

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE D'UN BÂTIMENT ÉCONOME PAR LA MÉTHODE IPMVP

Stéphane GINESTET

UMR 8508 – Université de Bordeaux 1

Dominique MARCHIO

Ecole des Mines de Paris, Centre Energétique et Procédés

1. INTRODUCTION

De nombreux outils permettant d'effectuer le commissioning de bâtiments climatisés existants sont aujourd'hui développés, en particulier pour satisfaire les exigences d'efficacité énergétique, et parfois de qualité de l'air. Les travaux présentés ici ont pour objet le test et le retour d'expérience portant sur un outil de commissioning de l'Annexe 40 de l'Agence Internationale de l'Energie [IEA04](Commissioning of building and HVAC systems for improved energy performance), afin de dégager son utilité, et de présenter une application sur une mesure d'économie d'énergie. L'étude se concentre sur l'application aux bâtiments existants (retro et on-going commissioning). Compte tenu de la diversité des équipements techniques concernés, l'étude a été limitée au cas des centrales de traitement d'air (CTA). L'outil a été testé en l'état de mise à disposition au début de l'étude avec un positionnement d'utilisateur final et non de développeur d'outils et de méthodes. Dans le cadre du projet, douze outils ont été tout d'abord recensés puis évalués, parmi ceux-ci, cinq outils ont été jugés propres à évaluation sur site pilote. Pour les 3 outils réellement diffusés à ce jour : guide du PECL, Emma-CTA (du CSTB), IPMVP (du DOE et de l'ASHRAE), une synthèse de retour d'expérience a été rédigée [GMP04].

Elaboré par un comité de rédaction international (gouvernements, organisations professionnelles, laboratoires de recherche...) travaillant dans le domaine de l'énergétique, l'IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol) [IPM08] est une proposition de protocole international de mesure et de vérification des performances des systèmes énergétiques présents dans les bâtiments. Conçu initialement pour donner un cadre rigoureux et quasi-réglementaire, l'outil est utilisé dans ces travaux au niveau de la phase de retro et de on-going commissioning, c'est-à-dire au moment de la mise en place d'une mesure d'économie d'énergie dans un bâtiment. La mesure d'économie d'énergie consiste ici à remplacer une centrale de traitement d'air à débit constant par une centrale de traitement d'air dont le débit d'air neuf est asservi à l'occupation (au moyen du taux de CO₂ mesuré) [GIN05].

L'IPMVP vise à :

- évaluer le potentiel d'économie d'énergie (à partir de mesures, de calculs, de simulations...)
- équilibrer les coûts, la précision et la répétitivité des mesures avec le coût de la mesure d'économie d'énergie

L'objectif est de valider contractuellement les gains consécutifs aux opérations d'amélioration des performances énergétiques d'un bâtiment ou d'un système.

2. PRÉSENTATION DE L'OUTIL

L'IPMVP vise à évaluer le potentiel d'économie d'énergie (à partir de mesures, de calculs, de simulations...), et à équilibrer les coûts, la précision et la répétitivité des mesures avec le coût de la mesure d'économie d'énergie mise en place. L'objectif est de valider contractuellement les gains consécutifs aux opérations d'amélioration des performances énergétiques d'un bâtiment ou d'un système. Quatre options de calcul sont présentées dans le document [IPM08]. En fonction de la mesure d'économie d'énergie et des paramètres (mesures, logiciels...) disponibles, le gestionnaire de l'installation va pouvoir déterminer quelle option est la plus adéquate (en terme de précision, de coût et de rapidité d'exécution).

L'IPMVP propose plusieurs options de calcul des économies, différants au niveau de leur coût (appareils de mesures nécessaires, durée d'instrumentation, recours à la simulation...) et de leur précision.

Le document [ASH02] propose, lui, deux méthodes de calcul en fonction de l'impact de la mesure d'économie d'énergie: sur la consommation d'énergie de tout le bâtiment ou sur un composant en particulier et une méthode faisant appel à la simulation du bâtiment.

L'option A porte sur la vérification des facteurs de performance et implique de déterminer les économies à long terme par l'utilisation libre des conditions (hypothèses) pour des facteurs opérationnels. Les options B et C comportent l'utilisation des données mesurées à long terme ; L'option B implique des analyses de données finales et l'option C implique des analyses de données portant sur l'ensemble du bâtiment. L'option D est une simulation calibrée qui peut comporter une combinaison des conditions de l'option A et des options B ou C.

Il est important de noter que toutes les méthodes permettant de définir les économies d'énergie sont des évaluations. La performance peut être mesurée, les économies d'énergie ne peuvent pas être mesurées. Les options décrites dans ce document sont créées pour satisfaire les besoins d'un éventail de contrats qui utilisent les économies d'énergie pour déterminer les termes financiers de ceux-ci.

Option	Comment les économies sont calculées	Coût
Option A: Se base sur l'aspect physique du changement (équipement) opéré. Les paramètres clés (éclairage ou COP d'un groupe frigorifique) - mesures ou données constructeurs - et les facteurs opérationnels (horaires d'utilisation, ...) estimés servent à déterminer l'économie réalisable.	Calculs d'ingénieurs utilisant des ratios d'économie type.	1-5% du coût du projet.
Option B: Les économies d'énergie sont déterminées après l'achèvement du projet par des mesures sur le court terme ou par des mesures prises tout au long du contrat (au niveau de l'équipement concerné).	A partir de mesures avant après la mise en place de la technique d'économie d'énergie	3-10% du coût du projet.
Option C: Les économies sont déterminées au niveau global (l'ensemble du bâtiment peut faire l'objet de plusieurs mesures d'économie d'énergie). On utilise alors les relevés (gaz, électricité) de l'année en cours ou des relevés plus détaillés (données mensuelles).	Analyse des relevés (annuels ou mensuels) en utilisant des techniques de régression.	1-10% du coût du projet.
Option D: Les économies sont déterminées par le biais d'une simulation de composants ou d'une simulation globale.	Simulation et modélisation calibrées avec des données horaires (ou mensuelles).	3-10% du coût du projet.

Tableau 1 : les différentes options de l'IPMVP

Les principes généraux de la méthode cités dans les documents [IPM08], [DOE00] restent peu précis, et ne permettent pas d'effectuer de calculs. Ils guident seulement l'utilisateur de la méthode vers les paramètres à identifier. Le travail a consisté ici à mettre en oeuvre ces différentes options, et de les analyser afin d'en dégager des tendances.

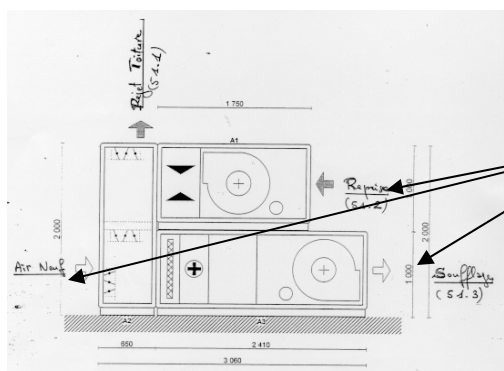
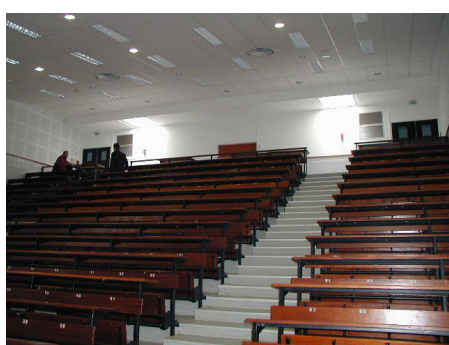
En résumé, les options A & B s'appliquent au niveau des systèmes, et les options C & D au niveau du bâtiment dans son ensemble. Les options C & D devraient être appliquées pour les opérations présentant des interactions importantes avec les consommations du bâtiment dans son ensemble, une unique analyse au niveau des systèmes se révélant alors insuffisante. L'option C consiste en une mesure des consommations pour l'ensemble du bâtiment, l'option D en une approche par modélisation pour l'ensemble du bâtiment. L'option A consiste en une extrapolation de l'efficacité (mesurée ou estimée) de l'équipement en utilisant un facteur forfaitaire (ex : nombre d'heure de fonctionnement). L'option B consiste en une estimation par la mesure des consommations sur une période courte ou plus longue. Les mesures sur quelques jours sont alors extrapolées par calcul en utilisant des modèles calibrés.

3. PRÉSENTATION DU SITE

3.1. Résumé du projet

Le propriétaire de deux salles de conférence, de 240 m² chacun, a souscrit un contrat de garantie de performances auprès d'un prestataire. Les salles sont traitées chacune par une CTA (centrale de traitement d'air) de type CLIMACIAT GI 100 de CIAT. Le chauffage de l'air est assuré par une batterie chaude à eau d'une puissance maximale de 160 kW, régulée en température. Le propriétaire souhaite remplacer les CTA existantes (débits d'air constants) par deux CTA à débit d'air variables afin de réaliser des économies, notamment sur le préchauffage de l'air neuf (en effet, les salles étant à occupation variable, un débit d'air neuf modulé en fonction du taux de CO₂ se révèle bien plus avantageux). Les modifications apportées au système sont : motorisation des registres asservis au taux de CO₂, ajout d'un système de variation de vitesse aux ventilateurs (la nouvelle régulation est inconnue pour l'instant...).

FIGURE 1 : APERÇU DE LA SALLE ET SCHEMA SOMMAIRE DE L'INSTALLATION



sondes de
température et
d'humidité

3.2. Hypothèses

Le projet a été rédigé en considérant les hypothèses suivantes :

- Le propriétaire ne prévoit pas de modifications majeures des salles de conférence (agrandissement par exemple) ou de changements qui modifieraient de manière significative leur occupation ou leur période d'utilisation.
- La période d'utilisation des salles ne variera pas suite à la modification des CTA.
- Le projet a été réalisé ici en mesurant l'énergie consommée avant et après la modification des CTA. Le propriétaire et le prestataire ont ici eu le temps de procéder à une étude expérimentale détaillée. Le calcul ne se basera pas ici sur une estimation des consommations (pas d'hypothèses complémentaires à rajouter à ce niveau). Les deux salles sont identiques.
- Les consommations avant et après la modification des CTA ont été mesurées. Les réductions de consommation (energy and demand savings) sont calculées comme suit :

$$\text{Réduction de consommation} = \frac{\text{Consommation CTA à débits d'air variables kWh (conditions de charges données)}}{\text{Consommation CTA à débits d'air constants kWh (conditions de charges très proches des précédentes)}}$$

3.3. Activités de M&V (Measurement and verification)

N'ayant pas de références normatives (ASHRAE, ISO...) concernant l'efficacité énergétique de la mise en place de tels systèmes (CTA à débit d'air variables) dans des situations telles que des salles à occupation variable, le propriétaire et le prestataire ont procédé à une campagne de mesures avant et après la modification des CTA. Les deux salles étant identiques (géométrie, composition des parois, orientation, réseaux aérauliques...) et occupées de manière quasi similaire (horaires, nombre d'occupants), il a été décidé d'équiper une des deux salles avec une CTA à débit d'air variables (salle 2) et de procéder à des mesures sur celle-ci, tout en laissant l'autre équipée de CTA à débit constant (salle 1). Les charges externes (Text, H_{Sext}, ensoleillement...) sont ici identiques, les charges internes sont très proches (occupation de deux salles de cours mitoyennes).

4. APPLICATIONS ET RÉSULTATS

Le bilan énergétique se fera ici sur les postes suivants :

- consommation de l'énergie électrique (ventilateurs notamment)
- consommation de l'énergie thermique

4.1. Option A : calculs simplifiés

Entrées supplémentaires	Mesures ponctuelles (« one-time ») de l'énergie consommée avant et après
Mode de fonctionnement :	4 méthodes pour l'évaluation des gains : 1. basée sur des mesures in-situ, au moyen d'appareils calibrés 2. basée sur des mesures sur un équipement similaire (« représentatif ») 3. basée sur des mesures communiquées par les constructeurs 4. basée sur des mesures de « baseline power level », profil de consommation électrique de l'ensemble du bâtiment
Sorties	Cette option permet de remplacer (au niveau contractuel) les mesures post-installation, afin d'évaluer les gains énergétiques.

L'application au site expérimental se fera par l'utilisation de clefs d'économies d'énergie déduites d'une étude approfondie du système par un organisme spécialisé (CETIAT). Il convient de distinguer ici deux modes de fonctionnement des CTA:

- le mode fonctionnement normal durant la journée
- le mode hors fonctionnement (maintien de 14°C durant les nuits)

L'étude du système montre que quel que soit le cas de figure, le mode hors fonctionnement représente 36% du total de l'énergie thermique consommée. On considérera ici que le mode hors fonctionnement se traduit par la même consommation, quelle que soit la CTA. En effet, les conditions extérieures, et les modes de contrôle (régulation) sont les mêmes. En ce qui concerne le mode de fonctionnement normal, la seule différence se fera sur le volume d'air neuf à réchauffer lors de la saison.

On calcule ici le surplus d'énergie de la CTA1 qui correspond au réchauffage de l'air neuf en fonctionnement normal, mais pour une occupation nulle. La CTA2 ne réalise pas ce réchauffage puisque dans ce cas d'occupation nulle le débit d'air neuf asservi à l'occupation est nul lui aussi.

On corrige cette valeur en considérant que les CTA ont le même débit (pour l'option A de l'IPMVP).

Le gain en énergie thermique est de 4768 kWh sur les 5 mois de chauffe, pour le mode de fonctionnement normal. Pour ce même mode, le gain en énergie électrique est de 1457 kWh sur les 5 mois de chauffe. L'économie en énergie thermique est bien plus élevée que le résultat des mesures effectuées sur la batterie chaude (2765 kWh d'économie mesurées).

Conclusion : l'option A ne permet ici que de faire une estimation des économies d'énergie réalisées¹. Les économies d'énergie sont ici déterminées sans mesures sur l'installation, donc pour que cette approche soit utile pour l'exploitant, il faut que les consignes prévues soient respectées. L'option A montre ici ses limites pour ce type d'équipement dont la consommation en énergie thermique et électrique est largement conditionnée par les valeurs des températures et de débits d'air. Il faut avoir accès à bon nombre de paramètres pour obtenir une précision suffisante, ce qui reviendrait quasiment à appliquer l'option B.

¹ L'une des principales hypothèses est ici que certaines conditions (par exemple la consigne en température intérieure) restent stables lors de l'étude. Si celles-ci sont modifiées par l'utilisateur en cours de fonctionnement, de fortes différences pourront être observées. Ainsi, dans le cadre de notre étude, un écart de 0,5°C sur la température moyenne de soufflage (21°C au lieu de 21,5°C) permet de réduire de 1000 kWh environ la quantité d'énergie consommée.

4.2. Option B : mesures sur site

Entrées supplémentaires:	Mesures en continu, in situ de l'énergie consommée avant et après
Mode de fonctionnement :	Calculs basés sur les données mesurées.
Sorties :	Cette option permet de confirmer qu'un système adapté a bien été installé, et qu'il génère les gains prévus. Elle permet aussi de déterminer les gains à partir de données mesurées.

Les mesures des différents paramètres sont réalisées à partir de matériel implanté spécialement pour le projet². Les paramètres mesurés utilisés pour réaliser l'opération sont (sur les deux CTA) :

- compteur électrique global
- puissance consommée par la batterie chaude (bilan sur l'eau)

On peut également avoir accès aux valeurs des températures de l'eau alimentant la batterie (entrée / sortie) mais ces données ne sont pas enregistrées. La puissance consommée par la batterie chaude est enregistrée toutes les 5 minutes et est disponible en fichier Excel. D'autres données sont également accessibles mais servent uniquement au fonctionnement correct de l'installation (sondes de T, de HR, de CO₂...).

	Economies (mesures, option B)
Consommation d'énergie thermique (batterie chaude) (kWh)	2765
Consommation d'énergie électrique (ventilateurs) (kWh)	2766

Tableau 2: résultats de mesure option B

Conclusion option B: bien que d'un coût relativement élevé, l'option donne de bons résultats. Le seul problème est ici la reproductibilité des conditions pour les deux salles (par exemple, l'occupation est différente), ce qui biaise le résultat.

4.3. Option C : analyse de relevés globaux

Cette option est appliquée lorsque l'on souhaite étudier l'ensemble de l'énergie consommée par un système, et notamment les interactions entre sous-systèmes. L'étude doit être menée sur une période assez longue.

Entrées supplémentaires:	Mesures en continu (sur le long terme), in situ de l'énergie consommée avant et après, pour une période de 9 à 12 mois chacune
Mode de fonctionnement :	Calculs basés sur les données mesurées. Le calcul d'énergie est ici effectué en développant un modèle statistique. L'approche s'apparente à une « identification de système, une approche par identification de paramètres ou modèle inverse (régression) ».
Sorties :	Cette option permet de confirmer que le système adapté a été installé et qu'il a le potentiel de générer les gains prévus. Elle permet aussi de déterminer les gains à partir de données mesurées.

L'option C concerne l'impact d'une mesure de conservation d'énergie sur le bâtiment dans son ensemble. Elle est basée sur l'analyse des données du bâtiment (factures, relevés...) sur une longue période (l'IPMVP préconise une

² Matériel :

- Puissance consommée par la batterie chaude (bilan sur l'eau)

Le dispositif utilisé est un compteur thermique effectuant un bilan sur l'eau (débit, températures). L'appareil utilisé est de marque Sappel (nom commercial Caltec MB, intégrateur d'énergie thermique de sous-station)

- Compteur électrique global

Le compteur est un appareil de type CE tri (Schneider Electric, référence 15465), conforme à la norme NF C 44-104

- Acquisition des données

Cet appareil permet aussi d'assurer l'acquisition de données externes au projet (sondes de T, de HR, de CO₂...). Il est ici utilisé pour enregistrer les données de la puissance consommée par la batterie chaude.

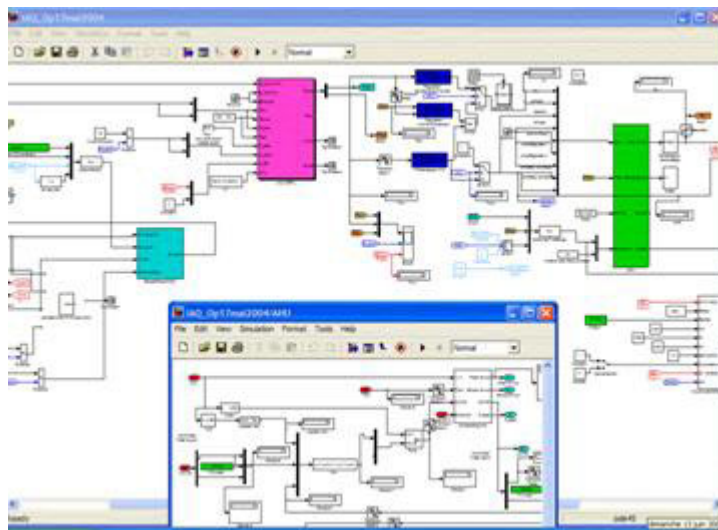
durée de 9 à 12 mois) à la fois avant et après la mise en œuvre de la mesure. Cette option est donc inadaptée à notre cas puisque l'étude ne concerne que les centrales de traitement d'air. Une approche par composant est donc plus adaptée. De plus, nous ne disposons pas de mesures effectuées sur les centrales de traitement d'air sur une période aussi longue.

4.4. Option D : simulation

Entrées supplémentaires :	Données concernant le bâtiment pour effectuer les simulations. Eventuellement : mesures en continu, in situ de l'énergie consommée avant et après.
Mode de fonctionnement :	Simulation du système, éventuellement utilisation des données mesurées. Différents programmes de simulation sont cités : DOE-2, BLAST, mais aussi HVACSim+, programmes CFD, TRNSYS, EES
Sorties :	Cette option permet de confirmer que le système adapté a bien été installé et qu'il a le potentiel de générer les gains prévus. Elle permet aussi de déterminer les gains à partir de données mesurées ou de simulations.

L'option D de l'IPMVP est essentiellement destinée aux applications pour lesquelles plusieurs mesures d'économie d'énergie entrent en jeu, avec notamment des interférences difficiles à évaluer (ex : une modification de l'éclairage d'un immeuble de bureau peut impliquer une diminution des charges internes, donc une augmentation de la puissance chaude nécessaire en hiver). De nombreux logiciels de simulation énergétique des bâtiments et de leurs équipements existent. Parmi ceux-ci, se dégage une famille basée sur la programmation graphique, dont les développements récents sont très importants, comme en témoignent les nombreux travaux publiés depuis quelques années. Dédié initialement à l'automatisme, Matlab/Simulink a suscité depuis quelques années l'intérêt des professionnels de l'énergétique. De nombreux programmes (ex : SIMBAD Simulation of Buildings And Devices, CSTB, [SIM05]) ont été développés afin d'obtenir des applications de ce logiciel aux bâtiments et plus généralement à leurs équipements techniques. Ainsi, SIMBAD propose une bibliothèque d'objets qui peuvent être assemblés de manière à obtenir une simulation dynamique d'un système de chauffage/climatisation.

FIGURE 2 : APERÇU DU PROGRAMME GRAPHIQUE MATLAB/SIMULINK :



Après simulation sur les 5 mois de la saison de chauffe, les résultats en consommation sont les suivants :

	CTA1 (débit ct)	CTA2 (débit var)	Economies (simulation, D)	Economies (mesures, B)
Consommation d'énergie thermique (batterie chaude) (kWh)	9661	6072	3589	2657
Consommation d'énergie électrique (ventilateurs) (kWh)	2938	2465	473	2766

Tableau 3: résultats des simulations menées avec le logiciel (programmation graphique)

Conclusion option D: la simulation des économies en énergie thermique consommée est tout à fait correcte (l'écart avec les mesures peut s'expliquer par le fait que l'option D permet d'imposer les mêmes conditions d'entrée aux deux CTA, ce qui n'est pas le cas de l'expérience). La simulation des économies en énergie électrique n'est pas bonne: nous ne disposons pas d'assez d'informations sur les ventilateurs sur site pour paramétrer nos modèles (basés sur un logiciel constructeur)

5. CONCLUSION

Cet outil, appliqué au bâtiment a permis de mettre en évidence [GMP04] :

- le coût relativement élevé de certaines options (option B : mesures en continu sur 5 mois, option D : programmation logiciel et calculs longs)
- la facilité et la rapidité d'utilisation de certaines options (option A et option C) ; toutefois, l'utilisateur doit veiller à bien formuler ses hypothèses afin de justifier la précision des calculs, qui est parfois insatisfaisante.
- certains défauts, notamment lors de l'utilisation de mesures (sonde exposée au soleil, pompage de vanne...)

La technicité requise (qualification du personnel utilisateur) est ici fonction de la mesure d'économie d'énergie étudiée :

- pour des mesures simples (liées à une modification d'éclairage, à un remplacement d'équipement...), le niveau technicien peut s'avérer suffisant
- pour des mesures plus complexes, mais pour lesquelles on dispose de retour d'expérience, le niveau ingénieur paraît nécessaire
- pour des mesures complexes sur lesquelles aucun travail n'a été fait, l'utilisateur doit posséder le niveau expert

Outre une méthodologie d'application de l'IPMVP, cette communication présente les résultats (simulations, mesures, calculs) obtenus pour le bâtiment considéré. Des conclusions sur l'option à utiliser en fonction du type de mesure d'économie d'énergie sont données :

- Si la mesure d'économie d'énergie est relativement simple à évaluer : il faut si possible utiliser l'option A (utilisation de clés d'économie) ou l'option C (relevé de compteurs). Le coût de mise en œuvre de l'outil sera raisonnable (peu de calculs et peu de mesures).
- Si la mesure d'économie d'énergie est complexe ou nouvelle : l'utilisation de mesures sur une longue période (option B) peut être nécessaire. Il faut alors bien veiller à ce que le coût des mesures et de l'étude ne contrebalance pas la valeur des économies réalisées.
- Si l'exécuteur de l'étude dispose des compétences nécessaires, le recours à des simulations basées sur des hypothèses et quelques relevés sur site, peut être une solution intéressante. En effet, en plus de l'évaluation des gains énergétiques, certains défauts peuvent être détectés, ainsi que leur impact sur la consommation d'énergie (et la QAI).

Les auteurs remercient l'Ademe, qui a financé une partie de l'étude au travers du PUCA (Plan urbanisme construction architecture).

6. BIBLIOGRAPHIE

[ASH02] ASHRAE Guideline 14-2002, "Measurement of energy and demand savings", 2002

[DOE00] Department of Energy, *Measurement & Verification Guidelines: M&V for Federal Energy Projects*, v2.2, USA, 2000.

[GIN05] Ginestet S. *Simulation dynamique des systèmes de climatisation : application aux régulations innovantes des centrales de traitement d'air*, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2005

[IEA04] IEA, Annex 40 Website: <http://www.commissioning-hvac.org/>, 2004

[IPM08] IPMVP : International Performance Measurement and Verification Protocol, <http://www.evo-world.org> site Internet de l'Efficiency Valuation Organisation (documents téléchargeables (IPMVP Public Library of Documents), dont une version en français IPMVP 2007)

[GMP04] O. Morisot, C. Laruelle, S. Markovic, D. Marchio, et S. Ginestet (2004), Garantie et maintien des performances Implantation et test de méthodes de retro & on-going commissioning, mode de valorisation des prestation de garantie des performances énergétiques, rapport final août 2004, N° de convention ADEME : 02 04 073

[SIM05] Simbad, « SIMulation of Buildings And Devices » version 2.2, CSTB, département DDD, 2005