



Construction d'un éco-quartier à la Jonction

Mandat d'ingénieur conseil pour la
conception énergétique du site

Phase B : Etude détaillée



Version 1 / 14 avril 2010

Impressum

Donneur d'ordre VILLE DE GENEVE

Représenté par Mme Valérie Cerda
Département des constructions et de l'aménagement
Service de l'énergie
Rue du Stand 25
1204 Genève

Tél : 022 418 58 40
Fax : 022 418 58 51
Email : ene@ville-ge.ch

Mandataire AMSTEIN + WALTHERT SA
Rue Pécolat 1
CP 1044
CH-1211 Genève 1

Tél. 022 731 83 80
Fax 022 738 88 13

www.amstein-walthert.ch

Rédaction M. Pierre-Jean Duc
M. Romain Spaëth

Distribution Mme Valérie Cerda

Versions Version 1 14 avril 2010

Validation 14 avril 2010 Visa

Intitulé R100414duc1_Carre_Vert_phase_B.doc

Sommaire

Résumé 4

1	Contexte général.....	6
2	Périmètres de l'étude.....	7
2.1	Le projet « Carré Vert » de manière résumée.....	7
2.2	Le périmètre élargi intérieur de manière résumée	8
3	Qualité de l'air.....	10
4	Synthèse des besoins en énergie et en eau du site.....	12
4.1	Besoins énergétiques du périmètre restreint	12
5	Synthèse de l'approvisionnement en énergie.....	15
6	Variantes de production d'énergie.....	17
6.1	Hypothèses liées au programme architectural.....	17
6.2	Problématique des dépôts des musées.....	19
6.3	Récupération de chaleur sur les transformateurs SIG	20
6.4	Récupération sur les eaux usées	23
7	Analyse et comparaison des variantes.....	30
7.1	Analyse des variantes.....	30
7.2	Comparaison des variantes	34
7.3	Synthèse de l'évaluation des variantes	38
8	Conclusions et recommandations aux concepteurs	43
9	Annexes	44
9.1	Tableau de synthèse	44
9.2	Plan de réseaux eaux usées + conduites CAD.....	44
9.3	Schéma de principe des variantes 1 et 2.....	44
9.4	Schéma de principe des variantes 3 et 4.....	44
9.5	Schéma de principe des variantes 5 et 6.....	44

Résumé

La planification énergétique territoriale représente l'unique moyen de planifier et de déployer, au moment opportun, l'intégration des filières et l'optimisation des transformations au niveau des quartiers et des zones. C'est dans cette optique que le projet d'aménagement « Carré Vert », visant la réalisation sur l'ancien site « Artamis » d'un éco-quartier à énergie positive et approvisionnement 100% renouvelable, se devait d'être soumis à une étude systématique des opportunités à saisir en termes d'utilisation rationnelle de l'énergie et d'utilisation d'énergies renouvelables.

Ce travail a été réalisé en deux temps. Le premier volet était constitué par l'étude de faisabilité rendue en septembre 2009. Constituant le deuxième volet de ce travail, **la présente étude détaillée a pour objectifs :**

- La consolidation de l'estimation des besoins énergétiques du quartier ;
- l'étude approfondie des deux variantes retenues lors de la première phase (phase A, étude de faisabilité)
- l'identification de différentes combinaisons énergétiques possibles et la comparaison de ces solutions selon des critères techniques, environnementaux et économiques.

Les résultats du concours d'architecture mené en parallèle du premier volet de la présente étude ont permis d'apporter des précisions quant à l'implantation des différents bâtiments.

Dans la continuité des hypothèses retenues en première analyse, la puissance de chauffage nécessaire pour le quartier s'élève donc à 1'040 kW sur la base de l'adoption du standard Minergie. Cette puissance sera répartie sur 4 bâtiments avec pour puissance respective 400, 290, 240 et 110 kW. La consommation énergétique s'élève à 1'940 MWh pour l'ensemble des bâtiments.

Le dimensionnement des installations est basé sur une analyse mensuelle des déperditions des bâtiments, consommations d'eau chaude sanitaire et apports solaires thermiques. Les différents profils mensuels de consommation sont basés sur des projets Minergie de taille similaire.

Les variantes retenues suite à l'étude préliminaire de l'approvisionnement en énergie du site ont fait apparaître deux solutions principales :

- récupération de chaleur sur les transformateurs des SIG
- récupération de chaleur sur les eaux usées.

La variante pompe à chaleur sur l'eau du Rhône n'a pas été retenue lors de cette première phase en raison des avantages conséquents présentés par les deux solutions citées précédemment.

L'étude approfondie a rapidement montré, en accord avec une étude menée en parallèle par les SIG, que le potentiel de récupération sur les transformateurs sera nettement diminué après la rénovation de ce poste de transformation, rénovation prévue pour 2015.

La suite de l'étude s'est donc principalement portée sur la récupération de chaleur sur les eaux usées.

Afin de consolider le dimensionnement des installations techniques, une campagne de mesure a permis de déterminer avec précision l'évolution de la température, du débit et de la hauteur d'eau dans la conduite passant à proximité du Carré Vert. Ces analyses ont permis de déterminer les grandeurs caractéristiques de l'écoulement (température et débit minimum).

Sur la base de ces considérations, les variantes étudiées ont donc été :

- V1 : 50% de puissance eaux usées (85% des besoins), 50% de puissance gaz (15% des besoins) - variante de comparaison;
- V2 : 50% de puissance eaux usées (85% des besoins), 50% de puissance pompe à chaleur sur l'eau du Rhône (15% des besoins);
- V3 : 100% de puissance eaux usées

avec pour chaque variante une option ECS solaire.

Ces différentes variantes sont comparées à une variante 100% gaz servant de base de comparaison. A noter que la variante 1 faisant intervenir une source d'énergie non renouvelable ne répond pas au cahier des charges du projet.

Chaque solution a été analysée et comparée selon différents critères économiques, énergétiques et environnementaux.

De cette analyse, il ressort que la variante « 100 % PAC sur eaux usées », sans l'option solaire thermique, représente la solution la plus intéressante à ce stade de l'étude.

Le premier défi, consistant à imaginer une solution de production d'énergie à 100% renouvelable et zéro émission pour le site Carré Vert est donc gagné et ceci aux mêmes coûts qu'une solution gaz standard.

Toutefois il reste encore d'autres défis à relever pour tendre vers le quartier à énergie positive en passant par la maîtrise des besoins, l'éco construction et l'autonomie de la production de chaleur. Certains de ces défis pourraient être relevés grâce à l'intégration de champs de capteurs photovoltaïques.

1 Contexte général

Correspondant à l'ancien site « Artamis », le périmètre du projet « Carré Vert » occupe une position stratégique au centre ville de Genève. Site de la première usine à gaz municipale puis siège administratif des Services Industriels de Genève jusqu'en 1994, le périmètre a ensuite été occupé par des milieux associatifs et artistiques, jusqu'à son évacuation en 2008 suite à la découverte d'une pollution nécessitant une décontamination du site.

Conformément aux objectifs de la Ville, la reconstruction de ce périmètre s'inscrit aujourd'hui dans la volonté de réaliser un éco quartier : il s'agira, en prenant appui sur les expériences déjà menées en Europe dans ce domaine (Quartier Vauban, DE ; Freiburg-am-Brisgau, DE ; Hammarby-Sjostadt, Stockholm, SE ; BedZed, Beddington, UK ; BO01, Malmö, SE ; Kronsberg, Hanovre, DE), d'adapter les solutions urbanistiques et architecturales au contexte local, tout en prenant en compte le mode de vie des futurs habitants du point de vue de l'impact environnemental global du quartier.

Ce projet se veut donc une application concrète des notions du développement durable, les aspects économiques, sociaux et environnementaux devant être analysés sur l'ensemble de la durée de vie du projet. C'est donc avec un souci d'exemplarité au niveau de la gestion des mobilités, de la diversité des activités, de la mixité des espaces, des mixités sociales et générationnelles, de la qualité urbaine, architecturale et environnementale, de l'intégration du projet dans le quartier... que celui-ci devra être mis en œuvre.

Dans ce contexte, les questions d'énergie apparaissent comme un enjeu clé : à travers l'élaboration du concept énergétique dont elle assure le pilotage, la ville de Genève vise à faire de ce site un quartier à énergie positive, approvisionné à 100% par des énergies renouvelables. Pour y parvenir, les questions d'énergies doivent être prises en compte suffisamment tôt dans le déroulement du projet. Sachant que, conformément au cahier des charges du concours d'architecture, les bâtiments neufs devront être optimisés, une part importante du travail devra ici porter sur l'approvisionnement énergétique du site.

Afin d'éviter, dans ce domaine, le caractère irréversible de choix stratégiques erronés, il est nécessaire de procéder à une évaluation du potentiel énergétique du site (périmètre restreint) et de ses alentours (périmètre élargi). Cette évaluation doit notamment permettre de déterminer les besoins et les potentiels à disposition au niveau énergétique (infrastructures en place, changements et évolutions prévisibles, valorisation des rejets,...), d'évaluer les possibilités d'approvisionnement en énergie et d'exploitation des ressources renouvelables et, au final, d'établir un concept d'approvisionnement en énergie tant au niveau des productions qu'à celui des éventuels réseaux.

Les pistes proposées doivent tenir compte des spécificités du site et des interactions du plan d'aménagement avec son environnement et son voisinage afin que les solutions retenues se complètent de façon cohérente, tout en permettant d'atteindre l'objectif initial d'un quartier à énergie positive à l'approvisionnement 100% renouvelable.

Cette approche permet en particulier de déterminer les infrastructures découlant d'une telle stratégie énergétique et, le cas échéant, de planifier leur élaboration.

C'est dans ce contexte que le bureau Amstein + Walthert a été mandaté dans un 1^{er} temps pour la réalisation de l'étude de faisabilité représentant le premier volet (phase A) de la conception énergétique de ce site. La phase B (étude détaillée) présentée dans l'actuel rapport vise à approfondir les 2 solutions retenues à l'issue de la phase A, soit la récupération de chaleur sur les eaux usées et les récupérations de chaleur sur les transformateurs SIG.

2 Périmètres de l'étude

Pour rappel, les trois périmètres qui ont ainsi été identifiés lors de la phase A sont :

- Le périmètre restreint (en rouge sur la carte) correspond aux limites du projet d'aménagement, c'est à cette échelle que doit être pensé le quartier à énergie positive ainsi que l'approvisionnement 100% renouvelable.
- Le périmètre élargi intérieur (en jaune sur la carte) : la proximité au site de l'éco-quartier permet d'envisager quelques synergies et en particulier la valorisation d'éventuels surplus renouvelables pour l'approvisionnement de bâtiments d'importance situés au-delà des strictes limites du quartier.
- Le périmètre élargi extérieur (en bleu sur la carte) couvre l'ensemble de la presqu'île de la Jonction.

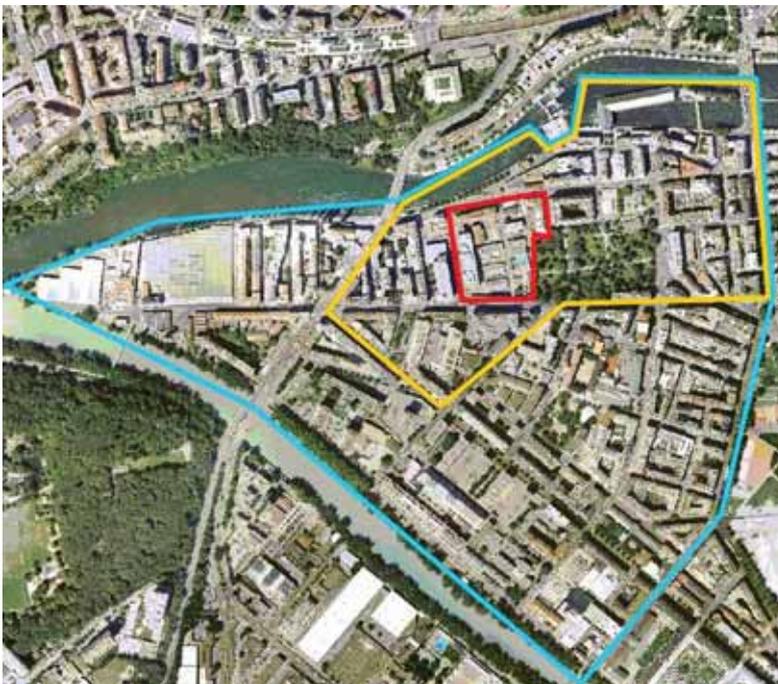


Figure 1– Identification du périmètre restreint (ligne rouge), du périmètre élargi intérieur (ligne jaune) et du périmètre élargi extérieur (ligne bleue)

2.1 Le projet « Carré Vert » de manière résumée

La localisation exacte ainsi que la forme des futurs bâtiments de cet éco-quartier n'étant pour l'heure pas encore définies, les évaluations présentées ci-après se basent principalement sur les surfaces et types d'affectations énoncés dans le cahier des charges du concours d'urbanisme et d'architecture actuellement en cours.

Les étapes et horizons temporels de construction des bâtiments présentés ici sont donc indicatifs :

Etape 1 : 5 ans, horizon 2014

- Parking souterrain : 10'000 m² SBP
- Dépôt pour la Ville de Genève. 10'400 m² SBP

Etape 2 : 6 ans, horizon 2015

- Logements (200 à 250) : 30'000 m² SBP
- Activités : 5'000 m² SBP

Etape 3 : 7 ans, horizon 2016

- Demi-groupe scolaire : 2'000 m² SBP
- Installations sportives : 1'300 m² SBP
- Salle de quartier : 150 m² SBP

En considérant que pour ce type d'affectation, la surface de référence énergétique (SRE) représente 100 % de la surface brute de plancher et que le parking n'est bien évidemment pas chauffé, les surfaces suivantes sont prévues par le projet « Carré Vert » au niveau du périmètre restreint :

	SRE
	m ²
Logements	30'000
Activités	5'000
Ecole et sport	3'300
Dépôts musées	10'400
Salle de quartier	150
Total	48'850

Tableau 1 - Surfaces de référence énergétique prévues par le projet « Carré Vert » au niveau du périmètre restreint.

2.2 Le périmètre élargi intérieur de manière résumée

Au terme de la phase A, il a été décidé que, compte tenu, d'une part, des distances qui séparent ces bâtiments du périmètre du futur éco-quartier et, d'autre part, de l'opportunité de traiter prioritairement le Sud de cette zone en synergie avec le secteur des Vernets (projet Praille-Acacias-Vernets), cette étude se concentrera sur le périmètre restreint.

Néanmoins, pour rappel, nous mentionnerons ci-dessous les sites les plus intéressants qui ont été mentionnés en phase A au niveau du périmètre élargi intérieur.

	SRE
	m ²
Administrations cantonales hors DCTI / DGAT	48'319
DCTI / DGAT	17'717
Patrimoine de la Ville de Genève :	
Palladium	6'020
Locaux administratifs	5'810
Logements : Rois 17	11'727
Logements : Puiserande 4	2'266
École	1'727
Total Ville de Genève	27'550
Hôtel de police	7'000
Nouveau bâtiment de bureaux MINERGIE	8'500
Total	109'086

Tableau 2 - Surfaces de référence énergétique existantes ou réalisées à court terme au niveau du périmètre élargi intérieur (restreint non compris).



Figure 2 – Identification des sites d'importance sur le périmètre élargi intérieur

- Réseau de chauffage à distance
- Administrations cantonales (sur le même CAD) :
 1. Service du cadastre A390
 2. Service cantonal de géologie A383
 3. Direction générale de la mobilité
 4. Hôtel des finances
 5. Salle de sport
 6. Bâtiment des forces motrices
- Patrimoine de la Ville de Genève :
 1. Ecole de Plantaporrêts
 2. Logements (Puiserande, 4)
 3. Palladium (Stand, 3)
 4. Locaux administratifs communaux (Stand, 25) : Département des finances et du logement ; des construction et de l'aménagement ; de l'environnement urbain et de la sécurité
 5. Logements (Rois, 17)
- Bâtiment DCTI / DGAT
- Hôtel de Police
- Transformateur SIG
- Bâtiment de bureaux MINERGIE

3 Qualité de l'air

Contexte légal :

Le respect de l'Ordonnance sur la Protection de l'Air (OPair) se base principalement sur les émissions de deux polluants déterminants, qui sont le dioxyde d'azote (NO₂) et les poussières fines (PM10).

- La valeur limite à long terme pour le NO₂ est de 30 [mg/m³].
- La valeur limite à long terme pour les PM10 est de 20 [mg/m³].

Le SCPA assure un suivi de la qualité de l'air dans le canton de Genève à partir d'un réseau de capteurs passifs de NO₂ et de stations équipées de moniteurs (stations ROPAG).

NO₂ :

La carte de concentration des émissions de dioxyde d'azote (moyenne annuelle 2008) présentée ci-dessous montre clairement un dépassement de la valeur limite tant au niveau du périmètre restreint que du périmètre élargi intérieur.

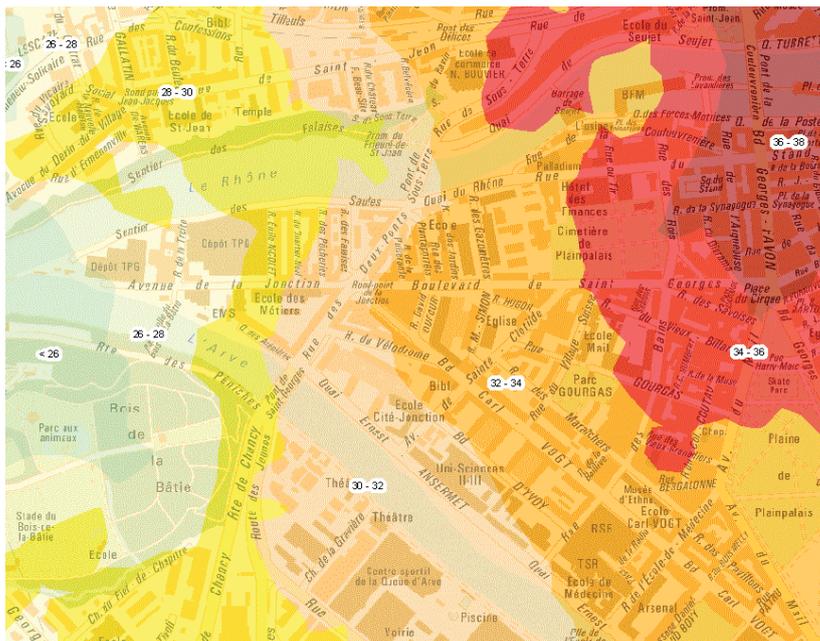


Figure 3: Concentration des émissions de dioxyde d'azote (NO₂) en moyenne annuelle 2008 au niveau du périmètre élargi (source : SITG)

PM10 :

Les chaudières à bois, malgré un bilan environnemental global excellent sont responsables d'une pollution directe importante, essentiellement sous forme de particules fines. Elles ne sont donc pas conseillées dans le canton de Genève, où l'on observe une pollution de l'air de plus en plus importante. Cela est valable spécialement en ville mais également de façon plus nuancée à la campagne où la pollution atmosphérique est également élevée. Cela ne signifie pas que l'usage du bois est interdit mais qu'il faudrait l'utiliser dans le cas où aucun autre vecteur moins émissif n'est envisageable ou par exemple pour se substituer de façon centralisée à de multiples petites installations bois peu efficaces.

Dans tous les cas, la chaudière à bois doit respecter les normes OPair 2012, ce qui implique généralement l'utilisation d'un catalyseur, d'un procédé de NOx et d'un filtre à particules. Ces différents systèmes de filtration entraînent des coûts et des besoins d'espace élevés, ce qui nous fait dire qu'une valorisation énergétique du bois est seulement envisageable dans une grosse installation centralisée.

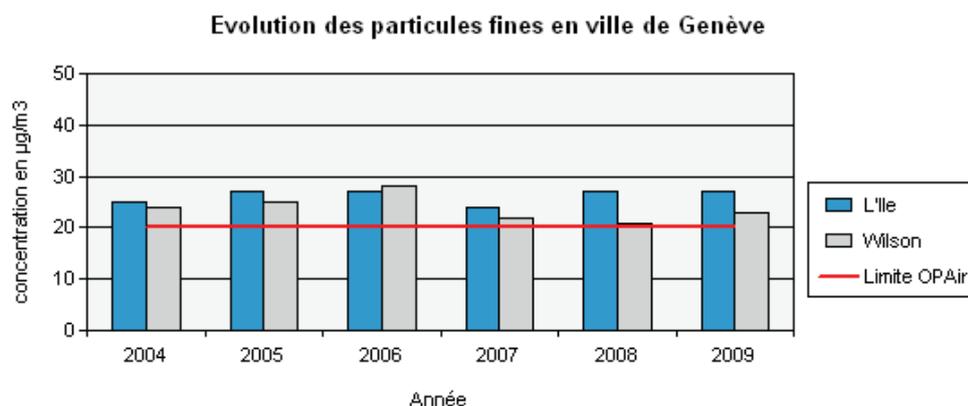


Figure 4 - Moyennes annuelles des PM10 en centre ville de Genève pour les dix dernières années (les moyennes de l'année en cours sont calculées sur les 365 derniers jours) (source : Service cantonal de protection de l'air).

Les concentrations moyennes annuelles de PM10 au centre ville de Genève montrent que les valeurs limites OPAir y sont continuellement dépassées. Sur le périmètre de Carré Vert (situé non loin du capteur du Pont de l'Ile), l'installation d'une chaudière à bois n'est donc pas la solution à privilégier dans la mesure où d'autres énergies renouvelables à plus faible impact environnemental peuvent être mises en place.

4 Synthèse des besoins en énergie et en eau du site

4.1 Besoins énergétiques du périmètre restreint

Nous ne reprendrons pas ici le détail des hypothèses posées dans le cadre de la phase A, mais nous nous bornerons à en rappeler les conclusions sur la base desquelles il avait été décidé de retenir pour l'analyse les valeurs MINERGIE.

De manière générale, nous ne considérons dans les tableaux qui suivent que les énergies utiles afin de pouvoir comparer les systèmes de production entre eux. Ce n'est que dans le cadre de l'évaluation des variantes de production que nous reviendrons en énergie finale. Une seule exception au niveau des besoins en froid qui sont transcrits en énergie électrique.

4.1.1 Besoins en énergie thermique du projet « Carré Vert » sur le périmètre restreint

En se basant sur des indices spécifiques, nous avons estimé les consommations du quartier et les puissances nécessaires pour les trois scénarios.

- Le respect des valeurs limites de la SIA 380/1 amène à une consommation d'énergie utile de 2'487 MWh/an et une puissance de 1'294 kW.
- En cas d'adoption du standard Minergie (*option retenue*), l'énergie utile nécessaire se verrait réduite à 1'938 MWh/an et la puissance à 1'021 kW.
- Le respect du standard Minergie P permettrait d'atteindre une consommation d'énergie utile de 1'558 MWh/an et de diminuer la puissance de plus d'un tiers par rapport à la base, pour atteindre 832 kW.

Le bilan pour le scénario MINERGIE retenu pour l'analyse est le suivant :

Minergie

	SRE	Chauffage	ECS	Total	Puissance	Puissance	Besoin thermique production de froid	Froid valoris. gratuit	Solde froid à fournir	Puissance thermique production froid
	[m2]	[MWh/an]	[MWh/an]	[MWh/an]	[kW]	[W/m2]	[MWh/an]	[MWh/an]	[MWh/an]	[kW]
Habitat collectif	30'000	565	625	1'190	700	23	0	0	0	0
Activités	5'150	120	36	156	111	22	0	0	0	0
Dépôts musées	10'400	345	14	360	90	9	360	0	360	140
Ecole	2'000	66	14	80	53	27	0	0	0	0
Install. sportives	1'300	44	108	152	66	51	0	0	0	0
Parking	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	48'850	1'140	797	1'938	1'021	21	360	0	360	140

Tableau 3 - Besoins thermiques (énergie utile) selon le scénario Minergie

4.1.2 Besoins en énergie électrique du projet « Carré Vert » sur le périmètre restreint

Nous nous sommes basés sur ces indices spécifiques électriques pour estimer les consommations du site et les puissances de production de froid éventuellement nécessaires pour les trois scénarios.

Les consommations d'électricité sont les suivantes :

- Respect de la norme SIA 380/4 : 2'353 MWh/an.
- Adoption du standard Minergie : 1'846 MWh/an.
- Adoption du standard Minergie P : 1'710 MWh/an.

Il est à noter que les besoins en électricité pour la climatisation sont basés sur une production de froid par machine à compression d'un COP de 4 (valeur issue des calculs détaillés des besoins des dépôts des musées).

Le bilan pour le scénario MINERGIE retenu pour l'analyse est le suivant :

Minergie

	SBP	Eclairage	Ventilation	Climatisation	Equipements	Techniques diverses	Total	Puissance électrique production froid
	[m2]	[MWh/an]	[MWh/an]	[MWh/an]	[MWh/an]	[MWh/an]	[MWh/an]	[kW]
Habitat collectif	30'000	578	70	0	558	42	1'248	0
Activités	5'150	72	19	0	60	6	157	0
Dépôts musées	10'400	121	39	90	49	12	311	35
Ecole	2'000	23	16	0	9	3	51	0
Install. sportives	1'300	17	9	0	1	2	29	0
Parking	10'000	38	10	0	0	3	50	0
Total	58'850	848	163	90	678	67	1'846	35

Tableau 4 - Besoins électriques des bâtiments selon le scénario MINERGIE

4.1.3 Synthèse des besoins thermiques et électriques du projet « Carré Vert » sur le périmètre restreint

*Etant donné la volonté de faire du « Carré Vert » un quartier exemplaire, il a semblé logique de retenir, pour la suite des évaluations, la **variante Minergie**. C'est cette variante qui servira de base pour la comparaison et le dimensionnement des variantes de production de chaleur.*

En pratique, le site aura un certain nombre de bâtiments de type Minergie P. L'analyse des potentiels valorisables permettra également d'évaluer si une contrainte plus forte au niveau des standards du site pourrait permettre d'en assurer l'autarcie énergétique.

4.1.4 Besoins en eau du projet « Carré Vert » sur le périmètre restreint

Sur la base du nombre d'occupants et des consommations spécifiques selon VSSH (besoin moyen et confort moyen), on peut estimer les consommations des nouvelles constructions du « Carré Vert » à 47'074 m³.

4.1.5 Evolution des besoins selon le phasage des constructions

Si l'on aborde l'évolution des besoins du « Carré Vert » sous l'aspect du phasage des constructions, soit, en première estimation, une réalisation par étape qui pourrait se réaliser de la manière suivante :

- étape 1 (mise en service horizon 2014) : dépôts musées et parkings souterrains (sous-sol),
- étape 2 (mise en service horizon 2015) : habitat collectif et activités,
- étape 3 (mise en service horizon 2016): école, salle de sport et maison de quartier.

La variation des besoins peut être représentée de la manière suivante :

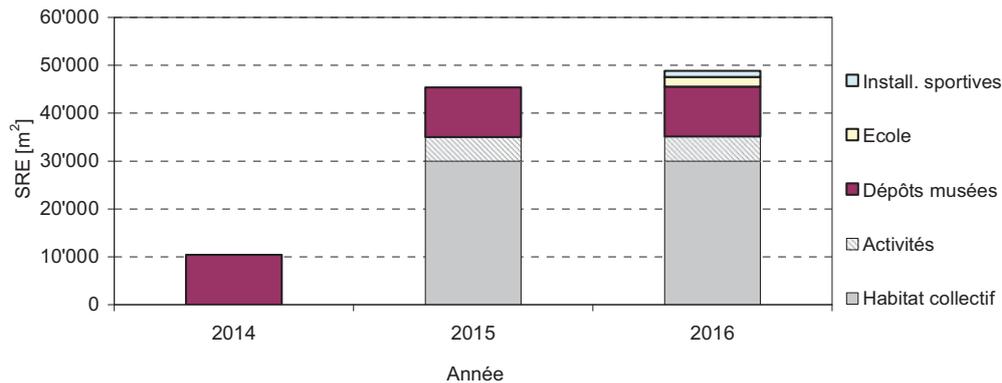


Figure 5 – Evolution des surfaces de références énergétiques (SRE) en fonction du phasage des nouvelles constructions (hors existant).

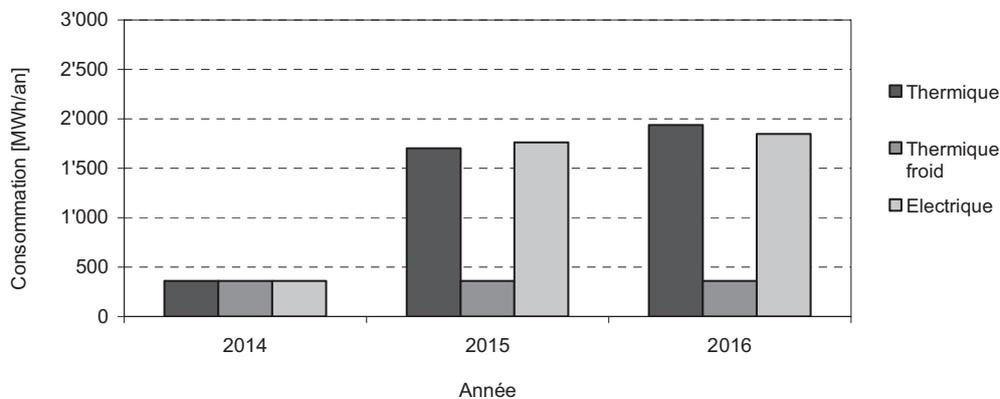


Figure 6 – Evolution des consommations et des puissances en fonction du phasage des nouvelles constructions (hors existant) pour l'orientation Minergie (les besoins thermiques froid sont donnés à titre indicatif et sont déjà compris dans les besoins électriques).

Au vu des graphiques qui précèdent, il apparaît clairement que la réalisation des logements représente une étape clef en termes de planification des infrastructures énergétiques.

5 Synthèse de l'approvisionnement en énergie

L'analyse détaillée (phase A) des différents agents énergétiques et des productions liées a permis, dans le cas des contraintes particulières au site du « Carré vert » (périmètre restreint, fortes densités, centre ville, objectifs de quartier à énergie positive et approvisionnement 100% renouvelable), de tirer les conclusions suivantes :

	Avantages	Inconvénients	Pertinence pour le Carré Vert
Mazout		Energie fossile Émissions polluantes locales	Non
Gaz	Impact environnemental inférieur au mazout	Energie fossile Émissions polluantes locales	Non
Biomasse	Renouvelable Valorisation ressources locales Neutralité CO2	Livraison et stockage Echelle des installations Emissions polluantes locales	Non
Solaire thermique	Renouvelable Coût Couverture des besoins ECS	Ombrages éventuels sur le site	Oui, à approfondir
Solaire PV	Renouvelable Production d'électricité décentralisée Revente électricité au coût de revient	Coût installation Concurrence avec solaire thermique Ombrages éventuels sur le site	Oui, à approfondir
PAC sol-eau (sondes verticales)	Valorisation de renouvelable Important potentiel local	Nombreuses constructions en sous-sol Absence de besoins de froid haute température	Non
PAC eau-eau nappe	Valorisation de renouvelable Nappe phréatique sur site	Faible potentiel énergétique	Non
PAC eau-eau Rhône	Valorisation de renouvelable Proximité du Rhône Potentiel important	Mollusques Variabilité des températures du Rhône	Oui, à approfondir
PAC air-eau	Valorisation de renouvelable Faible coût de réalisation et entretien	Faible coefficient de performance en hiver	Oui, à approfondir pour cas spécifiques
PAC-CCF	Production d'électricité décentralisée Source renouvelable envisageable Valorisation CAD existant	Actuellement basé sur source fossile	Non, mais à étudier au niveau du périmètre élargi

Récupération de chaleur sur eaux usées	Technique simple et maîtrisée Collecteur sur site Potentiel important Collecteur à remplacer	Problèmes de température pour traitement STEP	Oui, à approfondir
Récupération de chaleur sur transformateurs SIG	Proximité au site Potentiel très important	Renouvellement des transformateurs. : diminution éventuelle du potentiel énergétique	Oui, à approfondir
Eolien	Possibilité de participation à des projets sur d'autres sites Garantie d'approvisionnement en électricité. renouvelable	Absence de potentiel sur site	Oui, mais hors étude
Hydro-électricité	Proximité du Rhône	Potentiel entièrement valorisé	Non

Lors de la première phase de l'étude, ces variantes ont été comparées et analysées selon les axes suivants :

- Investissement total pour la production de chaleur et de froid : « investissement global »
- Coût du MWh chaud froid confondus : « coût du MWh th. »
- Emissions de CO₂ locales : « CO₂ »
- Impact environnemental (basé sur les Ecopoints) : « impact environnemental »
- Taux de production à base d'énergies renouvelables / indigène : « énergies renouv./indigène »
- Sécurité d'approvisionnement : « sécurité d'appro. »
- Possibilité de valoriser l'image du système : « image du système »

Sur la base de ces points de comparaison, ce sont les options « récupération de chaleur sur eaux usées » ainsi que « récupération de chaleur sur transformateurs SIG » - associées ou non à une installation solaire thermique - qui sont ressorties comme devant être étudiées de manière plus détaillée.

6 Variantes de production d'énergie

6.1 Hypothèses liées au programme architectural

La présente étude a été réalisée en grande partie en parallèle du concours d'architecture ne permettant pas d'avoir des informations précises à propos de l'implantation des bâtiments et sous-sols sur le site.

Afin de pouvoir comparer les différentes variantes de production d'énergie, nous avons donc formulé un certain nombre d'hypothèses cohérentes avec le cahier des charges du concours d'architecture.

Ces hypothèses auront une influence directe sur les dimensionnements techniques et sur le coût des installations.

6.1.1 Répartition des locaux et surface

En se basant sur les premières informations fournies par le lauréat du concours d'architecture, nous avons considéré les éléments suivants :

Le programme architectural prévoyant de grandes surfaces de dépôt pour les musées ainsi qu'un certain nombre de places de parking et de locaux annexes (caves, poussettes), la quasi totalité du site reposera sur des sous-sols. Les différents réseaux hydrauliques pourront donc transiter dans ces sous-sols sans avoir à prévoir d'opérations particulières de terrassement.

Par ailleurs ces sous-sols accueilleront les chaufferies et sous-stations techniques de chaque bâtiment.



Figure 7 – Ebauche des sous-sols (lauréat concours architecture).

Les locaux destinés au logement, activité et demi-groupe scolaire se répartissent en 4 bâtiments de taille diverse.

Les puissances nécessaires pour chaque bâtiment ont été estimées sur la base d'un rapport de surface.

Les puissances en jeu sont :

- Bâtiment A : 400 kW
- Bâtiment B : 290 kW

- Bâtiment C : 210 kW
- Bâtiment D : 110 kW



Figure 8 – Plan de quartier et bâtiments prévus.

6.1.2 Profil mensuel de consommation d'énergie

Afin de calculer au plus juste les consommations énergétiques des différents bâtiments du site et les rendements des composants techniques, nous nous sommes basés sur une analyse mensuelle des besoins et apports d'énergie.

Voici le profil mensuel de consommation énergétique pour le site Carré Vert.

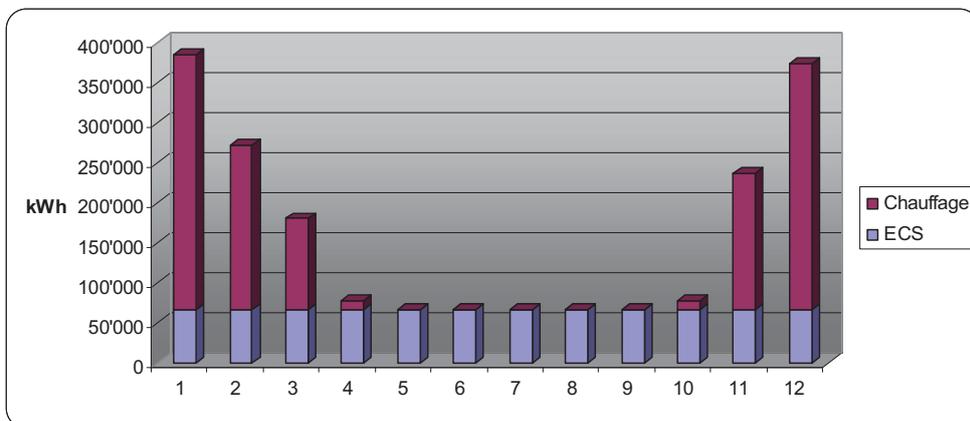


Figure 9 – Profil type de consommation énergétique d'un bâtiment Minergie.

Chacune des variantes de production d'énergie définie plus loin sera enrichie d'une option solaire pour la production de l'eau chaude sanitaire.

Voici le profil mensuel des apports solaires pour le site Carré Vert (1m² de capteur par personne).

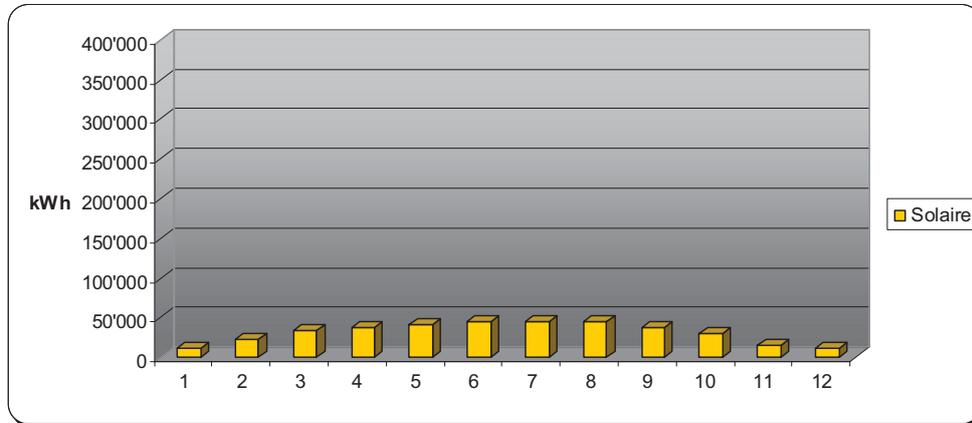


Figure 10– Profil type d'apport solaire pour le préchauffage de l'ECS.

6.2 Problématique des dépôts des musées

Le projet « Carré vert » prévoit l'aménagement de dépôts pour la Ville. Ces dépôts, d'une surface de 10'400 m² SBP sont destinés au stockage de diverses pièces de musées (art et d'histoire, ethnographie, histoire naturelle).

Ces dépôts renferment des pièces très sensibles aux conditions climatiques (luminosité, température et humidité) et un maximum de précautions doit être pris afin de garantir leur conservation.

A ce titre, la ventilation dans les dépôts des musées est critique. Elle est nécessaire pour assurer un renouvellement minimum d'air et doit par ailleurs garantir une bonne conservation des collections.

6.2.1 Les différents besoins des dépôts des musées

Après analyse des différentes conditions ambiantes demandées par Mr Kilian Anheuser, conservateur des laboratoires et ateliers de restauration, 2 niveaux d'exigence de la qualité de l'air dans les dépôts du musée ont pu être identifiés.

Le premier niveau d'exigence regroupe des conditions ambiantes standards à moyennement fortes (typiquement, 20°C / 50%_{Hr} ou 17°C / 50%_{Hr}). Le débit d'air neuf pour ce premier niveau d'exigence est d'environ 9'000 m³/h.

Le deuxième niveau regroupe des exigences fortes à très fortes (13°C / 50%_{Hr} à 13°C / 35%_{Hr}). Le débit d'air neuf à prendre en compte est de l'ordre de 1600 m³/h. Pour les petits locaux (typiquement anthropologie, 60 m²) les débits de ventilation ont volontairement été augmentés afin de garantir une certaine autorité de la ventilation. Avec des débits de ventilation plus faibles, la seule présence d'une personne dans ces petits dépôts ferait rapidement augmenter le taux d'humidité.

6.2.2 Choix du système de contrôle de l'ambiance

Pour limiter au maximum les dépenses énergétiques liées à la ventilation des dépôts, celle-ci sera assurée par deux monoblocs double flux avec un rendement de récupération de 70 %.

Afin de garantir les deux niveaux d'exigence, l'air neuf doit être fortement refroidi pour être déshumidifié avant d'être réchauffé à la température voulue.

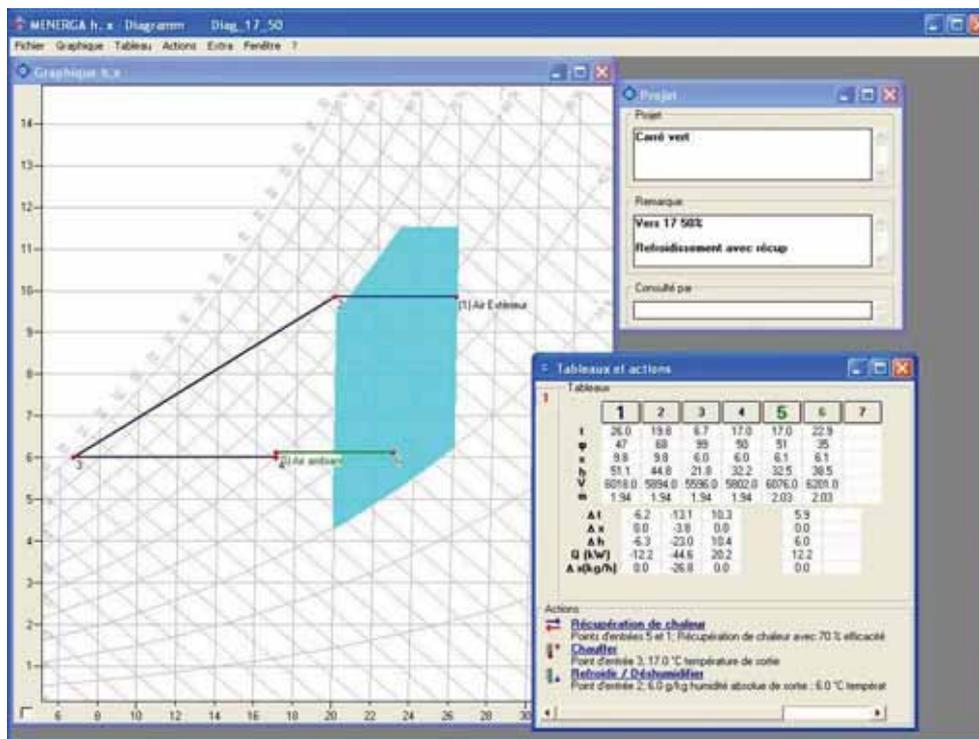


Figure 11 – Diagramme enthalpique (26°C/47%hr vers 17°C/50%hr)

Les niveaux de température de refroidissement (respectivement 6°C et -2°C) ne peuvent pas être atteints en utilisant des énergies renouvelables (géo-cooling par exemple). L'utilisation d'une machine à compresseur est donc inévitable.

6.2.3 Optimisation de la production de froid

Il est prévu d'équiper les dépôts de deux machines frigorifiques distinctes, chacune étant adaptée au niveau de température requis par les deux niveaux d'exigence. Le coefficient de performance (ESEER, European Seasonal Energy Efficiency Ratio pour les machines produisant du froid) sera ainsi optimisé.

Par ailleurs, toujours dans un souci de récupération maximum de l'énergie, il conviendra de valoriser au maximum les rejets thermiques de ces groupes frigorifiques (appoints de chaleur pour ECS par exemple).

A ce niveau de l'étude ces possibilités de récupération n'ont pas été prises en compte dans le bilan global du site.

6.3 Récupération de chaleur sur les transformateurs SIG

Lors de la première phase de l'étude, les mesures faites sur site ont montré un important potentiel de récupération, dans tous les cas supérieur aux besoins du Carré Vert.

Toutefois ces transformateurs haute tension / moyenne tension étant âgés de plusieurs dizaines d'années, les SIG envisagent, à juste titre, de rénover ces postes de transformation. Dans la suite de l'étude il sera donc important de prendre en compte cette rénovation afin d'assurer le caractère « durable » de cette ressource.

Nous nous baserons sur des données techniques de poste de transformation de caractéristiques similaires. Toutefois, ces données ayant un caractère confidentiel, il nous sera impossible de donner des informations précises.

6.3.1 Concept

Lors de la transformation de 130'000 V à 18'000 V, diverses pertes (cuivre, fer...) apparaissent dans les transformateurs faisant augmenter la température interne des appareils. Afin de garantir le bon fonctionnement des appareils, une circulation d'huile permet de refroidir les organes des transformateurs.

L'échauffement du cuivre au point le plus chaud est d'environ 78°C avec un échauffement moyen de 65°C. La température maximum de l'huile de refroidissement est de 60 °C.

Cette huile cède ensuite ses calories à un autre fluide via un échangeur de chaleur. Les types d'échange les plus courants sont :

- échange huile-eau (type OFWF, ONWF)
- échange huile-air (type OFAF)

Les transformateurs existants sont équipés d'échangeurs huile-eau. Le fluide secondaire (eau) est ensuite refroidi par un échangeur qui plonge directement dans le Rhône.

Au travers d'un échangeur de même type, il est possible de récupérer l'énergie dissipée par les transformateurs et de la distribuer au travers d'un circuit de chauffage à distance.

Un by-pass vers l'échangeur de chaleur situé dans le Rhône permet le refroidissement des transformateurs en été (pas de demande de chauffage au niveau du site du Carré Vert).

6.3.2 Hypothèses

- **Niveau de température**

Etant donné le niveau de température maximum dans les nouveaux transformateurs et afin de limiter les risques de surchauffe, le régime de température de l'huile sera de 45-50°C.

Après cet échangeur huile-eau, nous disposons donc d'une température d'eau dans le circuit CAD de 48 °C environ.

Ce régime de température permet sans autre d'assurer le chauffage des bâtiments (de préférence chauffage à basse température de type plancher chauffant). Toutefois il faut prévoir un appoint pour assurer le chauffage de l'eau chaude sanitaire.

- **Puissance disponible**

La puissance disponible est directement liée aux pertes cuivre et fer des transformateurs.

Voici les informations données par le constructeur pour un transformateur d'une puissance de 40 MVA:

- Pertes fer : 17 kW (pertes constantes)
- Pertes cuivre en fonction de la charge du transformateur :
 - o Charge de 25 % : 12 kW

- Charge de 50 % : 35 kW
- Charge de 75 % : 70 kW
- Charge de 100 % : 120 kW

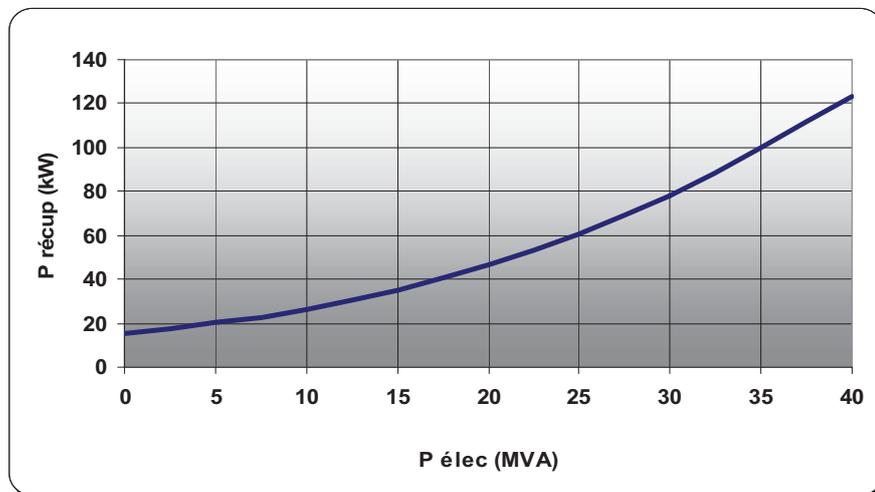


Figure 12 – Courbe caractéristique des pertes cuivre et fer pour un transformateur 40 MVA

A ce jour, la centrale de transformation se compose de 6 transformateurs de 30 MVA. Lors des relevés faits sur place (août 2009), le taux de charge moyen des transformateurs était d'environ 30 %, soit une puissance totale d'environ 55 MVA.

Nous n'avons pas pu obtenir de relevé annuel de consommation des transformateurs. Toutefois nous pouvons estimer que cette puissance ne varie pas dans une grande mesure au cours de l'année. En effet les besoins des industries sont à peu près constants toute l'année, de même pour les besoins en éclairage tous types confondus. Les consommations hivernales pour le chauffage peuvent être compensées, dans une certaine mesure, par les consommations liées à la climatisation.

Sur la base de ce qui précède on peut donc estimer que la puissance disponible avec la récupération de chaleur sur les transformateurs HT/MT des SIG restera limitée aux environs de 150 kW.

6.3.3 Synthèse

Lors des relevés effectués sur site, la récupération de chaleur sur les transformateurs des SIG a permis de mettre en avant une importante source de chaleur à valoriser.

Toutefois, le remplacement probable de ces transformateurs par des modèles plus récents limite fortement l'intérêt de cette ressource sur le long terme dans le cadre du projet Carré vert au vu des puissances en jeu et du rendement des nouveaux transformateurs. Cette évaluation a été confirmée par l'étude menée à ce propos par les SIG.

Cette ressource représente tout de même un important potentiel à valoriser dans le cadre d'un projet de moindre envergure que le site du Carré Vert.

6.4 Récupération sur les eaux usées

Parallèlement à la présente étude, les SIG ont mené une analyse afin de cerner la faisabilité et d'évaluer les impacts de la solution « Récupération sur les Eaux usées » sur l'ensemble du processus de traitement des eaux usées. Certains éléments présents ci-après sont repris de cette étude.

6.4.1 Concept général

Un important collecteur d'eaux mélangées passe à proximité du quartier du Carré Vert, entre le Rhône et la rue du Stand. Il recueille une grande quantité des eaux usées et pluviales du centre de Genève.

Ce collecteur mesure environ 2.2 m de diamètre et est potentiellement exploitable sur une longueur de 170m. Sa date de construction remonte à 1885. Toutefois ce collecteur est en bon état et ne nécessite pas de réhabilitation particulière. Il peut donc recevoir un échangeur de chaleur sans prévoir de lourds travaux de génie civil.

Cet échangeur de chaleur placé au fond de la conduite peut être couplé à une ou plusieurs pompes à chaleur permettant ainsi de valoriser l'énergie contenue dans les eaux usées.

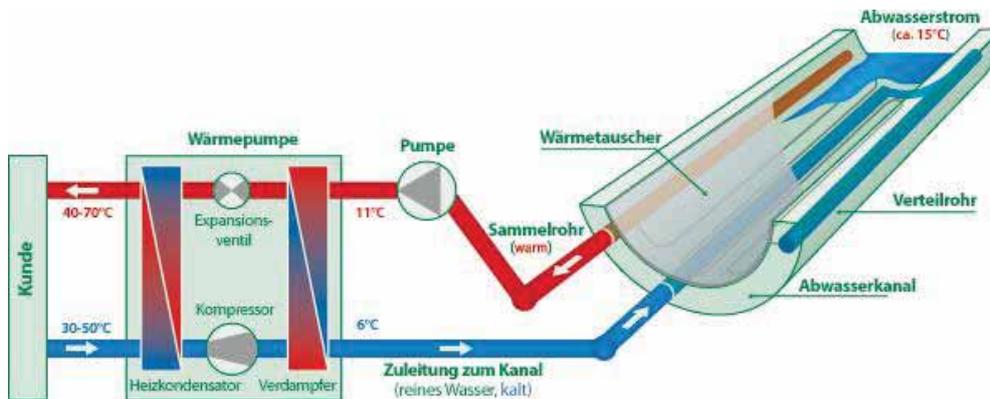


Figure 13 – Schéma de principe de la récupération de chaleur sur les eaux usées

Le système peut être adapté sur des canalisations existantes ou directement intégré dans des conduites neuves.

Dans le cadre ce projet, il a été préféré de mettre en place une solution de production d'énergie décentralisée. En effet, les besoins de chauffage et production d'ECS faisant appel à des régimes de température différent, cela permet d'optimiser les rendements des différentes PAC et de diminuer les déperditions dans les conduites de chauffage à distance.

Selon les niveaux de température des eaux usées (ou mélangées) et la longueur de l'échangeur, il peut s'avérer nécessaire de mettre en place une énergie d'appoint. Afin d'optimiser au maximum la récupération sur les eaux usées, cette énergie d'appoint sera utilisée pour relever la température d'eau dans la boucle primaire d'échange afin d'être exploitable par les pompes à chaleur avec un bon rendement de fonctionnement.

6.4.2 Relevés de température et analyse

Le collecteur passant à proximité cartier du Carré Vert, récolte les eaux usées du centre ville ainsi qu'une partie des eaux pluviales. Afin de valider le potentiel de récupération, une campagne de mesure a été menée sur ce collecteur du 24/09/2009 au 21/01/2010. Cette campagne de mesure est riche d'enseignement

d'autant plus que l'hiver a été rigoureux et les précipitations (pluie et neige) importantes.

Plusieurs grandeurs ont été mesurées afin de quantifier l'impact des eaux pluviales sur la récupération de chaleur: température, débit et hauteur d'eau. Le pas d'acquisition des données est de 5 minutes permettant ainsi d'avoir une grande précision sur l'évolution des différentes grandeurs mesurées.

- **Etude du profil journalier de débit et de température**



Figure 14 – Evolution de température et de débit hors précipitation – 25/09/2009

Lors d'une journée sans précipitation, la température et les débits des eaux usées évoluent de la même manière avec les pics prévisibles du matin, du midi et du soir, moment où nous avons les principaux soutirages d'eau chaude sanitaire. Le débit moyen se situe aux alentours de 375 l/s.

Ces profils de température et débit – sans précipitation – restent sensiblement identiques tout au long de l'année. On observera seulement un léger décalage de la température des EU, les débits restant sensiblement les mêmes.

Les pics de consommation correspondent donc en bonne partie aux pics de puissance disponible. Il conviendra donc d'optimiser le fonctionnement des installations afin de profiter des pics de puissance ou dans tous les cas de limiter les gros appels de puissance entre minuit et 8h du matin.

- **Impact des eaux pluviales sur la température et le débit des EU**

Dans le cas de précipitations importantes, on note une forte augmentation des débits et en même temps une nette diminution de la température des eaux usées.

Dès la fin de l'épisode pluvieux la température des eaux usées revient alors à son niveau de température précédent.



Figure 15 – Evolution des températures et des débits avec précipitation – 15/11/2009

A l'échelle de la journée, l'influence des eaux pluviales semble donc relativement limitée en dehors du pic de débit puisqu'on n'observe pas de baisse durable de température.

Toutefois, les pluies et certainement la température extérieure ont une influence sur l'évolution mensuelle de la température des eaux usées.

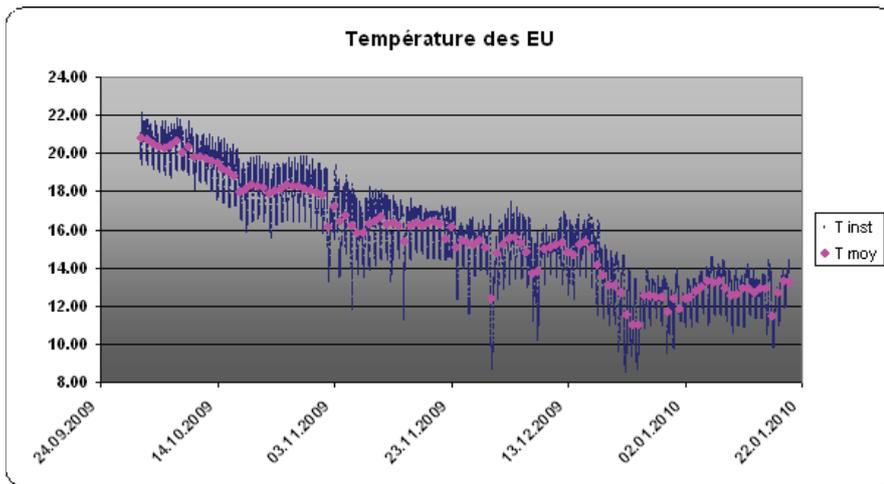


Figure 16 – Profil de température – 01/10/2009 _ 21/01/2010

La température moyenne diminue lentement jusqu'à la fin décembre pour se stabiliser aux alentours de 13°C sur le mois de janvier. La température ne descend que très rarement en dessous de 12°C. Le COP des pompes à chaleur pourra donc être optimisé en profitant d'une source de chaleur à relativement haute température.

- **Comparaison entre température des EU et température du Rhône**

Il est intéressant de comparer les valeurs de température des eaux usées et de l'eau du Rhône. Les relevés de température sur l'eau du Rhône ont été effectués par la plateforme de suivi Environnemental du Rhône et de l'Arve Genevois.

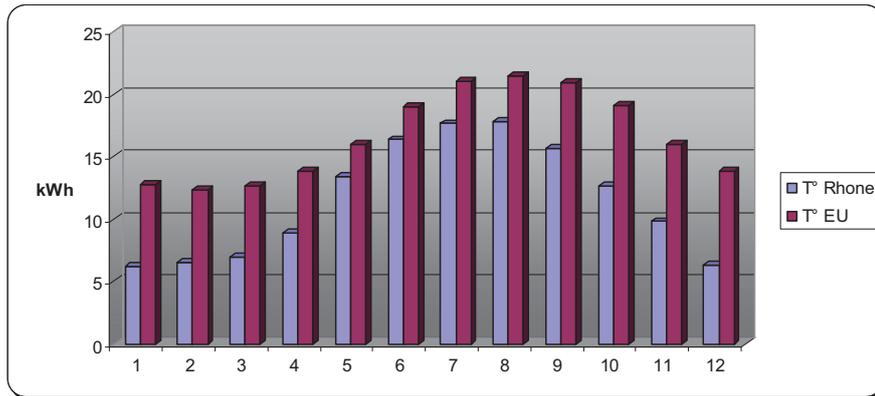


Figure 17 – Comparaison des températures moyennes mensuelles du Rhône et des EU.

On observe une nette différence de température moyenne mensuelle entre les deux sources, particulièrement les mois d'hiver et malgré l'influence des eaux pluviales qui se retrouvent dans le collecteur des EU.

Cela permet de confirmer l'importance du potentiel énergétique contenu dans les eaux usées comparé à une source d'origine naturelle telle que le Rhône.

6.4.3 Problématiques à considérer

Afin de garantir le bon dimensionnement et bon fonctionnement des différentes installations (STEP, pompes à chaleur, ...), il convient de prendre en considération un certain nombre d'éléments :

- **Puissance et rendement d'un échangeur de chaleur**

La relation entre le rendement d'un échangeur de chaleur et la longueur installée dans les canalisations n'est pas linéaire.

En effet dans le cas du Carré Vert, un premier dimensionnement permet d'estimer à 48m la longueur d'un échangeur pour couvrir une puissance de 500 kW et à 120 m pour couvrir une puissance de 1'000 kW.

Plus la puissance demandée est importante et plus le rendement baisse. Ceci est dû en partie au refroidissement des eaux usées directement en contact avec l'échangeur (flux laminaire). Nous verrons plus loin que sur la totalité de l'écoulement, le refroidissement reste faible.

Par ailleurs, on sait que dans le cas de bâtiments Minergie, 50% de la puissance permet de couvrir près de 85% des besoins énergétiques du site. La totalité de la puissance étant utilisée très rarement grâce à une forte isolation et une forte inertie des bâtiments.

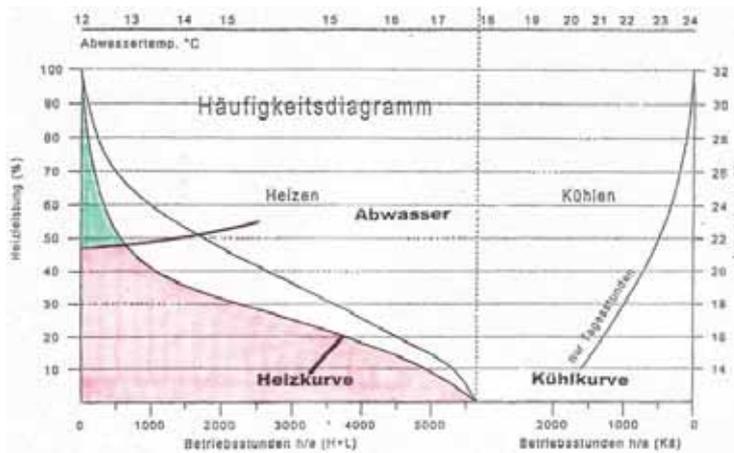


Figure 18 – Courbe caractéristique d'un échangeur sur les eaux usées.

Compte tenu de ces deux éléments, une solution mettant en œuvre une puissance de 50% sur les eaux usées et 50% sur un autre vecteur énergétique permettrait donc d'optimiser le rendement de la récupération de chaleur sur les eaux usées. Cette réflexion sera affinée dans l'analyse des différentes variantes.

- **Encrassement de l'échangeur**

De par les éléments circulant dans les conduites d'eaux usées, un dépôt de biofilm se crée sur les parois de la conduite et de l'échangeur (colonisation par les bactéries). Cette couche de biofilm limite les échanges thermiques entre l'échangeur et les eaux usées pouvant faire baisser les rendements de récupération de plus de 50%.

Cette couche de biofilm se crée relativement rapidement (3-4 semaines). Pourtant, il est difficilement imaginable de devoir nettoyer cet échangeur aussi régulièrement.

Pour limiter ce développement, la société Rabtherm a breveté un système utilisant des bandes cuivre placées sur l'échangeur, perpendiculairement à l'écoulement. Le cuivre ayant des propriétés bactériostatiques, le rendement de l'échangeur ne diminue plus que dans une faible mesure (baisse maximale de rendement de 20% après plusieurs mois).



Figure 19 – Bandes de cuivre limitant la formation du biofilm.

- **Modifications des réseaux en amont du Carré Vert**

La mise en œuvre de certaines modifications de réseau en amont du collecteur à court ou moyen terme pourrait faire diminuer le rendement des installations au niveau du Carré Vert.

Parmi les facteurs de réduction, on peut citer :

- des modifications du réseau en amont avec une diminution de la part des eaux usées dans les collecteurs (passage en séparatif) et donc une diminution du potentiel énergétique.

Etant donné la densité des réseaux au centre ville, il semble peu probable que ces réseaux passent tous en séparatif dans un avenir proche. La perte de rendement de ce fait semble donc relativement faible.

- une augmentation des installations de récupération d'énergie sur les eaux usées en amont.

Si le nombre d'installation se multiplie en amont du Carré Vert, potentiellement le contenu énergétique pourrait diminuer. Toutefois étant donné les contraintes fortes au niveau de la STEP et les rares opportunités de mise en œuvre de telles solutions de récupération, la probabilité d'une baisse mesurable des températures reste faible.

- **Limiter l'abaissement de température au niveau de la STEP**

La température des eaux usées influe directement sur le rendement du processus de traitement des effluents au niveau de la STEP d'Aire. En dessous d'une température de 13°C le traitement devient incomplet. La récupération de chaleur sur les eaux usées ne doit donc pas entraver ce processus biologique.

A ce jour, la norme VSA limite le refroidissement à l'entrée des stations d'épuration à 0.5 °C en moyenne sur 24h.

Selon les dimensionnements effectués précédemment, dans le cas où la totalité de l'énergie proviendrait des eaux usées, la puissance maximale soutirée aux eaux usées serait alors d'environ 850 kW.

Les débits mesurés au niveau du collecteur étant de 375 l/s – hors précipitation – le refroidissement des eaux s'élèverait alors à 0.53°C au niveau de l'échangeur et à 0.08 °C à l'entrée de la STEP (débit de 3'000 l/s).

Dans ces conditions, l'abaissement de température maximal défini par la norme VSA est donc largement respecté.

Du point de vue du fonctionnement de la STEP, l'abaissement de température étant très faible, on pourra considérer que les installations planifiées au niveau du Carré vert n'ont pas d'influence remarquable sur le traitement des eaux usées.

6.4.4 Variantes proposées

Sur la base des conclusions de la phase A et des éléments précédents, il a donc été décidé de retenir les variantes suivantes:

- **Variante 1 : PAC eaux usées / Chaudière gaz**

- Production de chaleur par PAC sur eaux usées (chauffage + ECS), 85 % des besoins (50% en puissance)

- Production de chaleur par chaudière gaz (chauffage + ECS), 15 % des besoins (50% en puissance)
- Production de froid pour les dépôts des musées par vecteur électrique.
- **Variante 2 : PAC eaux usées / Chaudière gaz / ECS solaire**
 - Production de chaleur par PAC sur eaux usées (chauffage + ECS), 85 % des besoins (50% en puissance)
 - Production de chaleur par chaudière gaz (chauffage + ECS), 15 % des besoins (50% en puissance)
 - Production de froid pour les dépôts des musées par vecteur électrique.
 - Production d'ECS par solaire thermique pour le logement (1 m² par habitant).
- **Variante 3 : PAC eaux usées / PAC eau du Rhône**
 - Production de chaleur par PAC sur eaux usées (chauffage + ECS), 85 % des besoins (50% en puissance)
 - Production de chaleur par PAC sur eau du Rhône (chauffage + ECS), 15 % des besoins (50% en puissance)
 - Production de froid pour les dépôts des musées par vecteur électrique.
- **Variante 4 : PAC eaux usées / PAC eau du Rhône / ECS solaire**
 - Production de chaleur par PAC sur eaux usées (chauffage + ECS), 85 % des besoins (50% en puissance)
 - Production de chaleur par PAC sur eau du Rhône (chauffage + ECS), 15 % des besoins (50% en puissance)
 - Production de froid pour les dépôts des musées par vecteur électrique.
 - Production d'ECS par solaire thermique pour le logement (1 m² par habitant).
- **Variante 5 : PAC sur eaux usées**
 - Production de chaleur par PAC sur eaux usées (chauffage + ECS), 100 % des besoins.
 - Production de froid pour les dépôts des musées par vecteur électrique.
- **Variante 6 : PAC sur eaux usées / ECS solaire**
 - Production de chaleur par PAC sur eaux usées (chauffage + ECS), 100 % des besoins.
 - Production de froid pour les dépôts des musées par vecteur électrique.
 - Production d'ECS par solaire thermique pour le logement (1 m² par habitant).

Les variantes 1 et 2 faisant intervenir du gaz ne pourront être retenues dans le cadre de ce projet, toutefois elles serviront de base de comparaison pour les autres variantes.

7 Analyse et comparaison des variantes

7.1 Analyse des variantes

Chaque variante a été évaluée de manière détaillée, puis un bilan énergétique et environnemental a été établi pour chacune d'elle. L'évaluation comprend les bases de dimensionnement du système proposé ainsi qu'un schéma de principe de la variante concernée (voir en annexe).

Les éco-points ont été évalués selon la méthode du BUWAL qui attribue à chaque polluant un quota d'éco-points par gramme correspondant à son impact relatif.

Les quantités de polluant ont été évaluées selon la méthode Ecoinvent (solution type) afin de tenir compte pour chaque vecteur de l'ensemble de la filière de production.

	Energie consommée MJ	SO2 mg/MJ	NO2 mg/MJ	COV mg/MJ	CO mg/MJ	Poussière mg/MJ	CO2 g/MJ
Eco-facteurs 06 (/g)		30	45	18		150	0.31
Gaz condés Low-Nox ECOINV		25	40	27		1.3	64
Electr hydr barr, ECOINV		1.2	7.3	1.1		3.3	1.0
Electr hydr fil eau, ECOINV		1.1	8.8	1.3		4.9	0.8
Electr hydr mix GE, ECOINV		1.2	8.0	1.2		4.1	0.9
Solaire th., ECOINV		14	8.5	2.3		2.4	2.3
Récup sur transfos SIG, ECOINV		0.02	0.12	0.02		0.06	0.01

Tableau 5 – Hypothèse d'évaluation des éco-points

7.1.1 Bilan énergétique et environnemental

7.1.1.1 Base de comparaison : chaufferie centralisée gaz

Base de comparaison

Chaud : gaz / Froid : électrique

	Chaleur (chaud)	Froid (énergie thermique)	Electricité	CO ₂ [tonnes] (émissions locales)	Ecopoints (émissions Ecoinvent)
Surface [m ²]	48850	10400	58850		
Besoins [MWh]	1938	360	1846		
Consommations futures base [MWh]	2153		1846	426	32065

Tableau 6 – Bilan de synthèse : base

Base GAZ (low Nox) Compresseurs froid	Impact environnemental - Emission de gaz et particules issus de la combustion						
	Energie consommée MWh/an	SO ₂ kg/an	NO _x kg/an	COV kg/an	CO kg/an	Poussière kg/an	CO ₂ tonnes/an
GAZ (low Nox)	2153	194	310	209	0	10	496
Divers par vecteur électrique	1846	8	53	8	0	27	6
TOTAL	3999	201	363	217	0	37	502
	TOTAL						
Ecopoints	32065	6042	16348	3909	0	5610	156

Tableau 7 – Bilan des émissions : base

7.1.1.2 Variante 1 : PAC Eaux usées / Gaz

Variante 1

Chaud : PAC eaux usées - eau 85 % / Gaz 15 % / Froid : électrique

	Chaleur (chaud)	Froid (énergie thermique)	Electricité	CO ₂ [tonnes] (émissions locales)	Ecopoints (émissions Ecoinvent)
Surface [m ²]	48850	10400	58850		
Besoins [MWh]	1938	360	1846		
PAC eaux usées - eau [MWh]	-1647	0	370		
Gaz [MWh]	291				
Solde besoins à satisfaire variante 1 [MWh]	290	360	2216		
Consommations variante 1 [MWh]	323		2216	64	12020

Tableau 8 – Bilan de synthèse : variante 1

Variante 1 PAC eaux usées 85 % / Gaz 15 % Compresseurs froid	Impact environnemental - Emission de gaz et particules issus de la combustion						
	Energie consommée MWh/an	SO ₂ kg/an	NO _x kg/an	COV kg/an	CO kg/an	Poussière kg/an	CO ₂ tonnes/an
PAC eaux usées	370	2	11	2	0	5	1
GAZ (low Nox)	323	29	46	31	0	2	74 64
Divers par vecteur électrique	1846	8	53	8	0	27	6
TOTAL	2538	38	110	41	0	34	82 64
Ecopoints	12020	1146	4967	736	0	5146	25

Tableau 9 – Bilan des émissions : variante 1

7.1.1.3 Variante 2 : PAC Eaux usées / Gaz / ECS Solaire

Variante 2

Chaud : PAC eaux usées - eau 85 % + solaire thermique / Gaz 15 % / Froid : électrique

	Chaleur (chaud)	Froid (énergie thermique)	Electricité	CO ₂ [tonnes] (émissions locales)	Ecopoints (émissions Ecoinvent)
Surface [m ²]	48850	10400	58850		
Besoins [MWh]	1938	360	1846		
Solaire thermique [MWh]	-375	0			
PAC eaux usées - eau [MWh]	-1329	0	272		
Gaz [MWh]	234				
Solde besoins à satisfaire variante 2 [MWh]	234	360	2118		
Consommations Variante 2 [MWh]	260		2118	51	12551

Tableau 10 – Bilan de synthèse : variante 2

Variante 2 PAC eaux usées 85 % / Gaz 15 % + sol. th. Compresseurs froid	Impact environnemental - Emission de gaz et particules issus de la combustion						
	Energie consommée MWh/an	SO ₂ kg/an	NO _x kg/an	COV kg/an	CO kg/an	Poussière kg/an	CO ₂ tonnes/an
PAC eaux usées	272	1	8	1	0	4	1
GAZ (low Nox)	260	23	37	25	0	1	60 51
Solaire thermique	375	19	11	3	0	3	3
Divers par vecteur électrique	1846	8	53	8	0	27	6
TOTAL	2753	51	110	37	0	36	70 51
Ecopoints	12551	1532	4951	675	0	5371	22

Tableau 11 – Bilan des émissions : variante 2

7.1.1.4 Variante 3 : PAC Eaux usées / PAC Rhône

Variante 3

Chaud : PAC eaux usées - eau 85 % / PAC eau du Rhône 15 % / Froid : électrique

	Chaleur (chaud)	Froid (énergie thermique)	Electricité	CO ₂ [tonnes] (émissions locales)	Ecopoints (émissions Ecoinvent)
Surface [m ²]	48850	10400	58850		
Besoins [MWh]	1938	360	1846		
PAC eaux usées - eau [MWh]	-1647		370		
PAC eau du Rhône - eau [MWh]	-291		70		
Solde besoins à satisfaire variante 3 [MWh]	0	360	2286		
Consommations variante 3 [MWh]			2286	0	8504

Tableau 12 – Bilan de synthèse : variante 3

Variante 3 PAC eaux usées 85 % / PAC Rhône 15 % Compresseurs froid	Impact environnemental - Emission de gaz et particules issus de la combustion						
	Energie consommée MWh/an	SO ₂ kg/an	NO _x kg/an	COV kg/an	CO kg/an	Poussière kg/an	CO ₂ tonnes/an
PAC eaux usées	370	2	11	2	0	5	1
PAC eau du Rhône - eau	70	0	2	0	0	1	0
Divers par vecteur électrique	1846	8	53	8	0	27	6
TOTAL	2286	9	66	10	0	34	7
	TOTAL						0
Ecopoints	8504	284	2967	177	0	5074	2

Tableau 13 – Bilan des émissions : variante 3

7.1.1.5 Variante 4 : PAC Eaux usées / PAC Rhône / ECS Solaire

Variante 4

Chaud : PAC eaux usées - eau 85 % + solaire thermique / PAC eau du Rhône 15 % / Froid : électrique

	Chaleur (chaud)	Froid (énergie thermique)	Electricité	CO ₂ [tonnes] (émissions locales)	Ecopoints (émissions Ecoinvent)
Surface [m ²]	48850	10400	58850		
Besoins [MWh]	1938	360	1846		
Solaire thermique [MWh]	-375	0			
PAC eaux usées - eau [MWh]	-1329		272		
PAC eau du Rhône - eau [MWh]	-234		56		
Solde besoins à satisfaire variante 4 [MWh]	0	360	2174		
Consommations Variante 4 [MWh]			2174	0	9716

Tableau 14 – Bilan de synthèse : variante 4

Variante 4 PAC eaux usées 85 % / PAC Rhône 15 % + sol. th. Compresseurs froid	Impact environnemental - Emission de gaz et particules issus de la combustion						
	Energie consommée MWh/an	SO ₂ kg/an	NO _x kg/an	COV kg/an	CO kg/an	Poussière kg/an	CO ₂ tonnes/an
PAC eaux usées	272	1	8	1	0	4	1
PAC eau du Rhône - eau	56	0	2	0	0	1	0
Solaire thermique	375	19	11	3	0	3	3
Divers par vecteur électrique	1846	8	53	8	0	27	6
TOTAL	2549	28	74	12	0	35	10
	TOTAL						0
Ecopoints	9716	837	3339	224	0	5313	3

Tableau 15 – Bilan des émissions : variante 4

7.1.1.6 Variante 5 : PAC Eaux usées

Variante 5

Chaud : PAC eaux usées - eau 100 % / Froid : électrique

	Chaleur (chaud)	Froid (énergie thermique)	Electricité	CO ₂ [tonnes] (émissions locales)	Ecopoints (émissions Ecoinvent)
Surface [m ²]	48850	10400	58850		
Besoins [MWh]	1938	360	1846		
PAC eaux usées - eau [MWh]	-1938		419		
Solde besoins à satisfaire variante 5 [MWh]	0	360	2265		
Consommations variante 5 [MWh]			2265	0	8427

Tableau 16 – Bilan de synthèse : variante 5

Variante 5 PAC eaux usées 100 % Compresseurs froid	Impact environnemental - Emission de gaz et particules issus de la combustion						
	Energie consommée MWh/an	SO ₂ kg/an	NO _x kg/an	COV kg/an	CO kg/an	Poussière kg/an	CO ₂ tonnes/an
PAC eaux usées	419	2	12	2	0	6	1
Divers par vecteur électrique	1846	8	53	8	0	27	6
TOTAL	2265	9	65	10	0	34	7 0
TOTAL							
Ecopoints	8427	281	2940	175	0	5028	2

Tableau 17 – Bilan des émissions : variante 5

7.1.1.7 Variante 6 : PAC Eaux usées / ECS Solaire

Variante 6

Chaud : PAC eaux usées - eau 100 % + solaire thermique / Froid : électrique

	Chaleur (chaud)	Froid (énergie thermique)	Electricité	CO ₂ [tonnes] (émissions locales)	Ecopoints (émissions Ecoinvent)
Surface [m ²]	48850	10400	58850		
Besoins [MWh]	1938	360	1846		
Solaire thermique [MWh]	-375	0			
PAC eaux usées - eau [MWh]	-1563		312		
Solde besoins à satisfaire variante 6 [MWh]	0	360	2158		
Consommations Variante 6 [MWh]			2158	0	9656

Tableau 18 – Bilan de synthèse : variante 6

Variante 6 PAC eaux usées 100 % + sol. th. Compresseurs froid	Impact environnemental - Emission de gaz et particules issus de la combustion						
	Energie consommée MWh/an	SO ₂ kg/an	NO _x kg/an	COV kg/an	CO kg/an	Poussière kg/an	CO ₂ tonnes/an
PAC eaux usées	312	1	9	1	0	5	1
Solaire thermique	375	19	11	3	0	3	3
Divers par vecteur électrique	1846	8	53	8	0	27	6
TOTAL	2533	28	74	12	0	35	10 0
TOTAL							
Ecopoints	9656	835	3318	223	0	5277	3

Tableau 19 – Bilan des émissions : variante 6

7.2 Comparaison des variantes

Les données évaluées au niveau de l'analyse des variantes ont été reprises dans un tableau de synthèse et chacune de ces variantes a été chiffrée en termes d'investissement.

L'intégration des investissements, des coûts de l'énergie et des coûts de maintenance a permis de mettre en évidence les critères suivants :

- Investissement pour la production de chaleur.
- Investissement pour la production de froid.
- Coût du MWh (y compris annuité, maintenance, et énergie).
- Emissions de CO₂ locales.
- Taux de production à base d'énergies renouvelables ou indigène.
- Sécurité d'approvisionnement.
- Possibilité de valoriser l'image du système.

Il est à noter que, du point de vue du chiffrage des investissements, l'évaluation s'est bornée à chiffrer une installation capable d'assurer les besoins en énergie et en puissance du site « Carré Vert ».

Les hypothèses de coût de l'énergie sont basées sur des tarifs moyens de la Ville de Genève pour le gaz et l'électricité.

Le tableau de synthèse présenté au Tableau 20 figure également en annexe 9.1.

Coûts moyen du kWh combustible gaz [Frs/MWh]	84.3	coût moyen selon informations Ville de Genève						Coûts de maintenance mazout [% d'invest.]	3
Coûts moyen du kWh combustible mazout [Frs/MWh]		sur besoins en chaleur sur besoins en chaleur (estimation) coût moyen de l'ensemble du patrimoine VdGE						Coûts de maintenance gaz [% d'invest.]	3
Coûts moyen du kWh CAD récupération [Frs/MWh]								Coûts de maintenance bois [% d'invest.]	4
Coûts moyen du kWh renouv/local (bois-biom.) [Frs/MWh]								Coûts de maint. bois gazéif biom [% d'invest.]	6
Coûts moyen du kWh combustible bois local [Frs/MWh]								Coûts de maintenance solaire [% d'invest.]	1
Coûts moyen du kWh CADSIG hiver [Frs/MWh]								Coûts de maint. pac eaux usées [% d'invest.]	2
Coûts moyen du kWh CADSIG été [Frs/MWh]								Coûts de maintenance électricité [% d'invest.]	1
Coûts moyen du kWh électrique [Frs/MWh]	208							Coûts de maint. pac eaux du Rhône [% d'invest.]	4
Facteur d'annuité [-]	0.071	sur base durée de vie 25 ans et taux d'intérêt à 5% sur base durée de vie 15 ans et taux d'intérêt à 5%						Coûts de maintenance compresseurs [% d'invest.]	3
Facteur d'annuité compresseurs froid, absorption et PAC [-]	0.0963							Coûts de maintenance CAD [% d'invest.]	1
Rendement production production mazout	0.85							Coûts de maintenance récupération [% d'invest.]	2
Rendement production production gaz	0.9							Coûts de maintenance CCF gaz [% d'invest.]	5
Rendement production production bois ou charbon	0.8							Taxe CO2 [Frs/t]	0
Rendement absorption	0.75								
Rendement production chaleur CAD	0.65								
Rendement production de chaleur CAD cycle combiné	0.4								
Pollution imputable à la production CAD cycle combiné	0.45								
COP annuel moyen pompes à chaleur	Base	1	2	3	4	5	6		
COP PAC eaux usées / eau		4.57	4.97	4.57	4.97	4.75	5.09		
COP PAC eau du Rhône / eau				4.19	4.19				
Puissance production de chaleur [kW]	1'021	puissance Minergie							
Besoins en énergie utile chaud [MWh]	1938	énergie utile selon besoins Minergie							
Besoins en énergie utile chaud ECS seul [MWh]	797								
Besoins en électricité hors PAC [MWh]	1846								
Besoins en énergie utile froid [MWh]	360	énergie utile selon besoins Minergie							
COP groupes de production de froid	4								

	Base	1	2	3	4	5	6
Variantes analysées	Gaz	PAC eaux usées 85 % / Gaz 15 %	PAC eaux usées 85 % / Gaz 15 % + Solaire thermique	PAC eaux usées 85 % / PAC Rhône 15 %	PAC eaux usées 85 % / PAC Rhône 15 % + Solaire thermique	PAC eaux usées 100 %	PAC eaux usées 100 % + Solaire thermique
Energie utile chaude produite [MWh]	1938	1938	1938	1938	1938	1938	1938
Consommation combustible [MWh]	2153	323	260				
Consommation électricité liée à la production de chaleur [MWh]		370	272	439	328	419	312
Investissement pour chaudières gaz [Frs]	SFr. 420'000	SFr. 200'000	SFr. 200'000	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
Investissement pour PAC Rhône [Frs]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 760'000	SFr. 760'000	SFr. 0	SFr. 0
Investissement pour PAC eaux usées [Frs]	SFr. 0	SFr. 780'000	SFr. 780'000	SFr. 780'000	SFr. 780'000	SFr. 1'140'000	SFr. 1'140'000
Investissement pour sous-station + distribution primaire [Frs]	SFr. 410'000	SFr. 410'000	SFr. 410'000	SFr. 410'000	SFr. 410'000	SFr. 410'000	SFr. 410'000
Investissement pour solaire thermique [Frs]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 1'420'000	SFr. 0	SFr. 1'420'000	SFr. 0	SFr. 1'420'000
Investissement total pour la production de chaleur [Frs]	SFr. 830'000	SFr. 1'390'000	SFr. 2'810'000	SFr. 1'950'000	SFr. 3'370'000	SFr. 1'550'000	SFr. 2'970'000
Coût d'annuité production de chaleur [Frs/an]	SFr. 58'930	SFr. 118'424	SFr. 219'244	SFr. 177'412	SFr. 278'232	SFr. 138'892	SFr. 239'712
Coût de maintenance production de chaleur [Frs/an]	SFr. 16'700	SFr. 25'700	SFr. 39'900	SFr. 50'100	SFr. 64'300	SFr. 26'900	SFr. 41'100
Coût de l'énergie chaude [Frs/an]	SFr. 181'490	SFr. 104'105	SFr. 78'495	SFr. 91'392	SFr. 68'249	SFr. 87'097	SFr. 64'893
Coût de la taxe CO2 [Frs/an]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
TOTAL coûts production de chaleur [Frs/an]	SFr. 257'120	SFr. 248'229	SFr. 337'639	SFr. 318'904	SFr. 410'781	SFr. 252'889	SFr. 345'705
Energie utile froide "gratuite" [MWh]							
Energie utile froide produite [MWh]	360	360	360	360	360	360	360
Consommation électricité production de froid [MWh]	90	90	90	90	90	90	90
Investissement total pour la production de froid [Frs]	SFr. 190'000	SFr. 190'000	SFr. 190'000	SFr. 190'000	SFr. 190'000	SFr. 190'000	SFr. 190'000
Coût d'annuité production de froid [Frs/an]	SFr. 18'297	SFr. 18'297	SFr. 18'297	SFr. 18'297	SFr. 18'297	SFr. 18'297	SFr. 18'297
Coût de maintenance production de froid [Frs/an]	SFr. 5'700	SFr. 5'700	SFr. 5'700	SFr. 5'700	SFr. 5'700	SFr. 5'700	SFr. 5'700
Coût de l'énergie utile froide [Frs/an]	SFr. 18'720	SFr. 18'720	SFr. 18'720	SFr. 18'720	SFr. 18'720	SFr. 18'720	SFr. 18'720
Coût de la taxe CO2 [Frs/an]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
TOTAL coûts production de froid [Frs/an]	SFr. 427'17	SFr. 427'17	SFr. 427'17	SFr. 427'17	SFr. 427'17	SFr. 427'17	SFr. 427'17
Coût du MWh chaud [Frs /MWh]	SFr. 133	SFr. 128	SFr. 174	SFr. 165	SFr. 212	SFr. 131	SFr. 178
Coût du MWh froid [Frs /MWh]	SFr. 119	SFr. 119	SFr. 119	SFr. 119	SFr. 119	SFr. 119	SFr. 119
Coût du MWh chaud froid confondu [Frs /MWh]	SFr. 130	SFr. 127	SFr. 166	SFr. 157	SFr. 197	SFr. 129	SFr. 169
Besoins d'électricité (hors chaud+froid) [MWh]	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756
Auto-production d'électricité [MWh]	0	0	0	0	0	0	0
Consommation d'électricité nette (hors chaud+froid) [MWh]	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756
Investissement pour la production d'électricité [Frs]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
Coût d'annuité production d'électricité [Frs/an]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
Coût de maintenance production d'électricité [Frs/an]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
Coût de l'énergie électrique [Frs/an]	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281
Coût de la taxe CO2 [Frs/an]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
TOTAL coûts production d'électricité [Frs/an]	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281
Coût du MWh électrique (hors prod. ch-fr) [Frs /MWh]	SFr. 208	SFr. 208	SFr. 208	SFr. 208	SFr. 208	SFr. 208	SFr. 208
Emissions de CO2 locales [tonnes/an]	426	64	51	0	0	0	0
Impact environnemental [Ecopoints]	32'065	12'020	12'551	8'504	9'716	8'427	9'656
Impact environnemental [Ecopoints/MWh]	14.0	5.2	5.5	3.7	4.2	3.7	4.2
Taux de prod. à base d'énergie renouv. / indig. [%]	0	83	87	100	100	100	100
Sécurité d'approvisionnement [pts]	1	2	3	1	2	1	2
Possibilité de valoriser l'image du système	0	1	2	2	3	2	3

Tableau 20 – Synthèse de la comparaison énergétique, environnementale et financière

7.2.1 Comparaison des variantes du point de vue du coût de l'énergie et de l'investissement

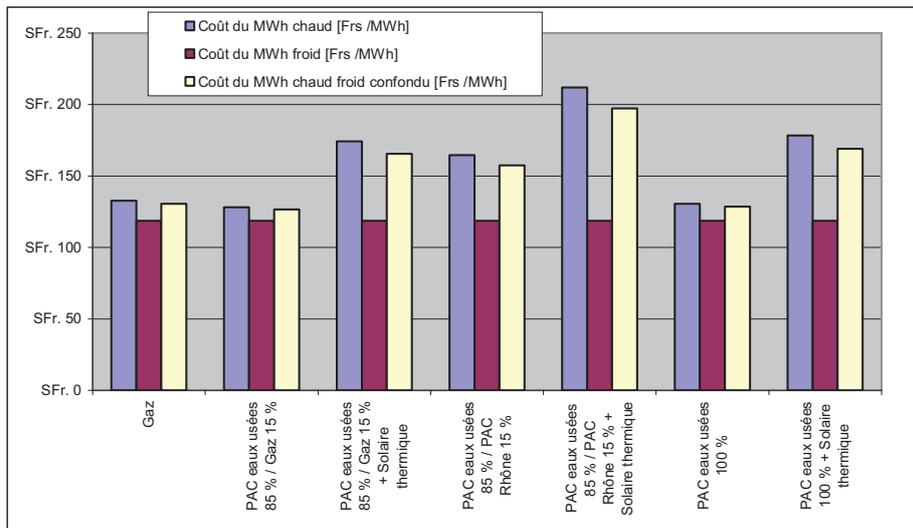


Figure 20 – Comparaison du coût de l'énergie des variantes proposées

L'analyse du tableau de synthèse et du graphique précédent amène aux conclusions suivantes :

- Les variantes 1 « 85% PAC EU, 15% gaz » et 5 « 100% PAC EU » sont les variantes les plus intéressantes du point de vue du coût du MWh chaud (y compris annuité, frais d'exploitation et d'énergie). Il est à noter que ces variantes ont des coûts très légèrement inférieurs au coût de la variante de base « Gaz ». Ces résultats s'expliquent en partie par les températures idéales de la source (optimisation du COP). Pour rappel, les variantes 1 et 2 faisant appel à des énergies non renouvelables ne répondent pas au cahier des charges du projet.
- Les variantes 3 et 4 faisant intervenir la récupération d'énergie sur les EU et des PAC sur le Rhône sont les variantes les plus défavorables. Ceci est lié au fort investissement nécessaire en particulier pour la station de pompage de l'eau du Rhône.
- Les variantes faisant intervenir le solaire thermique sont moins intéressantes du point de vue du coût du MWh chaud. En effet, pour ce projet, les investissements pour le solaire thermique sont élevés en comparaison du faible coût de l'énergie récupérée sur les eaux usées.

Le graphique qui suit montre les investissements à prévoir pour chaque variante et autorise sensiblement les mêmes remarques que précédemment :

- La variante 5 « 100% PAC EU » représente un compromis intéressant. Elle est en effet plus coûteuse à l'investissement que la variante de base « Gaz », mais reste moins chère que la variante 3 « 85% PAC EU et 15% PAC sur eau du Rhône ». Par ailleurs le surinvestissement que représente la variante 5 « 100% PAC EU » comparé à la variante 1 « 85% PAC EU, 15% gaz » reste relativement faible.
- La mise en place d'une installation solaire thermique renchérit fortement le coût d'investissement pour chaque variante.

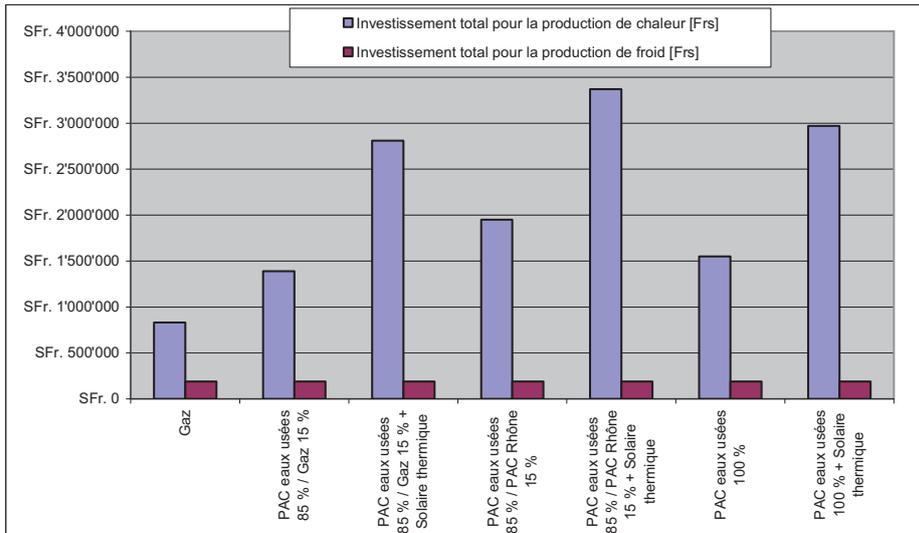


Figure 21 – Comparaison du coût d'investissement des différentes variantes

7.2.2 Comparaison des variantes du point de vue environnemental

Les tableaux qui suivent offrent une comparaison des différentes variantes du point de vue environnemental, soit au niveau des émissions de CO₂ locales et au niveau des éco-points par MWh.

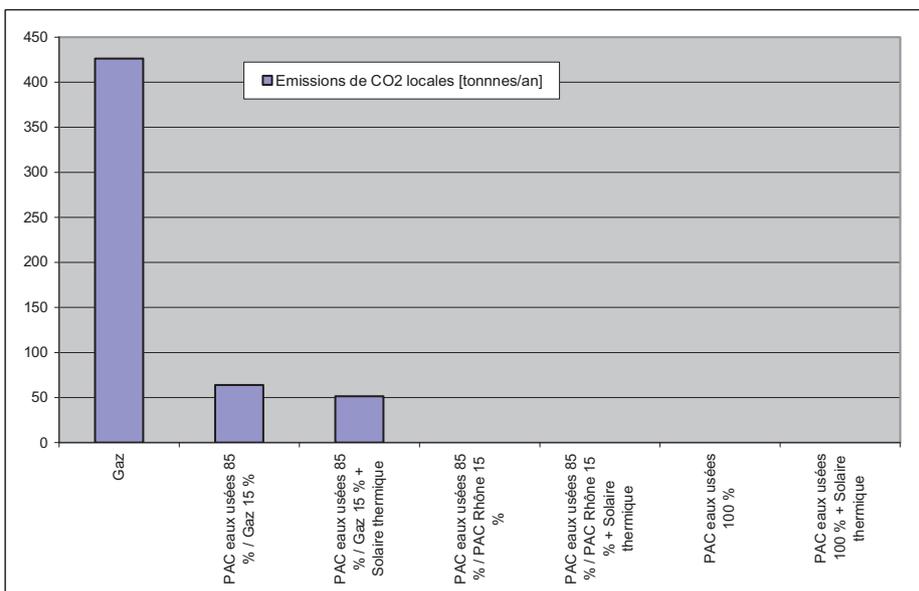


Figure 22 – Comparaison des variantes proposées au niveau des émissions de CO₂

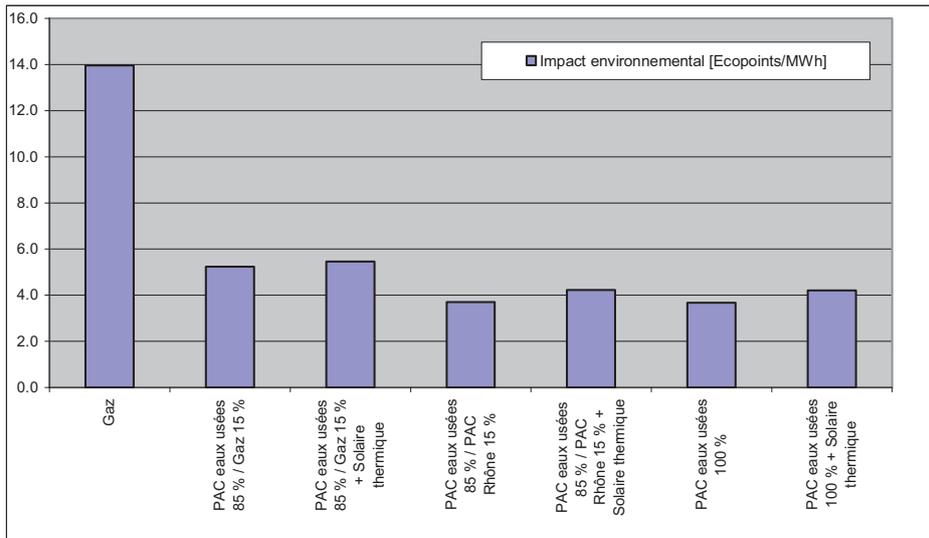


Figure 23 – Comparaison des variantes proposées au niveau des éco-points

L'analyse du tableau de synthèse et du graphique qui précèdent nous amène aux conclusions suivantes :

- En termes d'émissions locales de CO₂, et compte tenu d'un approvisionnement en électricité neutre de CO₂, seule la variante de base « Gaz » présente de fortes émissions. Les émissions des variantes 1 et 2 restent relativement faibles. Ceci est lié à l'utilisation de la chaudière gaz d'appoint qui n'est utilisée que pour des besoins de pointes.
- En termes d'éco-points par MWh, mis à part la variante de base « Gaz », les variantes sont relativement proches avec un très léger avantage à la variante 5 « 100% PAC EU ».
- Au niveau des éco-points toujours, force est de constater que le recours à une installation solaire thermique a une influence légèrement négative due à l'énergie grise nécessaire à la fabrication des capteurs, mais cette augmentation reste somme toute négligeable.

7.3 Synthèse de l'évaluation des variantes

Afin d'effectuer une comparaison globale des différentes variantes du point de vue de leurs performances tant économiques qu'énergétiques et environnementales, l'ensemble des valeurs issues du tableau de synthèse et exprimées à la base en des unités variables, ont été traduites en notes de 0 à 10. Ces notes sont proportionnelles à la performance de chaque solution et le nombre de points maximum correspond, par exemple, à de faibles émissions de CO₂, des coûts économiques limités, mais une part élevée d'énergies renouvelables / indigènes dans la production énergétique.

En résumé, au niveau graphique, plus le point se situe à l'extérieur, meilleure est, pour chaque critère, la notation et donc la performance de la variante considérée.

Par souci de lisibilité des graphiques, la dénomination des critères y a été abrégée de la manière suivante :

- Investissement total pour la production de chaleur et de froid : « investissement global »
- Coût du MWh chaud froid confondu : « coût du MWh th. »
- Emissions de CO₂ locales : « CO₂ »

- Impact environnemental (basé sur les Ecopoints) : « impact environnemental »
- Taux de production à base d'énergies renouvelables / indigène : « énergies renouvel./indigène »
- Sécurité d'approvisionnement : « sécurité d'appro. »
- Possibilité de valoriser l'image du système : « image du système »

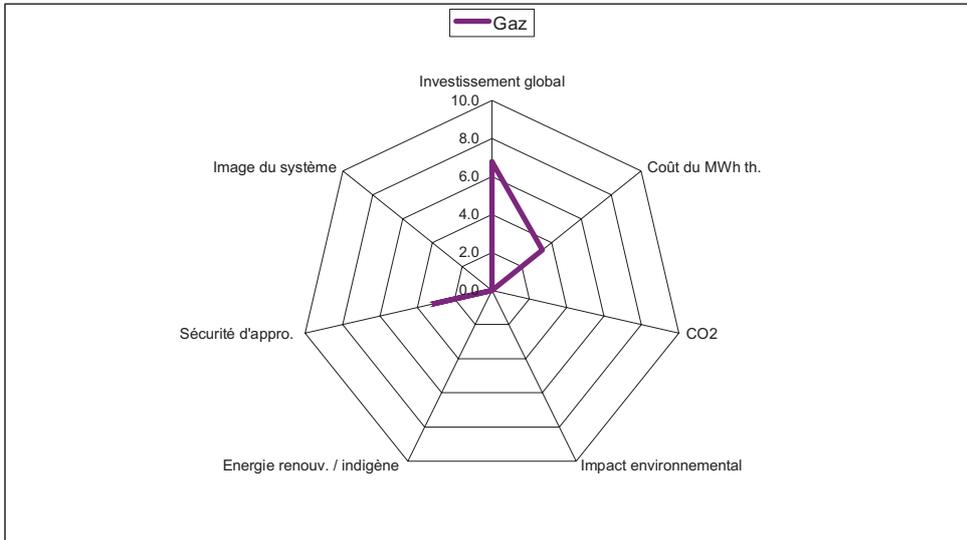


Figure 24 – Bilan global variante de base

La variante de base n'obtient des notes élevées qu'au niveau de l'investissement. Assez logiquement les indicateurs CO2 et impact environnemental ne correspondent pas aux ambitions du projet.

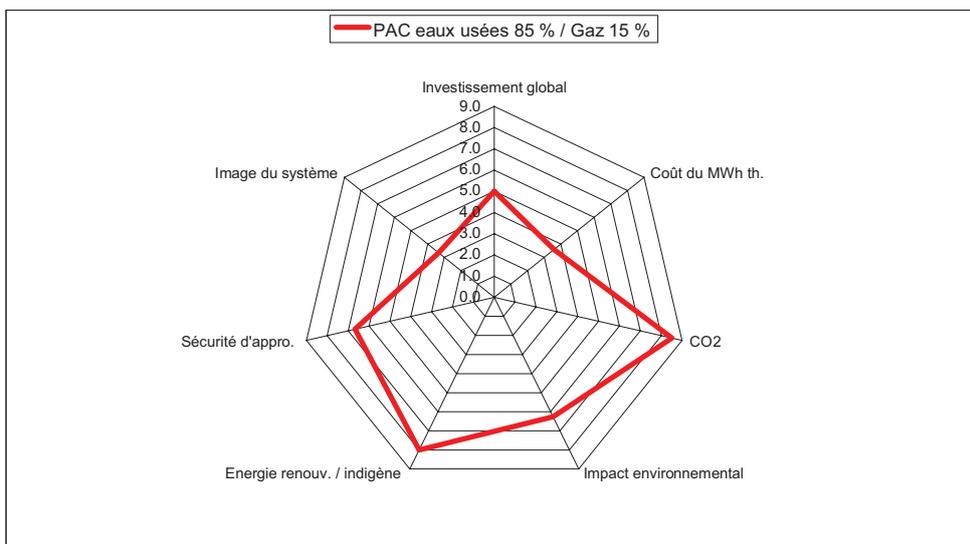


Figure 25 – Bilan global variante eaux usées / gaz

La variante 2 « 85% PAC EU, 15% gaz », présente des indicateurs relativement bien équilibrés notamment avec des coûts du MWh proches de la base de comparaison « gaz ». Les indicateurs environnementaux restent relativement bons malgré l'emploi du gaz.

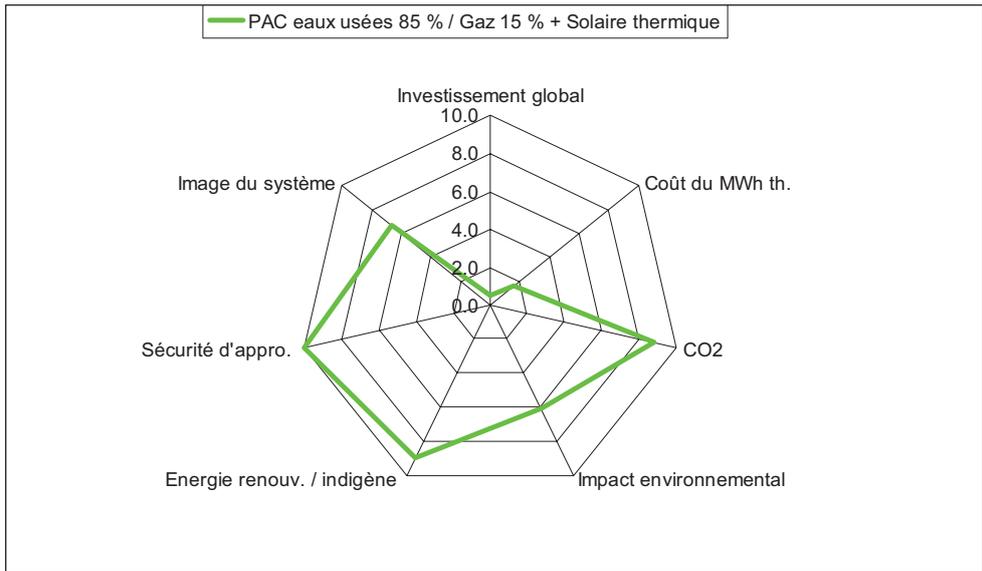


Figure 26– Bilan global variante eaux usées / gaz / solaire thermique

L'utilisation du solaire thermique améliore l'image du système et la sécurité d'approvisionnement (augmentation du nombre de vecteurs énergétiques) toutefois comme vu précédemment l'investissement et coût du MWh s'effondrent.

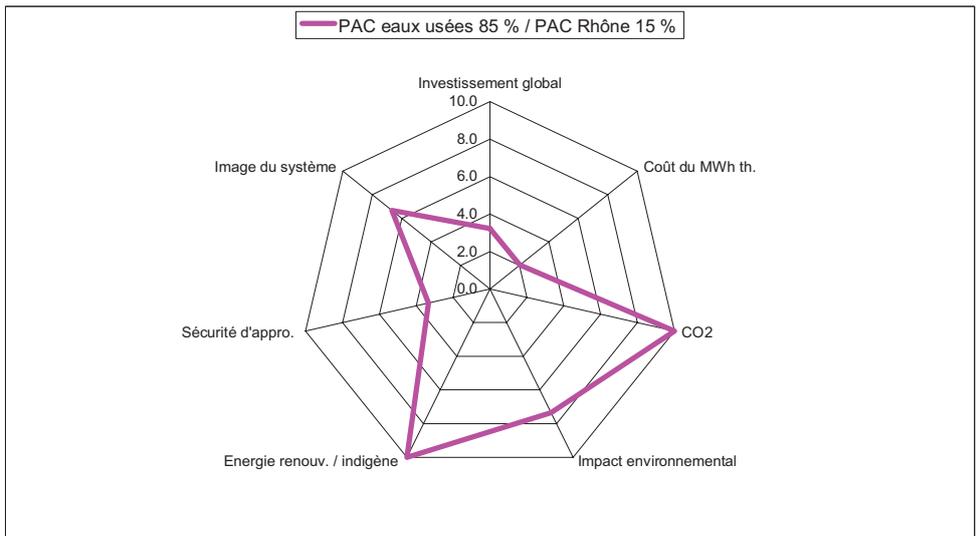


Figure 27 – Bilan global variante eaux usées / PAC Rhône

La variante 3 « 85% PAC EU, 15% PAC Rhône » est très bien située au niveau des indicateurs environnementaux, par contre les coûts d'investissement et coûts du MWh restent en dessous des valeurs de la variante 5 « 100% PAC EU ».

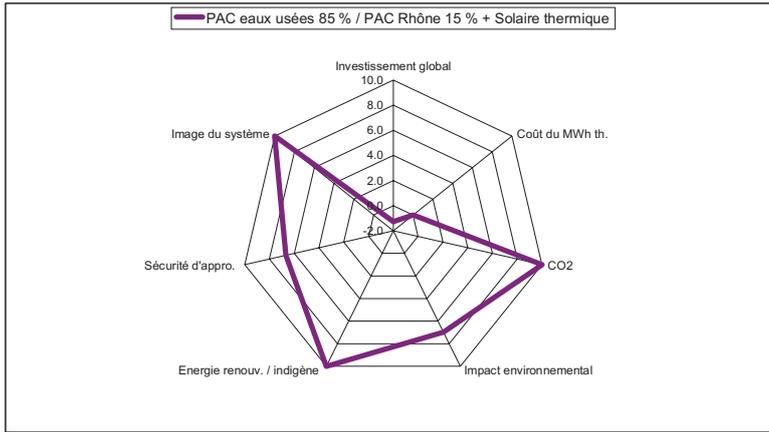


Figure 28– Bilan global variante eaux usées / PAC Rhône / solaire

La mise en place du solaire thermique permet d'améliorer grandement l'image du système. Par contre une fois encore l'investissement et coût du MWh s'effondrent à cause du fort investissement nécessaire pour la mise en place du solaire thermique.

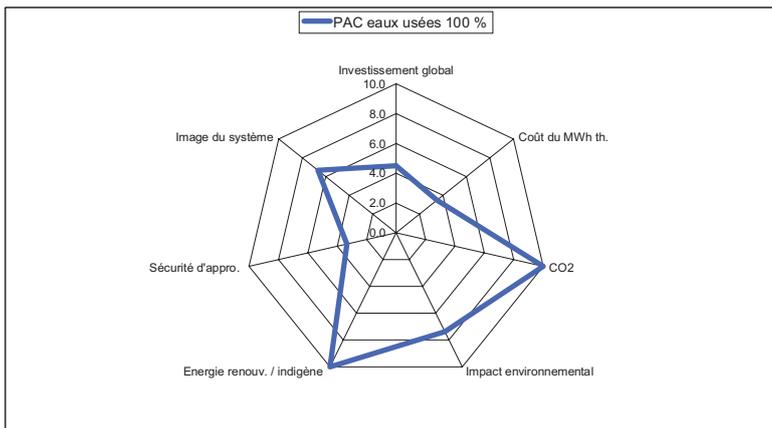


Figure 29– Bilan global variante eaux usées / PAC Rhône / solaire

La variante 5 « 100% PAC EU » semble être la variante la plus intéressante sur tous les points de vue. Seule la sécurité d'approvisionnement du site est moins bien notée que les autres variantes. Ceci est lié au fait que cette solution n'utilise qu'un seul vecteur énergétique.

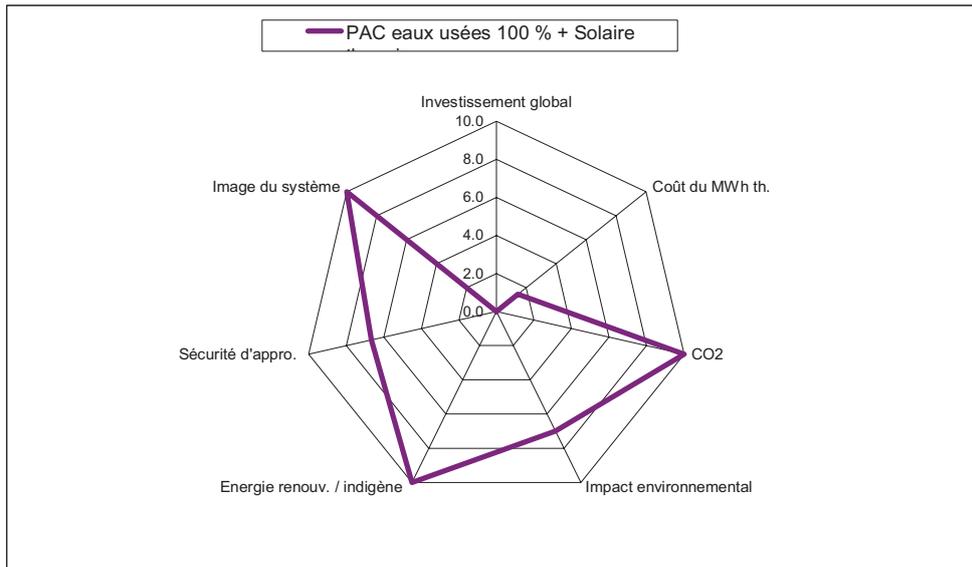


Figure 30– Bilan global variante eaux usées / PAC Rhône / solaire

Comme pour les autres solutions dans le cadre de ce projet, l’option solaire pénalise les indicateurs investissements et coûts du MWh.

La variante 1 « 85% PAC EU, 15% gaz » présente un bilan global très intéressant, y compris au niveau de l’impact environnemental. Toutefois cette solution ne doit pas être retenue étant donné qu’elle fait intervenir un agent énergétique non renouvelable.

La variante 3 « 85% PAC EU, 15% PAC Rhône », bien que conforme au cahier des charges de l’approvisionnement en énergie du site nécessite des investissements importants et des frais d’entretien élevés rendant cette solution plus chère que les autres.

La variante 5 « 100% PAC EU » présente le coût du MWh le plus bas tout en ayant un coût d’investissement qui reste modéré, un impact environnemental faible et une image aisément valorisable. Seul la sécurité d’approvisionnement est faible et une attention particulière doit être apportée à ce point.

De manière générale, l’adjonction, à l’une ou l’autre des variantes, d’une installation solaire thermique se voit pénalisée par un coût d’investissement élevé, et donc une incidence sur le coût de l’énergie. Une augmentation des tarifs de l’énergie aurait bien évidemment une influence positive sur la rentabilité à long terme d’une telle option qui reste pertinente.

En conclusion, il nous semble judicieux de retenir la variante 5 « 100% PAC sur les eaux usées ».

8 Conclusions et recommandations aux concepteurs

Etant donné la volonté de faire du « Carré Vert » un quartier exemplaire, il a logiquement été décidé de se baser sur la référence Minergie pour la comparaison et le dimensionnement des variantes de production de chaleur. Estimés sur la base de ce standard, les besoins du site s'élèvent, du point de vue thermique, à 1'938 MWh / an d'énergie utile pour une puissance de 1'021 kW installée et, au niveau électrique, à 1'846 MWh/an.

Afin de subvenir à ces besoins, différentes variantes de production d'énergie sont envisageables. Suite aux conclusions du premier volet de la présente étude, les variantes « récupération de chaleur sur les transformateurs des SIG » et « récupération de chaleur sur les eaux usées » ont été étudiées. La variante « récupération sur les transformateurs des SIG » ayant été abandonnée, le présent travail a permis d'affiner la réflexion sur la variante « récupération sur les eaux usées ».

Sur cette base, plusieurs combinaisons ont pu être identifiées et analysées. Il en ressort finalement que l'option « 100 % récupération sur les eaux usées » est à privilégier tant au niveau environnemental, qu'au niveau des investissements et des frais d'entretien. Toutefois une attention particulière devra être portée à la sécurité d'approvisionnement en énergie du site. Une énergie de secours devra certainement être prévue étant donné le caractère novateur de la solution retenue.

En parallèle, l'étude de la problématique des dépôts des musées a montré la nécessité de mettre en place un contrôle de température et d'humidité afin de garantir la bonne conservation des œuvres. Les exigences requises pour ces locaux imposent la mise en place d'une ou plusieurs machines frigorifiques. A ce stade du projet, les rejets de chaleur sur ces groupes frigorifiques n'ont pas été valorisés bien qu'ils représentent une importante source d'énergie. L'optimisation du concept avec l'utilisation des rejets de chaleur devra être étudiée. Dans le même temps il serait intéressant d'une part de préciser les besoins des dépôts des musées et d'autre part d'optimiser l'intégration architecturale afin de réduire au maximum les besoins de ces dépôts.

Le premier objectif du projet Carré Vert Artamis est donc rempli. La présente étude a permis de définir un concept d'approvisionnement en énergie permettant d'alimenter le site à 100 % avec des énergies renouvelables et avec zéro émission.

Toutefois il reste encore de nombreuses étapes à franchir avant d'atteindre l'objectif ambitieux de « quartier à énergie positive ». En tout premier lieu, il conviendra d'apporter une attention toute particulière à la maîtrise des besoins énergétiques des bâtiments. La présente étude repose sur l'hypothèse de bâtiments répondant au standard Minergie. Toutefois les méthodes constructives actuelles alliées à un concept architectural cohérent permettent de dépasser ce standard. L'utilisation de matériaux écologiques ou recyclés permettrait d'apporter une valeur supplémentaire à l'ensemble.

Du point de vue énergétique, l'approvisionnement en énergie se fera principalement à partir de pompes à chaleur. L'intégration architecturale de 3'000 m² de capteurs photovoltaïques permettrait de compenser les consommations électriques liées à la production de chaleur. L'objectif du quartier à énergie positive serait atteint avec la mise en place d'une surface supérieure à 18'000 m² de capteurs photovoltaïques.

9 Annexes

9.1 Tableau de synthèse

9.2 Plan de réseaux eaux usées + conduites CAD

9.3 Schéma de principe des variantes 1 et 2

9.4 Schéma de principe des variantes 3 et 4

9.5 Schéma de principe des variantes 5 et 6

Coûts moyen du kWh combustible gaz [Frs/MWh]	84.3	coût moyen selon informations Ville de Genève	Coûts de maintenance mazout [% d'invest.]	3
Coûts moyen du kWh combustible mazout [Frs/MWh]			Coûts de maintenance gaz [% d'invest.]	3
Coûts moyen du kWh CAD récupération [Frs/MWh]			Coûts de maintenance bois [% d'invest.]	4
Coûts moyen du kWh renouvel/local (bois-biom.) [Frs/MWh]			Coûts de maint. bois gazéif biom [% d'invest.]	6
Coûts moyen du kWh combustible bois local [Frs/MWh]		sur besoins en chaleur	Coûts de maintenance solaire [% d'invest.]	1
Coûts moyen du kWh CADSIG hiver [Frs/MWh]		sur besoins en chaleur (estimation)	Coûts de maint. pac eaux usées [% d'invest.]	2
Coûts moyen du kWh CADSIG été [Frs/MWh]		coût moyen de l'ensemble du patrimoine VdGE	Coûts de maintenance électricité [% d'invest.]	1
Coûts moyen du kWh électrique [Frs/MWh]	208		Coûts de maint. pac eaux du Rhône [% d'invest.]	4
			Coûts de maintenance compresseurs [% d'invest.]	3
Facteur d'annuité [-]	0.071	sur base durée de vie 25 ans et taux d'intérêt à 5%	Coûts de maintenance CAD [% d'invest.]	1
Facteur d'annuité compresseurs froid, absorption et PAC [-]	0.0963	sur base durée de vie 15 ans et taux d'intérêt à 5%	Coûts de maintenance récupération [% d'invest.]	2
			Coûts de maintenance CCF gaz [% d'invest.]	5

Rendement production production mazout	0.85						
Rendement production production gaz	0.9						
Rendement production production bois ou charbon	0.8						
Rendement absorption	0.75						
Rendement production chaleur CAD	0.65						
Rendement production de chaleur CAD cycle combiné	0.4						
Pollution imputable à la production CAD cycle combiné	0.45						
COP annuel moyen pompes à chaleur	Base	1	2	3	4	5	6
COP PAC eaux usées / eau		4.57	4.97	4.57	4.97	4.75	5.09
COP PAC eau du Rhône / eau							

Taxe CO2 [Frs/t] 0

Puissance production de chaleur [kW]	1'021	puissance Minergie
Besoins en énergie utile chaud [MWh]	1938	énergie utile selon besoins Minergie
Besoins en énergie utile chaud ECS seul [MWh]	797	
Besoins en électricité hors PAC [MWh]	1846	
Besoins en énergie utile froid [MWh]	360	énergie utile selon besoins Minergie
COP groupes de production de froid	4	

	Base	1	2	3	4	5	6
Variantes analysées	Gaz	PAC eaux usées 85 % / Gaz 15 %	PAC eaux usées 85 % / Gaz 15 % + Solaire thermique	PAC eaux usées 85 % / PAC Rhône 15 %	PAC eaux usées 85 % / PAC Rhône 15 % + Solaire thermique	PAC eaux usées 100 %	PAC eaux usées 100 % + Solaire thermique
Energie utile chaude produite [MWh]	1938	1938	1938	1938	1938	1938	1938
Consommation combustible [MWh]	2153	323	260				
Consommation électricité liée à la production de chaleur [MWh]		370	272	439	328	419	312
Investissement pour chaudières gaz [Frs]	SFr. 420'000	SFr. 200'000	SFr. 200'000	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
Investissement pour PAC Rhône [Frs]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 760'000	SFr. 760'000	SFr. 0	SFr. 0
Investissement pour PAC eaux usées [Frs]	SFr. 0	SFr. 780'000	SFr. 780'000	SFr. 780'000	SFr. 780'000	SFr. 1'140'000	SFr. 1'140'000
Investissement pour sous-station + distribution primaire [Frs]	SFr. 410'000	SFr. 410'000	SFr. 410'000	SFr. 410'000	SFr. 410'000	SFr. 410'000	SFr. 410'000
Investissement pour solaire thermique [Frs]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 1'420'000	SFr. 0	SFr. 1'420'000	SFr. 0	SFr. 1'420'000
Investissement total pour la production de chaleur [Frs]	SFr. 830'000	SFr. 1'390'000	SFr. 2'810'000	SFr. 1'950'000	SFr. 3'370'000	SFr. 1'550'000	SFr. 2'970'000
Coût d'annuité production de chaleur [Frs/an]	SFr. 58'930	SFr. 118'424	SFr. 219'244	SFr. 177'412	SFr. 278'232	SFr. 138'892	SFr. 239'712
Coût de maintenance production de chaleur [Frs/an]	SFr. 16'700	SFr. 25'700	SFr. 39'900	SFr. 50'100	SFr. 64'300	SFr. 26'900	SFr. 41'100
Coût de l'énergie chaude [Frs/an]	SFr. 181'490	SFr. 104'105	SFr. 78'495	SFr. 91'392	SFr. 68'249	SFr. 87'097	SFr. 64'893
Coût de la taxe CO2 [Frs/an]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
TOTAL coûts production de chaleur [Frs/an]	SFr. 257'120	SFr. 248'229	SFr. 337'639	SFr. 318'904	SFr. 410'781	SFr. 252'889	SFr. 345'705
Energie utile froide "gratuite" [MWh]							
Energie utile froide produite [MWh]	360	360	360	360	360	360	360
Consommation électricité production de froid [MWh]	90	90	90	90	90	90	90
Investissement total pour la production de froid [Frs]	SFr. 190'000	SFr. 190'000	SFr. 190'000	SFr. 190'000	SFr. 190'000	SFr. 190'000	SFr. 190'000
Coût d'annuité production de froid [Frs/an]	SFr. 18'297	SFr. 18'297	SFr. 18'297	SFr. 18'297	SFr. 18'297	SFr. 18'297	SFr. 18'297
Coût de maintenance production de froid [Frs/an]	SFr. 5'700	SFr. 5'700	SFr. 5'700	SFr. 5'700	SFr. 5'700	SFr. 5'700	SFr. 5'700
Coût de l'énergie utile froide [Frs/an]	SFr. 18'720	SFr. 18'720	SFr. 18'720	SFr. 18'720	SFr. 18'720	SFr. 18'720	SFr. 18'720
Coût de la taxe CO2 [Frs/an]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
TOTAL coûts production de froid [Frs/an]	SFr. 42'717	SFr. 42'717	SFr. 42'717	SFr. 42'717	SFr. 42'717	SFr. 42'717	SFr. 42'717
Coût du MWh chaud [Frs /MWh]	SFr. 133	SFr. 128	SFr. 174	SFr. 165	SFr. 212	SFr. 131	SFr. 178
Coût du MWh froid [Frs /MWh]	SFr. 119	SFr. 119	SFr. 119	SFr. 119	SFr. 119	SFr. 119	SFr. 119
Coût du MWh chaud froid confondu [Frs /MWh]	SFr. 130	SFr. 127	SFr. 166	SFr. 157	SFr. 197	SFr. 129	SFr. 169
Besoins d'électricité (hors chaud+froid) [MWh]	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756
Auto-production d'électricité [MWh]	0	0	0	0	0	0	0
Consommation d'électricité nette (hors chaud+froid) [MWh]	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756	1'756
Investissement pour la production d'électricité [Frs]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
Coût d'annuité production d'électricité [Frs/an]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
Coût de maintenance production d'électricité [Frs/an]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
Coût de l'énergie électrique [Frs/an]	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281
Coût de la taxe CO2 [Frs/an]	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
TOTAL coûts production d'électricité [Frs/an]	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281	SFr. 365'281
Coût du MWh électrique (hors prod. ch-fr) [Frs /MWh]	SFr. 208	SFr. 208	SFr. 208	SFr. 208	SFr. 208	SFr. 208	SFr. 208
Emissions de CO2 locales [tonnes/an]	426	64	51	0	0	0	0
Impact environnemental [Ecopoints]	32'065	12'020	12'551	8'504	9'716	8'427	9'656
Impact environnemental [Ecopoints/MWh]	14.0	5.2	5.5	3.7	4.2	3.7	4.2
Taux de prod. à base d'énergie renouvel. / indig. [%]	0	83	87	100	100	100	100
Sécurité d'approvisionnement [pts]	1	2	3	1	2	1	2
Possibilité de valoriser l'image du système	0	1	2	2	3	2	3

