

Cas d'étude : Eco-quartier solaire du Triangle Sud à Montmélian

Nom du projet :	Eco-quartier solaire du Triangle Sud
Adresse du projet :	Triangle Sud F-Montmélian
Nom et type de propriétaire :	Ville Montmélian Place Albert Serraz 73800 Montmélian
Contact :	Jean Rauber, Directeur général des services directionservices@montmelian.com



A/ Contexte de l'étude



A.1/ Motivations

Montmélian est une commune de 4 000 habitants située au sein du Territoire Cœur de Savoie qui regroupe 43 communes et 34 000 habitants, à 300 m d'altitude, à 15 km de Chambéry et à 50 km de Grenoble.

Montmélian est par ailleurs connue en France et en Europe comme ville pilote dans le domaine de l'énergie solaire, politique qu'elle développe depuis 1983. La commune compte 1564 m² de panneaux solaires thermiques soit 390 m² pour 1000 habitants (10 fois plus que la moyenne nationale qui est de 32 m²).

Championne de France de l'énergie solaire durant de nombreuses années, elle est l'une des quatre premières collectivités locales de France à s'être vue attribuer en décembre 2007 le label européen Cit'ergie pour l'exemplarité de sa politique "Energie-climat", un label renouvelé en 2012.

Le projet du Triangle Sud poursuit la dynamique d'innovation. Dans son nouveau PLU, la commune se fixe pour objectif d'accueillir une population nouvelle et de répondre aux besoins en logement de demain. Aux côtés d'un certain nombre de sites en renouvellement urbain, le Triangle Sud est confirmé comme zone d'urbanisation future avec une ambition environnementale forte : réaliser un quartier intégrant un réseau de chaleur solaire avec un taux de couverture solaire des besoins thermiques de 80%. L'étude d'urbanisme pré-opérationnelle pour la conception d'ensemble d'un nouveau quartier de 800 à 1000 logements a été lancée en 2012 sur cette base.

A.2/ Démarche de conception originale

L'ambition d'intégrer un réseau de chaleur solaire à ce futur quartier a revu le mode de faire au sein de l'équipe pluridisciplinaire et de travail avec la ville, nécessitant d'avancer prioritairement sur la dimension technique pour bien cerner les exigences de surface solaire (m^2 de panneaux), de stockage intersaisonnier (volume important) et de réseau associé, pour atteindre ce taux de couverture solaire de 80% des besoins d'énergie. Alors que généralement, les approches techniques viennent se surimposer à l'approche urbaine et paysagère, émoissant parfois certains principes forts d'aménagement, dans le cadre de ce projet, le travail d'urbanisme a intégré très en amont et de manière itérative les approches techniques pour mûrir et développer une cohérence environnementale globale. Un vrai parti pris de composition et de programmation émerge de ce processus.

La commune de Montmélian a confié l'élaboration de l'étude pré opérationnelle sur le « TRIANGLE SUD » pour la conception d'ensemble d'un nouveau quartier – plan de composition urbain et paysager à un groupement de bureaux d'études architecte, urbaniste, paysagiste, énergétique avec le soutien de l'Institut National de l'Énergie Solaire. Le projet concerne la réalisation d'un éco-quartier solaire d'environ 800 logements.

A.3/ Données d'environnement

Le futur Ecoquartier solaire du Triangle Sud est situé sur la commune de Montmélian.



Figure 1 : Implantation de l'Ecoquartier solaire du Triangle Sud

L'ensoleillement moyen annuel est de 1400 kWh/m^2 sur une surface inclinée à 30° et la température extérieure moyenne est de 11.8°C . Le nombre de degrés-jours unifié base 18 DJU_{18} est de 2500.

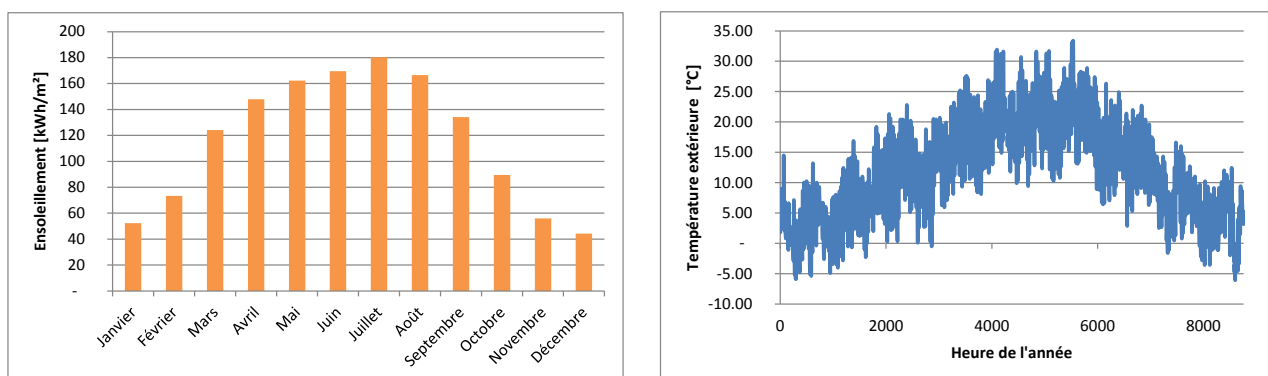


Figure 2 : Ensoleillement mensuel sur un plan incliné à 30° et température extérieure pour le climat de Montmélian

A.4/ Opportunités et barrières

Les principales opportunités ayant permis d'initier et développer le projet sont :

- la création d'un nouveau quartier avec des bâtiments basse consommation
- le retour d'expérience positif de la ville sur les installations solaires existantes
- la volonté de la ville de promouvoir l'énergie solaire et d'assurer un taux de couverture solaire de 80%
- l'intégration très en amont de l'objectif de 80% d'énergie solaire, et la réflexion commune avec les équipes d'urbaniste et architecte

Cependant de nombreux freins ont également dû être appréhendé, et notamment :

- le planning de développement du quartier : construction des 800-1000 logements avec un rythme de 40-60 logements par an
- l'intégration urbaine du stockage solaire liée à l'objectif de 80% de couverture solaire qui implique des capacités de stockage importante (plusieurs milliers de m³)
- l'aspect technologie innovante d'intégration du solaire sur le réseau, et surtout le manque de retour d'expérience en France
- les investissements initiaux importants inhérents aux solutions solaires qui ont en contrepartie un coût d'exploitation très faible
- le montage juridique et financier de l'opération originale

B/ Méthodologie et outils utilisés pour l'étude

B.1/ Courbe de charge du réseau de chaleur

> Besoins chauffage et ECS d'un logement type

Les hypothèses prise pour la définition d'un logement-type dont les performances énergétiques sont de niveau RT2012 – 20% sont les suivantes :

- surface moyenne par logement : 70 m²
- nombre d'habitant par logement : 2,3
- besoin en chauffage par logement : 2,8 MWh/an
- besoin en eau chaude sanitaire par logement : 2,1 MWh/an soit environ 40L/jour.personne d'eau chaude sanitaire à 60°C et 20% de pertes de bouclage.

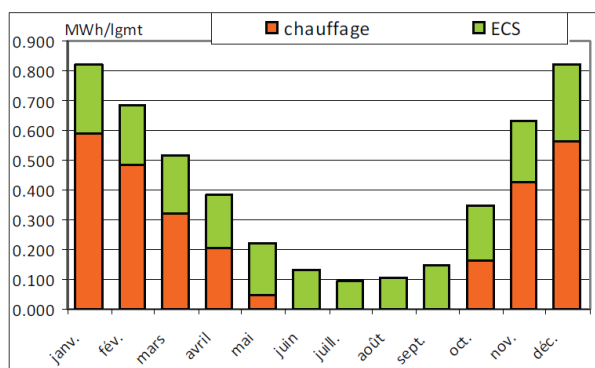


Figure 3 : Besoin de chauffage et ECS pour un logement type

> Phasage de construction et demande en chaleur

Le projet prévoit la construction de 1000 logements. Le phasage initialement prévu pour la construction est donné dans le tableau et le graphique suivants, ainsi que le nombre de logements, le nombre bâtiments et les besoins calorifiques par îlots en tenant compte des pertes du réseau de chaleur :

Îlot	Phasage	Nb de logement	Nb de bâtiment	Besoins totaux (CH+ECS+Pertes)
A	2 ans	170	8	884 MWh/an
B	5 ans	290	14	1508 MWh/an
C	6 ans	290	14	1508 MWh/an
D	3 ans	125	6	650 MWh/an
E	2 ans	110	5	572 MWh/an

Le phasage de construction propose la construction de 40 à 60 logements par an, ce taux étant plus important les 2 premières années de construction.

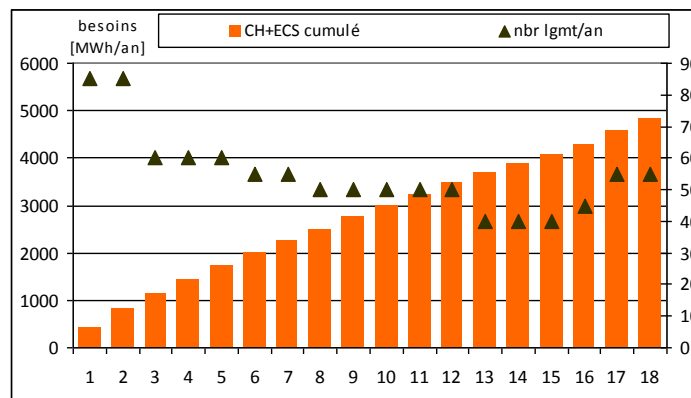


Figure 4 : Phasage de construction (points noir) et besoins de chaleur net cumulé (barre orange)

Un exemple de profil mensuel de la demande est donné dans le profil ci-après.

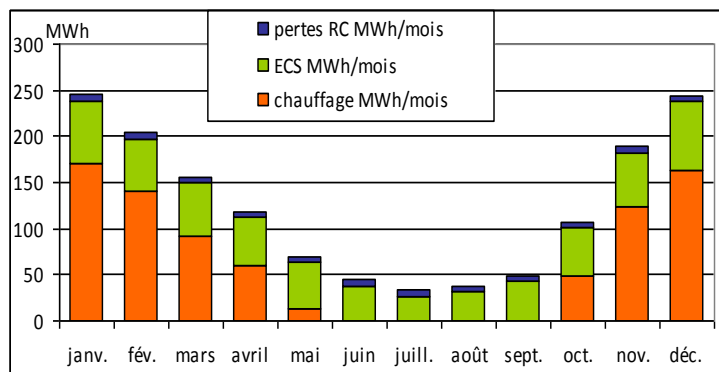


Figure 5 : Profil mensuel des besoins du réseau de chaleur pour l'îlot C (290 logements)

B.2/ Dimensionnement et performance du réseau de chaleur solaire

L'installation solaire étudiée pour le réseau de chaleur de l'écoquartier du Triangle Sud est répartie sur les bâtiments avec une réinjection d'énergie solaire au niveau de la chaufferie centrale. L'installation solaire a été simulée à partir du logiciel de simulation dynamique TRNSYS.

La centrale solaire et la chaufferie ont été modélisées et simulées. Les besoins du réseau sont fournis par un fichier externe.

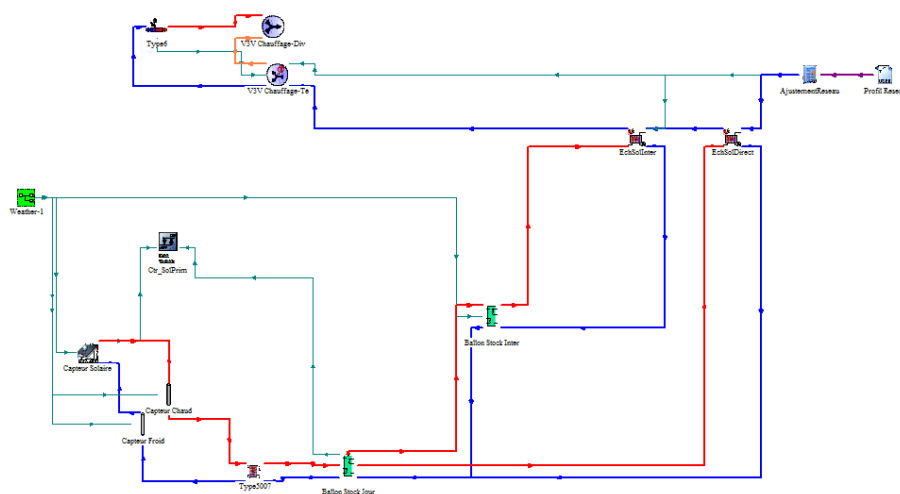


Figure 6 : Modélisation de la centrale solaire sous TRNSYS

Les données météorologiques utilisées dans les simulations sont issues de la base de données Meteonom.

Plusieurs indicateurs énergétiques sont utilisés afin de définir les performances du système.

La productivité solaire réseau Q_{sol,m^2} :

Elle représente l'énergie solaire injectée au niveau du réseau de chaleur ramenée à la surface de capteurs solaires.

$$Q_{sol,m^2} = \frac{Q_{sol,an}}{A_{solaire} * 1000} \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

Avec : - $Q_{sol,an}$: production solaire annuelle [MWh]
- $A_{solaire}$: surface de capteurs solaires [m²]

Le taux d'économie d'énergie f_{sav} :

Il représente l'économie d'énergie par rapport une solution de référence sans solaire.

$$f_{sav} = \frac{Q_{aux,solaire}}{Q_{aux,ref}}$$

Avec : - $Q_{aux,solaire}$: Consommation d'appoint avec le système solaire [MWh]
- $Q_{aux,ref}$: Consommation d'appoint de la solution de référence sans solaire [MWh]

La solution de référence est un réseau de chaleur sans installation solaire.

B.3/ Economie

Le calcul du coût de l'énergie solaire est basé sur la méthode du LCOE (Levelized Cost of Energy).

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Q_{sol,an,t}}{(1+r)^t}}$$

Avec : - I_t : CAPEX – coût d'investissement de l'année t
- M_t : OPEX – coût de fonctionnement et maintenance de l'année t
- F_t : Coût de l'énergie des auxiliaires de l'année t
- n : durée de vie du système
- r : taux d'actualisation

C/ Résultats de l'étude

C.1/ Conception, dimensionnement et performance du système solaire connecté au réseau de chaleur

Principe du réseau de chaleur par îlot :

Le phasage des constructions conduit à une architecture de réseau « décentralisée » pour rendre autonome chacune des phases (équivalent à un îlot de 150 logements).

La production d'énergie est assurée au niveau de chaque bâtiment, au moyen d'un champ de capteur. L'énergie solaire est transmise au réseau, de façon à alimenter l'ensemble des bâtiments. Une chaufferie centrale, par îlot, assure la fourniture du complément d'énergie. L'énergie excédentaire, non utilisée par les bâtiments notamment en été, est stockée dans un volume de stockage inter-saisonnier.

Les éléments de cette solution sont (par îlot) :

- Un réseau de chaleur alimentant chaque bâtiment de logement via une sous-station et fonctionnant à des températures entre 45°C (retour) et 70°C (départ),
- Plusieurs champs de capteurs installés en toiture des bâtiments et connectés directement au réseau de chaleur,
- Une chaufferie centrale à gaz pour effectuer l'appoint et le secours connectée au réseau de chaleur,
- Un stockage inter-saisonnier de type « Tank Thermal Energy Storage » (TTES), c'est-à-dire en cuve/silo extérieur,
- Une sous-station (SST) par bâtiment

Le principe est présenté dans le schéma suivant.

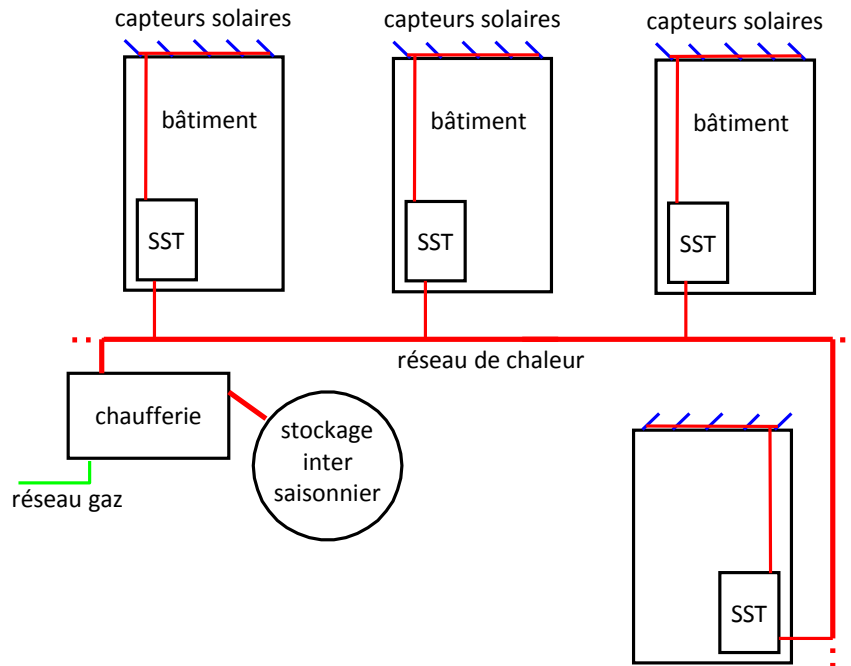


Figure 7 : Schéma de principe de la production de chaleur solaire décentralisée

Performance du réseau de chaleur solaire :

Les capteurs solaires retenus pour l'étude sont des capteurs plans haute performance ($\eta_0=0.817$, $a_1=2.205 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, $a_2=0.0135 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$).

Afin d'obtenir le taux de couverture solaire de 80%, les productions calorifiques devront être assurés par les différents moyens de production tel que détaillé dans le tableau suivant. En considérant un appoint de type chaudière gaz, la production de CO2 équivalent est également donnée dans le tableau.

Îlot	Nb logement	Besoins totaux (CH+ECS+Pertes) MWh/an	Production solaire MWh/an	Production appoint MWh/an	Contenu CO2(*) g/kWh
A	170	884	709 (80%)	175 (20%)	57.3
B	290	1 508	1 212 (80%)	296 (20%)	56.7
C	290	1 508	1 212 (80%)	296 (20%)	56.7
D	125	650	521 (80%)	129 (20%)	57.3
E	110	572	459 (80%)	113 (20%)	57.3

(*)Hypothèses de calcul : rendement de chaudière = 90%, PCI/PCS = 0,9 et contenu CO2 du gaz naturel = 234 g/kWh PCI

Les dimensions et performances des installations solaires de ces solutions sont les suivantes :

Îlot	Surface capteurs m ²	Volume stockage intersaisonnier m ³	Production solaire MWh/an	Productivité solaire kWh/(m ² .an)
A	1 670	6 500	709	424
B	2800	11 000	1 212	433
C	2 800	11 000	1 212	433
D	1 228	4 800	521	424
E	1 081	4 200	459	424

Un focus sur les performances de l'installation solaire pour l'îlot A (170 logements) est réalisé ci-après.

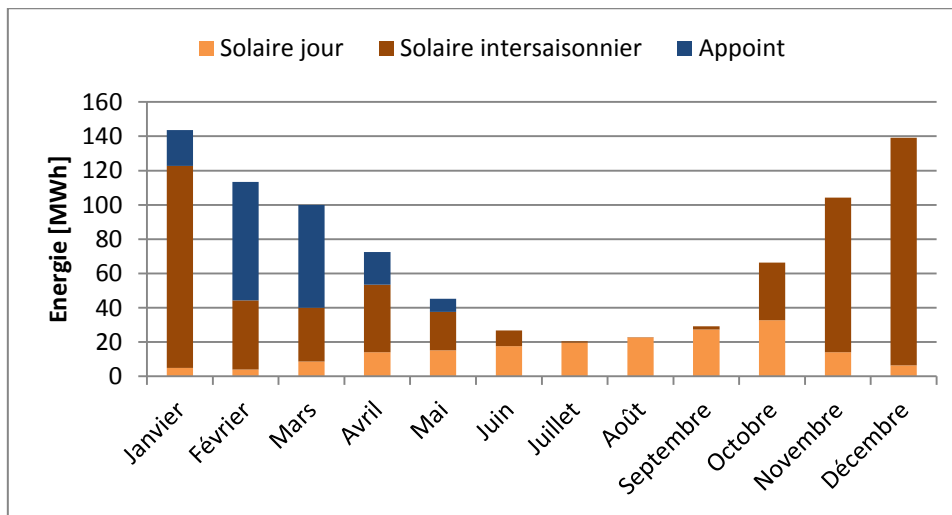


Figure 8 : Répartition mensuelle des énergies alimentant le réseau pour l'îlot A

Le diagramme suivant représente l'ensemble des énergies annuelles mises en jeu pour le cas de l'îlot A (170 logements).

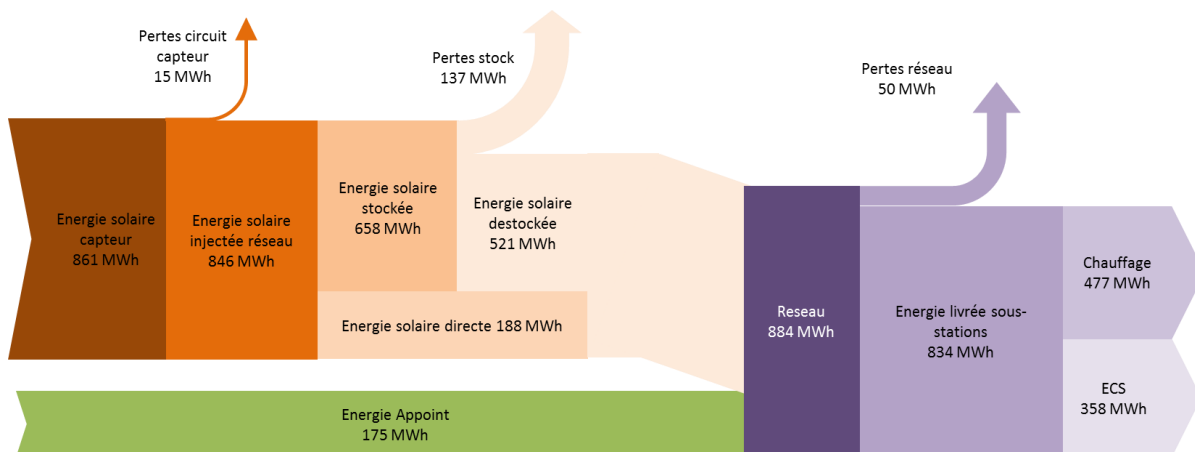


Figure 9 : Diagramme des flux d'énergie annuels du réseau de chaleur solaire de l'îlot A

C.2/ Focus sur le stockage d'énergie

Stockage en cuve de type TTES

L'objectif de taux de couverture solaire élevé (80%) fixé par la commune implique la mise en œuvre de stockage de grand volume permettant de déphaser la production du besoin d'énergie. Le stockage intersaisonnier à mettre en œuvre pour les différents îlots est repris dans le tableau suivant ainsi qu'un ordre de grandeur des dimensions :

Îlot	Volume stockage intersaisonnier m ³	Dimensions
		Hauteur (m) x diamètre hors isolation (m)
A	6 500	H15 x D24
B	11 000	H23 x D25 ou 2 cuves de H15 x D21
C	11 000	H23 x D25 ou 2 cuves de H15 x D21
D	4 800	H12 x D22
E	4 200	H12 x D21

La présence d'une nappe d'eau souterraine de faible profondeur limite la possibilité d'enterrer les stockages afin de limiter leur impact visuel au sein du quartier. Il est donc important d'intégrer au mieux ces stockages dans leur environnement.

Les photos suivantes illustrent des propositions d'intégration architecturale des stockages solaires :



Bureaux autour d'un stockage (Allemagne)



Silo réhabilité habillé de logement (Copenhague)



Silo végétalisé parking Lyon Perrache (France)



Habillé d'un mur d'escalade

Variante : stockage en sonde géothermique (BTES)

La solution de stockage d'énergie dans des sondes géothermiques pourrait être utilisée en variante à un stockage énergétique sensible sous forme de réservoir d'eau.

Le principe est d'envoyer la chaleur à haute température (95°C) dans le sous-sol (entre 30 et 100 m de profondeur) en période de surproduction (en été) et de la récupérer en période de sous production (en hiver).

La chaleur est restituée à une température plus basse (entre 65 et 25°C). Une pompe à chaleur est alors nécessaire à certaines périodes pour pouvoir valoriser la chaleur récupérée.

L'étude de données hydrogéologiques et hydrologiques a permis de déterminer qu'aucun forage n'a une profondeur supérieure à 24m. La non présence de forage de profondeur supérieure à 25 m semble indiquer que la présence d'eau sous cette profondeur est limitée voire inexistante. Ceci semble très intéressant pour la mise en œuvre de la solution de stockage géothermique.

Le champ géothermique serait donc composé de sondes de profondeur de 100 m avec les 30 premiers mètres isolés (pour éviter les pertes vers la nappe alluviale) pour stocker l'énergie entre une profondeur de 30 et 100 m.

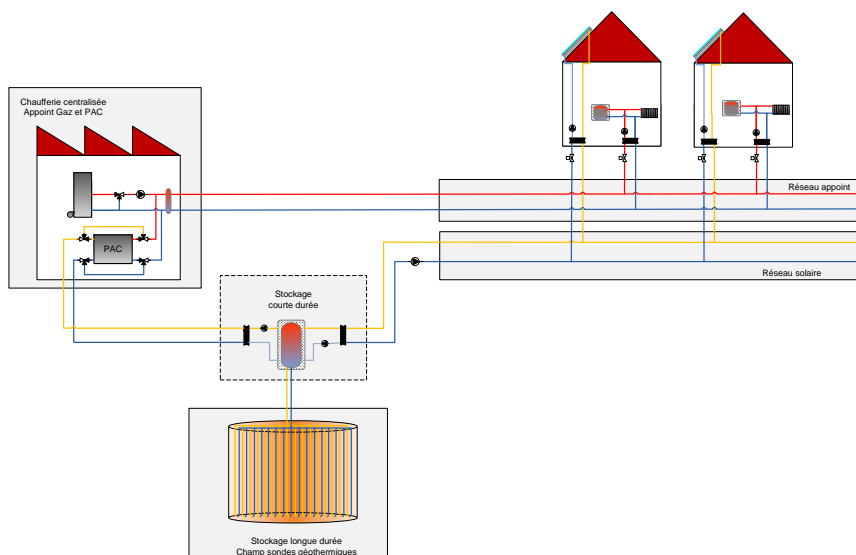


Figure 10 : Schéma de principe du réseau de chaleur solaire avec stockage en sonde géothermique

Une première estimation du dimensionnement du système pour le cas de l'îlot A aboutirait à un champ de 18 sondes de 70 mètres utiles couplé à une pompe à chaleur de 150 kW et stockage de 200m³.

La répartition des énergies par moyen de production est la suivante :

- Solaire : 80%
- Pompe à chaleur (Electricité) : 9%
- Appoint : 11%

C.3/ Bilan économique du réseau de chaleur solaire

La répartition des investissements en € hors TVA par poste est le suivant :

Ilot	Nb logement	Capteur k€HT		Stockage TTES k€HT		Appoint k€HT		Réseau k€HT		Total k€HT
A	170	835	40%	931	45%	59	3%	255	12%	2 080
B	290	1 400	44%	1297	41%	101	3%	366	12%	3 164
C	290	1 400	43%	1297	40%	101	3%	464	14%	3 262
D	125	614	38%	760	48%	44	3%	178	11%	1 596
R	110	540	37%	700	48%	39	3%	179	12%	1 458

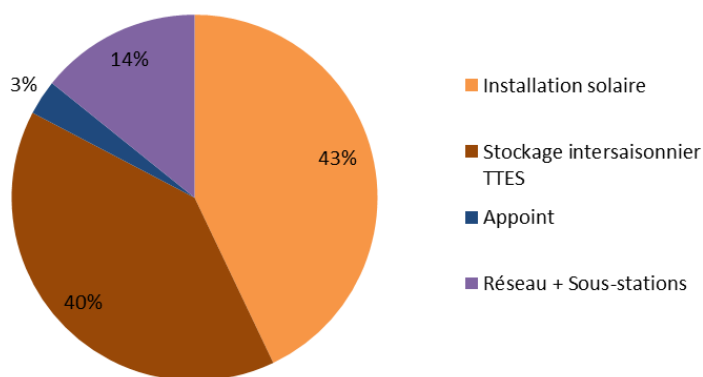


Figure 11 : Répartition des coûts d'investissement par poste pour l'îlot A

Le tableau suivant présente les montants d'investissement et les coûts d'exploitations sur 20 ans non actualisés, le coût global actualisé sur 20 ans, la production de chaleur sur 20 ans le projet et le LCOE en découlant.

Ilot	Nb logement	Investissement projet (CAPEX) k€ HT	Exploitation 20 ans (OPEX) k€ HT	Coût global actualisé ¹ 20 ans k€ HT	Production chaleur 20 ans MWh	LCOE projet € TTC ² /MWh
A	170	2 080	783	2 661	17 232	233
B	290	3 164	1 268	4 087	27 144	234
C	290	3 262	1 272	4 188	26 390	249
D	125	1 596	580	2 021	12 350	250
E	110	1 458	516	1 838	11 154	249

¹ : taux d'actualisation de 4% ; ² : TVA à 5.5%

Le financement des installations réseau de chaleur est réalisé par la vente de la chaleur produite. Pour les solutions énergies renouvelables, dont les coûts d'investissement sont élevés et ne sont pas compétitifs avec les solutions actuelles utilisant des énergies fossiles, des aides sont disponibles. Les calculs ont été faits pour deux scénarios suivants :

- Un LCOE de 150 € TTC/MWh, ce qui correspondrait à une « facture énergétique » par logement de l'ordre de 780 € TTC/an ;
- Un LCOE de 100 € TTC/MWh, ce qui correspondrait à une « facture énergétique » par logement de l'ordre de 520 € TTC/an ;

Le coût résiduel « restant à financer » permettant d'atteindre ces LCOE objectifs sont les suivants :

Ilot	Nb logement	LCOE projet € TTC/ MWh	Restant à financer pour un LCOE de 150 €/MWh		Restant à financer pour un LCOE de 100 €/MWh	
			k€ HT	€ HT /lgt	k€ HT	€ HT /lgt
A	170	233	927	5 455	1 489	8 756
B	290	234	1 445	4 982	2 296	7 919
C	290	249	1 639	5 652	2 460	8 484
D	125	250	793	6 340	1 189	9 510
E	110	249	717	6 516	1 079	9 809

Les pistes pour le « restant à financer » sont les suivantes :

- Aides à l'investissement pour le développement des EnR
- Prise en charge dans les coûts d'aménagement, en contre partie de terrains vendus « chauffés », dans le cadre d'une opération d'aménagement qui par ailleurs nécessite relativement peu d'équipements d'infrastructures publics

C.4/ Aperçu des modèles d'affaires possibles

Le montage juridique d'une telle solution doit prendre en compte les caractéristiques particulières du projet. Les risques techniques et financiers sont deux éléments très importants qui vont orienter la solution du montage.

Les solutions de financement proposées dans le paragraphe précédent montrent qu'il est indispensable que la collectivité prenne en charge dans la durée la maîtrise d'ouvrage du projet. Les deux principaux modes de gestion possible sont :

- la régie publique
- la délégation de service publique

Les DSP réseau de chaleur sont habituellement mise en place pour des contrats de fourniture de chaleur supérieure à 5GWh/an, ce qui n'est pas le cas ici. La régie publique semble donc le montage le plus approprié.

Auteurs

Cette étude a été réalisée par le CEA INES, les bureaux d'études TECSOL et INDDIGO ; en collaboration avec le groupement de bureaux d'études LIEUX-DITS (architecture et urbanisme) / PROGRAMMES-URBAINS (programmation urbaine et montage d'opération) / MDP (transport par câble) / Hélène SAUDECERRE (paysagiste) / HIS&O (hydraulique) / Altitudes VRD.

Cette fiche d'information a été préparée par CEA INES. Date : 14/05/2014

Cedric Paulus, CEA INES - Institut National de l'Energie Solaire
50, Avenue du Lac Léman, 73377 Le Bourget du lac, France
cedric.paulus@cea.fr, website : <http://www.ines-solaire.org> - <http://www.liten.fr>

Soutenu par :



Intelligent Energy Europe Programme
of the European Union

Le contenu de cette publication n'engage que la responsabilité de son auteur et ne représente pas nécessairement l'opinion de l'Union européenne. Ni l'EACI ni la Commission européenne ne sont responsables de l'usage qui pourrait être fait des informations qui y figurent.