

# Intégration du micro-cogénérateur dans l'habitat

Ce chapitre est consacré à la mise en situation du micro-cogénérateur AGATCO dans l'habitat individuel. L'objectif est de quantifier l'intérêt de la micro-cogénération dans ce type d'habitat. Il sera évalué selon deux critères : économique et environnemental. Pour juger de l'importance de ces critères, ceux-ci sont comparés avec les données obtenues en faisant usage d'une chaudière à granulés dans les mêmes conditions d'exploitation. Cette étude, si elle est réalisée en détails peut faire l'objet d'une thèse à elle seule, ce qui a été le cas pour la thèse de Benoît Andlauer qui a mis au point un modèle de calcul de l'impact d'un micro-cogénérateur intégré aux bâtiments [152]. C'est pourquoi, une étude simplifiée est présentée ici à partir des données issues de notre travail.

L'objectif est de simuler par trois scénarii le micro-cogénérateur dans les conditions d'utilisation d'une maison individuelle située dans les Vosges (Epinal) ayant un besoin maximal de chauffage de 10kW, la période de chauffe allant du 1<sup>er</sup> octobre au 30 avril. Le besoin en eau chaude sanitaire (ECS) est calculé en fonction du nombre de personnes occupant le logement. Le besoin électrique de la maison est déterminé en prenant en considération un ménage composé de quatre personnes vivant dans une maison de 120 m<sup>2</sup>.

Les données utilisées permettent de réaliser plusieurs scénarii. Dans un premier scénario, une chaudière à granulés est utilisée pour répondre aux besoins thermiques, le besoin en électricité est comblé en achetant l'énergie au réseau. Dans un deuxième temps, la chaleur est produite par le micro-cogénérateur et l'électricité ainsi produite est entièrement vendue au réseau, ce dernier fournissant les besoins en électricité. Enfin, le micro-cogénérateur répond aux besoins thermiques et l'électricité produite est auto-consommée. En fonction de la part d'autoconsommation une part d'électricité sera soit vendue soit achetée au réseau. De ses différents scénarii sont tirés le budget annuel nécessaire pour répondre à l'ensemble des besoins, l'efficacité énergétique et l'impact environnemental de chaque scénario.

## 1. Présentation des calculs

Dans un premier temps, l'obtention des différentes données sur la partie thermique est expliquée. Le calcul du besoin thermique, couplage du besoin en chauffage et en eau chaude sanitaire, permet d'obtenir la quantité de combustible et donc le budget nécessaire à l'année.

Dans un second temps, les données concernant la consommation électrique sont expliquées. La détermination du besoin électrique, les conditions d'achat et de vente de l'électricité par le particulier sont autant de facteurs influençant la comparaison des systèmes, et cela en fonction des scénarii d'utilisation de l'électricité produite par le micro-cogénérateur.

Enfin, la dernière partie présente les différents calculs permettant de réaliser le bilan économique, le bilan thermique et le bilan environnemental pour l'ensemble des cas.

## 1.1. Détermination des données thermiques

Le besoin en énergie thermique ( $B_t$ ) est la somme du besoin en chauffage ( $B_c$ ) et du besoin en eau chaude sanitaire ( $B_{ECS}$ ). A partir du besoin thermique le volume du ballon tampon ainsi que la consommation de combustible ( $C_t$ ) sont calculés.

### 1.1.1. Estimation du besoin en chauffage

La puissance optimale nécessaire pour répondre au besoin maximum de chaleur a été fixée à 10kW, celle du dispositif étudié dans le cadre de ce travail de thèse. Cette puissance est nécessaire lorsque l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment est maximal. La température intérieure est fixée à 19°C dans cette étude. La température extérieure dépend de la localisation, elle est appelée *température de base extérieure*, elle est calculée selon la norme EN ISO 15927-5. Elle désigne soit une température moyenne de l'air sur une période de n jours (n pouvant prendre comme valeur 1, 2, 3 ou 4) qui se répète à une fréquence de 1 fois par an, soit une température moyenne horaire de l'air qui est dépassée en moyenne sur 99 % des heures pendant le mois le plus froid de l'année. Dans les Vosges cette température est de -9°C pour les calculs simplifiés de la réglementation thermique de 2012 [153]. La puissance thermique nécessaire par degré d'écart avec l'extérieur est donc :

$$P_{\Delta T} = \frac{\text{Puissance nominale}}{(T_i - T_{eb})} \quad (\text{en kW}/^{\circ}\text{C}) \quad (76)$$

Avec :

$T_i$  : Température intérieur souhaité (°C)

$T_{eb}$  : Température extérieur de base (°C)

L'équation (76) permet de calculer le besoin en énergie dès lors que l'écart entre la température intérieure et extérieure est connu. Les Degrés Jour Unifié (DJU) représentent le cumul des écarts de température entre la température de référence choisie (19°C) et la température extérieure sur la période hivernale. Dans notre cas, la période de chauffe choisie débute le 1<sup>er</sup> octobre et se termine le 30 avril, soit 212 jours, les données concernant Epinal sont rassemblées dans le Tableau 23.

**Tableau 23 : DJU sur la période hivernale pour Epinal, statistiques établies sur la période 1986–2010 avec une température de référence de 19°C [154].**

Période hivernale du 1er octobre au 30 Avril	
	DJU Epinal
Octobre	257,3
Novembre	408
Décembre	514,6
Janvier	539,4
Février	458,85
Mars	403
Avril	297
Total :	2878,15

Le besoin d'énergie thermique pour chauffer la maison sur une année est donc de :

$$B_{\text{chauffe}} = P_{\Delta T} \times 24 \times \frac{DJU}{212} \quad (\text{en kWh/jour}) \quad (77)$$

### 1.1.2. Estimation du besoin en eau chaude sanitaire (ECS)

En moyenne les besoins journaliers d'ECS par personne sur une année s'élèvent à  $56 \pm 23$  litres à  $40^\circ\text{C}$ . Pour un ménage composé de 4 personnes les besoins journaliers sur une année sont de  $170 \pm 70$  litres à  $40^\circ\text{C}$  [155]. La température de l'eau froide qui entre dans le ballon d'ECS varie au cours de l'année, le Tableau 24 regroupe les valeurs moyennes au cours de l'année et les moyennes sur les périodes prises en compte dans l'étude. Les températures moyennes mensuelle d'eau froide ont été déterminées à partir d'un échantillon de 100 logements (32 immeubles, 65 maisons individuelles et 3 appartements) répartis en France. Les Vosges est un département froid de France, pour les calculs la température d'eau froide prise en compte est la valeur moyenne moins l'écart type.

**Tableau 24 : Variation de la température moyenne d'eau froide au cours de l'année et température moyenne sur la période hivernale et l'été en France [155].**

	Températures moyennes mensuelles d'eau froide ( $^\circ\text{C}$ )	Températures mensuelles prises en compte ( $^\circ\text{C}$ )	Températures moyenne sur période hivernale et été ( $^\circ\text{C}$ )
Octobre	$17 \pm 2^\circ\text{C}$	15	11
Novembre	$15 \pm 2^\circ\text{C}$	13	
Décembre	$12 \pm 2^\circ\text{C}$	10	
Janvier	$11 \pm 2^\circ\text{C}$	9	
Février	$11 \pm 2^\circ\text{C}$	9	
Mars	$12 \pm 2^\circ\text{C}$	10	
Avril	$15 \pm 2^\circ\text{C}$	13	
Mai	$17 \pm 3^\circ\text{C}$	14	17
Juin	$19 \pm 3^\circ\text{C}$	16	
Juillet	$21 \pm 3^\circ\text{C}$	18	
Août	$21 \pm 3^\circ\text{C}$	18	
Septembre	$20 \pm 3^\circ\text{C}$	17	

Le besoin en énergie pour la production d'ECS est calculé selon l'équation suivante, la température d'eau froide étant prise pour la période concernée :

$$B_{ECS} = 170 \times \frac{4185}{3600} \times \frac{40 - T_{\text{eau froide}}}{1000} \quad (\text{en kWh/jour}) \quad (78)$$

### 1.1.3. Estimation du temps de chauffe et du volume du ballon tampon

L'ajout d'un ballon tampon permet de réaliser une chauffe par jour. Le ballon vient emmagasiner le surplus d'énergie produite lors du fonctionnement en régime nominal de production de chaleur. Le temps de fonctionnement représente donc le besoin réel en énergie divisé par la puissance nominale de la production de chaleur :

$$t = \frac{B_t}{P_{nominale}} \quad (\text{en h/jour}) \quad (79)$$

Durant cette période de chauffe, une partie de la chaleur est utilisée pour chauffer la maison et le reste permet de chauffer l'eau du ballon tampon. Le volume du ballon tampon devra donc contenir l'énergie nécessaire au chauffage et aux besoins en eau chaude sanitaire pour le temps restant après la chauffe.

$$V = \frac{B_t}{24} \times (24 - t) \times \frac{3600}{4185 \times \Delta T} \quad (\text{en m}^3) \quad (80)$$

Avec :

$B_t$  : Le besoin thermique (kWh) ;

$t$  : Le temps de fonctionnement de la chaudière par jours (h) ;

$\Delta T$  : La différence de température entre l'entrée et la sortie du ballon.

La variation de température entre l'entrée et la sortie du ballon est dépendante du système de production d'eau chaude sanitaire et du type de chauffage mis en place. Dans notre cas d'étude, la différence de température de 45°C est prise, le choix a été réalisé en prenant en compte que la température de sortie d'eau de la chaudière serait d'environ 85°C et la température minimale du ballon 40°C (température de l'eau chaude sanitaire). Le volume du ballon tampon est donné à titre indicatif, il ne rentre pas dans les bilans réalisés.

#### **1.1.4. Estimation de la quantité de combustible**

L'énergie thermique qui a été réellement consommée ( $C_t$ ) prend en compte le rendement des appareils de production. Dans notre étude simplifiée, seul le rendement de la production de chaleur (rendement de la chaudière ou rendement thermique de la micro-cogénération) est pris en compte. Les pertes durant la distribution de la chaleur sont considérées comme nulles.

Les rendements utilisés sont ceux présentés dans le chapitre 1, paragraphe 3.3, la chaudière classique possède un rendement thermique de 90% et le micro-cogénérateur un rendement thermique de 79%.

L'énergie réellement consommée est donc fonction du système étudié :

$$C_t = \frac{B_t}{\eta_t} \quad (\text{en kWh/jour}) \quad (81)$$

Avec :

$C_t$  : Energie réellement consommée ;

$\eta_t$  : Rendement thermique de l'appareil de chauffage.

### 1.1.5. Prix de l'énergie thermique

Dans une maison, le besoin en énergie thermique peut être fourni par différentes sources d'énergie. La Figure 126 détaille l'évolution de leurs prix d'achat en €/MWh.

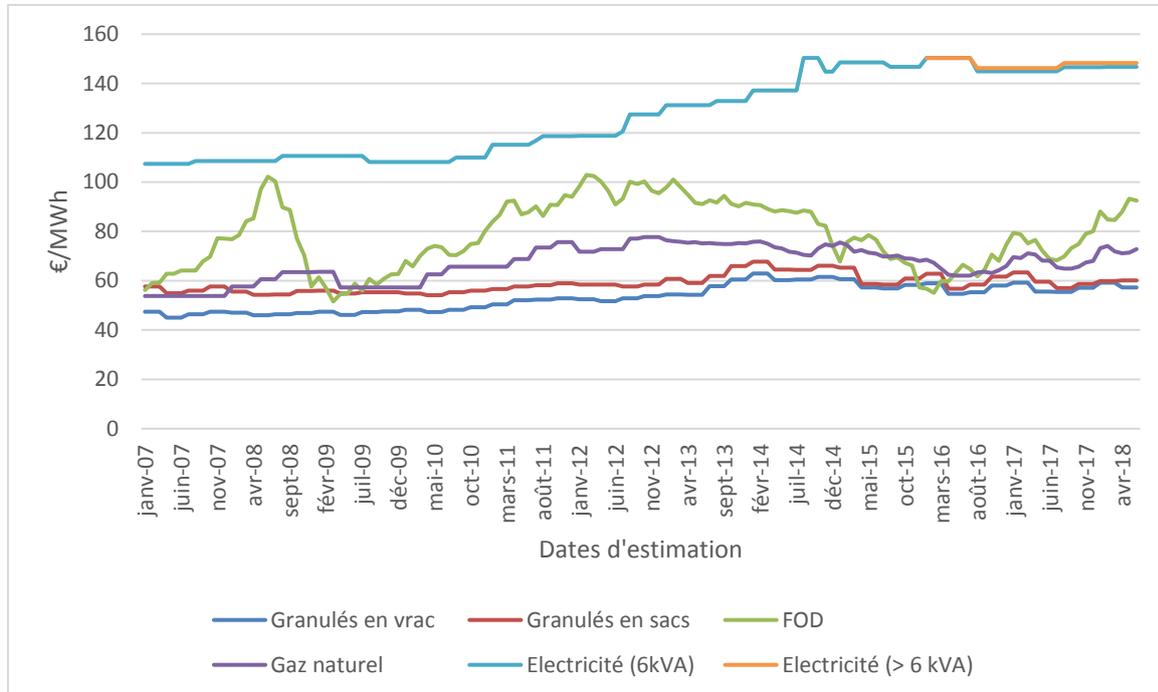


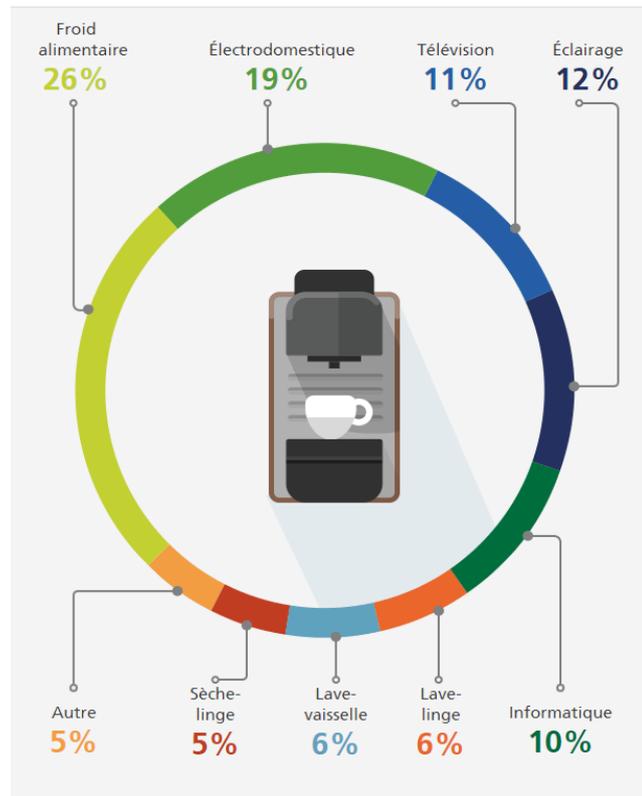
Figure 126 : Variation des tarifs d'achat de différentes énergies [55].

L'électricité est l'énergie la plus coûteuse à l'achat, mais c'est aussi la plus simple à mettre en œuvre dans l'habitat. Son prix est continuellement en augmentation depuis 2007, le tarif affiché prenant est celui de l'électricité pour un tarif bleu option base. Pour un contrat de fourniture d'électricité supérieur à 6kVA, les données existent à partir de décembre 2015. Le tarif est légèrement supérieur à celui donné pour un contrat à 6kVA. Le fioul domestique subit de grandes variations depuis ces dernières années. Le prix du gaz naturel est indexé sur celui du fioul. Il reste néanmoins assez proche de celui des granulés, même si ces derniers sont aujourd'hui plus compétitifs, avec un prix beaucoup plus stable de 60€/MWh.

## 1.2. Détermination des données électriques

### 1.2.1. Besoin d'énergie électrique (hors chaleur, ECS et cuisson)

Pour le calcul des besoins en énergie électrique, nous avons repris la quantité d'électricité moyenne consommée dans les maisons individuelles qui est de 3246kWh/an pour 2,45 personnes et une surface habitable de 115m<sup>2</sup> [156]. Puis nous avons réparti ce besoin selon la répartition des consommations décrite dans la Figure 127.



**Figure 127 : Répartition de la consommation d'électricité d'un ménage français (hors chauffage, eau chaude et cuisson) [157].**

Les différentes consommations internes peuvent être calibrées en fonction de trois méthodes : *la puissance installée / unité de surface* ; *le nombre de lancements / personne* et *la puissance installée / personne* [156]. Le Tableau 25 est réalisé en répartissant la consommation moyenne et en la pondérant selon le nombre de personnes vivant dans la maison ou selon la surface de l'habitat.

**Tableau 25 : Consommations d'électricité moyennes (hors chaleur, ECS et cuisson) par secteur.**

Usages	Désignation	Valeurs	Unités
Froid Alimentaire	FA	344,4	kWh/personne/an
Informatique	I	132,5	
Lave-linge	LL	79,5	
Lave-vaisselle	LV	79,5	
Sèche-linge	SL	66,2	
Electrodomestique	Ed	251,7	
Télévision	T	145,7	
Autre	A	1,4	kWh/m <sup>2</sup> /an
Eclairage	Eg	3,4	

La quantité d'énergie consommée par le ménage constitué de  $X_p$  personnes dans une maison individuelle d'une surface  $S$ , sera donc calculée de la façon suivante :

$$B_e = (FA + I + LL + LV + SL + Ed + T) \times Xp + (A + Eg) \times S \quad (\text{en kWh/an}) \quad (82)$$

La quantité d'énergie électrique consommée obtenue est une valeur moyenne, elle varie en fonction de chaque ménage, du matériel installé et de l'utilisation qui en est faite.

### **1.2.2. Scénarii de production d'électricité**

Plusieurs scénarii en corrélation avec les possibilités qu'offre la législation actuelle sont disponibles pour satisfaire le besoin en énergie électrique. Ces scénarii dépendent de l'utilisation ou non du micro-cogénérateur. Si la chaudière classique est employée (cas 1), alors le scénario est celui d'une production d'électricité par le réseau électrique. Si le micro-cogénérateur est utilisé (cas 2), alors il y a trois possibilités :

- L'électricité produite est dans son intégralité vendue au réseau et l'électricité nécessaire pour répondre au besoin est achetée au réseau (cas 2-a) ;
- L'électricité produite est dans son intégralité autoconsommée et la quantité manquante est achetée sur le réseau (cas 2-b) ;
- L'électricité produite subvient intégralement au besoin et l'excédent est vendu au réseau (cas 2-c).

Les deux dernières possibilités ne peuvent pas coexister, ce sera soit l'un soit l'autre en fonction des résultats obtenus, ceux-ci pouvant dépendre de la saison envisagée.

La production d'électricité est calculée à partir de la consommation en combustible et du rendement électrique du micro-cogénérateur (12%).

### **1.2.3. Prix d'achat et de vente d'électricité par le consommateur**

#### **1.2.3.1. Prix d'achat**

Le consommateur achète son électricité au réseau au prix de 148,3 €/MWh. Il correspond au tarif bleu option Base d'EDF de 2018 pour un contrat à 9 kVA. A ce tarif, il faut ajouter l'abonnement payé annuellement. En 2018 l'abonnement pour un contrat de 9 kVA s'élève à 125,08 € [55].

#### **1.2.3.2. Prix de vente**

Pour le prix de vente de l'électricité au réseau, nous considérons que le tarif C16, normalement utilisé pour toutes les tailles de cogénérateur au gaz, est applicable au bois. Il n'existe pas de législation disponible à ce jour pour la cogénération au bois dans une gamme de puissance inférieure à 300kW électrique [158]. Le tarif C16 est différent en fonction des saisons. La saison hiver commence le 1<sup>er</sup> novembre et se termine le 31 mars. Le tarif d'été est d'environ 30 €/MWh. Le tarif hiver est calculé à partir de trois composantes [109] :

- Une part fixe de 54 €/MWh ;

- Une compensation du prix du gaz en €/MWh :  $1,26 \times \text{Tarif B1}$  ;
- Une prime à la performance en €/MWh :  $130 \times (Ep - 0,1)$ ,  $Ep$  étant l'économie réalisée sur l'énergie primaire.

Dans notre étude, la compensation du prix du gaz est remplacée par une compensation du prix des granulés. Le Tarif B1 est remplacé par le prix des granulés. Le choix réalisé ici est pessimiste, il considère qu'aucune aide supplémentaire n'est mise en place pour aider aux développements des micro-cogénérateurs utilisant une ressource renouvelable et non fossile. Le calcul de l'économie d'énergie primaire est chiffré de la manière suivante :

$$Ep = \left( 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{CHP.t}}{\eta_{ref.t}} + \frac{\eta_{CHP.e}}{\eta_{ref.e}}} \right) \times 100\% \quad (83)$$

Avec :

$\eta_{CHP.t}$  : Le rendement thermique du micro-cogénérateur ;

$\eta_{ref.t}$  : Le rendement thermique de référence ;

$\eta_{CHP.e}$  : Le rendement électrique du micro-cogénérateur ;

$\eta_{ref.e}$  : Le rendement électrique de référence.

Dans le calcul, le rendement thermique de référence est de 92%. Le rendement électrique de référence est fonction de la part autoconsommée ( $\%_{ac}$ ) et du rendement de production d'électricité séparée utilisant le même combustible ( $\eta_{pse}$ ). Le calcul est exprimé dans le « *Règlement délégué (UE) 2015/2402 du 12/10/15* ».

$$\eta_{ref.e} = \left( (0,851 \times \frac{\%_{ac}}{100}) + (0,888 * (1 - \frac{\%_{ac}}{100})) \right) * \eta_{pse} \quad (84)$$

Avec :

0,851 : Le facteur correctif sur site pour un raccordement <0,45kVA

0,888 : Le facteur correctif hors site pour un raccordement <0,45kVA

$\eta_{pse}$  : Le rendement de production séparé d'électricité avec le même combustible (pour le bois et après 2016 : 37% [159])

$\%_{ac}$  : Part de l'électricité produite par cogénération autoconsommée

La période de vente de l'électricité est inférieure à la saison hivernale mais elle est comprise dedans. Le calcul du budget hivernal prend donc en compte cette variation.

### **1.3. Bilan énergétique et environnemental**

La comparaison des différents systèmes et cas étudiés passe par la détermination d'indicateurs. Dans les parties précédentes le prix d'achat et de vente des énergies a été expliqué, ce qui permet une comparaison sur l'impact économique. La partie développée ici concerne les impacts énergétiques et environnementaux.

Plusieurs indicateurs sont utilisés pour discuter du bilan énergétique : la consommation d'énergie primaire, le bilan bâtiment à énergie positive (BEPOS) et le recours aux énergies renouvelables et de récupération (RER).

Pour comparer l'impact sur l'environnement, l'étude s'appuie sur l'analyse de cycle de vie pour prendre en compte la totalité des impacts environnementaux. Dans l'étude, seule la contribution des consommations d'énergie sur le cycle de vie des appareils est déterminée et comparée.

### 1.3.1. Calcul de la performance énergétique

#### 1.3.1.1. Calcul de la consommation en énergie primaire $C_{EP}$

L'énergie primaire est l'énergie directement disponible dans l'environnement et directement exploitable sans transformation. Les facteurs d'énergie primaire, qui permettent de passer de l'énergie finale à l'énergie primaire, sont présentés dans le Tableau 26.

**Tableau 26 : Facteurs d'énergie primaire ni renouvelable, ni de récupération.**

Vecteur énergétique	Coefficient de conversion de l'énergie finale vers l'énergie primaire ( $f_p$ )
Electricité du réseau national	2,58
Gaz, charbon, produits pétroliers	1
Biomasse	1

Le calcul prend en compte l'ensemble des consommations du bâtiment en énergie et déduit la part d'électricité exportée.

$$C_{EP} = \sum C_{EF} \times f_p - P_{e,e} \quad (85)$$

Avec :

$C_{EP}$  : La consommation d'énergie primaire ( $kWh_{EP}$ ) ;

$C_{EF}$  : La consommation d'énergie finale ( $kWh_{EF}$ ) ;

$f_p$  : Le coefficient de conversion de l'énergie finale vers l'énergie primaire ;

$P_{e,e}$  : La production électrique exportée ( $kWh$ ).

La valeur de  $C_{EF}$  comprend une composante thermique  $C_t$  et une composante électrique  $C_e$ . La valeur de  $C_t$  est déterminée dans l'équation (81). La valeur de  $C_e$  dépend du scénario envisagé,  $C_e$  correspondant à la quantité d'électricité achetée sur le réseau.  $P_e$  est la production électrique du micro-cogénérateur et  $P_{e,e}$ , la part exportée de l'électricité produite par la micro-cogénérateur. Dans le cas 1,  $C_e = B_e$  et  $P_{e,e} = P_e = 0$ . Dans le cas 2-a,  $C_e = B_e$  car la totalité du besoin est acheté et  $P_e = P_{e,e}$  car la totalité de la production est vendue. Dans le cas 2-b, le déficit en électricité après autoconsommation est comblé par un achat d'électricité sur le réseau ainsi  $C_e = B_e - P_e$  et  $P_{e,e} = 0$ . Dans le cas 2-c, le besoin étant totalement comblé par l'autoconsommation,  $C_e = 0$  et  $P_{e,e} = P_e - B_e$ .

### 1.3.1.2. Bilan énergétique BEPOS

Le bilan énergétique dit BEPOS pour bâtiment « à énergie positive » distingue l'usage d'énergie non renouvelable de l'usage d'énergie renouvelable et favorise l'exportation d'énergie (électricité ou/et chaleur), comme indiqué en Figure 128. Il a été introduit avec la RT2012 [160].

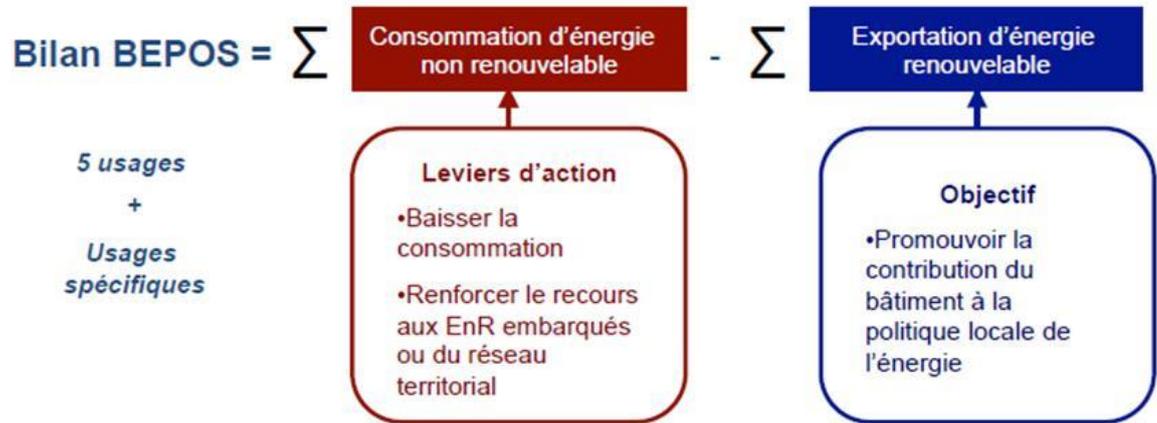


Figure 128 : Intérêt du bilan BEPOS.

### 1.3.1.3. Indicateur de recours aux énergies renouvelables et de récupération (ENRetR)

Enfin, un dernier indicateur est utilisé ici, c'est le recours aux énergies renouvelables et de récupération (RER) [160]. Celui-ci détermine la part d'ENRetR utilisée pour répondre aux besoins du bâtiment.

$$RER = \frac{E_{EP,r}}{C_{EP,nr} + E_{EP,r}} \quad (86)$$

Avec :

$E_{EP,r}$  : Consommation d'énergie renouvelable et de récupération ;

$C_{EP,nr}$  : Consommation d'énergie primaire ni renouvelable, ni de récupération.

Ce bilan permet de mesurer la capacité à augmenter l'utilisation d'ENRetR dans la consommation énergétique pour répondre aux besoins d'énergie.

### 1.3.2. Calcul des indicateurs de performances environnementales liés aux consommations d'énergies

La performance environnementale se traduit par l'impact du mode de consommation d'énergie sur l'environnement dans la durée, de l'extraction jusqu'à la consommation finale de l'énergie. La production locale d'énergie électrique permet d'éviter une partie de ces impacts, elle est donc prise en compte lors de l'étude d'un système de cogénération. Les impacts sur différents critères environnementaux des combustibles sur le cycle de vie sont présentés dans le Tableau 27.

**Tableau 27 : Impact de l'utilisation d'un kWh d'énergies sur le cycle de vie. [160].**

	Impact de la combustion d'un kWh de bois granulés en chaudière	Impact de l'utilisation d'un kWh d'électricité du réseau (éclairage)	Impact de l'utilisation d'un kWh d'électricité du réseau (Autre)	Impacts évités pour un kWh de l'électricité exportée
Réchauffement climatique (kg CO2 eq)	0,027	0,121	0,065	0,082
Epuisement des ressources abiotiques (éléments) (kg Sb eq)	1,20E-07	6,30E-07	5,70E-07	5,90E-07
Epuisement des ressources abiotiques (fossiles) (MJ)	3,70E-01	1,90E+00	9,90E-01	1,30E+00
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq)	2,90E-09	9,10E-08	9,70E-08	9,50E-08
Formation d'ozone photochimique (kg Ethylène eq)	1,20E-05	2,60E-05	1,60E-05	1,90E-05
Acidification des sols et de l'eau (kg SO2 eq)	2,40E-04	5,40E-04	3,40E-04	4,10E-04
Eutrophisation (kg (PO4)3 eq)	7,10E-05	6,90E-05	5,40E-05	5,90E-05
Pollution de l'air (m <sup>3</sup> air)	1,40E+01	4,70E+01	5,00E+01	4,90E+01
Pollution de l'eau (m <sup>3</sup> eau)	3,00E-02	3,00E-02	2,30E-02	2,50E-02

Les données du tableau proviennent du référentiel « énergie-carbone » pour les bâtiments neufs [160]. Ils peuvent être retrouvés sur la base de données INIES [161] qui recense et met à jour les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment. Ces données ont été déterminées par analyse du cycle de vie (ACV) des énergies. L'ACV est utilisée pour faire le détail des effets sur l'environnement d'un produit, procédé ou service du berceau à la tombe. Cette analyse contient un grand nombre d'hypothèses. Les données présentées ne comportent pas la variabilité de chacun des impacts en fonction des incertitudes inhérentes à l'analyse du cycle de vie.

## 2. Résultats et discussion

Les résultats de la mise en situation du micro-cogénérateur fonctionnant avec une turbine à air chaud et aux granulés de bois sont présentés et discutés dans cette partie.

La première partie est consacrée à la présentation des résultats des différents besoins énergétiques (chauffage et électricité), de la consommation en combustible et de la production d'électricité lorsque le micro-cogénérateur est utilisé. Dans la partie suivante est exposé le budget annuel nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques de la maison pour une année et pour chaque cas d'étude. Puis en troisième partie, les résultats des différents indicateurs du bilan thermique sont exprimés pour chaque situation. Enfin, la dernière partie est consacrée au bilan environnemental.

## 2.1. Résultats des besoins, consommation et production d'énergies

Les résultats des besoins énergétiques ont été répartis selon les saisons, dans le Tableau 28.

**Tableau 28 : Besoins énergétiques pour une maison à Epinal utilisant une production de chaleur de 10kW en régime maximal.**

Besoins en énergies thermiques :		
	Hiver	Été
Besoin d'énergie pour le chauffage (kWh/jour)	116,37	0,00
Besoin d'énergie pour l'ECS (kWh/jour) L	5,67	4,62
Besoin total en énergie (kWh/jour)	122,04	4,62
Temps de fonctionnement journalier de la production de chaleur (h) :	12,20	0,46
Volume du ballon tampon (m <sup>3</sup> ) :	1,15	
Besoin en énergie électrique annuel :		
Besoin électrique de la maison (hors chauffage, ECS et Cuisson) (kWh/jour)	13,63	

Ces résultats sont indépendants des différents scénarii, car il s'agit des propriétés de la maison et des besoins électriques d'un ménage de 4 personnes. Le temps de chauffe de 0,46 h soit 28 min pour la production de l'eau chaude sanitaire est assez faible. Il est donc possible de réaliser une chauffe tous les trois jours, pour optimiser le temps de combustion et ainsi la production d'électricité.

Dans le Tableau 29, la consommation et la production d'électricité sont présentées en fonction des saisons mais aussi des différents cas étudiés. La consommation de combustible dans le cas 2 est logiquement supérieure du fait de la production d'électricité.

**Tableau 29 : Consommation, production et besoins énergétiques par saison en fonction du cas pris en compte.**

Consommation et production d'énergie				
	Hiver		Été	
	Chaudière classique	Micro-cogénérateur	Chaudière classique	Micro-cogénérateur
Energie réellement consommée en hiver (kWh/jour)	135,60	154,48	5,13	5,85
Consommation de combustible (kWh)	28747,20	32749,97	785,4	895,57
Production d'électricité (kWh)	0	3930,00	0	107,37
Besoin électrique (kWh)	2889,56		2085,39	

Dans le cas 2, la production d'électricité en hiver est largement supérieure au besoin. S'il y a autoconsommation alors le cas qui se présente est le cas 2-c où la production d'électricité permet de répondre à la totalité du besoin et la quantité d'énergie restante est vendue au réseau. En été c'est le cas 2-b qui prévaut car la quantité d'électricité produite est inférieure au besoin, il sera donc nécessaire d'acheter le complément d'électricité.

## 2.2. Bilan économique

Le bilan économique prend en compte la variation du tarif de reprise de l'électricité en fonction du taux d'autoconsommation. Pour rappel, le tarif C16 est normalement utilisé pour la micro-cogénération gaz, il a été adapté au bois.

**Tableau 30 : Tarification de vente et d'achat d'électricité.**

<b>Condition tarifaire de vente de l'électricité en hiver (période du 1 novembre au 31 mars)</b>	
Pourcentage d'autoconsommation	73,5%
Tarification de reprise C16 modifié pour le bois (vente de toute la production électrique) (€/MWh)	140,38
Tarification de reprise C16 modifié pour le bois (autoconsommation) (€/MWh)	141,38
<b>Condition tarifaire de reprise de l'électricité en été</b>	
Tarification de reprise C16 modifié pour le bois (€/MWh)	30
<b>Achat de l'électricité</b>	
Tarif "Base" de vente de l'électricité par EDF en 2018 (9 kVA) en €/MWh	148,3
Abonnement 2018 (9 kVA) en €/an	125,1
<b>Achat des granulés de bois</b>	
Prix d'achat des granulés (€/MWh)	60

A partir des différentes consommations et en fonction des tarifs de rachat, le budget annuel du foyer pour répondre à ses besoins en énergie est calculé, les résultats sont donnés dans le Tableau 31.

**Tableau 31 : Budget global pour l'énergie du foyer sur une année moyenne.**

<b>Budget énergie</b>	
Utilisation de la chaudière classique (€)	2634,7
Utilisation du micro-cogénérateur avec revente totale de la production (€)	2488,5
Utilisation du micro-cogénérateur avec autoconsommation de l'électricité (€)	2322,2

La micro-cogénération permet une réduction de la facture énergétique du foyer. Si le système d'exploitation choisi est la revente totale de l'électricité produite alors l'économie annuelle est de 146 €/an, et dans le cas d'une autoconsommation elle est de 312 €/an. Une chaudière à granulés de 10 kW coûte environ 7000 € (appareil seul), si l'on considère que la cogénération augmente le prix d'achat de 5000 € (prix cible du module de cogénération), le micro-cogénérateur a un coût total de 12000 €. L'investissement supplémentaire de 5000 € sera donc rentable après 34 ans dans le premier cas et 16 ans dans le deuxième.

D'un point de vue purement financier, l'acquisition d'un micro-cogénérateur demande un lourd investissement avec un retour sur investissement très long. Ce point est surtout dû au faible coût de revente de l'électricité pris en compte dans nos calculs. La période « hivernale » prise en compte par le tarif de revente, 151 jours au lieu de 212 en tenant compte de la saison de chauffe vis-à-vis de la situation géographique de l'habitat, s'avère fortement désavantageuse. Il y a 61 jours où la production d'électricité par le micro-cogénérateur est importante et non valorisée. Si ce tarif est utilisé pour la micro-cogénération aux bois, alors l'autoconsommation est à privilégier. La mise en place d'un tarif attractif, comme celui mis en œuvre avec le photovoltaïque en 2010 avec un tarif de revente 3 fois supérieur à celui d'achat [162], permettrait de réduire le temps de retour sur investissement et de rendre attractif la micro-cogénération aux granulés de bois d'un point de vue économique.

## 2.3. Bilan thermique

Le bilan thermique repose sur trois indicateurs : le bilan d'énergie primaire, le bilan BEPOS et l'utilisation d'énergie renouvelable. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 32.

**Tableau 32 : Indicateurs du bilan thermique pour les différents cas étudiés.**

	Utilisation de la chaudière classique	Utilisation du micro-cogénérateur avec revente totale de la production	Utilisation du micro-cogénérateur avec autoconsommation de l'électricité
Bilan énergétique d'énergie primaire (kWhEP/m <sup>2</sup> /an)	353	354	314
Bilan énergétique BEPOS (kWhEP/m <sup>2</sup> /an)	107	73	34
Indicateur d'utilisation d'énergies renouvelables	70%	72%	87%

Au niveau de la consommation d'énergie primaire, utiliser un micro-cogénérateur dans le but de vendre la totalité de la production n'apporte pas de bénéfice vis-à-vis de l'utilisation d'une chaudière classique, l'autoconsommation permet quant à elle une réduction de 39 kWhEP/m<sup>2</sup>/an.

La cogénération agit positivement sur le bilan BEPOS, ce qui signifie qu'il permet une réduction de l'utilisation des énergies non renouvelable en partageant sa propre production et mieux encore en autoconsommant la part nécessaire à ses besoins.

Enfin, le ratio d'utilisation des ENRetR montre encore une fois que la possibilité d'autoconsommer la production interne d'électricité a un impact positif, cela permet de limiter l'utilisation d'énergies fossiles en favorisant les énergies locales et renouvelables.

Au niveau thermique, l'autoconsommation de l'électricité présente le meilleur bilan.

## 2.4. Bilan environnemental

Les résultats des calculs des impacts sur l'environnement des trois cas étudiés sont présentés dans le Tableau 33.

**Tableau 33 : Résultats des calculs des impacts sur l'environnement sur une année**

	Utilisation de la chaudière classique	Utilisation du micro-cogénérateur avec revente totale de la production	Utilisation du micro-cogénérateur avec autoconsommation de l'électricité
Réchauffement climatique (kg CO2 eq)	1,14E+03	9,24E+02	9,61E+02
Epuisement des ressources abiotiques (éléments) (kg Sb eq)	6,40E-03	4,52E-03	4,56E-03
Epuisement des ressources abiotiques (fossiles) (MJ)	1,62E+04	1,25E+04	1,32E+04
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq)	5,66E-04	1,94E-04	1,90E-04
Formation d'ozone photochimique (kg Ethylene eq)	4,38E-01	4,11E-01	4,17E-01
Acidification des sols et de l'eau (kg SO2 eq)	8,86E+00	8,19E+00	8,35E+00
Eutrophisation (kg (PO4)3 eq)	2,37E+00	2,43E+00	2,44E+00
Pollution de l'air (m <sup>3</sup> air)	6,61E+05	5,21E+05	5,18E+05
Pollution de l'eau (m <sup>3</sup> eau)	1,00E+03	1,03E+03	1,03E+03

L'ensemble des indicateurs utilisés sont expliqués ci-dessous.

Le réchauffement climatique est mesuré en kilogramme équivalent CO<sub>2</sub>. Cette unité permet de regrouper l'ensemble des molécules intervenant dans le réchauffement climatique, par exemple un kilogramme de méthane équivaut à 25 kg CO<sub>2</sub> eq car il est 25 fois plus nocif pour l'effet de serre que le CO<sub>2</sub> pour un potentiel de réchauffement global (PRG) à 100 ans.

L'épuisement des ressources naturelles est divisé en deux sous parties, l'épuisement des ressources abiotiques non renouvelables et non énergétiques (cuivre, zinc, aluminium, ...) et l'épuisement des ressources abiotiques non renouvelables énergétiques (gaz, lignite, pétrole, charbon, ...). Dans le premier indice, l'antimoine est utilisé comme indice, c'est une ressource considérée comme épuisable à l'échelle humaine et a une valeur de 1 par convention. Dans le second, l'épuisement des ressources est évalué en MJ, unité de l'énergie.

L'indicateur d'appauvrissement de la couche d'ozone évalue les émissions dans l'air de composés susceptibles de dégrader les molécules d'ozone de la stratosphère qui filtrent les rayons ultraviolets dangereux pour l'homme (UV-B). L'unité de mesure est le kilogramme équivalent trichlorofluorométhane (CFC 11).

La formation d'ozone photochimique évalue les émissions dans l'air de composés susceptibles de participer à la formation d'ozone troposphérique, zone de l'atmosphère où nous vivons. L'ozone est un gaz dangereux et irritant pour les voies respiratoires. Les composés organiques volatils (COV) font partie des composés à risques. L'unité de mesure est le kilogramme équivalent éthène (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>).

L'acidification des sols et de l'eau permet d'évaluer l'importance des émissions pouvant se transformer en acide pour se retrouver dans l'eau et le sol après lessivage. Ceci a pour conséquence la dégradation des milieux et conduit à des impacts sur la faune et la flore. Les principaux contributeurs sont le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), l'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) et l'ammoniac (NH<sub>3</sub>). L'unité utilisée est le kilogramme équivalent SO<sub>2</sub>.

L'eutrophisation de l'eau est la diminution de la quantité d'oxygène contenu dans l'eau, la conséquence la plus radicale est la disparition de l'écosystème. L'impact est évalué en prenant en compte les substances qui augmentent le risque de prolifération d'algues et d'espèces aquatiques dans l'eau qui vont par leur respiration et leur dégradation entraîner l'eutrophisation de l'eau. Le phosphate ((PO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup>) est utilisé comme référence.

Enfin, l'évaluation des impacts des émissions sur la pollution de l'eau et de l'air est évaluée par le nombre de m<sup>3</sup> nécessaire pour diluer la pollution générée afin que celle-ci soit sans risque pour l'environnement.

Il existe des variations très faibles (<5%) entre les scénarii d'utilisation du micro-cogénérateur. Elles ne permettent pas de conclure sur l'apport de la méthode de gestion de l'électricité sur l'environnement. La chaudière classique à granulés sert de point de référence pour la comparaison. Les résultats montrent que l'utilisation du micro-cogénérateur semble bénéfique pour l'environnement, notamment au niveau de l'appauvrissement de la couche d'ozone avec une diminution de 66%. Il peut être noté des améliorations au niveau de l'épuisement des ressources abiotiques (- 29% et - 20%), au niveau de la pollution de l'air (- 21%) et du réchauffement