



Notes techniques

Analyse de la consommation énergétique des tours

Auteur : Olivier SIDLER
Note technique n°090101

Janvier 2009

ENERTECH
Ingénierie énergétique
26160 FELINES S/RIMANDOULE
TEL & FAX : (33) 04.75.90.18.54
email : contact@enertech.fr
Web : www.enertech.fr

Introduction

Les tours ont la réputation d'être de très gros consommateurs d'énergie. En moyenne leur consommation d'énergie primaire est supérieure à 500 kWh/m²/an, et cette consommation peut atteindre dans certains cas 1.000 kWh/m²/an, et même plus de 1500 pour quelques tours de la Défense.

Or elles sont au coeur d'un débat aujourd'hui pour savoir si elles pourraient légitimement être une réponse à la densification urbaine, afin d'arrêter le mitage péri urbain et de mieux valoriser le foncier dont les coûts atteignent des niveaux de plus en plus difficiles à équilibrer.

Mais une tour n'est pas un objet isolé. Elle doit pouvoir être atteinte facilement par ses occupants, et sur un plan énergétique il faudra donc aussi envisager la question des déplacements et de la dépense d'énergie induite par ces déplacements.

Enfin le dernier aspect à envisager est celui du contenu énergétique d'une tour, comparé à celui d'un bâtiment ordinaire.

Nous allons examiner successivement ces trois aspects qui constituent l'ensemble des postes de consommation d'un bâtiment, directement ou indirectement.

Remarque : dans tout ce qui suit, nous avons utilisé pour la conversion énergie primaire/énergie finale, non pas le coefficient conventionnel de 2,58 (qui n'a aucun sens) mais le coefficient réel, celui utilisé par les Ministères français eux mêmes pour leurs calculs internes : **3,23**. Nous restons ainsi proches de la physique et des phénomènes tels qu'ils sont.

1 - Réduire la consommation d'une tour en exploitation

Le mouvement des « Green towers » a maintenant plus de dix ans. La première tour verte au monde a été la Commerzbank Tower à Frankfurt en 1997. Depuis, quelques dizaines de tours vertes ont été érigées avec la volonté, sincère ou non, de faire des bâtiments de haute qualité environnementale, doublée d'un effort sur la consommation d'énergie.

La plus intéressante de ces tours, du point de vue de la consommation d'énergie, est la Post Tower à Bonn (livrée fin 2002), parce qu'elle a été conçue par le meilleur bureau d'études thermiques allemand (Transolar) et que sa conception s'est faite en bonne intelligence entre l'architecte et tous les membres de l'équipe. Il s'agit, comme toutes les tours actuelles, d'un bâtiment de bureaux. C'est aujourd'hui la tour verte la moins consommatrice du monde.

La consommation prévisionnelle **d'électricité** (tous usages hors chauffage) était de 72 kWh/m²/an et celle **de chaleur** de 45 kWh_{ep}/m²_{shon}/an. Mais la campagne de mesure faite par Transolar a montré que, par rapport aux prévisions, la consommation réelle était supérieure de 33 % pour le chauffage et de 67 % pour les consommations électriques et s'élevait à 120 kWh/m²_{Shon}/an d'électricité et à 60 kWh/m²_{Shon}/an de chaleur, soit 448 kWh_{ep}/m²_{shon}/an en énergie primaire avec les coefficients de conversion réels (et non conventionnels) en France (primaire/final : 3,23 ; urbain : 1). Rapportées à la surface utile ces valeurs seraient respectivement 130, 67 et 500 kWh/m²/an.

La structure de cette consommation est la suivante :

1 - Chaleur :

Usages	Prévisions	Mesures
Chauffage	45	60

en kWh_{final}/m²_{shon}/an - Chauffage urbain

2 - Electricité :

Usages	Prévisions	Mesures
Ventilation	9	10
Rafraîchissement	0	3
Auxiliaires et autres	0	24
Bureautique	40	50
Ascenseurs	12	18
Eclairage	11	15
Total	72	120

en kWh d'électricité/m²_{shon}/an

Pour fixer les idées, le bâtiment de l'INEED que nous avons livré en 2006 à la gare TGV de Valence (surface utile : 2618 m²) est aujourd'hui le bâtiment de bureaux le moins consommateur de France. Sa consommation est de 20,7 kWh_{ep}/m²_{shon}/an de gaz pour le chauffage, et de 17,5 kWh/m²_{shon}/an d'électricité pour l'ensemble des autres usages. La consommation totale exprimée en énergie primaire pour l'ensemble des usages est de 77 kWh_{ep}/m²_{shon}/an. C'est 5,8 fois moins que la meilleure tour verte actuellement dans le monde.

Les décisions prises lors du Grenelle de l'Environnement vont poser un problème très sérieux aux tours, quelles qu'elles soient, et aux tours vertes en particulier. En effet, à compter de 2012, tous les bâtiments neufs devront atteindre le niveau de performance du label BBC Effinergie qui impose, pour l'instant, que $Cep \leq Cep_{ref} - 50\%$. Mais cette manière d'exprimer l'obligation n'est pas satisfaisante, et il n'est pas impossible que l'objectif des bâtiments tertiaires soit, comme pour les logements, exprimé d'une manière intrinsèque. Cette valeur ne pourrait s'écarter trop de la valeur pivot « 50 kWh/m²/an » (exprimée en énergie primaire) pour le chauffage, le rafraîchissement, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage et les auxiliaires de chauffage et de ventilation. Cet objectif pourrait aller, selon la zone climatique, de 40 jusqu'à 65 kWh_{ep}/m²_{shon}/an.

Or dans la tour verte la plus performante du monde aujourd'hui, la consommation atteinte pour ces seuls usages est de 52 kWh/m²/an d'électricité et 60 kWh_{ep}/m²_{shon}/an de chaleur, soit de près de 228 kWh/m²/an d'énergie primaire. C'est à dire 4,5 fois trop....

Mais la seconde décision prise lors du Grenelle est qu'en 2020, tous les bâtiments neufs en France devront être des bâtiments à énergie positive. Ils devront donc commencer par avoir extrêmement peu de besoins.....

Si les dispositions du Grenelle de l'Environnement peuvent paraître excessives à certains, elles n'en restent pas moins les seules mesures à prendre face à l'urgence énergétique et climatique. Dans une interview au journal Le Monde datée du 7/7/2008, le président du GIEC, M. Pachauri, a déclaré qu'il ne restait plus que sept ans pour inverser la courbe mondiale des émissions de gaz à effet de serre, après quoi la machine climatique s'emballera.

Question : que faudrait-il faire pour réduire la consommation d'énergie des tours de façon à atteindre le niveau de $60 \text{ kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2_{\text{shon}}/\text{an}$ pour la consommation conventionnelle ?

Reprenons les postes de consommation un à un :

■ *Le chauffage*

Les tours sont en général presque entièrement vitrées, ce qui est une hérésie énergétique. La première disposition serait de réduire considérablement la surface de vitrage en ne laissant qu'une partie vitrée de un mètre de hauteur. Mais une des conséquences des grandes surfaces vitrées observées dans les tours est l'effet « paroi froide » qui impose de chauffer à 22°C , ce qui augmente considérablement (d'environ 40 à 45 %) la consommation.

Cet ensemble de mesures pourraient ramener à 12 ou 15 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ les besoins de chauffage (mais pas encore la consommation !).

La consommation de chauffage sera fortement réduite si on utilise une pompe à chaleur couplée avec des systèmes de pieux géothermiques, notamment dans les structures du bâtiment. Plusieurs tours vertes ont utilisé ce système qui permet à la fois de réduire les consommations de chauffage et de rafraîchissement. Le chauffage pourrait alors ne plus représenter que $5 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ (par ces systèmes on a même atteint $2 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ dans un projet de bureaux à Grenoble).

■ *La ventilation*

Il faut enfin comprendre qu'il n'y a aucune obligation à utiliser 3 vol/h pour la ventilation alors que moins d'un volume pourrait suffire sans difficulté. La réduction massive des besoins de rafraîchissement (voir plus bas) va fortement faciliter cette réduction nécessaire des débits d'air. Il faut aussi systématiquement mettre en œuvre des ventilations double flux avec récupération de chaleur. Enfin, pour minimiser la consommation électrique des ventilateurs, il faudrait ventiler à l'horizontal, étage par étage ce qui éviterait les systèmes en toiture, et travailler à débit variable en fonction du taux d'occupation (détection de présence dans les bureaux).

■ *Le rafraîchissement estival*

C'est un des plus gros problèmes dans les tours qui sont généralement de gros consommateurs de climatisation. Il faut, comme le font beaucoup de tours vertes, généraliser l'ouverture des fenêtres afin de faire la nuit du free cooling et de stocker de la fraîcheur dans la structure. La Post Tower de Bonn décrite dans ce qui précède a mis ces dispositions en œuvre et a minimisé les besoins de rafraîchissement ($3 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$).

■ *La consommation des auxiliaires*

Elle sera réduite par des systèmes de pompes et de ventilateurs à vitesse variable, par une étude des réseaux pour qu'ils aient une faible perte de charge, etc. Mais une tour, du fait des longueurs à parcourir pour les différents fluides, sera toujours très consommatrice en auxiliaires, et il sera difficile d'atteindre le niveau que l'on a atteint dans le bâtiment de l'INEED ($5 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ d'électricité). Tablons sur $10 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$.

■ *La bureautique*

Nous avons montré depuis longtemps par campagnes de mesure que la bureautique était un des problèmes fondamentaux à régler si on voulait faire des bâtiments à faible consommation. La consommation moyenne en France est de $40 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ (électricité), mais l'usage de portables permet de diviser par 10 cette valeur. On peut conserver 4 ou 5 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$.

■ **L'éclairage**

Là aussi les solutions sont connues. Il faut diminuer le niveau d'éclairage dans les zones de bureaux (nous avons mis 150 lux dans le nouvel hôtel de la Région Rhône Alpes) et mettre un éclairage individuel, et si possible réglable, sur la tâche de travail. Le niveau de consommation peut descendre à 5 ou 6 kWh/m²/an d'électricité, peut-être 8 dans une tour à cause de la profondeur. Asservir ensuite l'éclairage à la présence et à l'éclairage naturel dans certains zones près des fenêtres.

■ **Les ascenseurs**

Ils restent un très gros problème dans les tours. Dans l'exemple allemand, il représente 15 % de la consommation totale d'électricité de la tour. On peut améliorer cela par des techniques qui fonctionnent bien dans les petits immeubles mais perdent un peu d'intérêt dans les tours (vitesse variable et suppression des réducteurs de vitesse à engrenages). Il existe aussi des ascenseurs dits « double deck » comportant deux niveaux et qui desservent deux étages à la fois. Mais ils sont délicats à faire fonctionner. Les ascenseurs resteront toujours le point faible des tours. Et ils sont inévitables.

Le bilan des dispositions précédentes, sur les cinq usages du label BBC, est le suivant :

- chauffage : 5 kWh/m²/an
- rafraîchissement : 3 kWh/m²/an
- ventilation : 10 kWh/m²/an
- auxiliaires : 10 kWh/m²/an
- éclairage : 8 kWh/m²/an

Attention : ici, toutes les surfaces sont des surfaces utiles

Total de la consommation d'électricité : 36 kWh/m²_{utiles}/an, soit environ 32,5 kWh_{ep}/m²_{shon}/an.

soit **105 kWh/m²_{shon}/an d'énergie primaire**. On est loin des 60 kWh_{ep}/m²_{shon}/an recherchés....

Si on considère l'ensemble des usages (et pas seulement les cinq usages du label BBC), la consommation d'électricité pourrait au mieux être de 60 kWh/m²_{utiles}/an, soit une consommation en énergie primaire de 194 kWh/m²_{utiles}/an, ou encore environ 175 kWh_{ep}/m²_{shon}/an. Mais il faudrait des efforts conséquents pour atteindre ce résultat, et il serait probablement aussi nécessaire d'associer les futurs utilisateurs lors de la conception de la tour, afin de leur faire comprendre très tôt le poids de leur comportement sur le résultat final.

Il reste l'idée de s'orienter vers le bâtiment à énergie positive. La production par éoliennes n'est *a priori* pas une bonne idée en site urbain (écoulement très turbulent au lieu d'écoulement laminaire, ressources de vent réduites, ce qui dégrade les performances). Il reste le photovoltaïque. Mais la toiture est totalement insuffisante du fait du grand nombre d'étages et il faudrait placer des panneaux en façades. Compte tenu de la perte de rendement dû au déficit d'enseuillement sur les façades Est/Ouest et Nord, et surtout des ombres portées par les bâtiments proches, il faudrait couvrir intégralement la tour de photopiles pour un résultat de toute façon insuffisant et de fort mauvais rendement. Mais il est très peu probable que l'on arrive à obtenir un bâtiment à énergie positive, on en sera même très loin.

Malgré les efforts importants que l'on pourrait faire, on voit que l'objectif qui sera imposé par le Grenelle de l'Environnement en 2012 à toutes les constructions neuves n'est guère compatible avec une tour, fût elle verte.

2 - Le contenu énergétique d'une tour

Nous n'avons pas trouvé d'études détaillées sur le contenu énergétique des tours. Mais il est certain que de par leur taille et les sollicitations auxquelles elles sont soumises (charge, vent, etc), les tours consomment beaucoup plus de matériaux au m² que n'importe quel autre type de bâtiment. Et de surcroît, elles consomment plutôt du béton et des aciers, c'est à dire des matériaux à très fort contenu énergétique. Elles sont aussi dotées de réseaux intérieurs beaucoup plus denses (électricité, sécurité, courants faibles, circuits de commande, etc). Si on suppose qu'elles mobilisent en moyenne une quantité de matériaux double de celle d'un immeuble de bureaux ordinaire (dont on connaît le contenu énergétique), on pourrait dresser le bilan suivant du contenu énergétique (exprimé en énergie primaire/m²_{utile}) :

- maison individuelle : 1000 kWh/m²
- Petit immeuble de bureaux : de 1500 à 2000 kWh/m²
- Tour : 3 à 4000 kWh/m²

Si on raisonne sur une valeur moyenne de 3500 kWh/m², le contenu énergétique représenterait 18 années de la consommation totale de la tour, sans compter l'entretien et le renouvellement des matériels et matériaux sensiblement plus fréquent dans une tour que dans les autres bâtiments.

On dresse généralement le bilan à 50 ans des bâtiments pour juger de l'impact cumulé du contenu énergétique et des charges d'exploitation. Celui d'une tour très performante (dont la consommation d'électricité tous usages confondus serait de 60 à 80 kWh_{ep}/m²_{utile}/an) pourrait se situer autour de **13.500 à 16.500 kWh/m²_{utile}** d'énergie primaire. Par comparaison, le bâtiment de bureaux que nous avons récemment présenté à Grenoble avait une consommation sur 50 ans de 2620 kWh/m²_{utiles}, grâce notamment à la compensation de la consommation d'électricité par une production photovoltaïque identique.

Le rapport de consommation entre un projet « urbain » très performant et une tour également très performante est proche de 6, malgré tous les efforts accomplis sur la tour....

On pourra certainement améliorer un peu cette situation en utilisant des matériaux recyclés. Certaines tours vertes l'on déjà fait.

Il semble donc que, malgré toutes les innovations techniques actuellement possibles, une tour soit structurellement très consommatrice en énergie et qu'il soit difficile, voire impossible, d'espérer la voir un jour au niveau des bâtiments de bureaux « urbains » tant l'écart est important.

3 - Le poids énergétique des déplacements

Dernier élément de cohérence : l'énergie nécessaire aux déplacements pour se rendre de son domicile à son lieu de travail : la tour.

Pour fixer les idées, faisons le calcul dans deux cas : le premier est celui d'un habitant qui fait 5 km pour rejoindre la tour, et le second celui d'un habitant extérieur à la ville qui fait 20 km.

On suppose que les trajets sont effectués A & R, 225 jours/an.

A partir des chiffres du CERTU (2002) fournissant la consommation d'énergie des différents modes de transport par passager.km, voici la consommation de l'usager dans les différentes configurations :

Transport	Voiture (8 l/100 km hors ville) (10 l/100 km hors ville)	Bus	Tramway
Consommation par passager.km (kWh _{ep})	0,7164 0,8955	0,0814	0,0640
Consommation annuelle pour un trajet journalier de 40 km (kWh _{ep} /an)	6450	735	—
Consommation de l'usager ramené au m ² de bureau (10m ² /pers) en kWh _{ep} /m ² /an	645	73,5	—
Consommation pour un trajet journalier de 10 km en ville (kWh _{ep} /an)	2015	183	144
Consommation de l'usager ramené au m ² de bureau (10m ² /pers) en kWh _{ep} /m ² /an	201,5	18,3	14,4

Les chiffres en gras représentent la consommation d'un salarié pour ses trajets domicile travail, exprimée en énergie primaire par m² et rapportée à la surface de bureau dont il dispose (10 m²). Ces chiffres doivent être directement comparés aux 155 kWh/m²/an du § 1 (voir p.4), qui est la consommation d'énergie primaire tous usages confondus, d'une tour très performante. **En d'autres termes, le salarié prenant sa voiture et faisant quotidiennement 20 km aller et retour (soit au total 40 km) pour se rendre à son travail, consomme ainsi 4,2 fois plus d'énergie que ce qu'il consomme dans la tour, son lieu de travail, tous usages confondus !**

Pour l'usager habitant en ville et faisant 10 km par jour en voiture, le bilan est meilleur mais reste lourd : 202 kWh_{ep}/m²/an, soit 1,3 fois plus que ce qu'il consomme sur son lieu de travail...

On voit que l'utilisation des transports en commun permettrait d'améliorer la situation. Si le salarié habitant 20 km pouvait prendre un bus, il ne consommerait plus que la moitié de l'énergie qu'il consomme sur son lieu de travail. Quant à celui qui est à 5 km, s'il peut rejoindre la tour en tramway, sa consommation de transport sera 10% de sa consommation annuelle dans la tour.

Ces quelques exemples montrent que d'un point de vue énergétique, la question des liaisons de la tour avec le reste de l'agglomération est fondamentale. La plupart des tours sont au centre des villes, parce qu'elles sont alors au noeud des transports en commun. Eloigner une tour d'un centre ville suppose de la desservir par des liaisons spécifiques à créer (comme le RER et la Défense en région parisienne).

Conclusion

Dans la perspective des nouvelles directives issues du Grenelle de l'Environnement, les tours, fussent elles trois fois plus performantes que les meilleures du monde actuellement, ne pourront jamais satisfaire les exigences réglementaires en vigueur et présenter un niveau de consommation suffisamment bas. Le recours à la production photovoltaïque sur l'ensemble des façades de la tour pourrait un peu améliorer cette situation, mais pas de façon assez significative.

Le contenu énergétique des tours est lui aussi beaucoup plus élevé que celui d'un bâtiment classique, mais on dispose de peu d'éléments précis sur le sujet.

Enfin, la question de la liaison de la tour et du tissu urbain qu'elle drainera est fondamentale. Une tour ne peut qu'être située sur un axe de transports en commun très denses. Faute de quoi les usagers prendront leur voiture, ce qui déséquilibrera définitivement le bilan énergétique ■