

GYMNASSE DE BEAULIEU
TRAVAIL DE MATURITÉ 2006

A photograph of an offshore oil rig in the middle of the ocean. The rig is a complex structure of metal beams and pipes, supported by a large steel jacket. The sky is blue with some light clouds, and the water is a deep blue. The rig is the central focus of the image.

**LA FIN DE L'OR NOIR,
LE DÉBUT D'UNE ÈRE NOUVELLE**
LIVRE DEUXIÈME
**ÉNERGIES ALTERNATIVES ET ÉTUDE DES
CHAUFFAGES DES GYMNASSES LAUSANNOIS**

RÉPONDANT :
M. FRANÇOIS GINGINS

AUTEURS :
ALEXANDRE STEULLET 3M5
ALEXANDRE FRAUENKNECHT 3M5

BUSSIGNY, ÉPALINGES, LAUSANNE ; LE 25 AVRIL 2007

Fig. 0.1

Première de couverture :

Plateforme pétrolière « Arguello Inc. Harvest » au large de la côte Californienne.

Source : NASA, libre de droit.

LA FIN DE L'OR NOIR, LE DÉBUT D'UNE ÈRE NOUVELLE

LIVRE DEUXIÈME

**ÉNERGIES ALTERNATIVES ET ÉTUDE DES
CHAUFFAGES DES GYMNASES LAUSANNOIS**

PAR M. ALEXANDRE STEULLET ET M. ALEXANDRE FRAUENKNECHT

TRAVAIL DE MATURITÉ 2006
SUJET LIBRE

AVEC COMME RÉPONDANT M. FRANÇOIS GINGINS
AVEC COMME EXPERTE MME. KARINE RYFFEL

1. Remerciements

Ce travail n'aurait pas été réalisable sans eux. Nous tenons à remercier chaleureusement ces personnes pour leur aide, leurs conseils et le temps qu'ils ont sacrifié.

- À Monsieur Rachid BENDJAMA, concierge de Chamblandes *qui nous a été d'une aide précieuse ;*
- À Monsieur Stephan FLUCKIGER, ramoneur *qui nous a gracieusement offert les visites de chaudières, et donné les informations qui s'imposaient ;*
- Au Service Immeubles, Patrimoine et Logistique (SIPAL) de l'État de Vaud, *pour les données de consommation des chauffages ;*
- À Monsieur Jean-François DUBUIS, directeur de Beaulieu, *pour nous avoir reçu immédiatement et de nous avoir aiguillés pour le début des recherches ;*
- Et bien sûr à Monsieur François GINGINS, éminent enseignant au gymnase de Beaulieu et à la Haute École Pédagogique, *pour avoir accepté d'être notre répondant et pour les innombrables heures qu'il a dû consacrer à la correction du dossier.*

2. Tables des matières

	<i>page</i>
1. Remerciements.....	3
2. Tables des matières	4
3. Travail pratique : les gymnases lausannois.....	5
3.1. Moyen de comparaison.....	5
3.2. La norme Minergie	6
3.3. Notre indice de comparaison.	6
3.4. Graphiques et données.....	7
3.4.1. Relevé des déficits de température ($\delta\theta$).....	7
3.4.2. Relevés de la consommation des gymnases	8
3.4.2.1. Pondération	8
3.4.2.2. Les gymnases sont-ils dans les normes ?	10
3.4.2.3. Analyse pour chaque gymnase	12
3.5. Solution pour l'amélioration de l'efficacité.....	15
3.5.1. Investissements minimales.....	15
3.5.2. Investissements conséquents.....	16
4. Solutions de remplacement pour le chauffage	17
4.1. Énergie fossile alternative : Le gaz naturel	17
4.2.1.1. Aspects techniques.....	17
4.2.1.2. Exemple	17
4.2.2. Se chauffer à la biomasse : le bois	18
4.2.2.1. Aspects techniques.....	18
4.2.2.2. Exemple	18
4.2.3. Se chauffer à la géothermie	18
4.2.3.1. Aspects techniques.....	18
4.2.4. Se chauffer à l'énergie solaire.....	19
4.2.4.1. Aspects techniques.....	19
4.2.4.2. Exemple	19
4.2.5. Coûts/Comparaison des différents moyens de chauffage	19
5. Conclusion	21
6. Annexes	22
6.1. Annexe n°1 Tableau de conversion	22
6.2. Annexe n°2 Solution de remplacement dans le domaine des transports.	22
7. Table des illustrations	27
8. Glossaire, symboles & abréviation	28
9. Bibliographie (inclus source internet)	29

3. Travail pratique : les gymnases lausannois

Étudions concrètement le problème du chauffage : intéressons-nous aux chauffages des gymnases lausannois (Beaulieu, Bugnon-Ours, Bugnon-Sévelin, La Cité, Chamblandes, Auguste-Piccard). Notre objectif est de les comparer, de pointer les bons et les mauvais élèves, de montrer quelles sont les recettes des bons gymnases.

3.1. Moyen de comparaison

Ce qu'il est intéressant de comparer quand on parle de chauffage, c'est le rapport entre consommation d'énergie et besoins réels de chauffage. Appelons ce rapport « l'efficacité » du chauffage. (Note : une bonne efficacité est une efficacité minimale).

$$\text{efficacité} = \frac{\text{consommation}}{\text{besoins}}$$

Voici un principe très général qu'il faut éclaircir.

Consommation : on entend par consommation l'énergie consommée. Elle se mesure en wattheure ou en joule. Lorsqu'un chauffage consomme du mazout ou du gaz, il est facile de déterminer la consommation, en fonction de la quantité de combustible consommé.

Besoins : On aborde ici un problème un peu plus complexe ; il est très difficile de définir quel est le besoin réel d'un bâtiment. En fait il dépend de plusieurs paramètres :

- **La taille du bâtiment**, exprimée en général en m², ce qui implique qu'on tient compte de la surface utile (un bâtiment de deux étages de 100 m² chacun, aura une surface utile de 200 m²). On pourrait imaginer de tenir compte du volume, plus le volume étant grand, plus il y a d'air à chauffer. Mais un bâtiment trop haut de plafond peut être considéré comme une erreur de conception et cela doit donc se ressentir dans « l'efficacité ». Note : si l'on choisit la surface au lieu du volume, il faut faire attention lorsqu'on compare une salle de gym (un grand volume y est nécessaire), il faut donc faire attention à comparer des choses qui sont comparables.
- **Le déficit de température**, exprimé en dH (degré heure). Pour pouvoir le mesurer, il faut d'abord définir une « température de non-chauffage », c'est-à-dire la température extérieure à partir de la quelle il n'est plus nécessaire de chauffer. Elle a été fixée à 18°C. Pour chaque degré en dessous de 18°C et pour chaque heure on compte 1 dH. Par exemple, s'il fait 17°C pendant deux heures, on aura un déficit de 2 dH. Par contre s'il fait au-dessus de 18°C on ne compte pas de dH négatif. On mesure les dH à l'aide d'un « dH-mètre ». Il s'agit en somme d'un appareil résultant de la combinaison d'un thermomètre et d'une horloge.

Voici une formule d'approximation du déficit de température :

Soit t_{total} la durée totale (en heure) de la mesure

Soit $\mu\theta_i$ la moyenne des températures en °C pour l'heure t

$$\text{déficit de température} \approx \sum_{t=1}^{t_{\text{total}}} (18 - \mu\theta_t) \quad \forall \mu\theta_t \leq 18$$

- **Les heures d'ouverture**, exprimée en heures/saison. Chauffer un bâtiment alors qu'il est fermé et inutile. Les heures d'ouverture sont donc déterminantes dans l'estimation des besoins de chauffage.

Ces trois paramètres sont ceux qui nous semblaient les plus cohérents, toutefois certains préfèrent considérer le nombre d'occupants plutôt que la grandeur du bâtiment (un bâtiment surdimensionné pouvant être considéré comme une erreur de conception). Mais nous estimons que les problèmes d'enclassement, lorsqu'il s'agit finalement de détails, n'ont rien à voir avec les problèmes de chauffage.

3.2. La norme Minergie

En plus de comparer l'efficacité respective des gymnases entre elles ou d'une année à l'autre, il est intéressant de définir une valeur cible, qu'il faudrait atteindre idéalement. C'est l'idée qu'il y a derrière la norme Minergie.

Le label Minergie, adopté par les cantons et la confédération, est attribué aux bâtiments qui entrent dans les standards Minergie, qui diffèrent selon l'affectation du bâtiment. De plus les normes pour les bâtiments anciens sont plus tolérantes. Il y a plusieurs critères (éclairage, qualité de l'isolation), mais le principal – celui sur lequel on va se concentrer – est l'efficacité du chauffage (note : en fait ils tiennent compte dans leur valeur cible de la consommation d'énergie pour la climatisation, mais dans le cas des gymnases elle est quasiment nulle, on n'en tiendra pas compte). Mais c'est là où les problèmes commencent. On a vu que pour obtenir une valeur significative de l'efficacité, il fallait pondérer la consommation par la surface du bâtiment, par le déficit de température et par le nombre d'heures d'ouverture. La norme Minergie, elle, ne tient compte que de la surface. Ça veut dire qu'à efficacité constante (dans le sens où nous l'entendons) un bâtiment peut être tantôt dans les normes tantôt hors norme d'une année à l'autre, et ceci par exemple à cause de grandes différences dans la « rudesse » entre deux hivers. Ceci décrédibilise gravement le système Minergie. De plus, les valeurs sont prises pour une année, du 1^{er} janvier au 31 décembre. Ceci n'a pas de sens car le passage d'une année à l'autre partage la « saison de chauffage » – c'est-à-dire la période froide de l'année – en deux.

Voici le barème pour les types de bâtiments qui nous intéressent :

Affectation	« Efficacité » minimale pour les bâtiments construits avant 1990	« Efficacité » minimale pour les bâtiments construits après 1990
Bâtiment scolaire	70 [kWh/m ²]	40 [kWh/m ²]
Salle de gym	50 [kWh/m ²]	25 [kWh/m ²]

(À ceci s'ajoutent d'autres critères qui ne concernent pas le chauffage)

3.3. Notre indice de comparaison.

Il s'agit pour nous de faire une comparaison qui tienne la route. Nous allons donc intégrer à notre pondération le déficit de température. Par contre, nous ne tiendrons pas compte du dernier paramètre que nous avons cité : les heures d'ouverture ; et ceci pour les raisons suivantes. Nous ne comparons que des gymnases, les heures d'ouverture sont donc sensiblement les mêmes. Il existe toutefois des différences, dues notamment à certaines ouvertures nocturnes. Malheureusement elles sont très aléatoires, il est donc quasiment impossible de les déterminer. Nous allons toutefois essayer d'en tenir compte dans l'analyse.

Voici donc notre formule pour « l'efficacité » :

Soit la **consommation**, en [kWh]

Soit **S**, la surface du bâtiment en [m²]

Soit **Δθ**, le déficit de température en [dH]

L'efficacité est donnée en [kWh·m⁻²·dH⁻¹]

$$\text{efficacité} = \frac{\text{consommation}}{S \cdot \Delta\theta}$$

3.4. Graphiques et données

3.4.1. Relevé des déficits de température ($\delta\theta$)

Il existe à Lausanne plusieurs stations de mesure des degrés-heures. Celles qui nous intéressent sont les suivantes :

- Lausanne – Centre, pour les gymnases :
Beaulieu, Bugnon Ours, Bugnon Sévelin, Cité Ancienne Académie, Cité Mercerie.
- Lausanne – Ouchy, pour les gymnases :
Auguste Piccard, Chamblandes
- Pully – Lac, pour les gymnases :
Auguste Piccard, Chamblandes

Note : les stations de Lausanne – Ouchy et de Pully – Lac sont à mettre ensemble. Elles vont définir ce que l'on va appeler le « climat lac ». En fait pour des raisons historiques les mesures on d'abord été prises à Ouchy, puis à Pully. La station Lausanne – Centre définit le « climat centre ».

Vous pouvez voir dans le tableau que les valeurs sont prises pour chaque saison (de chauffage). On entend par saison de chauffage la période qui va de début octobre à début mai. En dehors de cette période il ne devrait pas être nécessaire de chauffer.

Saison	90-91	91-92	92-93	93-94	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06
Lausanne-Centre	61950	62990	59610	57980	55650	59420	57520	56860	61090	59510	54800	57300	57440	61460	60580	64090
Lausanne-Ouchy	58470	59510	56160	57870				57790	62990	60400						
Pully-Lac					55250	60050	64650				54650	56530	57200	61020	58700	61400

Évolution de la rudesse de l'hiver de 1990-91 à 2005-06

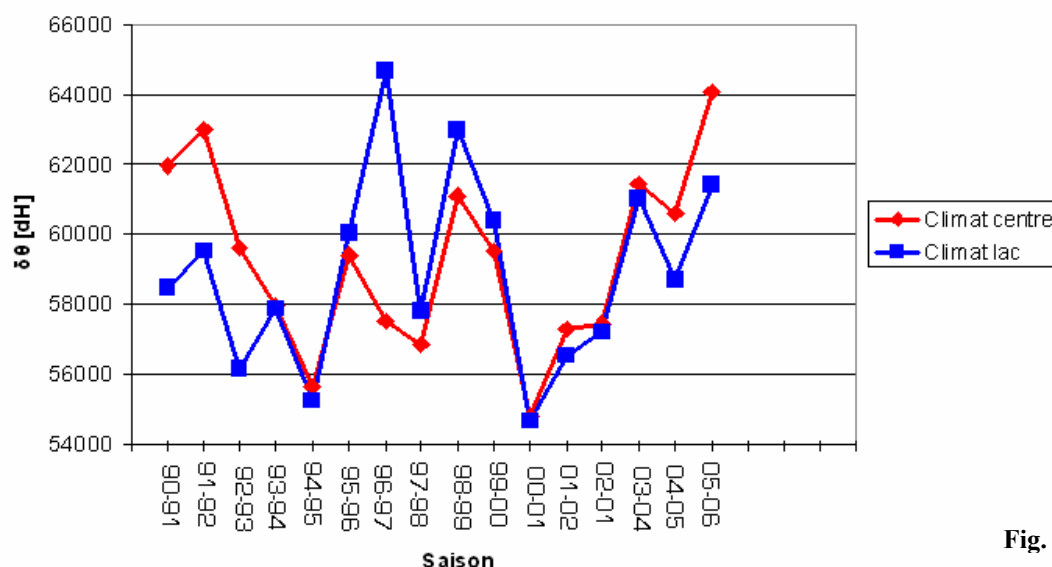


Fig. 3.1

3.4.2. Relevés de la consommation des gymnases

Voici sous forme d'un tableau toutes les données que nous avons pu obtenir. Malheureusement l'enregistrement systématique de ces données n'étant mis en place que depuis peu, nous ne pouvons remonter plus loin que l'hivers 2001-2002 dans le meilleur des cas.

Saison	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	
Premier relevé	08.oct.01	07.oct.02	06.oct.03	04.oct.04	03.oct.05	
Dernier relevé	06.mai.02	05.mai.03	03.mai.04	02.mai.05	08.mai.06	
Beaulieu (gaz)	66121	67333	D.Manquantes	102609	98087	[m3]
Beaulieu	661210	673330	D.Manquantes	1026090	980870	[kWh] (environ)
Bugnon (urbain)	D.Manquantes	D.Manquantes	918.22	846	856.27	[MWh]
Bugnon	D.Manquantes	D.Manquantes	918220	846000	856270	[kWh] (Précisément)
Chamblandes Ch. N°1 (mazout)			53853			[l] de mazout
Chamblandes Ch. N°2 (mazout)	Ch.1 + Ch. 2: 60562	Ch.1 + Ch. 2: 55782	2562	Ch.1 + Ch. 2: 55367	Ch.1 + Ch. 2: 59589	[l] de mazout
Chamblandes	605620	557820	564150	553670	595890	[kWh] (environ)
Cité (urbain)	D.Manquantes	D.Manquantes	534	571	D.Manquantes	[MWh]
Cité	D.Manquantes	D.Manquantes	534000	571000	D.Manquantes	[kWh] (Précisément)
Mercerie (urbain)	D.Manquantes	450.85	D.Manquantes	424.78	446	[MWh]
Mercerie	D.Manquantes	450850	D.Manquantes	424780	446000	[kWh] (Précisément)
Piccard Ch. N°1 (mazout)	30993	24613	26622	26846	30469	[l] de mazout
Piccard Ch. N°2 (mazout)	24915	27575	27614	26441	31519	[l] de mazout
Piccard	559080	521880	542360	532870	619880	[kWh] (environ)

En gras: Totaux en kWh
En normal: Donnée fournie par l'État

Afin de pouvoir pondérer les résultats par la surface utile des gymnases voici un tableau contenant ces valeurs. (Données en m²)

Gymnase	Beaulieu	Bugnon	Chamblandes	Cité	Mercerie	Piccard
Surface totale	8'741	11'171	11'956	6'105	7'434	15'413
Dont salle de gym	0	2'873	2'641	0	1'788	4'849

NB : À Beaulieu on ne traite pas du bâtiment de Fréminet et au Bugnon on ne traite pas du bâtiment de Sévelin.

3.4.2.1. Pondération

Nous avons donc pondéré les consommations pour obtenir des valeurs de « l'efficacité ». Tout d'abord voici le tableau avec l'efficacité **pondérée uniquement par la surface** utile (c'est-à-dire les valeurs utilisées pour les normes Minergie).

Saisons :	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006
Beaulieu	75.6446631	77.0312321	D.m.	117.388171	112.21485
Bugnon	D.m.	D.m.	82.1967595	75.7318056	76.6511503
Chamblandes	50.6540649	46.65607226	47.1855135	46.3089662	49.8402476
Cité	D.m.	D.m.	87.4692875	93.5298935	D.m.
Mercerie	D.m.	60.6470272	D.m.	57.1401668	59.9946193
Piccard	36.2732758	33.8597288	35.1884773	34.5727633	40.2179978

D.m. = données manquantes.
Valeurs données en [kWh/m²]

Passons maintenant au tableau des valeurs d'efficacité corrigée en fonction du besoin de chauffage. (**Pondération par surface et déficit de température**, cf. la formule ci-dessus).

Saisons :	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006
Beaulieu	1.32015119	1.34107298	D.m.	1.93773804	1.75089483
Bugnon	D.m.	D.m.	1.33740253	1.25011234	1.19599236
Chamblandes	0.89605634	0.8156656	0.77327947	0.78890913	0.81173042
Cité	D.m.	D.m.	1.42319049	1.54390712	D.m.
Mercerie	D.m.	1.05583265	D.m.	0.94321834	0.93609954
Piccard	0.64166417	0.5919533	0.57667121	0.58897382	0.65501625

D.m. = données manquantes.
Valeurs données en [Wh·m⁻²·dH⁻¹]

Quelques graphiques et première conclusion

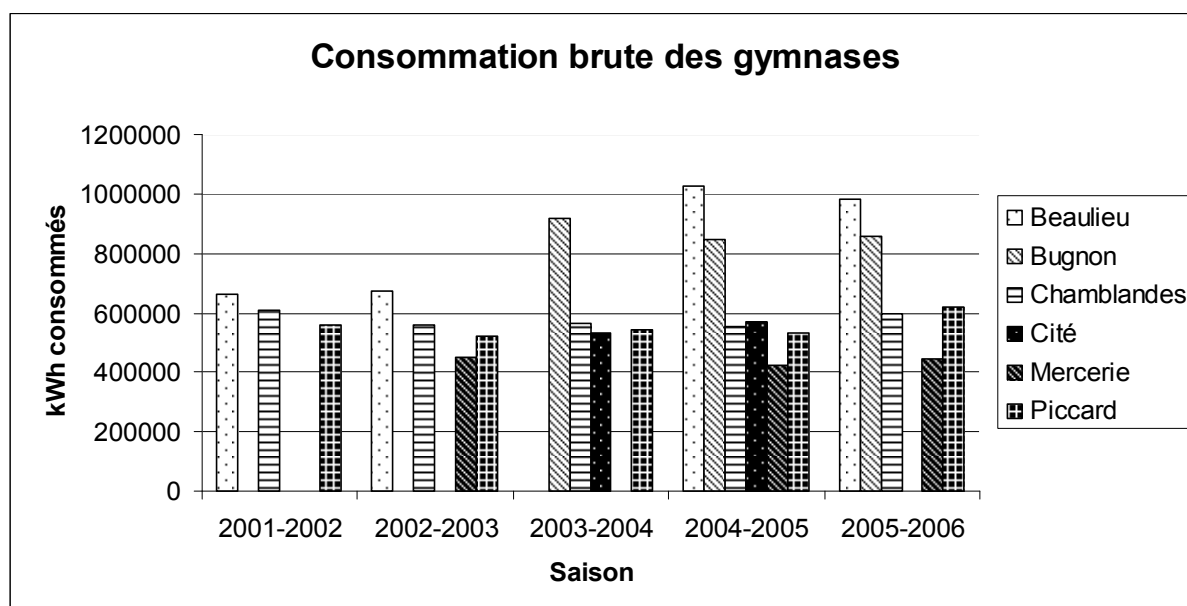


Fig. 3.2

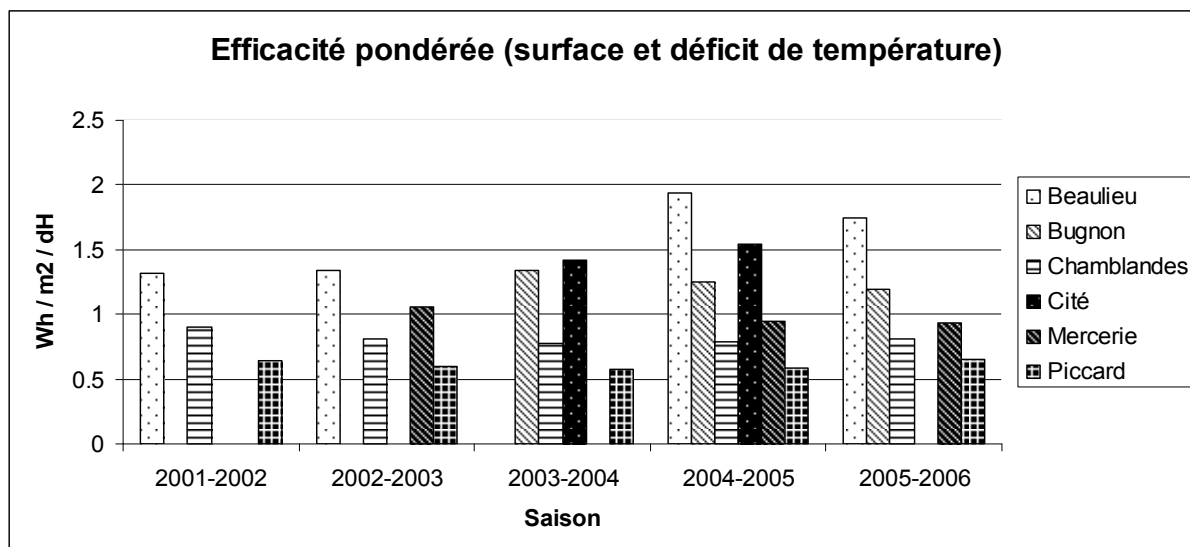


Fig. 3.3

Grâce à ce graphique, et en regardant surtout la saison 2004-2005 qui est complète (mais la tendance est la même sur les autres saisons) on peut faire un classement des meilleurs gymnases en termes d'efficacité : (du meilleur au moins bon)

1. Piccard
2. Chamblandes
3. Mercerie
4. Bugnon
5. Beaulieu (on est bon dernier !!!)

Toutefois ce classement ne tient pas compte des heures d'ouverture, ni de l'affectation des bâtiments (scolaire ou salle de gym) et ni de l'âge du bâtiment. Dans le point « Les gymnases sont-ils dans les normes » ci-dessous nous en tiendrons compte afin de pouvoir juger le plus objectivement possible de l'efficacité.

3.4.2.2. Les gymnases sont-ils dans les normes ?

Norme Minergie

D'abord intéressons nous à savoir si les gymnases sont dans les normes Minergie, donc sans tenir compte du déficit de température. Ci-dessous, sont consignés le calcul des valeurs limites pour être dans les normes :

Affectation:	Surface salle de cours [m ²]	Minergie (cours) [kWh/m ² /an]	Surface salle de gym [m ²]	Minergie (gym) [kWh/m ² /an]	Consommation maximale pour être dans les normes [kWh/an]
Beaulieu	8'741	70	0		611870
Bugnon	8'298	70	2873	50	724510
Chamblandes	9'315	70	2641	25	718075
Cité	6'105	70	0		427350
Mercerie	5'646	70	1788	50	484620
Piccard	10'564	70	4849	50	981930

Pour savoir si un bâtiment est dans les normes Minergie il faut prendre la consommation d'une année du 1^{er} janvier au 31 décembre. Comme les relevés de l'année 2004 sont complets pour tous les gymnases, on va prendre les valeurs de cette année. Comme on l'a dit auparavant, cette méthode ne nous paraît pas appropriée, mais nous allons proposer plus tard une « norme » plus pertinente.

	Consommation	Rappel norme	Dans les normes ?
Beaulieu	991607	611870	NON
Bugnon	933430	724510	NON
Chamblandes	586040	718075	OUI
Cité	569000	427350	NON
Mercerie	409680	484620	OUI
Piccard	526960	981930	OUI

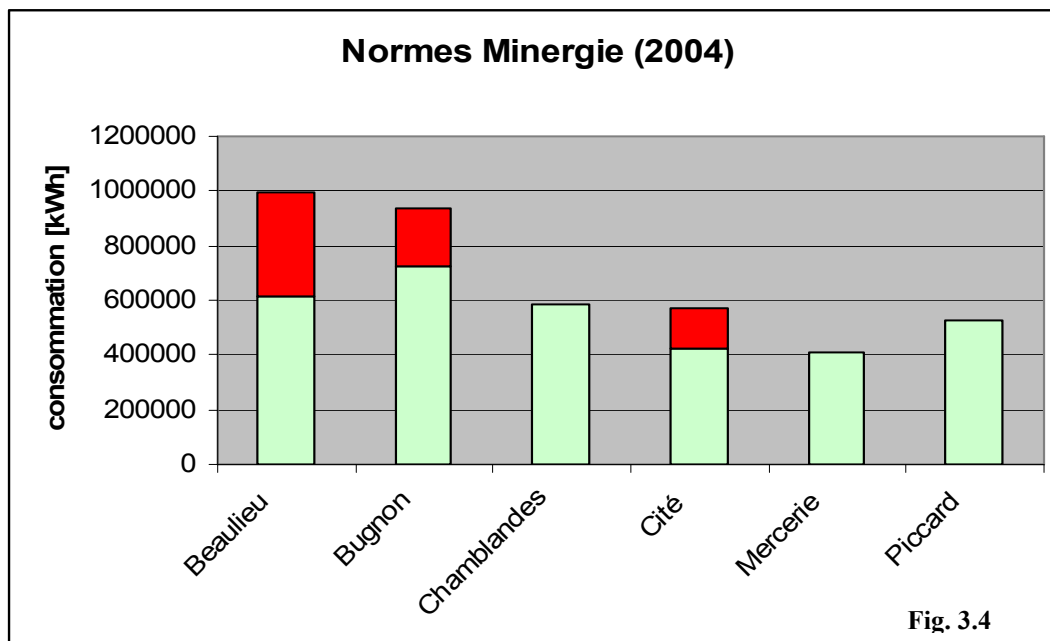


Fig. 3.4

En vert : dans les normes, en rouge : dépassement.

Notre norme

Selon la réflexion que nous avons menée, il serait donc plus judicieux d'établir une norme en $[Wh \cdot m^{-2} \cdot dH^{-1}]$. Mais il est difficile et arbitraire de définir la norme, et il faut garder en tête que le but est d'atteindre une consommation minimale.

On a voulu faire une norme qui corresponde à peu près à Minergie, et qui nous paraît honnête pour distinguer les bons des mauvais élèves.

Affectation	« Efficacité » minimale pour les bâtiments construits avant 1990	Efficacité minimale pour les bâtiments construits après 1990
Bâtiment scolaire	1 $[Wh \cdot m^{-2} \cdot dH^{-1}]$	60 $[Wh \cdot m^{-2} \cdot dH^{-1}]$
Salle de gym	0.7 $[Wh \cdot m^{-2} \cdot dH^{-1}]$	0.35 $[Wh \cdot m^{-2} \cdot dH^{-1}]$

Voici donc, pour chaque gymnase et chaque saison la valeur limite :

Consommation maximale pour être dans la norme [kWh]

Saison:	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006
Beaulieu	500'859	502'083	537'222	529'530	560'211
Bugnon	590'711	592'155	633'597	624'525	660'710
Chamblandes	578'830	585'691	624'805	601'050	628'696
Cité	349'817	350'671	375'213	369'841	391'269
Mercerie	395'232	396'198	423'926	417'857	442'067
Piccard	789'063	798'415	851'735	819'352	857'040

À partir de ça nous avons fait une analyse pour chaque gymnase.

3.4.2.3. Analyse pour chaque gymnase

- **Beaulieu**

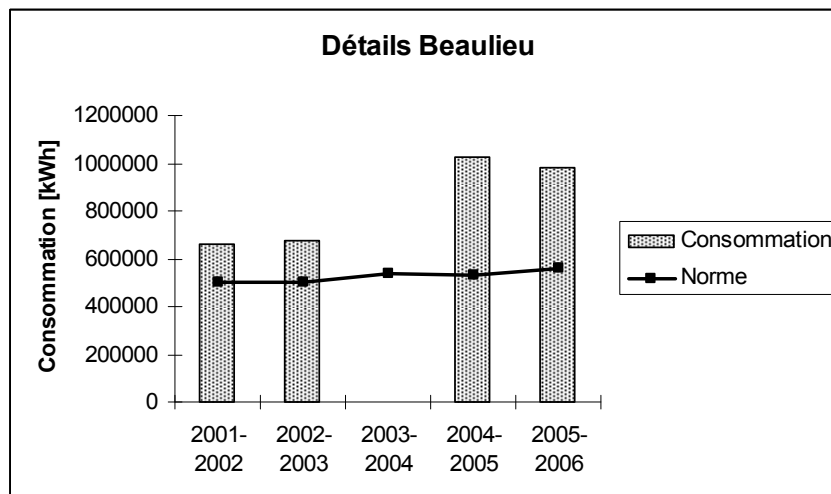


Fig. 3.5

Combustible : Gaz

Consommation relativement à la norme : parfois deux fois plus que la norme !

Évolution au fil des saisons : la situation s'est empirée entre le début des années 2000 et le milieu.

À décharge : Il y a des cours du soir, bâtiment haut de plafond.

Évaluation globale : **EXTRÊMEMENT MAUVAIS**

Le gymnase de Beaulieu se démarque comme ayant la pire gestion du chauffage de tous les gymnases lausannois, malgré que la chaudière soit récente. Les difficultés liées à l'architecture du bâtiment n'expliquent pas tout, il reste énormément d'efforts à faire. Il existe notamment des lacunes dans la conservation des « archives » statistiques.

- **Bugnon**

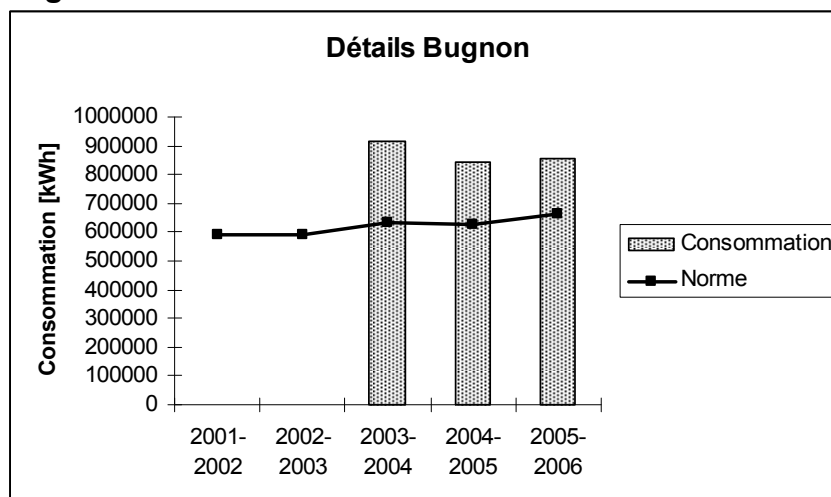


Fig. 3.6

Combustible : Chauffage urbain (gaz + déchets) de la centrale Pierre-de-Plan

Consommation relativement à la norme : toujours au-dessus

Évolution au fil des saisons : légère amélioration, mais il n'y a pas assez de données pour réellement juger l'évolution.

À décharge : Chauffage assez écologique.

Évaluation globale : **ASSEZ MAUVAIS**

Ce gymnase fait aussi partie des mauvais élèves, mais quelques efforts suffiraient à passer le cap.

- **Chamblandes**

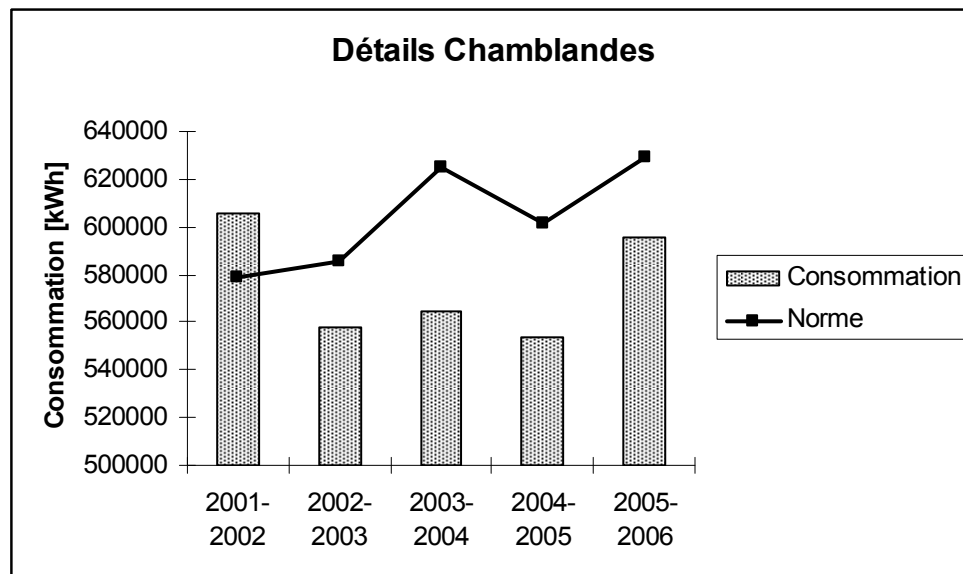


Fig. 3.7

Combustible : Mazout

Consommation relativement à la norme : En dessous avec une certaine marge

Évolution au fil des saisons : Bonne amélioration jusqu'en 2004-2006. La saison 05-06 a été plus difficile.

À décharge : Concierge engagé et responsable, bonne gestion, cours du soir.

Évaluation globale : **BON**

Ce gymnase est un exemple à suivre. Malgré des bâtiments vieillissants les résultats sont excellents. Nous verrons plus tard quelle en est la recette.

- **Cité**

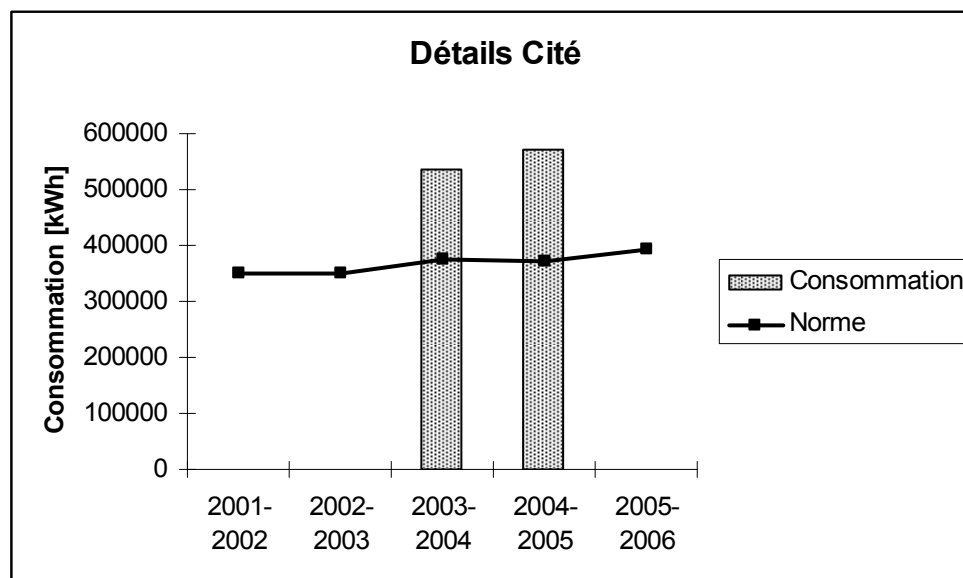


Fig. 3.8

Combustible : Chauffage urbain (gaz + déchets)

Consommation relativement à la norme : Largement en dessus

Évolution au fil des saisons : Trop peu de données

À décharge : Bâtiment historique (plus que centenaire), cours du soir

Évaluation globale : **MAUVAIS**

Ce gymnase est un cas particulier, étant donné l'âge du bâtiment. On comprend bien qu'il est impossible d'entreprendre de grands travaux, et que l'isolation est loin d'être idéale, mais des petites améliorations sont envisageables.

- **Mercerie**

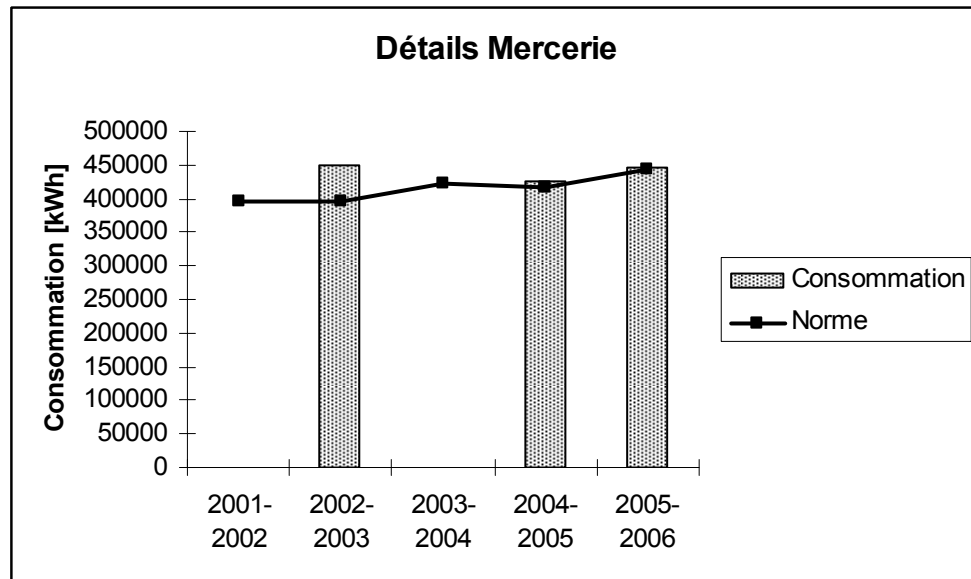


Fig. 3.9

Combustible : Chauffage urbain (gaz + déchets)
Consommation relativement à la norme : Consommation ≈ Norme
Évolution au fil des saisons : Légère amélioration / Maintien
À décharge : Bâtiment historique âgé
Évaluation globale : **CORRECTE**
 Joli travail, il faut faire attention à au moins maintenir le niveau.

- **Piccard**

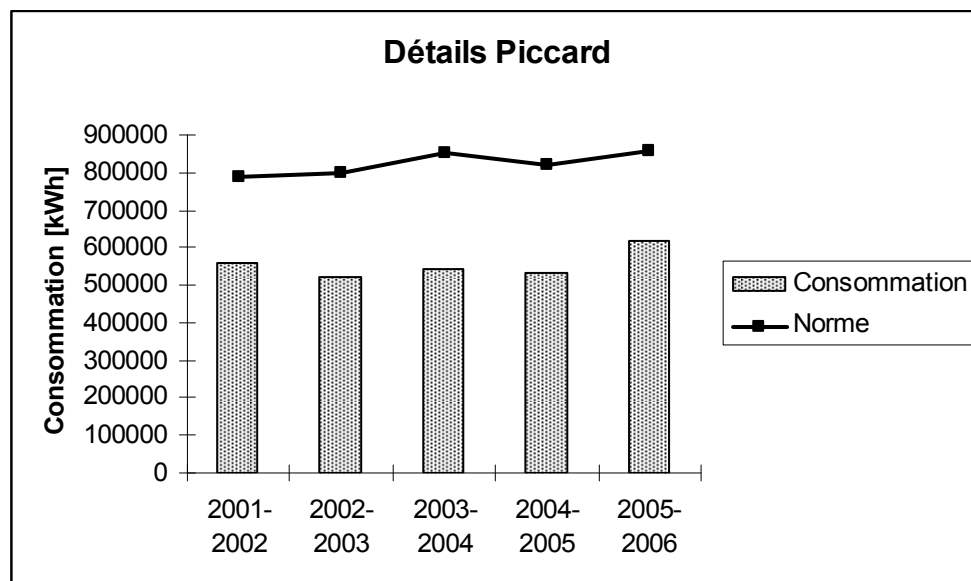


Fig. 3.10

Combustible : Mazout
Consommation relativement à la norme : Systématiquement en dessous
Évolution au fil des saisons : Maintien de bonnes performances
À décharge : cours du soir.
Évaluation globale : **BON**
 Ce gymnase s'en sort bien. Cela s'explique en partie par le fait que le bâtiment est relativement moderne (1966) et qu'il est bien exposé au soleil avec des grandes vitres. Compte tenu de ces éléments, on peut encore désirer une amélioration.

3.5. Solution pour l'amélioration de l'efficacité.

Il existe différentes solutions pour améliorer le bilan écologique et économique du chauffage des gymnases. On peut les grouper en deux classes :

3.5.1. Investissements minimes

Voici quelques propositions que tout gymnase devrait être en mesure d'appliquer sans difficulté. Elles sont données par M. Rachid Bendjama, concierge de Chamblandes, qui les a appliquées. Les résultats sont impressionnants, et le gymnase de Chamblandes peut être cité comme exemple.

- On a souvent considéré les vannes thermostatiques (c'est-à-dire une vanne qui gère l'arrivée d'eau dans les radiateurs en fonction de la température et du réglage) comme une bonne chose. Il faut relativiser les choses. Une telle vanne qui est réglée par les élèves ou le personnel non-sensibilisé a un effet tout à fait négatif. En effet, ces personnes ont tendance à ouvrir au maximum quand ils ont froid et de ne pas les refermer lorsque la température est devenue plus clémente ou en quittant la salle. Une vanne ouverte au maximum bloquera l'arrivée d'eau à des températures nettement trop élevées.

La solution est simple : il faut les bloquer sur une ouverture raisonnable. Cette opération est facile et ne nécessite que très peu de temps. Ce blocage n'empêche pas le concierge d'ajuster la vanne mais évite que des gens non-conscients du problème agissent de manière contre-productive.

Lors du blocage de la vanne, il faut être attentif au taux d'exposition de la salle au soleil. Ainsi une salle avec de grandes vitres exposées plein sud, un jour où il fait grand beau mais 0 °C à l'extérieur, il n'est pas nécessaire de chauffer.

De plus, dans la mesure du possible il faudrait éviter d'installer des vannes directement à côté (ou en dessous) des fenêtres susceptibles d'être ouvertes, car le froid de l'extérieur ferait complètement ouvrir la vanne qui chaufferait alors beaucoup trop, compte tenu qu'en plus une grande partie de la chaleur est perdue par la fenêtre ouverte.

- Les utilisateurs des bâtiments doivent d'ailleurs éviter d'ouvrir les fenêtres de manière prolongée. Il vaut mieux aérer un grand coup que de laisser une fenêtre en imposte.
- De manière générale les appartements, mais aussi les salles en tout genre sont trop chauffées. Il est important d'avoir des normes de températures raisonnables. Voici les normes qui sont appliquées à Chamblandes. Elles sont tout-à-fait viables et confortables, même si elles sont moins élevées qu'en général.

Normes de températures à Chamblandes	
Salle de cours :	20 °C
Salle de gymnastique :	14 °C
Couloir :	15 °C

NB : Il s'agit ici bien sûr des températures hivernales. L'été il ne s'agit en aucun cas d'utiliser un système de climatisation pour atteindre ces températures. Il faut les comprendre comme des valeurs cibles en temps de chauffage.

- Il faut faire attention à régler correctement les périodes de chauffage. Il faudrait par exemple commencer à chauffer le matin qu'à partir d'environ 30 minutes avant le début

des cours. Et, le soir, il faut en aucun cas continuer à chauffer après l'heure de fermeture.

Exemple du cas de Chamblandes :

Horaire de chauffage quand il n'y avait pas de cours du soir :

7 h 30 → 17 h 30

Horaire de chauffage maintenant qu'il y a des cours du soir :

7 h 30 → 21 h 30

- Il faut inciter les utilisateurs du bâtiment à s'habiller plus chaudement plutôt que de se plaindre de la température soi-disant trop basse.
- Il est important de pouvoir garder les statistiques des années précédentes (si possible dès la mise en fonction de la chaudière), et de constamment contrôler le taux d'énergie consommée par degré-heure afin de pouvoir détecter toute anomalie, et de pouvoir suivre le bilan écologique et économique de son chauffage.

Cette démarche peut paraître purement bureaucratique mais elle est essentielle pour avoir des points de repère. La maîtrise de la consommation du chauffage ne se fait pas du jour au lendemain, et il faut acquérir une certaine expérience.

Il ne faut pas sous-estimer les effets de telles mesures. Elles ont d'ailleurs un bien meilleur rapport prix/amélioration que des changements d'infrastructure (cf. *Investissement conséquents*, ci-dessous). En outre il faut savoir que si on chauffe une salle 1 °C de moins, c'est 6% d'énergie économisée.

3.5.2. Investissements conséquents

Si les installations existantes commencent à trop vieillir il peut être intéressant financièrement de les remplacer. Mais vouloir changer pour changer coûte cher et a aussi son « coût environnemental ».

Toutefois les infrastructures sensibles pour l'efficacité du chauffage sont :

- Isolation du toit
- Isolation des murs
- Vitres et baies vitrées
À remplacer impérativement : vitre sans double-vitrage
- Chaudière
L'idéal est une chaudière à granulés de bois, avec filtre à particule et avec technique de condensation.
- Système de distribution de chaleur
*Les conduites doivent être parfaitement isolées.
Le chauffage au sol provoque moins de pertes.*

Autant de domaines où des progrès techniques améliorent constamment les performances. Plus l'installation est récente et plus on y a mis le prix, mieux c'est.

4. Solutions de remplacement pour le chauffage

Plus que de vouloir exposer les côtés purement techniques et scientifiques des différentes alternatives, nous allons présenter chaque solution brièvement avant de donner leur intérêt écologique et leur viabilité, en comparant notamment les prix et les éventuelles pollutions.

Se chauffer a toujours été indispensable dans une bonne partie du globe. Longtemps la biomasse (par le bois) a été l'unique moyen, mais avec la révolution industrielle l'énergie fossile a pris nettement l'avantage. Trouver et appliquer des solutions pour revenir à des chauffages plus écologiques apparaît donc comme un grand défi.

4.1. *Énergie fossile alternative : Le gaz naturel*

4.2.1.1. Aspects techniques

De toutes les solutions que nous proposons, c'est sans doute la moins obscure pour le grand public. C'est un carburant qui a fait ses preuves et qui est déjà bien éprouvé.

D'un point de vue chimique, le gaz naturel qui est distribué est un gaz organique léger : le méthane (CH_4). Des autres gaz peuvent apparaître en trace, mais ils sont en principe retirés. La problématique posée par le gaz naturel est cependant en beaucoup de points semblable à celle du pétrole. Déjà au niveau des gisements, les gisements de pétroles sont souvent combinés à des gisements de gaz.

Toutefois le gaz naturel, contrairement au pétrole, pose des problèmes de transport, vu bien sûr sa volatilité. La consommation des gaz extraits est donc souvent « locale ». Ceci explique qu'il y a moins de tensions géopolitiques. En Europe il existe quand-même un réseau de gazoducs de distribution efficace. Pour des distances plus grandes il existe toutefois une autre solution : le GNL (gaz naturel liquéfié). Le transport intercontinental maritime est donc possible avec les bateaux méthaniers. Cette solution qui était chère devient de plus en plus intéressante et exploitée.

Mais, (revenons à ce qui nous intéresse) l'utilisation du gaz naturel comme combustible est-elle vraiment plus écologiquement viable que le pétrole ? Le gaz naturel contient moins de carbone que le pétrole, donc formation de 25 % de dioxyde de carbone en moins lors de la combustion (198 g/kWh). Les émissions de NO_x sont aussi moindres (de l'ordre de 33% de moins).

Un des avantages du gaz naturel est qu'il n'y pas besoin de se ravitailler périodiquement car, en général, la chaudière est directement connectée au réseau de distribution. Il n'y a donc pas besoins non plus d'avoir un réservoir. La taille nécessaire des locaux est donc moindre. Le prix de l'investissement initial sera donc plus bas.

4.2.1.2. Exemple

Le gymnase de Beaulieu.

Il possède en fait deux chaudières : la principale, celle à gaz ; et celle d'appoint, au mazout.

4.2.2. Se chauffer à la biomasse : le bois

4.2.2.1. Aspects techniques

Historiquement, c'est un des – sinon le – plus vieux combustible utilisé pour se chauffer. Et pourtant on va voir qu'il est tout-à-fait adapté à une utilisation moderne et d'avenir. Sa principale qualité est qu'il ne rejette que la quantité de CO₂ que l'arbre a précédemment absorbée, et qu'en se décomposant le bois en aurait émis autant. Son bilan CO₂ est donc neutre (si on ne tient pas compte des éventuelles émissions dues à l'exploitation de la forêt).

Toutefois le gros inconvénient écologique du bois est qu'il produit beaucoup de particules fines. L'utilisation d'une cheminée (opposée au poêle ou à la chaudière) n'est donc pas idéale, car les bûches ne se consomment généralement pas entièrement, de plus elles produisent plus de particules fines. L'idéal serait d'installer des appareils de traitement des fumées sur une chaudière à bois (des filtres à particules notamment).

4.2.2.2. Exemple

Collège de Corsy, à La Conversion.

Nous avons eu la chance de pouvoir visiter la chaudière du collège grâce à l'aimable invitation d'un ramoneur. L'approvisionnement se fait directement par la commune qui exploite les forêts des environs. (Il y a donc indépendance énergétique.) Ce système permet un ravitaillement fréquent et limite donc les besoins en capacité de stockage du bois. Le combustible est entreposé dans un réservoir plus bas que la chaudière. Il est ensuite amené à la chaudière par une vis sans fin (des « colonnes de chute » empêchent les retours de flammes). Tout le système est régulé électroniquement ; alimentation en oxygène (ventilateurs), alimentation en bois, système d'extinction en cas de problème. Les gaz chauds émanant de la combustion transmettent leur chaleur au circuit d'eau, après quoi ils sont centrifugés, afin de récupérer les particules fines (qui sont stockées en attente d'élimination dans des conteneurs).

Cette visite nous a permis de constater qu'à puissance égale, les chaudières à bois prennent plus de place que celles à mazout, et que malgré l'automatisation de l'installation elle nécessite plus de présence humaine (notamment au premier allumage de la saison). Ce sont les maux nécessaires à une installation plus écologique.

4.2.3. Se chauffer à la géothermie

4.2.3.1. Aspects techniques

Exploitation à petite échelle : la pompe à chaleur

Lorsqu'elle est utilisée pour une maison individuelle, ou de petite taille, c'est souvent à faible profondeur avec des différences de températures entre la couche du sol atteinte et l'air ambiant moindre (par exemple 10 °C plus chaud). On parle alors de géothermie de très basse énergie.

La pompe à chaleur est un système qui a déjà beaucoup été appliqué, notamment dans nos contrées. Le système est tout-à-fait adapté à l'exploitation du chauffage d'une villa, par exemple. Le système envoie de l'eau dans le sol à une profondeur où le sol est plus chaud que l'eau introduite. L'eau se réchauffe et entre dans le circuit de chauffage de la maison. Il s'opère donc un transfert de chaleur entre le sol et l'air de la maison via un circuit fermé d'eau.

L'énergie géothermique est renouvelable, mais le système nécessite une certaine quantité d'énergie électrique, « l'énergie d'entraînement ». Elle délivre 100% d'énergie thermique utile à partir de 25% à 30% d'énergie électrique.

Exploitation à grande échelle

Lorsqu'on veut appliquer ce principe à une plus large échelle, par exemple pour un réseau de chauffage urbain, on doit forer plus profondément (de plusieurs centaines de mètres à quelques milliers). La différence de température entre la couche du sol atteinte et l'air ambiant atteint alors parfois les 100 °C. On parle alors de géothermie de basse énergie.

4.2.4. Se chauffer à l'énergie solaire

4.2.4.1. Aspects techniques

Le principe du chauffage solaire est hyper simple : le soleil chauffe de l'eau qui est ensuite injectée dans le réseau du chauffage central. Dans la pratique, l'exploitation d'un chauffage solaire nécessite deux éléments supplémentaires. Le temps d'exposition du panneau au soleil étant limité, et les heures de forte consommation ne concordant pas avec les heures de fortes production, il faut installer (pour des performances optimales) un accumulateur à chaleur. De plus, il ne s'agit que d'un chauffage d'appoint, il faut donc toujours avoir une autre chaudière pour garder le même niveau de confort qu'avec un chauffage conventionnel.

4.2.4.2. Exemple

Maison de retraite de Montmélian, Savoie

Voilà ce qu'on pourrait appeler une réalisation de taille. Avec des capteurs solaires de 400 m² on arrive à alimenter 135 logements en eau-chaude et chauffer 5'000 m² de sol chauffant. Au final l'établissement économise 75% de sa facture de chauffage.

4.2.5. Coûts/Comparaison des différents moyens de chauffage

La comparaison des coûts est toujours délicate, car elle n'est valable que dans une certaine situation et dans un certain laps de temps. De plus il peut exister de grandes différences de prix à l'achat entre deux chaudières de même combustible.

Voici toutefois un tableau comparatif valable pour la situation en Suisse pour l'année 2005. Les chiffres sont tirés d'une étude comparative établie par l'Association Suisse de l'Industrie Gazière avec des chiffres de l'office fédéral de la statistique.

Cette étude est faite pour une villa (besoins de chauffage environ 20'000 kWh par an), reliée au réseau de distribution du gaz. Le prix par année est calculé en tenant compte de l'amortissement de l'installation, des locaux nécessaires à l'installation, des coûts d'entretien et des coûts de l'énergie consommée (combustible).

Type de chaudière	Investissement (locaux + installation)	Amortissement et exploitation par an
Au mazout	18'000.- CHF	3'724.30 CHF
Au gaz naturel	11'100.- CHF	3'262.80 CHF
Copeaux de bois	23'800.- CHF	4'592.80 CHF
Solaire (aux: mazout)	29'100.- CHF	4'292.15 CHF
Solaire (aux: gaz naturel)	22'700.- CHF	3'936.30 CHF
Pompe à chaleur (air/eau)	26'800.- CHF	3'986.- CHF
Pompe à chaleur (sol/eau)	39'600.- CHF	4'234.15 CHF
Granulés de bois	31'000.- CHF	4'523.50 CHF

Comparaison des investissements

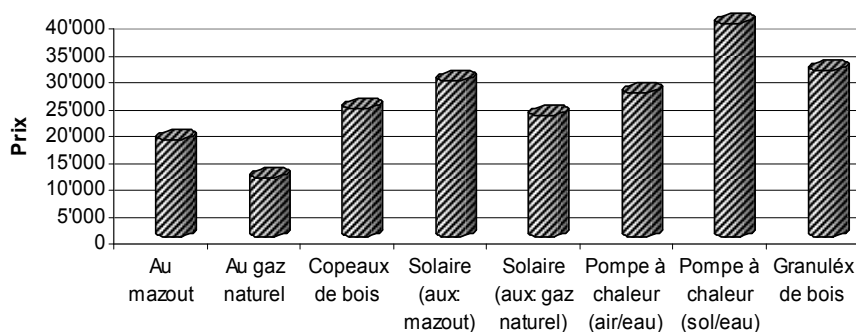


Fig. 4.1

Comparaison des amortissements & exploitations

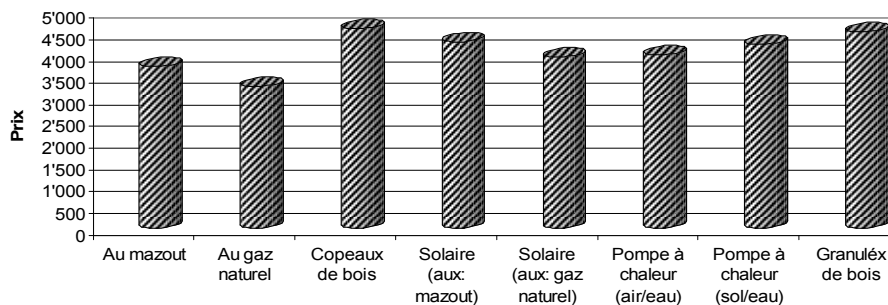


Fig. 4.2

5. Conclusion

Les gymnases lausannois ne sont pas les seuls bâtiments touchés par la problématique du chauffage. En fait les questions que nous nous sommes posées doivent l'être pour tous les bâtiments chauffés. Chaque concierge d'immeuble ou chaque propriétaire de villa a une responsabilité. L'action collective est un des principes fondamentaux pour qu'un effort écologique soit efficace.

Les solutions pour une meilleure efficacité existent, on l'a vu. Certaines ne coûtent rien, sinon un petit peu de temps. Chacun devrait donc relativiser son confort et appliquer quelques-unes de ces solutions.

Chaque construction, chaque rénovation, chaque remplacement d'une infrastructure immobilière doit se faire en tenant au moins autant compte de la variable écologique que de la variable économique. À la construction d'une maison par exemple, il existe aujourd'hui un grand choix de type de chauffage. Il faut donc arrêter de choisir par automatisme ou par défaut. Gare aussi aux publicités mensongères du lobby du mazout, pourtant si attendrissante à la télévision.

Heureusement la population semble de plus en plus prendre conscience des problèmes environnementaux. Et aujourd'hui des situations comme celle du gymnase de Beaulieu ne passent pas très bien auprès d'elle. Mais rares sont ceux qui sont conscients des chiffres et des performances des chauffages des bâtiments dans lesquels ils évoluent. Un rapport comme le notre permet donc d'attirer l'attention sur des mauvais points, et de tirer la sonnette d'alarme s'il y a lieu de le faire.

Avec cette deuxième partie du T.M., on vous a donc présenté une partie de la problématique pétrolière sous un angle de science naturelle, tandis que la première partie avait plus une approche de science humaine. On ne prétend pas avoir fait le tour du sujet, ni d'avoir été exhaustif, cela n'aurait pas été possible dans le cadre d'un T.M. On pourrait consacrer sa vie à étudier cette problématique sans réussir pour autant à résoudre tous les problèmes « pétroliers » tellement les enjeux sont importants.

Alors levons tous nos verres remplis de pétrole et buvons à la santé de notre planète. Et les gens qui se soulèvent de trop avoir bu d'or noir n'auront qu'à maudire leur sort. Regarde-toi en face plutôt qu'au fond d'un baril !

6. Annexes

6.1. Annexe n°1 Tableau de conversion

Baril [bl]	Tep	m ³ ep	kWh	GJ
énergie équivalente à un baril de pétrole	énergie équivalente à une tonne de pétrole	énergie équivalente à un m ³ de pétrole	un kilowattheure	un gigajoule
= 0,1364 Tep	= 1 Tep	= 0,8581 Tep	= 0,000086 Tep	= 0,02389 Tep
= 1586 kWh	= 11 628 kWh	= 9978 kWh	= 1 kWh	= 277,78 kWh

Sources:

- Joule. (8 juillet 2006). Wikipédia, l'encyclopédie libre. Page consultée le 8 août 2006 à partir de <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Joule&oldid=8529524>.
- Conversion Calculator. The British Petroleum Compagny, Page consultée le 8 août 2006 à partir de <http://www.bp.com/conversionCalculator.do?&contentId=7017990&categoryId=91>

6.2. Annexe n°2 Solution de remplacement dans le domaine des transports.

À la base il était prévu d'inclure cette partie dans le corps du T.M. Mais étant donné qu'il était déjà trop volumineux et que ça sortait du cadre du chauffage elle a été enlevée. Cela reste tout de fois intéressant de l'avoir dans les annexes car les transports restent le domaine le plus gourmand en pétrole.

Même si le pétrole est utilisé dans la production d'énergie dans tous les domaines, les transports est un, sinon le, domaine qui en est le plus dépendant. Le remplacement progressif du pétrole par d'autres énergies primaires dans les transports semble donc autant inévitable que difficile. Nous allons donc tenter d'explorer quelques pistes, applicables à l'automobile mais aussi à d'autres moyens de transports qui seront probablement amenés à terme à reprendre des parts de marché sur l'automobile étant donné la hausse prévue des besoins de transport et la volonté de limiter le bétonnage intensif.

Énergies fossiles alternatives

Le gaz naturel

Aspects techniques

De toutes les solutions que nous proposons, c'est sans doute la moins obscure pour le grand public. C'est un carburant qui a fait ses preuves et qui est déjà bien éprouvé.

D'un point de vue chimique, le gaz naturel qui est distribué est un gaz organique léger : le méthane (CH₄). Des autres gaz peuvent apparaître en trace, mais ils sont en principe retirés. La problématique posée par le gaz naturel est cependant en beaucoup de points semblable à celle du pétrole. Déjà au niveau des gisements, les gisements de pétroles sont souvent combinés à des gisements de gaz.

Toute fois le gaz naturel, contrairement au pétrole, pose des problèmes de transport, vu bien sûr sa volatilité. La consommation des gaz extraits est donc souvent « locale ». Ceci explique qu'il y a moins de tensions géopolitiques. En Europe il existe quand-même un réseau de gazoducs de distribution efficace. Pour des distances il existe toute fois une autre solution : le GNL (gaz naturel liquéfié). Le transport intercontinental maritime est donc possible avec les bateaux méthaniers. Cette solution qui était chère devient de plus en plus intéressante et exploitée.

Mais, (revenons à ce qui nous intéresse) l'utilisation du CNG (*Compressed natural gas*, gaz naturel compressé) comme carburant est-elle vraiment plus écologiquement viable que le pétrole ? Le gaz naturel contient moins de carbone que le pétrole, donc formation de 25 % de dioxyde de carbone en moins lors de la combustion (198 g/kWh). Les émissions de NO_x sont aussi moindres (de l'ordre de 33% de moins). De plus, la distribution de gaz n'a pas besoins de camions car il existe un réseau de conduite. Et les risques de marées noires sont nuls.

Coûts / Comparaison

Prenons des valeurs de comparaison pour les prix pour une Opel Zafira 1.6

	Prix à l'achat (neuf)	1 litre équivalent benzine (prix au 23 Septembre 2006)	Amortissement.
Véhicule à Benzine (sp95)	dès 26'850.- SFr.	1.64 SFr.	→ après 105'900 km environ
Véhicule à CNG	dès 31'450.- SFr.	1.02 SFr.	
Economie effectuée	117% (+4600.- SFr.)	- 38 % (-0.62 SFr.)	

Il faut aussi tenir compte que dans certaine région il existe des avantages fiscaux qui font que la voiture est plus vite amortie. Par exemple dans le canton de Vaud, il y a 50% de rabais sur la taxe automobile.

*Exemples**Le réseau de bus des Transports Lausannois*

Si la majorité des kilomètres tractionnés par les véhicules de TL le sont par énergie électrique (env. 53 %), env. 31 % le sont par traction diesel et enfin env.16 % par traction au CNG. Les TL possèdent quatre types d'autobus à gaz (A 330 CNG, New A 330 CNG, AG 300 CNG, New AG 300 CNG), tous construit par la firme Van Hool.

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL)*Aspects techniques*

Le gaz de pétrole liquéfié n'est en fait qu'un dérivé (par raffinage) du pétrole et/ou du gaz naturel. Il est composé de molécules organique du type C_xH_y , où x vaut entre 2 et 4. Mais le GPL « carburant » à proprement parler est un mélange de propane et de butane.

Le GPL a, à l'instar du CNG, la réputation d'avoir des avantages écologiques non-négligeables. Les émissions de particules fines sont quasiment nulles. Selon l'étude EETP, un véhicule au GPL émet 68 % moins d'oxyde d'azote (NO_x) qu'un véhicule à benzine, soit 95,8 % de moins qu'un véhicule au diesel. Mais les émissions de monoxyde de carbone sont sensiblement les mêmes, voir supérieures à celles des véhicules diesel ou à benzine. Et contrairement au mythe, les émissions de CO_2 ne sont pas significativement plus basses que celle d'un engin diesel ou à benzine. En fait les résultats concernant le dioxyde de carbone diffèrent selon les études. Mais ces résultats sont très théoriques, et pour une situation « optimale ». En fait ils proviennent des organes qui font le marketing du GPL. Dans la pratique les résultats sont beaucoup plus catastrophiques.

Mais un véhicule au GPL présente d'autres propriétés appréciables : le moteur s'use moins vite, fait moins de bruit et offre une meilleure souplesse de conduite.

Un des défauts majeurs du GPL c'est, étant donné que c'est un gaz, le risque d'explosion. Cela lui a d'ailleurs valu d'être exclus de certains garages souterrains.

Et dernier détail, mais pas des moindres pour nous helvètes : il n'existe pratiquement pas de stations GPL en Suisse. Les tableaux de comparaisons ci-dessous s'appliquent donc à une situation française.

En résumé le GPL est, contrairement au CNG, une alternative à abandonner. Les qualités écologiques ne sont que de la poudre aux yeux, il s'agit toujours d'une énergie fossile et en plus les véhicules GPL présentent des risques.

Coûts / Comparaison

Prenons l'exemple d'une Renault Scénic

	Prix à l'achat (neuf)	1 litre équivalent benzine (prix au 23 Septembre 2006)	Amortissement
Véhicule à Benzine (sp95)	dès 19'400 €	1.20 €	→ Après environ 50'000 km
Véhicule à GPL	dès 21'000 €	0.80 €	
Economie effectuée	108% (+1'600 €)	- 33% (- 0.40 €)	

Comparons maintenant les propriétés écologiques entre les deux modèle V70 de Volvo, un à benzine, l'autre à GPL. (Model 2005, données constructeur.)

Emissions en g/km	CO ₂	CO	HC (hydrocarbures imbrûlés)	NO _x
Volvo V70 2.4 l, BM5, benzine	214	0,032	0,020	0,013
Volvo V70 2.4 l, BM5, GPL	197	0,606	0,047	0,011
Différence	- 9 % avec le GPL	+ 1894 % avec le GPL	+ 135 % avec le GPL	- 12 % avec le GPL

Énergies renouvelables

Les biocarburants

Aspects techniques

Les « biocarburants » forme un groupe très large qui définit tous les carburants obtenus par des déchets végétaux « récents ». Cela comprend donc beaucoup de produits différents (huiles végétales en tous genres, gaz, alcools, et autres produits carboniques). Théoriquement il est possible de faire des moteurs avec tous ces carburants, mais, bien sûr, pour des raisons historiques et pratiques, les produits les plus intéressants à obtenir à partir de la biomasse sont :

Le bois, le biodiesel, l'huile végétale brute, le bioéthanol, et le biogaz.

Le bois, ou le charbon de bois (plus pratique et plus calorifique) n'est pas un carburant à proprement parler, mais un combustible, car il nécessite une chaudière. Le bois, dans le domaine des transports, n'est plus qu'un combustible historique – sauf dans de rares exceptions. Le principe est bien connu, c'est la machine à vapeur. Le bois permet de remplacer le charbon pour la chauffe de l'eau. Il n'augmente pas le taux de CO₂ dans l'atmosphère, mais rejette beaucoup de particules fines (donc à éviter en milieu urbain). L'effort dans les pays industrialisés ne doit pas se porter sur le remplacement du parc véhiculaire par des engins à vapeur, mais l'encouragement de l'utilisation du charbon de bois au lieu de l'antracite (charbon minéral) pour le fonctionnement des bateaux et locomotives à vapeur historiques et touristiques.

Le biodiesel, est en fait issu d'une réaction entre des huiles végétales (le plus souvent de colza ou de soja - USA en particulier) et d'alcools produits à partir de la biomasse (la plupart du temps du méthanol). Cela permet d'avoir un carburant moins visqueux qu'une huile végétale brute.

L'huile végétale brute utilisée comme carburant (HVC) est soit issue de l'agriculture (avec des procédés identiques – en termes de fabrication – à celle de la filière alimentaire), soit du recyclage d'huile végétale usagée (des restaurants par exemple). L'huile peut être quasiment directement utilisée comme combustible, ou bien être mélangée à du diesel traditionnel. La HVC est écologiquement très intéressante, mais pose quelques problèmes : sa température de fusion est assez élevée (problématique dans les pays froids), elle est visqueuse et use les injecteurs et les filtres.

Coûts / Comparaison

Dans les faits, il est difficile en Europe de trouver des voitures prévues dès l'achat pour rouler au biocarburant. Mais avec une voiture roulant habituellement au diesel, il est tout-à-fait possible de rouler à l'HVC moyennant quelques modifications, et à différentes proportions :

Rouler à 80% au diesel et à 20% à l'HVC :

Du moment que l'on possède un véhicule à moteur diesel, il n'y a pas besoin de modifier quoique ce soit. Il suffit de remplir le réservoir dans les proportions 80% diesel, 20% HVC. Attention toutefois, durant les mois les plus froids, ou dans les régions froides il faut rajouter de l'anti-gel, facilement trouvable.

Rouler à 100% à l'HVC :

Pour cela le moteur diesel nécessite l'installation d'un kit. Son coût est d'environ 1500.- SFr., installation comprise. Il existe plusieurs modèles sur le marché.

Le coût de l'huile végétale au litre varie selon le moyen d'approvisionnement. Elle est de 0.- SFr. par litre si l'on s'approvisionne auprès d'un restaurateur sympa qui veut bien vous laisser vous servir. (Souvent ça lui rend service, vu qu'il doit de toute façon l'éliminer.) L'autre solution est d'aller directement auprès des agriculteurs, certains vendent de l'huile végétale à des prix souvent inférieurs à ceux du diesel. Dans tout les cas (sauf exception chez certains agriculteurs) il vous faudra filtrer son huile. Un bricoleur peut construire un filtre maison (et efficace) pour moins de 100.- SFr. Une autre solution à laquelle certains pensent c'est d'acheter de l'huile alimentaire (neuve et déjà filtrée) dans des supermarchés. Ce procédé est totalement contre-productif, car la fabrication et l'élimination de l'emballage annulent tous les bienfaits écologiques d'utiliser de l'HVC au lieu du diesel.

En résumé pour rouler à l'HVC il faut être un minimum débrouillard, et il est difficile de vraiment pouvoir estimer le prix, car chaque cas est différent. Bien souvent cela revient, sur la durée, moins cher que de rouler au diesel.

Exemples

Projet « OZONE » (Orientation Zero Oil for New Energies) à la SNCF

23% de l'énergie de traction à la SNCF est encore d'origine pétrolière. Pour satisfaire la volonté du gouvernement de rendre la SNCF totalement indépendante du pétrole d'ici 2020, le projet OZONE tente d'étudier et de mettre en service des locomotives roulant à 100% au biocarburant dès 2008. De plus des locomotives dites « hybrides », selon le même principe que les voitures « hybrides », sont en test. Et enfin une trentaine de locomotives à moteur diesel traditionnel vont être soumises à un régime 20 % (voir 30%) de biodiesel pour 80 % (voir 70%) de diesel. Un programme similaire est aussi en cours au Canada.

Propulsion par de l'électricité issue d'une énergie renouvelable

Aspects techniques

L'énorme avantage de l'électricité c'est qu'elle est facilement productible par des moyens propres et écologiques. L'énorme désavantage est qu'elle est difficilement stockable en grande quantité.

Traits d'abord du problème du stockage. La solution la plus évidente est en fait de contourner le problème : au lieu de stocker l'énergie, on la consomme directement après sa production. Ce principe a d'ailleurs très largement fait ces preuves et le développement ne peut que s'occuper de détails. En Suisse, plus de 99% du trafic national de passagers par le rail est tractionné par des motrices électriques. De plus les agglomérations de Genève, Lausanne, Montreux-Riviera, La Chaux-de-Fonds, Fribourg,

Neuchâtel, Berne, Bienne, Lucerne, Zürich, Bâle, St-Gall, Schaffhouse, Winterthur pour ne citer que les réseaux suisses possédant au moins une ligne de trolleybus, véhicules pourvus de perches permettant de capter l'électricité des caténaies. Le désavantage de cette solution est que malgré des faibles coûts au kilowattheure, l'installation et l'entretien d'une ligne coûtent relativement chers. Cette solution n'est donc économiquement viable que sur des lignes à fort trafic.

Dans le trafic routier individuel, ou dans le trafic marchandise de détail la solution de l'alimentation externe n'est pas envisageable hors utopie. Il faut donc trouver des accumulateurs ou des « piles » à haute capacité. Cependant la pile chimique traditionnelle montre ses limites. Il y a deux solutions autres : des accumulateurs à très haute capacité (dont les plaques ont été laminées jusqu'à une minceur et une surface extraordinaire) ou la pile à combustible.

La pile à combustible produit de l'électricité suite aux réactions chimiques suivantes :

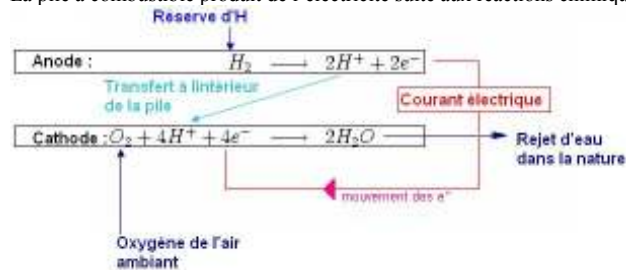


Fig. 6.1

Le véhicule propulsé par le courant électrique produit par cette pile à combustible ne doit donc avoir en réserve que de l'hydrogène. Pour en fabriquer il est nécessaire d'opérer l'opération inverse à la pile à combustible : l'électrolyse. Il faut donc à cette fin une énergie électrique. La pile à combustible n'a malheureusement pas un bon rendement, de plus le stockage de l'hydrogène est difficile. Ces aspects constituent les principaux désavantages de la pile à combustible à l'hydrogène.

Maintenant que nous avons traité du stockage, intéressons-nous à la production. Les possibilités écologiques ne manquent pas : Énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique, énergie marémotrice, géothermie.

Le point commun de toutes ces énergies est qu'elles ne polluent pas l'air (si on fait abstraction des travaux d'entretien et de construction) et qu'elles sont inépuisables, mais qu'elles portent atteinte au paysage dans une plus ou moins large mesure.

Coûts / Comparaison

Scooter à accumulateur

À titre de comparaison prenons deux types de scooters : un scooter à accumulateur de marque « Battle », et un scooter 50cm³ à peu près équivalent : BAOTIAN BT50QT-9.

	Prix à l'achat (neuf)	1 litre équivalent benzine (prix au 23 Septembre 2006)	Amortissement
Scooter à Benzine	Env. 1'100 SFr.	1.64 SFr.	→ Après environ 58'000 km
Scooter à accumulateur	Env. 3'000 SFr.	0.-- SFr. *	
Économie effectuée	273% (+1'900 SFr.)	-100% (-1.64 €)	

*en s'approvisionnant par exemple aux bornes gratuites mises à disposition par la ville de Lausanne. Elle offre d'ailleurs aux habitants une subvention de 1'600.- SFr. à l'achat d'un scooter électrique (dans ce cas : amortissement après environ 10'000 km).

Énergie solaire

Le prix de l'électricité du SIL ou de Romande Énergie : environ -.25 SFr. / kWh

Le prix de l'électricité issue du solaire (Prix payé par les services industriels de Genève) : environ -.85 SFr. / kWh

Le prix de l'électricité issue du solaire (Prix payé par un particulier possédant sa propre installation. Le calcul tient compte de l'amortissement et de l'entretien pour une surface de 1m² – adaptée pour un particulier) : entre -.70 et 1.50 SFr. / kWh

Énergie éolienne

D'un point de vue économique, l'énergie éolienne a le potentiel, sous certaines conditions, d'être meilleur marché que le nucléaire par exemple.

Énergie marémotrice

Cette énergie renouvelable peu connue et peu répandue ne date pourtant pas d'hier. Durant les siècles qui ont précédé le notre, les bretons utilisaient déjà des sortes de moulin à marée. Aujourd'hui l'homme a su exploiter les marées pour la production d'électricité de manière industrielle. Et pourtant il n'existe qu'une seule usine à ce jour : l'usine marémotrice de la Rance (en Bretagne). Le principe est le suivant : il y a un grand bassin que l'on remplit quand la marée est haute, et que l'on vide quand la marée est basse. Durant les phases de remplissage et de vidage, l'eau en mouvement est turbinée, et produit ainsi de l'électricité.

L'usine, construite en 1967, avait coûté environ 160 millions de francs suisses, somme qui représenterait actuellement environ 1 milliard. Le coût à la production du kWh revient à EDF à environ -.19 SFr., soit légèrement moins que le kWh nucléaire.

Énergie des vagues

Un tapis de flotteurs flexible flotte sur une mer agitée. Les mouvements relatifs entre flotteurs sont transformés en énergie électrique.

Géothermie

À la différence de la géothermie utilisée dans le domaine du chauffage (cf. 6.2.3.), pour la production d'électricité on a besoin de la « Géothermie haute énergie ». C'est-à-dire qu'une différence de quelques dizaines de degrés entre le sol foré et l'air ambiant ne suffit pas à l'exploitation d'une centrale de production électrique. La source d'énergie est contenue dans des réservoirs situés à plus de 1500 mètres sous terre et dont la température est supérieure à 80 °C (elle peut monter jusqu'à 300 °C). Pour atteindre de telles profondeurs il faut donc creuser profondément, ce qui est ardu. Pour que les coûts et les difficultés techniques soient moindres il est donc plus intéressant de construire ce genre de centrale dans les régions volcaniques – par exemple en Islande – où la température monte plus vite au mètre creusé.

Énergie hydroélectrique

Voici sans doute l'énergie renouvelable exploitée industriellement qui a fait son apparition en premier. En Suisse, le courant du réseau est produit à 60% par des usines hydroélectriques.

Mais qui dit énergie renouvelable ne dit pas forcément écologique. La construction de barrages provoque de gros dégâts sur le paysage et le biotope. Elle peut aussi obliger des populations entières à déménager. Dans les régions à risques une crise peut éclater si le pays en amont prive le pays en aval d'une certaine quantité d'eau (situation du barrage Atatürk en Turquie qui prive l'Iraq et la Syrie d'une partie des eaux de l'Euphrate). De plus la quantité de CO₂ rejetée dans l'atmosphère pendant la construction est affolante et ne vaut bien souvent pas la peine.

Aujourd'hui il faut bien sûr maintenir en exploitation les installations existantes – profitons pendant qu'il y a encore des glaciers – mais la construction de nouveaux barrages est une mauvaise idée dans la plupart des cas. Mais rien n'empêche de turbiner des eaux déjà sous pression.

Exemples

Exemple d'un réseau électrique propre, alimentant directement les véhicules : La filiale voyageur des CFF

Les Chemins de Fer Fédéraux Suisse SA font figure de modèle dans le monde entier, tant pour leur efficacité que pour leur bilan énergétique. Si on prend les véhicules du parc moteur destinés au transport de voyageurs (et si on exclut les véhicules de la *SBB Historic*, la fondation pour la sauvegarde du matériel historique), 100% d'entre-deux fonctionnent à l'énergie électrique. Les locomotives sont alimentées grâce aux caténaires, ce qui est possible grâce au haut taux d'électrification du réseau CFF : si on prend tous les kilomètres exploités par les CFF filiale voyageurs en service horaire, 100% d'entre-deux sont électrifiés. (Sur le réseau total des CFF – c'est-à-dire y compris les voies CFF Cargo – 3'002 km sont électrifiés sur un total de 3'154, ce qui représente environ 95,2%). En ce qui concerne la production d'énergie, en 2003 les CFF ont produit 89% de leur électricité par leurs propres usines hydroélectriques. Sur le 11% restants achetés sur le marché suisse de l'électricité, environ 60% est produit par des usines du même type, tandis que 40% est produit par des usines nucléaires. Au total c'est donc environ 95,5 % d'énergie hydraulique, contre 4,5 % de nucléaire. À noter que ça fait 100% de source ne rejetant pas (directement) de gaz polluants dans l'atmosphère. Toutefois, suite à la grande augmentation du trafic sur le réseau des CFF, ces chiffres sont légèrement devenus moins favorables, car il a fallu acheter plus d'électricité sur le marché (donc une plus grande part de nucléaire). En fait, si l'on prend la totalité de l'énergie qui a été nécessaire à la traction de tous les types de trains (y-compris les manœuvres en traction diesel), 75% sont d'énergies renouvelables sur un total de 2'260 GWh, soit environ 194'358 de Tep.

Énergies irremplaçables

Il reste une catégorie des transports où les énergies écologiques n'ont pas encore fait leur apparition : l'aviation. Le kérosène est un carburant extrêmement léger et ne peut pas être remplacé par du biocarburant. Il n'existe pas d'avion électrique capable de transporter plusieurs passagers, car les batteries sont trop lourdes et trop volumineuses.

Lueur d'espoir peut-être, une technologie récente, l'éco-light, permet aux avions de l'aviation générale (avion de tourisme, d'instruction, etc.) de voler avec de la benzine du type automobile.

On peut toutefois penser que l'aviation de transport de masse est vouée à moyen terme à disparaître. Des compagnies comme Easyjet ou Ryanair, en plus d'être des aberrations écologiques, risquent de devoir augmenter fortement leurs tarifs dans un avenir proche.

L'ère des transatlantiques et du Simplon-Orient-Express risque de revenir au goût du jour dans l'avenir.

7. Table des illustrations

Fig. n°	Page	Légende	Source
0.1	0	Première de couverture, plateforme pétrolière « Arguello Inc. Harvest » au large de la côte Californienne.	N.A.S.A.
3.1	7	Graphique : évolution de la rudesse de l'hiver de 1990-91 à 2005-06.	D'après les données d' « Info énergies ». Réalisation : A.F.
3.2	9	Graphique : consommation brute des gymnases.	D'après les données de « TENER ». Réalisation : A.F.
3.3	10	Graphique : efficacité pondérée (surface et déficit de température).	D'après les données de « TENER ». Réalisation : A.F.
3.4	11	Graphique : Normes Minergie (2004).	D'après les données de « TENER ». Réalisation : A.F.
3.5	12	Graphique : Détails Beaulieu.	D'après les données de « TENER ». Réalisation : A.F.
3.6	12	Graphique : Détails Bugnon.	D'après les données de « TENER ». Réalisation : A.F.
3.7	13	Graphique : Détails Chamblandes.	D'après les données de « TENER ». Réalisation : A.F.
3.8	13	Graphique : Détails Cité.	D'après les données de « TENER ». Réalisation : A.F.
3.9	14	Graphique : Détails Mercerie.	D'après les données de « TENER ». Réalisation : A.F.
3.10	14	Graphique : Détails Piccard.	D'après les données de « TENER ». Réalisation : A.F.
4.1	20	Graphique : Comparaison des investissements.	D'après les données de www.gaz-naturel.ch Réalisation : A.F.
4.2	20	Graphique : Comparaison des amortissements et exploitation.	D'après les données de www.gaz-naturel.ch Réalisation : A.F.
6.1	25	Principe de la pile à combustible.	Réalisation : A.F.

8. Glossaire, symboles & abréviation

≈	Symbole signifiant « correspond à peu près à ».
Δθ	Déficit de température, en degré-heure [dH].
A.F.	Alexandre Frauenknecht
A.S.	Alexandre Steullet
aux:	Énergie auxiliaire.
baril	Unité de mesure traditionnelle pour le pétrole, cf. annexe n°1 (6.1.).
benzine	En français de France signifie « essence ».
CFF	Chemins de fer fédéraux suisses S.A.
CNG	<i>Compressed Natural Gas</i> , Gaz naturel comprimé.
CO	Monoxyde de carbone, polluant.
CO ₂	Dioxyde de carbone, ou gaz carbonique, polluant.
dH	Unité de mesure : degré-heure, cf. point 3.1.
D.Manquantes	(Dans un tableau) « donnée manquante ».
D.m	(Dans un tableau) « donnée manquante ».
EDF	« Électricité de France »
Énergie fossile	Contraire de l'énergie renouvelable. Cette énergie est donc potentiellement épuisable.
Easyjet	Compagnie aérienne à bas prix.
GNL	Gaz naturel liquéfié
GPL	Gaz de pétrole liquéfié, cf. annexe n°2 (6.2.).
HC	Hydrocarbures imbrûlés, polluant.
HVC	Huile végétale carburant, cf. annexe n°2 (6.2.).
kWh	Kilo-watt-heure, unité de mesure de l'énergie. Cf. annexe n°1 (6.1.).
m ²	(Dans graphique) veuillez comprendre m ² (mètre-carré).
Minergie	Norme Minergie, détermine si un bâtiment est écologiquement acceptable. Cf. point 3.2.
Norme	(Dans graphique) représente la norme qu'on a proposée.
NO _x	Oxyde d'azote, polluant.
Ryanair	Compagnie aérienne à bas prix.
Saison	Période froide de l'année durant laquelle il est normalement nécessaire de chauffer (s'étend d'octobre à mai).
SFr.	Francs suisses.
SNCF	Société nationale de chemin de fer français
sp95	Benzine sans plomb, nonante-cinq octanes.
Tep	Tonne équivalente pétrole, unité de mesure d'énergie. Cf. annexe n°1 (6.1.).
TL	Transports de la région lausannoise.
TM	Travail de maturité (ce dossier).

9. Bibliographie (inclus source internet)

- Département des infrastructures de l'état de Vaud, *Groupe Énergie Rapport d'activité 2001*, Lausanne, avril 2002, 70pp. + annexes.
- MONS Ludovic, *Les enjeux de l'énergie : pétrole, nucléaire et après ?*, Larousse, Paris, 2005, 128pp.
- SIMMONS Matthew R, *Twilight in the desert : the coming Saudi oil shock and the world economy*, J. Wiley, Hoboken NJ, 2005, 422pp.
- CHALIAND Gérard, JAFALIAN Annie, *La dépendance pétrolière : mythes et réalités d'un enjeu stratégique*, Universalis, Paris, 2005, 195pp.
- *Conversion Calculator*. The British Petroleum Compagny, Page consultée le 8 août 2006 à partir de <http://www.bp.com/conversionCalculator.do?&contentId=7017990&categoryId=91>
- Wikipédia, l'encyclopédie libre. <http://fr.wikipedia.org/>
- Le Comité Français du Butane et du Propane (CFBP). <http://www.cfbp.fr/>
- *Les énergies renouvelables Ici et partout. Aujourd'hui et demain.*, AEE et Suisseénergie, Lausanne, 2005
- Opel Suisse, <http://www.opel.ch>
- Gazmobile SA, <http://www.erdgasfahren.ch/index.php?id=149#>
- Minergie, <http://www.minergie.ch>
- Service de l'environnement et de l'énergie (État de Vaud), <http://www.dse.vd.ch/environnement/energie/>
- LECHIEN Matt, *Le biodiesel, écologique et révolutionnaire*, Surréaliste édition, lieu d'édition inconnu, 2006, 33pp.
- Site du département du territoire du canton de Genève, <http://etat.geneve.ch/dt/>
- Site du ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer de la République Française, <http://www.equipement.gouv.fr/>
- Alex PIGEARD, *L'usine marémotrice de la Rance*, 1997, 45pp.
- Transports publiques de la région lausannoise, <http://www.t-l.ch>
- Moteur Nature, <http://www.moteurnature.com>
- Programme TENER de l'État de Vaud, <http://www.gestion-energies-vd.ch/>
- Groupement promotionnel suisse pour les pompes à chaleur, <http://www.pac.ch>
- Clipsol - l'Énergie solaire et les domaines d'application dans les collectivités, <http://www.clipsol.com/>
- Association Suisse de l'Industrie Gazière, www.gaz-naturel.ch

La fin de l'or noir, le début d'une ère nouvelle

Livre deuxième :

Énergies alternatives et étude des chauffages des gymnases lausannois

Ce dossier présente une **étude sur les différents « systèmes de chauffage » des gymnases** de Beaulieu, du Bugnon, de Chamblandes, de la Cité, de la Mercerie et de Piccard. Est-ce que la consommation en énergie est proportionnée par rapport aux besoins de chauffage ? Comment mesure-t-on ces dits besoins ? Comment peut-on améliorer les chauffages pour être plus écologique ? Voilà des questions auxquelles nous avons tenté de répondre.

Si vous lisez ce dossier, vous verrez qu'il existe de grandes différences entre les gymnases, et que rien n'est acquis. Vous découvrirez aussi quelles sont les **solutions possibles en alternative au chauffage traditionnel au mazout.**

Ce dossier s'inscrit dans le cadre d'un travail de maturité (TM), dont le thème général est le pétrole.

Lisez aussi le Livre Premier, qui traite de l'aspect macro-économique du pétrole.

Achévé d'imprimer : le 25 avril 2007, à Bussigny – près – Lausanne (Suisse)

Droits d'utilisation :

Toute personne est libre de lire, copier (en entier ou partie), projeter ou mettre à disposition ce dossier. Le contenu de ce dossier ne peut être ni vendu, ni utilisé à fin de marketing. Seul l'éventuel support peut être facturé.

À L'exception de la page plastique, ce dossier est imprimé sur un support en papier recyclable et issu de sylvicultures contrôlées FSC.

