

Filière Systèmes industriels

Orientation Power and Control

Diplôme 2008

Jérémie Mayor

*Flexibilisation de
la consommation de
l'énergie électrique*

Professeur

Michel Bonvin

Expert

Gaëtan Cherix

Confidentiel / Vertraulich

☐ oui / ja ☒ non / nein

FSI FTV	Année académique / Studienjahr 2007/2008	No PS / Nr. PS pc/2008/34
Commandant / Auftraggeber HES—SO Valais Industrie Ecole hôte	Etudiant / Student Jérémie Mayor	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Ecole hôte
Professeur / Dozent Michel Bonvin	Expert / Experte (données complètes) Gaëtan Cherix - CREM Martigny	

Nom / Titel

Flexibilisation de la consommation de l'énergie électrique - EFlex

Description et Objectifs / Beschreibung und Ziele

Dans la problématique de la consommation d'énergie électrique telle qu'elle va probablement se développer dans les années qui viennent, il va être proposé au consommateur de faire preuve d'une certaine flexibilité en échangeant certains avantages. Le projet EFlex souhaite avancer ou retarder une partie de la consommation électrique en fonction de déterminer quelles demandes des consommateurs industriels ou domestiques présentent une certaine flexibilité et de qualifier et quantifier cette flexibilité. Parmi des charges pouvant offrir une certaine flexibilité, on peut penser à une machine à laver le linge, qui doit avoir effectué son travail pour le lendemain matin, sans que l'heure de l'acte du début de l'opération soit vraiment contraignante; on peut aussi penser à une pompe à chaleur qui doit assurer le chauffage d'une maison, et qui peut très bien anticiper ou différer son enclenchement de quelques heures suivant la situation de charge ou de disponibilité du réseau électrique.

L'objectif du travail de diplôme est de :

Identifier les consommateurs électriques, de type domestiques ou industriels, qui peuvent offrir une certaine flexibilité

Qualifier et de quantifier cette flexibilité

Présenter quelques configurations possibles censées mettre en évidence la flexibilité qu'un parc de consommateurs peut offrir pour gérer la production capricieuse de différents producteurs d'électricité renouvelable (photovoltaïque ou éolien).

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum

Rep. de la filière
Pratiquer des Studieng.

.....

Etudiant/Student:

.....

Délais / Termine

Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags:
01.09.2008

Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts:
21.11.2008, 12:00

Exposition publique / Ausstellung Diplomarbeiten:
28.11.2008

Défense orale / Mündliche Verfechtung:
semaine/Woche 49

Flexibilisation de la consommation d'énergie électrique - EFlex

Flexibilisation des Verbräuche von der Elektroenergie - EFlex

Objectif

Le but de ce travail de diplôme est l'identification de consommateurs électriques, de type domestiques ou industriels, qui peuvent offrir une certaine flexibilité. Par la suite, il faut quantifier et qualifier cette flexibilité. Pour diminuer encore plus cette consommation, des panneaux photovoltaïques peuvent être disposés sur chaque bâtiment selon leur envie. Finalement les simulations apporteront leur verdict.

Résultats

Le système EFlex permet au client de bénéficier de gains économiques non négligeables. Par contre on doit faire face à une légère surconsommation. Les distributeurs d'énergie verront une diminution de la demande d'énergie pendant les heures de pointes. EFlex va dans la bonne direction en ce qui concerne la flexibilisation mais il faut encore d'avantage améliorer le système pour être encore plus performant.

Mots-clés

Flexibilisation, distributeurs d'énergie, charge du réseau, consommation, gains économiques, surconsommation, consigne variable

Ziel

Das Ziel dieser Diplomarbeit besteht darin, häusliche oder gewerbliche elektrische Verbraucher zu identifizieren, die eine gewisse Gebrauchs-Flexibilität bieten. Danach muss diese Flexibilität quantifiziert und qualifiziert werden. Um dessen Verbrauch noch mehr zu vermindern, können nach Bedarf Fotovoltaische Solarzellen auf den Gebäuden installiert werden. Schließlich werden Simulationen das Urteil fällen.

Resultate

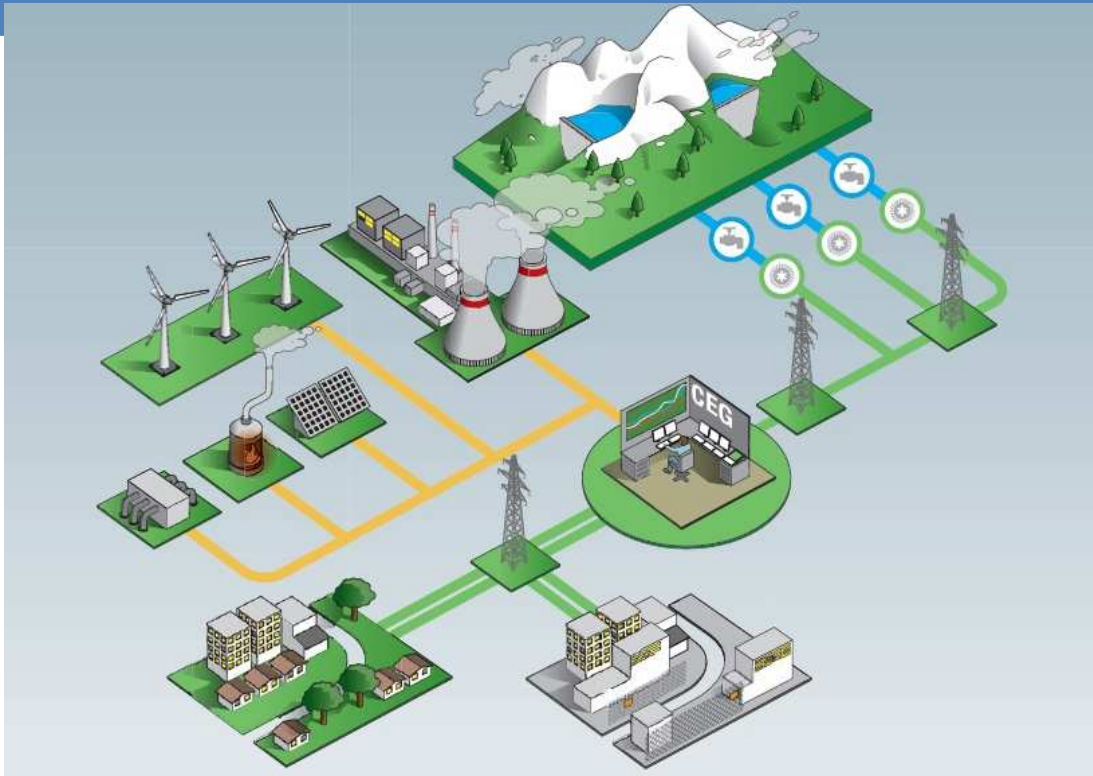
Das EFlex-System ermöglicht dem Kunden beträchtliche wirtschaftliche Gewinne zu bringen. Andererseits wird der Verbrauch leicht angehoben. Die Energieversorger werden eine Verminderung der Energienachfrage während der Höchstlast-Stunden bemerken. EFlex geht in die gute Richtung bezüglich der Flexibilisation, aber man muss das System noch verbessern, um es noch leistungsfähiger zu machen.

Schlüsselwörter

Flexibilisation, Energieversorger, Belastung des Netzes, Verbrauch, wirtschaftliche Gewinne, übermäßiger Konsum, veränderliche Anweisungen

TRAVAIL DE DIPLÔME

EFLEX



SION, LE 21 NOVEMBRE 2008

DIPLÔMANT	:	JÉRÉMIE MAYOR
SECTION	:	POWER CONTROL
PROFESSEUR	:	MICHEL BONVIN
EXPERT	:	GAËTAN CHERIX

TABLE DES MATIÈRES

1	EFlex	4
1.1	Description	4
1.2	Objectifs	4
2	Généralités	5
2.1	Charge du réseau.....	5
3	1 ^{ère} Catégorie : Systèmes thermiques	7
3.1	Chauffage à l'aide de pompes à chaleur (PAC)	7
3.1.1	Fonctionnement	7
3.1.2	Dimensions des habitations considérées	8
3.1.3	Données initiales	9
3.1.4	Variable ΔT_c	9
3.1.5	Calculs des caractéristiques des bâtiments.....	10
3.1.6	Formules des paramètres physiques.....	12
3.2	Chauffe eau	15
3.2.1	Dimensions des chauffe eau	15
3.2.2	Données initiales	15
3.2.3	Calculs des caractéristiques des chauffe-eau.....	16
3.2.4	Programme de soutirage.....	17
3.2.5	Formules des paramètres physique	18
3.3	Congélateur	19
3.3.1	Dimensions des congélateurs.....	19
3.3.2	Données initiales	19
3.3.3	Calculs des caractéristiques des congélateurs	20
3.3.4	Formules des paramètres physique	21
3.3.5	Programme de soutirage.....	22
3.4	Entrepôt frigorifique et cave a vin.....	23
3.4.1	Dimensions	23
3.4.2	Données initiales	23
3.4.3	Calculs des caractéristiques des entrepôts et des caves à vins.....	24
3.4.4	Formules des paramètres physique	25
3.4.5	Programme de soutirage des entrepôts	26
3.4.6	Programme de soutirage des caves à vin.....	27
3.5	Température de consigne adaptable à la charge du réseau	28
4	Appareils à démarrage différé	29
4.1	L'Electroménager	29



5	Tarifs & Gains	30
5.1	Economie	30
5.1.1	Tarifs	30
5.2	Gains	30
5.2.1	Gains de puissance	31
5.2.2	Gains économiques	31
6	Simulations	32
6.1	Analyse de la Pompe à chaleur	32
6.1.1	Constatations	33
6.2	Analyse du Chauffe eau	34
6.2.1	Constatations	34
6.3	Analyse du Congélateur	35
6.3.1	Constatations	35
6.4	Analyse entrepôts frigorifiques et caves à vin	36
6.4.1	Constatations	36
6.5	Analyse de l'électroménager	37
6.5.1	Constatations	37
7	Le biotope considéré	38
8	Adaptations	39
9	Conclusion	39
10	Annexes	40
11	Bibliographie : sites de référence	41
11.1	Sites de références	41
11.2	Références e-mail	41



1 EFLEX

1.1 DESCRIPTION

C'est un fait, la consommation d'énergie électrique ne cesse d'augmenter. Le développement de certaines régions, met à rude d'épreuve les distributeurs d'énergie. Les possibilités de production d'énergie électrique ne sont pas infinies. Les travaux nécessaires pour l'agrandissement des axes de transport coûtent des sommes astronomiques. Vu la problématique de la consommation d'énergie électrique et son développement dans les années à venir, le consommateur aura avantage à faire preuve de flexibilité en échange de certains avantages.

Le projet EFLEX souhaite avancer ou retarder une partie de la consommation électrique : il s'agit de déterminer si la demande des consommateurs industriels ou domestiques présente une certaine flexibilité en qualifiant et quantifiant cette flexibilité.

1.2 OBJECTIFS

L'objectif de ce travail est d'identifier les consommateurs électriques offrant une flexibilité quant au déplacement partiel de leur consommation dans les périodes creuses.

Il en résulte deux catégories principales : les systèmes thermiques électriques et les consommateurs pour lesquels le départ du processus peut être différé dans le temps. La catégorie des systèmes thermiques permet une adaptation de la température de consigne selon la charge du réseau, ce qui signifie qu'on peut prendre de la réserve dans les moments creux, typiquement la nuit. Ce type de dispositif permet donc une diminution de la demande d'énergie dans les moments saturés tout en gardant un excellent confort. La catégorie consommateurs avec départ différé offre la possibilité de retarder le début du cycle en attendant le moment propice afin d'éviter de fonctionner durant les heures de pointe. A noter que dans cette deuxième catégorie le temps de cycle ainsi que la puissance utile restent identiques par rapport au fonctionnement d'aujourd'hui.

Dès lors, la quantification de la consommation de différents appareils de chaque catégorie peut être simulée.

Le but final est de réaliser une habitation familiale et de pouvoir quantifier les gains économiques et énergétiques qu'un pilotage optimal de ces appareils offre, en tenant compte de l'apport d'éventuelles sources d'énergie renouvelable (vent, soleil,...).

21 novembre 2008



2 GÉNÉRALITÉS

Afin de comprendre dans les meilleures conditions ce travail EFlex, la notion charge du réseau est extrêmement importante car elle joue le rôle de « meneur de jeu ».

2.1 CHARGE DU RÉSEAU

A titre d'exemple la courbe de charge de l'entreprise EOS a été étudiée, on aurait pu prendre une courbe de charge d'un autre distributeur. Cette courbe a permis d'obtenir une variable charge du réseau « CR » qui oscille entre 0 et 1 selon la saturation du distributeur d'énergie. La courbe ci-dessous indique la charge selon la saison hiver ou été. Les mesures sont principalement observées le mercredi afin de ne pas être perturbées par les effets du week-end. Une interpolation entre ces deux courbes a permis d'acquérir les consommations mensuelles des différents mois de l'année en fixant la courbe hiver pour janvier et la seconde pour juillet.

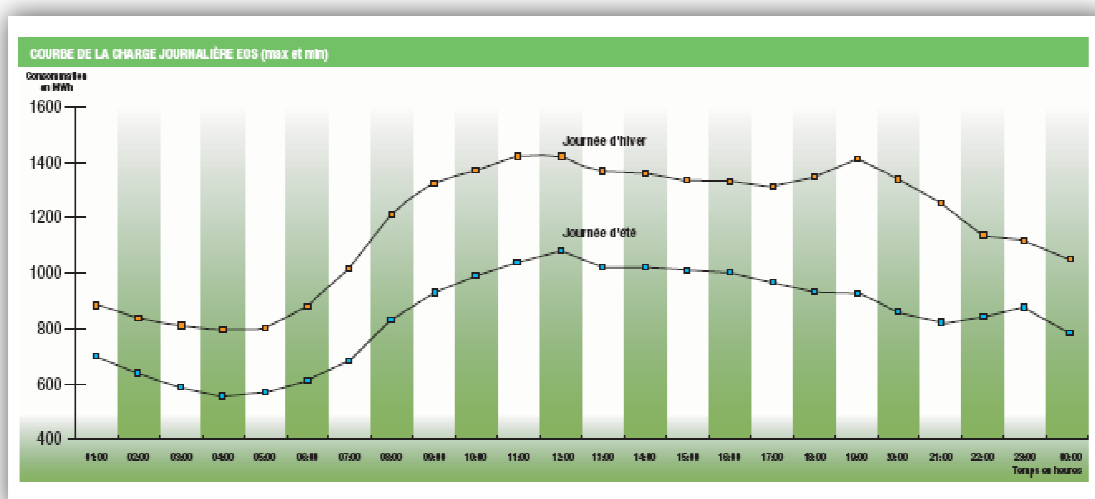


Figure 2.1 : Consommation selon EOS

- Réseau chargé
- Réseau moyennement chargé
- Réseau peu chargé

CR = 1

CR = 0.5

CR = 0



Pour la conception de la courbe « Charge du réseau », il a fallu assigner à la plus haute consommation de la courbe d'EOS une valeur de 1 et une valeur de 0 à la plus faible consommation. Maintenant la courbe « Charge du réseau » permet la simulation de la consommation de divers types d'appareils thermiques. La variable CR varie uniquement selon l'heure du jour et le mois de l'année et ne tient donc pas compte des effets de week-end ni de ceux des jours fériés.

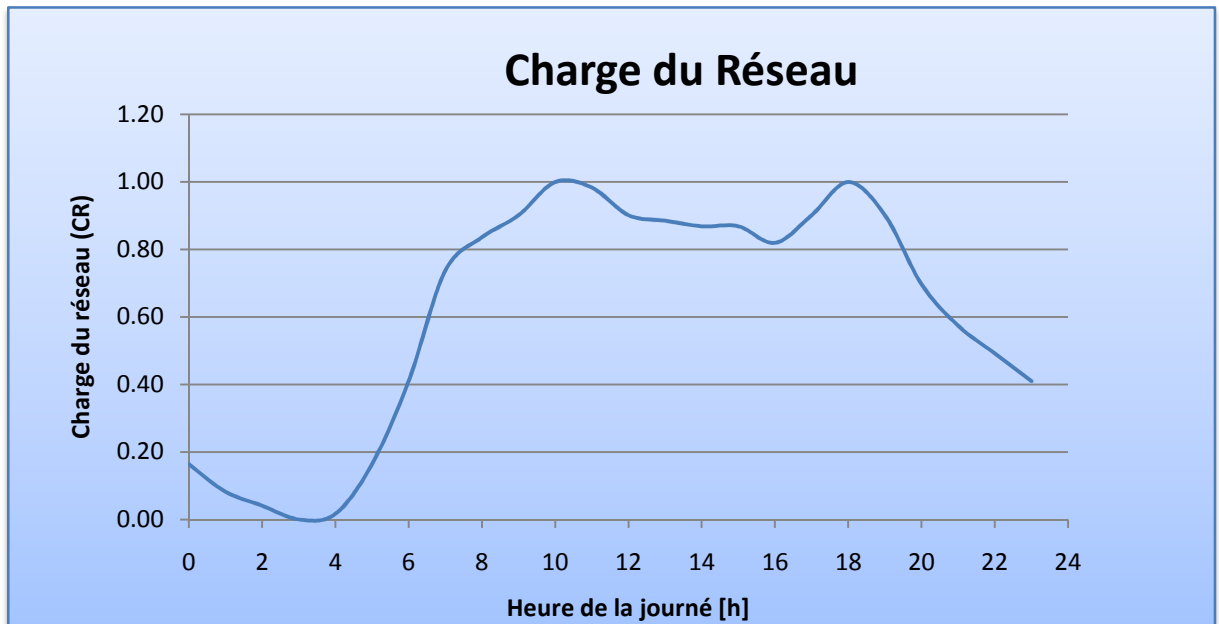


Figure 2.2 : Exemple de la variable CR

L'interpolation de la consommation d'énergie selon EOS sur douze mois, permet d'obtenir une variable CR propre à chaque mois de l'année.

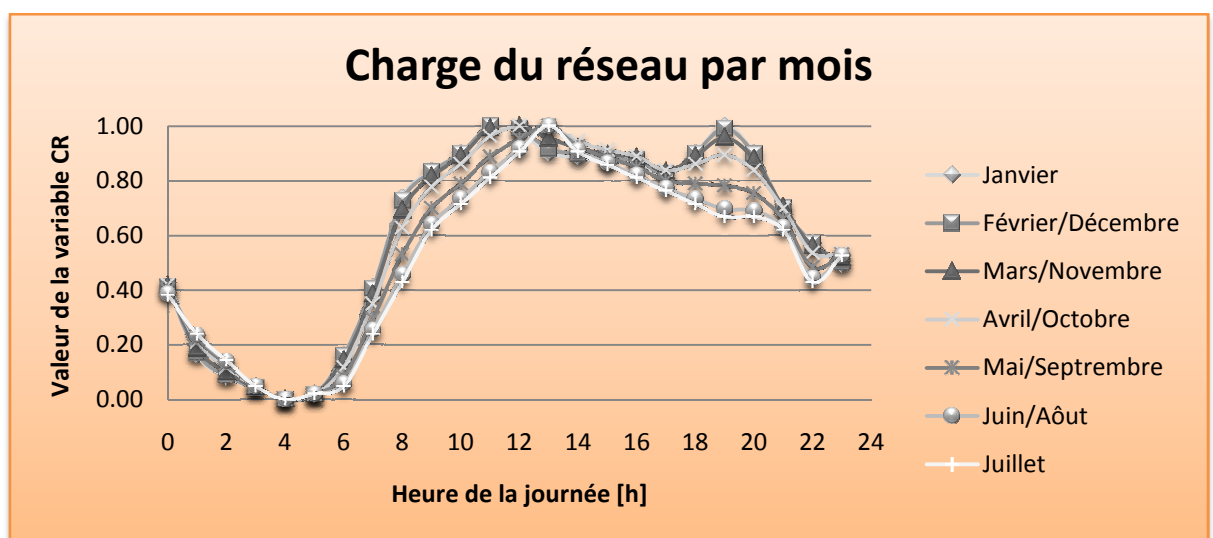


Figure 2.3 : Variable CR propre à chaque mois

21 novembre 2008



3 1^{ÈRE} CATÉGORIE : SYSTÈMES THERMIQUES

Les systèmes thermiques électriques offrent la liberté d'adapter la température de consigne en fonction de la disponibilité du réseau. Tous les dispositifs de ce genre possédant des pertes importantes ne sont pas considérés dans cette étude, car ces pertes limitent énormément la flexibilité de fonctionnement avec une consigne variable (p ex. appareils frigorifiques disponible dans les grandes surfaces commerciales).

3.1 CHAUFFAGE A L'AIDE DE POMPES A CHALEUR (PAC)

Etudions la consommation d'une pompe à chaleur pour une maison ou un immeuble. Ce système PAC est étudié pour différents types d'habitations. On distingue dans ce travail 3 catégories de systèmes selon l'année de construction de la maison:

- ✓ < 1980
- ✓ 1980 <...< 2000
- ✓ > 2000

3.1.1 FONCTIONNEMENT

Le système modélisé fonctionne de la manière suivante : la température intérieure de la maison varie selon les gains solaires, les gains internes, la température extérieure ainsi que de la puissance de chauffage. Lorsqu'au début d'une heure, la température intérieure est supérieure à la température de consigne, le chauffage n'est pas sollicité durant cette période. Au contraire si la température intérieure est inférieure à la température de consigne, le chauffage doit combler cette différence de température pendant l'heure qui suit. Dès que la température intérieure devient supérieure à la température de consigne des stores, les stores se baissent automatiquement, dans le cas contraire ils restent en position ouverte. La température de consigne varie entre un minimum et un maximum. Lorsque le réseau est chargé, la température de consigne est vue à la baisse, ce qui signifie que le chauffage fonctionnera moins à tarif élevé. Pendant les périodes creuses, la température de consigne sera vue à la hausse. Le tarif, lui, sera nettement diminué dans les heures creuses. Le prix de l'énergie électrique nécessaire au chauffage varie entre un minimum et un maximum selon la charge du réseau afin d'inciter le consommateur à utiliser l'énergie électrique dans les périodes de bas tarif. Les simulations effectuées tiennent compte du coefficient de performance (COP) de la PAC (COP≈3). En conclusion, les personnes flexibles auront une facture annuelle légèrement diminuée au contraire des personnes qui ne désirent pas donner un peu plus de liberté aux distributeurs d'électricité.

21 novembre 2008



3.1.2 DIMENSIONS DES HABITATIONS CONSIDEREES

- Maison : $L \cdot l \cdot h = 10 \cdot 10 \cdot 6$ Surface des fenêtres : 30% au sud
10% au nord
15% à l'est et l'ouest
- Immeuble : $L \cdot l \cdot h = 36 \cdot 14 \cdot 11.2$

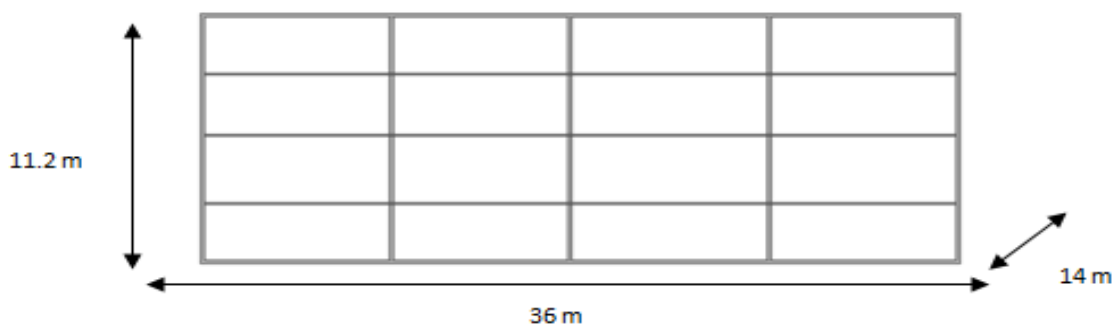


Figure 3.1 : Vue de l'immeuble

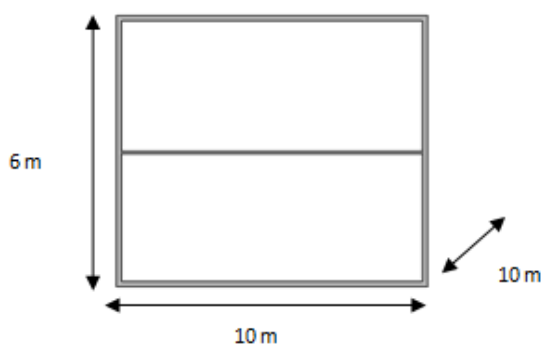


Figure 3.2 : Vue de la maison

Surface murs extérieurs + intérieurs	: 240 m ² / 1590 m ²
Surface des chapes	: 200 m ² / 2016 m ²
Surface du toit	: 100 m ² / 504 m ²
Surface vitrée	: 42 m ² / 248 m ²
Surface des parties opaques	: 498 m ² / 3861 m ²

	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ masse volumique	$c \left[\frac{J}{K \cdot kg} \right]$ chaleur massique	$\lambda \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$ conductivité thermique	$e [m]$ profondeur de pénétration
Sol : Chapes	2200	1100	1.5	0.07
Toits : Béton	2400	1100	1.8	0.12
Murs ext. + int. : BTC ¹	1100	900	0.44	0.06

Figure 3.3 : Caractéristiques des matériaux utilisés

¹ BTC : Briques en Terre Cuite



3.1.3 DONNEES INITIALES

La modélisation et la simulation ont été effectuées d'après les données qui se trouvent dans le tableau ci-dessous. La température extérieure provient de la base de données METEONORM pour la ville de Sion.

Température intérieure	T_i	20	[°C]
Température de consigne variable max	T_{c_max}	21	[°C]
Température de consigne variable min	T_{c_min}	19	[°C]
Température extérieure	T_e	-	[°C]
Pas de calcul	Δt	3600	[s]
Différence de température entre T_c max et T_c min	ΔT_c	2	[°C]
Température pour la descente des stores	T_s	23	[°C]
Transmission énergétique du vitrage	g_f	0.6	[-]
Transmission énergétique des stores	g_s	0.15	[-]

Tableau 3.4 : Données pour la simulation

3.1.4 VARIABLE ΔT_c

La variable ΔT_c correspond à la différence de température entre la température de consigne maximum et la température de consigne minimum.

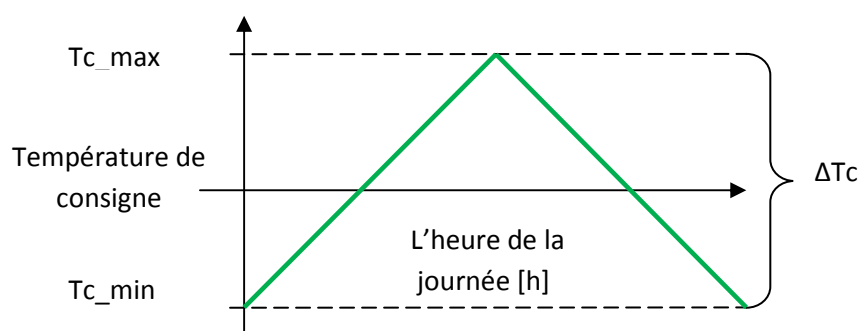


Figure 3.5 : Variation possible de la température de consigne



3.1.5 CALCULS DES CARACTERISTIQUES DES BATIMENTS

▪ Coefficient de la capacité calorifique

$$C = c \cdot m = c \cdot S \cdot e \cdot \rho$$

S : Surface du matériau [m^2]

c : Chaleur massique [$\frac{J}{kg \cdot K}$]

e : Profondeur de pénétration [m]

ρ : Masse volumique [$\frac{kg}{m^3}$]

$$C_{\text{béton}} = 1100 \cdot 100(504) \cdot 0.12 \cdot 2400 = 3.17E7 \frac{J}{K} / 1.6E8 \frac{J}{K}$$

$$C_{\text{chape}} = 1100 \cdot 200(2016) \cdot 0.07 \cdot 2200 = 3.39E7 \frac{J}{K} / 3.41E8 \frac{J}{K}$$

$$C_{BTC} = 900 \cdot 240(2632) \cdot 0.06 \cdot 1100 = 1.43E7 \frac{J}{K} / 5.95E7 \frac{J}{K}$$

$$C_{\text{totale}} = C_{\text{béton}} + C_{\text{chape}} + C_{BTC} = 7.9E7 \frac{J}{K} / 5.95E8 \frac{J}{K}$$

▪ Coefficient des déperditions spécifiques

Coefficients de transmission thermique

	<1980	1980<...<2000	>2000
U fenêtres [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]	3	2	1.3
U béton [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]	0.7	0.4	0.2
U chapes [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]	0.76	0.66	0.56
U BTC [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]	0.41	0.31	0.21

Tableau 3.6 : Coefficients de transmission thermique

A l'aide des coefficients de transmission thermique il est enfin possible de connaître les coefficients des déperditions spécifiques.

$$H_{TOT} = H_{\text{fenêtres}} + H_{\text{béton}} + H_{BTC} + H_{\text{chapes}} + H_{\text{renouvellement air}}$$

$$H_{\text{renouvellement air}} = c_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot Q_{\text{air}} = 1200 \cdot 1.2 \cdot \frac{80}{3600} = 32 \frac{W}{K} / 320 \frac{W}{K}$$



Ce coefficient caractérisant le renouvellement d'air est identique quelle que soit l'année de construction du bâtiment.

$$\left. \begin{aligned} H_{\text{béton}<1980} &= U_{\text{béton}<1980} \cdot S_{\text{béton}} \\ H_{\text{BTC}<1980} &= U_{\text{BTC}<1980} \cdot S_{\text{BTC}} \\ H_{\text{chape}<1980} &= U_{\text{chape}<1980} \cdot S_{\text{chape}} \\ H_{\text{fenêtre}<1980} &= U_{\text{fenêtre}<1980} \cdot S_{\text{fenêtre}} \end{aligned} \right\} H_{\text{total}} = 446 \frac{\text{W}}{\text{K}} / 3283 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$\left. \begin{aligned} H_{\text{béton}_{1980<\dots<2000}} &= U_{\text{béton}_{1980<\dots<2000}} \cdot S_{\text{béton}} \\ H_{\text{BTC}_{1980<\dots<2000}} &= U_{\text{BTC}_{1980<\dots<2000}} \cdot S_{\text{BTC}} \\ H_{\text{chape}_{1980<\dots<2000}} &= U_{\text{chape}_{1980<\dots<2000}} \cdot S_{\text{chape}} \\ H_{\text{fenêtre}_{1980<\dots<2000}} &= U_{\text{fenêtre}_{1980<\dots<2000}} \cdot S_{\text{fenêtre}} \end{aligned} \right\} H_{\text{totale}} = 330 \frac{\text{W}}{\text{K}} / 2522 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$\left. \begin{aligned} H_{\text{béton}>2000} &= U_{\text{béton}>2000} \cdot S_{\text{béton}} \\ H_{\text{BTC}>2000} &= U_{\text{BTC}>2000} \cdot S_{\text{BTC}} \\ H_{\text{chape}>2000} &= U_{\text{chape}>2000} \cdot S_{\text{béton}} \\ H_{\text{fenêtre}>2000} &= U_{\text{fenêtre}>2000} \cdot S_{\text{béton}} \end{aligned} \right\} H_{\text{totale}} = 237 \frac{\text{W}}{\text{K}} / 1886 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Ce tableau récapitule les caractéristiques des bâtiments. Le coefficient des déperditions spécifiques prend en compte le renouvellement d'air.

	Maison		Immeuble	
	C [J/K]	H _{TOT} [W/K]	C [J/K]	H _{TOT} [W/K]
< 1980	7.9E7	478	5.95E8	3603
1980 <...< 2000	7.9E7	362	5.95E8	2842
> 2000	7.9E7	269	5.95E8	2206

Tableau 3.7 Caractéristiques des bâtiments

21 novembre 2008



3.1.6 FORMULES DES PARAMÈTRES PHYSIQUES

- ✓ Température intérieure au temps p :

$$T^p = T_i^{p-1} + \frac{\Delta t}{C} \cdot \underbrace{[(G_s^{p-1} \cdot g_f + G_i^{p-1})]}_{\text{Gains solaires et internes}} + \frac{\Delta t \cdot H}{C} \cdot \underbrace{(T_e^{p-1} - T_i^{p-1})}_{\text{Déperditions spécifiques}} + \frac{\Delta t}{C} \cdot \underbrace{P_{CH}^{p-1}}_{\text{Apport chauffage}}$$

G_s^{p-1} : $G \left[\frac{W}{m^2} \right] \cdot A_F [m^2] \rightarrow$ Gain dû au rayonnement solaire [W]

G_i^{p-1} : Gain dû aux sources internes du bâtiment [W]

g_f : Transmission énergétique des vitrages

- ✓ Puissance de chauffage au temps p :

SI $T_i^{p-1} < T_{\text{consigne}}$

$$P_{CH} = \frac{C \cdot (T_{c(CR)-reel} - T_i^{p-1})}{\Delta t} + \text{ABS}((H \cdot (T_e^{p-1} - T_i^{p-1}) + G_s^{p-1} \cdot g_f + G_i^{p-1}))$$

SINON $P_{CH} = 0$

Les températures extérieures ainsi que les gains solaires ont été donnés par la base de données météorologiques de METEONORM pour la ville de Sion.



- ✓ Température extérieure au temps p :

Modélisation avec les données météorologiques

La courbe d'été et d'hiver représentent la consommation selon la saison. Ces valeurs ont été extraites de la base de données METEONORM pour la ville de Sion.

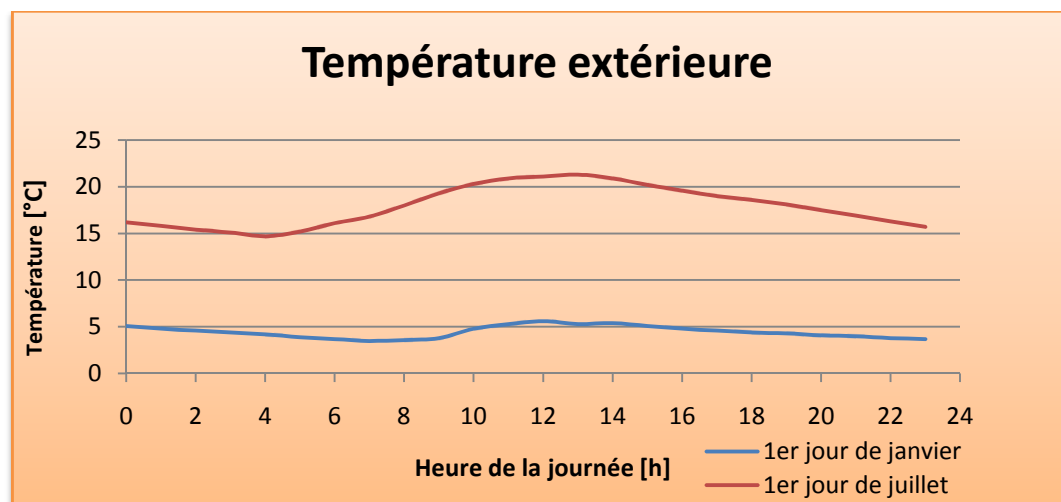


Figure 3.8 : Température extérieure selon mesures météorologiques

- ✓ Gains solaire au temps p :

Modélisation avec les données météorologiques

Les gains solaires proviennent de la même base de données METEONORM pour la ville de Sion.

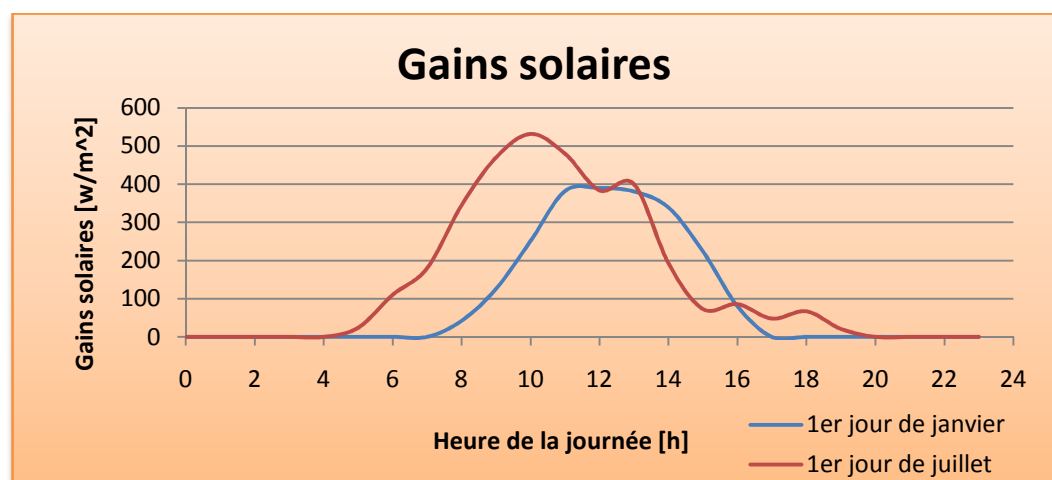


Figure 3.9 : Gains solaires selon mesures météorologiques

✓ Température de consigne au temps p:

Pour un fonctionnement laissant d'avantage de flexibilité au distributeur d'énergie, une température de consigne est mise à jour chaque heure en fonction de la disponibilité du réseau.

$$T_c^p = T_{c_max} - (CR \cdot \Delta T_c)$$

Pour un $\Delta T_c = 2^\circ\text{C}$, $T_{c_max} = 21$ et $CR = 1$, la température de consigne est de 19°C . Dans le cas où $CR = 0$, la température de consigne sera de 21°C .

A noter que si la température intérieure du bâtiment dépasse une limite réglée au préalable, les stores descendent automatiquement. Dans cette situation, les gains solaires sont aussi multipliés par la transmission énergétique des stores : $g = 0.15$.



3.2 CHAUFFE EAU

Le fonctionnement du chauffe eau électrique est semblable à celui de la pompe à chaleur d'un bâtiment. Pour cette simulation deux grandeurs de boiler ont été considérés.

3.2.1 DIMENSIONS DES CHAUFFES EAU

- Boiler 180l : $L \cdot l \cdot h = 0.3 \cdot 0.3 \cdot 2$ Surface extérieure = 2.58 m^2
- Boiler 320l : $L \cdot l \cdot h = 0.4 \cdot 0.4 \cdot 2$ Surface extérieure = 3.52 m^2

3.2.2 DONNEES INITIALES

La modélisation et la simulation ont été effectuées d'après les données qui se trouvent dans le tableau ci-dessous.

Température intérieure	T_i	55	[°C]
Température de consigne variable max	T_{c_max}	60	[°C]
Température de consigne variable min	T_{c_min}	50	[°C]
Température extérieure	T_e	20	[°C]
Pas de calcul	Δt	3600	[s]
Différence de température entre T_{c_max} et T_{c_min}	ΔT_c	10	[°C]

Tableau 3.10 : Données pour la simulation



3.2.3 CALCULS DES CARACTERISTIQUES DES CHAUFFE-EAU

▪ Capacité calorifique

$$C = c \cdot m$$

$$\begin{aligned} C_{\text{eau}} &: \text{Chaleur massique de l'eau} &: 4200 \frac{J}{K \cdot kg} \\ m &: \text{Capacité du boiler} &: 180 \text{ kg} / 320 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$C = 7.56E5 \frac{J}{K} / 1.34E6 \frac{J}{K}$$

▪ Coefficient des déperditions spécifiques

Coefficients de transmission thermique

$$U_{\text{Total}} = \frac{1}{\frac{1}{H_{\text{ext}}} + \frac{d}{\lambda}}$$

$$\begin{aligned} H_{\text{ext}} &: \text{Coefficients de transfert de chaleur surfacique} &: 8 \frac{W}{K \cdot m^2} \\ d &: \text{Epaisseur du côté du boiler} &: 10 \text{ cm} \\ \lambda &: \text{Conductivité thermique du matériau utilisé} &: 0.04 \frac{W}{K \cdot m} \end{aligned}$$

$$U_{\text{Total}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0.1}{0.04}} = 0.38 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

A l'aide du coefficient de transmission thermique il est enfin possible de déterminer les coefficients des déperditions spécifiques.

$$H_0 = S \cdot U_{\text{Total}} = 0.98 \frac{W}{K} / 1.34 \frac{W}{K}$$

Chauffe eau 200l		Chauffe eau 300l	
C [J/K]	H [W/K]	C [J/K]	H [W/K]
7.56E5	H ₀ =0.98	1.34E6	H ₀ =1.34

Tableau 3.11 : Caractéristiques des chauffe-eaux



3.2.4 PROGRAMME DE SOUTIRAGE

Le programme de soutirage des boilers a été choisi de la manière suivante afin d'être le plus fidèle à la réalité. Une plus grande quantité d'eau chaude est utilisée vers les 7h00 du matin et aux alentours de 18h00. Pour simuler cette demande d'eau chaude, on fait varier le coefficient de transmission thermique selon le principe exposé ci-dessous.

- ✓ Variation du coefficient de transmission thermique

$$P = \frac{m \cdot \rho \cdot (T_c - T_{eau})}{\Delta t}$$

$$\Delta H = \frac{P}{T_c - T_{eau}}$$

Avec

$$\rho_{massique_eau} = 4200 \frac{J}{kg}$$

$$\Delta t = 3600s$$

$$T_c = 55^\circ C \text{ et } T_{eau} = 10$$

$$m = 50kg / 100kg$$

Donc

$$\Delta H = 58.3 \frac{W}{K} / 116.7 \frac{W}{K}$$

La valeur T_c correspond à la température de consigne moyenne de la journée. On considère une demande maximum d'eau chaude de 50 litres pour le plus petit boiler et de 100 litres pour le plus grand boiler pendant les heures de pointes. Entre 8h00 et 17h00 la demande est moins importante. Tandis que pendant la nuit, la demande est inexistante, il y a donc plus que h_0 . Le coefficient de transmission thermique varie de 0.98 W/K à 59.3 W/K ($H_0 + \Delta H$) pour le premier boiler et de 1.34 W/K à 118 W/K ($H_0 + \Delta H$) pour le second.

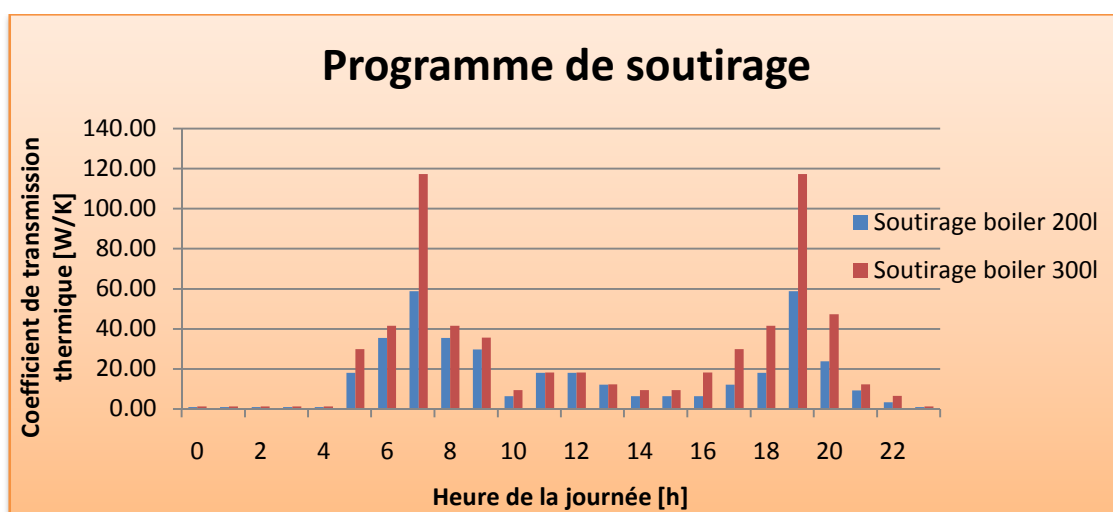


Figure 3.12 : Déperditions effectives



3.2.5 FORMULES DES PARAMÈTRES PHYSIQUE

- ✓ Température intérieure au temps p :

$$T^p = T_i^{p-1} + \frac{\Delta t \cdot H}{C} \cdot \underbrace{(T_e^{p-1} - T_i^{p-1})}_{\text{Déperditions spécifiques}} + \frac{\Delta t}{C} \cdot \underbrace{P_{CH}^{p-1}}_{\text{Puissance de chauffage}}$$

- ✓ Puissance de chauffage sur une heure au temps p :

$$Q = c \cdot m \cdot (T_c - T_{eau})$$
$$P_{CH} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{Q}{3600}$$

- ✓ Température de consigne au temps p :

Pour un fonctionnement laissant d'avantage de flexibilité au distributeur d'énergie, une température de consigne est mise à jour chaque heure en fonction de la disponibilité du réseau.

$$T_c^p = T_{c_max} - (CR \cdot \Delta T_c)$$

Pour un $\Delta T_c = 10^\circ\text{C}$, $T_{c_max} = 60$ et $CR = 1$, la température de consigne est de 50°C . Dans le cas où $CR = 0$, la température de consigne sera de 60°C .



3.3 CONGELATEUR

Le fonctionnement du congélateur est semblable à celui de la pompe à chaleur et du chauffe eau expliqué auparavant. Pour cette simulation deux grandeurs de congélateur ont été retenus.

3.3.1 DIMENSIONS DES CONGELATEURS

- Congélateur 200l : $L*I*h = 0.3*0.3*2$ Surface extérieure = 2.58 m^2
- Congélateur 300l : $L*I*h = 0.4*0.4*2$ Surface extérieure = 3.52 m^2

Pour la simulation des congélateurs, une quantité de 500 grammes de marchandise qui entre ou qui sort chaque jour a été considérée.

3.3.2 DONNEES INITIALES

La modélisation et la simulation ont été effectuées d'après les données qui se trouvent dans le tableau ci-dessous.

Température intérieure	T_i	-18	[°C]
Température de consigne variable max	T_{c_max}	-16	[°C]
Température de consigne variable min	T_{c_min}	-20	[°C]
Température extérieure	T_e	20	[°C]
Pas de calcul	Δt	3600	[s]
Différence de température entre T_{c_max} et T_{c_min}	ΔT_c	4	[°C]

Tableau 3.13 : Données pour la simulation

21 novembre 2008



3.3.3 CALCULS DES CARACTERISTIQUES DES CONGELATEURS

- Coefficient de la capacité calorifique

$$C = c \cdot m$$

C_{eau}	: Chaleur massique de la glace	: $2100 \frac{J}{K \cdot kg}$
m	: Masse contenu dans le congélateur	: $100 \text{ kg} / 150 \text{ kg}$

$$C = 2.1E5 \frac{J}{K} / 3.15E5 \frac{J}{K}$$

Pour le calcul de la capacité calorifique, la masse utilisée dans cette formule correspond à un congélateur rempli de glace à moitié de sa contenance. La glace représente la marchandise contenue dans le congélateur, elle est l'élément représentatif principal de toutes nourritures (légumes, fruits, viandes...).

- Coefficient des déperditions spécifiques

Coefficients de transmission thermique

$$U_{\text{Totale}} = \frac{1}{\frac{1}{H_{\text{ext}}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{H_{\text{int}}}}$$

H_{ext}	: Coefficient de transfert de chaleur surfacique	: $8 \frac{W}{K \cdot m^2}$
H_{int}	: Coefficient de transfert de chaleur surfacique	: $2 \frac{W}{K \cdot m^2}$
d	: Epaisseur d'une paroi	: 10 cm
λ	: Conductivité thermique du matériau utilisé	: $0.04 \frac{W}{K \cdot m}$

$$U_{\text{Totale}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0.1}{0.04} + \frac{1}{2}} = 0.32 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

A l'aide du coefficient de transmission thermique il est enfin possible de connaître les coefficients des déperditions spécifiques.

$$H_0 = S \cdot U_{\text{Totale}} = 0.83 \frac{W}{K} / 1.13 \frac{W}{K}$$

21 novembre 2008



3.3.4 FORMULES DES PARAMÈTRES PHYSIQUE

- ✓ Température intérieure au temps p :

$$T^p = T_i^{p-1} + \frac{\Delta t \cdot H}{C} \cdot \underbrace{(T_e^{p-1} - T_i^{p-1})}_{\text{Déperditions spécifiques}} + \frac{\Delta t}{C} \cdot \underbrace{P_{FR}^{p-1}}_{\text{Puissance de froid}}$$

- ✓ Puissance de refroidissement sur une heure au temps p :

$$Q = c_l \cdot m \cdot \Delta T + m \cdot L_l + c_s \cdot m \cdot \Delta T = 4200 \cdot 1 \cdot (20 - 0) + 3.5E5 \cdot 1 + 2100 \cdot 1 \cdot (0 - -18)$$

$$P_{FR} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{Q}{3600} = 131.5W$$

- ✓ Température de consigne au temps p :

Pour un fonctionnement laissant d'avantage de flexibilité au distributeur d'énergie, une température de consigne est mise à jour chaque heure en fonction de la disponibilité du réseau.

$$T_c^p = T_{c_max} - (CR \cdot \Delta T_c)$$

Pour un $\Delta T_c = 4^\circ\text{C}$, $T_{c_max} = -16$ et $CR = 1$, la température de consigne est de -16°C . Dans le cas où $CR = 0$, la température de consigne serait de -20°C .

Congélateur 200l		Congélateur 300l	
C [J/K]	H [W/K]	C [J/K]	H [W/K]
1.89E5	$H_0 = 0.83$	3.36E5	$H_0 = 1.13$

Tableau 3.14 : Caractéristiques des congélateurs



3.3.5 PROGRAMME DE SOUTIRAGE

Une quantité de marchandise qui entre ou sort tous les jours vers 11h00 a été considéré pour le soutirage des congélateurs. Cette modélisation correspond à l'heure où on introduit les commissions faites le matin.

✓ Variation du coefficient de transmission thermique

$$P = \frac{m \cdot \rho_{\text{massique_eau}} \cdot (T_{\text{marchandise}} - 0) + m \cdot \rho_{\text{latente}} + m \cdot \rho_{\text{massique_glace}} \cdot (0 - T_c)}{\Delta t}$$

$$\Delta H = \frac{P}{T_c - T_{\text{marchandise}}}$$

Avec

$$\rho_{\text{massique_eau}} = 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \rho_{\text{latente}} = 330000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \rho_{\text{massique_glace}} = 2100 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$\Delta t = 3600\text{s}$$

$$T_c = -18^\circ\text{C} \text{ et } T_{\text{marchandise}} = 20$$

Donc

$$\Delta H = 1.65 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

On considère une quantité de marchandise de 500g pour chaque congélateur. Le coefficient de transmission thermique varie de 0.83 W/K à 2.48 W/K ($H_0 + \Delta H$) pour le premier congélateur et de 1.13W/K à 2.78 W/K ($H_0 + \Delta H$) pour le second.

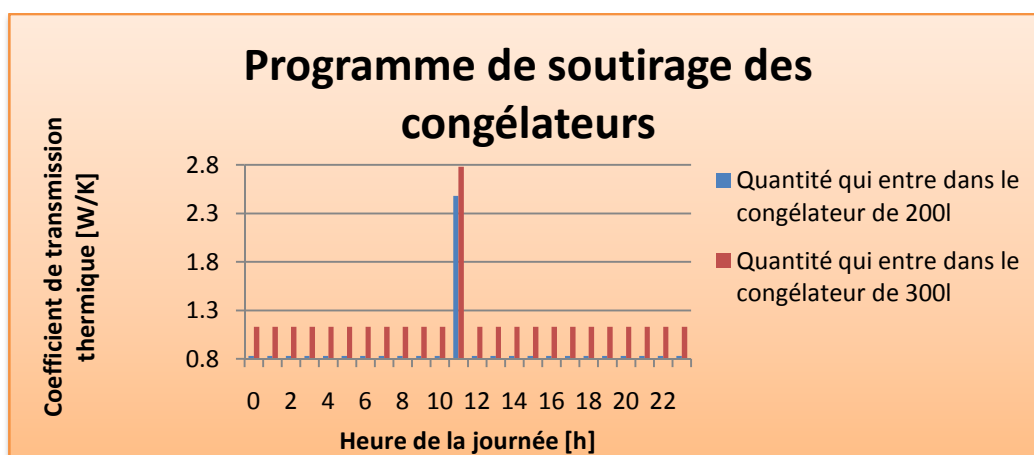


Figure 3.15 : Déperditions effectives



3.4 ENTREPOT FRIGORIFIQUE ET CAVE A VIN

3.4.1 DIMENSIONS

- Entrepôt frigorifique : $L*I*h = 60*15*7$ Surface extérieure = 2850 m²
- Cave à vin : $L*I*h = 14.5*6*6$ Surface extérieure = 420 m²

Pour les entrepôts frigorifiques, d'une capacité de 600 tonnes, un débit journalier de 15 tonnes a été considéré, suite à des informations récoltés auprès de l'entreprise « Les Fruits de Martigny SA ». Pour un bouteiller, pouvant accueillir 100'000 bouteilles, environs 300 d'entre elles entrent et sortent chaque jour. Les informations requises pour ces caves à vins ont été demandées auprès de Gérard Roduit vigneron encaveur à Fully.

3.4.2 DONNEES INITIALES

La modélisation et la simulation ont été effectuées d'après les données qui se trouvent dans le tableau ci-dessous.

Température intérieure	T_i	3 / 15 ²	[°C]
Température de consigne variable max	T_{c_max}	3 / 15	[°C]
Température de consigne variable min	T_{c_min}	2 / 14	[°C]
Température extérieure	T_e	20	[°C]
Pas de calcul	Δt	3600	[s]
Différence de température entre T_{c_max} et T_{c_min}	ΔT_c	1 / 1	[°C]

Tableau 3.16 : Données pour la simulation

² Les premières valeurs correspondent aux entrepôts frigorifiques et les secondes aux caves à vins. La température extérieure et le pas de calcul sont les mêmes pour les deux systèmes.



3.4.3 CALCULS DES CARACTERISTIQUES DES ENTREPOTS ET DES CAVES A VINS

▪ Coefficient de la capacité calorifique

Pour le calcul de la capacité calorifique, la quantité contenue dans les entrepôts ou les caves ont été obtenu par le biais auprès des entreprises mentionnées au paragraphe précédent. Il y a 50000 bouteille dans la cave à vin et 300 tonnes de légumes ou fruits dans l'entrepôt.

$$C = c \cdot m$$

C_{eau} : Chaleur massique de l'eau : $4200 \frac{J}{K \cdot kg}$

m : Quantité contenu dans les entrepôts / cave à vin : $300'000 \text{ kg}$ / $62'500 \text{ kg}$

$$C = 1.26E9 \frac{J}{K} / 2.625E8 \frac{J}{K}$$

▪ Coefficient des déperditions spécifiques

L'isolation pour ces deux systèmes est du polystyrène expansé (sagex).

Coefficients de transmission thermique

$$U_{\text{Total}} = \frac{1}{\frac{1}{H_{\text{ext}}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{H_{\text{int}}}}$$

H_{ext} : Coefficient de transfert de chaleur surfacique : $20 \frac{W}{K \cdot m^2}$

H_{int} : Coefficient de transfert de chaleur surfacique : $8 \frac{W}{K \cdot m^2}$

d : Epaisseur d'une paroi : 12 cm / 15 cm

λ : Conductivité thermique du matériau utilisé : $0.032-0.0042 \frac{W}{K \cdot m}$

$$U_{\text{Total}} = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{d}{0.037} + \frac{1}{8}} = 0.29 \frac{W}{m^2 \cdot K} / 0.24 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

A l'aide du coefficient de transmission thermique il est enfin possible de connaître les coefficients des déperditions spécifiques.

$$H_0 = S \cdot U_{\text{Total}} = 833.76 \frac{W}{K} / 99.31 \frac{W}{K}$$



3.4.4 FORMULES DES PARAMÈTRES PHYSIQUE

- ✓ Température intérieure au temps p :

$$T^p = T_i^{p-1} + \frac{\Delta t \cdot H}{C} \cdot \underbrace{(T_e^{p-1} - T_i^{p-1})}_{\text{Déperditions spécifiques}} + \frac{\Delta t}{C} \cdot \underbrace{P_{FR}^{p-1}}_{\text{Puissance de froid}}$$

- ✓ Puissance de refroidissement au temps p :

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T = 4200 \cdot m \cdot (20 - T_{finale})$$

$$P_{CH} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{Q}{24 \cdot 3600} = 14.5 \text{ kW} / 91.15 \text{ W}$$

- ✓ Température de consigne au temps p :

Pour un fonctionnement laissant d'avantage de flexibilité au distributeur d'énergie, une température de consigne est mise à jour chaque heure en fonction de la disponibilité du réseau.

$$T_c^p = T_{c_max} - (CR \cdot \Delta T_c)$$

Pour un $\Delta T_c = 1^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 1^\circ\text{C}$), $T_{c_max} = 3^\circ\text{C}$ ($T_{c_max} = 15^\circ\text{C}$) et $CR = 1$, la température de consigne est de 0.2°C (15°C). Dans le cas où $CR = 0$, la température de consigne sera de 2°C (14°C).

Entrepôt frigorifique		Cave à vin	
C [J/K]	H [W/K]	C [J/K]	H [W/K]
1.26E9	H ₀ =736.77	2.625E8	H ₀ =89.76

Tableau 3.17 : Caractéristiques des entrepôts et des caves

21 novembre 2008



3.4.5 PROGRAMME DE SOUTIRAGE DES ENTREPOTS

Une quantité de 15 tonnes de marchandise entre ou sort tous les jours vers 14h00, 16h00 et 18h00 dans les entrepôts frigorifiques. Cette modélisation est faite selon les informations récoltées auprès de l'entreprise « Les Fruits de Martigny SA ».

- ✓ Variation du coefficient de transmission thermique

$$P = \frac{m \cdot \rho_{\text{massique_eau}} \cdot (T_{\text{marchandise}} - T_c)}{\Delta t}$$

$$\Delta H_{\text{entrepôt}} = \frac{P}{T_{\text{marchandise}} - T_c}$$

Avec

$$\rho_{\text{massique_eau}} = 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$\Delta t = 3600\text{s}$$

$$T_c = 3^\circ\text{C} \text{ et } T_{\text{marchandise}} = 20$$

$$m = 5000\text{kg}$$

Donc

$$\Delta H_{\text{entrepôt}} = 5833 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Pour une quantité de marchandise de 15 tonnes le coefficient de transmission thermique passe de 833.76 W/K à 6666 W/K ($H_0 + \Delta H_{\text{entrepôt}}$).

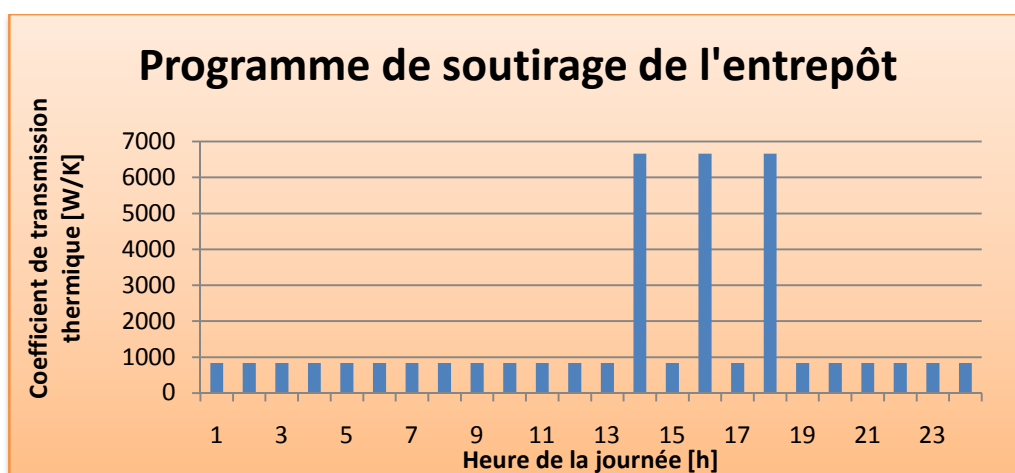


Figure 3.18 : Programme de soutirage de l'entrepôt



3.4.6 PROGRAMME DE SOUTIRAGE DES CAVES A VIN

Une quantité de 300 bouteilles entre tous les jours vers 15h00 dans la cave à vin. Cette modélisation est faite selon les informations récoltées auprès de la cave de Gérard Roduit. La masse des bouteilles pleines pèsent 1.25kg.

- ✓ Variation du coefficient de transmission thermique

$$P = \frac{m \cdot \rho_{\text{massique_eau}} \cdot (T_{\text{bouteilles}} - T_c)}{\Delta t}$$

$$\Delta H_{\text{cave}} = \frac{P}{T_{\text{bouteilles}} - T_c}$$

Avec

$$\rho_{\text{massique_eau}} = 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$\Delta t = 3600\text{s}$$

$$T_c = 15^\circ\text{C et } T_{\text{bouteilles}} = 20$$

$$m = N_{\text{bouteilles}} \cdot m_{\text{bouteille}} = 300 \cdot 1.25 = 375\text{kg}$$

Donc

$$\Delta H_{\text{cave}} = 437.5 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Pour une quantité de 300 bouteilles le coefficient de transmission thermique passe de 99.3 W/K à 536.8 W/K ($H_0 + \Delta H_{\text{cave}}$).

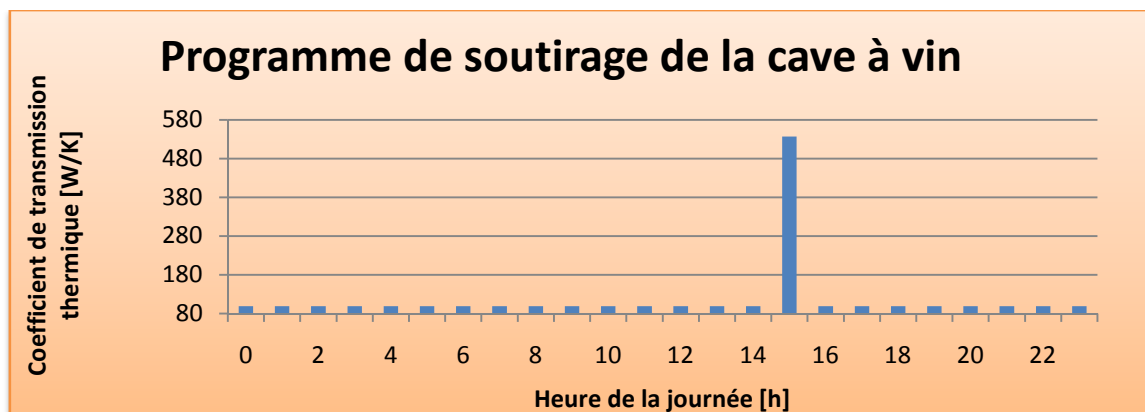


Figure 3.19 : Programme de soutirage de la cave à vin

21 novembre 2008



3.5 TEMPERATURE DE CONSIGNE ADAPTABLE A LA CHARGE DU RESEAU

Pour tous les appareils thermiques, une température de consigne qui s'adapterait à la charge du réseau (CR), permettrait d'obtenir un fonctionnement plus flexible. Cette nouvelle façon d'agir, permet d'une manière efficace d'éviter les pointes de charges dans les périodes critiques comme l'heure de midi. Le graphique ci-dessous traite la température de consigne flexible pour un bâtiment, bien entendu, ce principe est adaptable pour les autres processus présentés dans les paragraphes ci-dessus. On remarque que dans les instants critiques, la température de consigne est clairement inférieure comparée aux moments calmes comme la nuit.

$$T_c^p = T_{c_max} - (CR \cdot \Delta T_c)$$

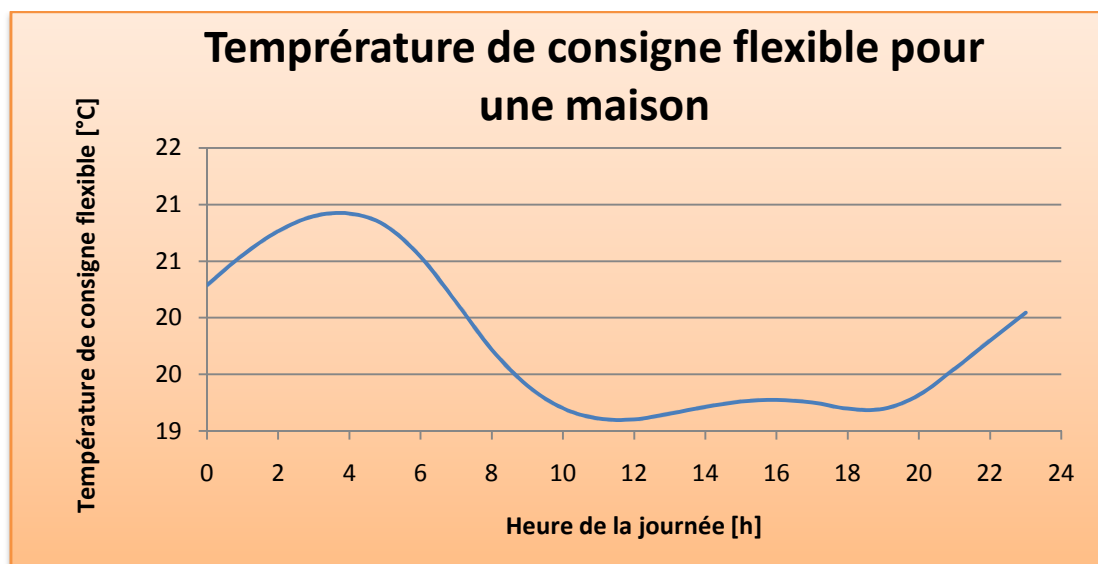


Figure 3.20 : Température de consigne flexible

Les températures de consigne pour les autres types d'appareils sont établies de la même manière que la température de consigne flexible pour une maison.



4 APPAREILS À DÉMARRAGE DIFFÉRÉ

4.1 L'ELECTROMÉNAGER

Pour tous les appareils tels que les lave-linges, les sèche-linges et les lave-vaisselles, un démarrage différé est la meilleure solution afin d'éviter des enclenchements durant des périodes où la demande d'énergie est importante. En faisant preuve de bon sens, il a été possible d'établir une table indiquant l'heure de démarrage différé exact en tenant compte du temps de cycle et le moment où l'utilisateur enclenche l'appareil. A noter qu'on estime que personne n'appuie sur le bouton START entre 23h et 3h. Le tableau qui se trouve ci-dessous indique l'heure à laquelle le démarrage différé a lieu.

On a estimé que tous les enclenchements réalisés entre :

- 4h00 et 9h00 doivent être terminés pour 12h00
- 10h00 et 15h00 doivent être terminés pour 18h00
- 16h00 et 22h00 doivent être terminés pour 06h00 le lendemain matin

Si le client appuie sur le bouton START de son appareil à (12h) et qu'il choisit un programme de (3h), son appareil démarrera effectivement à (13h).

	Temps de cycle 1h	Temps de cycle 2h	Temps de cycle 3h
0	-	-	-
1	-	-	-
2	-	-	-
3	-	-	-
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
10	13	13	13
11	14	14	13
12	15	15	13
13	16	15	14
14	16	16	14
15	17	16	15
16	0	0	0
17	1	1	1
18	1	1	1
19	2	2	2
20	2	2	2
21	3	3	3
22	3	3	3
23	-	-	-

Tableau 4.1 : Heures de démarrage pour un fonctionnement différé



5 TARIFS & GAINS

5.1 ECONOMIE

Une tarification adéquate est importante pour que les principes d'EFlex puissent être mis en oeuvre. Il est vrai que nous avons voulu tout au long de cette étude combler les périodes creuses du réseau afin de décharger les moments de haute consommation. Pour le client, il est important de connaître les vrais gains économiques que peut engendrer EEFlex. Pour cela nous avons dû choisir un tarif fixe pour simuler le fonctionnement actuel ainsi qu'un tarif variable pour inciter le consommateur à faire preuve de flexibilité.

5.1.1 TARIFS

Le tarif fixe a été choisi à 17 cts/kWh. Quant au tarif variable, il oscille entre un minimum de 5 cts/kWh (α) et un maximum de 26 cts/kWh ($\alpha + \beta$). La moyenne journalière du prix du kWh pour un tarif variable correspond au prix fixe du kWh.

$$Prix_p^{kWh} = \alpha + CR_p \cdot \beta$$

Le prix du kWh à l'instant p, dépend de :

- α prix minimum
- β l'augmentation du prix
- CR charge du réseau à l'instant p

En résumé, la charge du réseau varie entre 0 et 1, ce qui donne l'intervalle de prix ci-dessous.

CR = 0	le prix est de α
CR = 1	le prix est de $\alpha + \beta$

5.2 GAINS

Afin de comparer les simulations qui vont suivre, il est important de pouvoir calculer les gains économiques et les gains de puissance. Il est tout à fait possible de ne pas pouvoir obtenir toujours des résultats en notre faveur.



5.2.1 GAINS DE PUISSANCE

Les gains de puissance sont exprimés en %, en tenant compte que la consommation actuelle représente le 100%.

$$1 - \frac{\sum_{p=1}^{8760} P_p^{EEflex}}{\sum_{p=1}^{8760} P_p^{normale}}$$

P_p^{EEflex} = Puissance avec consigne variable
 $P_p^{normale}$ = Puissance sans consigne variable

5.2.2 GAINS ÉCONOMIQUES

Les gains économiques sont exprimés en %, en tenant compte que la facture annuelle actuelle représente le 100%.

$$1 - \frac{\sum_{p=1}^{8760} (P_p^{EEflex} \cdot \text{Tarif}_p^{EEflex})}{\sum_{p=1}^{8760} (P_p^{normale} \cdot \text{Tarif}_p^{normale})}$$

Tarif_p^{EEflex} = Tarif variable selon la charge du réseau
 $\text{Tarif}_p^{normale}$ = Tarif fixe



6 SIMULATIONS

Tous les graphiques qui suivent ont été effectués durant les trois premiers jours de l'année afin de rendre l'illustration plus lisible. Bien entendu, les valeurs en pourcent qui se trouvent à côté des courbes représentent une estimation annuelle.

6.1 ANALYSE DE LA POMPE À CHALEUR

Pour l'aspect chauffage, il faut différencier les bâtiments selon leur date de construction. L'immobilier le plus récent sera le moins gourmand, tandis que le plus ancien sera celui qui demande une plus grande quantité d'énergie de chauffage à cause de son isolation de moins bonne qualité. Les graphiques ci-dessous représentent les puissances de chauffage nécessaires pour différentes constructions en tenant compte des paramètres caractéristiques du bâtiment. Les simulations tiennent compte d'une température variable entre 19°C et 21°C selon la charge du réseau.

Surconsommation

0.32 %

Gains économiques

39 %

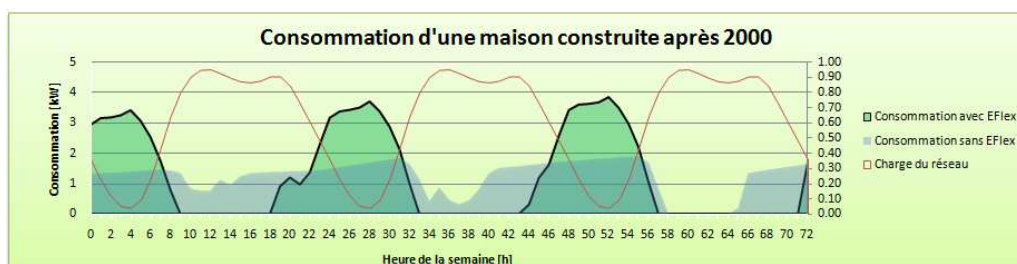


Figure 6.1 : Consommation maison construite après 2000

Surconsommation

0.66 %

Gains économiques

32 %

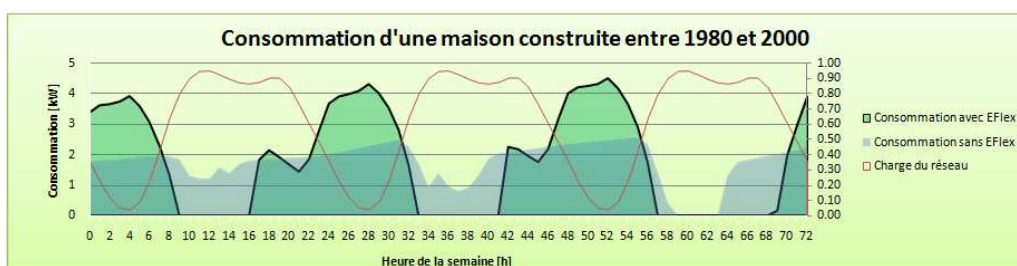


Figure 6.2 : Consommation maison construite entre 1980 et 2000

Surconsommation

0.58 %

Gains économiques

27 %

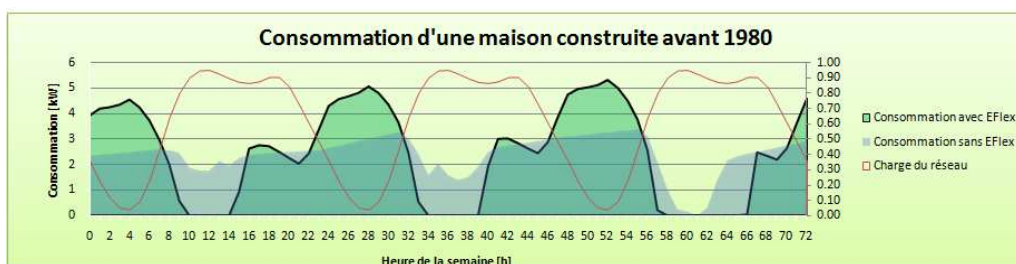


Figure 6.3 : Consommation maison construite avant 1980



Surconsommation

0 %

Gains économiques

34 %

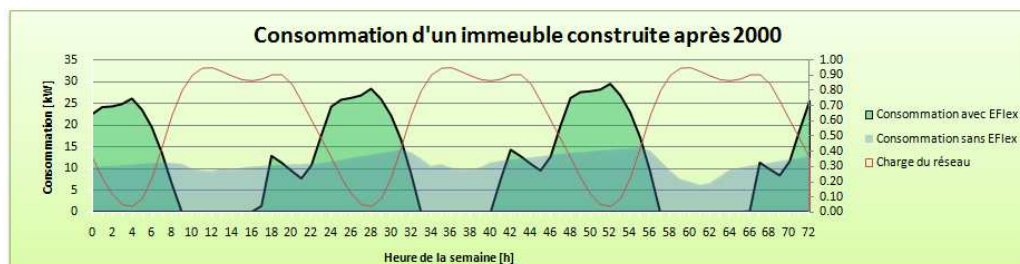


Figure 6.4 : Consommation immeuble construit après 2000

Surconsommation

0.08 %

Gains économiques

29 %

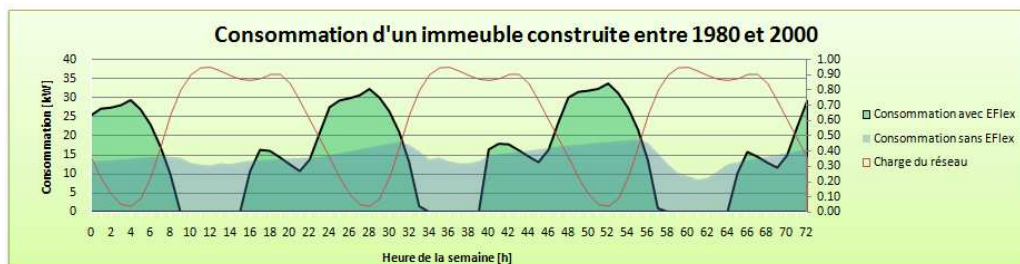


Figure 6.5 : Consommation immeuble construit entre 1980 et 2000

Surconsommation

0.13 %

Gains économiques

25 %

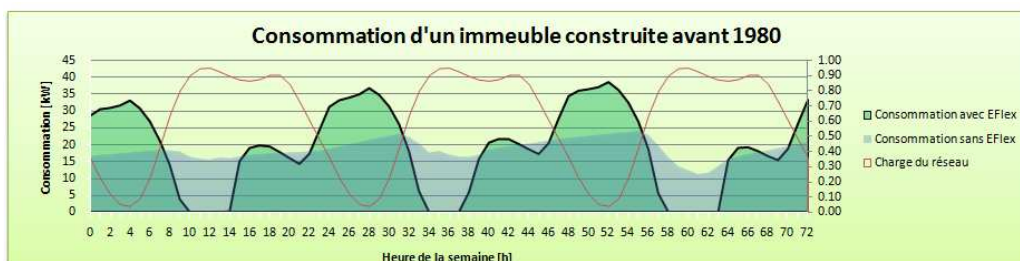


Figure 6.6 : Consommation immeuble construit avant 1980

6.1.1 CONSTATATIONS

Ces différentes situations représentent la consommation pour chaque catégorie. Sur ces six graphiques, il est clairement visible que la consommation EFlex (surface verte) est majoritairement répartie lorsque le réseau (trait rouge) est peu mis à contribution. Tandis qu'auparavant la consommation initiale (surface bleue) utilisait beaucoup de puissance dans les périodes où le réseau était surchargé. Dans tout les cas, les gains économiques sont présents voire même très importants. La surconsommation n'est pas trop important ce qui ne remet pas en question EFlex. Le bâtiment qui possède le coefficient de déperdition spécifique le plus petit sera celui qui bénéficiera d'un gain économique plus important.



6.2 ANALYSE DU CHAUFFE EAU

La simulation des chauffe-eaux prend en compte deux boilers de capacité différente (180 litres et 320 litres). La consommation des boilers dépend de la quantité d'eau chaude consommée quotidiennement, de la capacité totale et surtout des caractéristiques intrinsèques calculées dans la section chauffe-eau. La température de consigne variable se situe entre 50°C et 60°C selon la charge du réseau. Pour s'approcher de la réalité, la modélisation prend en compte une utilisation plus conséquente de l'eau chaude dans les périodes du matin vers 07h00 et le soir aux alentours de 19h00. L'environnement où se trouvent les chauffe-eaux, est supposé être aux alentours de 20°C.

Surconsommation

2.2 %

Gains économiques

6.1 %

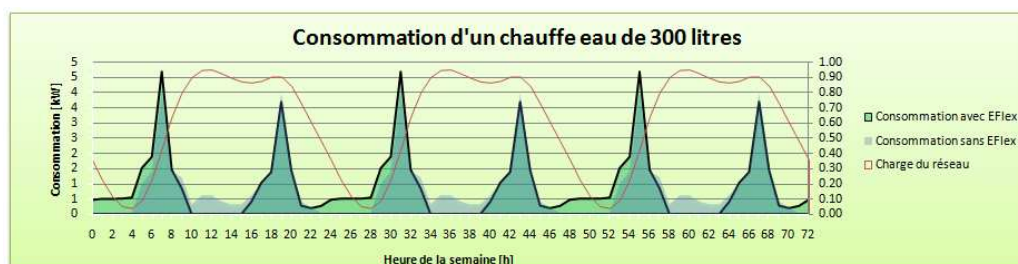


Figure 6.7 : Consommation d'un boiler de 300 litres

Surconsommation

2.3 %

Gains économiques

4.3 %

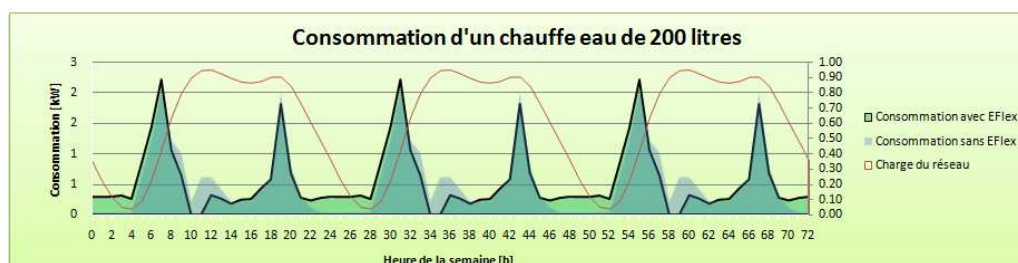


Figure 6.8 : Consommation d'un boiler de 200 litres

6.2.1 CONSTATATIONS

Le principe EFlex joue un rôle moins important avec ce type d'appareil. Il est évident que si on veut économiser encore plus il faudrait utiliser l'eau chaude en dehors des heures de pointes ou autoriser le boiler de mettre à température le nouvel arrivage d'eau fraîche seulement dans les périodes creuses. Un gain économique persiste mais reste toutefois infime. Une surconsommation apparaît, il faudrait pouvoir améliorer la régulation de ce système.



6.3 ANALYSE DU CONGÉLATEUR

La simulation des congélateurs considère deux congélateurs de capacité différente (200 litres et 300 litres). La quantité de marchandise entrant et sortant joue un rôle important sur la consommation globale. Les spécificités des congélateurs répertoriés dans le paragraphe 3.3.3 ont aussi un rôle prépondérant sur la quantité d'énergie requise pour ces dispositifs. La température de consigne variable oscille entre -16°C et -20°C . Une quantité de 500 gr de marchandise, qui entre quotidiennement a été retenue pour modéliser le fonctionnement des congélateurs. L'heure à laquelle où l'opération a lieu est prise à 11h00 afin de modéliser le retour des commissions.

Surconsommation

0.2 %

Gains économiques

19 %

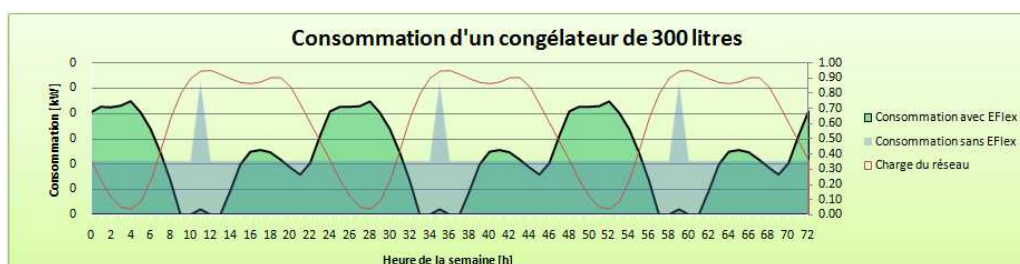


Figure 6.9 : Consommation d'un congélateur de 300 litres

Surconsommation

0.68 %

Gains économiques

11 %

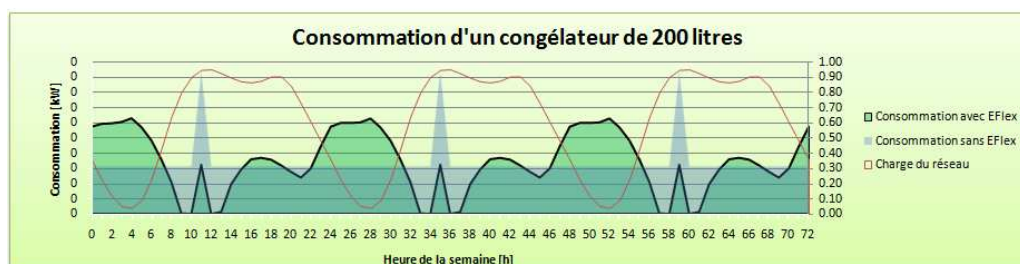


Figure 6.10 : Consommation d'un congélateur de 200 litres

6.3.1 CONSTATATIONS

Ces simulations démontrent que le congélateur de plus grosse capacité, possède une constante de temps bien plus élevée, ce qui explique une plus grande consommation dans la période basse consommation. Pour le plus petit congélateur, un gain économique persiste, par contre il est nettement inférieur à son confrère à cause de sa plus petite constante de temps.

21 novembre 2008



6.4 ANALYSE ENTREPOTS FRIGORIFIQUES ET CAVES A VIN

La simulation des entrepôts frigorifiques ainsi que celle des caves à vin ont été réalisées en prenant en compte les informations récoltées auprès de qui de droit comme expliqué dans le paragraphe 3.4.1. En préambule de ce test, on s'attendait à obtenir des résultats semblables à ceux des congélateurs traditionnels. Si ces attentes se confirmaient, le système EFlex toucherait un nouveau domaine ce qui le rendrait encore plus convaincant.

Surconsommation

1.4 %

Gains économiques

57 %

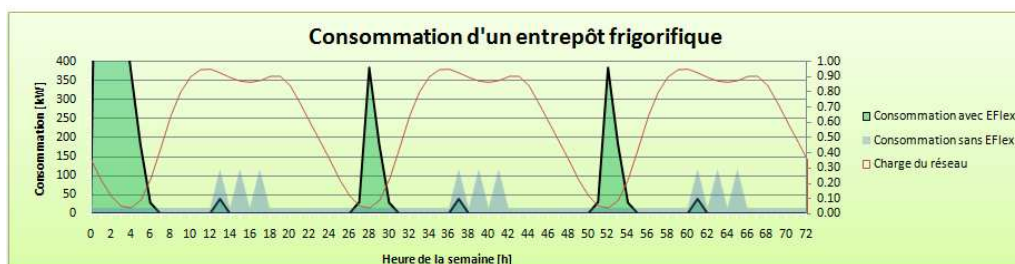


Figure 6.11 : Consommation d'un entrepôt frigorifique

Surconsommation

2.3 %

Gains économiques

63 %

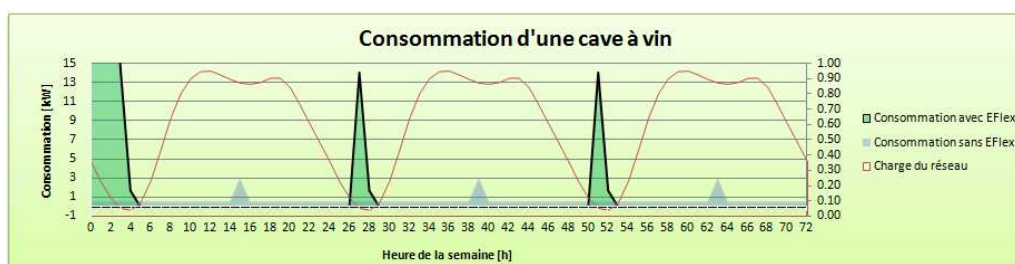


Figure 6.12 : Consommation d'une cave à vin

6.4.1 CONSTATATIONS

La première réflexion qu'on se fait, c'est que ces deux types de réfrigérateur sont nettement meilleures que les précédents au niveau des gains économiques. Le premier pic qu'on peut apercevoir sur les deux graphiques aux alentours de minuit est la conséquence de la mise à service du système. Le client remarquera immédiatement qu'il pourra diminuer de moitié sa facture d'électricité. Dans le futur il faudra de toute façon rectifier et chercher d'autres solutions qui puissent rendre ce système encore plus performant au niveau de la surconsommation.



6.5 ANALYSE DE L'ÉLECTROMÉNAGER

Pour l'électroménager, le principal objectif est d'enclencher les dispositifs (lave-linges, sèche-linges, lave-vaisselles) avec un déphasage dans le temps. Ce processus permettra de limiter l'emploi de ces appareils pendant certaines heures de la journée. Ce tableau (Tableau 4.1 : Heures de démarrage pour un fonctionnement différé) permet de connaître le déroulement du processus une fois que le temps de cycle et l'heure de démarrage sont connus. Cette modélisation a été faite en faisant preuve de bon sens. Pour cette simulation un élément a été démarré à 4h, 11h et 17h avec un temps de cycle d'une heure.

Surconsommation

0 %

Gains économiques

21 %

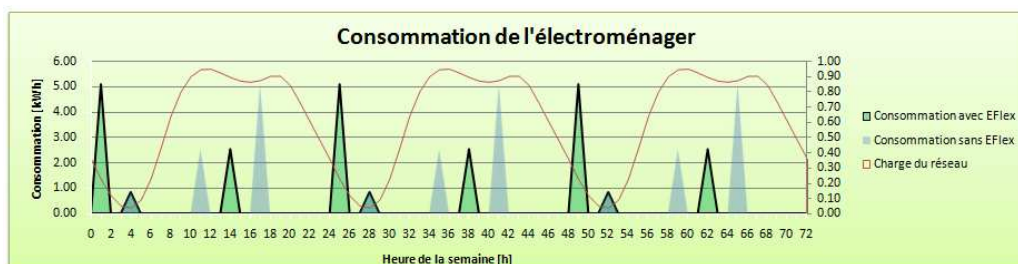


Figure 6.13 : Consommation des dispositifs avec démarrages différés

6.5.1 CONSTATATIONS

On remarque que le démarrage de 4h00 est identique que cela soit pour le système EFlex ou à l'utilisation habituelle. Par contre pour les autres enclenchements, on aperçoit clairement un déphasage comme résumé dans le tableau du paragraphe 4.1. Cette flexibilité permet donc au distributeur d'éliminer des pics lors d'une forte demande de puissance. Quant à l'utilisateur, il bénéficiera d'un gain économique non négligeable. Les appareils utilisés lors de cette simulation font partie de la classe énergétique A+, bien évidemment la seule différence par rapport aux autres classes est la puissance pour un cycle.



7 LE BIOTOPE CONSIDÉRÉ

Pour démontrer les bénéfices qu'un utilisateur d'EFlex pourra effectuer, il est indispensable de simuler un environnement qui lui est propre afin d'exprimer en francs l'économie que chaque citoyen peut effectuer en adoptant cette stratégie.

Traitons le cas d'une famille comprenant cinq personnes (2 parents, 3 enfants) ayant des activités extérieures (sport, théâtre...) à la fréquence de deux à trois fois par semaine. L'équipement de cette famille ressemblerait à :

- 1 maison construite entre 1980 et 2000
- 1 boiler de 300 litres
- 1 congélateur de 300 litres
- 1 lave-linge
- 1 sèche-linge
- 1 lave-vaisselle

Simulons le cas où, tous les jours 500 grammes de marchandise entrent ou sortent du congélateur aux alentours de 11h, tous les jours un lave-linge démarre vers les 7h00, quotidiennement un sèche-lèche est mis en marche à 17h00 et un lave-vaisselle est enclenché chaque jours après le repas de midi.

Surconsommation

1.2 %

Gains économiques

13 %

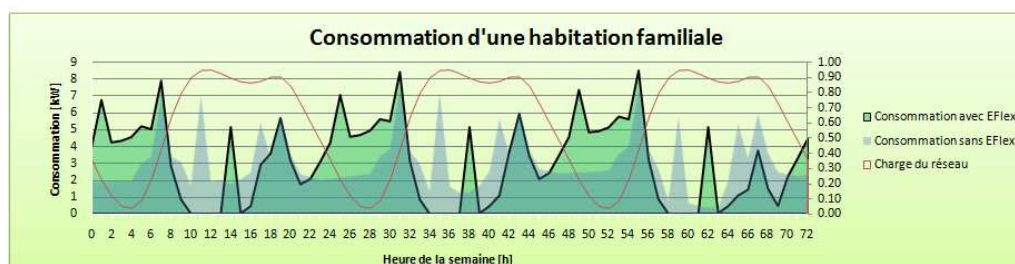


Figure 7.1 : Consommation d'une habitation familiale

Cette courbe de consommation pour une période de trois jours pour le mois de janvier confirme que la mentalité EFlex est respectée. Ce graphique illustre parfaitement le démarrage différé de l'électroménager, en plus la consommation majoritairement regroupée dans les heures de nuit (bas tarif). Les habitants de cette maison, grâce à l'utilisation de EFlex et d'une certaine preuve de flexibilité, bénéficieraient d'une économie de 13% qui correspondrait à une somme d'environ de 400 CHF par an. La légère surconsommation n'arrêtera sûrement pas les personnes convaincues par EFlex.

21 novembre 2008



8 ADAPTATIONS

Afin d'obtenir des résultats encore plus convaincants, il a fallu déphaser de deux heures la température de consigne pour parvenir à bénéficier d'un gain économique encore plus grand. Il faut cependant faire un compromis, car comme le montre le graphique ci-dessous, plus la consigne est déphasée plus les gains économiques augmentent contrairement à la sous-consommation. Si l'on regarde du côté du client il est bien de déphaser encore de quelques heures supplémentaires, par contre du point de vue du distributeur d'énergie, il faudrait justement limiter ce déphasage dans le futur.

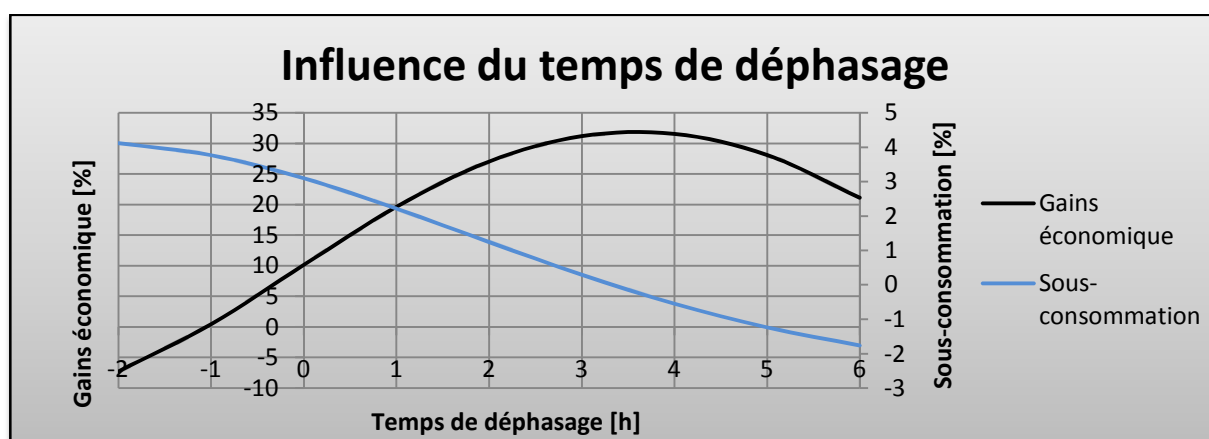


Figure 8.1 : Influence de temps de déphasage

9 CONCLUSION

Ce travail a demandé une grande concentration pour gérer au mieux la collecte d'information qui a été réalisée. Il est vrai qu'un amas de renseignements a été nécessaire pour la réalisation et la compréhension de ce projet. Il ne fallait en aucun cas se disperser et suivre la ligne directrice qui fixée lors de l'attribution du projet de diplôme. Les rencontres mensuelles ont permis d'éclaircir certains doutes, et me garder sur le « droit chemin » afin d'arriver à mon but final. L'aide de mon Coach, Michel Bonvin, m'a été très précieuse. Ses connaissances ainsi que son expérience liées à ma volonté de bien faire et d'approfondir mon savoir, ont été des atouts pour réaliser un travail intéressant et le plus fidèle à la réalité.

Les résultats obtenus prouvent que les attentes d'une gestion flexible de la consommation d'électricité ne sont absolument pas utopiques. Bien au contraire elles sont extrêmement convaincantes. Les bénéfices économiques ont même dépassés ce que l'on pouvait imaginer au début du projet. Comme tout projet, des améliorations notoires sont évidemment possibles. En effet certains appareils peuvent encore être gérés de manière améliorées afin



d'obtenir des résultants encore plus révélateurs. En exécutant ce travail, le constat a été que tous les systèmes thermiques qui comportent des pertes importantes tels que des congélateurs commerciaux, ne sont pas utilisables dans la gestion d'énergie d'EFlex, car ces systèmes ne peuvent en aucun cas offrir une flexibilité dans leur fonctionnement. Pour les caves à vins ainsi que les entrepôts frigorifiques, il m'est apparu difficile d'obtenir quelque chose de convaincant, à cause de la trop grande quantité de marchandise qui entre et qui sort tous les jours, ce qui rend une flexibilisation d'utilisation plus fragile. Cette étude peut être poussée encore plus loin, en prenant compte des dispositifs utilisés dans l'industrie, dans la chimie, dans le médical voire dans l'agroalimentaire. Dans ces domaines, la gestion des chambres froides, des fours ou d'autre système peut sûrement être améliorée. Tous les appareils pouvant accepter le principe d'un démarrage différé sont autant importants que les appareils thermique pour diminuer la consommation d'énergie dans les heures de hautes demandes. Pour ce dernier type, il faudrait qu'un automate gère l'enclenchement afin d'éviter qu'une multitude d'appareil démarre en même temps mais plutôt de manière cascadée.

Dans le futur, tout le monde le sait de manière inconsciente, de plus en plus d'accessoires, d'outils ou d'appareils utiliseront comme source d'énergie une batterie. L'exemple le plus frappant est l'automobile. Il est important, dès aujourd'hui, de commencer à réfléchir à la manière d'effectuer une gestion de la charge des accumulateurs.

10 ANNEXES

CD comportant :

✓ Le travail exécuté sur Excel	:	Biotope v1.5
✓ Rapport (pdf)	:	EFlex v1.3
✓ Base de données METEONORM pour la ville de SION (pdf)	:	METEONORM
✓ La courbe de charge d'EOS (pdf)	:	Courbe de charge EOS
✓ Résumé (pdf)	:	Résumé
✓ Page de garde (pdf)	:	Page de garde
✓ Echancier (pdf)	:	Echancier

21 novembre 2008



1 1 BIBLIOGRAPHIE : SITES DE RÉFÉRENCE

1 1.1 SITES DE RÉFÉRENCES

- ✓ [HTTP://WWW.TOPTEN.CH](http://www.topten.ch)
- ✓ [HTTP://WWW.BFE.ADMIN.CH](http://www.bfe.admin.ch)
- ✓ [HTTP://WWW.RECHSTEINER-BASEL.CH](http://www.rechsteiner-basel.ch)
- ✓ [HTTP://WWW.NE.CH](http://www.ne.ch)
- ✓ [HTTP://WWW.ELECTRICITE.CH](http://www.electricite.ch)
- ✓ [HTTP://PARTNER.1TO1ENERGY.CH](http://partner.1to1energy.ch)
- ✓ [HTTP://WWW.ABIHOME.BE](http://www.abihome.be)
- ✓ [HTTP://WWW.ENERGIE-ENVIRONNEMENT.CH](http://www.energie-environnement.ch)
- ✓ [HTTP://WWW.LABRIVERT58.FR](http://www.labrivert58.fr)
- ✓ [HTTP://WWW-ENERGIE.ARCH.UCL.AC.BE](http://www.energie.arch.ucl.ac.be)
- ✓ [HTTP://WWW.ECONOLOGIE.COM](http://www.econologie.com)
- ✓ [HTTP://WWW.UCTE.ORG](http://www.ucte.org)
- ✓ [HTTP://WWW.BFS.ADMIN.CH](http://www.bfs.admin.ch)
- ✓ [HTTP://WWW.SWISSELECTRIC.CH](http://www.swisselectric.ch)
- ✓ [HTTP://WWW.ELECTRICITE.CH](http://www.electricite.ch)
- ✓ [HTTP://WWW.WIKIPEDIA.ORG](http://www.wikipedia.org)
- ✓ [WWW.ENERGYBOX.CH](http://www.energybox.ch)

1 1.2 RÉFÉRENCES E-MAIL

- | | | |
|---------------------------------|---|------------------|
| ✓ Cave Gérard Roduit | : | Gérard Roduit |
| ✓ Services industriels de Fully | : | Joseph Darbellay |
| ✓ EOS | : | Sylviane Tappa |
| ✓ Les Fruits de Martigny SA | : | Carlos Fuentes |

Sion le 21 novembre 2008

Jérémie Mayor

