



ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTALE
PROJET DE RENOUVELLEMENT URBAIN DES
GODARDES II
A RUEIL-MALMAISON (92)



ETUDE DE FAISABILITE SUR LE POTENTIEL DE
DEVELOPPEMENT EN ENERGIES RENOUVELABLES

JUIN 2020

AXENNE



MAITRE D'OUVRAGE **LOGIREP**
127 rue Gambetta
92154 SURESNES Cedex



PRESTATAIRE **AXENNE**
73, cours Albert Thomas
69 447 LYON Cedex 03
Tél. : 04 37 44 15 80



Version	Date de rendu	Nature de la modification	Auteurs
1	Septembre 2019	Rendu initial	M.DUPLUS
2	Juillet 2020	Corrections	M.DUPLUS

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
PRESENTATION DU SITE	6
1 CONTEXTE	6
2 PROGRAMMATION	7
3 PHASAGE – PERFORMANCE DES BATIMENTS	8
4 BATIMENTS EXISTANTS A PROXIMITE	8
OPPORTUNITÉ DE RÉSEAUX DE CHALEUR OU DE FROID	9
1 BESOINS ENERGETIQUES	9
2 OPPORTUNITE DE RESEAU DE CHALEUR OU DE FROID	11
CONSOMMATIONS D’ELECTRICITE	12
1 BESOINS ENERGETIQUES DES BATIMENTS	12
1.1 ESTIMATION DES CONSOMMATIONS	12
1.2 COURBES DE CHARGE ET AUTOCONSOMMATION	12
2 BESOINS ENERGETIQUES	13
2.1 ÉCLAIRAGE PUBLIC	13
2.2 BORNES DE RECHARGE POUR VEHICULES ELECTRIQUES	13
3 ATTEINTE DU NIVEAU BEPOS	14
3.1 AU NIVEAU DES BATIMENTS	14
3.2 AU NIVEAU DU QUARTIER	15
PRECONISATIONS POUR LIMITER LES IMPACTS ENERGETIQUES DU PROJET	16
1 PISTES D’ACTIONS POUR LA MAITRISE DE L’ENERGIE ET LA SOBRIETE ENERGETIQUE	16
1.1 ORIENTATION ET BIOCLIMATISME	16
1.2 PERFORMANCE ENERGETIQUE DU BATIMENT	17
2 RECOMMANDATIONS POUR FAVORISER L’INTEGRATION DES ENR DANS LA CONCEPTION	18
2.1 DENSITE DU BÂTI ET RESEAUX DE CHALEUR	18
2.2 MODULES PHOTOVOLTAÏQUES	18
3 LES SMART-GRIDS	19
3.1 BATIMENT INTELLIGENT	19
3.2 QUARTIER INTELLIGENT	20
3.3 LE STOCKAGE D’ELECTRICITE	20
GISEMENT DISPONIBLE EN ENERGIES RENOUVELABLES ET DE RECUPERATION	21

1	FILIERES DE PRODUCTION D'ENERGIE THERMIQUE	21
1.1	ÉNERGIE SOLAIRE	21
1.2	BIOMASSE COMBUSTIBLE	26
1.3	GEO THERMIE	33
1.4	HYDROTHERMIE	37
1.5	AEROTHERMIE	41
1.6	RECUPERATION DE CHALEUR SUR EAUX USEES	42
1.7	CHALEUR FATALE	48
1.8	RACCORDEMENT A UN RESEAU DE CHALEUR EXISTANT	48
2	FILIERES DE PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE	50
2.1	ÉNERGIE SOLAIRE	50
2.2	ÉNERGIE EOLIENNE	51
2.3	HYDROELECTRICITE	54
2.4	ENERGIES MARINES	54
3	FILIERE DE PRODUCTION DE BIOGAZ	55
3.1	BIOMASSE METHANISABLE	55
4	RECAPITULATIF DES POTENTIALITES DU SITE	57
<u>ENERGIES RENOUVELABLES ET SYSTEMES ADAPTES A L'OPERATION</u>		58
1	LES DIFFERENTS SYSTEMES ADAPTES	58
2	SOLUTIONS PERTINENTES POUR LE PROJET	59
<u>ANNEXES</u>		60
A.	METHODOLOGIE POUR EVALUER LA PERTINENCE D'UN RESEAU DE CHALEUR	60
B.	DEFINITION DES ENERGIES DITES UTILES, FINALES, PRIMAIRES	61
C.	METHODOLOGIE POUR L'ESTIMATION DES BESOINS ENERGETIQUES	63
D.	PRESENTATION DE LA REGLEMENTATION THERMIQUE 2012 ET DES LABELS EFFINERGIE	68
E.	LES BATIMENTS A ENERGIE POSITIVE (BEPOS) – LE REFERENTIEL ENERGIE CARBONE (E+C-)	74
F.	PRESENTATION DES SYSTEMES THERMIQUES INDIVIDUELS	78
G.	PRESENTATION DES SYSTEMES THERMIQUES EN RESEAU	88
H.	PRESENTATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE	93

INTRODUCTION

Le Grenelle I, dans son article 8, a modifié le code de l'urbanisme (article L.128-4) afin de rendre obligatoire « une étude de faisabilité sur le potentiel de développement en énergies renouvelables de la zone, en particulier sur l'opportunité de la création ou du raccordement à un réseau de chaleur ou de froid ayant recours aux énergies renouvelables et de récupération » pour toute action ou opération d'aménagement telle que définie à l'article L.300-1 et faisant l'objet d'une étude d'impact.

Cette étude de faisabilité sur le potentiel de développement des énergies renouvelables doit permettre d'analyser les atouts et contraintes de l'opération pour la valorisation du potentiel en énergies renouvelables (EnR) du territoire d'implantation de la zone d'aménagement. Il sera ainsi possible d'optimiser le recours aux énergies renouvelables afin de diminuer le recours aux énergies traditionnelles et fossiles et d'envisager au plus tôt dans le projet d'aménagement le raccordement ou la création de réseaux de chaleur et / ou de froid.

À l'issue de cette étude, le LOGIREP disposera d'éléments d'aide à la décision pour optimiser le recours aux énergies renouvelables compte tenu des priorités et choix d'aménagement.

PRESENTATION DU SITE

1 CONTEXTE

LOCALISATION

Le projet de renouvellement urbain des Godardes se situe au sud-est de Rueil-Malmaison sur les coteaux du Mont Valérien. Il est délimité par l'avenue Président Pompidou au nord et la rue du 18 juin 1940 au sud. L'ensemble du site représente une zone de 3,4 ha.

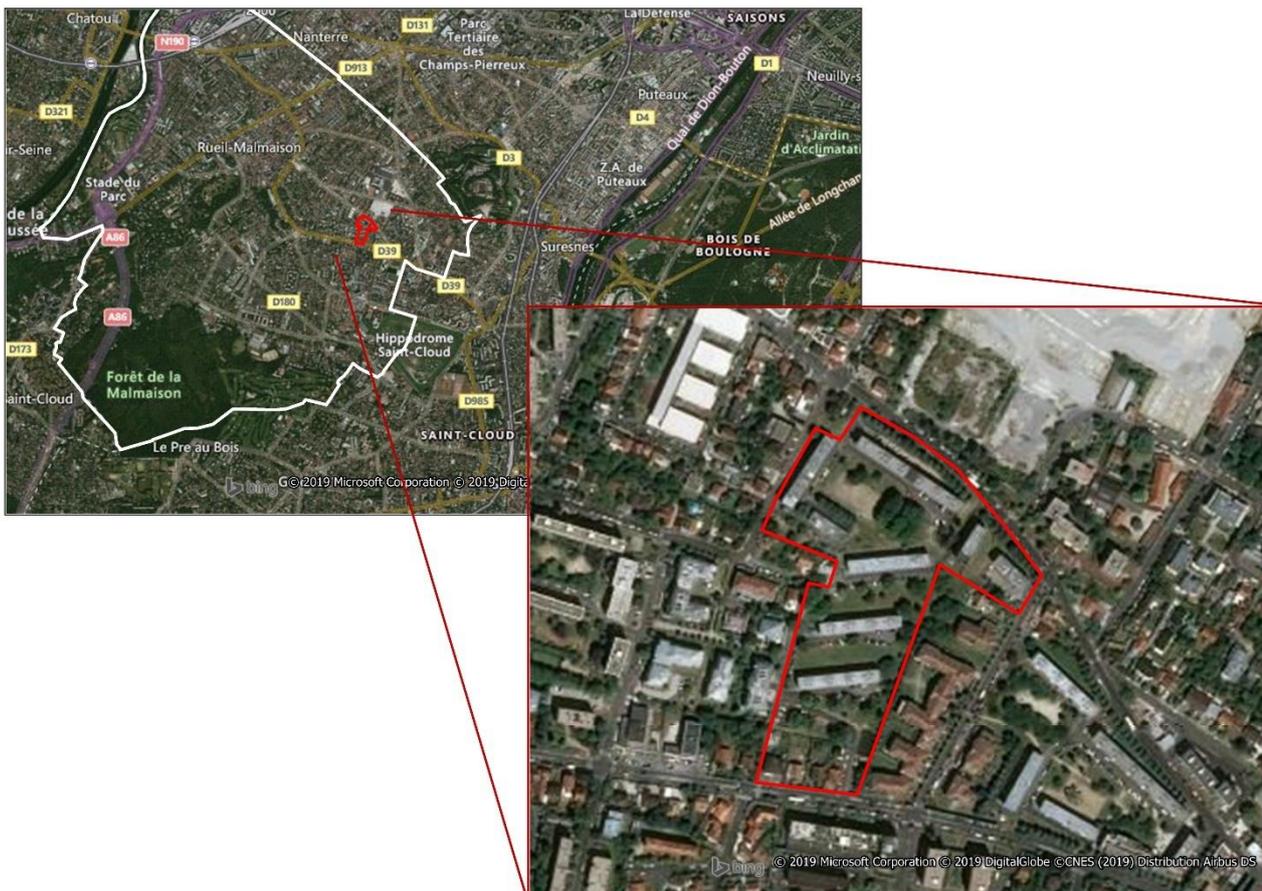


Figure 1 : Vue aérienne du site des Godardes II

ACCESSIBILITE

Le site sera desservi par l'avenue Président Pompidou au nord et la rue du 18 juin 1940 au sud.

TOPOGRAPHIE

L'altitude du site se situe entre 90 et 70 m ; le site présente une forte déclivité orientée vers le Sud

OCCUPATION DU SOL

Le site est actuellement occupé par plusieurs ensembles de logements collectifs qui seront démolis.

2 PROGRAMMATION

La programmation prise en compte est issue des travaux du groupement Ateliers 2/3/4/, EGIS V&T et TERRE Eco et date de juillet 2019. Elle comprend 13 bâtiments de logements collectifs regroupés en 8 lots pour un total de 489 logements et 30 060 m² de SDP. Certains lots correspondent à la réhabilitation d'anciens immeubles existants (L3, L5 et L6).



Figure 2 : Programmation du projet des Godardes II

3 PHASAGE – PERFORMANCE DES BATIMENTS

Les bâtiments neufs verront vraisemblablement leurs PC déposés après 2020 et respecteront par conséquent la future réglementation 2020 qui devrait imposer l'atteinte d'un niveau « énergie positive » dont les modalités ne sont pas encore connues mais dont le calcul devrait se rapprocher du label expérimental Énergie Carbone (E+C-) qui sera pris comme référence. La performance thermique des bâtiments est considérée conforme au label Effinergie + en ce qui concerne les besoins de chaleur et de froid.

Pour les bâtiments réhabilités, on considère une rénovation de type BBC et une performance conforme à la RT 2012.

La définition et les hypothèses prises en compte pour les labels et réglementations mentionnés sont décrites aux annexes D et E.

4 BATIMENTS EXISTANTS A PROXIMITE

Cette partie s'intéresse aux bâtiments existants aux alentours de la zone, ainsi qu'aux projets proches : en effet, ces bâtiments peuvent agir comme levier au développement de réseaux de chaleur, en améliorant la densité thermique et donc la rentabilité de réseaux potentiels.

Aux abords du site on trouve une majorité d'habitats collectifs et individuels. Le projet est également contigu avec la ZAC de l'Arsenal, actuellement en cours de construction. Ce projet d'aménagement devrait à terme compter 250 000 m² de surface de plancher regroupant des logements, des bureaux, commerces et équipements dont une future gare de Métro. Les travaux de voiries et réseaux ont débuté en 2018 et les livraisons s'échelonneront entre 2020 et 2032.

OPPORTUNITÉ DE RÉSEAUX DE CHALEUR OU DE FROID

L'objectif de ce paragraphe est de calculer en première approche la densité énergétique du site afin de statuer sur la pertinence d'un réseau de chaleur. Dans l'affirmative, les solutions proposées intégreront cette potentialité. Dans la négative, les solutions proposées utiliseront uniquement des installations à l'échelle du bâtiment.

La création d'un réseau de chaleur raccordant tous ou une partie des bâtiments présente en effet plusieurs intérêts :

- Mutualisation de l'investissement : dans la mesure où la densité de consommation d'énergie est suffisante, la création d'un réseau permet de réduire les coûts liés aux équipements de production de chaleur en les mutualisant. Le calcul de la densité énergétique permet d'étudier la rentabilité de cette solution qui représente des coûts supplémentaires liés au réseau par rapport à un ensemble de solutions collectives.
- Mutualisation de l'exploitation (maintenance, approvisionnement, etc.).
- Création d'un service public de l'énergie : le réseau peut être porté par la collectivité qui assure ainsi un service de fourniture de chaleur à l'ensemble du quartier à un prix stable et équivalent pour tous les occupants.

D'autre part, le réseau créé sur le site peut être étendu aux bâtiments existants aux alentours ou aux futurs bâtiments qui verront le jour aux abords du site. Ces bâtiments bénéficieront ainsi d'une énergie issue de sources renouvelables dont les coûts sont mutualisés. Cette extension permettra également d'accroître la densité énergétique du réseau de chaleur (en particulier pour les bâtiments existants dont les consommations sont plus importantes) et contribuera à améliorer le bilan économique du réseau créé.

La méthodologie employée pour déterminer l'opportunité d'un réseau de chaleur est décrite en annexe A.

1 BESOINS ENERGETIQUES

Les consommations finales d'énergie des bâtiments ont été calculées en supposant que le réseau de chaleur envisagé a un contenu CO₂ inférieur à 50 grammes par kilowattheure. Ce réseau de chaleur couvre les besoins de chauffage de tous les bâtiments, ainsi que les besoins en eau chaude sanitaire des logements (les besoins en eau chaude sanitaire des commerces et des bureaux sont trop faibles pour envisager une mutualisation ; ils sont couverts par des équipements indépendants électriques à semi-accumulation).

La méthodologie employée pour l'estimation des besoins énergétiques est décrite en annexe C.

Les consommations de chaleur et de froid de l'ensemble des bâtiments sont de 1 710 MWh_{ef} par an :

- 1 350 MWh_{ef} par an pour le chauffage et les auxiliaires,
- 360 MWh_{ef} par an pour l'eau chaude sanitaire.

Par défaut on considère que les logements n'ont pas de besoins de froid liés à la climatisation. Le confort d'été doit être assuré par une conception bioclimatique des bâtiments.

La densité de consommation d'énergie finale, c'est-à-dire les consommations d'énergie finale ramenées à la surface au sol du lot, est illustrée sur la carte suivante. Cet indicateur permet de visualiser les lots les plus intéressants à raccorder à un réseau de chaleur, et ceux qui consomment trop peu d'énergie au vu de leur taille pour que leur desserte par un réseau soit intéressante.

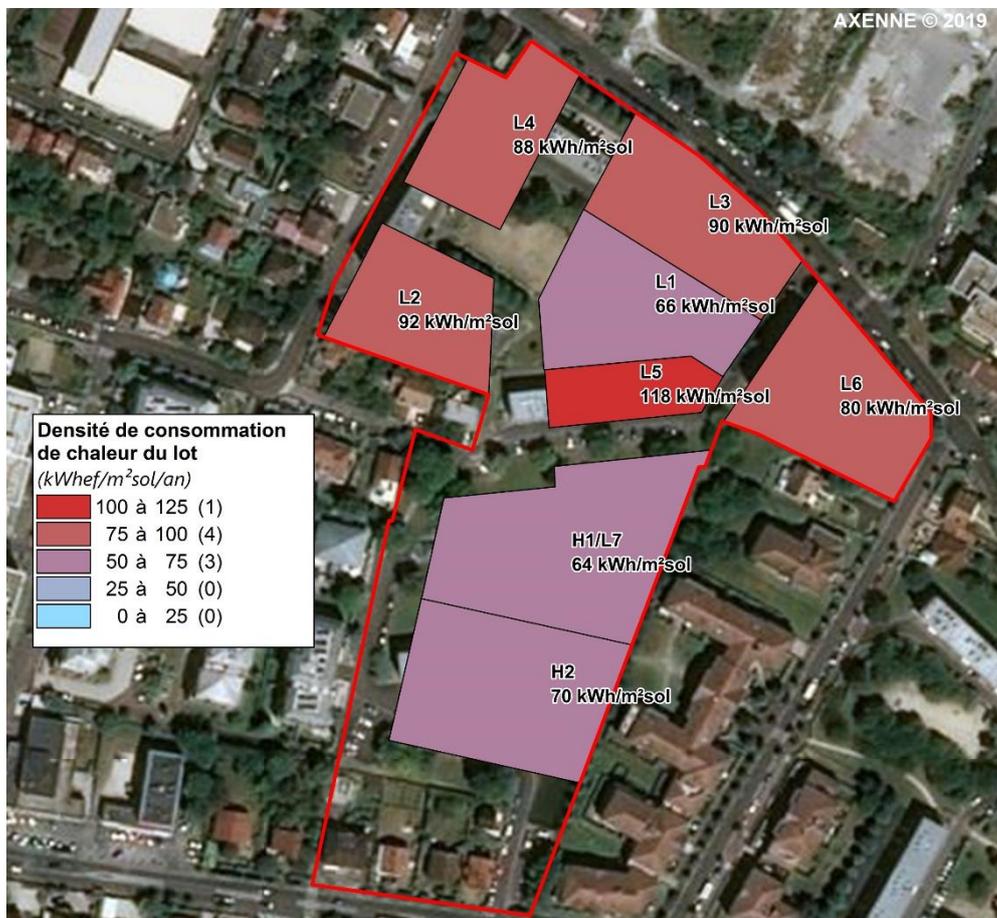


Figure 3 : Densité de consommation d'énergie finale pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire des bâtiments par lot

Les lots présentant les densités les plus importantes sont ceux qui présente la plus grande densité de construction : L5 puis L2, L3, L4 et L6.

2 OPPORTUNITE DE RESEAU DE CHALEUR OU DE FROID

RESEAUX POTENTIELS SUR LE SITE

Au vu des consommations calculées précédemment, il n'y a pas de disparités importantes en termes de densité de consommations qui justifierait de raccorder certains bâtiments et pas d'autres à un réseau de chaleur. Le réseau envisagé alimente par conséquent l'ensemble des bâtiments.

Le réseau de chaleur présenté couvre les besoins de chauffage ainsi que les besoins en eau chaude sanitaire de l'ensemble des bâtiments.

La longueur du réseau envisagé présente une longueur d'environ 590 ml. Au vu des consommations en énergie retenues et des longueurs des tracés, le réseau de chaleur potentiel présente une densité énergétique de 2,90 MWh_{ef}/ml.an.

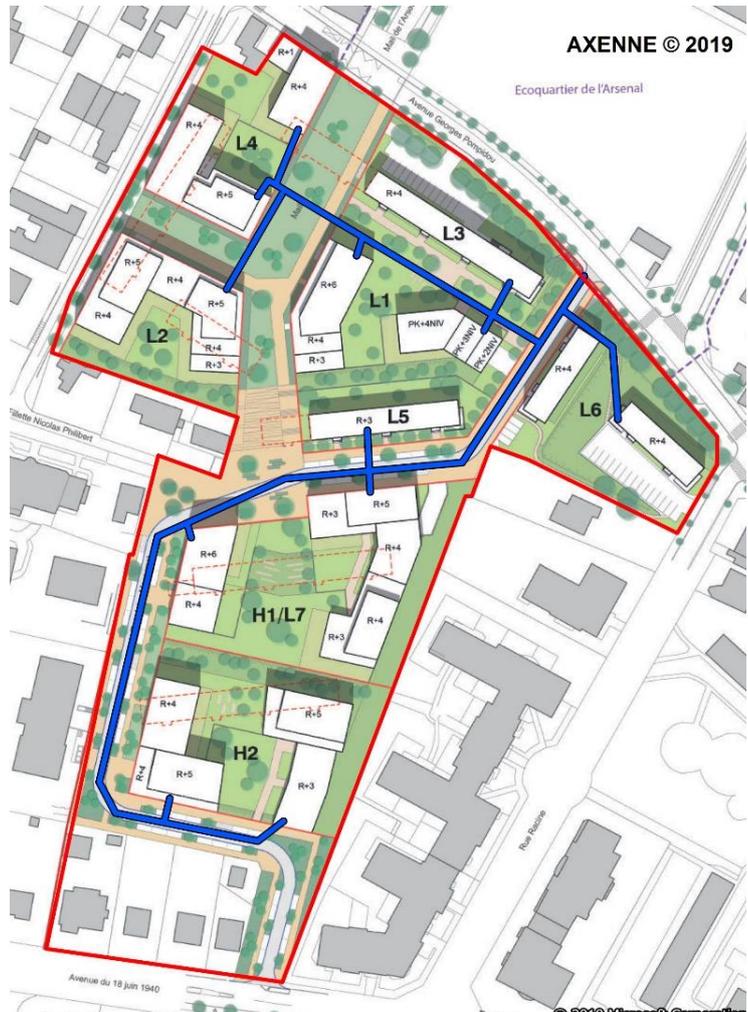


Figure 4 : Tracé et extensions du réseau de chaleur potentiel

La densité énergétique thermique trouvée est suffisante pour envisager un réseau de chaleur ; elle est en effet supérieure au seuil imposé pour bénéficier du Fonds Chaleur (la densité énergétique minimum demandée par l'ADEME pour bénéficier du Fonds Chaleur est de 1,7 MWh_{ef}/m/an). Des études plus poussées, notamment économiques, seront nécessaires pour confirmer l'intérêt économique d'une telle opération ; pour cela, il faudra d'abord définir quelles énergies et quels systèmes peuvent alimenter ce réseau de chaleur.

L'utilisation d'une partie de ce réseau pour rafraîchir les bâtiments concernés n'a pas été envisagée ici. En effet, les besoins de rafraîchissement sont considérés comme nuls sur l'ensemble des bâtiments de logement.

PERTINENCE D'UN RESEAU DE CHALEUR OU DE FROID

La mise en place d'un réseau de chaleur sur l'ensemble des bâtiments semble intéressante en première approche. Des études plus poussées seront nécessaires pour confirmer l'intérêt économique d'une telle opération ; pour cela, il faudra d'abord définir quelles énergies et quels systèmes peuvent alimenter ce réseau de chaleur.

CONSOMMATIONS D'ÉLECTRICITE

1 BESOINS ENERGETIQUES DES BATIMENTS

1.1 ESTIMATION DES CONSOMMATIONS

La consommation électrique des bâtiments est envisagée à 990 MWh_{ef}/an. Cette consommation correspond aux besoins pour la cuisson, l'éclairage et les usages mobiliers, ainsi que les parties communes (ascenseurs, parkings et éclairage), à laquelle s'ajoute une part de la consommation de chaleur si celle-ci est produite par des solutions électriques (ce qui n'est pas le cas ici puisqu'on considère un réseau de chaleur) et la consommation de la climatisation lorsqu'elle existe.

La méthodologie employée pour l'estimation des besoins énergétiques est décrite en annexe C.

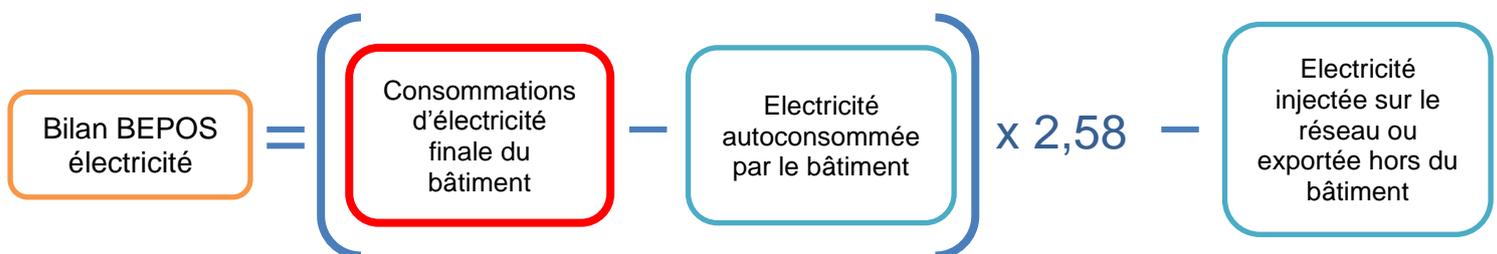
Cuisson	Elec spécifique	Eclairage	Parties communes	Total élec
310 MWh _{ef}	510 MWh _{ef}	90 MWh _{ef}	80 MWh _{ef}	990 MWh _{ef}
31%	52%	9%	8%	100%

Figure 5 : Récapitulatif des consommations finales d'électricité par type de bâtiment

1.2 COURBES DE CHARGE ET AUTOCONSOMMATION

Le label E+C- considère que l'électricité produite par le bâtiment et autoconsommée par celui-ci est déduite du bilan d'énergie primaire. Cela a pour conséquence de beaucoup limiter les consommations réglementaires du bâtiment, en effet, l'électricité est affectée d'un facteur 2,58 en énergie primaire et augmente par conséquent beaucoup le bilan. Ainsi, le label encourage l'autoconsommation d'électricité par le bâtiment lui-même.

A l'inverse l'électricité injectée sur le réseau ou autoconsommée par ailleurs sur le site est déduite directement du bilan en énergie primaire, elle a par conséquent un impact moins important sur la consommation de celui-ci.



La part d'électricité produite par le bâtiment qui est autoconsommée dépend de la courbe de charge des différents usages et de la production. La part d'électricité autoconsommée pour chaque usage et chaque typologie est définie par le label E+C- (voir Annexe E).

2 BESOINS ENERGETIQUES

2.1 ÉCLAIRAGE PUBLIC

Les rues et venelles devront être équipées d'éclairage public, source de consommation d'électricité.

Le calcul de la consommation d'énergie liée à l'éclairage public des voies est basé sur les hypothèses suivantes :

- Type de lampes : LED - plus chère, mais moins consommatrices et ayant une durée de vie plus longue.
- Régime d'éclairage réduit (éteint entre minuit et 5 h) pour les voies piétonnes et les parkings et normal pour la rue principale.

Nom de la voie	Longueur	Type de lampe	Régime d'éclairage	Puissance installée	Energie consommée annuellement
Voies piétonnes et stationnements	400	LED	Réduit	1,86 kW	4,28 MWh
Rue Jules Massenet	400	LED	Normal	1,59 kW	6,54 MWh
TOTAL				3,46 kW	10,82 MWh

La longueur totale des voiries à créer est d'environ 800 ml. Finalement, la consommation d'électricité liée à l'éclairage public se montera à environ **11 MWh/an**.

2.2 BORNES DE RECHARGE POUR VEHICULES ELECTRIQUES

Le développement des véhicules électriques et hybrides rechargeables est encouragé au niveau national. La réglementation impose aux nouveaux bâtiments tertiaires et de logements collectifs d'équiper un nombre de places minimum pour la recharge de véhicules électriques. Ce développement va causer des consommations d'électricité supplémentaires.

Dans cette perspective, le calcul des appels de puissance et des consommations d'électricité qui peuvent être attendus au niveau du projet a été réalisé. Il se base sur un certain nombre d'hypothèses :

- Nombre de places de stationnement prévues (données de programmation),
- Taux de pénétration des véhicules électriques et hybrides rechargeables dans le parc de véhicules, en fonction de l'année considérée. Ce taux a été estimé à partir des objectifs nationaux à 2025 à 5% du parc automobile (Sources : Programmation Pluriannuelle de l'Energie)
- Distance parcourue par jour par les particuliers : distance moyenne parcourue par déplacement en voiture multipliée par le nombre moyen de déplacements en voiture par jour et par personne (source : Livre Vert),
- Consommation moyenne d'un véhicule électrique par kilomètre sur une année (source : statistiques des véhicules en circulation),
- Puissance de la charge : pour des logements, on considère une charge lente appelant une puissance électrique de 3,7 W.

Le nombre de places de parkings est connu pour 559. Finalement, la consommation d'électricité liée à la recharge des véhicules électriques se montera en 2025 à environ **32 MWh/an pour une puissance appelée de 890 kW** (lorsque tous les véhicules se rechargent en même temps).

Nom du Parking	Année de fonctionnement	Type de stationnement	Nombre de places	Puissance appelée (kW)	Electricité consommée par an (MWh)
Parkings des logements	2025	Logement	559	89	32

3 ATTEINTE DU NIVEAU BEPOS

3.1 AU NIVEAU DES BATIMENTS

A l'échelle des bâtiments, en particulier ceux dont le permis de construire sera déposé après 2020, l'atteinte d'un niveau BEPOS, c'est-à-dire « bâtiment à énergie positive » est conditionnée par la mise en œuvre d'une production d'électricité au niveau du bâtiment. Cette production devra alors couvrir les besoins d'électricité du bâtiment ainsi que les consommations de chaleur issues de sources non renouvelables (appoint).

Le label E+C- définit ainsi 4 niveaux ENERGIE 1 à ENERGIE 4 qui conditionne le bilan énergétique de chaque bâtiment. Ce bilan énergétique correspond à l'ensemble des consommations d'énergie non renouvelable du bâtiment auxquels on retranche l'ensemble des productions d'électricité réalisée à l'échelle du bâtiment¹.

- Les niveaux ENERGIE 1 à 3 imposent une consommation maximale dégressive pour l'ensemble des usages.
- Le niveau ENERGIE 3 impose en plus une production électrique minimale.
- Le niveau ENERGIE 4 impose quant à lui un bilan neutre.

Le tableau ci-dessous compare les 4 seuils du label E+C- au bilan des consommations estimées pour chaque typologie sur le projet (dans le cadre d'un réseau de chaleur ayant un contenu carbone < 50 gCO₂/kWh (alimenté à 77% par des EnR&R et un appoint gaz) et couvrant les besoins de chauffage et d'ECS.

	Consommations d'énergie primaire	Bilan BEPOS max ENERGIE 1	Bilan BEPOS max ENERGIE 2	Bilan BEPOS max ENERGIE 3	Bilan BEPOS max ENERGIE 4
Appartement neufs	98 kWhep/m ²	139 kWhep/m ²	133 kWhep/m ²	110 kWhep/m ²	-
Appartement rehab	103 kWhep/m ²	144 kWhep/m ²	137 kWhep/m ²	114 kWhep/m ²	-
TOTAL	2 954 MWhep/an	4 202 MWhep/an	4 006 MWhep/an	3 308 MWhep/an	0 MWhep/an

On remarque que sur la base des hypothèses prise en compte (performance du label Effinergie+ pour les logements neufs) les niveaux ENERGIE 1 à 3 sont atteints sans production supplémentaire pour tous les logements.

Le niveau ENERGIE 4 nécessite quant à lui une production systématique puisqu'il implique un bilan neutre en énergie primaire. Toutefois, ce niveau peut être atteint par d'autres moyens :

- En réduisant davantage les consommations d'énergie des différents postes et en particulier la consommation d'électricité ;
- En ayant recours à d'autres sources d'énergie. En effet, on considère ici un réseau de chaleur alimenté à 77% par des EnR&R. Dans le cas d'une chaudière bois on atteint ainsi généralement 85% d'EnR avec un appoint et 100% sans appoint ;
- En maximisant la production d'électricité : via des chaudières à cogénération, du photovoltaïque en façade ou en brise-soleil, de l'éolien en toiture, et en maximisant l'autoconsommation.

On ne sait pas à l'heure actuelle, ce que la future réglementation thermique retiendra comme niveau d'exigence. Pour l'heure, Effinergie a de son côté lancé 3 labels BBC2017, BEPOS2017 et BEPOS+2017 qui correspondent respectivement aux niveaux ENERGIE 2, 3 et 4.

¹ Rappelons que l'électricité autoconsommée par le bâtiment est mieux valorisée que l'électricité exportée : voir 1.2

3.2 AU NIVEAU DU QUARTIER

Le label E+C- s'intéresse à l'atteinte du niveau « Bâtiment à énergie positive » en limitant le bilan production/consommation à l'échelle du bâtiment. Cette approche ne permet pas de prendre en compte les possibilités de mutualisation qui existent à l'échelle plus large du quartier.

Sur la base des hypothèses précédentes, les consommations électriques s'élèvent ainsi à environ 933 MWh/an, dont :

- 900 MWh/an pour les bâtiments ;
- 11 MWh/an pour l'éclairage public ;
- 32 MWh/an pour la recharge des véhicules.

La production envisageable par des panneaux photovoltaïques sur l'ensemble des toitures des bâtiments est de l'ordre de 860 MWh/an (voir page 50).

Dans une approche strictement annuelle des consommations d'électricité, le bilan production moins consommation d'électricité est donc négatif de 83 MWh/an. Toutefois, dans une approche « Quartier à énergie positive », il faut prendre en compte la part d'électricité produite qui peut être réellement autoconsommée sur le quartier et celle qui sera injectée sur le réseau. Le taux d'autoconsommation dans les bâtiments est estimé à 21 % en moyenne (voir Annexe C), le taux d'autoconsommation par l'éclairage est de 0, et le taux d'autoconsommation pour la charge des véhicules est estimé à 5 % (recharge nocturne majoritaire).

Selon ces hypothèses la part de la production autoconsommée s'élève à 20 % soit 191 MWh/an.

Le bilan global est alors de 742 MWh/an supplémentaires consommés et de 669 MWh exportés sur le réseau. En énergie primaire, cette énergie n'est pas comptabilisée de la même manière, l'énergie consommée depuis le réseau électrique étant multipliée par un coefficient 2,58. Le bilan en énergie primaire de l'électricité s'élève ainsi à 1 245 MWh_{ep}/an d'électricité consommée.

Bilan énergie primaire :

933 – 191 = 742 MWh_{ef}/an d'électricité consommés, soit 1 914 MWh_{ep}/an

669 MWh_{ef}/an d'électricité injectée sur le réseau, soit 669 MWh_{ep}/an

1 245 MWh_{ep}/an consommés



A ce bilan électrique il faut ajouter la consommation d'énergie primaire d'énergie fossile non électrique (ici la part d'énergie non renouvelable alimentant le réseau de chaleur), soit 576 MWh_{ep}/an². Ce qui représente un bilan final de 1 821 MWh_{ep}/an.

Toutefois, ce bilan peut être réduit par d'autres moyens :

- En réduisant davantage les consommations des différents postes et en particulier la consommation d'électricité ;
- En ayant recours à d'autres sources d'énergie. En effet, on considère ici un réseau de chaleur alimenté à 77% par des EnR&R. Dans le cas d'une chaudière bois on atteint ainsi généralement 85% d'EnR avec un appoint et 100% sans appoint ;
- En maximisant la production d'électricité : via des chaudières à cogénération, du photovoltaïque en façade ou en brise-soleil, de l'éolien en toiture, et en maximisant l'autoconsommation.

² On considère un réseau de chaleur alimenté à 77% par des EnR&R (voir page 12) qui couvre les besoins de chaleur à hauteur de 1710 MWh_{ef}/an (voir page 14) soit une consommation d'énergie fossile de 564 MWh_{ef}/an et 576 MWh_{ep}/an (gaz naturel avec un rendement du réseau de 98%).

PRECONISATIONS POUR LIMITER LES IMPACTS ENERGETIQUES DU PROJET

1 PISTES D' ACTIONS POUR LA MAITRISE DE L'ENERGIE ET LA SOBRIETE ENERGETIQUE

1.1 ORIENTATION ET BIOCLIMATISME

L'enjeu d'une architecture dite « bioclimatique » est de tirer le meilleur parti des caractéristiques du site et de son environnement pour aboutir à un bâtiment naturellement confortable pour ses utilisateurs et peu onéreux dans son fonctionnement. D'un point de vue énergétique, ce type d'architecture permet de réaliser des économies à plusieurs niveaux :

- Grâce à la réduction des besoins de chauffage en hiver en maximisant les apports solaires ;
- Grâce à la réduction des besoins de rafraîchissement en été en limitant les apports solaires et en favorisant la circulation d'air, le rafraîchissement des ambiances, etc.
- Grâce à la réduction des consommations de ventilation grâce à l'utilisation des courants d'air naturels ;
- Grâce à la réduction des consommations d'éclairage grâce à une optimisation des apports de lumière naturelle.

Ces économies d'énergie sont l'occasion d'autant d'économies financières pour l'utilisateur et peuvent également engendrer des économies d'investissement dans le dimensionnement des équipements.

En phase de conception, les principales dispositions qui devront être prises concernent :

- L'orientation : on privilégiera une orientation est-ouest du bâti de manière à positionner les plus grandes façades au sud et profiter ainsi des apports solaires.
- L'organisation des espaces : favoriser les appartements traversants bénéficiant d'une double exposition, disposer les lieux de vie diurnes entre sud-est et sud-ouest et les salles de bains, toilettes et chambres entre nord-est et nord-ouest, ne pas prévoir d'appartements uniquement orientés au nord.
- L'utilisation de l'environnement : on prendra en compte les ombres générées par le relief et la végétation, la circulation de l'air et la protection face aux vents dominants sur les besoins énergétiques du bâtiment.
- La création de végétation et de zones humides pour favoriser le rafraîchissement des ambiances et l'ombre en été. On tâchera de limiter les zones artificialisées à proximité des bâtiments. Mise en place de toitures végétalisées.
- Pour favoriser le confort d'été : création de protections solaires extérieures (brise-soleil, pergola, débord de toiture, avancée architecturale, etc.) adaptées à l'orientation des ouvertures vitrées ; complétées avec des protections mobiles extérieures (volets, stores à projection, etc.). Choisir des revêtements de façades de couleur claire.

1.2 PERFORMANCE ENERGETIQUE DU BATIMENT

La performance énergétique d'un bâtiment ne se réduit pas au seul respect de la réglementation thermique en vigueur.

D'une part il est possible d'aller plus loin que cette réglementation en termes de performance pure, par le respect de labels (Effinergie notamment) ou par l'atteinte de seuil de performance ambitieux pour les constructions neuves (le niveau imposé par la future réglementation RE 2020 n'est pas encore connu mais il devrait se limiter aux recommandations de la RT 2012 en termes de performance et imposé un niveau de performance globale – bilan énergie consommée et produite – proposé par l'expérimentation Energie + Carbone -) ou les rénovations.

D'autre part, un certain nombre de bonnes pratiques peuvent être favorisées afin de garantir une performance effective des bâtiments correspondants aux valeurs théoriques envisagées :

- Dans le cas d'un chauffage collectif, réguler le fonctionnement de la chaudière en fonction de la température extérieure, et prévoir un ralenti de nuit ce qui permet de faire des économies sur l'électricité consommée par le circulateur.
- Mettre en place un comptage individualisé des consommations pour chaque appartement et pour chaque usage (chauffage, eau chaude sanitaire, électricité) et installer un programmeur performant par logement, accompagné de son mode d'emploi. Ces recommandations permettent aux usagers de visualiser et de pouvoir agir directement sur leurs consommations.
- Choisir des matériaux d'isolation permettant une bonne inertie thermique, si possible biosourcés, et privilégier une isolation par l'extérieure sans ponts thermiques (désolidariser les balcons et terrasses de la structure, ou les équiper de rupteurs de ponts thermiques).
- Installer un système de ventilation mécanique contrôlée (VMC) dit double-flux, dont l'échangeur aura une efficacité nominale de 90% au minimum. Choisir des conduits rigides (et non souples). Prévoir des débits variables afin de permettre une surventilation nocturne en été.
- Installer un ou plusieurs interrupteurs muraux à l'entrée du logement commandant les prises destinées au matériel audiovisuel et informatique.
- Choisir des ascenseurs à contrepoids, avec variateur de vitesse, sans réducteur (« gearless »), et dont l'éclairage de cabine est asservi au fonctionnement effectif (extinction de la cabine à vide).
- Dans le cas d'un chauffage à eau, équiper les radiateurs de robinets thermostatiques.

2 RECOMMANDATIONS POUR FAVORISER L'INTEGRATION DES ENR DANS LA CONCEPTION

2.1 DENSITE DU BÂTI ET RESEAUX DE CHALEUR

La densité du bâti doit être recherchée à deux niveaux :

- Au niveau des bâtiments eux-mêmes : en créant des bâtiments plus hauts et plus compacts on limite ainsi les surfaces de déperditions thermiques. La compacité du bâti permet de simplifier et d'optimiser l'isolation à moindre coup en réduisant pour un même volume les surfaces déperditives. Les bâtiments collectifs de moyenne hauteur doivent être privilégiés afin de mutualiser les équipements de chauffage et de rafraîchissement.
- Au niveau de la zone, si l'on souhaite s'orienter vers un réseau de chaleur, il est primordial de privilégier la densité du bâti. En effet, la rentabilité d'un réseau de chaleur est directement dépendante de la longueur de celui-ci, d'autant plus lorsqu'il alimente des bâtiments dont les besoins énergétiques sont limités (ce qui est déjà le cas avec la réglementation thermique 2012). Si tous les bâtiments n'ont pas vocation à être alimentés par un réseau de chaleur (notamment les maisons individuelles), on pourra organiser la zone de manière à regrouper les bâtiments les plus consommateurs.

Dans l'optique de créer un réseau de chaleur, on pourra également prévoir dès la conception de la zone un espace dédié à la chaufferie centrale. Dans le cas d'une chaudière bois énergie il faudra également disposer d'un accès routier suffisant pour le passage de camions et une zone de retournement pour la livraison. La chaufferie devra être positionnée de manière à optimiser le tracé du réseau de chaleur tout en limitant les nuisances pour les riverains (bruit des livraisons par exemple).

2.2 MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

L'implantation de capteurs solaires photovoltaïques en toiture devra être idéalement prise en compte dès la conception des bâtiments. On pourra ainsi maximiser le rendement de ces installations. Dans le cas de toitures inclinées, on privilégiera une orientation est-ouest de la toiture afin de bénéficier d'une surface maximale disponible exposée au sud. On veillera également à limiter les effets de masque entre les bâtiments en créant des bâtiments de hauteur équivalente et positionnés de manière à éviter qu'ils ne projettent leur ombre sur les toitures voisines, afin de bénéficier d'un ensoleillement maximal toute l'année. Dans cette optique, on prendra également en compte les ombres générées par le relief et la végétation.

3 LES SMART-GRIDS

Un smart-grid ou « réseau intelligent » est un réseau électrique de transmission ou de distribution, de grande ou de petite échelle et utilisant les Nouvelles Technologies de l'Informatique et de la Communication (NTIC). Un smart-grid n'est pas un nouveau réseau électrique, mais une évolution du réseau actuel permettant de répondre aux nouveaux défis du secteur de l'électricité :

- Satisfaire une demande croissante en électricité ;
- Intégrer les sources de production intermittentes, décentralisées et d'origine renouvelable.

La différence majeure entre le réseau actuel et un smart-grid se trouve dans l'aspect communicatif de tous ces pôles entre eux. La gestion du réseau électrique pour l'instant centralisée et unidirectionnelle (allant de la production à la consommation) doit évoluer vers un système plus réparti et bidirectionnel. Dans le réseau actuel, l'équilibre est obtenu en pilotant l'offre d'électricité en fonction de la demande et aux conditions d'approvisionnement et de coût les plus favorables. Dans un smart-grid, la demande est gérée de façon active (incitations au délestage lors des pics de consommation) et permet tout comme l'offre d'équilibrer le système électrique.

Un smart-grid est donc une évolution du réseau qui va toucher à la fois la production et la consommation, avec comme aspect essentiel la communication entre tous les acteurs du réseau électrique. Pour répondre aux problématiques futures, il doit impliquer directement les utilisateurs finaux et gérer de façon optimale de nombreux paramètres qui sont :

- Intégration des énergies renouvelables ;
- Intégration des véhicules électriques ;
- Stockage de l'énergie ;
- Modernisation du réseau.

3.1 BATIMENT INTELLIGENT

Un bâtiment intelligent est une application du smart-grid sur un réseau privé. Il doit répondre à trois critères essentiels qui sont :

- Assurer le confort et la sécurité des utilisateurs ;
- Optimiser son efficacité énergétique et limiter les émissions de CO₂ ;
- Être intéressant du point de vue économique (que les gens soient prêts à investir dans ce type de bâtiment).

Le confort et la sécurité des utilisateurs passent par le respect des normes relatives à la luminosité, la température, aux transports (ascenseurs ou escaliers) et aux communications (téléphoniques et internet). Un bâtiment intelligent doit limiter la quantité d'énergie à consommer pour respecter ces niveaux de confort et de sécurité.

Une caractéristique très importante d'un bâtiment intelligent est la gestion de ses divers équipements électriques. L'application des NTIC à un bâtiment porte le nom de Gestion Technique des Bâtiments (GTB).

La GTB permet premièrement de relier le matériel et les contrôles de différents systèmes à un unique outil de gestion. Ainsi le chauffage, le refroidissement, l'éclairage, les stores et les systèmes de détection d'incendie et d'alarmes sont gérés par le même outil. Suivant les dispositifs utilisés, la GTB permet aussi de mesurer, piloter et anticiper la production et la consommation d'énergie dans un bâtiment afin d'optimiser l'autoconsommation de l'énergie produite.

Les bâtiments sont donc équipés de nombreux capteurs et actionneurs, ainsi que d'une plateforme ou d'un logiciel de gestion d'énergie. On compte des capteurs de présence, de température et de luminosité par exemple, qui permettent de limiter au mieux les consommations d'énergie superflues (chauffage lorsque l'occupant n'est pas là, éclairage trop important lorsque la luminosité est correcte, ...).

Ce modèle de smart-grid permet de limiter les consommations externes d'électricité d'un bâtiment afin elle rendre le plus autonome possible ou exportateur d'électricité (on parle de bâtiment à énergie positive ou BEPOS). On limite ainsi les pertes d'électricité induites par la circulation de l'électricité sur les réseaux et les transformations successives (basse tension, moyenne tension, etc.). **Ce modèle est celui qui est mis en avant par le label E+C- qui favorise l'autoconsommation au niveau d'un bâtiment.**

3.2 QUARTIER INTELLIGENT

Pour qu'un quartier soit considéré comme un smart-grid, la communication entre les différents bâtiments est essentielle. Grâce à des dispositifs de communication entre les compteurs des bâtiments, les pertes liées au transport de l'énergie sont évitées et l'électricité renouvelable produite localement peut alimenter directement les bâtiments du quartier.

En France cependant, les premiers smart-grids à l'échelle de quartier sont encore en phase d'expérimentation, avec notamment des projets tels qu'Issygrid en région Parisienne, Nice Grid à Carros (Alpes Maritimes) et Confluence à Lyon.

La base d'un smart-grid à l'échelle d'un quartier réside dans la communication entre les différents bâtiments dans le but d'optimiser la gestion locale de l'énergie. L'arrivée de 35 millions de compteurs communicants Linky d'Enedis d'ici 2020 doit accompagner le développement des smart-grids en France.

Le compteur Linky est en interaction permanente avec le réseau, lui permettant de recevoir des ordres et transmettre des informations au centre de supervision d'Enedis (ou d'une entreprise locale de distribution). La communication entre les clients et les fournisseurs d'électricité se fait donc par l'intermédiaire des postes de distribution et d'une agence centrale de supervision. Il s'agit d'une communication par courants porteurs en ligne (CPL) entre les compteurs individuels et le concentrateur situé dans le poste de distribution. Les données collectées dans les postes de distribution peuvent ensuite être envoyées à une agence centrale de supervision par le biais d'un réseau téléphonique GPRS. Ce modèle s'applique aussi à un réseau de plus grande échelle que pour un quartier, tel que pour une ville ou un département, et à long terme pour le réseau national voire européen.

Ce modèle de smart-grid permet de limiter les consommations externes d'électricité du quartier tout en permettant de mutualiser les productions à une échelle plus large entre bâtiments ayant des typologies différentes (bureaux occupés la journée en semaine et logements occupés le soir et le weekend), avec des moyens de production sur le site (ombrières photovoltaïques, éoliennes urbaines, cogénération alimentant un réseau de chaleur, etc.) et d'intégrer des consommations supplémentaires : éclairage public, véhicules électriques (et leur capacité de stockage), autres équipements publics. **Ce modèle est celui qui est mis en avant par la loi sur l'autoconsommation qui considère comme autoconsommée l'électricité produite et consommée sur un réseau raccordé à un même poste source de transformation.**

L'échelle retenue pour la mise en place d'un smart-grid doit prendre en compte les possibilités de mutualisations offertes par une échelle plus importante tout en veillant à réduire les contraintes supplémentaires que présente cette échelle : besoin d'une entité de régulation faisant le lien entre les différents bâtiments, relation et contractualisation entre les propriétaires des bâtiments, prise en compte du phasage des constructions.

3.3 LE STOCKAGE D'ELECTRICITE

En plus de la communication et du pilotage à distance entre les différents acteurs du réseau électrique, le stockage de l'électricité est une des composantes majeures d'un smart-grid. Les sources d'énergies renouvelables solaires et éoliennes sont des sources intermittentes, c'est pourquoi leur pic de production peut survenir durant des périodes de très faible consommation électrique. Le stockage intégré à ces sources d'énergie permet de faire tampon et de réguler l'injection d'électricité dans le réseau. Le stockage d'électricité permet aussi de participer à l'effacement lors des pics de consommation en rendant les bâtiments équipés autonomes en énergie. Si les dispositifs de stockage injectent de l'électricité à ce moment, la dépendance aux solutions de production utilisées lors des pics de production (charbon, gaz, fioul) et fortement émettrices en gaz à effet de serre peut être réduite.

La principale solution de stockage à l'échelle d'un bâtiment est la batterie. Toutefois, le coût, la durée de vie et le bilan environnemental des batteries en font une solution aujourd'hui peu adaptée à l'autoconsommation d'électricité. Toutefois des pistes sont actuellement à l'étude, en particulier le recours aux batteries des véhicules électriques en charge (véhicule to grid) ou la réutilisation de batteries de véhicules en fin de vie (les batteries des véhicules sont généralement remplacées lorsque leur capacité n'est plus que de 80%, mais elles peuvent toujours être utilisées de manière stationnaire lorsqu'il n'y a pas de contraintes d'encombrement ou de poids).

GISEMENT DISPONIBLE EN ENERGIES RENOUVELABLES ET DE RECUPERATION

1 FILIERES DE PRODUCTION D'ENERGIE THERMIQUE

1.1 ÉNERGIE SOLAIRE



Il s'agit de capter le rayonnement solaire via un capteur puis de redistribuer l'énergie qu'il contient par le biais d'un fluide caloporteur – qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air – et d'un circulateur.

Un capteur solaire thermique exposé au soleil capte une partie du rayonnement et réfléchit le reste : il convertit ensuite le rayonnement en chaleur et la transmet au fluide caloporteur.

1.1.1 GISEMENT

L'ensoleillement du territoire et les données météorologiques constituent le gisement brut des filières solaires thermiques. Ces données servent de base au calcul du productible des installations solaires thermiques et photovoltaïques.

DONNEES METEOROLOGIQUES

Les données météorologiques (températures extérieures, rayonnement, vitesse de vent) sont issues du logiciel Météonorm V7. Les stations prises en références pour élaborer le climat sur le territoire sont Paris/Orly, Paris/Montsouris et Trappes.

Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus (la réverbération du rayonnement direct sur la végétation, le sol, les immeubles, etc.).

Base météo de référence : Rueil-Malmaison				
Altitude : 108 m				
Latitude : 48,87 °				
Longitude : 2,12 °				
MOIS	Ensoleillement à l'horizontale (en Wh/(m².j))	Température mini	Température moyenne	Température maxi
Janv	806	2,5	5,0	7,5
Févr	1 274	2,9	5,8	8,6
Mars	2 419	4,8	8,3	11,7
Avr	4 100	7,2	11,2	15,2
Mai	4 548	10,8	14,9	18,9
Juin	5 300	13,8	18,1	22,4
Juil	5 323	15,0	19,5	24,0
Août	4 226	15,4	19,6	23,8
Sept	3 367	12,0	16,2	20,3
Oct	2 032	9,7	13,0	16,2
Nov	1 133	5,6	8,2	10,8
Déc	645	2,2	5,1	7,9
Total annuel : 1073 kWh/(m².an)				
Sources : ensoleillement (période 1991 - 2010) / températures (période 2000 - 2009) - Météonorm V7				

Figure 6 : Données mensuelles d'ensoleillement et de température

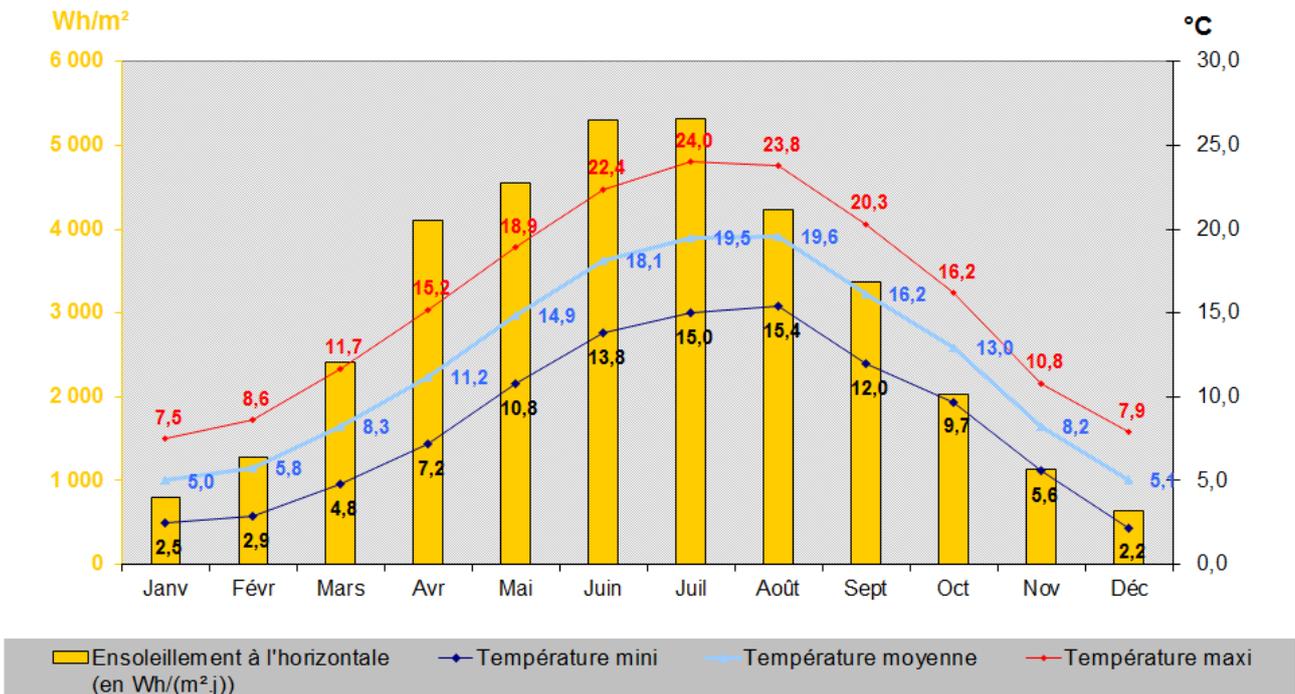


Figure 7 : Courbes mensuelles d'ensoleillement et de température à Rueil-Malmaison

CARTOGRAPHIE DE L'ENSOLEILLEMENT

La carte suivante met en évidence l'ensoleillement annuel moyen sur le territoire. Les valeurs d'ensoleillement sont issues de la base de données SolarGis détenue par Axenne (grille au pas de 250m). Les données d'ensoleillement sont calculées à partir des images du satellite Météosat, du relief, etc. entre 1994 et 2013.

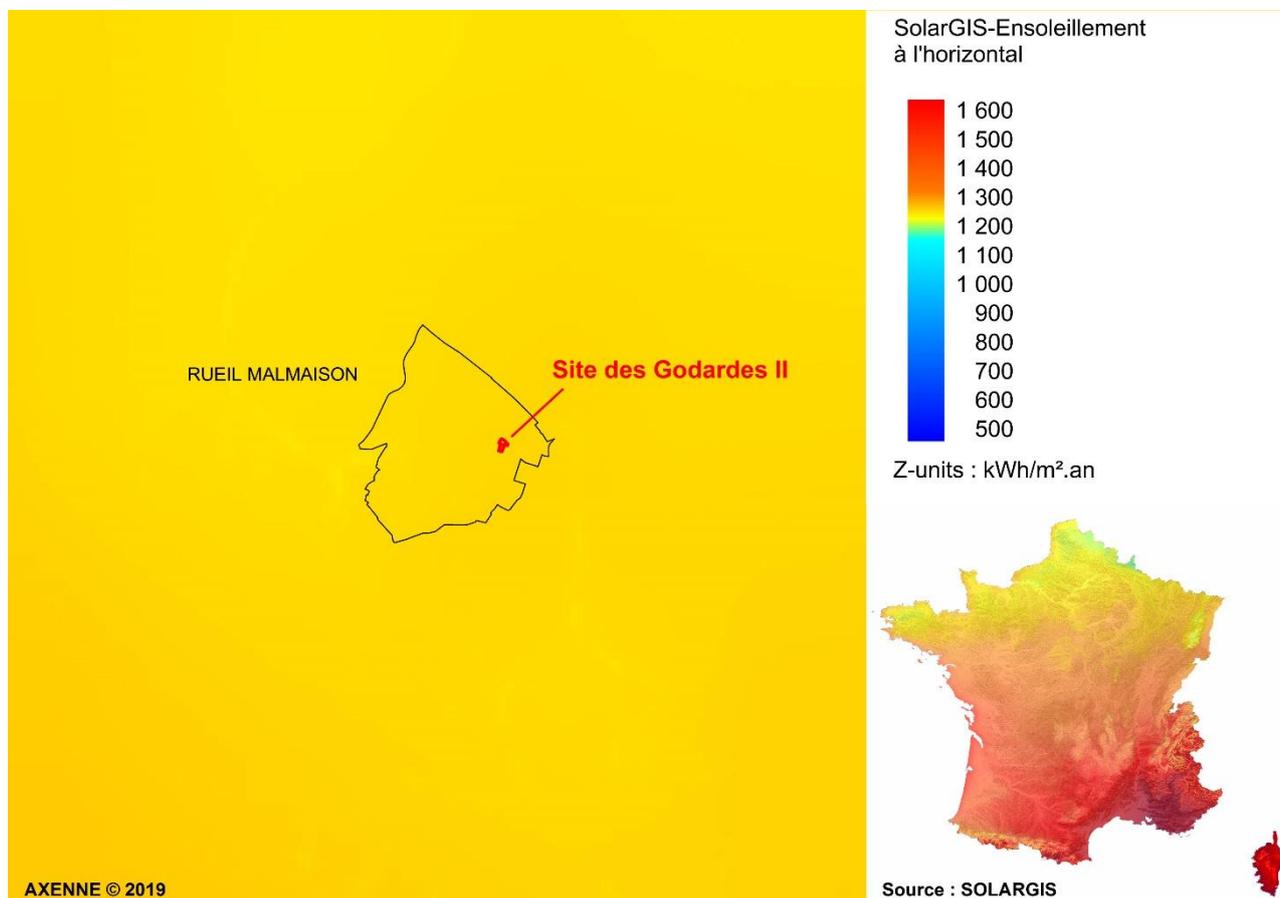


Figure 8 : Ensoleillement moyen annuel sur le territoire, prise en compte du relief

La plage de valeurs indiquée dans la légende comprend toutes les valeurs de l'ensoleillement en France pour la période donnée. Cette information permet de situer le territoire étudié par rapport à la France en ce qui concerne l'ensoleillement.

La zone d'étude bénéficie d'un ensoleillement annuel dans la moyenne nationale.

1.1.2 PRODUCTIBLE

Le productible d'une installation solaire thermique est illustré dans le cadre d'une installation collective.

Caractéristiques de l'installation (simulation SOLO 2000) :

- Consommation de 2 000 L/jour.
- Ballon de stockage de 2 000 L,
- 45 m² de capteurs,
- Orientation Sud et inclinaison à 45°,

Ces besoins correspondent à ceux d'un immeuble de 20 logements, avec en moyenne 2,35 habitants par logement³, soit aux besoins en eau chaude sanitaire de 47 personnes environ.

³ Moyenne d'habitants par logement selon le Recensement de la population INSEE 2009

L'inclinaison des capteurs est optimisée pour une production d'eau chaude en hiver ; l'inclinaison des capteurs est donc importante au regard de la hauteur du soleil durant cette période de l'année (les capteurs produisent le maximum d'énergie lorsque les rayons du soleil arrivent à 90° dans le plan du capteur).

Avec les hypothèses mentionnées ci-dessus, l'installation produira 19 200 kWh/an soit 65 % des besoins en eau chaude sanitaire du bâtiment considéré. La productivité des capteurs est de 392 kWh/m².

1.1.3 CONTRAINTES

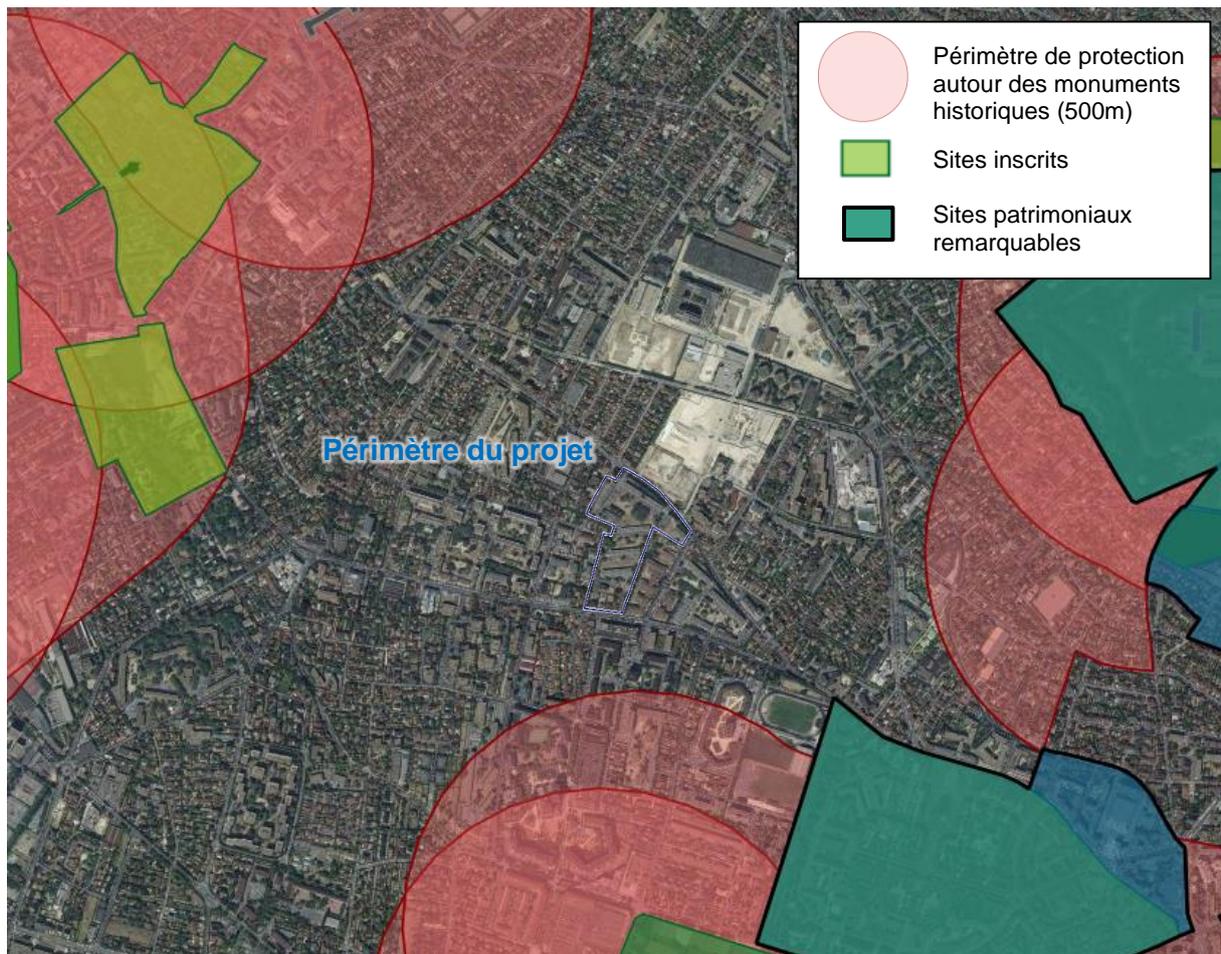
1.1.3.1 Contraintes réglementaires

CONTEXTE

Dans l'objectif de protéger et conserver le patrimoine bâti présentant une importance particulière, différents types de protection existent en France : secteur sauvegardé, site classé, AVAP (Aires de mise en valeur de l'architecture et du patrimoine) ou ZPPAUP (Zone de Protection du Patrimoine architectural, Urbain et Paysager), monument historique et site inscrit. Ces protections n'ont pas les mêmes implications, notamment en ce qui concerne la possibilité d'implanter une installation solaire thermique ou photovoltaïque à proximité.

CONTRAINTES SUR LE SITE

L'emprise du projet est située hors de toutes zones de protection du patrimoine (sites inscrits, sites classés, site patrimonial remarquable). Les monuments historiques présents autour du site sont situés à plus de 500 m.



1.1.3.2 Contraintes physiques

D'une manière générale et dans la mesure du possible, il est préférable de placer les bâtiments les plus hauts au nord afin d'éviter qu'ils ne projettent leurs ombres sur les bâtiments plus bas dont la toiture ne pourrait alors pas être équipée de capteurs solaires. Ce critère semble avoir été globalement pris en compte dans la conception du projet.

1.1.4 POTENTIEL

Des capteurs solaires thermiques peuvent être mis en place sur tous les bâtiments, il n'y a pas de contraintes réglementaires.

Les **filières solaires thermiques présentent un gisement intéressant**, et pourraient être sollicitées pour contribuer à l'approvisionnement énergétique du site.

1.2 BIOMASSE COMBUSTIBLE



Le terme « bois-énergie » désigne l'énergie produite à partir de la dégradation du bois. Cette énergie est au départ celle du soleil, transformée par les arbres lors de la photosynthèse. Elle est libérée sous forme de chaleur lors de la combustion du bois et est utilisée directement pour produire de la chaleur.

Le bois énergie est un mode de chauffage ancestral qui a récemment connu d'importantes évolutions technologiques : automatisation de l'alimentation, du décendrage et de la régulation pour les chaudières et certains poêles, amélioration des performances techniques et du rendement. Les produits développés apportent un grand confort sur le plan thermique et sont de plus en plus souples d'utilisation. Les niveaux de pollution (émissions de particules essentiellement) ont été réduits de manière importante par rapport aux anciens modèles.

Le bois-énergie est une énergie renouvelable qui ne court pas de risque de pénurie, à court ou à long terme, à condition de recourir à une gestion raisonnée de la forêt.

1.2.1 GISEMENT

L'approvisionnement de la filière bois énergie peut faire appel à des ressources bois de différentes natures, celles-ci pouvant déjà être captées par d'autres filières de valorisation du bois, en tout ou partie. Il est important de veiller à éviter les conflits d'usage de la ressource bois.

Le gisement est constitué de la ressource forestière (taillis, rémanents d'exploitation, etc.), mais également des sous-produits des industries du bois (sciures, copeaux, écorces, dosses, etc.), des bois de rebut non souillés (palettes, cagettes, etc.) et des résidus d'élagage. La plupart de ces matériaux doivent être transformés avant d'être utilisés dans une chaudière.

On considère en première approche que l'approvisionnement en combustible bois d'origine forestière est intéressant jusqu'à une distance de 50 km ; au-delà, deux problèmes se posent :

- Le coût du transport rend non compétitif le combustible,
- Les émissions polluantes dues au transport « annulent » l'intérêt de recourir au bois énergie pour ses qualités environnementales.

Ressource forestière :

La carte ci-dessous permet de localiser les régions forestières situées dans un rayon de 50 km autour du site, et de visualiser les caractéristiques de la forêt sur cette même zone.

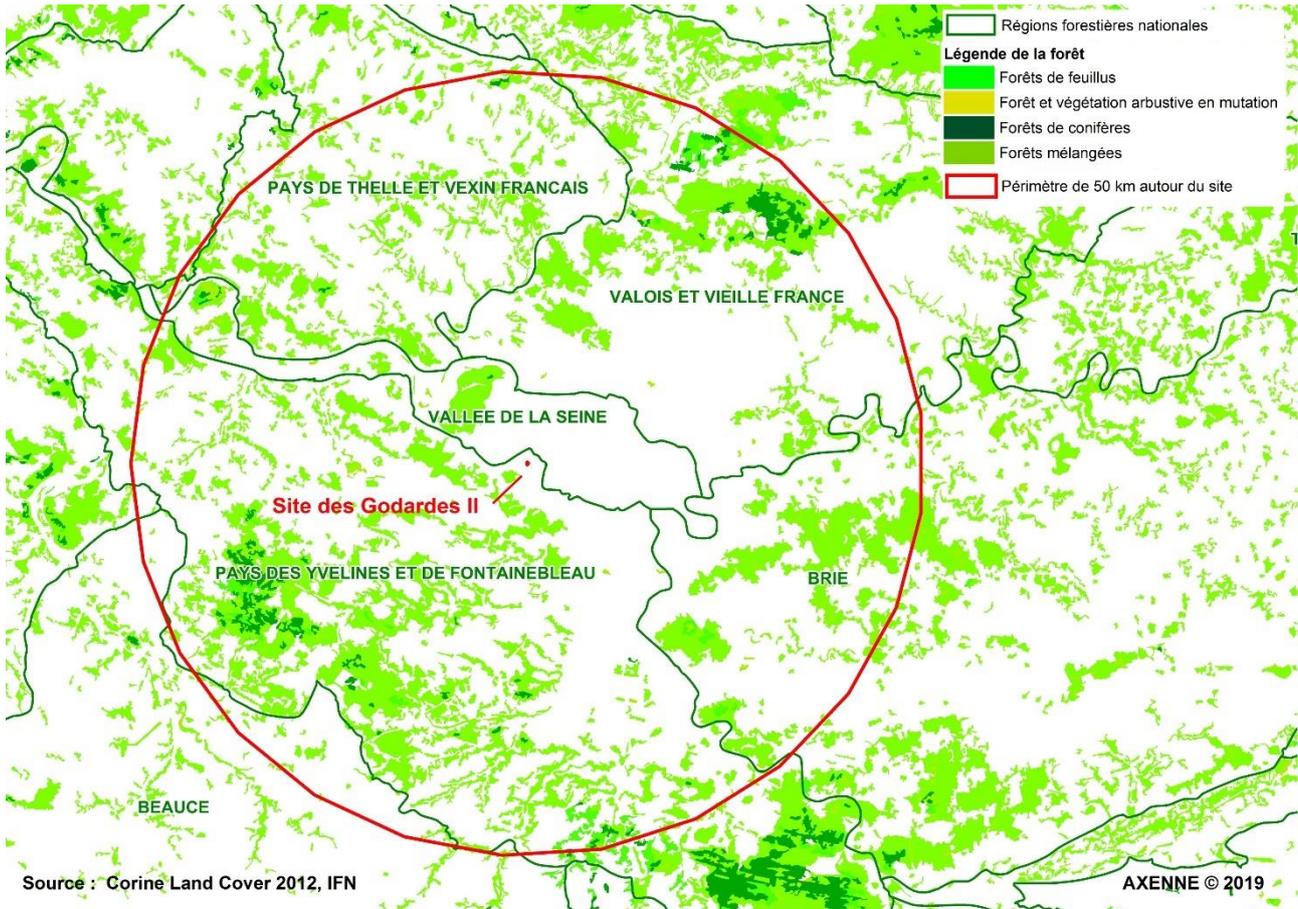


Figure 10 : La forêt et les régions forestières autour du site (carte : AXENNE)

Les ressources forestières disponibles pour l'énergie sont estimées via l'étude réalisée à l'échelon national en 2015 par l'IGN et le FCBA : « Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035 ». Cette étude est une mise à jour d'études précédentes, rendue possible par la mise en œuvre d'informations nouvelles (données d'inventaire forestier national consolidées sur 5 ans, mesures directes des prélèvements de bois en forêt, etc.). Elle s'intéresse à différents niveaux de disponibilités, mis en évidence par la figure suivante.

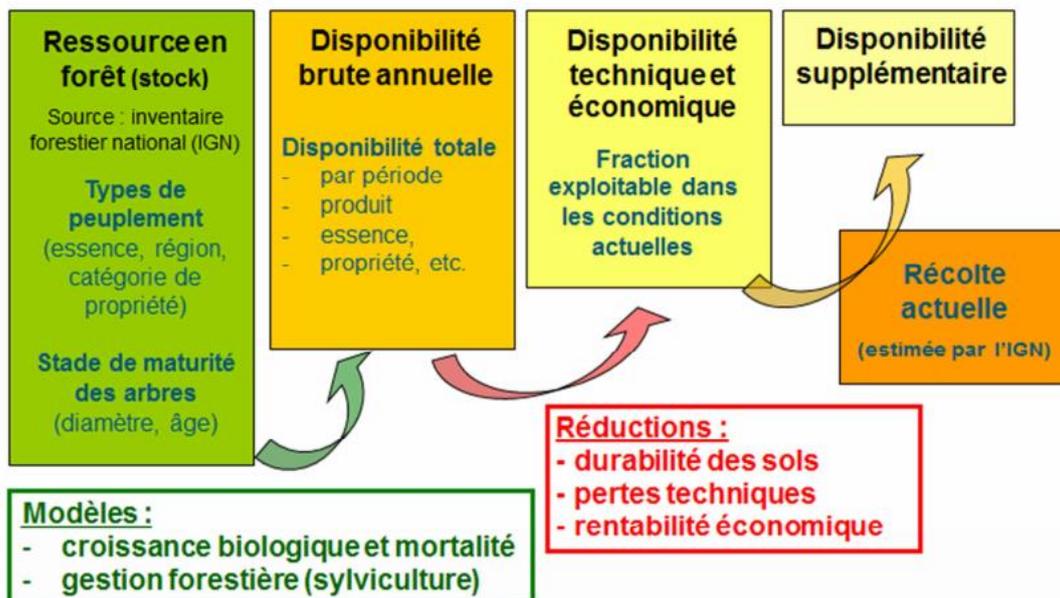


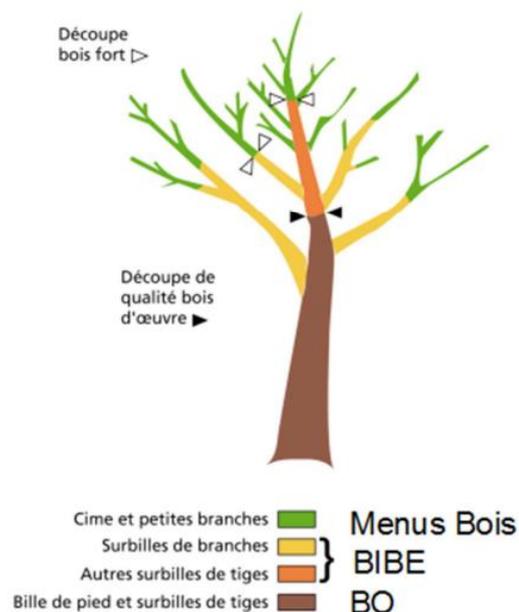
Figure 11 : Niveaux de disponibilité en bois énergie (IGN, FCBA, ADEME)

L'étude indique que « les usages réels des bois dépendent de la demande, et donc de l'existence d'un marché pour les différents types de produits bois issus des forêts. Ces paramètres économiques n'ont pas été évalués dans l'étude.

Les usages potentiels sont définis dans l'étude comme la valorisation économique la plus élevée possible des bois. Les volumes de disponibilités sont ventilés en bois d'œuvre potentiel (BO-P) et en bois industrie bois énergie potentiel (BIBE-P) suivant un classement de la qualité des bois.

Le volume de chaque arbre récoltable a été réparti en trois compartiments selon leur usage potentiel :

- Le **bois d'œuvre (BO-P)** se rencontre dans la base du tronc de l'arbre. Il concerne tous les bois dont la découpe minimale est de 20 cm de diamètre et qui sont susceptibles d'être sciés ou déroulés et tranchés pour les billes de qualité exceptionnelle (ces derniers usages représentent environ 5% du volume de BO-P).
- Le **bois d'industrie et énergie (BIBE-P)** se situe dans la cime de l'arbre, dans les branches jusqu'à la découpe 7 cm (bois fort) et pour les arbres sans BO-P, dans la totalité des tiges.
- Les **menus bois (MB)** correspondent aux petites branches de moins de 7 cm de diamètre. Ils peuvent être valorisés en plaquette pour l'énergie, mais ils sont le plus souvent laissés en forêt pour des raisons économiques et environnementales (pauvreté des sols, sensibilité des sols au tassement). »



Le tableau suivant présente la disponibilité supplémentaire de BIBE-P en Ile-de-France à l'horizon 2031-2035, selon deux scénarios de gestion sylvicole différents.

	Scénario de sylviculture constante		Scénario de gestion dynamique progressif	
	m ³ /an	t/an	m ³ /an	t/an
Feuillus	143 000	78 500	281 000	154 270
Résineux	7 000	2 900	33 000	13 700
Total	150 000	81 400	315 000	167 970

Le tableau suivant présente la disponibilité supplémentaire de MB en Ile-de-France à l'horizon 2031-2035, selon deux scénarios de gestion sylvicole différents.

	Scénario de sylviculture constante		Scénario de gestion dynamique progressif	
	m ³ /an	t/an	m ³ /an	t/an
Feuillus	77 000	42 270	96 000	52 700
Résineux	18 000	7 470	26 000	10 790
Total	95 000	49 740	122 000	63 490

Ainsi, la disponibilité supplémentaire en bois énergie à l'horizon 2031-2035 varierait de **131 140 tonnes** selon le scénario de sylviculture constante à **231 460 tonnes** selon le scénario de gestion dynamique progressif⁴.

CONNEXES DE LA TRANSFORMATION DU BOIS

Les entreprises dites de première transformation du bois sont les scieries et les usines de déroulage et de tranchage. Les entreprises de fabrication d'emballage relèvent techniquement de la deuxième transformation, mais elles produisent le même type de connexes que les entreprises de la première transformation du bois. Les connexes de la première transformation sont les dosses, délignures, chutes de tronçonnage, la sciure et les écorces.

⁴ L'ensemble de ces chiffres sont donnés à une humidité de 0%.

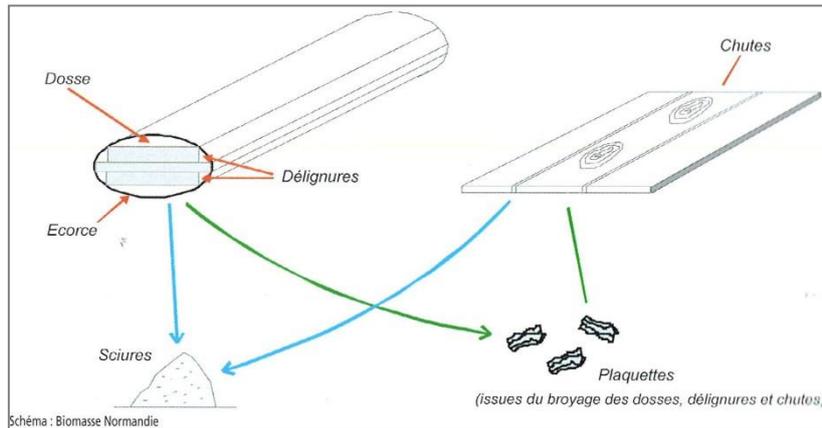


Figure 12 : Connexes de la première transformation du bois

Tous les produits connexes de scieries peuvent être valorisés pour l'énergie. L'utilisation des sciures nécessite cependant des chaudières spécialisées (notamment en ce qui concerne le mode d'introduction du combustible dans le foyer) que l'on ne retrouve généralement que dans les scieries ou les industries productrices de sciures.

Les scieries régionales ont été contactées par le bureau d'études Inddigo lors de la réalisation du SRCAE d'Ile-de-France. Les faibles tonnages recensés n'ont pas permis de réaliser de cartographie. « L'étude préalable à l'élaboration du volet combustion de la biomasse en filière collective du SRCAE d'Ile-de-France » indique que « les ressources en connexes de 1^{ère} et 2^{nde} transformation du bois sont soumises à des contraintes de mobilisation (gisement diffus dont la collecte est lourde à mettre en œuvre) avec également une part d'autoconsommation par les usines.». Une ressource de **10 000 tonnes à l'horizon 2015-2020** est retenue par l'étude. Cette ressource est limitée par le manque de sites industriels en Ile-de-France. Elle pourrait atteindre **70 000 tonnes à l'horizon 2030- 2050**.

BOIS DE REBUT

Les bois de rebut sont des objets en bois en fin de vie ou usagés ; il peut s'agir de palettes perdues et usagées, de caisses et cagettes en bois usagées, de copeaux, sciures, écorces ou plaquettes, de planches, de meubles, de bois de démolition, etc.

Ce type de bois représente un gisement pour le bois énergie, mais sa valorisation n'est possible que sous certaines conditions : il est en effet indispensable pour que les plaquettes issues de bois de rebut puissent être brûlées en chaudière que le bois ayant servi à leur fabrication n'ait pas été traité (auquel cas il doit être incinéré dans un incinérateur agréé) et qu'il ait été correctement déferrailé.

Le bois de rebut peut être classé en trois catégories principales, qui sont celles utilisées par les professionnels (mais qui n'ont pas de valeur réglementaire) :

- Classe A : bois non traité et non souillé
 - Emballages lourds (palettes, caisses) : Les palettes, qui représentent la très grande majorité du gisement sont de deux types : unirotaion ou réutilisables. Les premières peuvent facilement être utilisées comme combustible bois car il est facile de connaître le producteur qui peut garantir un bois exempt de traitement. Les secondes sont plus susceptibles d'avoir reçu un traitement de préservation ; il est alors nécessaire d'être en mesure de prouver qu'elles n'ont pas été traitées pour pouvoir les valoriser en chaufferie bois.
 - Emballages légers (cageots, cagettes, bourriches, boîtes à fromage, etc.) : ils ne subissent aucun traitement chimique pour leur préservation.
- Classe B – bois non dangereux : bois de démolition, portes, fenêtres, vieux meubles, panneaux de process, etc. qui comportent des colles, vernis et peintures. Certains de leurs adjuvants ou composants peuvent poser des problèmes de pollution. Ils sont dirigés vers des centres d'enfouissement techniques ou utilisés pour la fabrication de panneaux de particules (sous réserve d'un conditionnement spécifique) ; ils peuvent également être brûlés dans des chaufferies industrielles adaptées dans le cas de bois faiblement adjuvantés.

- Classe C – déchets dangereux : traités à la créosote (traverses de chemin de fer, poteaux téléphoniques, etc.) ou autoclavés et imprégnés de sels métalliques (piquets de vigne et d'arboriculture, écrans acoustiques, glissières de sécurité, etc.). Ils sont détruits en usine d'incinération de déchets spéciaux ou en fours de cimenterie.

La rubrique 2910 des ICPE concerne les installations de combustion utilisant notamment de la biomasse. Celle-ci est définie suivant trois catégories :

- 2910A : Les produits composés d'une matière végétale agricole ou forestière susceptible d'être employée comme combustible en vue d'utiliser son contenu énergétique, les déchets végétaux agricoles et forestiers, les déchets de liège, les produits connexes de scieries issues du (v) ci-dessous, ou lorsque la biomasse est issue de déchets au sens de l'article L. 541-4-3 du code de l'environnement.
- 2910B : Les déchets suivants :
 - ii) Déchets végétaux provenant du secteur industriel de la transformation alimentaire, si la chaleur produite est valorisée ;
 - iii) Déchets végétaux fibreux issus de la production de pâte vierge et de la production de papier à partir de pâte, s'ils sont co-incinérés sur le lieu de production et si la chaleur produite est valorisée ;
 - v) Déchets de bois, à l'exception des déchets de bois qui sont susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds à la suite d'un traitement avec des conservateurs du bois ou du placement d'un revêtement, y compris notamment les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition.
- [2910C : Concerne la combustion de biogaz.]

① Une nouvelle réglementation relative aux ICPE est entrée en vigueur au 1^{er} janvier 2014. Elle répartit désormais la biomasse en deux catégories : les produits agricoles et forestiers, et les déchets. Les bois de rebut appartiennent désormais à la catégorie des déchets.

En conséquence, depuis le 15 octobre 2014, les chaufferies bois classées 2910-A et utilisant des bois de rebut comme combustible ont trois possibilités :

- modifier leur approvisionnement afin de remplacer les emballages en bois par de la biomasse naturelle,
- conserver leur approvisionnement et solliciter un classement en rubrique 2910-B sous un régime d'enregistrement ou de déclaration (ce qui entraîne des exigences supplémentaires en termes de contrôles),
- conserver leur approvisionnement et demander à leurs fournisseurs de bois de rebut de fournir des attestations de conformité de **sortie du statut de déchet**.

Cette sortie de statut de déchet est encadrée par l' « Arrêté du 29 juillet 2014 fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les broyats d'emballages en bois pour un usage comme combustible de type biomasse dans une installation de combustion ».

« L'étude préalable à l'élaboration du volet combustion de la biomasse en filière collective du SRCAE d'Ile-de-France » évalue les bois de classe A disponibles en Ile-de-France à **315 000 tonnes à l'horizon 2015-2020**. Le gisement serait identique à **l'horizon 2030- 2050**.

BOIS D'ELAGAGE

« L'étude préalable à l'élaboration du volet combustion de la biomasse en filière collective du SRCAE d'Ile-de-France » s'intéresse au bois issu de l'entretien de la biomasse agricole (peupleraies, haies, alignements, vergers) et au bois issu de l'entretien de la biomasse urbaine.

Le gisement de bois d'élagage serait de **33 000 tonnes à l'horizon 2015-2020** et pourrait atteindre **200 000 tonnes à l'horizon 2030- 2050**.

SYNTHESE DES RESSOURCES DISPONIBLES

Le tableau suivant résume les gisements de bois énergie présents sur la région Ile-de-France à l'horizon 2031.

Ressources disponibles	Disponibilité basse	Disponibilité haute
Ressource forestière	131 140 t	231 460 t
Connexes de la transformation du bois	70 000 t	
Bois de rebut	315 000 t	
Bois d'élagage	200 000 t	
Total à 35% d'humidité⁵	838 400 t	992 700 t

Figure 13 : Ressources disponibles en bois énergie

1.2.2 FOURNISSEURS

La carte suivante met en évidence les fournisseurs de bois énergie en région Ile-de-France. Une carte dynamique permettant d'obtenir les coordonnées du fournisseur ainsi que son volume de bois énergie est disponible à l'adresse suivante : <http://www.francibois.fr/chauffage/observatoire-du-bois-energie-d-ile-de-france>.

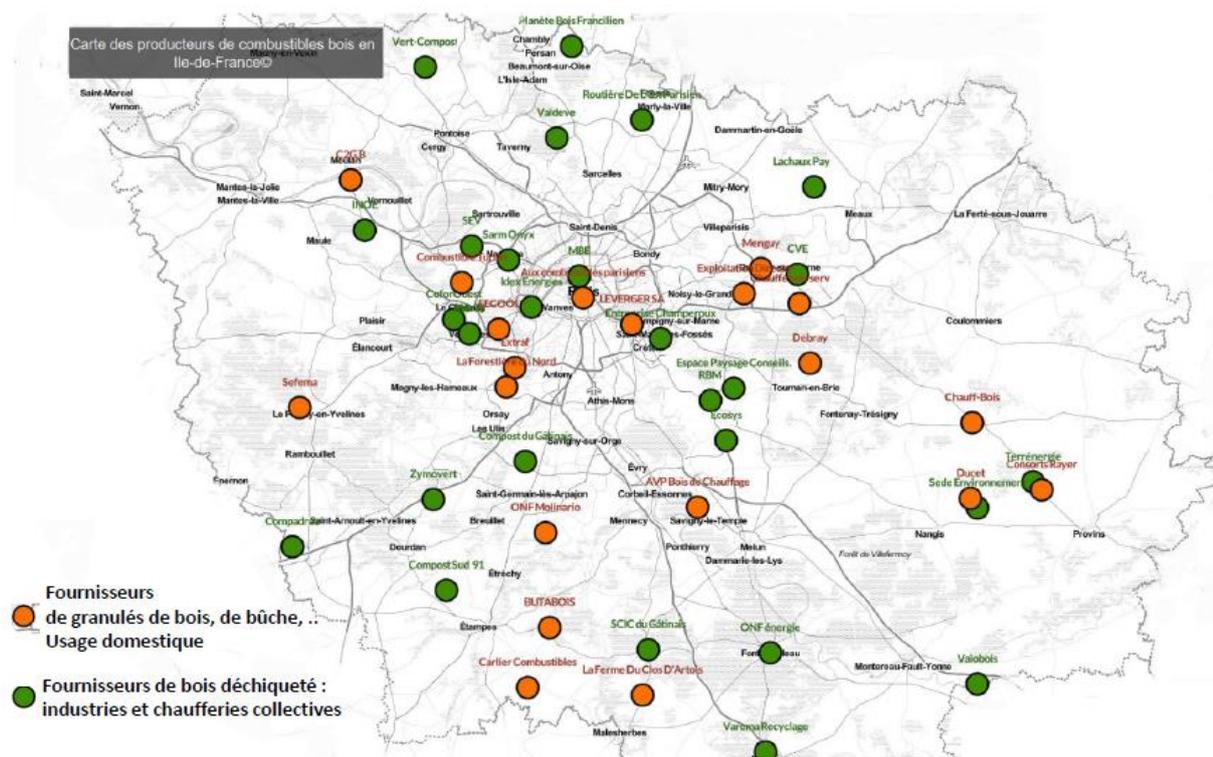


Figure 14 : Fournisseurs de bois énergie en Ile-de-France (Francibois)

Le bois énergie peut être utilisé pour approvisionner des bâtiments de manière individuelle ou mutualisée (réseau de chaleur). Dans tous les cas, la ou les chaufferies seront installées dans un bâtiment indépendant, accolé ou en sous-sols de bâtiments existants et seront équipées d'un silo de stockage du combustible. Ce silo devra être accessible pour la livraison du combustible par camions.

⁵ Les tonnages présentés dans le tableau sont à des taux d'humidités dépendants du type de ressource. Par exemple, les bois d'élagage sont généralement relativement humides (45% d'humidité) tandis que les bois de rebut sont plus secs (de l'ordre de 15% d'humidité). Afin de pouvoir additionner les tonnages indiqués, une conversion est faite pour ramener l'ensemble des ressources à un même taux d'humidité.

1.2.3 CONTRAINTES

Le bois énergie peut être utilisé pour approvisionner des bâtiments de manière individuelle ou mutualisée (réseau de chaleur). Dans tous les cas, la ou les chaufferies seront installées dans un bâtiment indépendant, accolé ou en sous-sols de bâtiments existants et seront équipées d'un silo de stockage du combustible. Ce silo devra être accessible pour la livraison du combustible par camions.

La chaufferie fournira la chaleur pour le chauffage et le plus souvent pour l'eau chaude sanitaire également, à hauteur de 85 % en moyenne, l'appoint étant réalisé par une chaudière au gaz naturel permettant ainsi de limiter la puissance de la chaudière bois et l'investissement.

ACCESSIBILITE POUR LA LIVRAISON

La livraison du combustible pourrait être réalisée par l'avenue George Pompidou ou l'avenue du 18 juin 1940 et via la rue Jules Massenet. La chaufferie devra être positionnée à proximité immédiate de cet axe.

RESERVE FONCIERE

- Lorsqu'il s'agit d'installations à l'échelle d'un bâtiment ou de petits réseaux de chaleur, la chaudière et le silo de stockage du combustible peuvent être intégrés aux bâtiments. Par exemple, pour une chaudière bois de 200 kW et un appoint/secours gaz de 400 kW, l'emprise foncière sera d'environ 25 m² pour la chaufferie plus 25 m² pour le silo.
- Dans le cas d'un réseau de chaleur plus important, la chaufferie et le silo nécessitent un bâtiment dédié et constituent un élément impactant en termes de réserve foncière. Une chaufferie bois/appoint gaz de 2 MW nécessite 150-200 m², silo compris.
- Dans le cas d'un raccordement à un réseau existant de périmètre plus large, les sous-stations sont installées en pied d'immeuble et prennent peu de place (équivalent à une chaufferie gaz).

Il sera également nécessaire d'étudier l'accessibilité du ou des silos de stockage depuis la rue afin que les camions puissent effectuer la livraison, ainsi que la possibilité d'effectuer des manœuvres de retournement une fois la livraison effectuée.

NUISANCES

Suivant la fréquence de livraisons, celles-ci peuvent générer une nuisance pour le voisinage. Il s'agit d'une nuisance comparable à la livraison effectuée chez un commerce.

1.2.4 POTENTIEL

Au vu des ressources et de l'offre locale, il serait tout à fait possible de couvrir les besoins de chaleur du projet par des chaudières en pied d'immeuble ou un réseau de chaleur au bois énergie.

1.3 GEOTHERMIE



La géothermie est l'exploitation de la chaleur du sous-sol. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1 000°C à 4 300°C. Enfin, en ce qui concerne la géothermie dite de surface, la chaleur de la couche superficielle du sous-sol est en partie influencée par le climat.

L'accroissement de la température en fonction de la profondeur est appelé « gradient géothermal ». Il est en moyenne, sur la planète, de 3,3°C par 100 mètres. Les gisements géothermiques sont qualifiés en fonction de leur température notamment, de haute à très basse énergie (cf. figure ci-après).

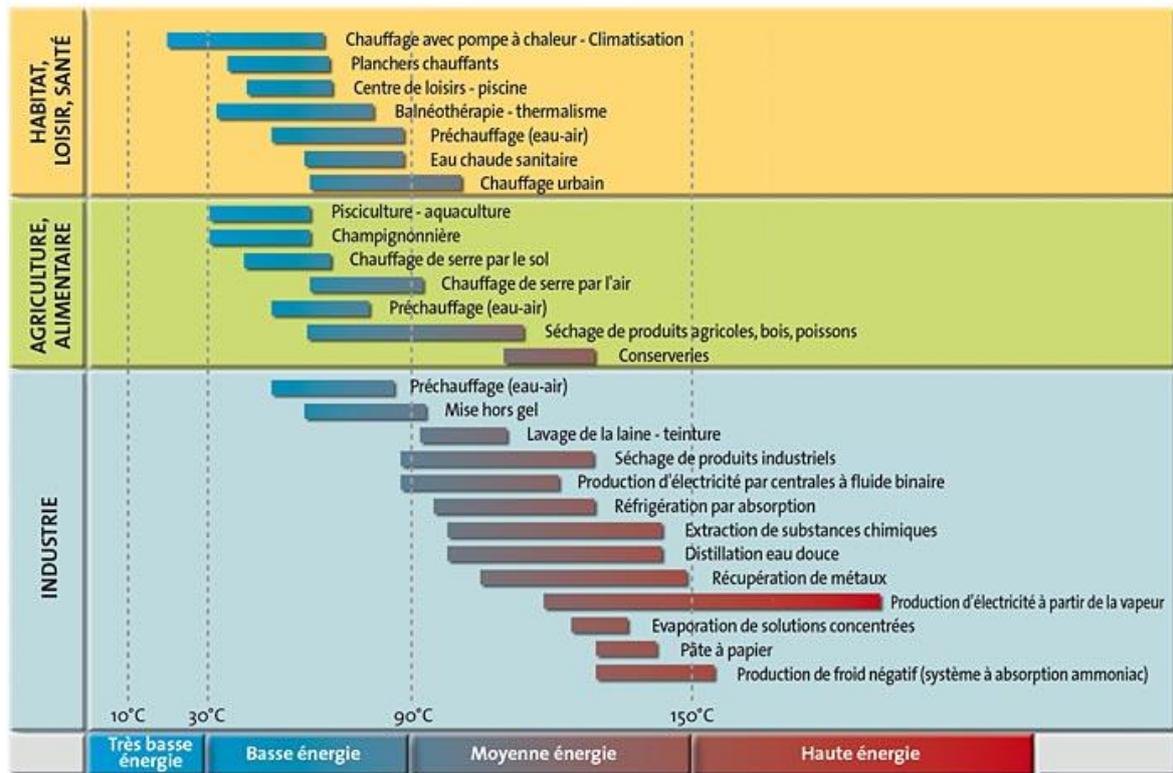


Figure 15 : Principales utilisations de la géothermie en fonction des températures (Source : Géothermie Perspectives)

On distingue cinq catégories de géothermie, suivant le niveau de température des fluides exploités :

- La **géothermie très basse énergie** (température inférieure à 30°C – profondeur inférieure à 100 m) : par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur (PAC), l'énergie du sous-sol est utilisée pour le chauffage et/ou le rafraîchissement de locaux.
- La **géothermie basse énergie** (température comprise entre 30 et 90°C) est destinée au chauffage urbain, à certaines utilisations industrielles, au thermalisme ou encore à la balnéothérapie. L'essentiel des réservoirs exploités se trouve dans les bassins sédimentaires (profondeur comprise entre 1 500 et 2 500 mètres).
- La **géothermie moyenne énergie** (température comprise entre 90 et 150°C) : eau chaude ou vapeur humide) : elle est destinée à des usages thermiques tels que des utilisations industrielles et peut être utilisée pour la production d'électricité (technologie faisant appel à un fluide intermédiaire). Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1 000 mètres. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2 000 à 4 000 mètres.
- La **géothermie haute énergie** (température supérieure à 150°C) : Les réservoirs, généralement localisés entre 1 500 et 3 000 mètres de profondeur, se situent dans des zones de gradient géothermal anormalement élevé. Lorsqu'il existe un réservoir, le fluide peut être capté sous forme de vapeur sèche ou humide pour la production d'électricité.

- **La géothermie profonde des roches chaudes fracturées (hot dry rock) :** Elle s'apparente à la création artificielle d'un gisement géothermique dans un massif cristallin. À trois, quatre ou cinq kilomètres de profondeur, de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Elle se réchauffe en circulant dans les failles et la vapeur qui s'en dégage est pompée jusqu'à un échangeur de chaleur permettant la production d'électricité. Plusieurs expérimentations de cette technique sont en cours dans le monde, notamment sur le site de Soultz-Sous-Forêts en Alsace.

Seule la géothermie basse et très basse énergie est étudiée ci-après pour l'approvisionnement énergétique de la zone. En effet, les besoins énergétiques et le contexte de la zone à construire ne permettent pas d'envisager le recours aux autres types de géothermies⁶.

1.3.1 GISEMENT

Les pompes à chaleur (PAC) sont un élément indispensable pour la valorisation de la géothermie très basse énergie. Ce sont des systèmes thermodynamiques fonctionnant sur le même principe que les réfrigérateurs, le processus étant inversé pour produire de la chaleur. Elles ont globalement un COP (Coefficient de Performance) de 4 ce qui signifie que pour 1 kWh d'électricité consommée, elles en produisent 4. La consommation pour le chauffage est donc divisée par quatre par rapport à un chauffage électrique ; le confort est également nettement amélioré si l'on compare avec un chauffage électrique direct.

Parmi les pompes à chaleur, plusieurs technologies existent, qui se distinguent suivant leur type de capteurs :

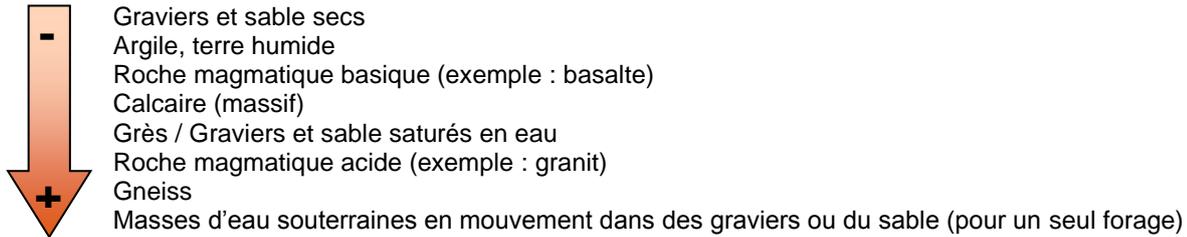
- **capteurs horizontaux :** ils permettent une installation à moindre coût, mais ils nécessitent une grande surface de pose (1,5 à 2 fois la surface à chauffer). Il s'agit de tubes de polyéthylène ou de cuivre gainés de polyéthylène qui sont installés en boucles enterrées horizontalement à faible profondeur (de 0,60 m à 1,20 m). → ***Cette technologie est réservée aux maisons existantes – les maisons neuves ayant de faibles besoins en énergie qui ne justifient pas un tel équipement – et ne sera donc pas étudiée.***
- **capteurs verticaux :** ils sont constitués de deux tubes de polyéthylène formant un U installés dans un forage (jusqu'à 200 m de profondeur) et scellés dans celui-ci par du ciment. On y fait circuler en circuit fermé de l'eau additionnée de liquide antigel. La capacité d'absorption calorifique moyenne d'un capteur vertical est d'environ 50 W par mètre de forage, il faut donc souvent utiliser deux ou plusieurs capteurs qui doivent être distants d'au moins une dizaine de mètres.
Il peut également s'agir de capteurs intégrés dans les fondations sur pieux du bâtiment (tubes polyéthylène noyés dans le béton). On parle de géostructures ou fondations thermoactives.
- **capteurs sur nappe :** deux tubes distincts puisent l'eau dans un aquifère peu profond puis la restituent. Le fluide utilisé est alors directement l'eau de l'aquifère (Cf. § 1.4).

Il est nécessaire de faire appel à une entreprise de forage qualifiée et de respecter les procédures administratives concernant la protection du sous-sol.

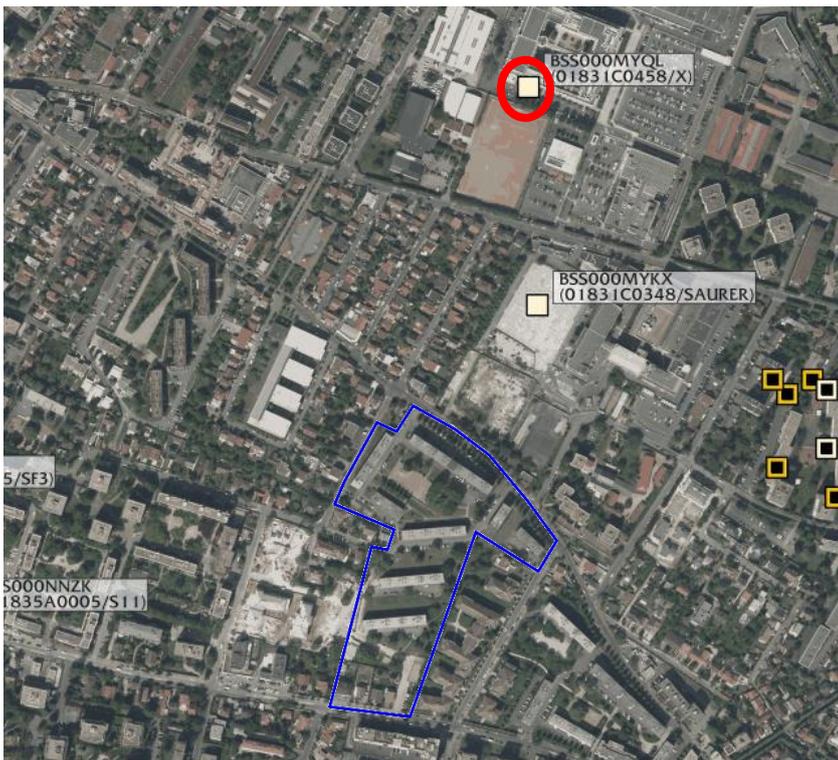
POMPES A CHALEUR SUR CAPTEURS VERTICAUX

⁶ Les forages doivent être réalisés à des profondeurs telles qu'ils nécessitent un investissement très important qui sera difficilement rentabilisé si les besoins de chaleur ne sont pas très importants et très concentrés : on estime qu'il faut desservir au minimum 3 000 équivalents-logements dans un rayon de 3 à 4 km pour la géothermie basse énergie (source : ADEME IDF). Remarque : Un équivalent logement correspond à la consommation d'un logement de 70 m² construit selon les normes en vigueur au milieu des années 90, soit environ 11 MWh/an de chaleur utile en chauffage et en eau chaude.

La conductivité thermique d'un terrain varie essentiellement suivant son humidité et sa texture. La figure ci-dessous montre la variation du potentiel en fonction du type de sous-sol :



La Base de données du Sous-Sol (BSS) du BRGM recense les forages réalisés sur tout le pays et permet d'obtenir pour certains d'entre eux des coupes géologiques à différentes profondeurs.



Le forage entouré en rouge présente la géologie suivante :

Profondeur	Composition
De 0 à 0.4 m	Goudron
De 0.4 à 0.6 m	Mache fer
De 0.6 à 2 m	Remblai
De 2 à 6 m	Marnes et gypse
De 6 à 11 m	Calcaire très dur
De 11 à 16 m	Sables de Beauchamp
De 16 à 28.5 m	Marnes et caillasses
De 28.5 à 38 m	Calcaire grossier très dur
De 38 à 41 m	Fausses glaises
De 41 à 51 m	Sable fin gris
De 51 à 54 m	Eau marron fonce
De 54 à 58 m	Gris clair
De 58 à 59 m	Marron clair argile
De 59 à 62 m	Gris fonce très dur
De 62 à 65 m	Argile plastique
De 65 à 69 m	Marnes et calcaire
De 69 à 73 m	Craie très dure
De 73 à 101 m	Craie à silex

Figure 16 : Ouvrages de la banque de

données du sous-sol (BRGM)

Ces caractéristiques laissent supposer une conductivité thermique plutôt moyenne jusqu'à 100 mètres de profondeur. Cependant, d'une manière générale, **la mise en place de pompes à chaleur sur capteurs verticaux est possible et intéressante partout en France, donc également sur le site.** Il serait toutefois nécessaire de réaliser un test de réponse thermique du terrain pour connaître précisément la capacité thermique du terrain.

1.3.2 CONTRAINTES DU SITE

Il existe plusieurs contraintes à la mise en place d'installations géothermiques : risques de mouvement de terrain, présence de cavités, risque de remontée de nappe, etc.

Le BRGM et le CEREMA ont établi une carte des zones relatives à la géothermie de minime importance⁷ pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Cette carte s'appuie sur une

⁷ Sont considérées comme des exploitations de gîtes géothermiques à basse température relevant du régime de la minime importance :

- Les activités recourant à des échangeurs géothermiques fermés (géothermie sur capteurs verticaux) dont la profondeur de forage est inférieure à 200m et dont la puissance thermique maximale prélevée du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW.
- Les activités recourant à des échangeurs géothermiques ouverts (géothermie sur nappe) dont la température de l'eau prélevée est inférieure à 25°C, dont la profondeur de forage est inférieure à 200m et dont la puissance thermique maximale

méthodologie d'élaboration prenant en compte neuf phénomènes redoutés pouvant apparaître lors d'un forage géothermique de minime importance :

- Affaissement / surrection lié aux niveaux d'évaporites,
- Affaissement / effondrement lié aux cavités (minières ou non minières),
- Mouvement ou glissement de terrain,
- Pollution des sols et des nappes,
- Artésianisme,
- Mise en communication d'aquifères,
- Remontée de nappe.

La carte distingue trois zones selon l'importance des phénomènes. Celles-ci sont définies dans l'article 22-6 du décret n°2006-649 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains (article créé par le décret n°2015-15 du 8 janvier 2015) :

- Zones rouges : zones dans lesquelles la réalisation d'ouvrages de géothermie est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance.
 - ➔ Une installation géothermique dans ce type de zone relèvera alors de la géothermie de basse température et nécessitera donc le dépôt d'une demande d'autorisation.
- Zones orange : zones dans lesquelles les activités géothermiques ne sont pas réputées présenter des dangers et inconvénients graves et dans lesquelles est exigée la production d'une attestation d'un expert agréé. Celle-ci doit constater la compatibilité du projet au regard du contexte géologique de la zone d'implantation et de l'absence de dangers et inconvénients graves.
 - ➔ Le régime déclaratif s'applique. La réalisation de l'ouvrage nécessite l'avis d'un expert géologue ou hydrogéologue et le recours à un foreur qualifié.
- Zones vertes : zones dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance sont réputées ne pas présenter des dangers et inconvénients graves.
 - ➔ Le régime déclaratif s'applique. Il est nécessaire de recourir à un foreur qualifié.

La totalité du site est éligible à la géothermie de minime importance sur capteurs verticaux avec avis d'expert (zone orange). Le principal risque identifié est l'affaissement / surrection lié aux niveaux d'évaporites.

- L'aléa sismique de la zone est très faible⁸.
- Le terrain ne présentant pas de cavités souterraines⁹.
- Aucun mouvement de terrain (glissement, chute, éboulement, effondrement, coulée, érosion)¹⁰ n'est référencé.
- L'aléa de retrait ou gonflement des argiles¹¹ est faible sur le site.
- Le site n'est pas concerné par le risque inondation¹² de la Seine, le risque d'inondation par remontée de nappe est faible à très faible sur le site.

1.3.3 POTENTIEL

La géothermie très basse énergie sur capteurs verticaux ou pieux géothermiques présente un potentiel a priori intéressant sous réserve d'un avis d'expert favorable ; il pourra s'agir d'une source d'approvisionnement en énergie pour les bâtiments ayant de faibles besoins et/ou des besoins de chaud et de froid. Des tests en réponse thermiques sont nécessaires pour identifier précisément la puissance spécifique qui pourra être mobilisée.

prélevée du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW. Les eaux prélevées doivent être en totalité réinjectées dans le même aquifère. Les débits prélevés ou réinjectés doivent être inférieurs à 80 m³/h.

⁸ Source : georisques.gouv.fr

⁹ Source : georisques.gouv.fr

¹⁰ Source : georisques.gouv.fr

¹¹ Source : georisques.gouv.fr

¹² Source : georisques.gouv.fr

1.4 HYDROTHERMIE



L'hydrothermie est la récupération de chaleur sur l'eau de nappes ou de cours d'eau (cf. Article 19 de la Loi 2009-967 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, dite Grenelle I).

1.4.1 AQUIFERES SUPERFICIELS

Un atlas du potentiel d'utilisation des aquifères superficiels accompagné d'un outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse énergie a été réalisé par le BRGM sur la région Ile-de-France. Pour chaque aquifère superficiel, des données telles que la profondeur, l'épaisseur, la température, le débit, la minéralisation, le potentiel géothermique voire la puissance possible à installer, etc. sont disponibles.

L'étude repose sur une analyse multicritères du sous-sol, basée sur les paramètres suivants :

- La profondeur d'accès à la ressource ;
- Le débit exploitable ;
- La température de l'aquifère

Remarque : cet atlas ne se substitue pas à une étude détaillée d'un bureau d'études spécialisé dans le but de confirmer la présence d'un potentiel supposé sur la zone considérée.

La carte page suivante présente le potentiel du meilleur aquifère au droit du site.



Figure 17 : Caractéristiques géothermiques du meilleur aquifère (source : BRGM)

Les informations hydrogéologiques recueillies¹³ indiquent la présence de plusieurs aquifères au droit du site d'étude :

- l'aquifère du Bartonien, formé par les calcaires de Saint Ouen et les sables de Beauchamp faiblement perméable et potentiellement vulnérable à une pollution (Eocène supérieur) ;
- l'aquifère du de l'Yprésien et du Lutétien, situées approximativement à la côte 45,00 NGF soit à environ 46 m de profondeur au nord du site et 27 m au sud du site (Eocène moyen et inférieur) ;
- l'aquifère de la craie dont la profondeur pourrait être également faible.

L'Atlas géothermique du BRGM indique que le potentiel est fort à moyen au droit du site (profondeur des aquifères plus importante sur la partie nord) grâce à la présence des aquifères de l'Eocène moyen et inférieur et de la Craie. Ils présenteraient tous les deux un débit moyen mobilisable de l'ordre de 10 à 50 m³/h et des températures de 12 à 16°C.

! Ces informations ne se substituent pas à une étude de faisabilité détaillée d'un bureau d'études spécialisé, dans le but de confirmer la présence d'un potentiel supposé sur la zone considérée.

Une étude approfondie doit être réalisée par un bureau d'études spécialisé pour connaître les caractéristiques hydrologiques et géotechniques des terrains et conclure sur la possibilité d'utiliser cette nappe à des fins de production de chaleur pour une partie des bâtiments ou l'ensemble de la zone via un réseau de chaleur.

À titre d'exemple, il est important d'étudier l'impact des pompes à chaleur sur nappe sur les installations voisines de même type d'une part, et sur la température de la nappe d'autre part. Sur ce dernier point, l'idéal est d'utiliser la PAC en été et en hiver de manière à équilibrer les rejets.

1.4.2 AQUIFERES INTERMEDIAIRES

La nappe de l'**Albien** est située à environ 600 mètres de profondeur au droit de Paris, et peut atteindre 1 000 mètres de profondeur au droit de Melun. Sa température est de l'ordre de 25°C à 30°C.

La nappe du **Néocomien** est située sous celle de l'Albien (~750 mètres de profondeur), et présente une température un peu plus élevée (de l'ordre de 30 à 45°C)¹⁴.

L'utilisation de ces deux nappes nécessite un recours à une pompe à chaleur, tout comme la géothermie sur nappe superficielle. Cependant, elles sont encore peu utilisées pour la géothermie. Le réseau de chaleur du Fort d'Issy-les-Moulineaux est alimenté via la nappe de l'Albien : d'une profondeur de 635 mètres, le doublet permet d'exploiter une eau à 28°C.

Le potentiel au droit du site n'est pas connu avec précision. Toutefois, ce type de projet ne peut pas être envisagé à l'échelle d'un site comme celui des Godardes II, à plus forte raison dans le cadre de bâtiments neufs ayant de faibles consommations. Il doit être envisagé à une échelle plus large, dans le cadre de la création d'un réseau de chaleur urbain plutôt de l'ordre de grandeur de la ville.

1.4.3 AQUIFERES PROFONDS (GEOOTHERMIE BASSE ENERGIE)

Le **Dogger** est un bassin sédimentaire datant du Jurassique. Sa température est de l'ordre de 65 à 77°C en Ile-de-France. Le doublet géothermique du réseau de chaleur Bagéops à Bagneux exploite cette ressource à 65°C (par l'intermédiaire de pompes à chaleur), avec un débit de 250 à 280 m³/h. Le forage atteint 1 800 m de profondeur et le réseau alimente environ 9 500 équivalents logements.

Les critères retenus par le BRGM afin de déterminer le potentiel de la nappe du Dogger sont la température, la transmissivité et la profondeur de la nappe. Le potentiel est favorable sur la commune de Rueil-Malmaison.

¹³ Rapport d'études historique, documentaire et de vulnérabilité selon la norme X31-620-2 Secteur des Godardes II à Rueil Malmaison, OMNIUM GENERAL D'INGENIERIE, mars 2018

¹⁴ Source : BRGM (Géothermie Perspectives)

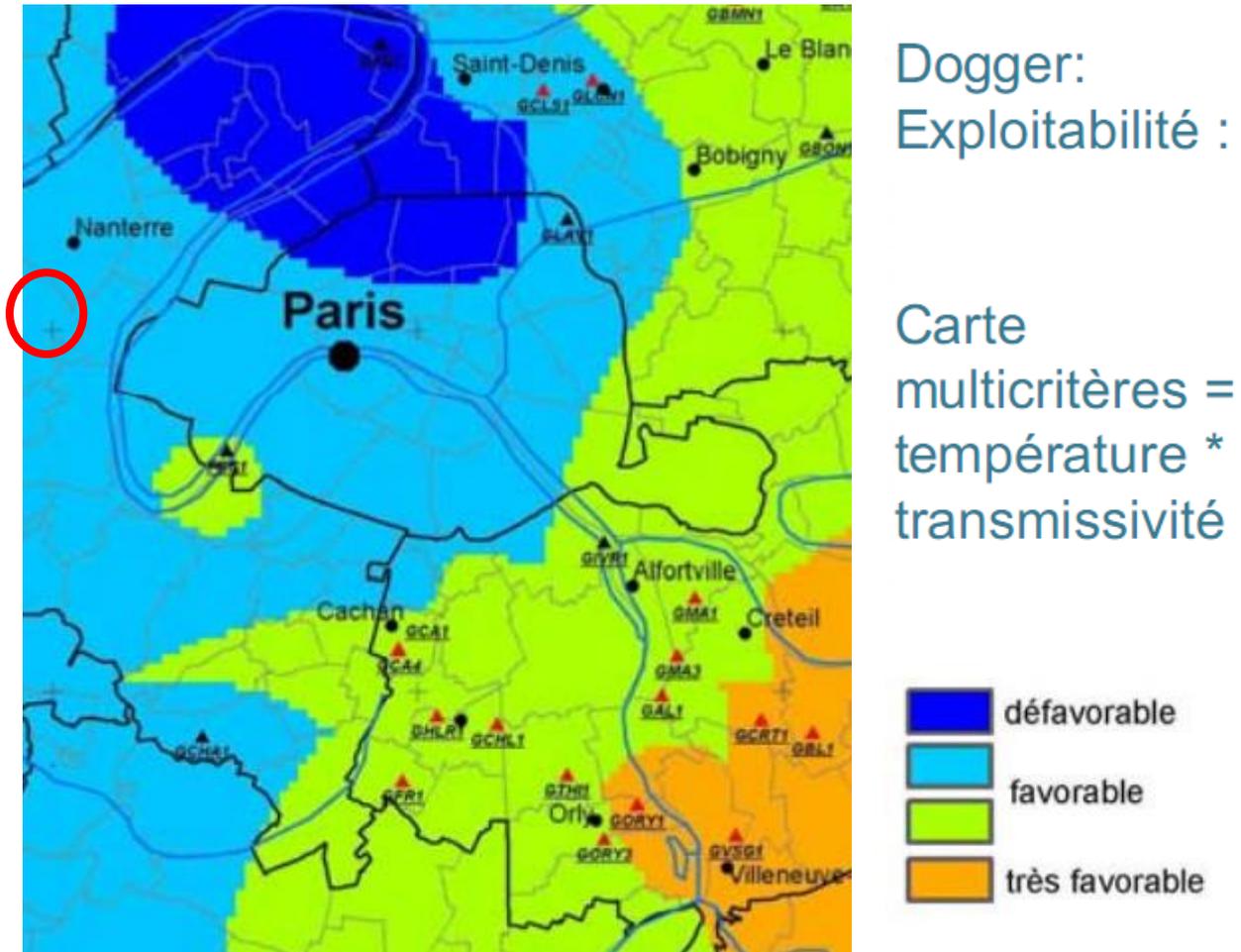


Figure 18 : Potentiel géothermique du Dogger en Ile-de-France (BRGM, 2008)

Le potentiel géothermique de ces aquifères peut être exploitable par échange direct de chaleur ou par l'intermédiaire de pompes à chaleur, selon les températures rencontrées. En revanche, l'exploitation de cette ressource n'est envisageable que dans le cadre de la mise en place d'un réseau de chaleur alimentant un nombre très conséquent d'immeubles et de bâtiments publics et tertiaires. En effet, les coûts de forage étant très importants, il est possible de rentabiliser un tel projet avec un nombre important d'usagers raccordés au réseau de chaleur¹⁵.

1.4.4 CONTRAINTES

Il existe plusieurs contraintes à la mise en place d'installations géothermiques : risques de mouvement de terrain, présence de cavités, risque de remontée de nappe, etc.

Le BRGM et le CEREMA ont établi une carte des zones relatives à la géothermie de minime importance pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (voir 1.3.2).

La totalité du site est éligible à la géothermie de minime importance sur nappe avec avis d'expert (zone orange). Le principal risque identifié est l'affaissement / surrection lié aux niveaux d'évaporites.

- Le site du projet n'est pas concerné par un périmètre de protection de captage d'alimentation en eau potable.
- Le site du projet n'est pas concerné par un périmètre d'aléa inondation.

¹⁵ Ou un nombre d'utilisateurs plus restreint mais présentant des besoins de chauffage très importants.

La réalisation d'un ouvrage sur le Dogger représente un investissement considérable (de l'ordre de 8 M€ contre 500 k€ à 1 M€ environ pour un ouvrage sur nappe superficielle). Ce type d'ouvrage ne peut être envisagé que dans le cadre d'une opération dépassant les seuls bâtiments du site.

1.4.5 POINT SUR LA PROCEDURE AQUAPAC

Étant donnés les coûts importants de forage et les risques que les ressources ne soient pas suffisantes pour être exploitées, une procédure de garantie a été mise en place au niveau national. Elle couvre également les risques de non-pérennité de la ressource. Il s'agit de la procédure AQUAPAC.

LA PROCEDURE AQUAPAC

Cette procédure de « garantie sur la ressource en eau souterraine » à faible profondeur utilisée à des fins énergétiques a été mise en œuvre en partenariat entre l'ADEME, le BRGM et EDF. Elle est destinée à couvrir les risques d'aléas et de non-pérennité de la ressource. C'est une double garantie :

- garantie de recherche : couvre le risque d'échec consécutif à la découverte d'une ressource en eau souterraine insuffisante pour le fonctionnement des installations tel qu'il avait été prévu,
- garantie de pérennité : couvre le risque de diminution ou de détérioration de la ressource en cours d'exploitation.

Elle s'applique en faveur des installations utilisant des pompes à chaleur d'une puissance thermique supérieure à 30 kW.

AQUAPAC assure pendant 10 ans les investissements réalisés pour le captage et le transfert de la ressource jusqu'à l'échangeur eau –eau et sa réinjection.

Le cas échéant, une indemnité importante calculée sur le montant des investissements est versée à l'assuré. Elle ne peut dépasser 140 000 euros par sinistre.

1.4.6 POTENTIEL

La géothermie très basse énergie sur les nappes de l'Eocène moyen et inférieur et de la Craie semble envisageable **sous réserve d'un avis d'expert favorable**. Des études complémentaires quant aux caractéristiques de ces nappes devront être menées pour confirmer et affiner leurs caractéristiques locales.

Le recours à la géothermie plus profonde (Albien, Néocomien, Dogger) pourrait être envisagé à plus large échelle dans le cadre de la création d'un réseau de chaleur de plus grande ampleur à l'échelle de la commune.

1.5 AEROTHERMIE



L'aérothermie est la récupération de chaleur dans l'air extérieur ou dans l'air de renouvellement extrait des bâtiments (cf. Article 19 de la Loi 2009-967 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, dite Grenelle I).

L'exploitation de la chaleur contenue dans l'air se fait au moyen d'une pompe à chaleur (cf. § 1.3 pour une présentation des pompes à chaleur).

1.5.1 GISEMENT

SUR AIR EXTERIEUR

Le prélèvement de la chaleur sur l'air extérieur ne peut pas être réalisé de manière efficace dans n'importe quelles conditions : en effet, lorsque la température extérieure est trop basse, le coefficient de performance de la pompe à chaleur diminue jusqu'à présenter un rendement équivalent à celui d'un radiateur électrique. Il s'agit donc d'éviter les installations dans les régions présentant un hiver rigoureux, ou alors de ne les utiliser qu'en mi saison avec un autre équipement pour l'hiver. Par ailleurs, le sel contenu dans l'air marin peut poser un problème de corrosion au niveau de la pompe à chaleur, généralement située à l'extérieur.

Rueil-Malmaison ne présente pas d'hivers très rigoureux, de ce fait, ce type d'installation est envisageable mais pas à privilégier, ou pour un fonctionnement en mi-saison seulement.

SUR AIR VICIE

L'air extrait d'un bâtiment lors du processus de renouvellement d'air est chaud ; il est dommage de perdre les calories qu'il contient, sachant qu'il faut chauffer l'air extérieur froid qui le remplace. Deux applications principales existent pour récupérer la chaleur contenue dans l'air vicié :

- La ventilation mécanique contrôlée (VMC) thermodynamique : la chaleur de l'air vicié est transférée à l'air neuf entrant avant son arrivée dans le bâtiment puis une pompe à chaleur relève la température jusqu'au niveau souhaité,
- Le chauffe-eau thermodynamique : une pompe à chaleur utilise la chaleur de l'air pour chauffer un ballon d'eau chaude sanitaire.

Ces équipements sont présentés dans des fiches dans la seconde partie de ce rapport.

Ce type d'équipement peut être implanté dans n'importe quelle partie de la France. Leur pertinence est plutôt liée à l'usage du bâtiment : par exemple, la mise en place de chauffe-eau thermodynamiques n'est intéressante que lorsque les besoins en eau chaude sanitaire sont suffisamment importants ce qui est le cas pour les logements.

1.6 RECUPERATION DE CHALEUR SUR EAUX USEES

1.6.1 TECHNOLOGIE



En hiver, les eaux usées sont plus chaudes que l'air extérieur, constituant ainsi une source de chaleur. Au niveau des collecteurs d'eaux usées, le cas inverse se produit en été ; les bâtiments peuvent être rafraîchis grâce aux eaux usées. La récupération de chaleur (ou de froid) se fait de manière simple : un fluide caloporteur capte l'énergie des eaux usées par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. L'énergie peut être récupérée à différents niveaux : au niveau du bâtiment, au niveau de la station d'épuration, ou au niveau des collecteurs d'eaux usées.

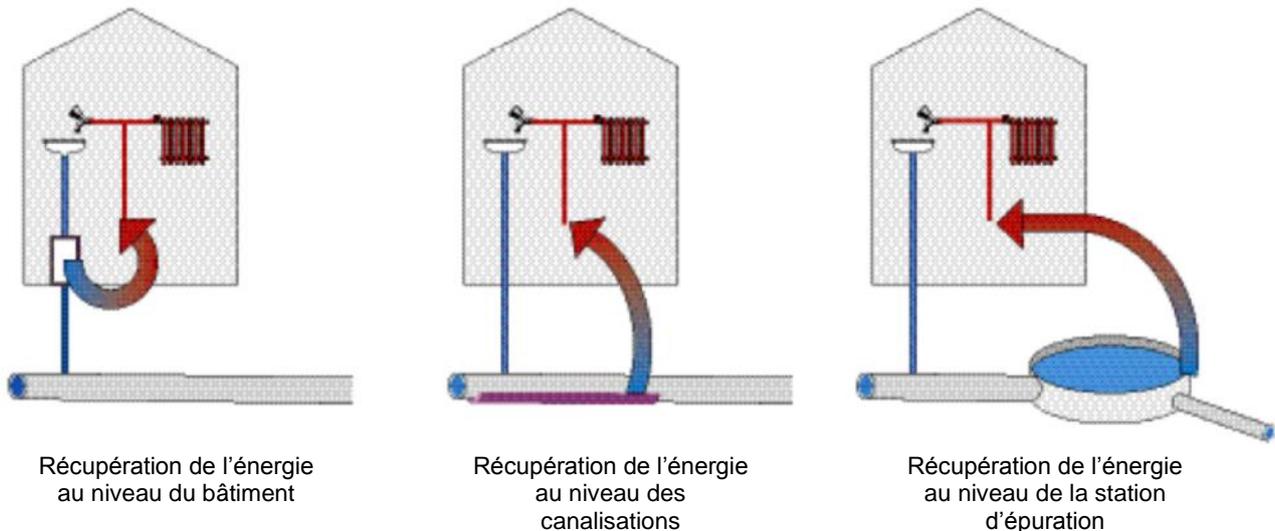


Figure 19 : Récupération de l'énergie des eaux usées (Source : Gestion et services publics, Suisse)

1.6.1.1 Au niveau des collecteurs

PRESENTATION

La température des eaux usées oscille entre 10°C et 20°C toute l'année.

Le chauffage collectif des bâtiments peut se faire de manière centralisée ou décentralisée. Dans le premier cas, la chaleur est produite au sein d'une unique chaufferie puis l'eau est acheminée à haute température vers les lieux de consommation via des canalisations isolées. Ce système est idéal lorsque les consommateurs sont proches les uns des autres.

Dans le cas d'un système décentralisé, l'eau est acheminée à basse température (entre 7 et 17°C) vers les chaufferies présentes dans chaque bâtiment. Cette solution présente l'avantage d'utiliser des canalisations non isolées et donc meilleur marché, ainsi que de réduire les pertes de chaleur. Elle est adaptée dans le cas de consommateurs éloignés de la source de captage de l'énergie. En revanche, les coûts d'installation et de maintenance de plusieurs chaufferies seront plus importants.

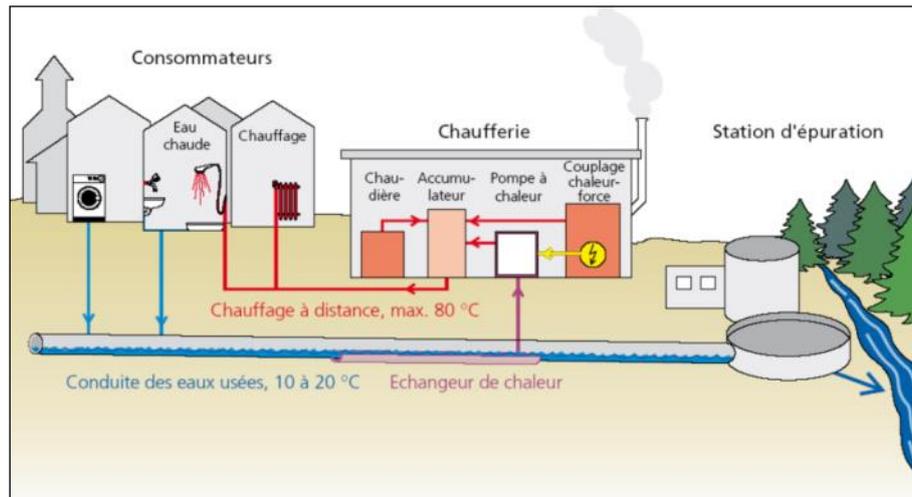


Figure 20 : Principe de fonctionnement de la récupération de chaleur des eaux usées sur les canalisations
(Source : Susanne Staubli)



Dans le cas d'un réseau d'assainissement neuf ou lors d'une rénovation de tronçons, les échangeurs de chaleur peuvent être intégrés à la canalisation. Dans le cas inverse, les systèmes sont réalisés au cas par cas et déposés au fond des canalisations. Cependant, la mise en place de ce système, qui est aisée pour des constructions nouvelles, sera difficile et chère pour des canalisations anciennes et de petits diamètres.

Figure 21 : Canalisation préfabriquée avec échangeur de chaleur intégré

Source : Guide pour les maîtres d'ouvrages et les communes, OFEN



Figure 22 : Échangeur installé dans un ovoïde existant (Rabtherm), échangeur pour collecteur existant (Uhrig)

Source : Lyonnaise des Eaux

PERFORMANCE DU SYSTEME ET ECONOMIES D'ENERGIE

La performance du système est conditionnée par le système de chauffage des bâtiments alimentés (haute ou basse température), le débit des eaux, leur température et la configuration du réseau des eaux usées.

Le système de chauffage influence la performance de la pompe à chaleur, le COP. Celui-ci dépend de la différence entre la température de condensation et la température d'évaporation du fluide frigorigène. Les meilleurs COP sont obtenus avec de faibles différences de température. Un réseau d'eau chaude basse température est donc préférable pour obtenir une bonne performance du système.

Selon le bureau d'études BPR-Europe, la performance varie de 2 à 5 kW de puissance de chauffage/m² d'échangeur de chaleur, soit 1,8 à 8,4 kW par mètre linéaire d'échangeur. La longueur de l'échangeur est généralement comprise entre 40 et 80 m.

CONTRAINTES ET RECOMMANDATIONS

La mise en œuvre de la récupération de chaleur sur eaux usées nécessite que certaines conditions soient respectées par le réseau d'eaux usées et le/les bâtiments à alimenter.

Sur les bâtiments à chauffer/rafraîchir :

Paramètre	Contrainte/Recommandation
<u>Type de bâtiment</u>	La demande de chauffage ou d'ECS doit être régulière pour assurer un temps d'exploitation élevé des pompes à chaleur, et améliorer leur rentabilité. Bâtiments les plus adaptés : piscines, résidence de logements, bureaux, hôpitaux, maisons de retraite, hôtels. Les salles de sports, salles de spectacles et centres commerciaux sont à éviter.
<u>Distance collecteur/bâtiments</u>	Préférable : inférieure à 350 m Cas favorable : distance inférieure à 200 m
<u>Température de fonctionnement</u>	Une température d'exploitation basse permet une meilleure efficacité des pompes à chaleur utilisées par la récupération de chaleur sur eaux usées. Les systèmes de chauffage basse température sont préconisés dans le cas de constructions neuves (T < 65°C)
<u>Puissance thermique</u>	Minimum 150 kW (Puissance nécessaire pour l'alimentation d'une cinquantaine de logements collectifs)
<u>Volume de consommation</u>	Une consommation supérieure à 1 200 MWh/an est très favorable à la mise en place de l'installation de récupération de chaleur. Une consommation inférieure à 800 MWh/an est plutôt défavorable.
<u>Climatisation</u>	Utiliser des pompes à chaleur réversibles pour climatiser le bâtiment en été permet d'augmenter la rentabilité de l'installation.

Figure 23 : Contraintes et recommandations sur les bâtiments alimentés par la chaleur des eaux usées

Sources : OFEN¹⁶, Lyonnaise des Eaux

Sur le réseau de collecte des eaux :

Paramètre	Contrainte/Recommandation
<u>Débit des eaux usées</u>	Débit minimum 15 L/s (moyenne quotidienne par temps sec). Ce débit est atteint pour 8 000 à 10 000 personnes raccordées au réseau. Débit favorable : entre 15 et 30 L/s Débit très favorable : supérieur à 50 L/s
<u>Diamètre du collecteur</u>	Collecteur existant : diamètre minimum de 800 mm pour que l'échangeur de chaleur puisse être installé. Renouvellement ou extension de réseau : un diamètre de 400 mm est suffisant (l'échangeur est intégré directement à la canalisation). Installation impossible : diamètre inférieur à 400 mm.
<u>Température des eaux usées</u>	La température des eaux en entrée de la station d'épuration doit de préférence être supérieure à 12°C ¹⁷ L'abaissement de la température des eaux usées peut avoir des effets négatifs sur la nitrification et l'élimination de l'azote dans les STEP à boues activées. Cet aspect doit être étudié lors de l'étude de faisabilité.
<u>Âge des conduites</u>	L'installation d'un échangeur de chaleur est plus avantageuse dans le cas où la canalisation doit être rénovée ou remplacée.

Figure 24 : Contraintes et recommandations sur les canalisations d'eaux usées

Sources : OFEN, VSA (Association Suisse des professionnels de la protection des eaux), Lyonnaise des Eaux

¹⁶ Office Fédéral de l'Énergie Suisse. Il propose un programme en faveur de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables, SuisseEnergie. Dans ce cadre, un « Guide pour les Maîtres d'Ouvrage et les communes » sur l'utilisation des eaux usées comme source de chauffage ou de rafraîchissement est mis à disposition.

¹⁷ Rabtherm, société ayant développé le procédé de récupération de chaleur sur eaux usées, a étudié l'impact de ce procédé sur la température des eaux usées. Pour un débit de 60 L/s et une puissance de chauffage de 500 kW, la température est diminuée de 1°C pour un gain de 4°C du fluide caloporteur. À l'inverse, en mode froid, les eaux usées sont réchauffées de 4°C (de 24 à 28°C) alors que le fluide caloporteur perd 6°C.

1.6.1.2 Au niveau d'une station de relevage

Il existe une solution de récupération de chaleur des eaux usées au niveau des stations de pompage (ou stations de relevage). Ces stations sont souvent intéressantes car elles sont situées en ville et donc proches des preneurs de chaleur.

Ce système utilise une fosse de relevage existante. Une partie des eaux usées est pompée de la fosse de la station de pompage avant STEP vers des échangeurs coaxiaux et transférée vers le collecteur après passage dans l'échangeur comme l'illustre la figure page suivante.

Cette technologie est encore en cours de développement et il y a aujourd'hui très peu d'installations de ce type en Europe.

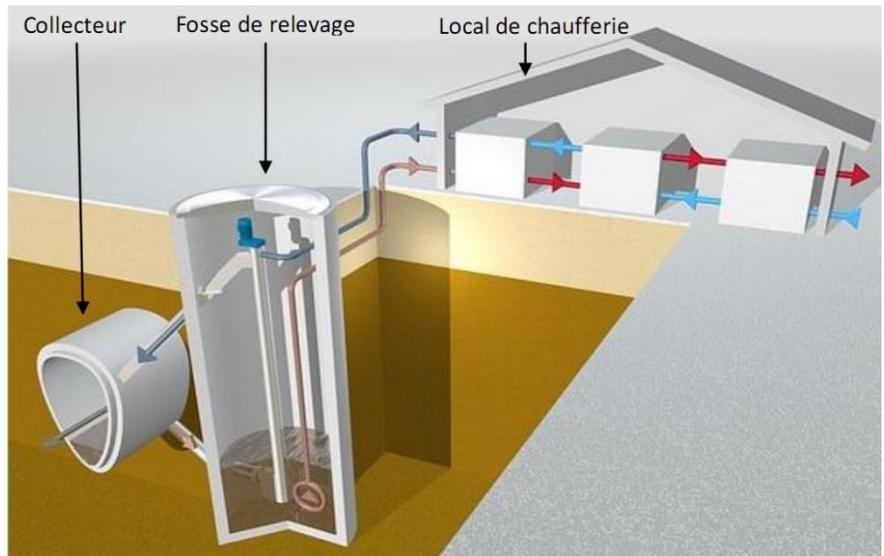


Figure 25 : Récupération de chaleur à partir d'une fosse de relevage Source : www.huber.de

CONTRAINTES

Comme pour les procédés précédents, certaines conditions sont à respecter et plusieurs éléments à considérer au cours de la conception :

- C'est une solution intéressante pour des besoins en chaleur importants (minimum de 150 kW) ;
- Les débits dans le collecteur doivent être au minimum de 15 l/s et la température minimale des eaux usées ne doit pas être en dessous de 10 °C ;
- Les eaux usées sont filtrées avant d'entrer dans l'échangeur de chaleur. Des essais sont en cours pour limiter la formation de biofilm sur les parois ;
- Les échangeurs de chaleurs utilisés sont de capacité standard avec la possibilité de les monter en série. Ces échangeurs ne se trouvent pas directement dans le collecteur mais dans un local de chaufferie au-dessus et disposent d'un système de nettoyage automatique.

En plus des conditions de débits et de températures à respecter, d'autres contraintes sont listées ci-dessous :

- L'extraction de chaleur des eaux usées a une influence sur les procédés de la STEP en aval.
- Des conditions limites sont à respecter en suivant les recommandations de l'exploitant de la STEP ;
- Cette solution nécessite d'avoir de la place aux abords de la fosse et des preneurs de chaleur à proximité de la station de pompage. Une solution en cours de développement permet de se placer à proximité des preneurs de chaleur en construisant une fosse de relevage pour récupérer la chaleur des eaux usées.

1.6.1.3 Au niveau du bâtiment

Il est également possible de récupérer la chaleur des eaux usées avant que celles-ci n'atteignent le collecteur. La récupération se fait au niveau du bâtiment.

Les eaux usées des cuisines, salles de bain, lave-linge et lave-vaisselle sont acheminés à une température moyenne de 28°C vers un échangeur de chaleur. Les calories des eaux usées sont transmises au circuit secondaire via l'échangeur. L'eau ainsi préchauffée peut être directement introduite dans un ballon d'eau chaude qui portera sa température à 55°C grâce à l'énergie souhaitée (solaire, bois, électricité, gaz), tel que proposé par exemple par le système Thermocycle¹⁸. Elle peut également être acheminée vers une pompe à chaleur. Ce système est proposé par exemple par Biofluides Environnement, PME française.

¹⁸ <http://www.vega-energies.com/110/>

Remarque : Il existe également des systèmes statiques, comme par exemple le Power-pipe : un échangeur de chaleur composé d'un tuyau d'évacuation en cuivre enrobé d'un serpentín de 4 à 6 tubes de cuivre est inséré directement dans la continuité du tuyau d'évacuation des eaux usées en remplaçant une section de ce dernier. Il permet ainsi un simple préchauffage de l'eau chaude sanitaire.



Figure 26 : Power-pipe

ÉCONOMIES D'ÉNERGIE

Une réduction de 40 à 60% de la consommation énergétique en eau chaude sanitaire est envisageable. Ce type d'installation peut être couplé à une installation solaire thermique, pouvant alors couvrir jusqu'à 80% de la demande en ECS.

CONTRAINTES

Il est nécessaire de séparer les eaux grises des eaux-vannes avant le dispositif de récupération de chaleur. Ceci peut nécessiter la mise en place d'un nouveau collecteur. Dans certains cas, il peut être impossible de séparer les eaux usées.

1.6.1.4 Au niveau de la station d'épuration

La récupération de chaleur en sortie de station d'épuration (STEP) est un procédé présentant un potentiel énergétique important. Cette énergie peut être utilisée sur le site ou peut assurer le chauffage de bâtiments situés à une distance acceptable de la STEP (Cf. Figure 24 ci-dessous).

La puissance disponible dépend de différents facteurs :

- le débit minimal par temps sec hivernal en sortie de STEP,
- la température minimale de l'eau en sortie de STEP,
- la température minimale de rejet des eaux épurées dans le milieu naturel, si une valeur limite est imposée par l'autorité compétente (protection des eaux de rivières, etc.)

La récupération de chaleur sur les eaux usées se fait via un échangeur de chaleur (échangeurs à plaques, échangeurs tubulaires, etc.). Positionner l'échangeur en sortie de STEP permet de réduire l'encrassement de celui-ci, par rapport à une installation en entrée de STEP ou au sein du process de celle-ci. En effet, les eaux en sortie de STEP ont été épurées et contiennent donc moins d'éléments susceptibles d'encrasser l'échangeur (particules, boues, sables, feuilles, etc.).

Figure 27 : Echangeur tubulaire en sortie de STEP (Lyonnaise des Eaux, ISTINOX, ANTEA)



ATOUS

Cette solution de récupération de chaleur des eaux usées présente de nombreux atouts :

- Très fort potentiel de puissance thermique,
- Simplicité de mise en œuvre (génie civil limité, pas d'arrêt d'exploitation du réseau en amont, pas de contrainte d'installation d'équipements sur le domaine public, nombre d'acteurs généralement plus restreint que pour une installation sur le réseau d'eaux usées, etc.),
- Elle s'applique parfaitement aux solutions de production de chaleur centralisée, sous réserve que des besoins de chaleur suffisants existent à proximité,
- Pas d'effet sur la STEP (pas de problème de refroidissement des eaux usées avant rejet),
- Retours d'expérience positifs (une trentaine de stations d'épuration sont équipées en Suisse).

CONTRAINTES ET RECOMMANDATIONS

Des contraintes sont néanmoins à prendre en compte :

- Les besoins de chaleur à proximité de l'installation doivent être suffisants pour que celle-ci soit viable. Le réseau de chaleur permettant de chauffer ces consommateurs doit avoir une densité énergétique minimale de 1,5 MWh/mètre linéaire de canalisations. Cette valeur correspond au critère de l'ADEME pour bénéficier du Fonds chaleur.
- La STEP doit avoir une capacité minimale de 10 000 équivalents-habitants, afin que le débit des eaux épurées soit suffisant. Un débit hivernal par temps sec minimal de 15 L/s est recommandé.
- Il doit y avoir une adéquation entre les variations du débit des eaux usées et les variations des besoins en chaleur des consommateurs.
- La STEP doit disposer d'un espace suffisant pour implanter les éléments nécessaires à la récupération de chaleur. En effet, la taille des échangeurs est importante.
- Cette solution ne convient pas aux territoires d'altitudes élevées, pour lesquels les températures de rejet des eaux usées sont trop faibles,
- Il est préférable de mettre en place un circuit intermédiaire entre les eaux usées épurées et la pompe à chaleur car celle-ci n'est pas conçue pour travailler avec des fluides agressifs.
- Une bonne conception et exploitation permettent d'éviter la corrosion et l'encrassement des échangeurs de chaleur.

1.6.2 GISEMENT

AU NIVEAU DE LA STATION D'EPURATION

La station d'épuration la plus proche est celle de Paris Seine-centre située sur la commune de Colombes et très éloignée du site.

SUR LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT EXISTANT

Des réseaux d'eaux usées sont présents aux abords du site¹⁹. Il s'agit de réseaux unitaires de diamètre maximale 500 mm. Comme indiqué précédemment, un diamètre minimal de 800 mm est nécessaire pour envisager une récupération de chaleur sur un réseau existant. D'autre part, les réseaux unitaires ne présente pas des débits constants et leur température est largement perturbée par l'apport d'eaux pluviales ce qui rend la valorisation de chaleur difficile.

SUR LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT A CREER SUR LE SITE

Les réseaux à créer ne présenteront probablement pas un diamètre suffisant. Leur diamètre pourrait à la rigueur être surdimensionné pour accueillir un dispositif de récupération de chaleur, mais le débit ne serait a priori pas suffisant.

POUR DES INSTALLATIONS AU NIVEAU DU BATIMENT

La seule contrainte à l'installation de systèmes individuels de récupération de chaleur sur eaux usées est la nécessité de séparer les eaux grises des eaux-vannes avant le dispositif. Si cela peut conduire à des coûts importants sur des bâtiments existants, cette contrainte engendre peu de surcoûts pour des bâtiments à construire.

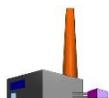
1.6.3 POTENTIEL

La station d'épuration est trop éloignée. Les caractéristiques des réseaux d'assainissement existants et à créer ne permettent pas d'envisager leur utilisation pour l'alimentation de bâtiments.

Il est faisable a priori d'installer des systèmes de récupération de chaleur sur eaux usées au niveau du bâtiment sur les bâtiments ayant des besoins en eau chaude sanitaire.

¹⁹ Source : *DIAGNOSTIC DES RESEAUX EXISTANTS*, avril 2017

1.7 CHALEUR FATALE



On entend par chaleur fatale une production de chaleur dérivée d'un site de production mais qui n'en constitue pas l'objet premier, et qui, de ce fait, n'est pas nécessairement récupérée. Les sources de chaleur fatale sont très diversifiées. Il peut s'agir de sites de production d'énergie (les centrales nucléaires), de sites de production industrielle, de bâtiments tertiaires d'autant plus émetteurs de chaleur qu'ils en sont fortement consommateurs (hôpitaux, réseaux de transport en lieu fermé, sites d'élimination comme les unités d'incinération de déchets, etc.).

1.7.1 GISEMENT

Il n'y a pas de site producteur de chaleur à proximité.

1.7.2 POTENTIEL

Il n'y a pas de gisement de chaleur fatale exploitable dans le secteur.

1.8 RACCORDEMENT A UN RESEAU DE CHALEUR EXISTANT

1.8.1 CONTEXTE



L'article L128-4 du Code l'Urbanisme demande à ce que soit réalisée une étude de faisabilité sur le potentiel de développement en énergies renouvelables des nouvelles zones aménagées qui font l'objet d'une étude d'impact ; il précise également que doit être réalisée une analyse de l'opportunité de raccorder les constructions de ces zones à un réseau de chaleur ou de froid existant et ayant recours aux énergies renouvelables et de récupération.

1.8.2 GISEMENT

Un réseau de chaleur a été créé sur le site de la ZAC Arsenal actuellement en cours de construction, à proximité immédiate du projet. Le Réseau Rueil Arsenal dont les conduites ont été posées fin 2018 a obtenu un Titre V avec un contenu CO₂ du réseau de chaleur : 0,113 kg eq. CO₂/kWh. Il sera alimenté à plus de 60% par des énergies renouvelables grâce à la géothermie.

L'extension nécessaire pour raccorder le projet au réseau existant serait d'environ 170 m (voir carte suivante).



Figure 28 : Tracé de l'extension potentielle du réseau de chaleur de la ZAC Arsenal vers le site

En première approche, l'exploitant du réseau ne voit pas d'objection à ce que le site soit raccordé au réseau de chaleur existant.

La première phase de construction correspondant aux réseaux de chaleur déjà créés se situe sur la partie sud du projet pour une livraison envisagée en 2020 à l'exception de la caserne de pompiers à l'extrême sud (donc au plus proche du site d'étude) qui devrait être livrée en 2024. Le raccordement des bâtiments du site pourrait s'inscrire dans le calendrier de la ZAC Arsenal.

1.8.3 POTENTIEL

Le raccordement au réseau de chaleur de la ZAC de l'Arsenal est une potentialité **tout à fait intéressante**. Des études plus poussées sont nécessaires pour valider la faisabilité technico-économique de ce raccordement.

2 FILIERES DE PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE

2.1 ÉNERGIE SOLAIRE



Les modules photovoltaïques produisent de l'électricité à partir de l'ensoleillement (les photons de la lumière du soleil) ; il ne faut donc pas les confondre avec les panneaux solaires thermiques qui produisent de la chaleur qui est transmise par un fluide caloporteur.

2.1.1 GISEMENT

L'ensoleillement du territoire et les données météorologiques constituent le gisement brut des filières solaires photovoltaïques. Ces données servent de base au calcul du productible des installations solaires thermiques et photovoltaïques.

Voir § 1.1 pour plus d'informations.

2.1.2 PRODUCTIBLE

Les toitures des bâtiments si l'on exclut la majeure partie des ombres portées représentent environ 7 500 m² (voir Figure 29). Avec une inclinaison des modules optimale de 30°, la surface de modules pourrait représenter 8 650 m² soit une puissance de 900 kWc pour une production prévisionnelle de 860 MWh/an soit 960 heures à puissance nominale.



Figure 29 : Cartographie des toitures des bâtiments pouvant être équipées en panneaux photovoltaïques

2.1.3 CONTRAINTES

D'une manière générale, les contraintes sont les mêmes que pour la filière solaire thermique ; voir § 1.1.3.

2.1.4 POTENTIEL

Des panneaux solaires photovoltaïques peuvent être mis en place sur tous les bâtiments, il n'y a pas de contraintes réglementaires.

La filière solaire photovoltaïque présente un gisement intéressant, et pourrait être sollicitée pour contribuer à l'approvisionnement en électricité du site.

2.2 ÉNERGIE EOLIENNE



Une éolienne produit de l'électricité à partir du vent ; elle récupère l'énergie cinétique du vent. En tournant, le rotor entraîne un arbre raccordé à une génératrice électrique qui se charge de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

Remarque : Nous n'aborderons pas les grands parcs éoliens. En effet, le type de machines utilisées ayant une hauteur de 100 mètres, ils ne se prêtent pas à l'implantation sur le site, la seule contrainte d'urbanisme rendant impossible l'installation de ce type d'équipement. Seul l'éolien dit « urbain » ou « petit éolien » est abordé ici.

2.2.1 PRESENTATION DE LA TECHNOLOGIE

Certains concepteurs ont créé des éoliennes dites urbaines, adaptées aux conditions particulières que sont la turbulence, les vitesses de vent affectées par l'environnement, les vibrations, le bruit ou encore les considérations d'aménagement. Elles peuvent se classer en deux grandes catégories suivant l'orientation de l'axe de leurs pales, horizontal ou vertical.

ÉOLIENNES A AXE HORIZONTAL

Les éoliennes urbaines à axe horizontal sont similaires aux éoliennes classiques quant à leur principe de fonctionnement. Les pales mises en rotation par l'énergie cinétique du vent entraînent un arbre raccordé à une génératrice qui transforme l'énergie mécanique créée en énergie électrique.

Les éoliennes urbaines à axe horizontal se caractérisent par leur petite taille, allant de 5 à 20 mètres, par le diamètre des pales (2 à 10 m) et par leur puissance atteignant pour certaines 20 kW.

ÉOLIENNES A AXE VERTICAL

Ces éoliennes à axe vertical ont été conçues pour répondre au mieux aux contraintes engendrées par les turbulences du milieu urbain. Grâce à ce design, elles peuvent fonctionner avec des vents provenant de toutes les directions et sont moins soumises à ces perturbations que les éoliennes à axe horizontal. Elles sont relativement silencieuses et peuvent facilement s'intégrer au design des bâtiments ou équipements publics (éclairage public). Leur faiblesse réside principalement dans la faible maturité du marché qui engendre des coûts d'investissement relativement importants. En raison de leur petite taille, l'énergie produite est faible.

En milieu urbain, la vitesse du vent et sa direction sont imprévisibles surtout près des bâtiments. Là où la turbulence ne peut être évitée, les éoliennes à axe vertical peuvent plus facilement capter la ressource éolienne.

Il existe deux grands types d'éoliennes à axe vertical : le type Darrieus et le type Savonius.

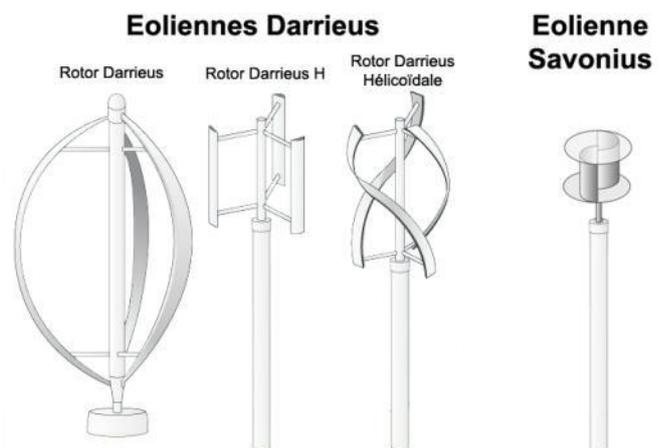


Figure 30 : Éoliennes de type Darrieus et Savonius

Les avantages de l'éolienne verticale type Darrieus sont nombreux :

- Elle peut être installée dans des zones très venteuses, puisqu'elle peut subir des vents dépassant les 220 km/h.
- En outre, cette éolienne émet moins de bruit qu'une éolienne horizontale et occupe moins de place. De plus, il est possible de l'installer directement sur le toit.
- Autre aspect pratique, son générateur peut ne pas être installé en haut de l'éolienne, au centre des rotors, mais en bas de celle-ci. Ainsi plus accessible, il peut être vérifié et entretenu plus facilement.

Les inconvénients de l'éolienne verticale Darrius sont un faible rendement et son démarrage difficile dû au poids du rotor sur le stator.

Les avantages de l'éolienne de type Savonius sont :

- d'une part, son esthétisme et la possibilité de l'installer sur une toiture,
- d'autre part, le fait qu'elle fonctionne même avec un vent faible (contrairement au système Darrius), quelle que soit sa direction.

Comme l'éolienne type Darrius, l'éolienne Savonius n'émet que peu de bruits, mais a un faible rendement.

2.2.2 GISEMENT

Les vents dominants sont de direction sud-ouest avec une vitesse moyenne de 3,3 m/s.

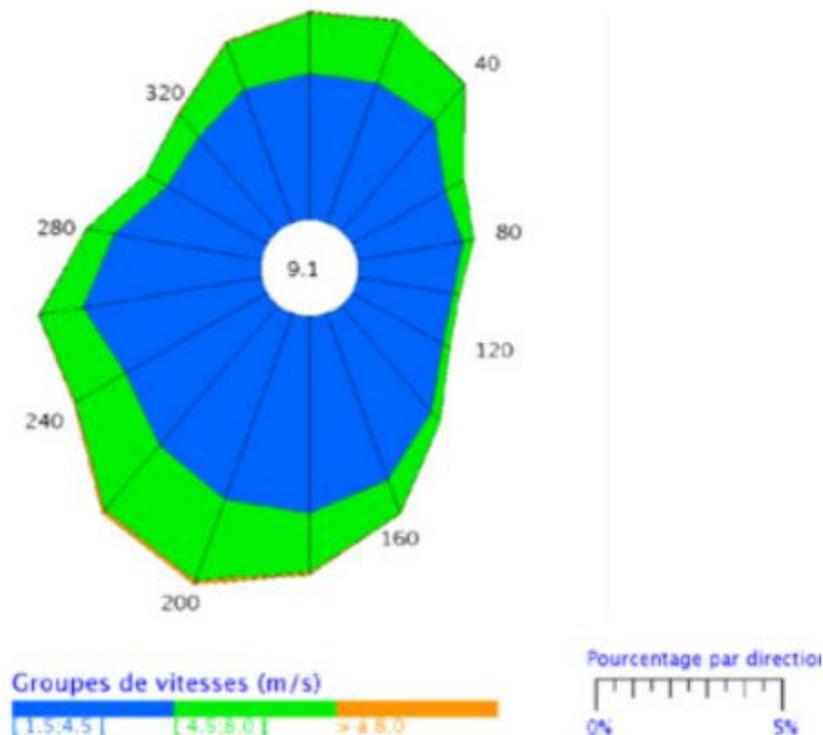


Figure 31 : Rose des vents annuelle sur le site

2.2.3 PRODUCTIBLE

Les vents semblent souffler avec une certaine régularité sur le site mais leur vitesse moyenne reste inférieure à 5m/s.

Quoi qu'il en soit, les vents peuvent être « freinés » par la topographie du site ; le régime aéralique est extrêmement perturbé par la proximité du sol, mais aussi par les nombreux obstacles (arbres, bâtiments, etc.). Aussi, le positionnement le plus favorable aux éoliennes urbaines se trouve en toiture des bâtiments les plus hauts et dans l'axe des vents dominants pour s'affranchir au maximum des perturbations créées par les autres bâtiments qui seront construits.

Il est dans tous les cas difficile de déterminer précisément le gisement d'un site sans une étude de vent locale, réalisée à l'aide d'un mât de mesures, d'au moins une année sur le lieu même pressenti pour l'implantation de l'éolienne. Cependant, le coût d'une telle étude peut être prohibitif par rapport à la production attendue de l'éolienne ; il est alors préférable de se référer au retour d'expérience des projets existants et aux enseignements qu'il en découle sur l'implantation conseillée des éoliennes urbaines.

2.2.4 CONTRAINTES LORS DE L'INSTALLATION SUR LES BATIMENTS

Afin d'identifier les conditions nécessaires à une meilleure intégration des éoliennes en milieu urbain et de promouvoir l'émergence de la technologie en tant que moyen de production d'électricité à l'échelle des villes en Europe, un projet européen, WINEUR, a vu le jour en 2005. Ce projet a permis d'obtenir les premiers éléments de réponse par rapport cette technologie. Les conclusions que l'on peut tirer de cette expérience en termes de potentiel sont les suivantes :

- Le vent soufflant autour d'un bâtiment est dévié en atteignant le haut du bâtiment. Afin d'utiliser de manière optimale le vent soufflant au-dessus du bâtiment, il faut une certaine marge entre le bord du bâtiment et la flèche de l'éolienne. Cela doit être calculé pour chaque site. Cela est traduit par la simulation réalisée par un bureau d'études hollandais, DHV.

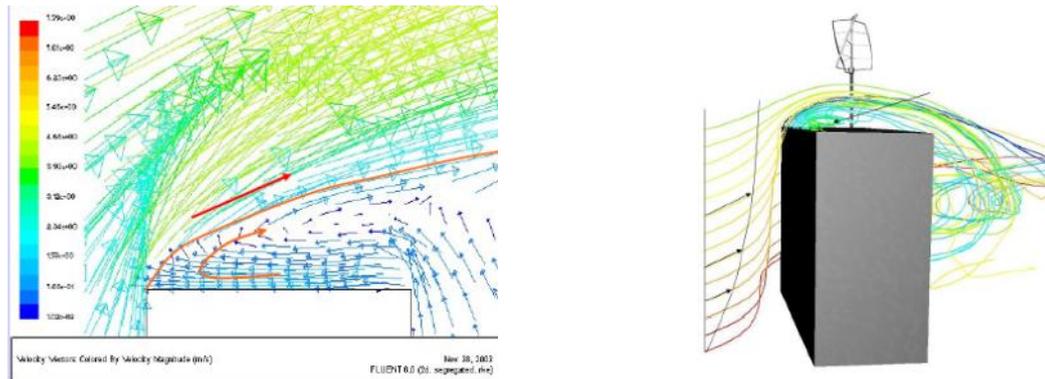


Figure 32 : Comportement du vent dans un environnement urbain (source : DVH)

- La turbulence en milieu urbain en dessous du toit peut pousser les éoliennes à axe horizontal à chercher le vent sans réussir à capter un flux d'air lui permettant de générer de l'électricité.
- Là où les directions de vent dominant convergent, l'utilisation d'éolienne à axe vertical fixe peut être possible, cependant elle doit être placée de manière à récupérer le vent au-dessus du bâtiment et donc placée pas trop bas.
- Lors de la sélection d'une éolienne, la courbe de puissance doit être évaluée en considérant le profil du vent. Cependant, une vitesse de vent moyenne ne permettra pas forcément d'obtenir des informations adéquates, même si celle-ci est mesurée à un endroit précis pour une installation spécifique. Idéalement, la durée relative à une gamme de vent doit être considérée avec la courbe de puissance.

Nous avons pu voir qu'il est difficile de calculer le productible de l'éolienne et de définir la position optimale de celle-ci. Quelques règles permettent de choisir un emplacement pour une meilleure récupération de la ressource :

- Le toit où sera installée l'éolienne doit être bien au-dessus de la hauteur moyenne des constructions environnantes (environ 50%) ;
- Dans un contexte urbain présentant une importante rugosité, une turbine à axe horizontal sera installée à une hauteur supérieure de 35% à la hauteur du bâtiment. Cela permet d'éviter les phénomènes de turbulence. Cependant, des turbines à axe vertical adaptées aux flux turbulents peuvent permettre d'éviter cette contrainte de hauteur ;
- Pour sélectionner un site adéquat, la rose des vents doit indiquer une vitesse moyenne minimum de 5 m/s ;
- Le site sélectionné doit présenter une productivité énergétique de 200 à 400 kWh/m².an, mais cela peut varier d'un facteur 2 à 5 en fonction du site. Le choix du site est donc particulièrement décisif, mais difficile.

2.2.5 REGLEMENTATION

Si la hauteur du mât ne dépasse pas 12 mètres (sans les pales) alors il n'est pas nécessaire de déposer un permis de construire, il n'y a pas non plus d'enquête publique et il n'y a strictement aucune modalité d'évaluation de l'impact sur l'environnement. Si elles ne sont pas encore rentables, le législateur a toutefois facilité leur implantation puisqu'au strict opposé des grands parcs éoliens, aucune autorisation n'est nécessaire pour installer ce type de machine si la hauteur du mât est inférieure à 12 mètres.

Il est toutefois nécessaire de respecter la réglementation en vigueur, même si aucune autorisation n'est nécessaire. Cette remarque prévaut en particulier pour le respect de la réglementation contre le bruit de voisinage. Dans un rayon de 10km autour de ces radars, il est nécessaire d'obtenir l'aval de l'exploitant concernant la mise en place des machines. D'autre part, les éoliennes ne peuvent pas être implantées à moins de 300 m d'un site nucléaire ou d'une installation classée en raison de produits toxiques, explosifs, comburants et inflammables.

2.2.6 POTENTIEL

L'éolien urbain est désavantagé par les contraintes techniques (rugosité du vent, etc.), économiques (coût élevé de la technologie), et une mise en œuvre parfois délicate (réglementation). Le gisement est faible sur le site.

2.3 HYDROELECTRICITE

Il n'y a pas de potentiel exploitable à proximité du site.

2.4 ENERGIES MARINES

Il n'y a pas de potentiel exploitable à proximité du site.

3 FILIERE DE PRODUCTION DE BIOGAZ

3.1 BIOMASSE METHANISABLE



La digestion anaérobie, également appelée méthanisation, est la décomposition biologique de matières organiques par une activité microbienne naturelle ou contrôlée, en l'absence d'oxygène. Ce procédé conduit à la production de biogaz.

La formation de biogaz est un phénomène naturel que l'on peut observer par exemple dans les marais. Elle apparaît également dans les décharges contenant des déchets organiques.

Les déchets organiques pouvant être valorisés en méthanisation proviennent de différents types de producteurs :

- **Les ménages et collectivités locales** : fraction fermentescible des ordures ménagères, boues issues de stations d'épuration, huiles alimentaires usagées produites par la restauration, etc.
- **Les exploitations agricoles** : effluents d'élevage (lisiers, fumiers), résidus de cultures (pailles de céréales ou oléagineux, cannes de maïs), cultures dédiées, etc.
- **Les industries agroalimentaires** : déchets organiques de natures très variées (graisses de cuisson, sous-produits animaux, effluents, lactosérum, etc.).

La méthanisation consiste à stocker ces déchets dans une cuve hermétique appelée « digesteur » ou « méthaniseur », dans laquelle ils seront soumis à l'action des bactéries, en l'absence d'oxygène. La fermentation des matières organiques peut durer de deux semaines à un mois, en fonction de plusieurs paramètres dont la température de chauffage du mélange.

La méthanisation des ressources organiques permet de produire :

- Du **biogaz** : composé majoritairement de méthane (de l'ordre de 60 à 80%) et de dioxyde de carbone (20 à 40%) ; il contient également des « éléments traces » (hydrogène sulfuré, ammoniac, etc.). Le biogaz peut être valorisé par combustion sous chaudière, cogénération, comme carburant après épuration, ou encore être injecté sur le réseau de gaz naturel (après épuration).
- Le **digestat** : fraction organique résiduelle de la méthanisation. Il a une valeur fertilisante et amendante. Il peut subir une séparation de phase solide / liquide. La fraction liquide peut être utilisée en engrais, et la fraction solide en compost.

La méthanisation, en tant que technique de production d'une énergie renouvelable, bénéficie d'une obligation d'achat de l'électricité produite à partir du biogaz ainsi que du biométhane injecté sur le réseau de gaz naturel :

- Les modalités du tarif sont définies par l'arrêté du 19 mai 2011 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz.
- L'arrêté du 23 novembre 2011 fixe les conditions d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel.
- L'arrêté du 27 février 2013 fixe les conditions d'achat de l'électricité et du biométhane en cas de double valorisation (installations alliant cogénération et injection).

La figure suivante met en évidence les différentes étapes de la méthanisation, de la collecte des déchets à la valorisation de l'énergie produite.

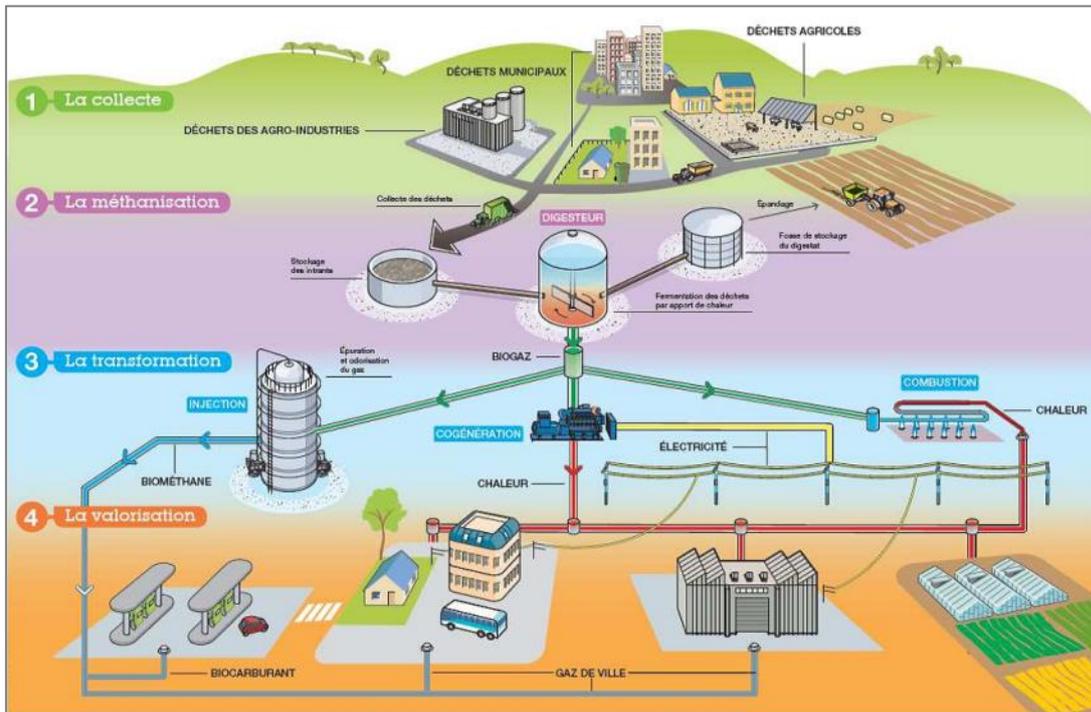


Figure 33 : Les étapes de la méthanisation (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement)

3.1.1 CONTRAINTES

Même si les gisements locaux de biomasse fermentescible étaient présents en quantité suffisante, mettre en place une installation de méthanisation afin d'alimenter le site ne serait pas pertinent, car la production de biogaz est constante sur l'année, ce qui n'est pas le cas de la demande de chaleur (sauf pour l'eau chaude sanitaire pour laquelle la demande est bien trop faible pour rentabiliser les investissements).

Par ailleurs, il ne faut pas oublier qu'un projet de méthanisation nécessite une surface foncière minimale de 2 000 m²⁰, ainsi qu'un éloignement minimal de 50 mètres des habitations avoisinantes²¹.

La méthanisation des boues issues de la station d'épuration pourrait ainsi être envisagée mais nécessiterait également l'apport de biomasse externe issue de productions agricoles par exemple et la définition d'un schéma d'approvisionnement pérenne.

3.1.2 POTENTIEL

La seule possibilité pour l'opération d'être alimentée grâce à la méthanisation serait d'intégrer cette technologie au mix énergétique d'un réseau de chaleur. Cette solution pourrait être intéressante mais à une échelle beaucoup plus large que le quartier seul et à condition que la consommation de chaleur du réseau soit à peu près constante toute l'année.

²⁰ Source : RAEE

²¹ Arrêtés du 10/11/2009 et 12/08/2010

4 RECAPITULATIF DES POTENTIALITES DU SITE

Au regard des ressources et des contraintes présentes sur le territoire, les conclusions suivantes peuvent être tirées quant aux énergies pertinentes pour l’approvisionnement du site :

		Énergie considérée	Gisement intéressant	Remarques
CHALEUR		SOLAIRE THERMIQUE	Oui	<ul style="list-style-type: none"> Gisement intéressant Pas de contraintes réglementaires
		BOIS ENERGIE	Oui	<ul style="list-style-type: none"> Ressources et offre disponibles
		GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE	Oui	<ul style="list-style-type: none"> Potentiel moyen a priori Avis d'expert nécessaire Test en réponse thermique nécessaire
		HYDROTHERMIE	Oui	<ul style="list-style-type: none"> Potentiel favorable sur nappe superficielle Études hydrogéologiques complémentaires à mener Avis d'expert nécessaire
		AEROTHERMIE	Oui	<ul style="list-style-type: none"> Sur air extérieur : uniquement en mi-saison avec appoint Sur air vicié : selon les besoins des bâtiments
		INDIVIDUEL	Oui	<ul style="list-style-type: none"> Séparation des eaux vannes et des eaux grises avant le dispositif
		SUR COLLECTEURS	Non	<ul style="list-style-type: none"> Caractéristiques des collecteurs existants et à créer insuffisantes
		SUR STEP	Non	<ul style="list-style-type: none"> Stations d'épuration trop éloignée
	CHALEUR FATALE	Non	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'opportunités 	
	RESEAU DE CHALEUR EXISTANT	Oui	<ul style="list-style-type: none"> Opportunité de raccordement au réseau de la ZAC de l'Arsenal 	
ÉLECTRICITE		SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	Oui	<ul style="list-style-type: none"> Gisement intéressant Pas de contraintes réglementaires
		ÉOLIEN URBAIN	Non connu	<ul style="list-style-type: none"> Valeur d'exemplarité uniquement Vents faibles
		GRAND EOLIEN	Non	<ul style="list-style-type: none"> Proximité d'habitations
BIOGAZ		METHANISATION	Non	<ul style="list-style-type: none"> Pas à privilégier en première approche

ENERGIES RENOUVELABLES ET SYSTEMES ADAPTES A L'OPERATION

1 LES DIFFERENTS SYSTEMES ADAPTES

Le graphique ci-dessous présente les possibilités de mise en place d'installations utilisant les énergies renouvelables pour les différents types de bâtiments présents sur le site.

		Appartements	Solutions déportées	Eclairage public	Bornes de recharge pour véhicules
	Panneaux solaires thermiques	ECS 			
	Chaudière bois	Chauffage  / ECS 			
	Réseau de chaleur au bois	Chauffage  / ECS 			
	PAC sur capteurs verticaux ou pieux géothermiques	Chauffage  / rafraîchissement 			
	PAC sur nappe	Chauffage  / rafraîchissement 			
	Boucle d'eau sur nappe	Chauffage  / rafraîchissement  / ECS 			
	VMC double-flux thermodynamique	Chauffage  / rafraîchissement 			
	Chauffe-eau thermodynamique sur air vicié	ECS 			
	Récupération sur eaux usées	ECS 			
	Réseau de chaleur existant	Chauffage  / ECS 			
	Panneaux solaires photovoltaïques en toiture	Electricité 		Electricité 	Electricité 
	Panneaux solaires photovoltaïques en ombrières		Electricité  (déporté)	Electricité 	Electricité  (déporté)
	Eolien urbain	Electricité 	Electricité  (déporté)	Electricité 	Electricité  (déporté)

ECS : eau chaude sanitaire - PAC : pompe à chaleur

A noter : Certains équipements fonctionnent avec un appoint.

Les solutions avec pompe à chaleur (géothermie, VMC double flux et Chauffe-eau thermodynamique) permettent également le rafraîchissement en été. D'autre part ces systèmes utilisent de l'électricité pour fonctionner.

Des solutions peuvent être mises en œuvre de manière déportée sur le site : éoliennes urbaines, panneaux photovoltaïques en ombrières de parkings, éclairage public autonome, etc.

A noter que différentes solutions individuelles peuvent être mises en œuvre de manière concomitante sur des bâtiments ou groupes de bâtiments différents en fonction du choix du promoteur et de l'intérêt technico-économique spécifique d'une solution sur ce bâtiment. Les solutions en réseau sont quant à elles d'autant plus intéressantes qu'elles concernent un grand nombre de bâtiments de la zone ou même l'ensemble des bâtiments de la zone. Enfin les solutions pour le chauffage, le rafraîchissement, l'eau chaude sanitaire et l'électricité peuvent être mises en œuvre de manière indépendante pour fournir ces différents besoins. Lorsqu'une solution peut fournir plusieurs besoins en même temps il est plus intéressant de ne pas multiplier les solutions. Par exemple un réseau de chaleur au bois pourra fournir l'eau chaude sanitaire des bâtiments raccordés en plus du chauffage. D'une manière générale, les solutions de production d'électricité fonctionnent indépendamment des solutions pour le chauffage, le rafraîchissement et l'eau chaude sanitaire.

Les différentes solutions proposées sont présentées en Annexes F à H.

2 SOLUTIONS PERTINENTES POUR LE PROJET

Pour la production de chaleur, la solution la plus pertinente, dans la mesure où sa faisabilité est avérée, semble être le raccordement au réseau de chaleur existant sur la ZAC de l'Arsenal. En effet :

- Dans la mesure où la faisabilité d'un réseau de chaleur semble avérée (voir densité de besoins de chaleur calculée dans l'étude), ce type de solution est à privilégier. En effet, cette solution permet de mutualiser les investissements, de fournir une énergie bon marché à prix équivalent pour l'ensemble des usagers, de favoriser le recours aux EnR, de couvrir à la fois les besoins de chauffage et d'ECS, etc. D'autre part, le raccordement à un réseau ne présente pas de difficultés majeures sur le site, que l'on aurait pu constater dans le cas d'un phasage très étendu, d'incertitudes sur la réalisation effective des phases de constructions les plus tardives du projet, d'une grande diversité des typologies et des besoins (besoins de froid pour des bureaux par exemple) ou d'une grande diversité des propriétaires (dans le cas de zones accueillant des entreprises, des commerces et des logements par exemple).
- Le raccordement à un réseau existant permet d'éviter la création d'installations de production de chaleur qui serait nécessaire à un réseau de chaleur circonscrit au site. Or, cela nécessiterait de disposer d'une surface foncière importante pour la création d'une chaufferie biomasse ou des forages et installations géothermiques. Dans le cas d'une chaufferie biomasse, cela nécessiterait également de disposer d'un accès pour les camions de livraison du combustible, et de prendre en compte des nuisances à éviter (sonores liées à la livraison par camion, visuelle pour l'intégration de la chaufferie et de la cheminée, etc.). Outre le coût important de ces équipements, l'étude de leur faisabilité impacterait les délais de réalisation du projet.
- Enfin, la mutualisation des installations de production créées sur la ZAC de l'Arsenal permet de rentabiliser ces installations et ne demande pas un allongement important du réseau.

Pour la production d'électricité, des modules photovoltaïques pourraient opportunément être implantés sur les toitures des bâtiments. L'électricité produite pourrait être en partie autoconsommée par les logements.

ANNEXES

A. METHODOLOGIE POUR EVALUER LA PERTINENCE D'UN RESEAU DE CHALEUR

TRACE DES RESEAUX DE CHALEUR

Les réseaux de chaleur sont tracés à l'aide du logiciel de cartographie MapInfo. Le tracé est basé sur les éléments de programmation cartographique fournis par le maître d'ouvrage (hypothèse de disposition des bâtiments et des voiries) : le réseau est tracé en sorte à desservir toutes les parcelles prévues.

DENSITE ENERGETIQUE SEUIL

Afin de déterminer en première approche l'opportunité d'un réseau de chaleur à l'échelle d'un quartier, la valeur de la densité énergétique du futur réseau est utilisée comme indicateur. Il s'agit de l'énergie desservie par le réseau ramenée à la longueur du réseau. Plus cette valeur est importante plus le réseau est rentable car il nécessite un investissement initial et des coûts de fonctionnement moindres pour une production d'énergie équivalente.

D'après le manuel de l'ADEME : « Mise en place d'une chaufferie au bois - Étude et installation d'une unité à alimentation automatique », « en deçà de 4 à 5 MWh/m_l par an, le coût d'amortissement du réseau a un impact important sur le prix de revient de l'énergie finale distribuée. » D'autre part, Biomasse Normandie et le Comité Interprofessionnel du Bois Énergie proposent une valeur « courante » de faisabilité de 3 MWh livrés/(m_l.an). Ce seuil est un peu plus bas. Enfin, le seuil Fonds Chaleur ADEME est de 1,5 MWhe_u/(m_l.an) (*eu = énergie utile. Voir définition d'énergie utile en annexe*).

Finalement, nous retenons la valeur seuil de 1,7 MWhe_f/(m_l.an), correspondant au seuil de faisabilité technique retenu par le Fonds Chaleur (*ef = énergie finale. Voir définition d'énergie finale en annexe*).

Cette approche permet d'identifier les réseaux potentiellement intéressants ; une étude économique plus précise est ensuite nécessaire pour les réseaux retenus afin de déterminer si réellement ils présentent une opportunité.

Remarque : Pour information, la densité thermique des réseaux de chaleur bois en France peut être découpée en fonction de la puissance bois (source : CIBE/AMORCE) :

- moins de 500 kW : 1,5 MWh/(m_l.an),
- 500 à 1 500 kW : 3 MWh/(m_l.an),
- 1 500 à 3 000 kW : 3,5 MWh/(m_l.an).

B. DEFINITION DES ENERGIES DITES UTILES, FINALES, PRIMAIRES

ÉNERGIE UTILE :

L'énergie utile caractérise le besoin énergétique brut, et représente l'énergie dont dispose l'utilisateur final à partir de ses propres équipements.

ÉNERGIE FINALE :

Il s'agit de l'énergie délivrée aux consommateurs pour être convertie en énergie utile.

L'énergie finale caractérise une consommation énergétique, son calcul intègre le rendement de l'équipement de production ou de pertes du réseau. C'est l'énergie qui est facturée au consommateur, qui est disponible pour l'utilisateur final.

ÉNERGIE PRIMAIRE :

C'est la forme première de l'énergie directement disponible dans la nature : bois, charbon, gaz naturel, pétrole, vent... L'énergie primaire n'est donc pas directement utilisable et fait l'objet de transformation (le raffinage du pétrole pour obtenir de l'essence ou du gazole par exemple).

Elle caractérise donc un coût énergétique global, prenant en compte l'énergie consommée, mais aussi l'énergie qu'il a fallu produire en amont pour transformer, transporter, distribuer, stocker cette énergie jusqu'au lieu de consommation.

CONVERSION ENERGIE UTILE/ENERGIE FINALE :

On a la relation : Énergie finale = Énergie utile x rendement de l'équipement de production

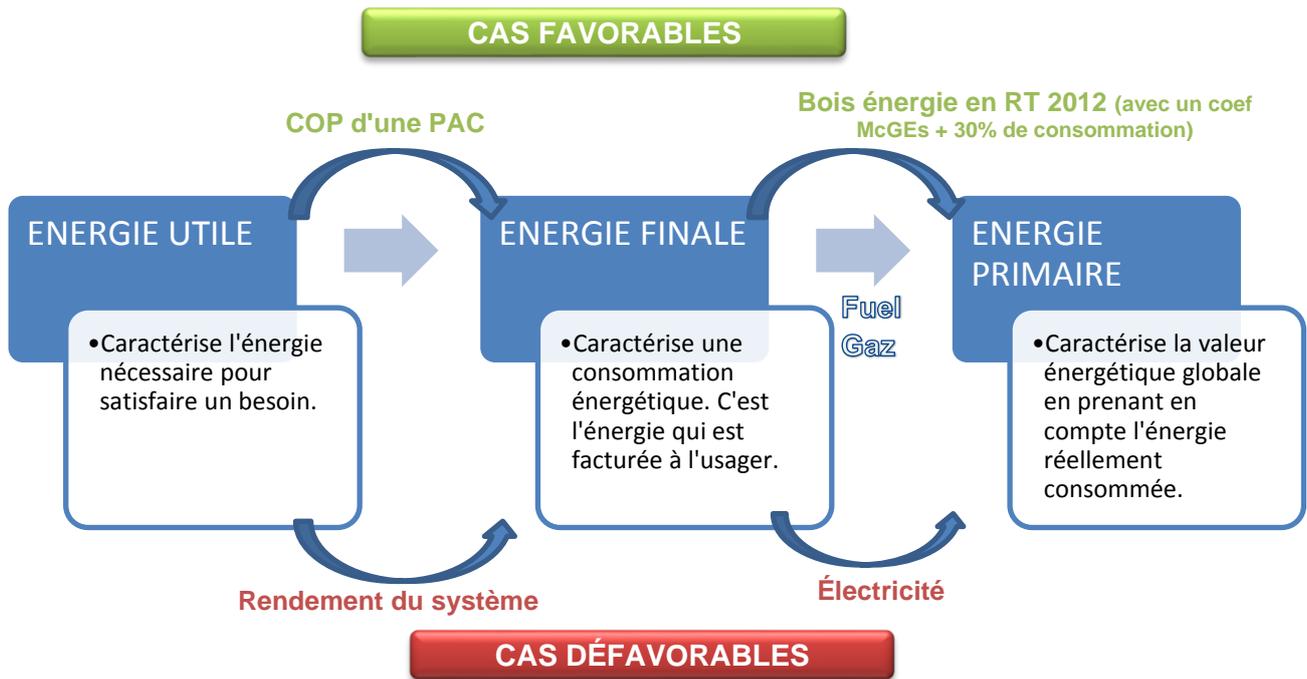
CONVERSION ENERGIE FINALE/ENERGIE PRIMAIRE :

On a la relation : Énergie primaire = Énergie finale x vecteur énergétique

Type d'énergie	RT 2012	Label BBC
Électricité	2,58	2,58
Bois	1	0,6
Gaz/Fioul	1	1

Tableau 1 : Vecteurs énergétiques selon les réglementations et les labels

Le vecteur énergétique de l'électricité varie en fonction du mix énergétique de chaque pays. La France, avec son parc de production nucléaire de faible rendement, est défavorisée par rapport à la Suisse par exemple (dont le vecteur énergétique de l'électricité est de 2).



EXEMPLE

Exemple d'un appartement situé en région parisienne de 100 m². Les seuils en énergie primaire sont ceux de la Réglementation Thermique 2012. Trois solutions sont comparées : chauffage au gaz, via une pompe à chaleur alimentée à l'électricité ou au bois.

Hypothèses :

Rendement de la chaudière gaz et bois : 95 %
Rendement de la pompe à chaleur(COP) : 300 %

Énergie de chauffage	Gaz naturel	Pompe à chaleur	Bois
Énergie utile	3 500 kWh	4 300 kWh	4 650 kWh
Énergie finale	3 700 kWh	1 450 kWh	4 800 kWh
Énergie primaire	3 700 kWh	3 700 kWh	4 800 kWh

Dans la pratique, le maître d'ouvrage peut donc moins isoler sa maison dans le cadre du bois énergie tout en atteignant la valeur réglementaire d'énergie primaire que celui qui utilise le gaz. C'est également le cas dans une moindre mesure pour les pompes à chaleur.

C. METHODOLOGIE POUR L'ESTIMATION DES BESOINS ENERGETIQUES

La présente étude nécessite la connaissance des besoins énergétiques de la zone étudiée. Puisque les bâtiments ne sont pas construits, les besoins énergétiques sont estimés à partir des données de programmation et sur la base de ratios de consommation par m² selon l'usage, le type de bâtiment et le scénario retenu. Il s'agit d'évaluer essentiellement les besoins en consommation thermique et électrique des différentes surfaces programmées.

PERFORMANCES ENERGETIQUES DES NOUVELLES CONSTRUCTIONS

Le niveau de performance énergétique est généralement défini en fonction des dates prévues de dépôt des permis de construire :

- Les bâtiments construits avant 2020 sont soumis à la Réglementation Thermique 2012.
- Les bâtiments construits après 2020 sont soumis à la future Réglementation Thermique 2020, à savoir la performance BEPOS.

Une présentation de la RT 2012 et de l'appellation BEPOS est consultable en annexe D et E.

METHODOLOGIE

POUR DES BATIMENTS RT 2012

Le programme d'aménagement bâti doit respecter la Réglementation Thermique de 2012. Des exigences sont donc fixées pour :

- Le Bbio : l'énergie utile des postes Chauffage, Refroidissement, Éclairage doit être inférieure à un seuil Bbiomax
- Le Cep : l'énergie primaire des postes Chauffage, Eau Chaude Sanitaire, Refroidissement, Éclairage, Auxiliaires doit être inférieure à un seuil Cepmax.

Les vecteurs énergétiques entre énergies utile, finale, primaire, varient selon l'équipement et l'énergie (*voir en annexe la définition des énergies utile, finale et primaire*).

Le tableau ci-dessous donne les seuils à respecter pour des bâtiments alimentés par un réseau de chaleur dont le contenu CO₂ est inférieur à 50 grammes de CO₂ par kWh. Ils sont calculés selon les formules décrites en annexe D. Le Bbio, qui exprime la performance de l'enveloppe du bâti ne dépend pas de l'énergie et du système de production choisi.

	Bbiomax	Cep _{max}
Appartement	60 kWh _{eu} /m ² SHONRT.an	80 kWh _{ep} /m ² SHONRT.an

CALCUL DES RATIOS DE CONSOMMATION PAR SCENARIO

L'exercice consiste maintenant à répartir les consommations allouées par la réglementation à chaque poste de dépense énergétique : chauffage et auxiliaires, eau chaude sanitaire, refroidissement, éclairage.

Les données d'entrée sont la consommation par m² du parc RT 2005 pour chaque usage précédemment cité et pour 8 typologies de bâtiments résidentiels ou tertiaires. Elles proviennent du CEREN²² mais ont été travaillées pour correspondre à la consommation du parc RT 2005 sur la zone géographique et à l'altitude du projet. Elles sont exprimées en énergie utile, ce qui permet de partir sur des bases affranchies des systèmes de production.

La méthode utilisée est une méthode par tâtonnement et par itération :

²² Centre d'Études et de Recherches Économiques sur l'Énergie

- 1. les ratios en énergie utile du CEREN du parc RT 2005 sont exprimés en énergie finale, pour chaque scénario, en prenant en compte le rendement de l'équipement de production associé à chaque poste de dépense énergétique ;
- 2. le Bbio et le Cep du projet sont calculés et comparés aux valeurs seuils réglementaires ;
- 3. si les deux seuils sont respectés, les ratios sont conservés. Sinon, on applique à chaque poste énergétique des hypothèses réalistes de réduction des consommations (elles sont détaillées plus loin) ;
- 4. on repart à l'étape 2.

Le schéma ci-dessous illustre cette méthodologie, pour un appartement :

DONNEES D'ENTREE

Ratio RT 2005 en énergie utile :

	Chauffage	ECS	Cuisson	Elec spé	Eclairage	Climatisation
Appartement	97 kWhe/m ²	18 kWhe/m ²	12 kWhe/m ²	19 kWhe/m ²	5 kWhe/m ²	4 kWhe/m ²

Seuils réglementaires

→ Bbiomax = 72 kWhe/(m².an)→ Cepmax = 70 kWhep/(m².an)

Scénario d'approvisionnement

→ $\eta_{eq} = E_u/E_f$

→ Vecteur énergétique considéré = Ef/Ep

ÉTAPE 1 – EXPRESSION EN ENERGIE FINALEConnaissant le rendement de production de chaque poste énergétique ;
ratios en énergie finale :

	Chauffage	ECS
Appartement 1	93 kWhef/m ²	18 kWhef/

COMPARAISON AVEC LES SEUILS

→ Bbio = 107 kWhe/m² > Bbio_{max}
 → Cep = 136 kWhep/m² > Cep_{max}

Hypothèses réalistes de réduction des consos :
 - 40 % Chauffage
 - 40 % ECS

ÉTAPE 2 – REDUCTION DES CONSOMMATIONS

	Chauffage	ECS
Appartement 1	56 kWhef/m ²	11 kWhef/

COMPARAISON AVEC LES SEUILS

→ Bbio = 68 kWhe/m² < Bbio_{max}
 → Cep = 91 kWhep/m² > Cep_{max}

Hypothèses réalistes de réduction des consos :
 - 60 % Chauffage
 - 40 % ECS

ÉTAPE N – ATTEINTE DES PERFORMANCES REGLEMENTAIRES

	Chauffage	ECS
Appartement 1	37 kWhef/m ²	11 kWhef/

COMPARAISON AVEC LES SEUILS

→ Bbio = 42 kWhe/m² < Bbio_{max}
 → Cep = 56 kWhep/m² < Cep_{max}

Les pourcentages de réduction des consommations appliquées sont réalistes et représentatifs des progrès que la filière est capable de faire. Il sera par exemple beaucoup plus facile de diminuer le poste Chauffage, en améliorant l'isolation, que de réduire le poste Électricité Spécifique (sur ce poste, on note d'ailleurs plutôt une augmentation des consommations en raison du recours massif au Hifi et à l'électroménager).

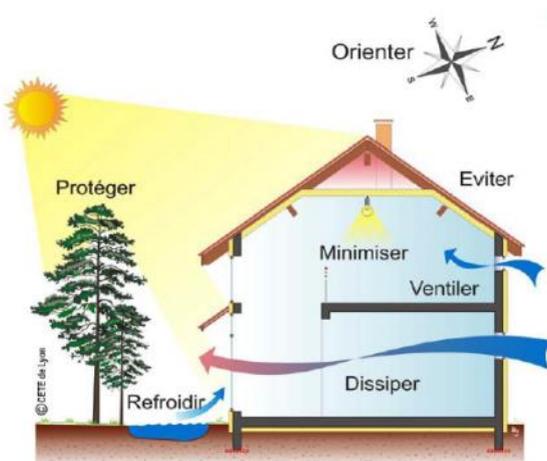
Les hypothèses prises sont tirées de la littérature – CSTB, ADEME, Effinergie, Enertech – et des retours d'expérience de bâtiments neufs ou rénovés.

- Les réductions des consommations du poste Chauffage peuvent atteindre 90% en améliorant le bâti jusqu' à atteindre le niveau exigé pour les bâtiments passifs (15 kWh_{eu}/m²).
- Les réductions des consommations du poste ECS peuvent atteindre 50% en calorifugeant le ballon, en installant des mousseurs et des robinets thermostatiques.
- Les réductions des consommations du poste Électricité spécifique peuvent atteindre 10% en installant des équipements performants.
- Les réductions des consommations du poste Éclairage peuvent atteindre 50% en installant des équipements performants et en permettant des apports externes de lumière plus importants.
- Les réductions des consommations du poste Climatisation dépendent de la typologie du bâtiment, et des performances de rafraîchissement attendues.
- Pour les logements et les bâtiments d'enseignement la climatisation sera supprimée : une conception bioclimatique et une ventilation réfléchi permettront, dans ces bâtiments bien isolés, de contrôler et de maîtriser la température interne.
- Pour les commerces, les bureaux, les bâtiments d'activités, un système performant de rafraîchissement avec ventilation et évaporation permettra une réduction de la consommation du poste Climatisation de 75%.

Remarque :

La climatisation fait partie des cinq usages pris en compte par la réglementation thermique 2012 dans le calcul des consommations énergétiques d'un bâtiment. Il est donc fondamental qu'elle soit minimale, voire nulle, afin de respecter les seuils réglementaires.

La climatisation peut être évitée via un certain nombre de mesures. Une conception bioclimatique du bâtiment permet :



- **de limiter les apports externes** : une enveloppe isolante permet de bien protéger le bâtiment. L'ensoleillement direct est limité par des brises soleils, des stores extérieurs, des vitrages à très fort facteur solaire.
- **de favoriser la ventilation naturelle** : le positionnement des ouvertures permet de favoriser la ventilation traversante, garantissant le renouvellement de l'air.
- **de maîtriser les apports internes** : dès lors que les apports externes sont limités, les occupants, les équipements de bureautique ainsi que l'éclairage représentent les principaux apports en chaleur du bâtiment. Une bonne conception du bâtiment permet d'optimiser l'éclairage naturel. En complément, des lampes basses consommations peuvent être utilisées. Éviter la mise en veille des appareils de bureautique permet d'en limiter l'apport thermique.

Les dispositifs listés ci-dessus peuvent être complétés via un **rafraîchissement nocturne** (free-cooling), qui permet d'évacuer la chaleur au cours de la nuit. Le renouvellement d'air est accru.

Enfin, une **forte inertie** du bâtiment est indispensable ; elle permet de stocker la chaleur lors de pics de température dans la journée, et la restitue la nuit. L'inertie peut être valorisée grâce à une **dalle active** : des serpentins sont positionnés dans la dalle au moment de sa mise en œuvre et du coulage du béton. Ce système permet un rafraîchissement doux et économique.

CALCUL DES RATIONS DE PUISSANCE PAR SCENARIO

Pour chaque poste de consommation énergétique, le ratio de puissance appelée a été calculé de la façon suivante :

- **Chauffage** : la puissance appelée pour ce poste est calculée d'après le ratio de consommation calculé précédemment, les Degrés Jours Unifiés et la température minimale de base observée sur le territoire, ainsi que la température intérieure de consigne (en général, 19°C).
- **Eau Chaud Sanitaire** : la puissance appelée pour ce poste est calculée d'après le ratio de consommation calculé précédemment et le type de production : instantané, semi-instantané, à accumulation.
- **Cuisson** : la puissance appelée pour ce poste est tirée de données Enertech.
- **Électricité spécifique** : la puissance appelée pour ce poste est tirée de données Enertech.
- **Éclairage** : la puissance appelée pour ce poste est tirée de données Enertech et de documents de formation ADEME sur les bâtiments basse énergie.
- **Climatisation** : la puissance appelée pour ce poste est tirée d'une étude réalisée par le Centre Énergétique et Procédés de l'École des Mines de Paris.

RESULTATS

VECTEURS ENERGETIQUES :

Pour les besoins thermiques, les vecteurs énergétiques [énergie primaire/énergie finale] calculés pour un réseau de chaleur dont le contenu CO₂ du kWh est inférieur à 50 g est de 1,14.

RATIOS DE CONSOMMATION DES BATIMENTS

Les ratios de consommations utilisés en fonction du type de bâtiment, par usage et suivant la performance énergétique envisagée sont présentés ci-dessous. Les ratios de puissance sont également présentés.

BEPOS - Scénario RDC 50g CO2/kWh							
	Chauffage	ECS	Cuisson	Elec spé	Eclairage	Climatisation	Total
Appartement neufs	32 kWh/m ²	12 kWh/m ²	10 kWh/m ²	17 kWh/m ²	3 kWh/m ²	0 kWh/m ²	75 kWh/m ²
Appartement rehab	54 kWh/m ²	12 kWh/m ²	10 kWh/m ²	17 kWh/m ²	3 kWh/m ²	0 kWh/m ²	97 kWh/m ²

BEPOS - Scénario RDC 50g CO2/kWh							
	Chauffage	ECS	Cuisson	Elec spé	Eclairage	Climatisation	Total
Appartement neufs	14 W/m ²	4 W/m ²	29 W/m ²	3 W/m ²	6 W/m ²	0 W/m ²	56 W/m ²
Appartement rehab	23 W/m ²	4 W/m ²	29 W/m ²	3 W/m ²	6 W/m ²	0 W/m ²	65 W/m ²

CALCUL DES RATIOS DE CONSOMMATION DES AUTRES USAGES

Concernant les autres usages, non pris en compte dans la RT2012, le référentiel Energie-Carbone fournit une méthode de calcul : consommation des ascenseurs, des parkings du bâtiment (ventilation et éclairage) et des parties communes.

	Autres usages
Appartement neufs	3 kWh/m ²
Appartement rehab	3 kWh/m ²

Le référentiel Energie-Carbone fournit également des taux d'autoconsommation de l'électricité produite par typologie et par usage. Sur la base de la production photovoltaïque maximale estimée par bâtiment, le taux d'autoconsommation de chaque typologie sont calculés ci-dessous.

	Tap PV
Appartement neufs	28%
Appartement rehab	29%

D. PRESENTATION DE LA REGLEMENTATION THERMIQUE 2012 ET DES LABELS EFFINERGIE

BATIMENTS CONCERNES ET DATES D'APPLICATION

La RT 2012 s'applique à :

- Tous les bâtiments de **bureaux, d'enseignement, d'établissement d'accueil de la petite enfance**, faisant l'objet d'une demande de permis de construire ou d'une déclaration préalable à partir du **28 octobre 2011**.
- Tous les **bâtiments à usage d'habitation situés en zone ANRU**, faisant l'objet d'une demande de permis de construire ou d'une déclaration préalable à partir du **28 octobre 2011**.
- Toutes les **maisons** individuelles ou accolées, les **bâtiments collectifs d'habitation** et **foyers jeunes travailleurs** et **cités universitaires**, faisant l'objet d'une demande de permis de construire ou d'une déclaration préalable à partir du **1^{er} janvier 2013**.
- Tous les **commerces, restaurations, résidences pour personnes âgées ou dépendantes, hôpital, hôtel, établissement sportif**, faisant l'objet d'une demande de permis de construire ou d'une déclaration préalable à partir du **1^{er} janvier 2013**.

PRINCIPES GENERAUX ET DEFINITIONS

La réglementation thermique 2012 est avant tout une réglementation d'objectifs et comporte :

- 3 exigences de résultats : besoin bioclimatique, consommation d'énergie primaire, confort d'été.
- Quelques exigences de moyens, limitées au strict nécessaire, pour refléter la volonté affirmée de faire pénétrer significativement une pratique (affichage des consommations par exemple).

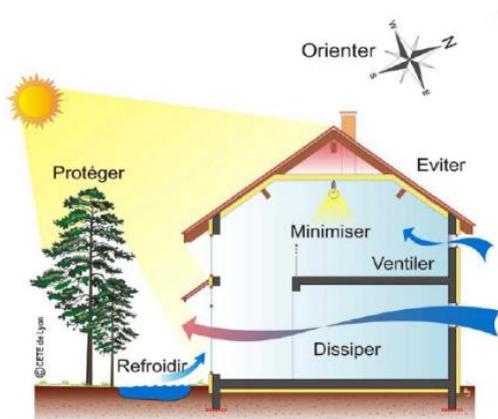
LES EXIGENCES DE RESULTATS

a) Tic : Température Intérieure Conventionnelle

La RT 2012 définit des catégories de bâtiments dans lesquels il est possible d'assurer un bon niveau de confort en été sans avoir à recourir à un système actif de refroidissement.

Pour ces bâtiments, la réglementation impose que la température la plus chaude atteinte dans les locaux, au cours d'une séquence de 5 jours très chauds d'été n'excède pas un seuil.

b) Bbio : Besoins Bioclimatiques



Les **besoins bioclimatiques du bâti – énergie utile pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage – doivent être inférieurs à une valeur seuil, $Bbio_{max}$** . Cette exigence impose une limitation simultanée du besoin en énergie pour les composantes liées à la conception du bâti (chauffage, refroidissement et éclairage), imposant ainsi son **optimisation indépendamment des systèmes énergétiques mis en œuvre**.

Source : CETE de Lyon

Cette exigence peut se traduire comme suit :

$$Bbio = E_u(\text{chauffage} + \text{refroidissement} + \text{éclairage}) \leq Bbio_{max}$$

La réglementation définit le $Bbio_{max}$ comme suit :

$$Bbio_{max} = Bbio_{maxmoyen} \times (M_{bgéo} + M_{balt} + M_{bsurf})$$

Avec :

- $Bbio_{maxmoyen}$: valeur moyenne du $Bbio_{max}$ qui varie selon la typologie de bâtiment et selon la catégorie CE1/CE2
- $M_{bgéo}$: coefficient de modulation selon la localisation géographique
- M_{balt} : coefficient de modulation selon l'altitude
- M_{bsurf} : pour les **maisons individuelles, les bâtiments de commerce et les établissements sportifs**, coefficient de modulation selon la surface

Ces coefficients sont présentés de façon plus détaillée au paragraphe d).

c) Cep : Consommation conventionnelle d'énergie

L'exigence de consommation conventionnelle maximale d'énergie primaire se traduit par le coefficient Cep_{max} , portant sur les **consommations de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, de production d'eau chaude sanitaire et d'auxiliaires (pompes et ventilateurs) ; déduction faite de toute la production d'électricité à demeure**. Conformément à l'article 4 de la loi Grenelle 1, la valeur du Cep_{max} s'élève à 50 kWh/(m².an) d'énergie primaire, modulé selon la localisation géographique, l'altitude, le type d'usage du bâtiment, la surface moyenne des logements et les émissions de gaz à effet de serre pour le bois énergie et les réseaux de chaleur les moins émetteurs de CO₂.

Cette exigence impose, en plus de l'optimisation du bâti exprimée par le $Bbio$, le **recours à des équipements énergétiques performants, à haut rendement**.

Cette exigence peut se traduire comme suit :

$$Cep = E_p(\text{chauffage} + \text{refroidissement} + \text{éclairage} + \text{ECS} + \text{auxiliaires}) \leq Cep_{max}$$

La réglementation définit le Cep_{max} comme suit :

$$Cep_{max} = 50 \times M_{ctype} \times (M_{cgéo} + M_{calt} + M_{c surf} + M_{CGES})$$

Avec :

- M_{ctype} : coefficient de modulation selon la typologie de bâtiment et sa catégorie CE1/CE2
- $M_{cgéo}$: coefficient de modulation selon la localisation géographique
- M_{calt} : coefficient de modulation selon l'altitude
- $M_{c surf}$: pour les **maisons individuelles, accolées ou non, les bâtiments collectifs d'habitation, les bâtiments de commerce et les établissements sportifs**, coefficient de modulation selon la surface
- M_{CGES} : coefficient de modulation selon les émissions de gaz à effet de serre des énergies utilisées.

Ces coefficients sont présentés de façon plus détaillée au paragraphe d).

Cas particulier des logements collectifs

Au vu de :

- Une équation investissement / économies d'énergie moins favorable dans le logement collectif que dans la maison individuelle ;
- Une filière industrielle qui doit s'adapter (notamment proposer des pompes à chaleur adaptées au collectif, performantes et à coût maîtrisé)

Pour ne pas pénaliser le logement collectif ; **une consommation supplémentaire de 7,5 kWh_{ep}/(m².an) est autorisée** pour les bâtiments dont le permis de construire est déposé avant le **31 décembre 2014**.

Cela se traduit comme suit :

$$Cep_{max} = 57,5 \times M_{ctype} \times (M_{cgéo} + M_{calt} + M_{c surf} + M_{CGES})$$

Cas particulier de la production d'électricité sur les logements

Pour les bâtiments de logements – individuels et collectifs – ayant une production d'électricité à demeure, une consommation supplémentaire est autorisée.

$$Cep \leq Cep_{max} + 12kWh_{ep}/(m^2 \cdot an)$$

d) Les éléments de modulation

Catégories CE1 et CE2

En général, un local est de catégorie CE1. **Certains locaux du fait de leur usage et/ou de leur exposition au bruit combiné(s) à la contrainte climatique sont de catégorie CE2, munis d'un système de refroidissement.** Par exemple :

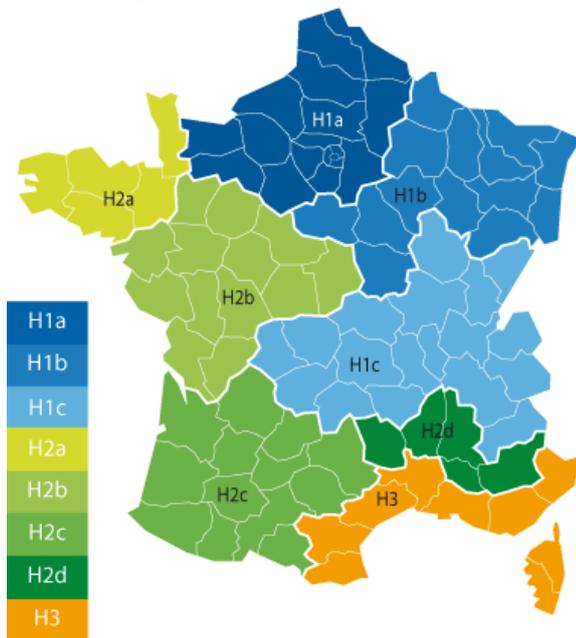
- Locaux situés dans un bâtiment de bureaux dont les baies ne sont pas ouvrables en application d'autres réglementations : par exemple, immeuble de grande hauteur ;
- Locaux situés dans un bâtiment de bureaux exposé au bruit ;
- Locaux situés dans un bâtiment d'enseignement en zone méditerranéenne et exposés au bruit ;
- Locaux à usage d'habitation situés en zone climatique méditerranéenne et exposés au bruit ;

Pour les locaux CE2, la Réglementation Thermique considère que les locaux remplissant ces exigences ont « besoin » d'être climatisés. Le niveau d'exigence fixé tient donc compte de consommations de refroidissement.

M_{ctype}

Ce coefficient tient compte de la typologie du bâtiment et de sa catégorie CE1/CE2. En effet, selon l'activité du bâtiment, il sera plus ou moins énergivore, idem selon sa catégorie. Par exemple, le coefficient affecté à un bâtiment de restauration ouvert 6 jours sur 7 pour 2 repas par jour est de 6 ; celui d'un établissement sportif scolaire de 1,1. Il a donc été considéré que la consommation des cinq usages réglementaires est 6 fois plus élevée pour un restaurant qu'un gymnase scolaire : le restaurant est en effet plus occupé, ses besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de rafraîchissement et d'éclairage sont plus importants qu'un gymnase peu occupé et peu chauffé.

M_{bgéo} et M_{cgéo}

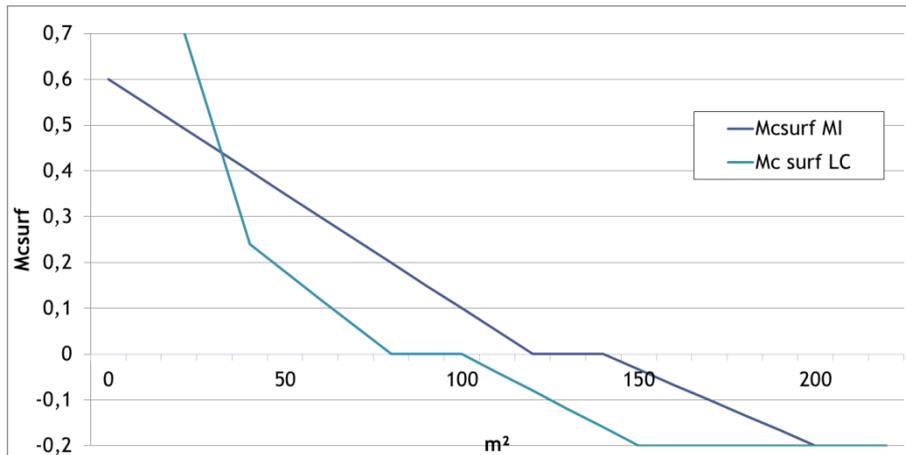


Ces coefficients tiennent compte de l'influence de la position géographique sur la consommation énergétique d'un bâtiment. Un bâtiment au nord de la France sera donc autorisé à consommer plus qu'un bâtiment similaire au sud.

8 zones climatiques – H1a, H1b, H1c, H2a, H2b, H2c, H2d, H3 – sont définies.

M_{balt} et M_{calt}

Ces coefficients tiennent compte de l'altitude. Un bâtiment à 1 500 m d'altitude sera donc autorisé à consommer plus qu'un bâtiment similaire à 500 m d'altitude ; il aura en effet davantage besoin de se chauffer.

M_{bsurf} et M_{csurf} 

Pour ne pas pénaliser les logements de petite surface, l'exigence est modulée selon la surface du logement.

Les établissements sportifs et les commerces de grande taille sont moins autorisés à consommer par m^2 que des bâtiments de même type de plus petite surface.

la taille sont pris égaux à 0.

 M_{CGES}

Le coefficient M_{CGES} tend à favoriser les énergies les moins émettrices de CO_2 en accordant une consommation supplémentaire :

- Aux **maisons individuelles ou accolées et bâtiments collectifs d'habitation, aux bâtiments d'enseignement, aux établissements sportifs, aux bâtiments d'habitation communautaire** pour lesquelles le **bois énergie** est l'énergie principale de chauffage et/ou d'ECS
- Aux **tous les types de bâtiments** alimentés par un réseau de chaleur ou de froid, en fonction du **contenu CO_2 du kWh** du réseau

Quelques exemples :

	M_{CGES}			
	≤ 50 g/kWh	50 à 100 g/kWh	100 à 150 g/kWh	≥ 150 g/kWh
Maison alimentée par du bois énergie	0,3			
École alimentée par du bois énergie	0,1			
Bureau raccordé à un réseau de froid dont le contenu CO_2	0,3	0,2	0,1	0
Commerce raccordé à un réseau de chaleur dont le contenu CO_2	0,15	0,1	0,05	0

Une maison alimentée par du bois énergie a un seuil de consommation réglementaire 30 % plus élevé qu'une maison similaire alimenté par des énergies fossiles.

LES EXIGENCES DE MOYENS

Pour **tous les types de bâtiments** :

- Traitement des ponts thermiques significatifs ;
- **Comptage d'énergie** par usage et affichage différencié en logement et en tertiaire
- Dispositifs de régulation d'éclairage artificiel parties communes + parkings

Pour les **bâtiments d'habitation** :

- Respect d'un taux minimal de vitrages de 1/6 de la surface habitable en logement
- Traitement de la perméabilité à l'air des logements, avec respect d'une perméabilité à l'air maximale

En particulier, pour les **maisons individuelles, le maître d'ouvrage doit opter pour une des solutions suivantes** :

- Produire de l'eau chaude à partir d'un système **solaire thermique** a minima 2 m^2 ;

- Être raccordé par un **réseau de chaleur alimenté à plus de 50% par une ENR&R** ;
- Démontrer que la contribution des ENR au Cep du bâtiment est supérieure ou égale à 5 kWh_{ep}/(m².an) ;
- Produire l'ECS via un **chauffe-eau thermodynamique** dont le coefficient de performance est au moins 2 ;
- Recourir à une production de chauffage et/ou d'ECS par une chaudière à **micro-cogénération**, dont le rendement thermique à pleine charge est supérieur à 90% et le rendement électrique supérieur à 10%.

LES LABELS EFFINERGIE

Le label Effinergie reprend les exigences de la RT2012 en les renforçant.

Le Label Effinergie+, qui existe depuis 2012, est un label d'application volontaire qui renforce les seuils sur les coefficients $B_{bio_{max}}$ et Cep_{max} . Le $B_{bio_{max}}$ est ainsi réduit de 20%. Le Cep_{max} est réduit de 20% pour les bâtiments à usage d'habitation, d'enseignement, d'accueil de la petite enfance ou EHPAD et 40% pour les autres.

Le label renforce également les exigences de moyen : perméabilité à l'air des réseaux, information des usagers, etc.

En 2017, Effinergie a lancé 3 nouveaux labels afin d'accompagner la future réglementation thermique prévue pour 2018 ou 2020 (BBC2017, BEPOS2017 et BEPOS+2017). Ces labels reprennent les exigences du label Effinergie+ (en intégrant un critère de compacité) et intègre des éléments supplémentaires issus de l'expérimentation Energie Carbone (voir Annexe E). Le tableau page suivante résume ces exigences.

		Maison individuelle	Logement collectif	Tertiaire
Pré-requis		RT 2012 et E+C-, a minima Energie 2 – Carbone 1		
		RT 2012 et E+C-, a minima Energie 3 – Carbone 1 et bâtiment producteur d'énergie renouvelable		
		RT 2012 et E+C-, a minima Energie 4 – Carbone 1 et bâtiment producteur d'énergie renouvelable		
Exigences communes	Bbiomax	Bbiomax – 20%	Modulation du Bbiomax	Bbiomax – 20%
	Cepmax	Cepmax – 20%	Cepmax – 20% ¹	Cepmax – 40%
	Perméabilité à l'air du bâti	Q4Pa_surf ≤ 0,4 m ³ /h/m ² Ou formation des ouvriers Ou démarche qualité	Q4Pa_surf ≤ 0,8 m ³ /h/m ² Ou ≤ 1 m ³ /h/m ² suivant le type de mesure Ou démarche qualité	Q4Pa_surf inférieur à la valeur prise dans l'étude thermique Ou démarche qualité
	Contrôle des réseaux de ventilation	PROMEVENT Pré-inspection et Vérifications fonctionnelles et Mesures fonctionnelles aux bouches	PROMEVENT Pré-inspection et Vérifications fonctionnelles et Mesures fonctionnelles aux bouches et Mesure d'étanchéité à l'air des réseaux aérauliques ou démarche qualité	Protocole effinergie Contrôle visuel et Vérification mesures fonctionnelles aux bouches et Mesure d'étanchéité à l'air des réseaux aérauliques ou démarche qualité
	Qualification des bureaux d'étude	Qualifications OPQIBI 1331 et 1332 "Etudes Thermiques Réglementaires" ou , Certification NF Etudes Thermiques ou , Certification BE NR d'l.cert option "Etudes thermiques réglementaires" ou , Référents CERTIVEA.		
	Commissionnement	Nécessité de mise en place d'un commissionnement		
	Mobilité	Utilisation de l'outil effinergie écomobilité		
	Information aux usagers	Fourniture du guide effinergie et affichage		

E. LES BATIMENTS A ENERGIE POSITIVE (BEPOS) – LE REFERENTIEL ENERGIE CARBONE (E+C-)²³

DEFINITION ET REGLEMENTATION

« Dès 2020, tous les bâtiments neufs seront à énergie positive, c'est-à-dire qu'ils produiront davantage d'énergie qu'ils n'en consomment » - déclaration du précédent président de la République lors de la restitution des conclusions du Grenelle de l'environnement.

À ce jour, il n'y a pas de définition précise et consensuelle d'un bâtiment à énergie positive (BEPOS) et plusieurs questions se posent :

- Peut-on parler d'énergie positive lorsqu'une énergie renouvelable est menée sur site, mais produite ailleurs ?
- Par ailleurs, le comportement des occupants étant essentiel à l'atteinte de l'objectif, quelle sera leur place dans le projet ?

Le comité opérationnel n°1 du Grenelle définit les grandes lignes d'un bâtiment BEPOS en ces termes :

Ne devraient être éligibles que des bâtiments déjà conformes au label BBC et pour lesquels la consommation d'énergie primaire du bâtiment prévue pour l'ensemble des usages de l'énergie est compensée en moyenne annuelle par la production locale.

En complément l'obtention de ce label pourrait intégrer la mise en place d'une information des occupants sur les conditions à respecter pour que le bâtiment puisse être géré tout en atteignant l'énergie positive et une exigence d'affichage des résultats de la consommation et de la production réelle.

Rapport au ministre de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables
Comité opérationnel n° 1 « Bâtiments neufs publics et privés »
Grenelle de l'environnement – CSTB – mars 2008

La définition du PREBAT d'un bâtiment, ou d'un site à énergie positive, est la suivante :

Un bâtiment ou un site est à énergie positive s'il consomme peu d'énergie et si l'énergie produite sur le site, grâce aux énergies renouvelables, est supérieure à celle consommée (tous usages confondus) en moyenne sur l'année.

Les bâtiments à énergie positive doivent permettre par leur qualité architecturale une intégration harmonieuse dans la ville. Ils doivent fournir aux utilisateurs un environnement intérieur sûr, sain et confortable et faciliter des comportements éco responsables.

Enfin pour que des bâtiments à énergie positive contribuent à la sobriété énergétique globale, ils doivent nécessiter « peu d'énergie » pour leur construction et leur localisation doit aussi nécessiter « peu d'énergie » pour le transport de leurs utilisateurs.

Vers des bâtiments à énergie positive
Proposition de structuration des actions de recherche
PREBAT - Juin 2009

²³ Sources :

- Vers des bâtiments à énergie positive – Proposition de structuration des actions de recherche – PREBAT (Programme de Recherche et d'Expérimentation sur l'énergie dans le Bâtiment) - Juin 2009
- Rapport au ministre d'État, ministre de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables : Comité opérationnel n° 1 « Bâtiments neufs publics et privés » - Grenelle de l'environnement – CSTB – Mars 2008
- <http://www.fiabitat.com/labels-basse-energie.php#4ee>

INDICATEURS POUR LE SUIVI DES PROJETS

Le PREBAT recense 4 indicateurs énergétiques pour vérifier si l'énergie positive est obtenue :

- La consommation totale d'énergie primaire du site (sans la prise en compte de la production locale) ;
- Le « bilan énergétique » du site : la consommation totale d'énergie primaire du site diminuée par la production d'énergie renouvelable sur le site. Le bâtiment sera à énergie positive si ce bilan passe en dessous de zéro en moyenne sur l'année.
- L'énergie grise du site (énergie dépensée lors de la construction du site, de son entretien, de sa maintenance et de sa démolition) ;
- L'énergie primaire nécessaire au transport des utilisateurs.

Attention ! certains points tels que les comportements éco responsables ne sont pas quantifiables ou mesurables, ils auront cependant une influence forte sur les consommations énergétiques durant la phase d'exploitation du site.

Il est important qu'un suivi du projet soit assuré, non seulement sur la performance énergétique, mais également sur les aspects confort d'été, santé, etc.

Selon les caractéristiques des bâtiments, il sera plus ou moins difficile d'atteindre l'objectif de bâtiments positif. Une maison, par exemple, atteindra plus facilement l'énergie positive qu'un immeuble : sa surface de toit par m² est plus beaucoup plus grande pour capter l'énergie solaire. La localisation sera également un des paramètres : un logement situé dans le sud de la France atteindra plus facilement l'équilibre production-consommation que le même bâtiment situé dans une région plus froide et moins ensoleillée.

Enfin, un immeuble tertiaire près d'une bouche de métro permettra de réduire les consommations de transport, mais pourra être plus consommatrice pour la construction du bâtiment.

Attention par contre, à ne pas faire la confusion entre énergie positive et émissions de CO₂ nulles (ou « négatives »). Pour les émissions de CO₂, il faut tenir compte du cycle de vie des matériaux utilisés, leur provenance et leur recyclage en fin de vie.

LE REFERENTIEL ENERGIE CARBONE

Démarche engagée dans le cadre de la loi de transition énergétique pour la croissance verte, l'expérimentation de la performance environnementale des bâtiments ambitionne d'élaborer, avec les acteurs, les standards des bâtiments de demain, via :

- La généralisation des bâtiments à énergie positive
- Le déploiement de bâtiment à faible empreinte environnementale

Dans ce but, un référentiel a été constitué, le référentiel Energie positive, Réduction Carbone ou Energie-Carbone (E+C-). Ce référentiel représente un cadre technique permettant d'évaluer la performance des bâtiments selon les deux axes énergétique et émissions de gaz à effet de serre ainsi que des niveaux de performance classés de 1 à 4 pour l'énergie et 1 à 2 pour le carbone.

Concernant la partie Energie, le référentiel propose de réaliser le bilan des consommations et des productions d'énergie au niveau du bâtiment en énergie primaire et de comparer ce bilan à 4 seuils de références ayant des valeurs décroissantes.

BILAN BEPOS

Le calcul du bilan énergétique du bâtiment, ou Bilan BEPOS est défini comme la différence entre la somme des consommations d'énergie non renouvelables pour tous les usages du bâtiment (Cep, nr) et la somme des productions d'énergie renouvelable exportées par le bâtiment (Pep, r, ex).

$$Bilan_{BEPOS} = Cep, nr - Pep, r, ex$$

Le **Cep, nr** est calculé en faisant la somme des consommations d'énergie finale pour chaque usage, y compris les parties communes :

- Les 5 usages de la RT2012 : chauffage, ECS, éclairage, ventilation et climatisation
- Les autres usages mobiliers : cuisson, appareils électroménagers, etc.
- Les usages liés aux parties communes : éclairage des parties communes, ascenseurs, éclairage et ventilation des parkings.

A ces consommations d'énergie finales est soustraite la part de production d'énergie réalisée par le bâtiment et réellement autoconsommée par ces usages, c'est-à-dire non injectée sur le réseau électrique ou un réseau de chaleur.

On convertit ensuite cette énergie finale en énergie primaire en appliquant un coefficient de conversion selon la nature de l'énergie consommée :

- 0 pour l'énergie issue de sources renouvelables ou de récupération (y compris le combustible issu du bois) ;
- 1 pour le gaz, le charbon et les produits pétroliers ;
- 2,58 pour l'électricité issue du réseau électrique national ;
- Pour l'énergie provenant d'un réseau de chaleur : $1 - \text{taux}_{\text{EnR\&R}}$

Le **Cep, nr** s'approche dans sa définition du **Cep** de la RT2012 mais il diffère par certains aspects : la prise en compte de nouveaux postes de consommations internes (mobilier, cuisson) et parties communes, l'exclusion des consommations d'énergie renouvelable (bois, chaleur des réseaux de chaleur), la prise en compte de l'autoconsommation réelle.

Le **Pep, r, ex** représente la part d'énergie produite par le bâtiment exportée hors du bâtiment, c'est-à-dire qui n'est pas autoconsommée par les usages mentionnés ci-dessus. Cette production peut être injectée sur le réseau électrique ou sur un réseau de chaleur.

SEUILS DE PERFORMANCE

Pour les niveaux **ENERGIE 1** et **ENERGIE 2**, le bilan énergétique maximal, $\text{Bilan}_{\text{BEPOS,MAX}}$, à respecter est défini par :

$$\text{Bilan}_{\text{BEPOS,max},i} = 50^{(*)} \times M_{\text{bilan},i} \times Mc_{\text{type}} \times (Mc_{\text{geo}} + Mc_{\text{alt}} + Mc_{\text{surf}}) + Aue_{\text{ref}}$$

* Pour les bâtiments collectifs d'habitation, cette valeur est portée à 57,5 jusqu'au 31 décembre 2017.

i correspond aux deux niveaux 1 et 2 avec $M_{\text{bilan},i}$ variant selon le niveau et les typologies :

$M_{\text{bilan},i}$ en kWhep/(m ² .an)	Maisons individuelles ou accollées	Bâtiments collectifs d'habitation	Bâtiments à usage de bureau	Autres bâtiments soumis à la réglementation thermique
Pour le niveau « Energie 1 », valeur de $M_{\text{bilan},1}$	0,95	0,95	0,85	0,9
Pour le niveau « Energie 2 », valeur de $M_{\text{bilan},2}$	0,9	0,85	0,7	0,8

Aue_{ref} , correspond à la consommation de référence des autres usages (hors 5 usages de la RT2012) en énergie primaire. Cette valeur est calculée de manière forfaitaire pour chaque usage selon les caractéristiques du bâtiment. Elle est égale à la consommation finale de ces usages (Eef_{au}) multipliée par un coefficient de conversion en énergie primaire (en général 2,58 pour l'électricité) :

$$Eef_{au} = Eef_{asc} + Eef_{park} + Eef_{com, ecl} + Eef_{usmob}$$

Les termes de cette consommation correspondent respectivement aux consommations des ascenseurs, parkings, éclairage des parties communes et mobiliers. Ils sont calculés dans notre étude selon la méthode des « valeurs annuelles forfaitaires » du référentiel qui donne des valeurs forfaitaires par m² du bâtiment.

La consommation des ascenseurs représente ainsi 2 kWh_{ef}/m²/an à laquelle on applique un coefficient de surface habitable (surface utile du bâtiment sur surface RT).

La consommation des parkings dépend du type de parking :

- Pour les parkings couverts : 3 kWh_{ef}/m²/an pour l'éclairage et 0,5 kWh_{ef}/m²/an pour la ventilation ;
- Pour les parkings extérieurs ou semi-couverts avec éclairage : 0,5 kWh_{ef}/m²/an ;
- Pour les autres parkings : 0 kWh_{ef}/m²/an.

A cette valeur est affectée un ratio entre la surface de parking et la surface RT du bâtiment et un coefficient entre la surface

La consommation de l'éclairage est fixée à 1,1 kWh_{ef}/m²/an.

La consommation du mobilier est calculée suivant la méthode employée pour estimer les consommations des 5 postes de la RT2012 (voir Annexe C) elle correspond à la somme des consommations d'électricité spécifique et de la cuisson.

Pour le niveau ENERGIE 3, le bilan énergétique maximal, Bilan_{BEPOS, max, 3}, à respecter est défini par :

$$Bilan_{BEPOS, max, 3} = 50 \times M_{bilan, 3} \times Mc_{type} \times (Mc_{geo} + Mc_{alt} + Mc_{surf}) + Aue_{ref} - Prod_{ref}$$

Prod_{ref} correspond à la production d'énergie renouvelable de référence du bâtiment selon sa typologie.

Les valeurs des coefficients sont données dans le tableau ci-après en fonction de la typologie du bâtiment.

	Maisons individuelles ou accolées	Bâtiments collectifs d'habitation	Bâtiments à usage de bureau	Autres bâtiments soumis à la réglementation thermique
Pour le niveau « Energie 3 », valeur de $M_{bilan, 3}$	0,8	0,8	0,6	0,8
Pour le niveau « Energie 3 », valeur de $Prod_{ref}$	20	20	40	20

Pour le niveau ENERGIE 4, le bilan énergétique maximal doit être nul ou négatif :

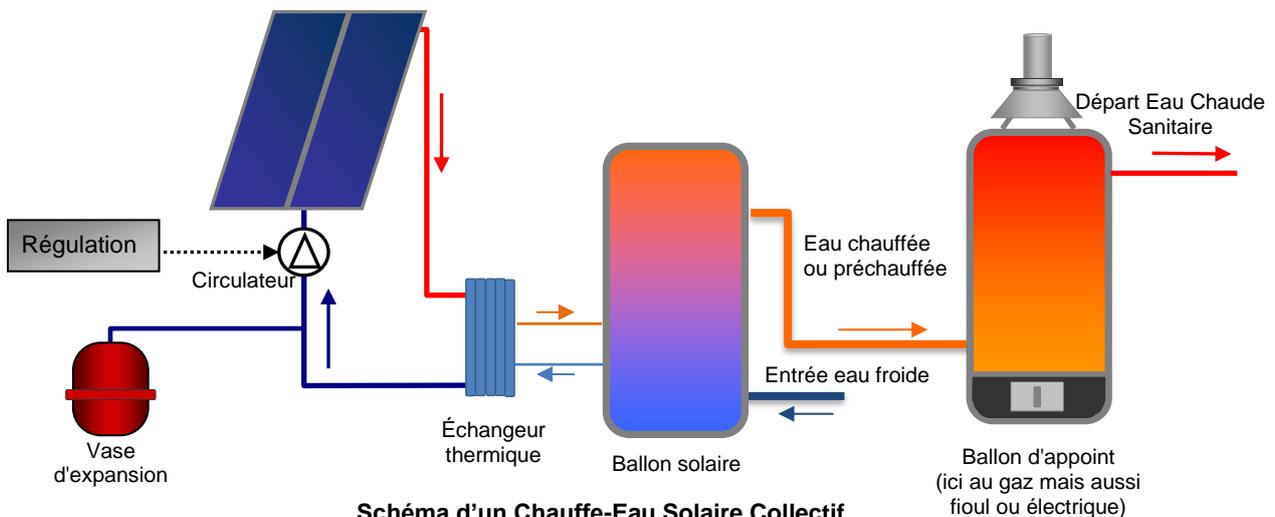
$$Bilan_{BEPOS, max, 4} \leq 0$$

F. PRESENTATION DES SYSTEMES THERMIQUES INDIVIDUELS

LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE COLLECTIF (CESC)

FONCTIONNEMENT

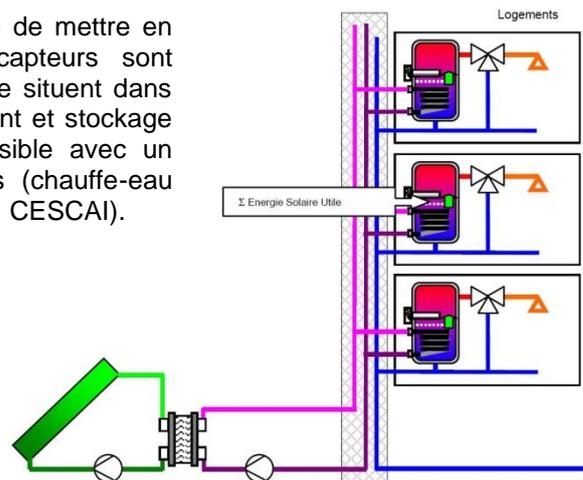
C'est à la surface du panneau que le rayonnement solaire est converti en chaleur. Un liquide caloporteur circule dans l'absorbeur et transmet sa chaleur via un échangeur à l'eau chaude sanitaire. Le circuit solaire est donc totalement indépendant du circuit consommateur.



Il est toujours nécessaire de recourir à un appoint, l'énergie solaire ne pouvant pas couvrir l'intégralité des besoins (en particulier en hiver) : un ballon de stockage solaire est généralement placé en amont d'un équipement d'appoint qui assure le maintien en température de consigne de l'eau chaude.

Remarque : Pour des logements collectifs, il est possible de mettre en place une installation collective individualisée : les capteurs sont collectifs, mais les ballons de stockage et les appoints se situent dans chaque appartement (chauffe-eau solaire collectif à appoint et stockage individualisé : CESCI). Une autre configuration est possible avec un ballon de stockage collectif et des appoints individuels (chauffe-eau solaire collectif à stockage collectif et appoint individualisé : CESCAI).

Schéma d'un Chauffe-Eau Solaire Collectif à appoint et stockage Individualisé dit « tout individuel » (source : ADEME)



AVANTAGES DU SOLAIRE THERMIQUE

La production de chaleur par le biais de capteurs solaires thermiques présente les avantages suivants :

- la ressource d'énergie utilisée est renouvelable et gratuite, aucune pénurie ou fluctuation des prix n'est à craindre,
- le processus de production de chaleur n'a aucun impact sur l'environnement (pas de rejets polluants, pas de déchets, etc.),



- quelle que soit l'énergie substituée (électricité, fioul ou gaz), les rejets de gaz à effet de serre évités sont importants.

Les différentes technologies sont au point ; leurs performances sont testées par un organisme indépendant (le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). Les installateurs compétents pour de telles installations doivent avoir obtenu un agrément Qualisol, délivré par l'association Qualit'EnR.

CONDITIONS A RESPECTER

- Une consommation d'eau chaude relativement constante tout au long de l'année et effective les mois d'été (éviter ce type d'installation dans les écoles, mais les privilégier sur les maisons de retraite, les foyers, les piscines municipales, etc.).
- Une architecture étudiée en amont afin de prévoir un emplacement optimum pour l'intégration des capteurs au bâti et leur production. Idéalement, les capteurs sont orientés plein sud. Toutefois il faut tenir compte des masques environnants et de l'orientation du site. La puissance délivrée par l'installation est maximale dans le cas où le rayonnement solaire est perpendiculaire aux capteurs. Par ailleurs, il est intéressant d'incliner les capteurs en fonction de la période où l'on souhaite le plus de production. Idéalement, les capteurs solaires sont inclinés à 45° pour la production d'eau chaude sanitaire.
- L'installation de réducteur de débit sur tous les points d'eau, ce qui permet d'envisager une installation dimensionnée au plus juste et garantit des économies d'eau.

BATIMENTS CIBLES

Pour tous les types de bâtiments, plus la **consommation d'eau chaude du bâtiment est régulière sur l'année**, plus l'installation de capteurs solaires thermiques sera une opération rentable. En particulier, il faut éviter une baisse trop importante de la demande en été.

DIMENSIONNEMENT

En première approximation, on dimensionne 1 m² de capteur solaire thermique pour 45 L d'eau chaude consommée par jour.

ÉLÉMENTS ECONOMIQUES

En première approximation, les hypothèses suivantes peuvent être prises :

- Investissement pour un chauffe-eau solaire collectif :
 - Pour une surface de capteurs inférieure à 50 m² : 1 200 € HT par m² de capteurs,
 - Pour une surface de capteurs inférieure à 100 m² : 1 000 à 1 100 € HT par m² de capteurs,
 - Pour une surface de capteurs supérieure à 100 m² : 800 à 1 000 € HT par m² de capteurs,
- Exploitation (ordres de grandeur) :
 - 100 € HT par an pour des installations de moins de 10 m²,
 - 165 € HT par an pour des installations de moins de 100 m²,
 - De 300 à 500 € HT par an pour des installations supérieures à 100m².
- Économies générées : réduction de la consommation d'eau chaude de 55% à 60%. Les économies dépendent de l'énergie utilisée auparavant ou substituée.

LA CHAUFFERIE BOIS COLLECTIVE

FONCTIONNEMENT

Les **combustibles** utilisés sont les sous-produits forestiers (branchages, petits bois, etc.) et industriels (écorces, sciures, copeaux, etc.) qui sont valorisés sous différentes formes :



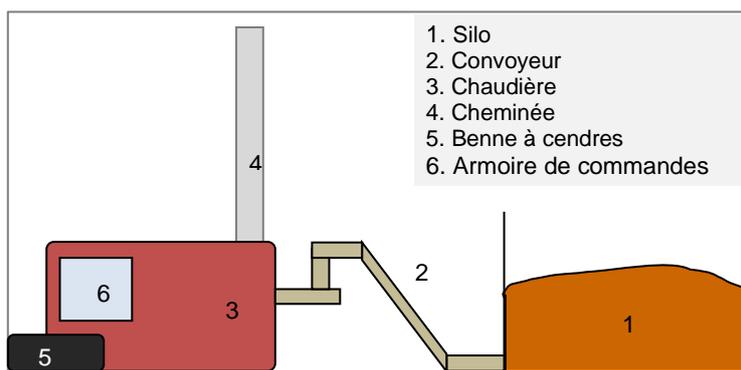
Les **granulés de bois** sont produits par compression et agglomération de sciure (pas d'agent de liaison). Ce sont de petits cylindres de 6 à 10 mm de diamètre et de 2 cm de long. Ils sont utilisés dans les **poêles** et les **chaudières à alimentation automatique de petite puissance**. Leur coût est plus élevé que celui des autres combustibles bois mais leur pouvoir calorifique est meilleur du fait de leur grande densité et de leur hygrométrie plus faible.



Les **plaquettes** (ou bois déchiqueté) sont obtenues par déchiquetage d'arbres, de branches, de sous-produits de l'industrie du bois, etc. Elles sont utilisées dans les **chaudières automatiques**.

Remarque : Le pouvoir calorifique des combustibles bois dépend en grande partie de leur humidité. C'est pourquoi il est nécessaire de sécher le bois avant de le transformer et de le brûler.

Les combustibles bois sont amenés dans un **silo de stockage** attenant à la chaufferie et d'où ils sont envoyés automatiquement à la chaudière en fonction des besoins. Le schéma ci-dessous présente le fonctionnement général de la chaufferie bois :



La technologie de la chaudière évolue au fur et à mesure que sa puissance augmente, de même que le système de transfert du combustible du silo vers la chaudière : de la vis sans fin pour les toutes petites chaudières, à l'extracteur à échelles et enfin au grappin.

AVANTAGES DU BOIS ENERGIE

Le bois énergie bénéficie d'atouts indéniables, qui appuient son développement et une meilleure utilisation de cette ressource :

- Des ressources locales importantes et une filière d'approvisionnement bien structurée : l'énergie utilisée est renouvelable, aucune pénurie n'est à craindre tant que l'exploitation forestière est réalisée de manière durable. C'est pourquoi les prix sont moins sujets à des fluctuations.
- Un bilan neutre vis-à-vis des gaz à effet de serre : conventionnellement, l'utilisation de la biomasse est considérée comme neutre du point de vue des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) puisque sa combustion émet autant de CO₂ qu'elle n'en a absorbé au cours de sa croissance. À ce titre, le développement de son utilisation, en substitution aux énergies traditionnelles, constitue l'un des leviers privilégiés de la lutte contre le changement climatique.
- Le contexte haussier du prix des énergies traditionnelles : alors que les énergies fossiles ont longtemps été les énergies les moins chères, la récente envolée des prix du pétrole rend compétitive la valorisation des ressources locales comme la biomasse.
- Les progrès techniques et la diffusion massive des matériels a permis une baisse des coûts d'investissement, la maturité technique des offres bois-énergie n'est aujourd'hui plus à démontrer.



CONDITIONS A RESPECTER
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Veiller à la qualité du combustible utilisé dans la chaudière : plus la puissance de cette dernière est faible, plus les caractéristiques du combustible ont un impact important sur son fonctionnement (mauvaise combustion, rejet de polluants atmosphériques, détérioration des équipements, etc.). Il faut établir un contrat de fourniture précisant les caractéristiques requises ainsi que les pénalités en cas de non-respect du cahier des charges. ▪ Faire dimensionner par des professionnels expérimentés les différents éléments constitutifs de l'installation afin d'éviter de mauvaises conceptions : accessibilité du silo par les véhicules de livraison, surdimensionnement de la chaudière bois, etc. ▪ Bien entretenir et régler les équipements. ▪ Vérifier que les chaudières respectent les normes de rejets auxquelles elles sont soumises et qui garantissent des rejets atmosphériques acceptables. Plus la chaudière est de taille importante, plus la réglementation lui impose des seuils de rejets faibles.
DIMENSIONNEMENT
<p>Une attention toute particulière sera portée au dimensionnement de la chaudière. En particulier, on veillera à ne pas la surdimensionner, pour des raisons techniques et économiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ses performances se dégradent lorsqu'elle fonctionne à bas régime, ce qui engendre des difficultés d'exploitation à la mi-saison pour une chaudière surdimensionnée ; ▪ L'investissement de la chaudière bois est la part la plus importante dans le coût de revient de la chaleur produite. Une chaudière surdimensionnée engendre un investissement important, et diminue la rentabilité économique du projet. <p>La taille du silo de stockage est calculée en fonction de l'autonomie souhaitée (une semaine par grand froid pour les petites chaudières) de la chaudière ou suivant la taille des véhicules de livraison.</p>
BATIMENTS CIBLES
<p>Les bâtiments opportuns pour une chaudière bois énergie présentent préférentiellement les caractéristiques suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Un espace disponible pour l'installation de la chaudière et du silo de stockage : local technique, réserve foncière disponible autour du bâtiment. ▪ Un accès pour le passage des camions et l'approvisionnement en combustible (prévoir une aire de retournement pour les véhicules de livraison suivant la configuration du site).
ÉLÉMENTS ECONOMIQUES
<p>Pour une chaudière de 100 à 300 kW, l'investissement global se situe entre 1 000 et 2 000 € HT/kW. Lorsque la puissance est comprise entre 300 et 1 200 kW, l'investissement global se situe plutôt entre 750 et 1 500 € HT/kW. Les fourchettes de prix sont très importantes et varient en fonction du type de projet, de la nature du maître d'ouvrage, des aménagements de génie civil à effectuer, de la reprise d'éléments existants, etc.</p> <p>L'exploitation de la chaufferie jusqu'à 500 kW environ nécessite le passage d'un technicien une ou plusieurs fois par semaine (en moyenne 1 à 5 heures par semaine) pour vérifier le bon état de marche, gérer la livraison de combustibles, effectuer le petit entretien et le déchargement. En comptant l'ensemble de ces tâches plus les autres coûts (ramonage, petit et gros entretien), le coût d'exploitation annuel est d'environ 2 000 – 3 000 €/an.</p>

LA POMPE À CHALEUR (PAC) GÉOTHERMIQUE SUR SONDES

FONCTIONNEMENT

La géothermie consiste à utiliser les calories du sous-sol pour chauffer ou rafraîchir les bâtiments. Ces calories sont dans le sol. On parle de sondes ou de capteurs verticaux ou horizontaux, dans lesquels circule un fluide en circuit fermé.



En surface

La pompe à chaleur est constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide calorifique. Le circuit est composé de quatre éléments :

- un évaporateur : le fluide frigorigène capte la chaleur de la zone extérieure et s'évapore,
- un compresseur : la vapeur du fluide frigorigène est comprimée, ce qui augmente sa température,
- un condenseur : le fluide frigorigène se condense et cède sa chaleur au milieu à réchauffer,
- un détendeur : le fluide est ramené à la pression d'entrée dans l'évaporateur.

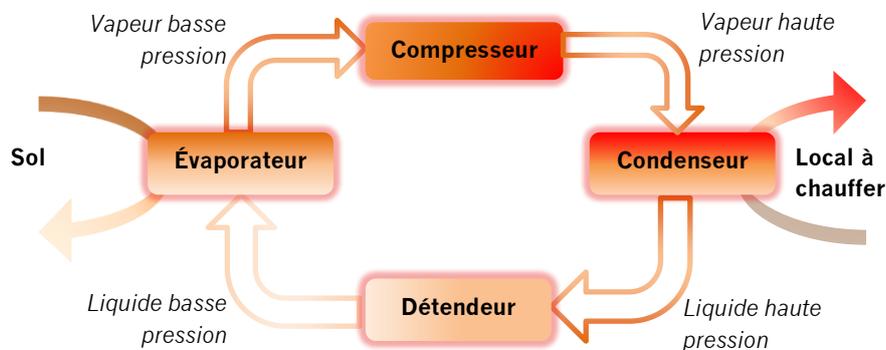


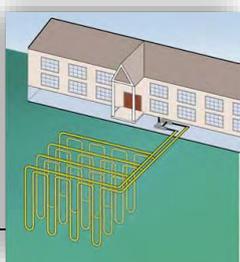
Schéma de principe d'une pompe à chaleur

La performance d'une pompe à chaleur est mesurée par son **Coefficient de Performance (COP)** : c'est le rapport entre l'énergie produite par la pompe à chaleur et l'énergie qui lui a été fournie en entrée ; et varie entre 3 et 5. Plus le COP est élevé, meilleures sont les performances de la pompe à chaleur ; et plus les économies sont importantes pour l'utilisateur.

La pompe à chaleur est plus performante quand la différence de température entre la source où est puisée la chaleur et le bâtiment est faible. Pour cette raison, on utilisera des **émetteurs « basse température » : à eau, via des radiateurs ou un plancher chauffant.**

Une seconde pompe à chaleur pourra permettre de produire l'ECS à une température plus élevée. Celle-ci présentera par conséquent un COP plus faible de l'ordre de 3.

On pourra également prévoir un by-pass sur la pompe à chaleur de chauffage afin de fournir du rafraîchissement en été via la circulation d'eau à la température du sol à travers un plancher chauffant/rafraichissant (c'est le free-cooling). Cette solution permet de rafraîchir les bâtiment n'ayant pas de réel besoin de froid comme les logements. Pour la climatisation, on aura recours à une pompe à chaleur réversible capable de fournir du froid en été.

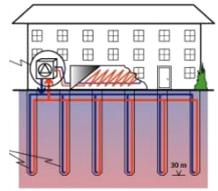


Les capteurs verticaux sont constitués de deux tubes en forme de U installés dans un forage (jusqu'à 100 mètres de profondeur). De l'eau additionnée de liquide antigél circule dans les tubes.

En fonction de l'importance des besoins thermiques à satisfaire, plusieurs sondes peuvent être installées sur un même site, constituant un **champ de sondes géothermiques.**

Champ de sondes géothermiques (BRGM)

Lorsque la valeur de portance d'un sol est faible et que l'utilisation de pieux de fondation en béton est nécessaire, ces pieux peuvent être équipés de capteurs géothermiques (tubes de polyéthylène noyés dans le béton). On parle de géostructure ou de fondations thermoactives.



Géostructure énergétique (géothermie.ch)

AVANTAGES DE LA GEOTHERMIE

- Les pompes à chaleur géothermiques ont un très bon rendement énergétique (de 3 à 5 kWh thermiques fournis pour 1 kWh électrique consommé).
- La géothermie est une énergie locale qui ne dépend pas des conditions atmosphériques, donc son potentiel ne fluctue pas : c'est une énergie fiable et constante.
- La géothermie permet d'envisager le refroidissement des locaux en été, c'est une des rares technologies respectueuses de l'environnement pour ce type d'application.

CONDITIONS A RESPECTER

- Vérifier préalablement à tous travaux si le site se prête à ce type d'installation (caractéristiques géotechniques du sol, accès pour un engin de forage, etc.).
- Vérifier l'interférence avec d'éventuelles autres installations situées à proximité.
- Transmettre les informations concernant l'installation au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) qui réalise un suivi des installations existantes.
- Installer une pompe à chaleur capable de démarrer à vide ou équipée d'un démarrage progressif pour limiter l'appel de puissance.
- Choisir une pompe à chaleur dont le coefficient de performance (COP) est élevé : pour cela, se rapprocher de l'ADEME qui donnera le COP minimal pour bénéficier des aides disponibles.
- Faire installer la pompe à chaleur par un installateur QualiPAC ; faire réaliser les forages par un installateur Qualiforage. Ces agréments sont délivrés par l'association Qualit'EnR, qui promeut la qualité des prestations des professionnels installateurs.
- L'émission de chaleur se fera préférentiellement via des émetteurs basse température afin d'améliorer les performances de la pompe à chaleur.

DIMENSIONNEMENT

Une sonde 100 mètres de profondeur fournit une puissance thermique d'environ 5 kW. En considérant que la pompe à chaleur associée au forage a un COP de 4, la puissance thermique fournie au bâtiment ou au réseau de chaleur est d'environ 7 kW par sonde. Plusieurs sondes peuvent être installées pour un même bâtiment ; elles doivent alors être espacées d'au moins 10 mètres et peuvent atteindre 200 m de profondeur.

ÉLEMENTS ECONOMIQUES

L'investissement pour une pompe à chaleur s'élève à 300 €/kW environ. Pour le forage de capteurs verticaux, l'investissement s'élève à 50 à 90 € par mètre foré. Ces valeurs sont cependant très variables en fonction des caractéristiques des sols.

LA POMPE À CHALEUR (PAC) SUR NAPPE

FONCTIONNEMENT

L'hydrothermie ou géothermie sur nappe consiste à utiliser les calories de l'eau d'une nappe (ou d'un cours d'eau) pour chauffer ou rafraîchir les bâtiments. Un doublet géothermique est nécessaire : un puits de captage et un puits de rejet.



En surface

La pompe à chaleur est constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide calorifique. Le circuit est composé de quatre éléments :

- un évaporateur : le fluide frigorigène capte la chaleur de la zone extérieure et s'évapore,
- un compresseur : la vapeur du fluide frigorigène est comprimée, ce qui augmente sa température,
- un condenseur : le fluide frigorigène se condense et cède sa chaleur au milieu à réchauffer,
- un détendeur : le fluide est ramené à la pression d'entrée dans l'évaporateur.

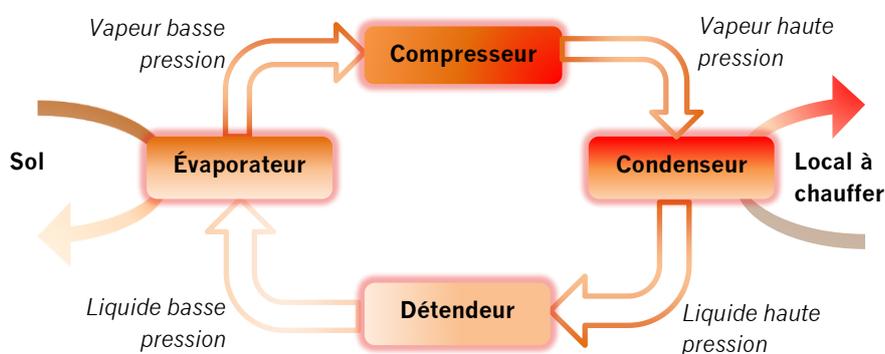


Schéma de principe d'une pompe à chaleur

La performance d'une pompe à chaleur est mesurée par son **Coefficient de Performance (COP)** : c'est le rapport entre l'énergie produite par la pompe à chaleur et l'énergie qui lui a été fournie en entrée ; et varie entre 3 et 5. Plus le COP est élevé, meilleures sont les performances de la pompe à chaleur ; et plus les économies sont importantes pour l'utilisateur.

La pompe à chaleur est plus performante quand la différence de température entre la source où est puisée la chaleur et le bâtiment est faible. Pour cette raison, on utilisera des **émetteurs « basse température »** : à eau, via des radiateurs ou un plancher chauffant.

En sous-sol

Lorsque la chaleur est captée dans un aquifère, la présence d'une nappe d'eau à faible profondeur est bien sûr indispensable. Son débit doit être suffisant pour chauffer le bâtiment. Selon ces caractéristiques physico-chimiques, l'eau captée peut ensuite être rejetée dans une rivière ou dans un plan d'eau ou – le plus souvent – devra être réinjectée dans la nappe.

AVANTAGES DE LA GEOTHERMIE

- Les pompes à chaleur associées aux doublets géothermiques ont un très bon rendement énergétique (de 3 à 5 kWh thermiques fournis pour 1 kWh électrique consommé).
- L'hydrothermie ou géothermie sur nappe est une énergie locale qui ne dépend pas des conditions atmosphériques, donc son potentiel ne fluctue pas : c'est une énergie fiable et constante.
- L'hydrothermie ou géothermie sur nappe permet d'envisager le refroidissement des locaux en été, c'est une des rares technologies respectueuses de l'environnement pour ce type d'application.

CONDITIONS A RESPECTER

- Vérifier préalablement à tous travaux si le site se prête à ce type d'installation (pour un puisage dans la nappe : potentiel thermique, caractéristiques hydrogéologiques de la nappe et présence d'autres installations, pour des capteurs verticaux : accès pour un engin de forage, etc.).

- Dans le cas de la géothermie sur nappe, surveiller la température de l'eau de la nappe pour vérifier si ces équipements ne risquent pas d'impliquer une modification de son équilibre à long terme. Vérifier l'interférence avec d'éventuelles autres installations.
- Vérifier la réglementation s'appliquant dans le cas d'un puisage dans la nappe : déclaration auprès de la de l'autorité administrative (DREAL, DDT). Il est important de transmettre également les informations au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) qui réalise un suivi des installations existantes.
- Mettre en place des dispositifs de mesure des débits prélevés et rejetés dans la nappe.
- Installer une pompe à chaleur capable de démarrer à vide ou équipée d'un démarrage progressif pour limiter l'appel de puissance.
- Choisir une pompe à chaleur dont le coefficient de performance (COP) est élevé : pour cela, se rapprocher de l'ADEME qui donnera le COP minimal pour bénéficier des aides disponibles.
- Faire installer la pompe à chaleur par un installateur QualiPAC ; faire réaliser les forages par un installateur Qualiforage. Ces agréments sont délivrés par l'association Qualit'EnR.
- L'émission de chaleur se fera préférentiellement via des émetteurs basse température afin d'améliorer les performances de la pompe à chaleur.

DIMENSIONNEMENT

Une nappe présentant un débit de 100 m³/h et une température de 12°C fournit une puissance thermique d'environ 700 kW si l'eau est rejetée à 6°C. En considérant que la pompe à chaleur associée au forage a un COP de 3,5, la puissance thermique fournie au bâtiment ou au réseau de chaleur est d'environ 975 kW.

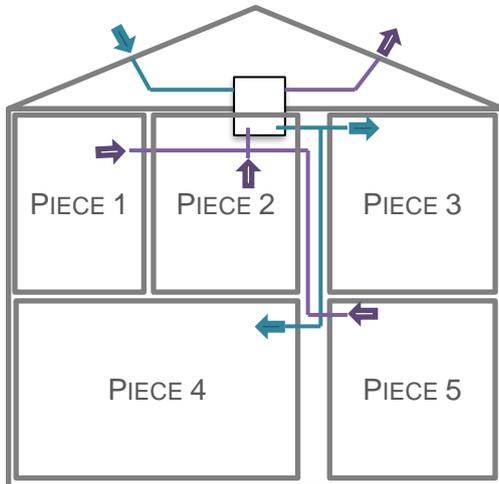
ÉLEMENTS ECONOMIQUES

L'investissement pour une pompe à chaleur s'élève à 300 €/kW environ. Un forage sur la nappe coûte environ 2 000 € par mètre foré. Ces valeurs sont cependant très variables en fonction des caractéristiques des sols.

LA VMC THERMODYNAMIQUE

FONCTIONNEMENT

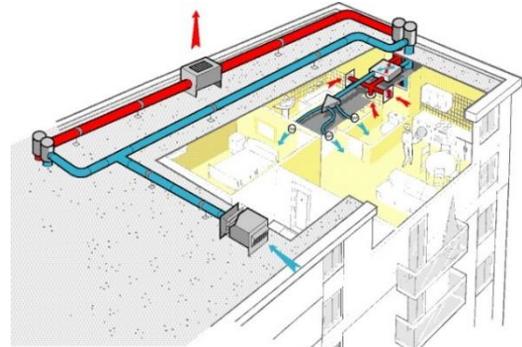
La VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée) thermodynamique (ou pompe à chaleur sur air vicié) consiste en une pompe à chaleur air/air installée en sortie d'une VMC double-flux.



Schémas de fonctionnement d'une pompe à chaleur sur air vicié

Une VMC double flux permet de limiter les pertes de chaleur inhérentes à la ventilation en récupérant la chaleur de l'air vicié extrait du bâtiment et en l'utilisant pour réchauffer l'air neuf filtré venant de l'extérieur.

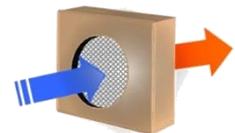
L'air vicié chaud est extrait des sanitaires et des autres pièces via des bouches d'extraction ; il traverse la VMC double flux et préchauffe ainsi l'air entrant. Un ventilateur pulse l'air neuf préchauffé dans la pompe à chaleur. L'air entrant atteint enfin la température de consigne (généralement 19°C) en traversant la PAC, et circule à travers les conduits de ventilation.



La régulation du système de chauffage se fait via des « modules de chauffage » situés dans les canalisations : des résistances électriques, de 300 à 700 W en moyenne, assurent en appoint la température de consigne souhaitée dans chacune des pièces. Ces modules complémentaires de chauffage sont utilisés de manière très ponctuelle : par période de grands froids et en régulation si une pièce est réglée sur une température supérieure aux autres.

AVANTAGES

- La chaleur contenue dans l'air vicié n'est plus gaspillée mais récupérée.
- L'émission de chaleur se fait via la ventilation : le bâtiment se trouve débarrassé de tout émetteur de chaleur. La pompe à chaleur est réversible ce qui permet éventuellement de rafraîchir le bâtiment.
- Dans une VMC thermodynamique, l'air à l'entrée de la PAC est préchauffé et la pompe à chaleur fonctionne en permanence dans des plages de température optimales (en effet, plus l'écart de température entre l'air entrant et l'air sortant est faible, meilleures sont les performances de la PAC).



CONDITIONS A RESPECTER

- Installer une pompe à chaleur capable de démarrer à vide ou équipée d'un démarrage progressif pour limiter l'appel de puissance.
- Choisir une pompe à chaleur dont le coefficient de performance (COP) est élevé : pour cela, se rapprocher de l'ADEME qui donnera le COP minimal pour bénéficier des aides disponibles.
- Faire installer la pompe à chaleur par un installateur QualiPAC. Cet agrément est délivré par l'association Quali'EnR.

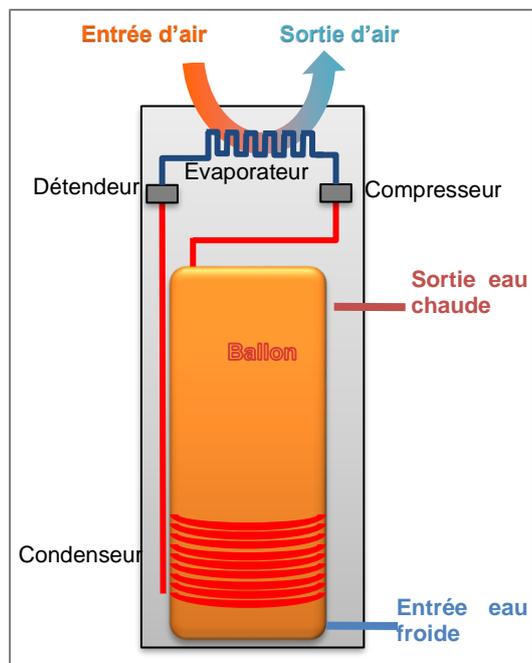
Éléments économiques

L'investissement pour une VMC thermodynamique dont la puissance du compresseur est de 1,3 kW est de 17 000 €HT environ. La maintenance consiste à réaliser des opérations de contrôle, à nettoyer ou remplacer les filtres, nettoyer l'évaporateur. Ces opérations coûtent 200 à 300 € HT par an.

LE CHAUFFE-EAU THERMODYNAMIQUE (CET)

FONCTIONNEMENT

Le chauffe-eau thermodynamique est un ensemble monobloc constitué d'un ballon d'eau chaude et d'une pompe à chaleur située en partie haute du ballon.



La pompe à chaleur est constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide, appelé « fluide frigorigène ». Le circuit est composé de quatre éléments :

- un évaporateur : le fluide frigorigène capte la chaleur de l'air du local et s'évapore,
- un compresseur : la vapeur du fluide frigorigène est comprimée, ce qui augmente sa température,
- un condenseur : le fluide frigorigène se condense en liquide et cède sa chaleur, via un échangeur, au ballon d'eau chaude,
- un détendeur : le fluide est ramené à la pression d'entrée dans l'évaporateur.

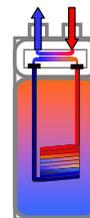
La performance d'un chauffe-eau thermodynamique est mesurée par son Coefficient de Performance (COP) : c'est le rapport entre l'énergie produite par la pompe à chaleur et l'énergie qui lui a été fournie en entrée. Le COP varie entre 3 et 4 selon les données des constructeurs ; il sera en réalité moins élevé.

Certains modèles sont équipés d'un échangeur de chaleur supplémentaire, permettant le raccordement à une autre

source de production – une installation solaire thermique par exemple.

AVANTAGES

- La chaleur contenue dans l'air vicié n'est plus gaspillée mais récupérée.
- La pompe à chaleur récupère l'énergie contenue dans une pièce technique par exemple, et la transmet à l'eau chaude sanitaire. Plus la différence entre la température de consigne – 55°C pour la production d'eau chaude sanitaire – et la température de l'air à l'entrée de la PAC est faible, plus son COP est élevé. L'air entrant dans la pompe à chaleur étant à la température du bâtiment, la pompe à chaleur fonctionne en permanence dans des plages de température adéquate.



Conditions à respecter

- Disposer d'un local technique pouvant accueillir le chauffe-eau thermodynamique. Les canalisations d'eau chaude sont situées à proximité de cette pièce. La pièce dans laquelle sera installé le chauffe-eau thermodynamique doit être suffisamment grande et aérée pour que la température de l'air entrant ne soit pas dépendante du débit d'air entrant. On éloignera ce système légèrement bruyant des pièces occupées en permanence.
- Installer une pompe à chaleur capable de démarrer à vide ou équipée d'un démarrage progressif pour limiter l'appel de puissance.

Éléments économiques

L'investissement pour un ballon thermodynamique de 300 L est de 2 500 € HT environ. La maintenance consiste à nettoyer ou remplacer les filtres encastrés, vérifier la bonne évacuation des condensats, nettoyer l'évaporateur. Ces opérations coûtent 50 à 100 € HT par an.

G. PRESENTATION DES SYSTEMES THERMIQUES EN RESEAU

LE RÉSEAU DE CHALEUR AU BOIS

FONCTIONNEMENT



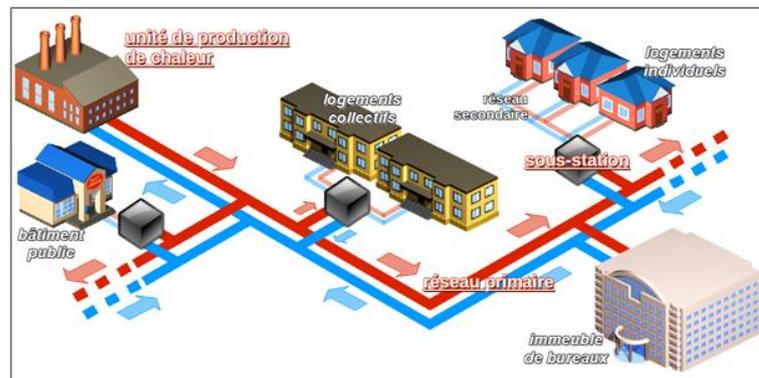
Les **combustibles** utilisés sont les sous-produits forestiers (branchages, petits bois, etc.) et industriels (écorces, sciures, copeaux, etc.) qui sont valorisés sous différentes formes. Pour un réseau de chaleur, étant donnée la puissance de la chaudière bois, on utilise des plaquettes. Les **plaquettes** (ou bois déchiqueté) sont obtenues par déchiquetage d'arbres, de branches, de sous-produits de l'industrie du bois, etc.

Remarque : Le pouvoir calorifique des combustibles bois dépend en grande partie de leur humidité. C'est pourquoi il est nécessaire de sécher le bois avant de le transformer et de le brûler.

Les combustibles bois sont amenés dans un **silo de stockage** attenant à la chaufferie et d'où ils sont envoyés automatiquement à la chaudière bois en fonction des besoins.

Le réseau de chaleur permet de distribuer la chaleur produite par une même chaudière à plusieurs bâtiments. Ces réseaux peuvent être de tailles différentes : de plusieurs milliers de logements desservis et plusieurs dizaines de kilomètres de réseaux à trois ou quatre bâtiments desservis pour quelques dizaines de mètres de réseau.

Le réseau de distribution, ou réseau de chaleur, est un circuit fermé constitué par des tuyaux enterrés isolés, transportant un fluide caloporteur (eau le plus souvent). Il part de la chaudière et dessert les bâtiments raccordés, transmet la chaleur puis revient à la chaudière en retournant le fluide refroidi. La sous-station permet l'échange de chaleur entre le circuit primaire (réseau principal) et le circuit secondaire (installation de chauffage interne au bâtiment) via un échangeur de chaleur. Une sous-station est à prévoir pour chaque bâtiment raccordé. Lorsque le réseau de chaleur dessert d'autres bâtiments que ceux appartenant au maître d'ouvrage, il faut distinguer la partie primaire du réseau (chaufferie, réseau et sous-station) de la partie secondaire (chauffage des bâtiments après les sous-stations, à l'intérieur des bâtiments). Le maître d'ouvrage est responsable a minima de la partie primaire.



AVANTAGES DU BOIS ENERGIE

Le bois énergie bénéficie d'atouts indéniables, qui appuient son développement et une meilleure utilisation de cette ressource :

- Des ressources locales importantes et une filière d'approvisionnement bien structurée : l'énergie utilisée est renouvelable, aucune pénurie n'est à craindre tant que l'exploitation forestière est réalisée de manière durable. C'est pourquoi les prix sont moins sujets à des fluctuations.
- Un bilan neutre vis-à-vis des gaz à effet de serre : conventionnellement, l'utilisation de la biomasse est considérée comme neutre du point de vue des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) puisque sa combustion émet autant de CO₂ qu'elle n'en a absorbé au cours de sa croissance. À ce titre, le développement de son utilisation, en substitution aux énergies traditionnelles, constitue l'un des leviers privilégiés de la lutte contre le changement climatique.
- Le contexte haussier du prix des énergies traditionnelles : alors que les énergies fossiles ont longtemps été les énergies les moins chères, la récente envolée des prix du pétrole rend compétitive, dans une perspective de long terme, la valorisation des ressources locales comme la biomasse.
- Les progrès techniques et la diffusion massive des matériels a permis une baisse des coûts



<p>d'investissement, la maturité technique des offres bois-énergie n'est aujourd'hui plus à démontrer.</p> <p>Par ailleurs, la gestion d'un combustible solide comme le bois étant plus compliquée que celle d'un combustible gazeux ou liquide, sa mutualisation en réseau de chaleur est un avantage. De plus, cela permet à un plus grand nombre de consommateurs de bénéficier d'une chaleur propre, renouvelable et produite à partir de ressources locales, à un coût économique intéressant et moins volatile que les énergies fossiles.</p>
<p>CONDITIONS A RESPECTER</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ S'assurer que le réseau de chaleur est pertinent sur le plan énergétique et économique : rechercher des bâtiments consommateurs et rapprochés de manière à avoir une densité énergétique²⁴ importante. Une forte densité énergétique garantit une meilleure rentabilité puisque l'investissement consenti pour le réseau est plus facilement amorti (plus d'énergie livrée). ▪ Veiller à la qualité du combustible utilisé dans la chaudière : plus la puissance de cette dernière est faible, plus les caractéristiques du combustible ont un impact important sur son fonctionnement (mauvaise combustion, rejet de polluants atmosphériques, détérioration des équipements, etc.). Il faut établir un contrat de fourniture précisant les caractéristiques requises ainsi que les pénalités en cas de non-respect du cahier des charges. ▪ Faire dimensionner par des professionnels expérimentés les différents éléments constitutifs de l'installation afin d'éviter de mauvaises conceptions : accessibilité du silo par les véhicules de livraison, surdimensionnement de la chaudière bois, etc. ▪ Bien entretenir et régler les équipements. ▪ Vérifier que les chaudières respectent les normes de rejets auxquelles elles sont soumises et qui garantissent des rejets atmosphériques acceptables. Plus la chaudière est de taille importante, plus la réglementation lui impose des seuils de rejets faibles.
<p>DIMENSIONNEMENT</p> <p>Une attention toute particulière sera portée au dimensionnement de la chaudière. En particulier, on veillera à ne pas la surdimensionner, pour des raisons techniques et économiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ses performances se dégradent lorsqu'elle fonctionne à bas régime, ce qui engendre des difficultés d'exploitation à la mi-saison pour une chaudière surdimensionnée ; ▪ L'investissement de la chaudière bois est la part la plus importante dans le coût de revient de la chaleur produite. Une chaudière surdimensionnée engendre un investissement important, et diminue la rentabilité économique du projet. <p>Pour les mêmes raisons, une chaudière d'appoint est nécessaire ; il peut s'agir d'un simple appoint pour les périodes de grand froid et/ou d'une production de l'eau chaude sanitaire en été. Il est également possible de dimensionner la chaudière d'appoint de façon à ce qu'elle soit en capacité de couvrir l'intégralité des besoins le jour le plus froid (en cas de panne de la chaudière bois par exemple) ; on parle alors d'appoint/secours.</p> <p>La taille du silo de stockage est calculée en fonction de l'autonomie souhaitée (quelques jours pour les réseaux de chaleur importants) de la chaudière ou suivant la taille des véhicules de livraison.</p> <p>Le tracé du réseau de chaleur doit être optimisé de manière à être le plus court possible et de réduire les investissements. Chaque tronçon doit être accessible de manière à pouvoir effectuer des opérations de maintenance éventuellement nécessaires.</p>
<p>CONTRAINTES</p> <p>La mise en place d'un réseau de chaleur présente quelques contraintes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ La chaufferie centrale et le silo de stockage doivent être intégrés au site. ▪ Un accès pour le passage des camions et l'approvisionnement en combustible doit être prévu (prévoir une aire de retournement pour les véhicules de livraison suivant la configuration du site). ▪ La conception, la réalisation, la gestion et l'exploitation sont plus complexes que dans le cas de solutions individuelles. ▪ Penser le montage juridique dès le début du projet car il appelle une gestion plus complexe et une

²⁴ Rapport entre la quantité d'énergie livrée par le réseau et sa longueur

organisation spécifique. Il faut qu'un acteur se montre intéressé pour porter un tel projet ; le maître d'ouvrage doit ensuite contractualiser avec différents acteurs pour la mise en place des installations puis leur exploitation. Plusieurs montages juridiques sont possibles.

ÉLÉMENTS ECONOMIQUES

L'investissement pour l'ensemble du projet varie de manière très importante en fonction du type de projet, des aménagements de génie civil à effectuer, de la reprise d'éléments existants, etc. Des ordres de grandeur sont donnés ci-dessous en fonction de la puissance de la chaudière bois :

- 100 – 300 kW : 1 500 à 2 300 € HT/kW,
- 300 – 1 200 kW : 1 300 à 1 900 € HT/kW,
- > 1 200 kW : 900 à 1 500 € HT/kW.

L'exploitation comprend la gestion du bon état de marche de l'installation et des sous-stations, et la gestion des livraisons de combustibles.

LA BOUCLE D'EAU GÉOTHERMIQUE SUR NAPPE

FONCTIONNEMENT



L'eau de la nappe circule dans un réseau de distribution desservant plusieurs bâtiments : on parle de boucle d'eau. L'eau prélevée dans la nappe via un puits de captage y est ensuite réinjectée via un puits de rejet.

Remarque : L'eau circulant dans le réseau étant à la température de l'eau de la nappe, non encore réchauffée, il ne s'agit pas à proprement parler d'un réseau de chaleur.

Chaque bâtiment est équipé d'une pompe à chaleur qui relève la température de l'eau de la nappe afin de couvrir les besoins en chauffage. Si la pompe à chaleur est réversible, elle peut fonctionner en été pour rafraîchir le bâtiment (elle abaisse alors la température de la nappe). On peut également faire circuler l'eau à température de la nappe dans les émetteurs des bâtiments pour rafraîchir en été sans utiliser la pompe à chaleur (free-cooling). Enfin, si une pompe à chaleur haute température est installée, il est possible de réaliser de la production d'eau chaude sanitaire également (pour les bâtiments ayant des besoins suffisants).

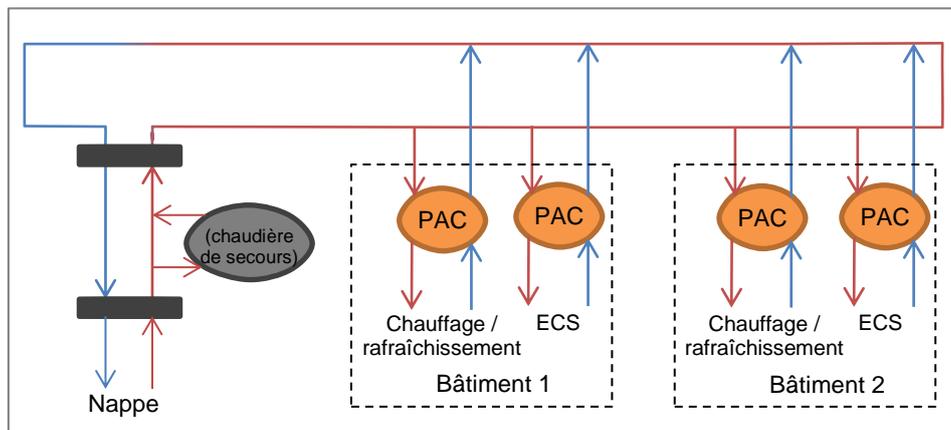


Schéma de principe d'une boucle d'eau

Remarque : Il est possible de placer une pompe à chaleur centrale en sortie de nappe et de distribuer l'eau chaude comme dans un réseau de chaleur classique – solution moins onéreuse – mais on perd alors l'avantage de la multiplicité des usages : dans le cas de la boucle d'eau, un bâtiment peut se chauffer pendant qu'un autre se chauffe et produit son eau chaude sanitaire et que simultanément un troisième se rafraîchit. D'autre part, les pertes de chaleur sur le réseau de chaleur sont plus importantes que pour une boucle d'eau puisque la température de l'eau qui y circule est plus élevée.

AVANTAGES

- Multiplicité des usages : possibilité pour les différents bâtiments raccordés de se chauffer, de se refroidir et de produire leur eau chaude sanitaire. Un bâtiment peut simultanément produire son eau chaude sanitaire et se chauffer ou se refroidir. Un bâtiment peut se chauffer pendant que le bâtiment d'à côté se refroidit.
- Le free-cooling sans utiliser la pompe à chaleur peut fournir une solution de rafraîchissement quasiment gratuite (seules les pompes de circulation fonctionnent), notamment pour les logements.
- La température de la nappe ne dépend que peu des conditions atmosphériques, donc son potentiel fluctue peu : c'est une énergie fiable et constante qui permet aux pompes à chaleur d'avoir un très bon rendement énergétique (de 3 à 5 kWh d'énergie thermique produite pour 1 kWh d'énergie électrique consommée).
- Pertes de chaleur sur la boucle d'eau moins importantes qu'avec un réseau de chaleur.

CONDITIONS A RESPECTER

- Vérifier les capacités de la nappe au regard des besoins en énergie (production de chaleur et production de froid) et des besoins pour les autres usages (eau potable, irrigation, etc.) par une étude hydrogéologique. L'étude hydrogéologique doit examiner les points suivants : caractéristiques

hydrogéologiques de la nappe, potentiel thermique, présence d'autres forages à proximité et éventuelles interactions entre eux, etc.

- Surveiller la température de l'eau de la nappe pour vérifier l'impact de l'installation. En effet, l'eau rejetée dans la nappe après utilisation dans la boucle d'eau sera plus froide en hiver et plus chaude en été. La modification de la température d'une nappe peut avoir d'importantes conséquences sur son équilibre biochimique. Le fait d'effectuer du chauffage l'hiver et de la climatisation l'été est intéressant car il permet un équilibre annuel ; cependant, des impacts saisonniers peuvent être observés.
- Se conformer à la réglementation et aux prescriptions des organismes en charge (police de l'eau, DDT, etc.). Transmettre les caractéristiques de l'ouvrage au BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) qui effectue un suivi des installations existantes.
- Installer des pompes à chaleur capables de démarrer à vide ou équipées d'un démarrage progressif pour limiter l'appel de puissance.
- Choisir une pompe à chaleur dont le coefficient de performance (COP) est élevé : pour cela, se rapprocher de l'ADEME qui donne le COP minimal pour bénéficier des aides disponibles.
- Faire installer les pompes à chaleur pour des installateurs agréés QualiPAC ; faire réaliser les forages par une entreprise agréée Qualiforage. Ces agréments sont délivrés par l'association Qualit'EnR qui promeut la qualité des prestations des professionnels des énergies renouvelables.
- Vérifier l'accessibilité du site aux engins de forage.
- Privilégier des émetteurs de chaleur fonctionnant à basse température (planchant chauffant / rafraîchissant, radiateurs basse température, etc.) afin d'améliorer les performances des pompes à chaleur.

DIMENSIONNEMENT

Une nappe présentant un débit de 100 m³/h et une température de 12°C fournit une puissance thermique d'environ 700 kW. En considérant que la pompe à chaleur associée au forage a un COP de 3,5, la puissance thermique fournie au bâtiment ou au réseau de chaleur est d'environ 975 kW.

BATIMENTS CIBLES

Ce type d'installation est particulièrement intéressant dans le cas de raccordement de bâtiments ayant des besoins de chaud et de froid.

ÉLÉMENTS ECONOMIQUES

- L'investissement pour une pompe à chaleur s'élève à 300 €/kW environ.
- Un forage sur nappe coûte environ 2 000 € par mètres forés. Cette valeur est très variable en fonction des caractéristiques du site.

H. PRESENTATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITE

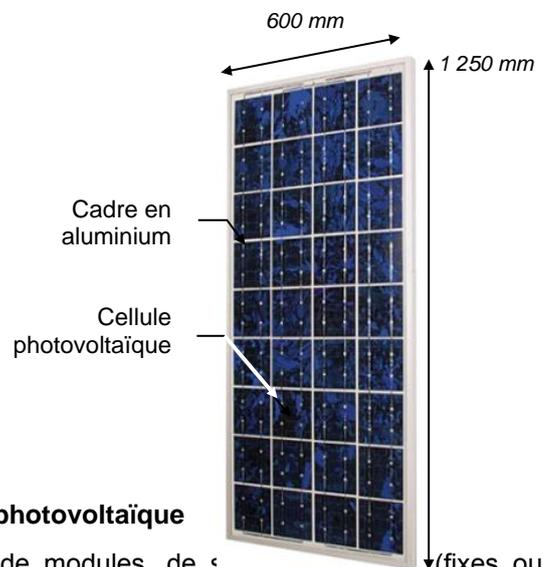
LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

FONCTIONNEMENT

Une **cellule photovoltaïque** est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse du soleil et la transforme en électricité.

Lorsqu'une cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons de la lumière viennent frapper sa face avant. L'énergie des photons est partiellement transmise aux électrons qui se déplacent du pôle positif – face avant de la cellule – au pôle négatif – face arrière. C'est ce déplacement des électrons qui crée un courant électrique.

Chaque cellule photovoltaïque ne génère qu'une petite quantité d'électricité. Elles sont donc assemblées en série pour constituer un **module photovoltaïque**, qui se compose généralement d'un circuit de 36 à 60 cellules. Le matériau utilisé étant très fragile, les cellules sont protégées par des plaques de verre ou, à l'arrière, par un matériau composite. Un cadre en aluminium permet la fixation de ce module sur différents types de supports. Des modèles sans cadre permettent différentes variantes pour l'intégration architecturale.



Module photovoltaïque

Un **générateur photovoltaïque** est composé d'un champ de modules, de s (fixes ou mobiles) pour poser les modules, du câblage, et des onduleurs qui permettent de convertir le courant continu en courant alternatif revendu au distributeur d'électricité local.

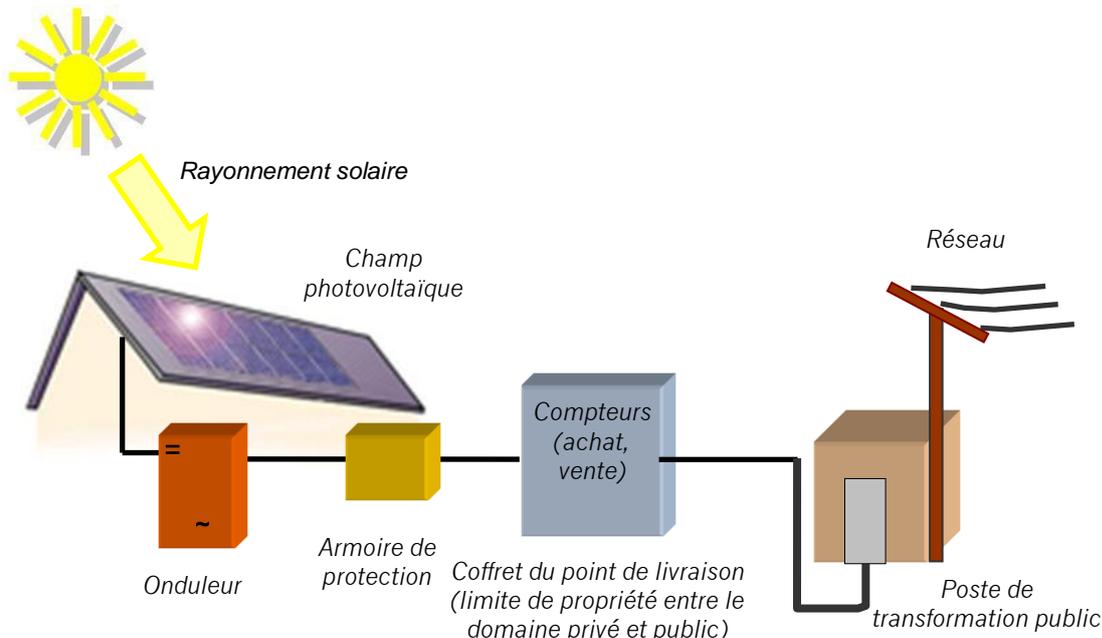


Schéma de principe d'une installation photovoltaïque

Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle). Les modules photovoltaïques sont généralement garantis 25 ans et leur durée de vie est d'environ 40 ans.

AVANTAGES DU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

La production d'électricité à partir de l'énergie radiative du soleil par l'intermédiaire de modules photovoltaïques présente des avantages importants :

- la ressource d'énergie utilisée est renouvelable, aucune pénurie ou fluctuation des prix n'est à craindre,
- la production d'électricité est réalisée sans qu'il n'y ait aucune pièce en mouvement, ce qui entraîne des frais de maintenance excessivement faibles et une exploitation aisée (les modules sont auto-nettoyés avec la pluie),
- le processus de production d'électricité n'a aucun impact sur l'environnement (ni rejet polluant, ni déchet, ni bruit, etc.),
- ce qui est produit est généralement consommé sur place, ce qui présente un intérêt du point de vue électrique puisque les pertes dans les câbles sont très faibles (contrairement au mode de production décentralisée, ex : centrale nucléaire). Même si l'électricité produite par les installations est injectée sur le réseau, en pratique l'électricité choisit le plus court chemin et est utilisée à l'endroit le plus proche de sa production,
- La filière de recyclage des panneaux photovoltaïques est en place et fonctionne. En France, le seul éco-organisme agréé par les pouvoirs publics pour la prise en charge des panneaux photovoltaïques usagés pour la période 2015-2020 est la SAS PV CYCLE France, créée en 2014. Elle a mis en place un système collectif de collecte et de recyclage et accepte tous les panneaux en provenance du marché français, quelle que soit leur marque ou leur technologie.



Il est important de mettre en parallèle l'installation d'un générateur photovoltaïque sur un bâtiment avec la maîtrise de la consommation en énergie de ce bâtiment : cela permet une vraie cohérence entre une production d'électricité « propre » et une consommation énergétique maîtrisée.

Le panel d'actions à mettre en place dans le cadre d'une telle démarche est vaste : remplacement des ampoules classiques par des lampes basse consommation aux endroits appropriés, appareils électriques performants, etc. Certaines actions sont peu chères et faciles à mettre en œuvre, elles doivent donc absolument être réalisées pour une cohérence énergétique globale.

CONDITIONS A RESPECTER				
<ul style="list-style-type: none"> Prévoir dès le début du projet un emplacement optimum pour l'intégration des modules photovoltaïques au bâti et pour une production maximale. Faire réaliser les travaux par un installateur compétent possédant l'agrément QualiPV, délivré par l'association Qualit'EnR. Investir en priorité sur la performance énergétique du bâti puis sur un chauffage très performant. Si toutes ces mesures ont été prises en compte il est cohérent d'étudier une solution photovoltaïque. Mettre en œuvre des équipements performants dans le bâtiment (éclairage, équipement électrique, etc.). Cela permet une vraie cohérence entre une production d'électricité « propre » et une consommation énergétique maîtrisée. 				
DIMENSIONNEMENT				
Voir § 2.1.2 page 50				
BATIMENTS CIBLES				
Idéalement, les modules sont orientés plein sud. Toutefois il faut tenir compte des masques environnants et de l'orientation du site. La puissance délivrée par l'installation est maximale dans le cas où le rayonnement solaire est perpendiculaire aux modules. Un angle de 30 à 35° permet de capter au maximum le rayonnement estival qui est le plus productif.				
ÉLÉMENTS ECONOMIQUES				
	Polycristallin	3 kWc	36 kWc	100 kWc
Investissement		2 € HT/Wc	1,5 € HT/Wc	1 € HT/Wc
Raccordement		500 €HT	1 500 €HT	15 000 €HT
Exploitation – maintenance – assurances		100 € HT/an	1 300 € HT/an	3 300 € HT/an
<p><i>Attention !</i> La fourchette d'investissement présentée est observée pour 2015 ; cependant ces coûts évoluent rapidement : le coût du Wc a baissé presque linéairement entre 1995 et 2010, d'environ 0,5 € par an. Le prix du module à la sortie de l'usine va continuer de baisser, grâce à l'effet d'expérience et à la pression de la concurrence.</p> <p>Achat de l'électricité produite</p> <p>Les projets de moins de 100 kW font l'objet d'un système de tarif d'achat ajustable chaque trimestre et les projets de plus de 100 kW d'un système d'appel d'offres. Ces tarifs sont révisés tous les trois mois ; les nouveaux tarifs sont calculés par la Commission de Régulation de l'Énergie et font l'objet d'un arrêté.</p> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px;"> <p>☞ Les tarifs d'achats du trimestre en cours sont détaillés sur le site : http://www.photovoltaique.info/Aujourd-hui-arrete-du-4-mars-2011</p> </div>				

FOCUS SUR LES EQUIPEMENTS AUTONOMES

Pour des applications urbaines, les modules photovoltaïques peuvent être intégrés au mobilier urbain : au-dessus des horodateurs, sur un mât pour l'affichage en temps réel de la durée d'attente des bus, sur un panneau publicitaire pour son éclairage, etc.

L'installation photovoltaïque permet de s'affranchir d'un raccordement au réseau pour une consommation annuelle très faible (l'horodateur est un bon exemple). Éviter le raccordement au réseau signifie d'une part s'affranchir des tranchées et d'autre part ne pas avoir à payer un abonnement finalement cher pour l'équipement alimenté.

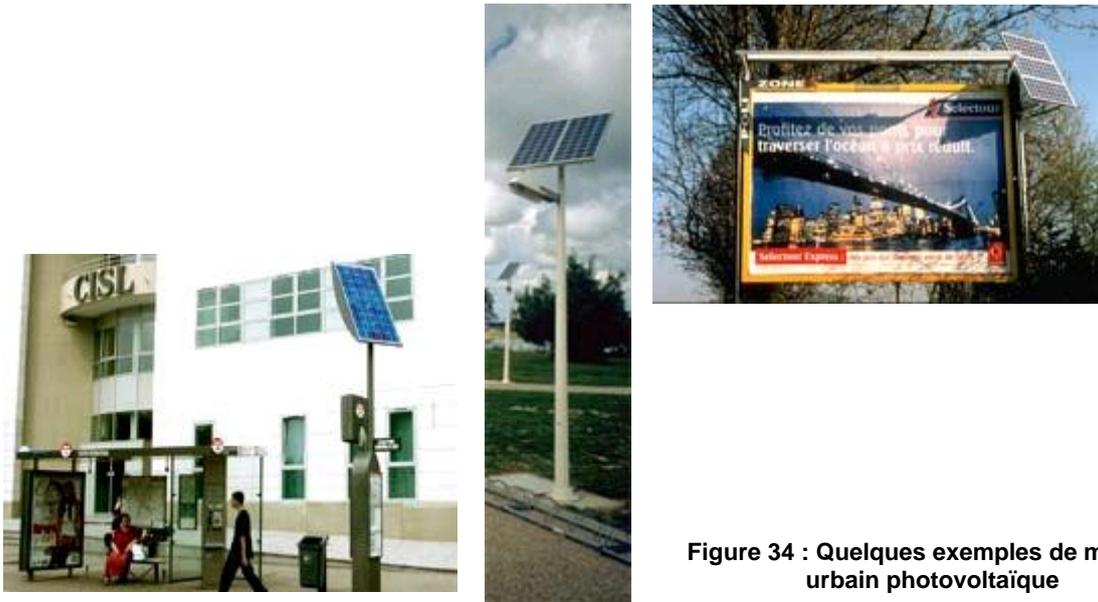


Figure 34 : Quelques exemples de mobilier urbain photovoltaïque

Éclairage public

De nombreux systèmes d'éclairage public solaires font leur apparition sur un marché encore peu structuré. De façon générale, ces lampadaires sont constitués :

- de panneaux photovoltaïques d'une cinquante à quelques centaines de Wc ;
- d'une batterie se logeant dans un caisson fixé en pied de mât ou à enterrer dans une réserve technique ;
- d'un régulateur ;
- d'un lampadaire « classique » : le mât et la lampe.



Figure 35 : Lampadaires photovoltaïques

Les modules photovoltaïques captent l'énergie en journée et la restituent du crépuscule à l'aube, par le biais de batteries. Des systèmes programmables – tels qu'un programmeur, un régulateur, un détecteur de présence, un système de télégestion – souvent en option, permettent de gérer les périodes d'allumage et donc d'améliorer l'autonomie du système en limitant le recours à l'électricité du réseau. Une centrale de commande détermine les heures d'éclairage. Il est également possible d'équiper ces lampadaires de détecteurs de présence déclenchant l'allumage dès le franchissement du périmètre surveillé. Les lampes utilisées sont des ampoules fluorescentes à vapeur de sodium basse ou haute pression ou des LED. Quant aux batteries et au système de régulation, ils sont souvent intégrés au lampadaire (avec un bac à fleurs par exemple) ou sur un élément de mobilier proche (tel un banc).

Les systèmes d'éclairage photovoltaïque ont une autonomie moyenne de 3 à 4 jours pour un fonctionnement de 8 heures.

Dans le cadre de l'éclairage public, la mise en œuvre de modules photovoltaïques doit s'étudier dans une logique de cohérence esthétique (équiper par exemple tout un quartier), en s'attachant à calculer les coûts évités (raccordement au réseau traditionnel) et la rentabilité globale de l'opération. La notion de non-destruction de la voirie (point positif) ainsi que les **ombres portées des bâtiments sur les modules dans la journée** (point négatif) sont aussi des éléments dont il faut tenir compte.

L'investissement s'élève à 1 800 € en moyenne par candélabre, pour l'équipement et la pose, et se décompose comme suit :

- Équipement :
 - candélabre : mât + luminaire + crosse : de 800 € (sodium haute pression) à 1 100 € (bloc LED),
 - Panneau PV 50 Wc : 50€,
 - Batterie 50 Ah : 200 €,
 - Régulation : 50 €,
- Génie civil et pose : 400 €.

Il s'agit de postes estimatifs, pouvant subir d'importantes variations selon le projet, le type et le nombre de lampadaires, etc.

Horodateurs

Les horodateurs sont de loin le type de mobilier urbain faisant le plus appel au photovoltaïque, la rentabilité est telle qu'aucune subvention n'est nécessaire pour ce type d'application. Le surcoût pour un horodateur est de 350 € hors taxes. Dans le même temps, l'économie générée la première année est de 115 € environ sur l'abonnement et la consommation électrique et 140 € par mètre linéaire de tranchée pour le raccordement.

De même que pour les lampadaires photovoltaïques, attention à vérifier les ombres portées sur l'équipement, qui empêchent la production d'électricité, surtout sur ces équipements de faible hauteur.



Figure 36 : Horodateur photovoltaïque