

"Analyse énergétique des bâtiments" Notes de Cours
Préparé par D. Mather

EA4 : Aspects de la simulation de l'ensemble du bâtiment

1. Performance en charge partielle des équipements de chauffage, de ventilation et de climatisation et simulation
2. Courbe de durée de la charge
3. Application d'une courbe de durée de charge dans un processus de conception
4. Estimation du rendement horaire moyen à charge partielle
5. Exemple de pas de temps de la "pseudo-simulation" (partie A)
6. Exemple de pas de temps de la "pseudo-simulation" (partie B)

Aperçu du module

Ce module traite de l'analyse des équipements de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) alimentés par des charges variables au cours d'une année (ou d'une saison, p. ex. saison de chauffage/refroidissement). La performance de l'équipement à charge partielle est un facteur déterminant de l'efficacité moyenne de l'équipement pendant toute sa durée de fonctionnement.

Résultats d'apprentissage visés par le cours :

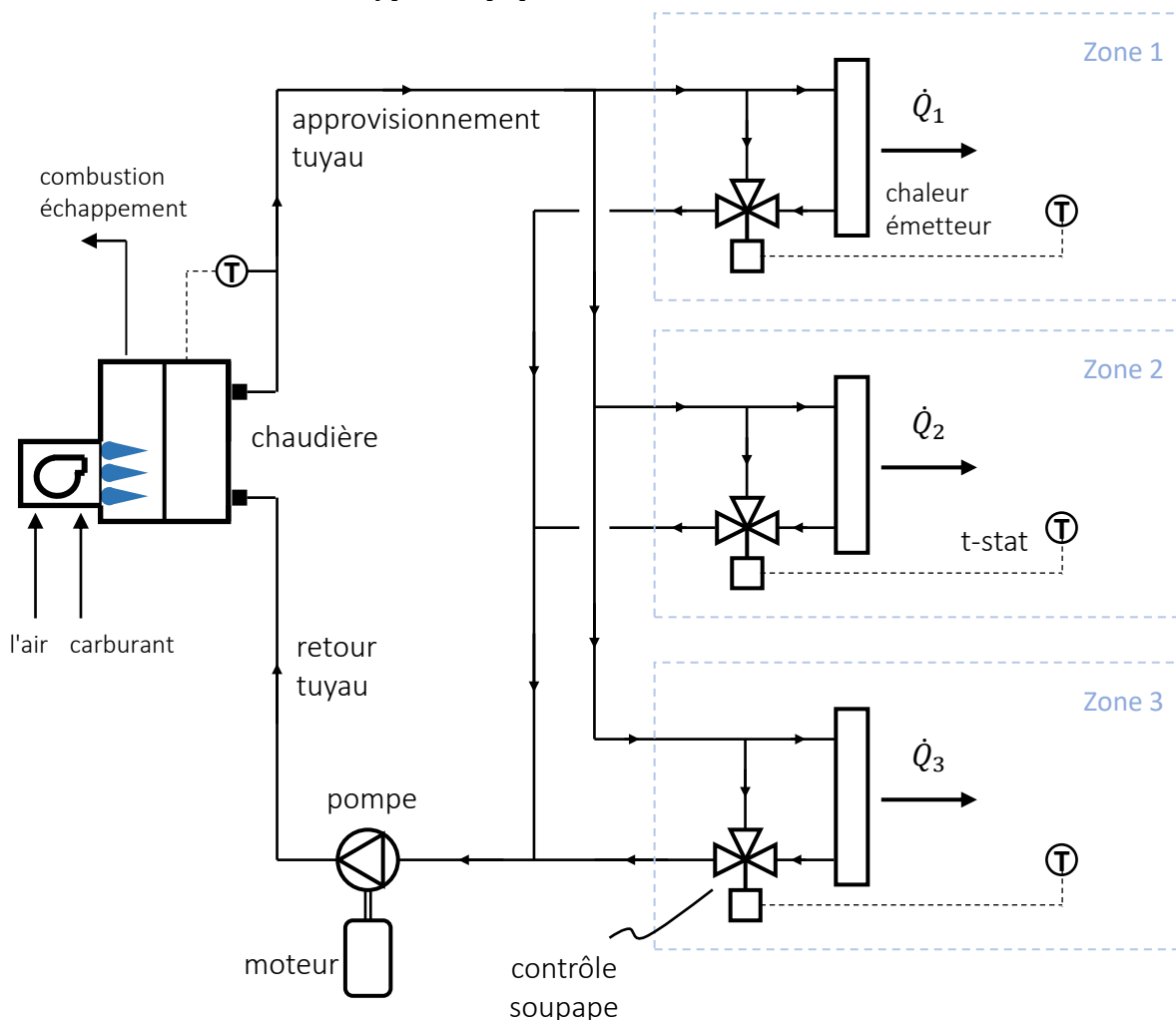
- Appliquer les calculs énergétiques de base à une variété de composants et de systèmes ayant un impact sur l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments.
- Appliquer des techniques d'analyse simples à l'audit et à la simulation énergétiques des bâtiments.

1. Performance en charge partielle des équipements de chauffage, de ventilation et de climatisation et simulation

Ce module s'intéresse principalement à l'impact des charges variables sur le fonctionnement et l'efficacité des équipements de chauffage, de ventilation et de climatisation. Pour certains types d'équipements, le rendement peut varier considérablement en fonction de la charge. Selon la situation, l'efficacité peut augmenter ou diminuer à charge partielle. L'une des principales raisons d'effectuer une simulation énergétique est d'estimer la variation des charges sur l'équipement CVC, c.à.d. de permettre l'évaluation de l'impact des charges de fonctionnement sur l'efficacité.

Ce module n'a pas pour but d'être exhaustif dans sa discussion sur le sujet. L'objectif est plutôt de reconnaître que les charges de CVC sont généralement très variables et qu'il faut en tenir compte lors de la conception d'un système si l'on souhaite obtenir une efficacité moyenne raisonnable.

Cette section utilise un système de chauffage hydronique comme exemple de système à analyser, mais la plupart des concepts considérés sont généralement applicables à la simulation de nombreux types d'équipements CVC.



La "simulation énergétique de l'ensemble du bâtiment" peut être un outil utile pour envisager des conceptions alternatives lors de la conception d'un nouveau bâtiment ou pour estimer les économies qui pourraient être réalisées grâce à des travaux de rénovation dans le cadre d'un audit énergétique.

La simulation peut être particulièrement utile pour envisager des mesures pour lesquelles les calculs manuels ne sont pas pratiques. Cela peut être particulièrement vrai pour l'analyse d'équipements desservant des charges très variables, tels que les équipements de chauffage, de ventilation et de climatisation. La simulation sera utilisée pour estimer les charges (p. ex. sur une base horaire) et l'énergie utilisée par l'équipement pour répondre à ces charges.

Les calculs pour chaque pas de temps individuel peuvent être raisonnablement simples - le problème est le nombre de pas de temps qu'il peut être nécessaire de simuler. p. ex., une simulation heure par heure pendant un an impliquerait 8760 pas de temps.

Les sections à la fin de ce module (5 et 6) examinent quelques calculs représentatifs du type de ceux qui pourraient être effectués pendant la simulation d'un seul pas de temps pour un exemple simple de système de chauffage hydronique (nous l'appellerons "pseudo-simulation"). (Pour simuler une année complète, les calculs seraient répétés pour chaque heure simulée, en mettant à jour certains paramètres toutes les heures, tels que les conditions météorologiques, la présence d'occupants et leur utilisation de l'éclairage et d'autres équipements électriques (c.à.d. les gains de chaleur internes), et l'énergie solaire incidente sur les différentes surfaces du bâtiment (c.à.d. le rayonnement de rayon/diffus, en fonction de l'heure de la journée, de l'orientation de la surface, et de nombreux autres facteurs).

LECTURE : Veuillez lire le "design brief" suivant pour une discussion assez rapide et générale sur l'utilisation de la simulation dans la conception des bâtiments. Le document date de vingt ans, mais les concepts généraux abordés sont toujours applicables ; cependant, certains détails peuvent être dépassés (p. ex., la liste des outils logiciels de simulation).

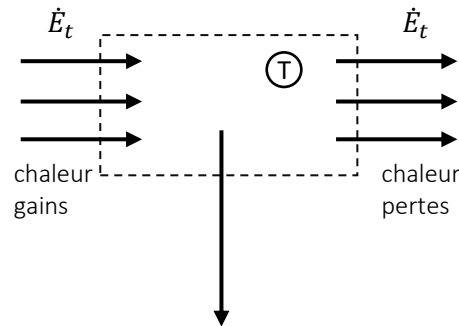


"Design Brief : Simulation de bâtiment"
Energy Design Resources, E Source Inc, 2000.

Une vue très simplifiée "en deux étapes" du processus de simulation pour un pas de temps particulier (p. ex. pour le calcul de la consommation d'énergie d'un équipement CVC) :

Étape 1 : Calculer la charge de CVC

p. ex., pour chaque environnement/zone conditionné(e), calculer la quantité de chauffage/refroidissement nécessaire pour compenser les gains/pertes de chaleur nets.



$$\dot{Q}_{load} = \sum_{in} \dot{E}_t - \sum_{out} \dot{E}_t$$

← p. ex., refroidissement nécessaire pour compenser gain net de chaleur

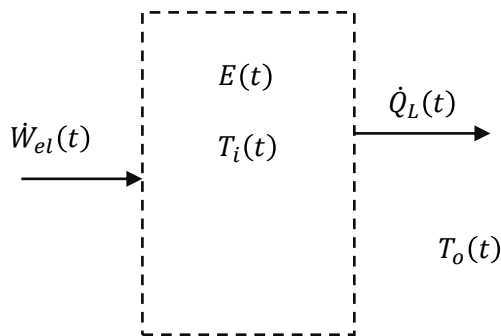
Étape 2 : Calcul de la consommation d'énergie des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation

Déterminer l'énergie nécessaire pour le pas de temps afin de faire fonctionner l'équipement HVAC pour répondre à la charge qui lui est imposée.

2. Courbe de durée de charge

Dans cette section, nous examinerons l'élaboration d'une "courbe de durée de la charge" (CDL) en tant que méthode simple pour visualiser les données relatives à la charge énergétique qui est variable dans le temps.

Rappelons l'analyse et la simulation du "réservoir chauffé" des discussions précédentes. Dans la section 4 de l'EA2, une approche "quasi stable" de l'analyse a été discutée, dans laquelle le taux de chauffage horaire moyen est supposé correspondre à la perte de chaleur horaire moyenne. (Dans un exemple de calcul présenté dans cette section, le taux de perte de chaleur horaire moyen était de 3,72 kW, la perte de chaleur horaire totale était de 3,72 kWh et la consommation d'électricité horaire totale était de 3,72 kWh).



Approche quasi-stationnaire :

$$\int_{1hr} W_{el}(t) \cdot dt \approx \int_{1hr} \dot{Q}_L(t) \cdot dt$$

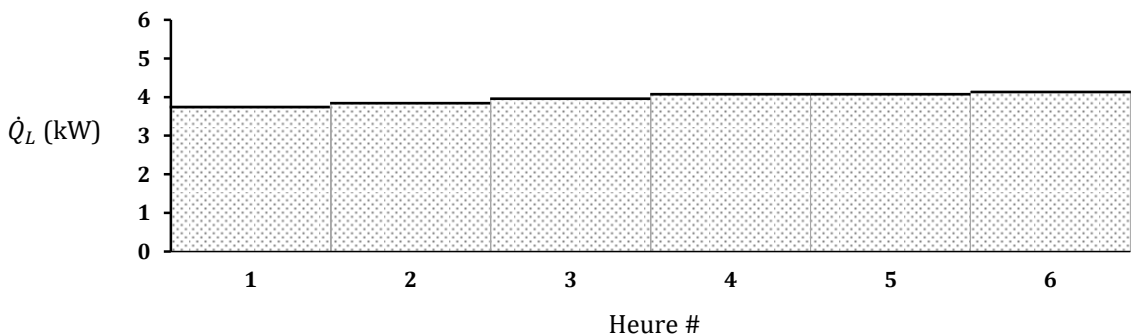
$$W_{el,1hr} = Q_{L,1hr}$$

Examinons maintenant la simulation de la consommation d'énergie heure par heure du réservoir de chaleur pendant une année entière (c.à.d. 8760 heures) à l'aide de l'approche quasi-stationnaire. En fonction du site d'installation prévu pour le réservoir, un fichier de données météorologiques sera sélectionné pour l'analyse - en supposant que ces données soient fournies sur une base horaire.

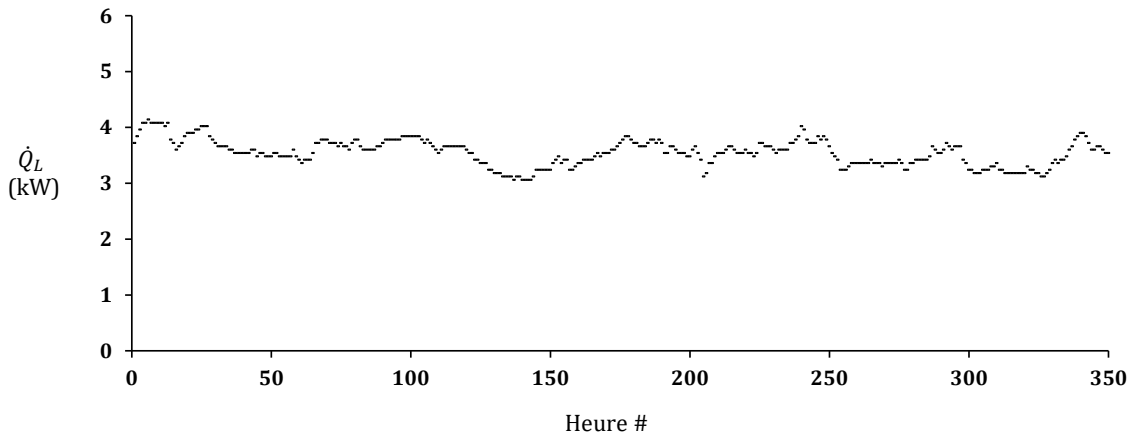
En utilisant les mêmes caractéristiques pour le réservoir et le système de chauffage que celles décrites dans la section 2 de l'EA2 (p. ex., UA du réservoir = 60 W/°C, capacité de l'élément chauffant à résistance électrique = 6 kW), les données fournies par la simulation peuvent apparaître comme dans le tableau de la page suivante. Dans le tableau, T_o est la température horaire de l'air extérieur, \dot{Q}_L et \dot{W}_{el} sont les taux de transfert d'énergie horaires moyens (quasi stables), et Q_L et W_{el} sont les transferts d'énergie horaires totaux (c.à.d. le total des pertes de chaleur et de la consommation d'électricité).

Heure #	()	(W)	(W)	(kWh)	(kWh)
1	-12	3720	3720	3.72	3.72
2	-14	3840	3840	3.84	3.84
3	-16	3960	3960	3.96	3.96
4	-18	4080	4080	4.08	4.08
5	-18	4080	4080	4.08	4.08
6	-19	4140	4140	4.14	4.14
---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---
8755	-6	3360	3360	3.36	3.36
8756	-6	3360	3360	3.36	3.36
8757	-6	3360	3360	3.36	3.36
8758	-7	3420	3420	3.42	3.42
8759	-8	3480	3480	3.48	3.48
8760	-9	3540	3540	3.54	3.54
<i>Total</i>	-	-	-	$\approx 22,372$	$\approx 22,372$

Le taux de perte de chaleur horaire moyen (\dot{Q}_L) est la **charge** horaire du système de chauffage. Le graphique ci-dessous représente la charge horaire moyenne pour les six premières heures. La hauteur du "rectangle" de chaque heure correspond à l'ampleur de la charge horaire (kW). La largeur de chaque rectangle est la durée du pas de temps (1 heure), et la surface de chaque rectangle est le transfert d'énergie horaire total (kWh).



Étendons maintenant le graphique pour montrer les charges horaires pour environ deux semaines de simulation (350 heures \approx 14,5 jours). Le graphique de la page suivante fournit ces données, mais il ne montre que la partie supérieure du rectangle de chaque heure. La largeur de chaque rectangle est très faible par rapport à la durée totale considérée et les données commencent à ressembler davantage à une courbe lisse (plutôt qu'à des rectangles).



L'énergie totale transférée est l'aire sous la courbe :

$$E = \int \dot{E}(t) \cdot dt$$

Dans le cas de nos données, on peut également l'exprimer de la manière suivante :

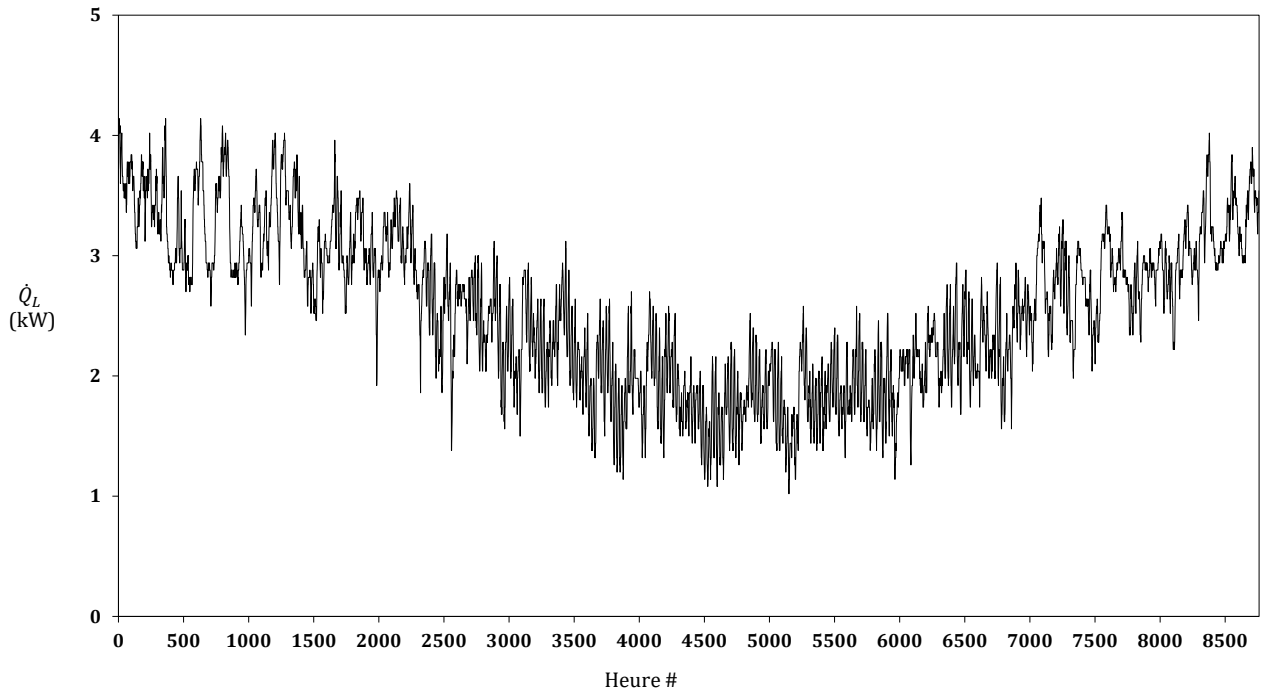
$$E = \sum (\dot{E} \cdot \Delta t)$$

Cette dernière version de l'équation est la méthode utilisée dans le tableau de la page précédente pour déterminer le total annuel des pertes de chaleur et de la consommation d'électricité.

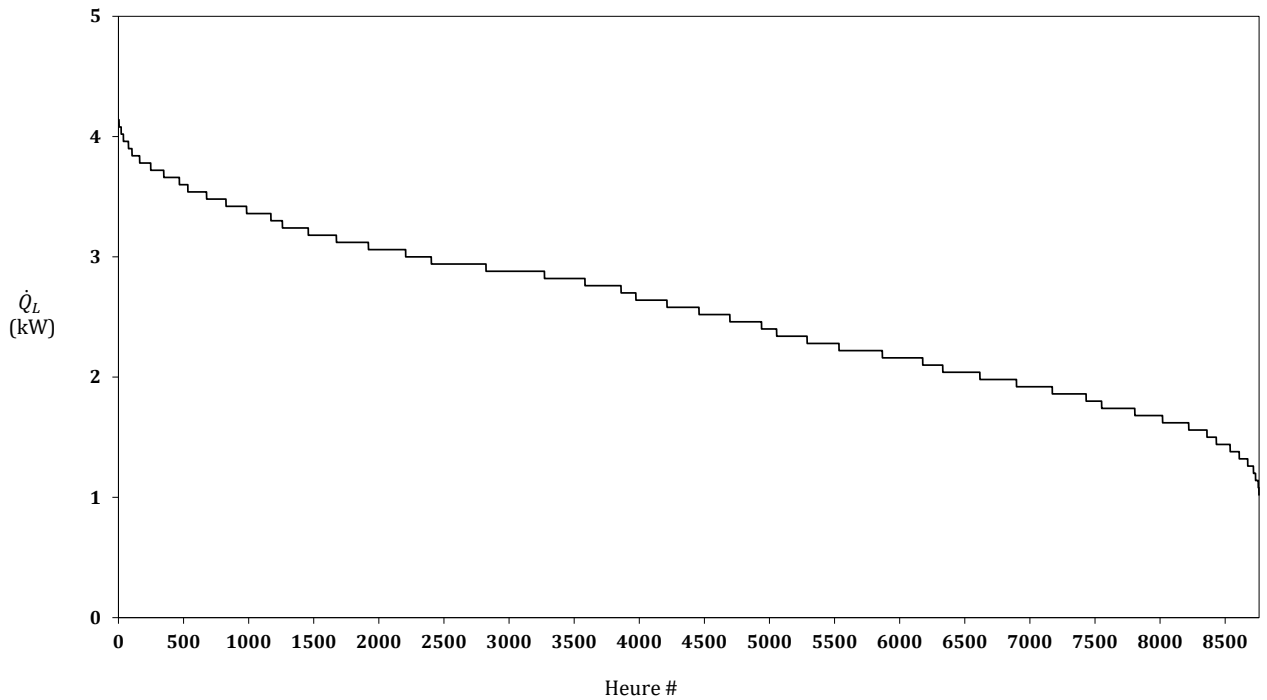
Nous allons maintenant étendre le graphique à une année entière. La page suivante contient deux graphiques représentant chacun 8760 heures de données. Le premier graphique présente les données chronologiquement (c.à.d. telles qu'elles ont été simulées). Le second graphique présente le même ensemble de données, mais triées de l'heure de la charge la plus élevée à l'heure de la charge la plus faible. Le second graphique est appelé "courbe de durée de charge".

La courbe de durée de charge offre une méthode simple pour montrer la gamme des charges attendues au cours de la période considérée, sans tenir compte de l'occurrence chronologique. En triant les données de cette manière, il est facile d'observer des caractéristiques telles que les charges minimales et maximales, et le nombre d'heures au-dessus ou au-dessous d'un niveau de charge particulier. En outre, l'aire sous la courbe représente toujours la charge annuelle totale (c.à.d. la perte de chaleur) puisque les données sont représentées sous la forme d'un débit d'énergie en fonction du temps.

Charges simulées - Chronologique

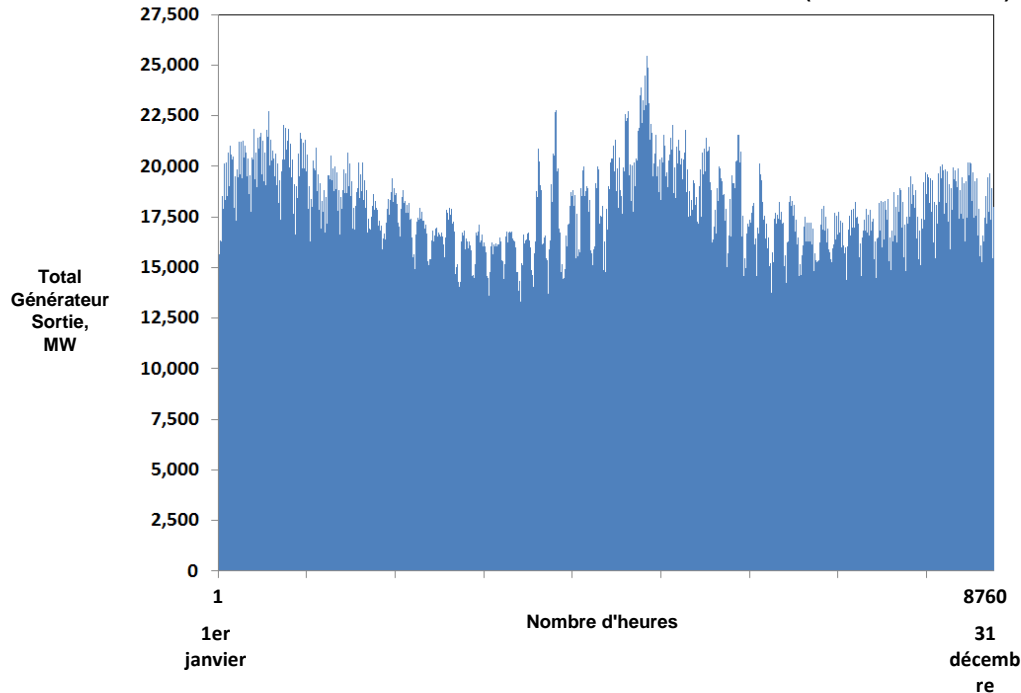


Charges simulées - Courbe de durée de charge

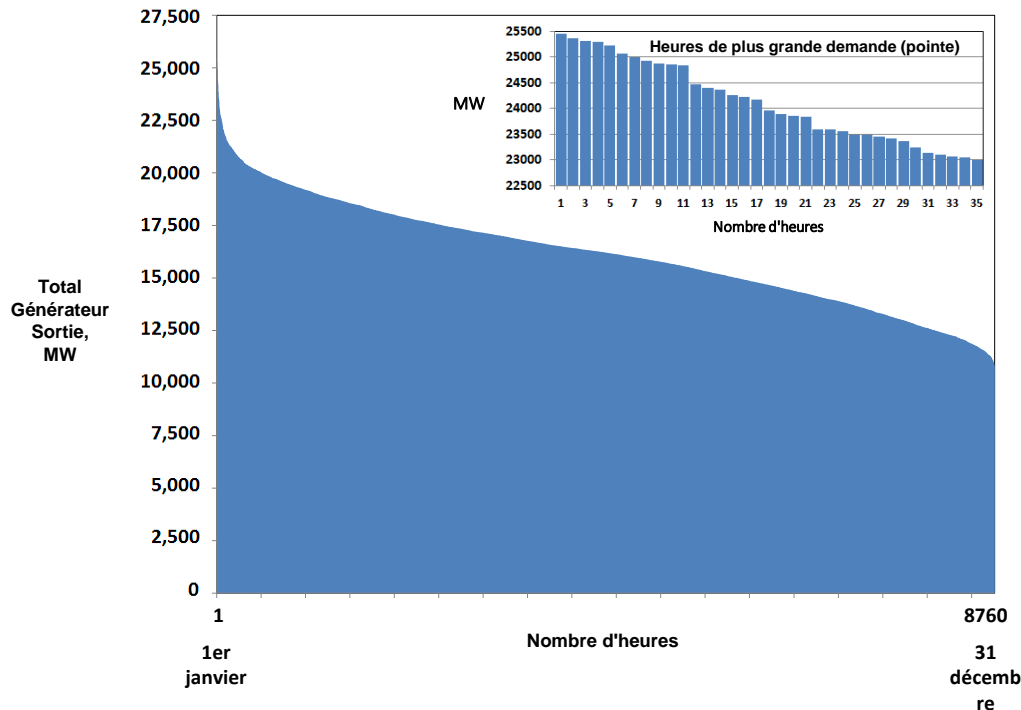


Un autre exemple de données est fourni dans les graphiques ci-dessous : la moyenne horaire de la production d'électricité pour le réseau électrique de l'Ontario en 2011 (c.à.d. la production combinée de tous les générateurs situés en Ontario, qui alimentent le réseau électrique de l'Ontario). (c.à.d. la production combinée de tous les générateurs situés en Ontario et alimentant le réseau électrique de l'Ontario). Dans ces graphiques, les rectangles sont "remplis". L'utilité de présenter les données sous la forme d'une courbe de durée de charge sera examinée dans la section suivante.

DEMANDE MOYENNE HORAIRE SUR LE RÉSEAU DE L'ONTARIO (CHRONOLOGIQUE) - 2011



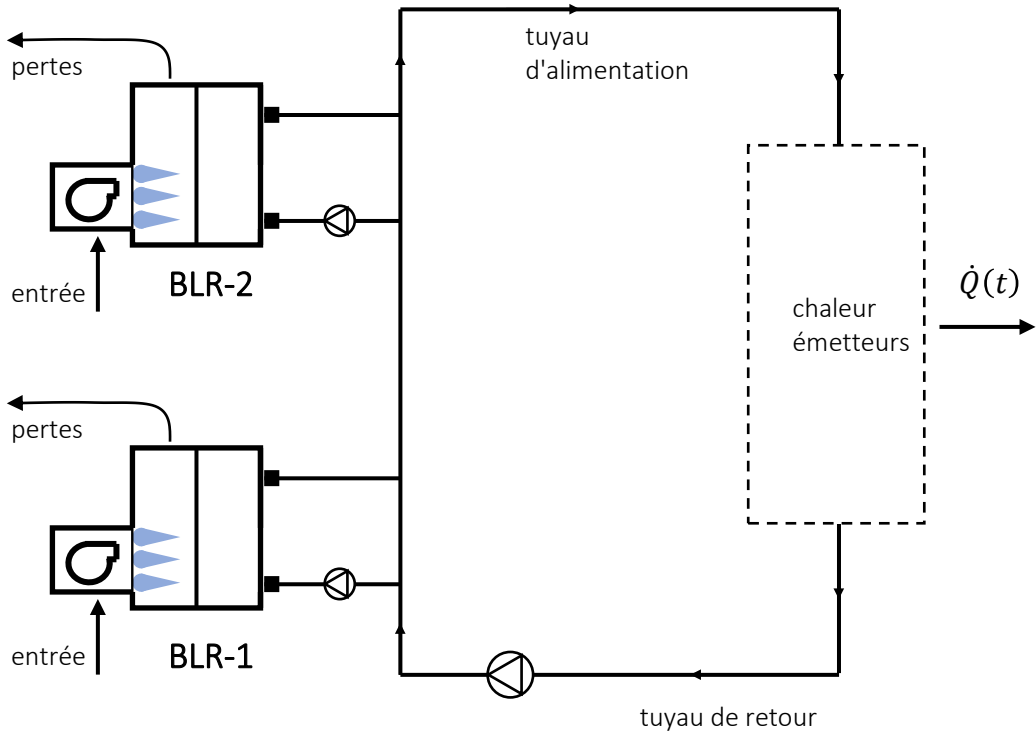
DEMANDE MOYENNE HORAIRE SUR LE RÉSEAU DE L'ONTARIO (COURBE DE DURÉE DE CHARGE) - 2011



3. Application d'une courbe de durée de charge dans un processus de conception

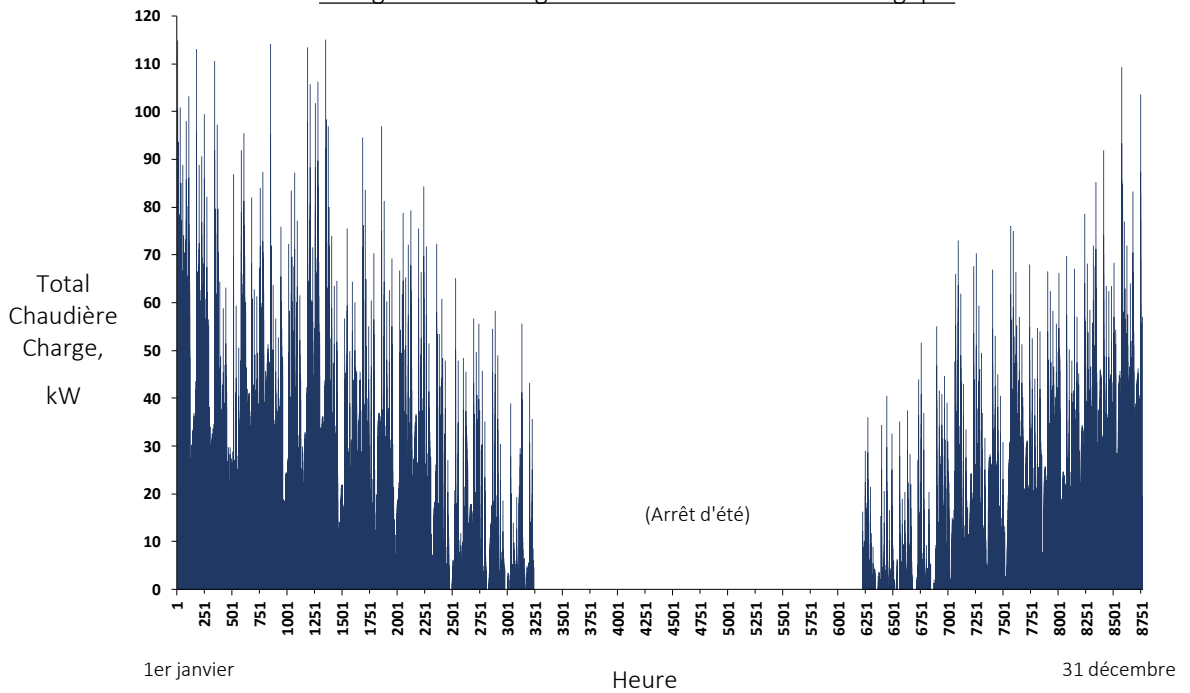
Considérons le processus de conception d'un système de chauffage hydronique pour un bâtiment commercial. Supposons que le système comprenne deux chaudières de capacité identique. Une représentation simplifiée de ce système est fournie ci-dessous, avec les nombreux dispositifs d'émission de chaleur (situés autour du bâtiment) représentés comme un point unique de prélèvement de chaleur dans la boucle.

Notez la similitude du système ci-dessous avec l'exemple du "réservoir chauffé" avec chauffage externe (EA2, section 2), mais il y a maintenant deux sources de chaleur (c.à.d. BLR-1 et BLR-2).

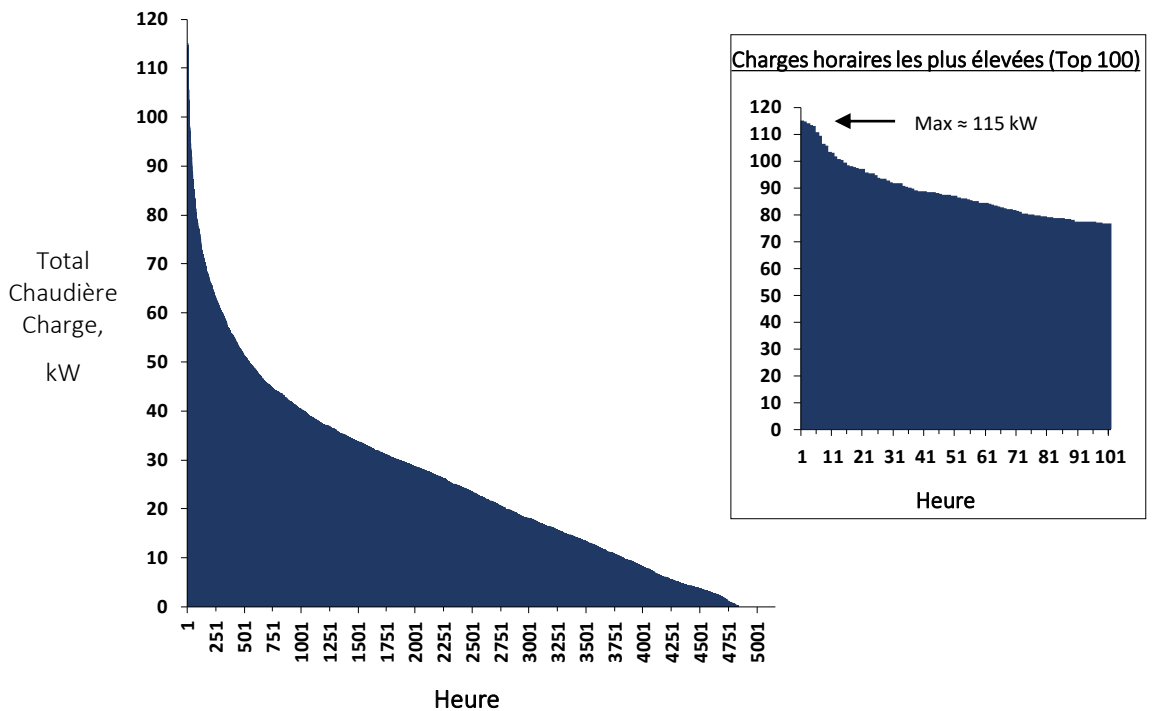


Supposons qu'une simulation énergétique détaillée, heure par heure, du bâtiment ait été réalisée dans deux buts : i) prévoir la demande de chaleur de pointe du système de chaudière, et ii) prévoir les charges horaires pour toute la saison de chauffage afin d'estimer un profil de charge saisonnier (c.à.d. une courbe de durée de la charge). Les graphiques de la page suivante montrent les résultats de la simulation, le graphique supérieur montrant la charge totale heure par heure (chronologiquement) et le graphique inférieur montrant les mêmes données mais sous la forme d'une courbe de durée de charge.

Charges de chauffage horaires simulées - Chronologique



Charges de chauffage horaires simulées - Courbe de durée de la charge



Les résultats de la simulation indiquent une charge de pointe de la chaudière d'environ 115 kW (charge totale).

Supposons qu'il soit décidé que les chaudières seront choisies de manière à ce que chacune ait une capacité de 60 kW, ce qui donne une capacité totale de 120 kW. (Remarque : on peut admettre que cette sélection n'offre pas beaucoup de marge de sécurité/de surdimensionnement, mais cet aspect de la conception n'est pas essentiel pour la présente discussion et pourra être réexaminé ultérieurement).

Disons qu'il y a deux modèles différents de chaudières de 60 kW à prendre en considération, dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Type	Capacité	Estimation Efficacité saisonnière	Coût du capital
Modèle A	60 kW	80%	\$5000
Modèle B	60 kW	90%	\$8000

Autres informations :

gaz naturel : contenu thermique $\approx 37,8 \text{ MJ/m}^3$, coût = $0,30 \text{ \$/m}^3$

Une question :

Est-ce un bon investissement de choisir le modèle B de chaudière plutôt que le modèle A ?

Pour répondre à cette question dans le cas d'un système comportant plusieurs appareils (en parallèle) desservant la charge, il faut examiner comment ils seront "séquencés" (p. ex., comment sont-ils contrôlés pour déterminer quand chaque chaudière doit s'allumer).

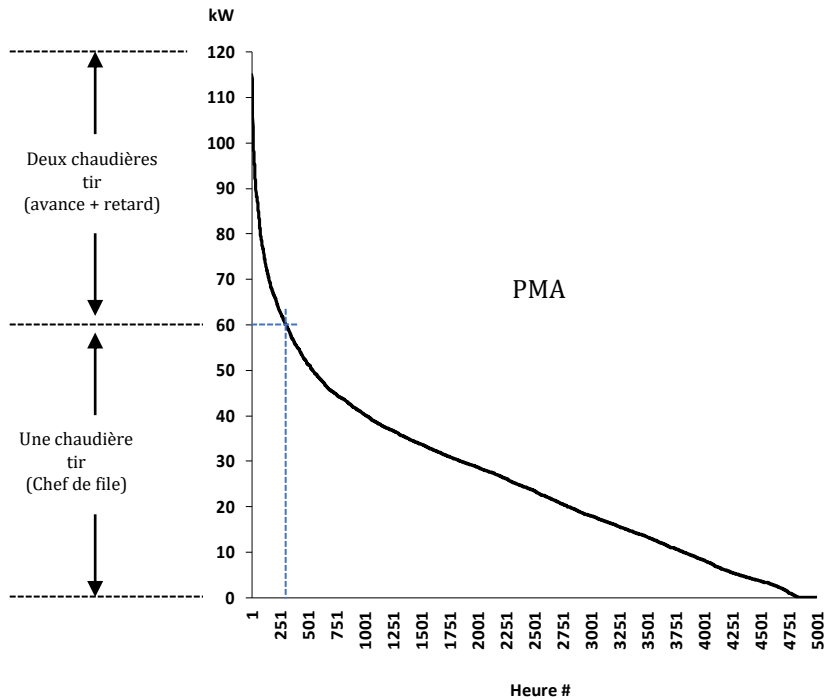
Sur la base de deux chaudières de 60 kW :

- Une chaudière fonctionnant seule peut couvrir une charge allant jusqu'à 60 kW.
- Si la charge totale est $>60 \text{ kW}$, les deux chaudières doivent fonctionner.

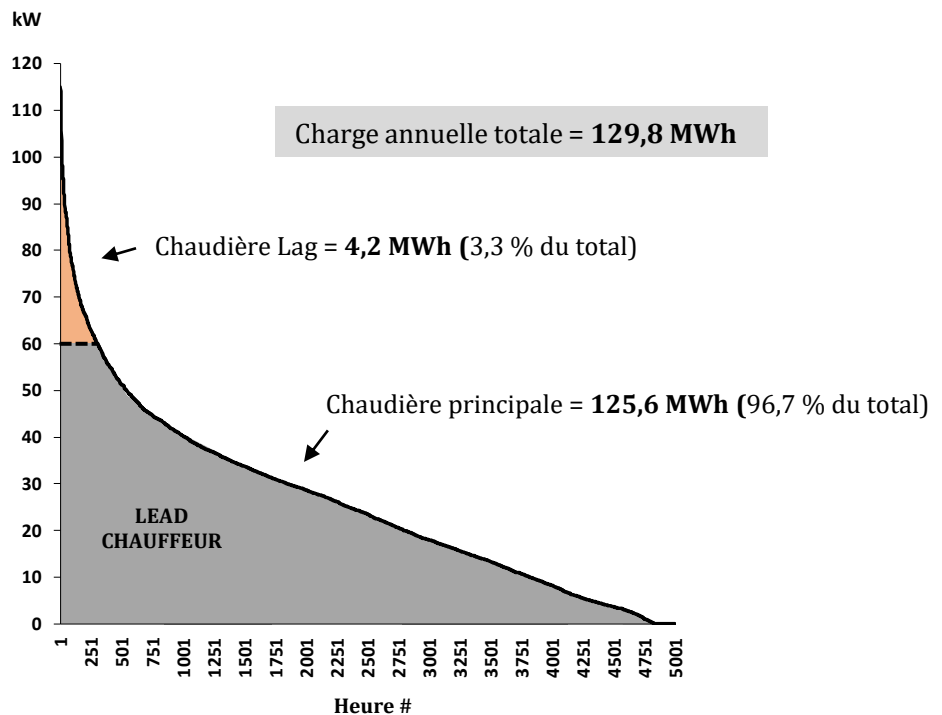
Dites que l'opération "Lead-Lag" a été utilisée :

Chaudière LEAD : S'allume en premier.

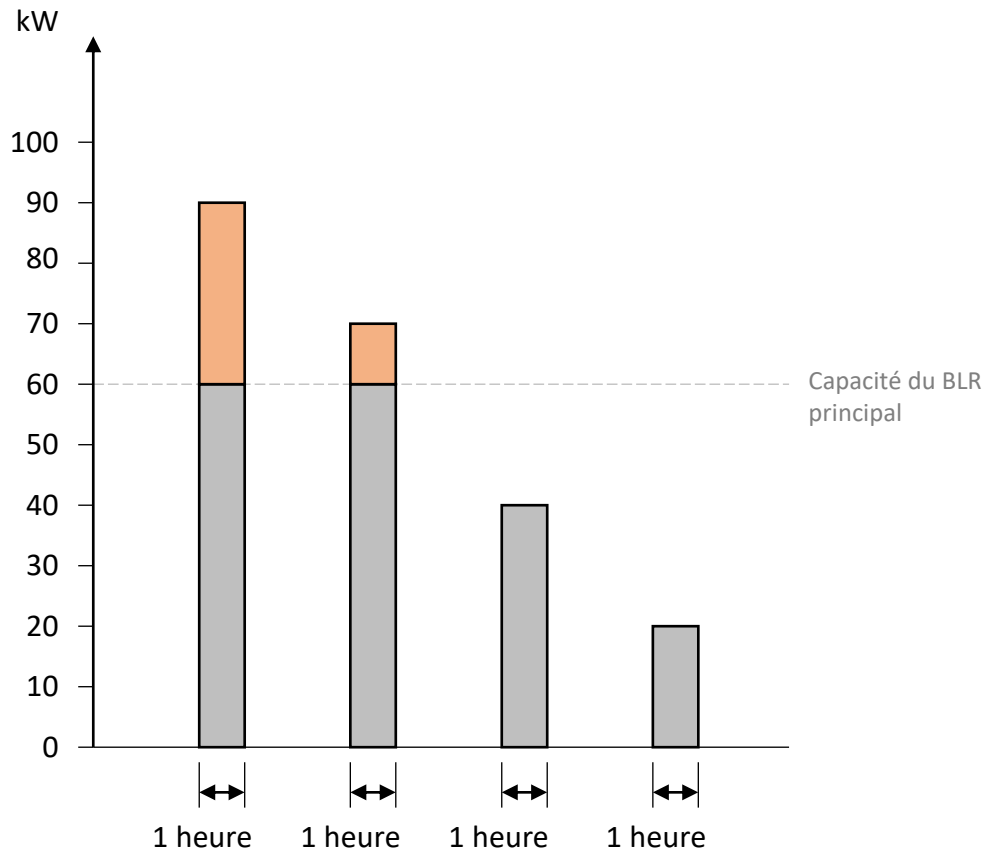
Chaudière LAG : s'allume lorsque la chaudière Lead ne peut pas répondre seule à la charge.



Disons qu'en analysant les données de simulation horaire (p. ex., contenues dans une feuille de calcul), on détermine ce qui suit :



Se concentrer sur l'exemple des heures individuelles :



Charge horaire totale	90 kW	70 kW	40 kW	20 kW
Plomb BLR Charge	60 kW	60 kW	40 kW	20 kW
Lag BLR Load	30 kW	10 kW	0 kW	0 kW
Rendement horaire de la BLR principale	60 kWh	60 kWh	40 kWh	20 kWh
Lag BLR Sortie horaire	30 kWh	10 kWh	0 kWh	0 kWh
Production horaire totale	90 kWh	70 kWh	40 kWh	20 kWh

Analyse coûts-avantages :

Charge annuelle de la chaudière à plomb = 125,6 MWh = 452 160 MJ

Charge annuelle de la chaudière Lag = 4,2 MWh = 15 120 MJ

Gaz naturel : Contenu thermique $\approx 37,8 \text{ MJ/m}^3$ Coût = $0,30 \text{ \$/m}^3$

Conception Scénario	Chaudière	Modèle	Saisonnier Efficacité	Coût du capital de l'équipement	Annuel Coût du carburant	Coût marginal du capital	Carburant annuel Réduction des coûts	Période de récupération simple (années)
1	Plomb	A	80%	\$5000	\$4486	-	-	-
	Lag	A	80%	\$5000	\$150	-	-	-
	Total	-	-	\$10000	\$4636	-	-	-
2	Plomb	B	90%	\$8000	\$3987	\$3000	\$498	6.0
	Lag	B	90%	\$8000				
	Total	-	-	\$16000				
3	Plomb	B	90%	\$8000				
	Lag	A	80%	\$5000				
	Total	-	-	\$13000				

Êtes-vous en mesure de compléter la valeur manquante dans ce tableau ? (c.à.d. les cellules en jaune)

Le tableau complété se trouve à la page suivante. Quelle est, selon vous, la meilleure option de conception ?

Conception Scénario	Chaudière	Modèle	Saisonnier Efficacité	Coût du capital de l'équipement	Annuel Coût du carburant	Coût marginal du capital	Carburant annuel Réduction des coûts	Période de récupération simple (années)
1	Plomb	A	80%	\$5000	\$4486	-	-	-
	Lag	A	80%	\$5000	\$150	-	-	-
	Total	-	-	\$10000	\$4636	-	-	-
2	Plomb	B	90%	\$8000	\$3987	\$3000	\$498	6.0
	Lag	B	90%	\$8000	\$133	\$3000	\$17	180
	Total	-	-	\$16000	\$4121	\$6000	\$515	11.6
3	Plomb	B	90%	\$8000	\$3987	\$3000	\$498	6.0
	Lag	A	80%	\$5000	\$150	\$0	\$0	N/A
	Total	-	-	\$13000	\$4137	\$3000	\$498	6.0

Réfléchissez : Supposons que l'on décide que la capacité totale = 120 kW n'offre pas un facteur de sécurité suffisant pour la charge de pointe prévue = 115 kW ?

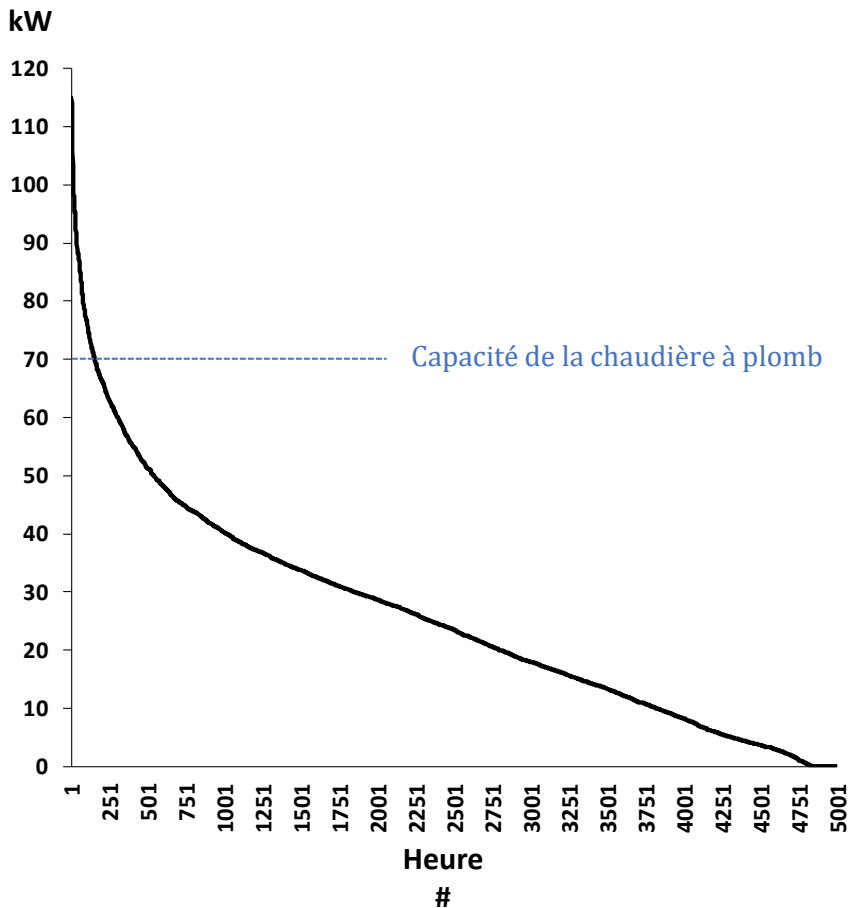
$$\frac{\text{provided capacity}}{\text{predicted peak}} = \frac{120 \text{ kW}}{115 \text{ kW}} = 104\% \quad (\text{i.e. } 4\% \text{ oversizing})$$

Que se passe-t-il si l'on souhaite surdimensionner de 20 % ?

Nous pourrions choisir 2 x 70 kW = 140 kW

$$\frac{140 \text{ kW}}{115 \text{ kW}} = 122\%$$

Quel serait l'impact de ce changement sur la part de la charge saisonnière pouvant être couverte par une seule chaudière (c.à.d. la chaudière principale) ?



4. Estimation du rendement horaire moyen à charge partielle

Dans les simulations horaires, une technique courante pour prédire la consommation d'énergie horaire d'un appareil dont l'efficacité dépend fortement de la charge consiste à appliquer un facteur de correction de l'efficacité en cas de charge partielle.

p. ex., pour estimer la consommation d'énergie d'une chaudière pendant une heure donnée (c.à.d. un pas de temps), la charge horaire estimée et le rendement horaire estimé sont nécessaires.

$$E_f = \frac{Q_{HL}}{\eta}$$

E_f = l'énergie d'entrée estimée (combustible) pour l'heure considérée

Q_{HL} = la charge moyenne estimée de l'appareil (c.à.d. la puissance requise) pour l'heure considérée

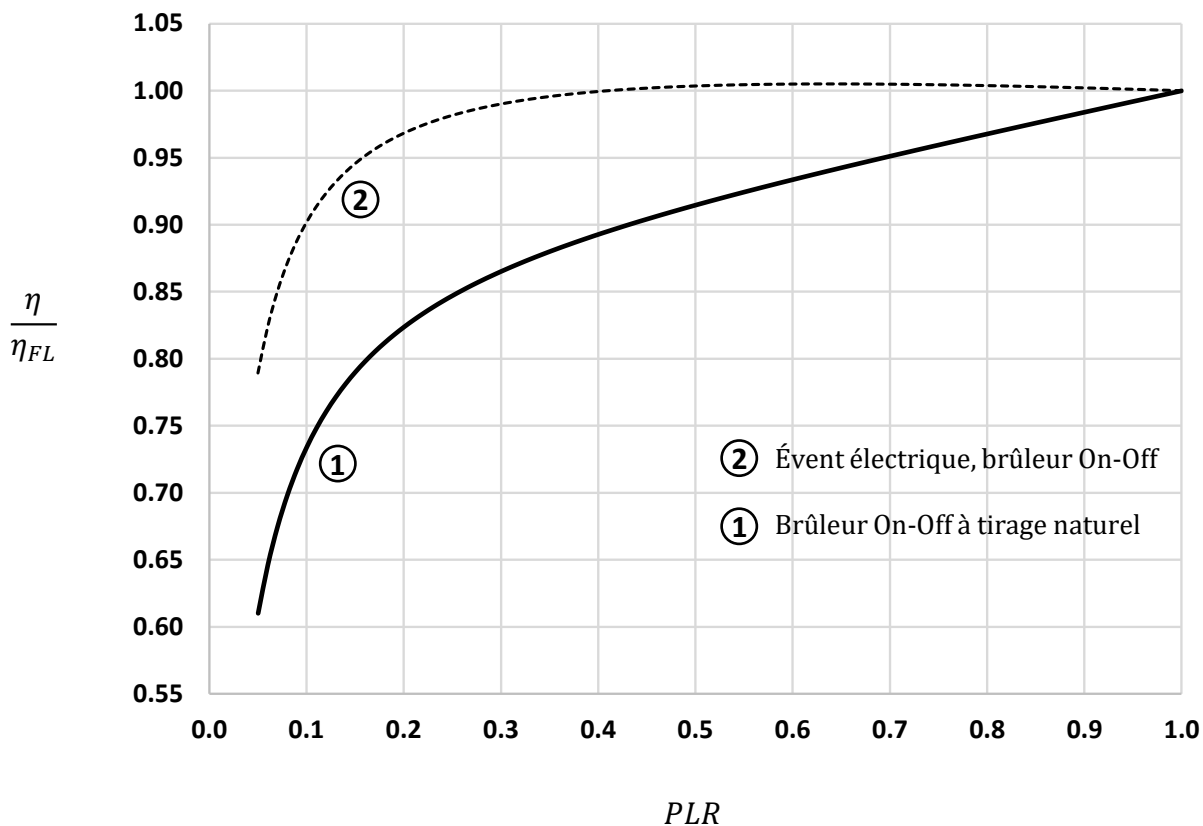
η = l'efficacité moyenne estimée pour l'heure considérée

Il est courant que le rendement horaire soit calculé sur la base du taux horaire de charge partielle (PLR) et du rendement nominal (p. ex., le rendement à pleine charge en régime permanent) de l'appareil.

le taux de charge partielle horaire : $PLR = \frac{Q_{HL}}{Q_{FL}} = \frac{\text{load during hour considered}}{\text{capacity}}$

p. ex., le graphique de la page suivante présente des courbes génériques de correction du rendement à charge partielle pour deux types de chaudières, basées sur les données du logiciel de simulation horaire "eQUEST". L'une des courbes est destinée à simuler une chaudière à tirage naturel avec brûleur tout ou rien, et l'autre une chaudière à ventilation assistée avec brûleur tout ou rien.

Exemple de courbes de correction de l'efficacité des chaudières à charge partielle



$$\frac{\eta}{\eta_{FL}} = \frac{PLR}{A + B \cdot PLR + C \cdot PLR^2}$$

① $A = 0.027, \quad B = 1.1055, \quad C = -0.1325$

② $A = 0.016, \quad B = 0.945, \quad C = 0.03905$

Exemple de calcul

Considérons une chaudière dont les performances à charge partielle sont similaires à la courbe 1 de la page précédente. La chaudière a une capacité nominale de 500 kW et un rendement nominal de 80 %. Le brûleur est en mode tout ou rien.

Estimez la consommation d'énergie pour une heure où la charge moyenne est de 200 kW.

$$PLR = \frac{\text{load}}{\text{capacity}} = \frac{200 \text{ kW}}{500 \text{ kW}} = 0.4$$

$$\frac{\eta}{\eta_{FL}} \approx 0.89$$

$$\eta = \left(\frac{\eta}{\eta_{FL}} \right) \cdot \eta_{FL} = (0.89)(80\%) \approx 71\%$$

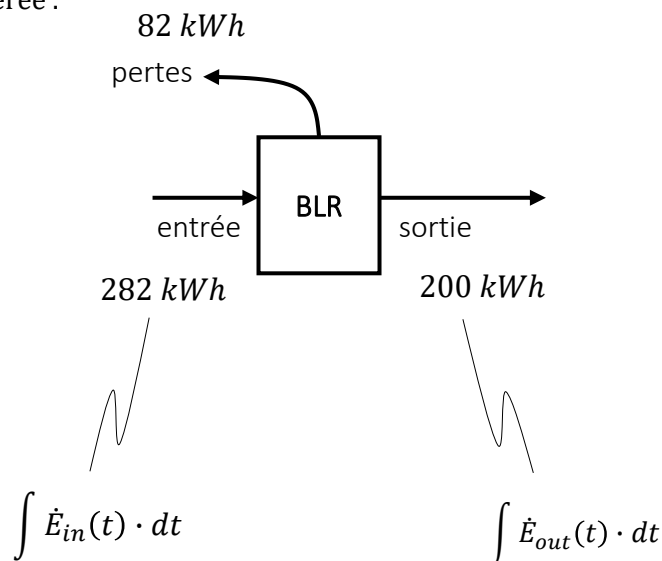
$$E_{out} = \dot{Q}_{HL} \cdot \Delta t = (200 \text{ kW})(1 \text{ hr}) = 200 \text{ kWh}$$

(charge horaire totale)

$$E_{in} = E_{out} / \eta = (200 \text{ kWh}) / 0.71 = 282 \text{ kWh}$$

(consommation horaire totale de carburant)

Pour l'heure considérée :



Remarque :

À partir des informations fournies dans l'exemple, nous pouvons estimer la fraction de temps de fonctionnement du brûleur pour l'heure considérée.

Puissance nominale (puissance en régime permanent) :

$$\dot{Q}_{FL} = 500 \text{ kW}$$

Rendement nominal (rendement en régime permanent) :

$$\eta_{FL} = 80\%$$

Par conséquent, l'apport nominal (au brûleur) est de :

$$\dot{E}_{fuel} = \frac{\dot{Q}_{FL}}{\eta_{FL}} = \frac{500 \text{ kW}}{80\%} = 625 \text{ kW}$$

Il s'agit du débit d'énergie fourni au brûleur lorsqu'il est en marche (allumage). Comme il s'agit d'un brûleur tout ou rien, l'autre état possible est l'arrêt (0 kW).

Pendant combien de temps un appareil qui consomme de l'énergie à raison de 625 kW doit-il fonctionner pour consommer 282 kWh ?

$$\Delta t_{on} = \frac{282 \text{ kWh}}{625 \text{ kW}} = 0.45 \text{ hr} = 27 \text{ min}$$

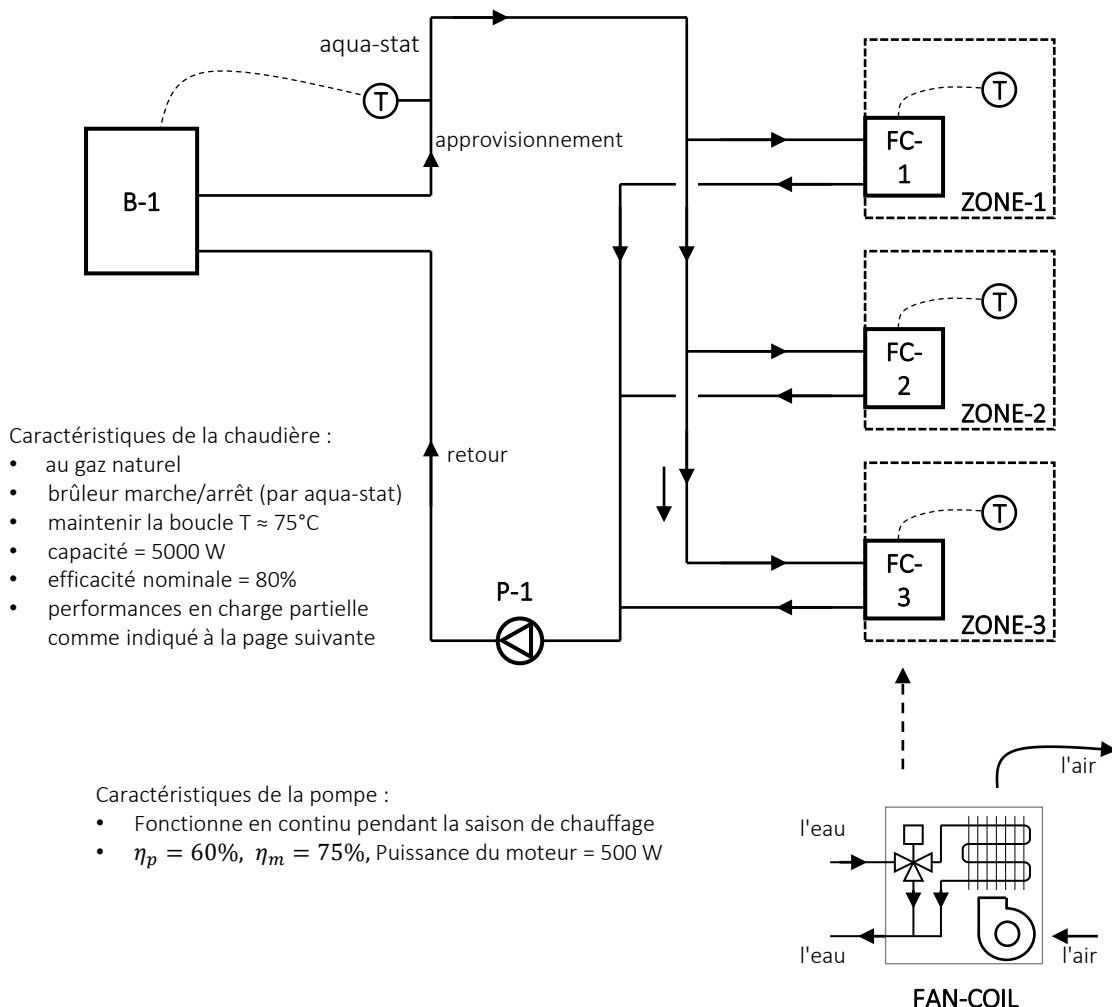
Le est le temps de présence total accumulé pendant l'heure considérée. Ainsi, la fraction de temps de présence est :

$$f_{on} = \frac{0.45 \text{ hr}}{1 \text{ hr}} = 45\%$$

5. Exemple d'étape temporelle de la "pseudo-simulation" (partie A)

Cette section et la suivante examinent un exemple de calcul de la consommation d'énergie d'un système de chauffage hydronique pour un pas de temps d'une heure. Les calculs sont *similaires* à ceux qui pourraient être effectués par un logiciel de simulation, c'est pourquoi cette section est décrite comme une "pseudo-simulation".

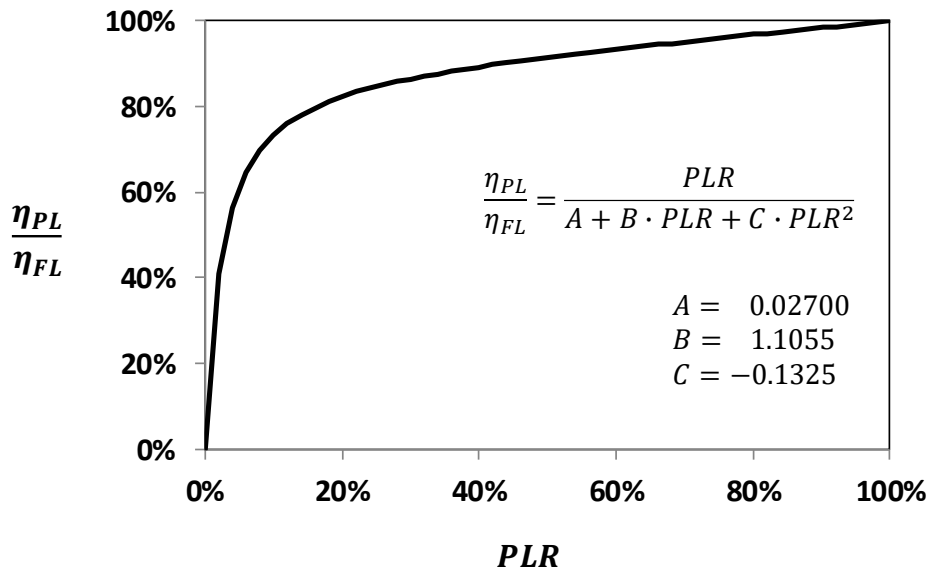
Prenons l'exemple d'une simulation réalisée dans le cadre de la conception d'un système de chauffage hydronique. Un schéma simplifié est présenté ci-dessous. Des ventilo-convecteurs sont utilisés comme dispositifs terminaux de chauffage dans trois zones thermiques. Nous supposons que des choix préliminaires ont été faits pour les ventilo-convecteurs, la chaudière et la pompe, et que les détails affectant les pertes/gains de chaleur par zone sont connus. La simulation sera utilisée pour estimer la consommation annuelle d'énergie du système.



Caractéristiques des ventilo-convecteurs :

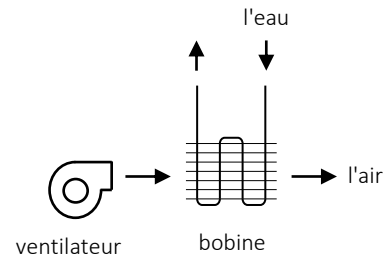
- commande marche/arrêt par T-stat
- bobine : 2000 W @ EWT=75°C, EAT=21°C
- moteur du ventilateur : 150 W d'entrée

Chaudière à charge partielle horaire Courbe d'ajustement de l'efficacité



Fan-Coil :

Ce terme est utilisé ici pour désigner un petit dispositif (situé dans la zone) contenant un serpentin hydronique et un ventilateur. Lorsque le t-stat de la zone demande de la chaleur, le ventilateur fonctionne et la chaleur est transférée de l'eau chaude circulant dans le serpentin à l'air de la zone.

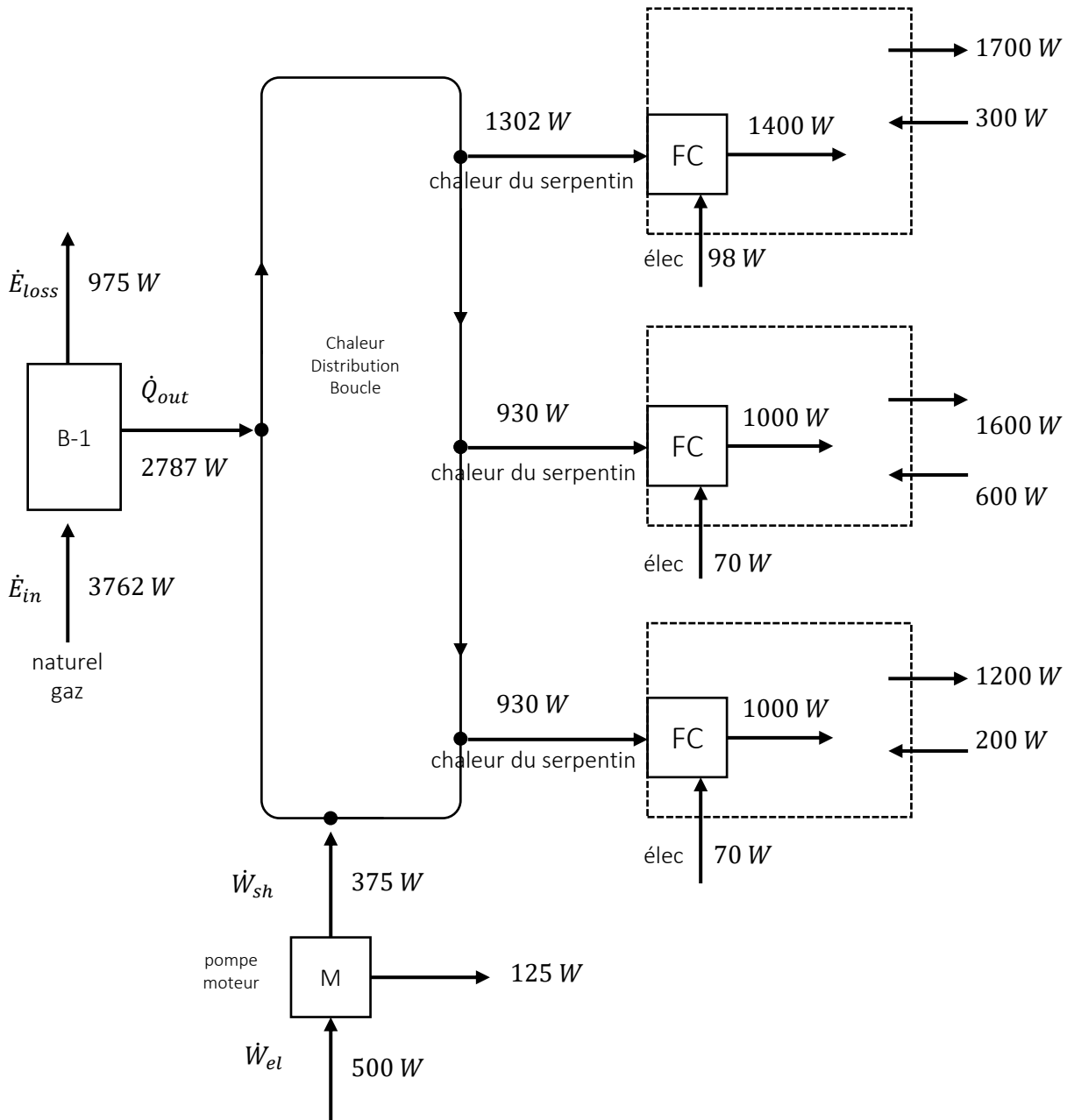


CABINET UNIT HEATER STANDARD FEATURES

- Adjustable wall seal to suit recessing requirements.
- Copper Aluminum coil for steam or hot water.
- Support bracket to wall.
- Whisper quiet blowers.
- Cabinet finish neutral eggshell baked powder.
- Leveling legs optional.
- 16-Gauge steel front panel with insulation, standard.
- Permanent washable filter, aluminum fiber media.
- Motors - Permanent split capacitor.
- Outside air knockout provided standard on "F" and "FS" models.

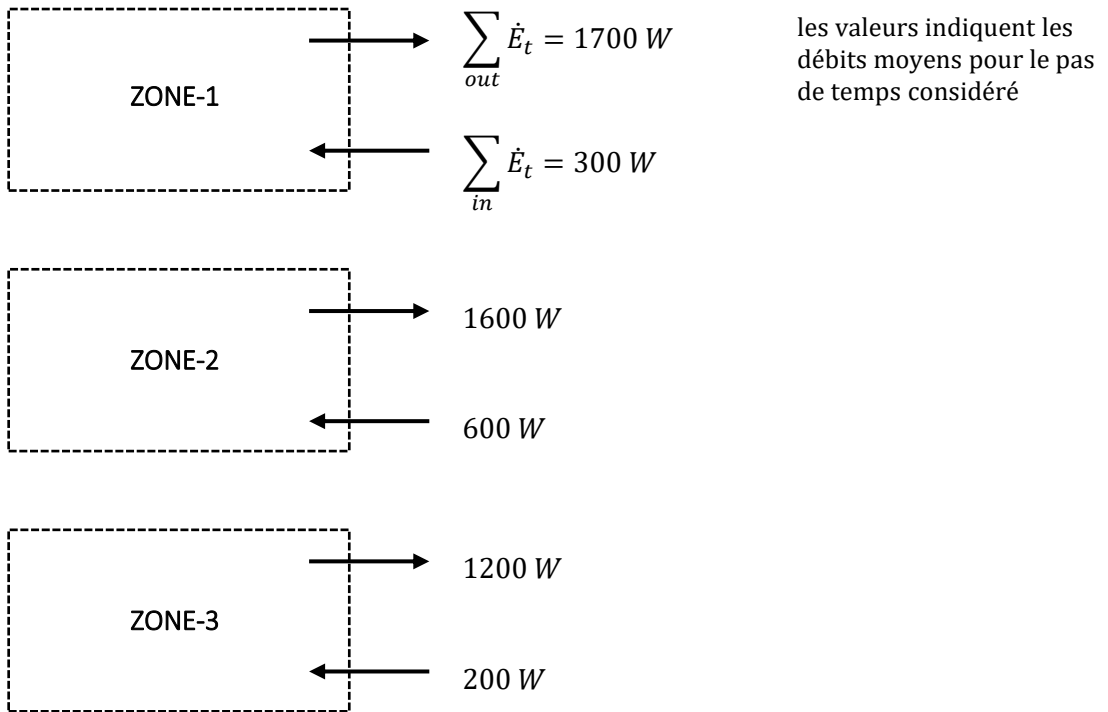
Un aperçu du résultat :

Notre objectif sera d'élaborer un diagramme de flux d'énergie montrant les taux moyens de flux d'énergie à travers le système pendant l'heure (pas de temps) considérée.



Suivant : L'analyse pas à pas...

Pour le pas de temps considéré, supposons que les composantes des gains et des pertes de chaleur ont déjà été calculées pour chaque zone. (Dans cette analyse, nous voulons nous concentrer sur le calcul de la consommation d'énergie du système de chauffage pour répondre à la charge).



La production moyenne d'énergie nécessaire à chaque ventilo-convecteur doit être apparente (c.à.d. par bilan énergétique, en supposant que nous voulons maintenir un "état stable" dans chaque zone).

p. ex., Zone 1 : Perte nette = 1400 W (sur la base des gains totaux et des pertes totales indiqués ci-dessus).

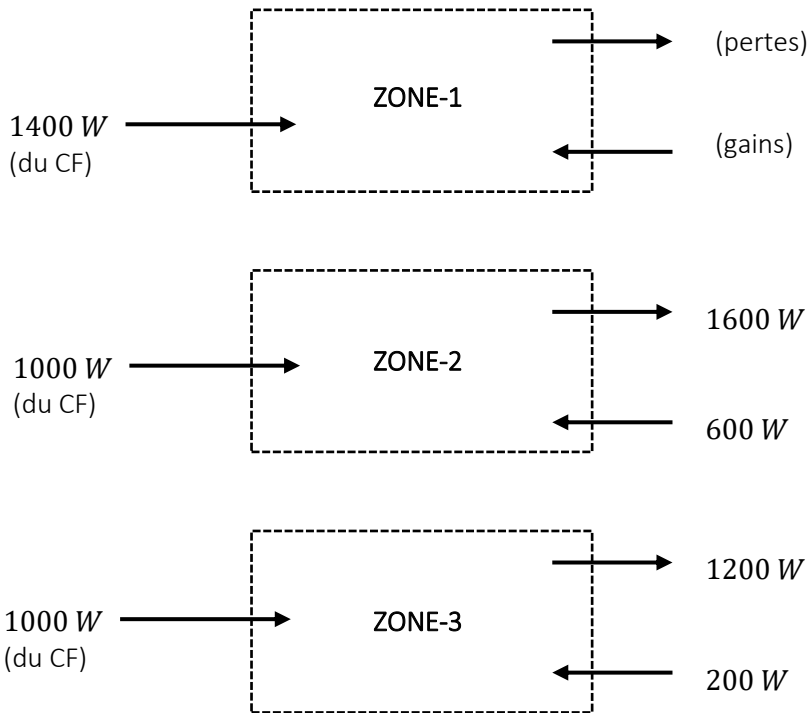
∴ L'ajout de 1400 W de chaleur par le ventilo-convecteur assure l'équilibre.

Zone 1 : charge de chauffage = 1400 W

Zone 2 : charge de chauffage = 1000 W

Zone 3 : charge de chauffage = 1000 W

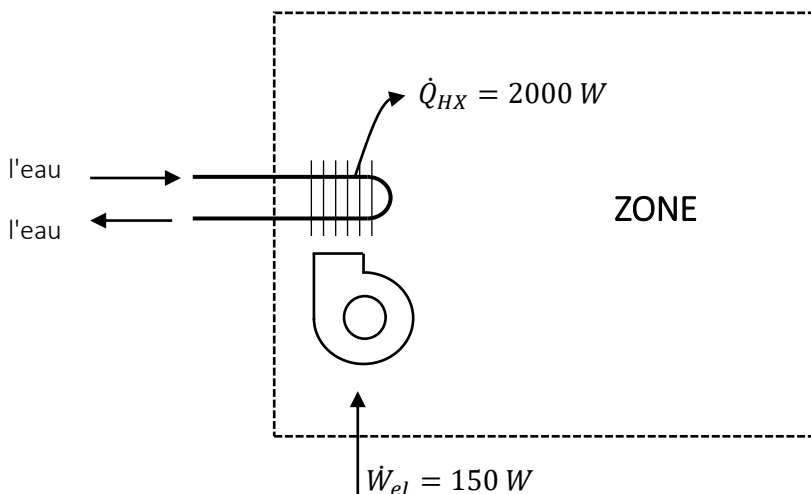
Il s'agit de la charge calculée pour chaque ventilo-convecteur. L'étape suivante consiste à calculer les flux d'énergie vers chaque ventilo-convecteur pour répondre à la charge.



En fonction des caractéristiques du ventilo-convecteur :

Lorsqu'un ventilo-convecteur fonctionne, le transfert de chaleur à partir de la boucle hydronique est de 2000 W , et le moteur du ventilateur consomme 150 W . Ainsi, lorsque l'appareil fonctionne, l'énergie totale ajoutée à l'espace est de 2150 W .

(La pièce est un CV qui reçoit 2000 W d'énergie sous forme de chaleur et 150 W sous forme de travail électrique - pendant que le FC fonctionne).



Fonctionnement du ventilo-convecteur

- Chaque unité s'allume et s'éteint (c.à.d. qu'elle est commandée par le T-stat) pour maintenir une température ambiante à peu près stable. La production d'énergie horaire moyenne correspondra à la charge horaire moyenne.
- Utiliser un modèle simple de ventilo-convecteur :

	FC allumer	FC éteindre
chaleur du serpentin	2000 W	0 W
puissance du ventilateur	150 W	0 W
chaleur totale	2150 W	0 W
(On suppose que les effets de "réchauffement" et de "refroidissement" sont négligeables pour cette analyse).		

Zone 1

Déterminer le temps d'exécution FC nécessaire pour répondre à la charge (pour ce pas de temps) en utilisant le concept "PLR".

$$PLR = \frac{load}{capacity}$$

$capacity = 2150 \text{ W}$ (capacité effective)

$load = 1400 \text{ W}$ (pour le pas de temps considéré)

$$PLR = \frac{1400 \text{ W}}{2150 \text{ W}} = 65.1\%$$



Note : Indique la "ponctualité" (%) pour ce pas de temps.

Moyenne horaire des débits d'énergie

puissance du moteur du ventilateur $\dot{W}_{el} = (150 \text{ W})(0.651) + (0 \text{ W})(1 - 0.651) = 98 \text{ W}$

chaleur du serpentin $\dot{Q}_{HX} = (2000 \text{ W})(0.651) + (0 \text{ W})(0.349) = 1302 \text{ W}$

chaleur totale à la zone $\dot{Q} = 1302 \text{ W} + 98 \text{ W} = 1400 \text{ W}$

Zones 2 et 3 Calculs identiques (les charges sont les mêmes).

$$capacity = 2150 \text{ W}$$

$$load = 1000 \text{ W} \quad (\text{pour le pas de temps considéré})$$

$$PLR = \frac{1000 \text{ W}}{2150 \text{ W}} = 46.5\%$$

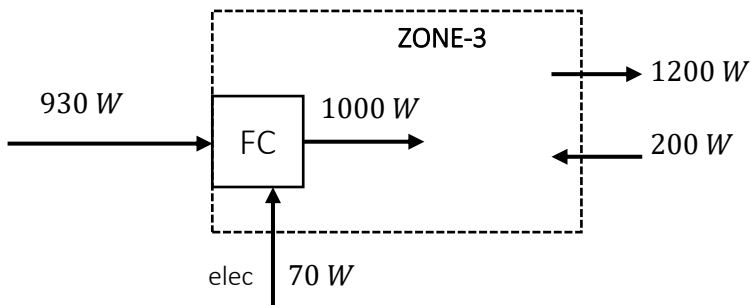
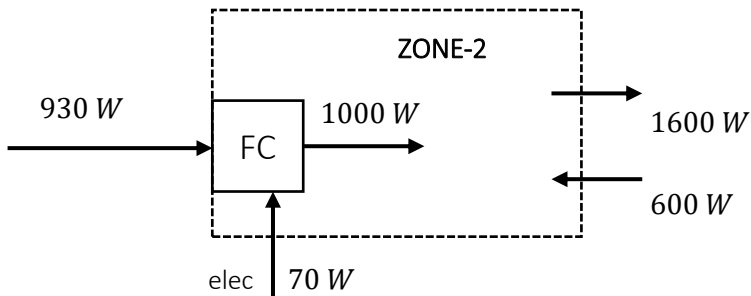
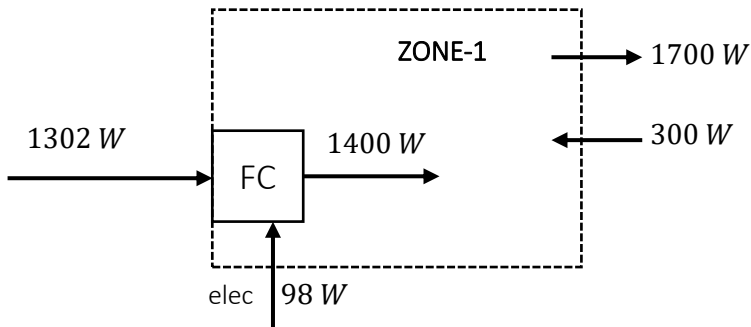
Moyenne horaire des débits d'énergie

$$\text{puissance du moteur du ventilateur} \quad \dot{W}_{el} = (150 \text{ W})(0.465) = 70 \text{ W}$$

$$\text{chaleur du serpentin} \quad \dot{Q}_{HX} = (2000 \text{ W})(0.465) = 930 \text{ W}$$

$$\text{chaleur totale à la zone} \quad \dot{Q} = 930 \text{ W} + 70 \text{ W} = 1000 \text{ W}$$

Résumé des débits d'énergie horaires moyens au niveau de la zone :



Note : Si la consommation horaire moyenne d'électricité des ventilateurs est de 98 W, 70 W et 70 W, leur consommation horaire d'énergie est de :

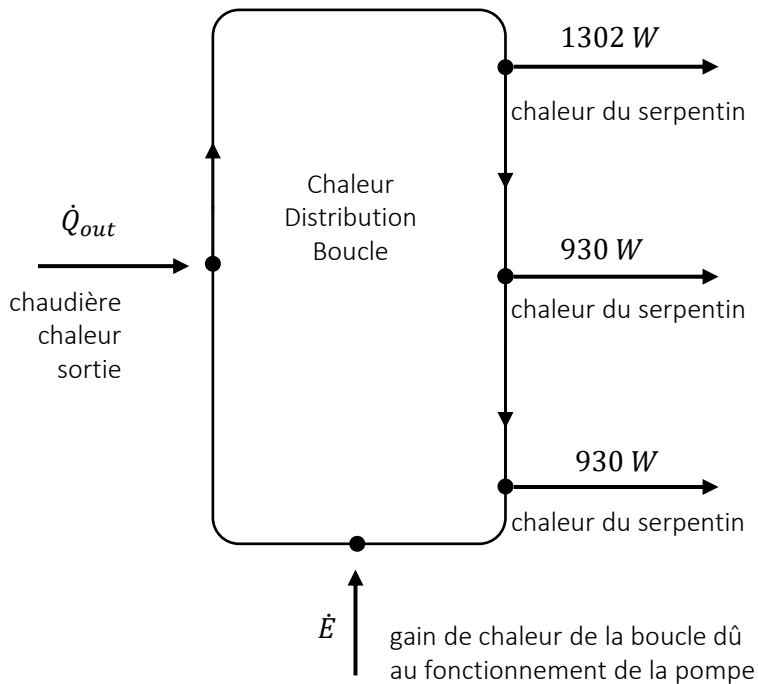
Zone 1: $E = \dot{E} \cdot \Delta t = (98 \text{ W})(1 \text{ hr}) = 98 \text{ Wh} = 0.098 \text{ kWh}$

Zone 2: $70 \text{ Wh} = 0.070 \text{ kWh}$

Zone 3: $70 \text{ Wh} = 0.070 \text{ kWh}$

6. Exemple d'étape temporelle de la "pseudo-simulation" (partie B)

Étape suivante : Tenir compte des flux d'énergie dans la boucle de distribution de chauffage pour déterminer la charge de la chaudière.



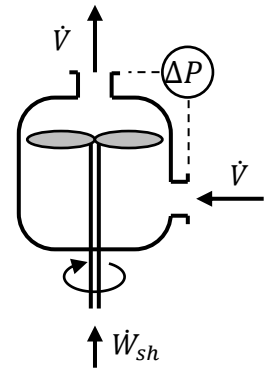
Si nous évaluons le total des gains et des pertes de chaleur, le rôle de la chaudière est de fournir le gain de chaleur supplémentaire nécessaire pour maintenir l'équilibre. (La chaudière s'allumera et s'éteindra en fonction de l'aqua-stat pour maintenir une température de boucle à peu près stable. Nous supposons que le taux horaire moyen de fourniture de chaleur correspondra à la charge horaire moyenne).

Remarque : pour cette analyse, nous supposons qu'il n'y a pas d'autres flux d'énergie significatifs que ceux décrits. (p. ex., nous considérerons que les pertes de chaleur à travers les parois isolées des tuyaux sont négligeables).

La "perte de chaleur" de la boucle due au fonctionnement de chaque serpentin est déjà connue. Nous devons tenir compte du gain de chaleur dû au fonctionnement de la pompe.

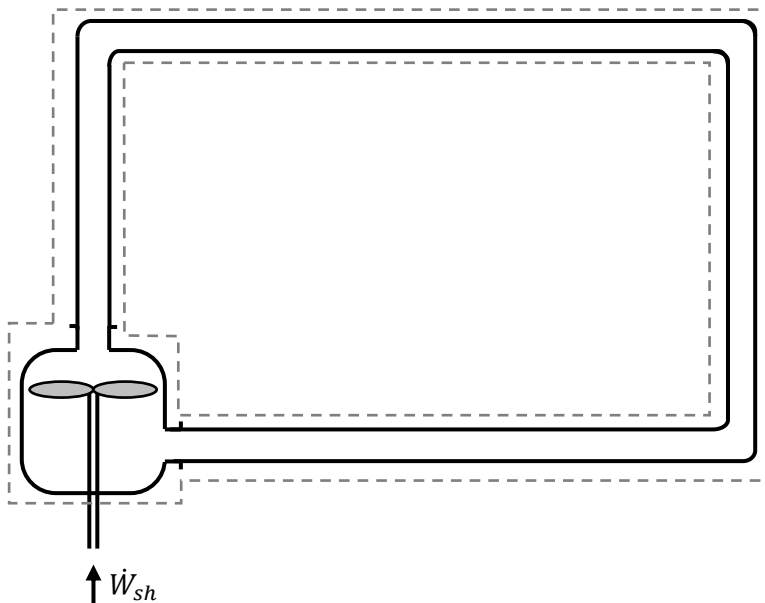
La pompe fonctionne en continu pendant la saison de chauffage. Cela permet d'obtenir un gain de chaleur continu dans la boucle.

Une représentation simplifiée de la pompe elle-même est fournie à droite.



Nous pouvons considérer la puissance de l'arbre fournie à la pompe comme le taux d'ajout d'énergie à la boucle de tuyauterie - il se trouve qu'elle est fournie à la pompe. L'énergie fournie (sous forme de travail) est continuellement convertie en énergie thermique par les pertes de friction du fluide et d'autres effets se produisant lorsque le fluide se déplace dans le circuit de la tuyauterie.

Nous pouvons considérer le circuit de tuyauterie (y compris la pompe) comme un CV, comme le montre la version simplifiée ci-dessous. Supposons que la pompe fonctionne pendant une période où il n'y a pas d'autres flux d'énergie en provenance ou à destination de la boucle. Le flux d'énergie dans le CV est la puissance de l'arbre utilisée pour entraîner la pompe. Si la pompe est arrêtée et que la puissance de l'arbre cesse, la circulation de l'eau s'arrêtera peu après en raison du frottement des fluides. Toute l'énergie fournie par la puissance de l'arbre se trouve toujours "à l'intérieur" du CV, mais elle a été convertie en énergie thermique. Pendant que la pompe fonctionne, ce processus est continu. En outre, il se poursuit même lorsque d'autres transferts d'énergie vers ou depuis la boucle ont lieu (p. ex., lorsque la chaudière ou les ventilo-convecteurs fonctionnent).



Pour notre exemple de calcul, nous disposons des informations suivantes sur la pompe :

$$\eta_p = 60\%,$$

$$\eta_m = 75\%$$

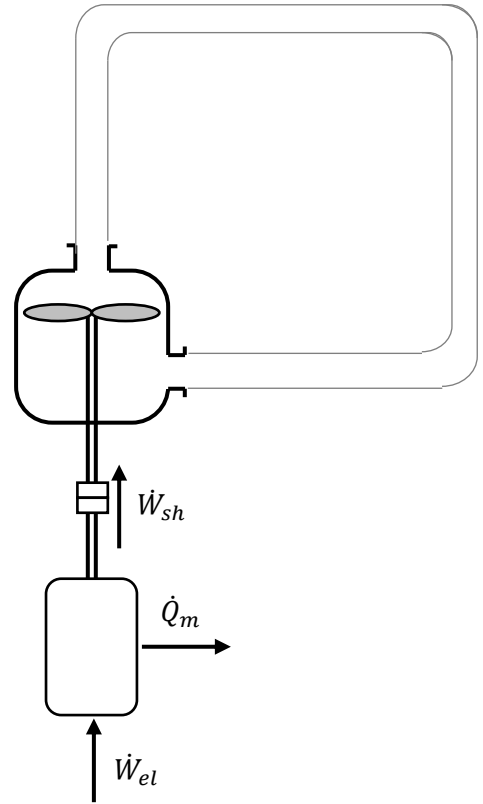
Puissance du moteur = 500 W

Le travail sur l'arbre est :

$$\dot{W}_{sh} = \dot{W}_{el} \cdot \eta_m = (500 \text{ W})(0.75) = 375 \text{ W}$$

La dissipation thermique du moteur est :

$$\dot{Q}_m = \dot{W}_{el} - \dot{W}_{sh} = 500 - 375 = 125 \text{ W}$$

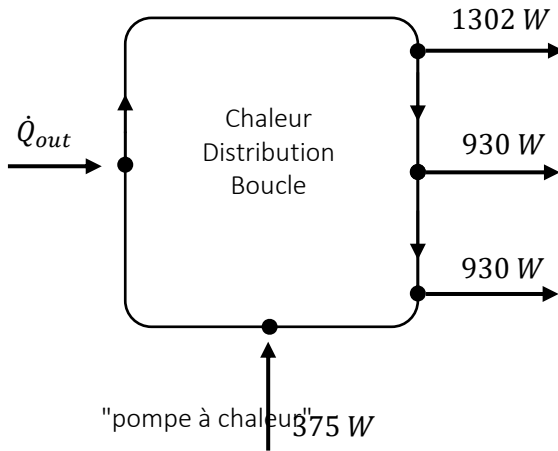


Pour cette analyse, nous ne prendrons que le travail de l'arbre comme taux d'énergie ajouté à la boucle de tuyauterie.

Qu'advient-il de la chaleur dissipée par le moteur ? Cela dépend de l'emplacement physique du moteur. La pompe et le moteur se trouvent probablement dans un local technique. La chaleur dissipée par le moteur finira probablement par constituer un gain de chaleur dans ce local technique (cela n'affecte pas vraiment le bilan énergétique de la boucle hydronique).



Nous pouvons maintenant effectuer le calcul de la charge de la chaudière (pour équilibrer la boucle) :



$$\sum_{out} \dot{E}_t = 3162 \text{ W}$$

$$\sum_{in} \dot{E}_t = 375 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{out} &= \sum_{out} \dot{E}_t - \sum_{in} \dot{E}_t \\ &= 2787 \text{ W} \end{aligned}$$

Nous supposons donc que la commande de la chaudière fonctionnera de manière à ce que le taux de production de chaleur horaire moyen soit de 2787W.

Rappel :

Étape 1 : Calculer la charge de l'équipement = 2787 W ✓

Étape 2 : Calculer l'énergie utilisée pour répondre à la charge

Nous allons maintenant appliquer le modèle d'efficacité à charge partielle de la chaudière pour estimer son taux d'entrée horaire moyen.

Caractéristiques connues de la chaudière :

$$capacité = \dot{Q}_{out,FL} = 5000 \text{ W}$$

$$efficacité nominale = \eta_{FL} = 80\%$$

Pour le pas de temps considéré :

$$load = \dot{Q}_{out} = 2787 \text{ W}$$

$$PLR = \frac{load}{capacity} = \frac{2787 \text{ W}}{5000 \text{ W}} = 0.557$$

Le modèle de correction de l'efficacité de la chaudière est le suivant

$$\frac{\eta_{PL}}{\eta_{FL}} = \frac{PLR}{A + B \cdot PLR + C \cdot PLR^2}$$

$$A = 0.02700, \quad B = 1.1055, \quad C = -0.1325$$

η_{PL} = rendement horaire moyen à charge partielle

η_{FL} = le rendement nominal de la chaudière (c.à.d. le rendement constant à la capacité)

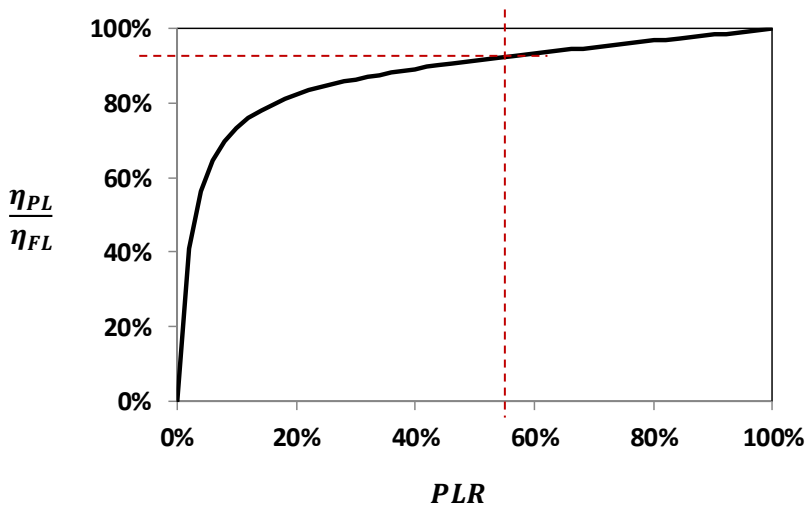
$$\text{Au } PLR = 0.557$$

$$\frac{\eta_{PL}}{\eta_{FL}} = \mathbf{0.925}$$

Ainsi, pour le pas de temps considéré :

$$\eta_{PL} = \eta_{FL} \left(\frac{\eta_{PL}}{\eta_{FL}} \right) = 80\%(0.925) \approx \mathbf{74\%}$$

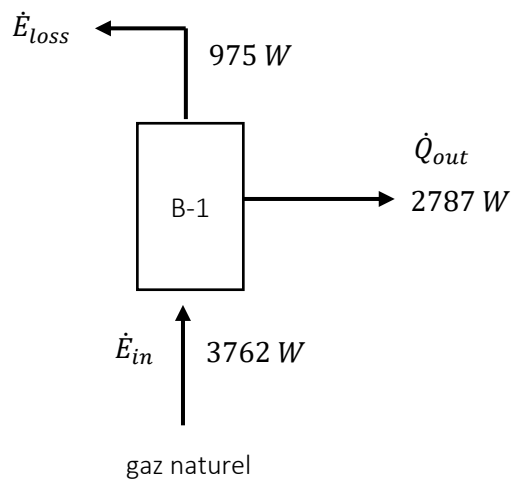
Ou en utilisant la courbe de manière visuelle :



Pour l'heure considérée, la chaudière fournit une puissance moyenne = 2787 W tout en fonctionnant avec un rendement moyen = **74%**.

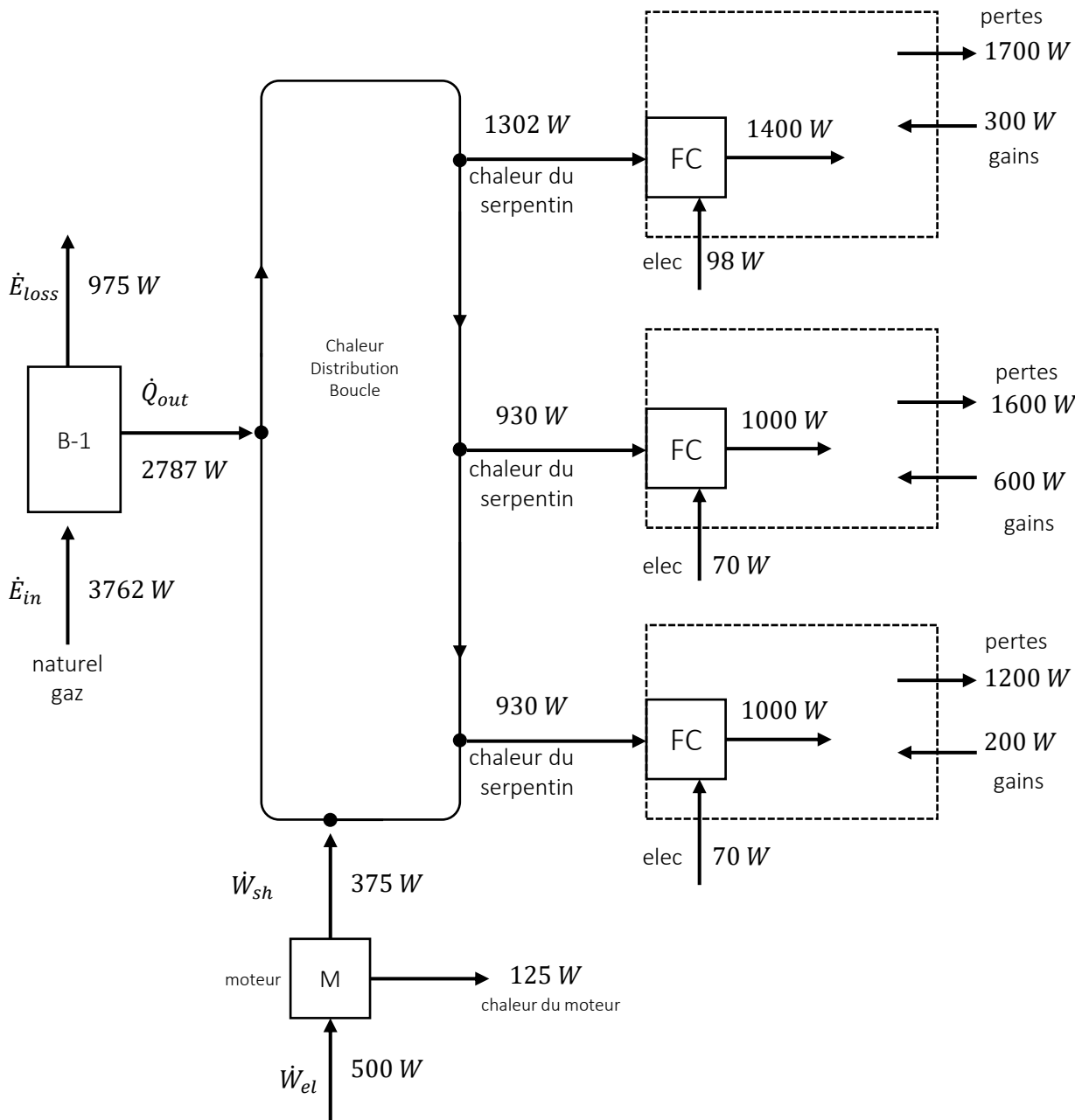
Ainsi, le taux moyen d'apport d'énergie doit être :

$$\dot{E}_{in} = \frac{\dot{Q}_{out}}{\eta} = \frac{2787 \text{ W}}{0.74} = \mathbf{3762 \text{ W}}$$



Nous pouvons maintenant revenir au diagramme des flux d'énergie du système global présenté plus haut. Nous devrions être en mesure d'interpréter la signification de chaque débit d'énergie.

Notez que le diagramme indique la quantité d'énergie apportée à chaque appareil faisant partie du système de chauffage : chaudière, pompe, ventilo-convecteurs.



Consommation totale d'énergie du système de chauffage pour le pas de temps :

Utilisation	L'électricité		Gaz naturel	
	Horaire Taux moyen	Horaire Consommation d'énergie	Horaire Taux moyen	Horaire Consommation d'énergie
Les fans	0,238 kW	0,238 kWh	-	-
Pompe	0,500 kW	0,500 kWh	-	-
Chaudière	-	-	3,762 kW	3,762 kWh ≈ 0.364 m ³
Total	0,738 kW	0,738 kWh	3,762 kW	0.364 m³

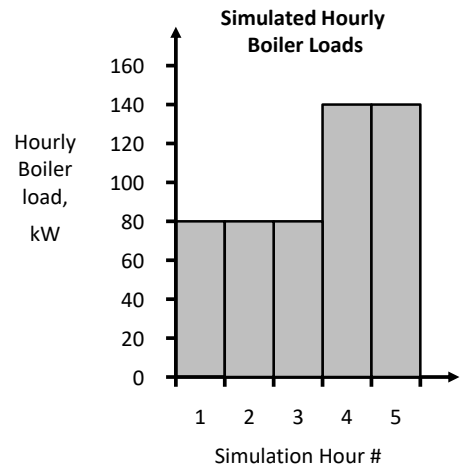
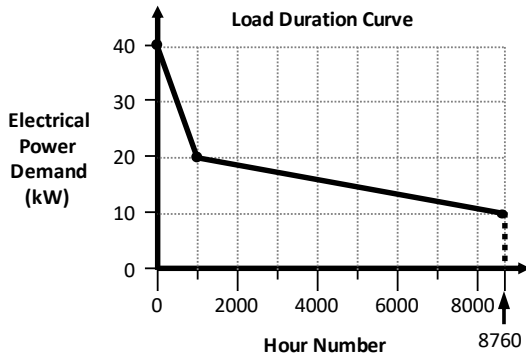
Contenu thermique du gaz naturel :
 $1\text{ m}^3 \approx 10.33\text{ kWh}$

Note : Ces calculs ont été effectués pour un seul pas de temps (c.à.d. une heure). Les mêmes calculs pourraient être répétés pour tous les autres pas de temps pendant lesquels le système fonctionne afin d'estimer la consommation annuelle d'énergie.

Problèmes

1. La courbe de durée de la charge électrique annuelle d'un bâtiment particulier est représentée sur la figure (ci-dessous, à gauche). Estimez les éléments suivants :

- taux de consommation électrique annuel minimum (kW)
- taux de consommation électrique maximal annuel (kW)
- consommation totale d'électricité pendant les 1000 heures de plus forte demande (kWh)
- consommation totale d'électricité pour l'année (kWh)



2. Une simulation énergétique heure par heure est réalisée pour analyser les performances d'une chaudière au gaz naturel. La chaudière a une puissance nominale de 200 kW et un rendement nominal à pleine charge de $\eta_{FL} = 80\%$.

La chaudière est équipée d'un "système de combustion modulante" qui permet de régler le brûleur de manière à ce que la chaudière s'adapte en permanence à la charge plutôt que d'effectuer des cycles d'allumage et d'extinction pour s'adapter à la charge en moyenne. Ce modèle particulier de chaudière peut fonctionner à des rendements plus élevés à charge partielle qu'à pleine charge. Les performances de la chaudière lorsqu'elle fonctionne à charge partielle peuvent être estimées à l'aide de l'équation ci-dessous :

$$\eta_{PL}/\eta_{FL} = 1.15 - 0.27 \cdot PLR + 0.12 \cdot PLR^2$$

Les charges horaires des chaudières pour les cinq premières heures de la période de simulation sont indiquées dans le graphique (ci-dessus, à droite).

Sur la base des informations fournies, estimez les éléments suivants :

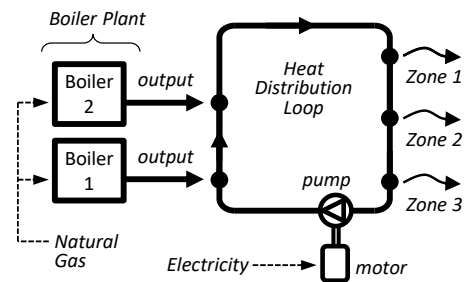
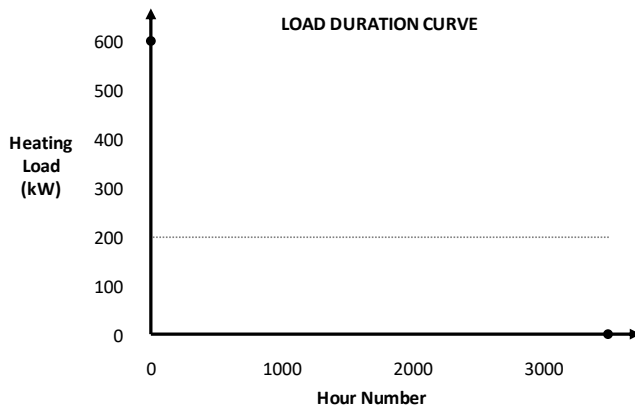
- Charge totale de la chaudière (kWh) sur les cinq heures simulées.
- Consommation totale de combustible (kWh) pour une période de cinq heures si le rendement de la chaudière est constant à 80 %.
- Consommation totale de combustible (kWh) pour les trois premières heures si la courbe d'ajustement du rendement en charge partielle est appliquée.

3. Un système de chaudière est en cours de conception pour un nouveau bâtiment. Le système comprendra 3 chaudières identiques, chacune ayant une puissance nominale de 200 kW. La courbe de durée de charge prévue est illustrée ci-dessous (à gauche).

La séquence de fonctionnement prévue est la suivante : La chaudière 1 s'allume en premier et fonctionne pour répondre à la charge qu'elle peut supporter, jusqu'à sa capacité. La chaudière 2 est allumée en second et fonctionne pour répondre à la charge qu'elle peut supporter (au-delà de la charge de la chaudière 1), jusqu'à concurrence de sa capacité. La chaudière 3 est ensuite ajoutée dans un ordre similaire à celui de la chaudière 2.

Sur la base de la séquence opérationnelle prévue, estimez les éléments suivants :

- Nombre d'heures par an pendant lesquelles la chaudière 3 fonctionnera.
- Charge de chauffage annuelle totale (kWh) survenant pendant les heures où la chaudière 3 fonctionne.
- Consommation annuelle de combustible de la chaudière 3 (kWh) si elle fonctionne avec un rendement moyen = 70 %.



4. Considérons l'analyse énergétique du système de chauffage hydronique représenté dans le diagramme ci-dessus à droite. La chaufferie se compose de deux chaudières identiques, chacune ayant les caractéristiques suivantes :

Combustible = gaz naturel

Capacité = 85 kW

Type de brûleur = marche/arrêt

Efficacité nominale, $\eta_{FL} = 80\%$

Les chaudières fonctionnent selon le principe "Lead/Lag", c.à.d. que la chaudière 1 fonctionne en premier pour répondre à la charge (jusqu'à sa capacité), et la chaudière 2 fonctionne si nécessaire pour répondre à la charge restante.

La pompe et le moteur présentent les caractéristiques suivantes :

Débit = 15 L/s, montée en pression = 160 kPa, efficacité de la pompe = 60%, efficacité du moteur = 88%

- Estimer la puissance de l'arbre (W) requise par la pompe
- Estimez le taux de consommation de combustible de la chaudière (m^3/hr) pendant un moment où les deux chaudières sont allumées. Supposez que le contenu thermique du gaz naturel est de $10,33 \text{ kWh/m}^3$.
- Considérons une période où les taux d'extraction de chaleur de la boucle sont les suivants : Zone 1 = 30 kW, Zone 2 = 12 kW, Zone 3 = 22 kW. Estimez la charge calorifique à satisfaire par chaque chaudière (kW) au cours de cette période.

5. Un système de chaudière est en cours de conception pour un bâtiment qui devrait avoir besoin de chauffage pendant environ 3 500 heures par an. La courbe de durée de la charge est indiquée ci-dessous (à gauche). La charge de chauffage annuelle totale est de $\sim 280\,000$ kWh.

La charge sera couverte par trois chaudières identiques, chaque chaudière ayant les caractéristiques suivantes :

Combustible de chauffage = gaz naturel

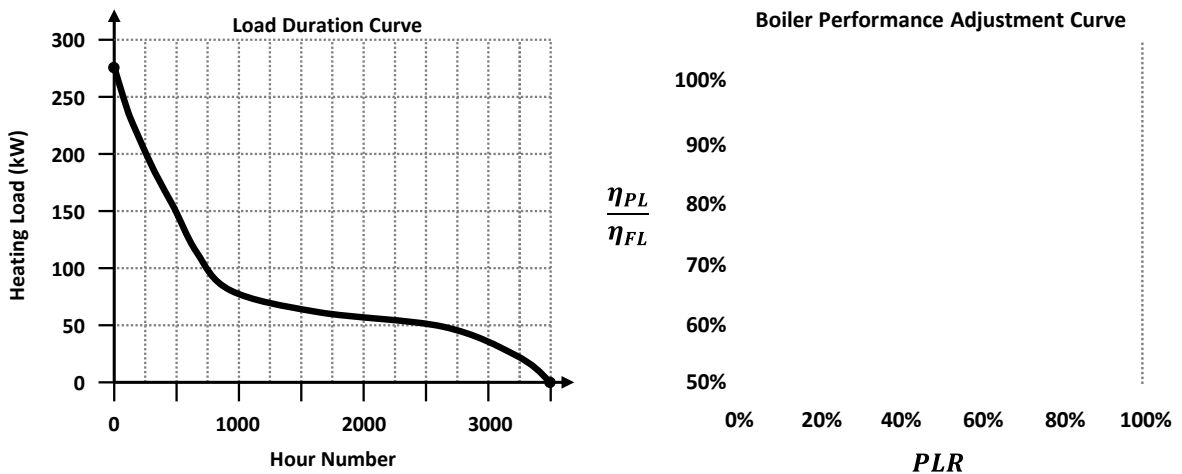
Puissance nominale = 100 kW

Type de brûleur = on/off

Efficacité nominale, $\eta_{FL} = 82\%$

Le contenu thermique du gaz naturel peut être estimé à $\approx 10,33$ kWh/m³.

La séquence de fonctionnement des chaudières sera la suivante : La chaudière 1 s'allume en premier et fonctionne pour répondre à la charge qu'elle peut supporter, jusqu'à concurrence de sa capacité. La chaudière 2 s'allume ensuite et fonctionne pour répondre à la charge qu'elle peut supporter (en plus de celle de la chaudière 1), jusqu'à concurrence de sa capacité. La chaudière 3 est ensuite ajoutée dans l'ordre, de la même manière que la chaudière 2. La puissance calorifique moyenne de chaque chaudière est ajustée en allumant et en éteignant son brûleur. Le rendement horaire à charge partielle de chaque chaudière peut être estimé à l'aide de la courbe d'ajustement ci-dessous (à droite).

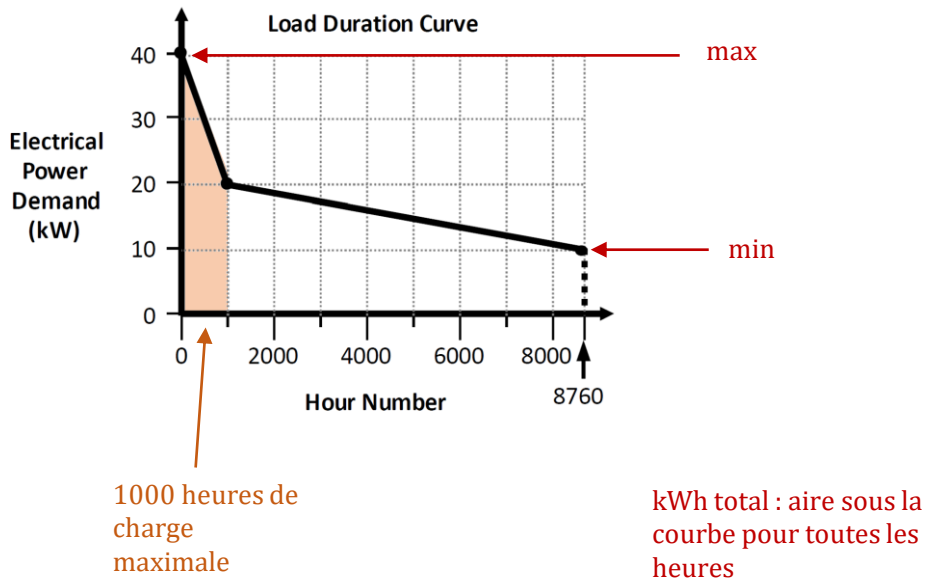


Compte tenu des informations ci-dessus, faites des estimations raisonnables :

- Nombre total d'heures de fonctionnement de la chaudière 3 pendant la saison de chauffage.
- Nombre total d'heures pendant la saison de chauffage pendant lesquelles la chaudière 1 fonctionnera à charge partielle.
- Charge de chauffage annuelle totale (kWh) à couvrir par la chaudière 2.
- Consommation annuelle de combustible de la chaudière 2 (kWh) si elle fonctionne avec un rendement saisonnier de 70 %.
- Charge à couvrir par la chaudière 3 (kW) pendant une heure où la charge totale desservie par les chaudières est de 240 kW.
- En utilisant la courbe d'ajustement des performances : le rendement horaire (%) que la chaudière 3 devrait atteindre pendant une heure où la charge totale desservie par les trois chaudières est de 240 kW.
- Taux de consommation totale de gaz naturel (m³ /hr) à un moment où les brûleurs de toutes les chaudières sont allumés.

Solutions

1.



2.

a) $3 (1 \text{ h}) (80 \text{ kW}) + 2 (1 \text{ h}) (140 \text{ kW}) = 520 \text{ kWh}$

b)

$$E_{in} = \frac{E_{out}}{\eta} = \frac{520 \text{ kWh}}{0.8} = 650 \text{ kWh}$$

c) À 80 kW

$$PLR = \frac{80}{200} = 0.4$$

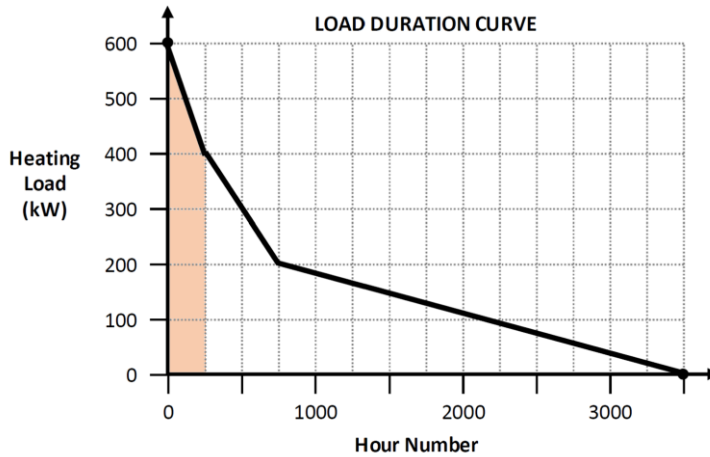
$$\frac{\eta_{PL}}{\eta_{FL}} = 1.15 - 0.27PLR + 0.12PLR^2 \cong 1.06$$

$$\eta_{PL} = \eta_{FL} \left(\frac{\eta_{PL}}{\eta_{FL}} \right) = 80\% (1.06) = 84.8\%$$

$$\dot{E}_{in} = 80 \text{ kW} / 0.848 = 94.3 \text{ kW}$$

$$E_{in} = (3 \text{ hrs}) (94.3 \text{ kW}) = 283 \text{ kWh}$$

3.



- a) La chaudière 3 brûle environ 250 heures par an
(c.à.d. lorsque la charge totale est supérieure à 400 kW)
- b) Charge totale pendant l'incendie de la chaudière 3 : en orange ci-dessus
 $(250 \text{ h})(200 \text{ kW})(1/2) + (250 \text{ h})(400 \text{ kW}) = 125\,000 \text{ kWh}$
- c) Charge de la chaudière 3 = $(250 \text{ heures})(200 \text{ kW})(1/2) = 25\,000 \text{ kWh}$

$$E_{in} = \frac{E_{out}}{\eta} = \frac{25,000 \text{ kWh}}{0.7} = 35,714 \text{ kWh}$$

4.

a)

$$\dot{W}_{sh} = \frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{\eta_p} = \frac{(160 \text{ kPa}) \cdot (15 \text{ L/s})}{0.60} = 4000 \text{ W}$$

b)

les brûleurs sont allumés/éteints

$$input = \frac{output}{\eta} = \frac{85 \text{ kW}}{0.8} = 106.25 \text{ kW} \quad (\text{chaque brûleur})$$

$$2(106.25 \text{ kW}) \frac{1 \text{ m}^3}{10.33 \text{ kWh}} = 20.6 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

c) extraction = 30 + 12 + 22 = 64 kW

ajout = 4 kW (par pompe)

extraction nette = 64 kW - 4 kW = 60 kW

BLR-1 = 60 kW (PLR = 70,6 %)

BLR-2 = 0 kW

5.

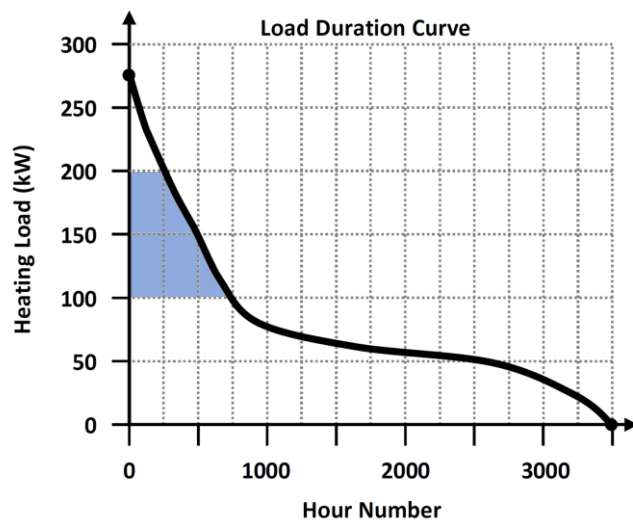
a)

heures lorsque la charge totale ≥ 200 kW $\rightarrow 250$ hrs

b) heures où la charge totale < 100 kW (mais > 0 kW)

$\rightarrow 3500 - 750 \cong 2750$ hrs

c) zone entre 100 et 200 kW $\approx 50,000$ kWh



d)

$$\text{input} = \frac{\text{output}}{\eta} = \frac{50000 \text{ kWh}}{0.7} = 71429 \text{ kWh}$$

e)

B-1 100 kW
B-2 100 kW
B-3 40 kW

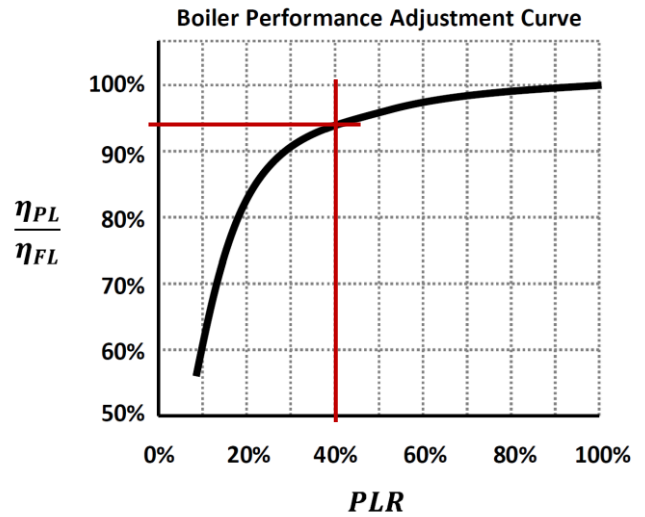
\leftarrow ANS = 40 kW

f)

$$\text{À } 40 \text{ kW : } \quad \text{PLR} = 40/100 = 0,4$$

$$\frac{\eta_{PL}}{\eta_{FL}} \approx 0.94$$

$$\eta_{PL} = (0.94)82\% = \mathbf{77\%}$$



g)

brûleur marche/arrêt

$$\text{input} = \frac{\text{output}}{\eta} = \frac{100 \text{ kW}}{0.82} \cong 122 \text{ kW each}$$

$$3(122 \text{ kW}) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{10.33 \text{ kWh}} \right) \cong \mathbf{35.4 \text{ m}^3/\text{hr}}$$