- nie par PAC	kWh	42902	92897	30503	0	93457	0	92898
COP annuel		4.63	4.33	3.1	4	3.07	4	6.13
Taille BOILER	kW	0	0	0	0	0	30.9	0
GN consommée par BOILER	kWh	0	0	0	0	0	103823	0

		Scnr3	Scnr7	Scnr11	Scnr15	Scnr19	Scnr23	Scnr27
Chaleur fournie par BOILER	kWh	0	0	0	0	0	93441	0
Cout total annuel(objectif)	k€	11.66	10.95	13.32	13.62	13.26	9.49	9.15
Cout investissement	k€							
Cout Gaz naturel	k€	3.62	0	5.05	7.47	0	5.03	0
Cout elec achetée	k€	1.54	7.28	0.16	0.16	8.75	3.76	6.25
Cout elec vendue	k€	0	0	0	1.46	0	0	0
Volume reser-voir chauffage	m3	1	1	1	1	1	1	1
Volume ECS	m3	1	1	1	1	1	1	1
chaleur_ap-point_resistance	kWh	0	0	0	0	0	0	0





### Annexe 11 : émissions directes issues de la combustion d'1 MJ de gaz naturel

*En moteur de cogénération*

Substances	Lieu d'émission	Quantité	Unité
Emissions to air			
Carbon dioxide, fossil	high. pop.	0.056	kg
Carbon monoxide, fossil	high. pop.	0.000048	kg
Dinitrogen monoxide	high. pop.	0.0000025	kg
Heat, waste	high. pop.	0.83	MJ
Methane, fossil	high. pop.	0.000023	kg
Nitrogen oxides	high. pop.	0.000015	kg
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	high. pop.	0.000002	kg
Particulates, < 2.5 um	high. pop.	0.00000015	kg
Platinum	high. pop.	7E-12	kg
Sulfur dioxide	high. pop.	0.00000055	kg

Source : Rapport Ecoinvent 1.1 [Heck, 2003]

*En chaudière modulante à condensation.*

Substances	Lieu d'émission	Quantité	Unité
Emissions to air			
Acetaldehyde	high. pop.	0.000000001	kg
Acetic acid	high. pop.	0.00000015	kg
Benzene	high. pop.	0.0000004	kg
Benzo(a)pyrene	high. pop.	1E-11	kg
Butane	high. pop.	0.0000007	kg
Carbon dioxide, fossil	high. pop.	0.056	kg
Carbon monoxide, fossil	high. pop.	0.0000059	kg
Dinitrogen monoxide	high. pop.	0.0000005	kg
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachloro- dibenzo-p-dioxin	high. pop.	3E-17	kg
Formaldehyde	high. pop.	0.0000001	kg
Heat, waste	high. pop.	1.11	MJ
Mercury	high. pop.	3E-11	kg
Methane, fossil	high. pop.	0.000002	kg
Nitrogen oxides	high. pop.	0.0000099	kg
PAH, polycyclic aro- matic hydrocarbons	high. pop.	0.00000001	kg
Particulates, < 2.5 um	high. pop.	0.0000001	kg
Pentane	high. pop.	0.0000012	kg
Propane	high. pop.	0.0000002	kg
Propionic acid	high. pop.	0.00000002	kg
Sulfur dioxide	high. pop.	0.0000005	kg
Toluene	high. pop.	0.0000002	kg

**Source :** Rapport Ecoinvent 1.1 [Faist Emmenegger, 2003]

