

PEREN

(PERformance ENergétique et environnement PERENNE)

Rapport de synthèse

 <p>Groupe GA</p>	 <p>silic</p>
 <p>ADDENDA</p>	 <p>Tisseyre + Associés INGENIERIE ACOUSTIQUE</p>
 <p>Laboratoire de Recherche en Architecture Groupe de Recherche Environnement Conception Architecturale et Urbaine</p>	 <p>Laurenti</p>

Etude réalisée avec le soutien de la Fondation Bâtiment Énergie
suite au second appel à projets de juillet 2006 relatifs à la maîtrise de l'énergie,
au recours aux énergies renouvelables et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre
lors de la construction, de la réhabilitation ou de la rénovation des bâtiments de bureaux.

Ce projet s'appelait initialement « Intégration et coût global au service de la performance énergétique ».

Le nouveau nom PEREN peut se décliner comme PERformance ENergétique mais il rappelle également que cette performance ne peut être obtenue au détriment de la pérennité de notre environnement.

SOMMAIRE

1. Introduction	5
2. Consortium	5
2.1 Groupe constructeurs & exploitants	5
2.2 Groupe études et recherches	6
2.3 Equipes et contacts	6
3. Description des travaux	7
3.1 Programme de travail initial et déroulement effectif.....	7
3.2 Evaluation d'immeubles existants	8
3.3 Etude de l'immeuble virtuel et de ses variantes	13
4. Méthodes et outils.....	28
4.1 Démarche de développement.....	28
4.2 Architecture générale.....	29
4.3 Quantitatif à partir d'une maquette numérique au format IFC	30
4.4 Intégration des résultats de simulation	30
4.5 Bibliothèque des matériaux et objets types	30
4.6 Coût global partagé.....	31
4.7 Bilan du développement de l'outil.....	34
5. Le projet pilote Narval.....	35
6. Guide à l'intention des concepteurs.....	36
6.1 Réduire les consommations énergétiques	36
6.2 Réduire les émissions de GES	39
6.3 Maîtriser la qualité des ambiances.....	42
7. Guide à l'intention de la maîtrise d'ouvrage	43
7.1 Autoriser les variantes	43
7.2 Expression des objectifs	43
7.3 Taxe carbone.....	43

Figures

FIGURE 1. CONSOMMATIONS (kWHEF/M ² SHON).....	8
FIGURE 2. DEPENSES (€ / M ² SHON)	8
FIGURE 3. AUTONOMIE EN LUMIERE NATURELLE DES BUREAUX DU 1ER ETAGE, FAÇADE NORD-EST	10
FIGURE 4. AUTONOMIE EN LUMIERE NATURELLE AVEC UNE TRANSMISSION VITRAGE DE 75% ET UNE REFLEXION DU SOL DE 35%	10
FIGURE 5. CONSOMMATIONS TOTALES D'ENERGIE PAR VARIANTE.....	16
FIGURE 6. CONSOMMATIONS TOTALES D'ENERGIE PAR POSTE ET PAR VARIANTE	16
FIGURE 7. RATIOS DE CONSOMMATIONS EN ENERGIE PRIMAIRE.....	17
FIGURE 8: REPARTITION DES GES ANNUALISEES ENTRE USAGES ET CONSTRUCTION DES IMMEUBLES	25
FIGURE 9: EMISSIONS DE GES PAR OUVRAGES DE CONSTRUCTION	25
FIGURE 10: COMPARAISON ENTRE LE COUT DES VARIANTES D'IMMEUBLES ET LEURS IMPACTS	26
FIGURE 11. QUANTITATIF IFC : ONGLET MURS.....	30
FIGURE 12. VARIATIONS DU FACTEUR D'ACTUALISATION POUR DES PERIODICITES DE 1 A 8 ANS	32

1. Introduction

Le parc de bâtiments de bureaux représente une surface de 182 millions de m². En 2002, les immeubles de bureau consommaient en moyenne 286 Kwh/an.m² d'énergie finale dont 166 Kwh pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Le gisement d'économies est important puisque 30% des bâtiments de bureaux sont climatisés et qu'entre 30% et 50% de l'énergie utilisée pour l'éclairage pourrait être économisée dans les bureaux grâce à l'utilisation de systèmes et de technologies plus efficaces.

C'est la raison pour laquelle la Fondation Bâtiment Energie a décidé de faire porter son second appel à projets sur « la maîtrise de l'énergie, le recours aux énergies renouvelables et la réduction des émissions de gaz à effet de serre lors de la construction, de la réhabilitation ou de la rénovation des bâtiments de bureau ».

Pour le volet 1, les solutions attendues de cet appel à projets devaient permettre d'atteindre un niveau de performances énergétiques qui pourra se situer à mieux que le niveau de consommation de référence fixé par la RT 2005 moins 30%.

Le consortium a estimé qu'il est possible d'aller plus loin grâce au projet et s'est fixé l'objectif suivant :

Contribuer directement et indirectement à ce que des immeubles de bureaux neufs ou ayant fait l'objet de réhabilitations lourdes obtiennent des performances énergétiques correspondant à **la consommation de référence de la RT2005 moins 40%**.

Selon notre expérience, la consommation moyenne des immeubles de bureau récents en conformité avec la RT 2005 se situe aujourd'hui entre 150 et 200 Kwh d'énergie finale par m² SHON et par an.

Pour illustrer les retombées potentielles du projet, considérons une valeur intermédiaire de 166 Kwh dont 96 pour le chauffage et l'ECS (solution gaz) et 70 en électricité, ce qui correspond à une consommation de 277 Kwh d'énergie primaire par m² et par an.



Une réduction de 40% conduirait à une consommation de 100 Kwh d'énergie finale par m² et par an. Si le consortium parvient à influencer la production de 400 000 m² de bureaux par an, les incidences du projet seront les suivantes :

- économie annuelle d'énergie finale : 26 400 Kwh représentant 297 tonnes de CO₂
- gain financier annuel : environ 1,13 M€ (Gaz : 497 K€ – Electricité : 616 K€)

2. Consortium

2.1 GROUPE CONSTRUCTEURS & EXPLOITANTS

Il est constitué de GA et SILIC, deux acteurs de l'immobilier de bureau à la fois constructeurs et gestionnaires situés respectivement à Toulouse et Paris.

	8 Chemin de la terrasse BP 95809 31505 TOULOUSE cedex 5 www.ga-sa.fr	Recherche et analyse de solutions, montage de projet pilote
	4 Place Rio de Janeiro 75008 Paris	Recherche et analyse de solutions, montage de projet pilote

2.2 GROUPE ETUDES ET RECHERCHES

	RN d'Auch 32300 MIRANDE www.addenda.fr	Simulation thermique dynamique
	Groupe de Recherche Environnement Conception Architecturale et Urbaine ENSA de Toulouse 83 rue Aristide Maillol, BP 10629 31106 Toulouse Cedex 1	Coût global, impacts environnementaux
	8, Place de la Tour de Londres 31750 ESCALQUENS www.laurenti.com	Responsabilité scientifique, Spécification et développement de l'outil
	16, chemin de Manel 31400 TOULOUSE www.planete-acoustique.com	Acoustique et aménagement, coordination

2.3 EQUIPES ET CONTACTS

	Frédéric Mothe David Raymond Axel Verger	Frédéric MOTHE Tél : 05 61 144 000 f.mothe@ga-sa.fr
	Rodolphe Evrard	Rodolphe EVRARD Tél : 01 45 12 50 20 revrard@socomie.fr
	Alain Castells Fabien Melenec	Alain CASTELLS Tél : 05 62 66 92 50 amo@addenda.fr
	Alain Chatelet Jean-Pierre Cordier Luc Floissac Frédéric Bonneaud	Alain CHATELET Tél : 05 62 11 50 43 alain.chatelet@toulouse.archi.fr
	Bernard Ferriès Aimerique Veque Juan-Camilo Pinto	Bernard FERRIES Tél : 05 34 66 62 99 ferries@laurenti.com
	Alain Tisseyre Laurence Aupetit Thomas Buzzi	Alain TISSEYRE Tél : 05 61 25 53 19 a.tisseyre@planete-acoustique.com

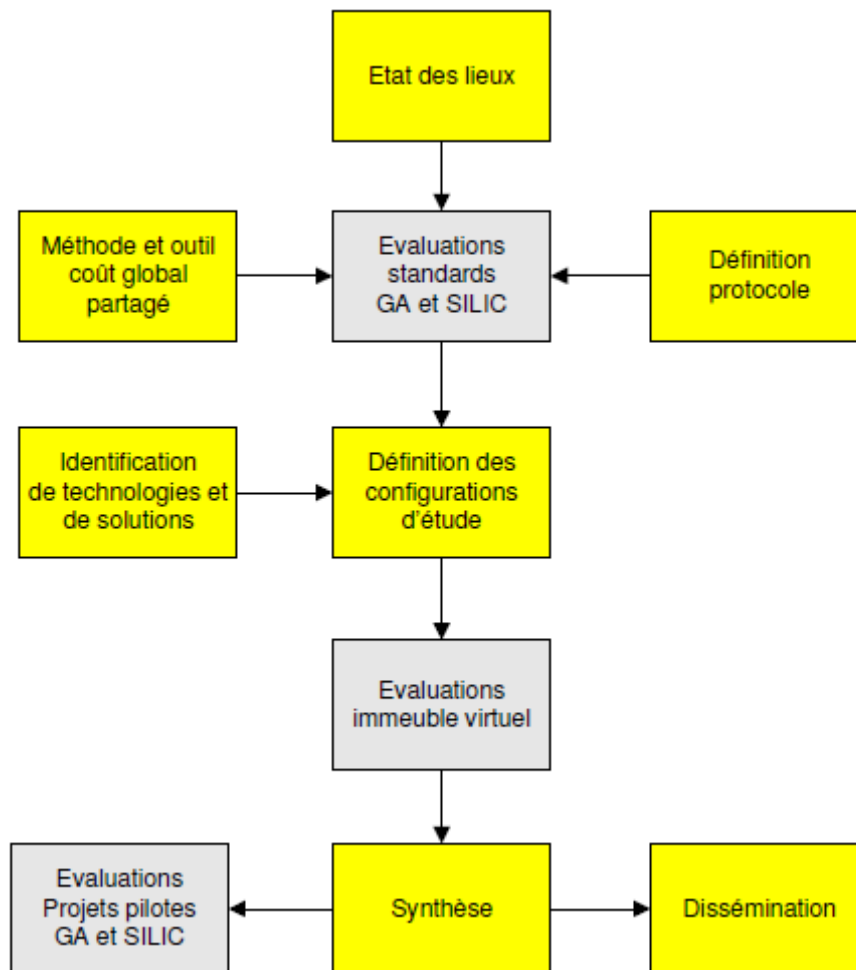
3. Description des travaux

3.1 PROGRAMME DE TRAVAIL INITIAL ET DEROULEMENT EFFECTIF

Le projet a débuté en mai 2007 et s'est terminé en septembre 2009.

Le programme de travail initial prévoyait de débuter par un état des lieux puis d'étudier deux immeubles représentatifs de la production actuelle des deux constructeurs-exploitants. Il était prévu de mettre au point au cours de cette étape un protocole d'évaluation ainsi que la méthode et l'outil de calcul de coût global partagé.

Ensuite, nous avons prévu de tester diverses combinaisons de solutions sous la forme d'un immeuble virtuel et de ses variantes. La synthèse des travaux devait ensuite être la base des actions de dissémination et trouver sa concrétisation dans le cadre de projets pilotes.



Ce programme a été respecté dans son principe et a seulement fait l'objet de deux aménagements :

1. Le développement de l'outil s'est étalé sur la majeure partie du projet pour l'améliorer en fonction des besoins induits par les évaluations ;
2. Suite à la crise de l'immobilier, le démarrage du projet pilote a été décalé. Les retours ne sont pas disponibles à ce jour et ne peuvent être intégrés à ce rapport de synthèse. L'équipe PEREN s'est engagée à communiquer largement sur ce projet dès que les études auront été terminées pour afficher les performances attendues.

3.2 EVALUATION D'IMMEUBLES EXISTANTS

Les deux immeubles retenus sont représentatifs du patrimoine des deux entreprises partenaires. Le premier est le siège de GA à Toulouse. Le second est un immeuble de SILIC situé dans le parc Orly-Rungis.



Siège GA, Toulouse (3 230 m² SHON)



Immeuble Saارينen (18 000 m² SHON)

Ces deux immeubles ont fait l'objet de nombreux calculs : consommations d'énergie par usage, niveaux sonores et intelligibilité dans les bureaux, autonomie d'éclairage naturel, énergie grise et émissions de GES induites par les constituants. Extraits des principaux résultats :

❖ Consommations et dépenses d'énergie

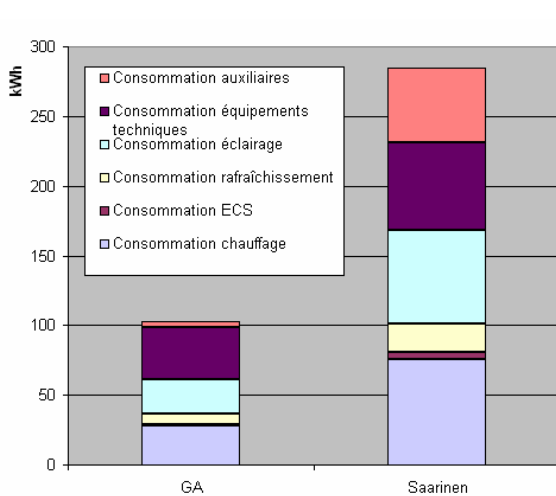


Figure 1. Consommations (kWh/m² SHON)

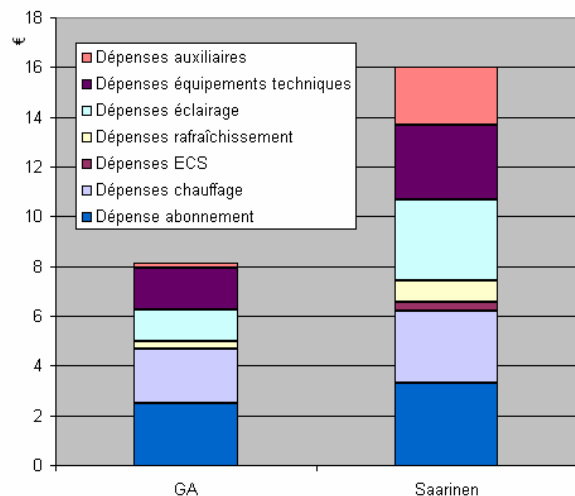


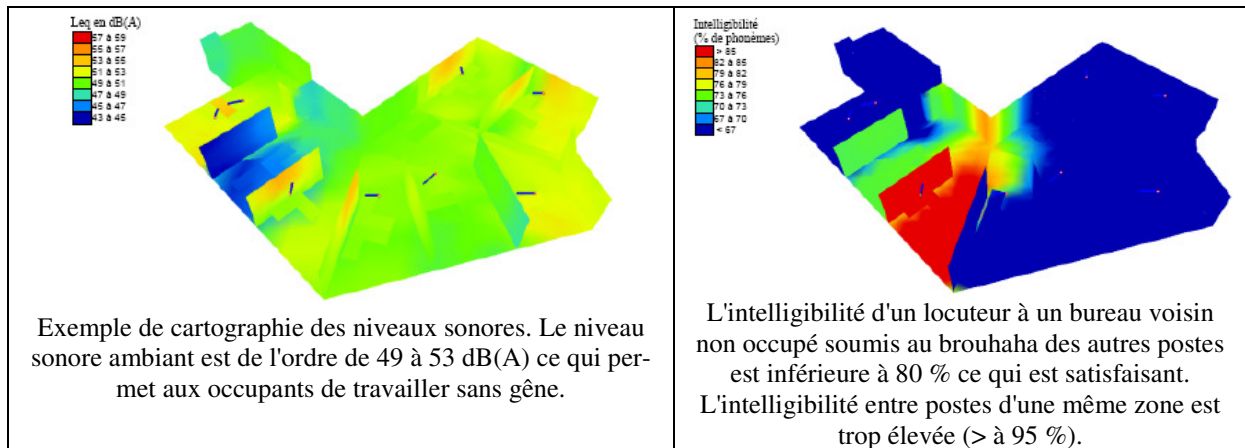
Figure 2. Dépenses (€/m² SHON)

Enseignements de l'analyse des résultats de la simulation thermique dynamique :

- 1) Grande influence du comportement des utilisateurs et du mode de gestion des systèmes. Les consommations de l'immeuble Saارينen sont principalement dues au mode de fonctionnement du locataire et non aux qualités intrinsèques du bâtiment. Elles sont directement impactées par le process spécifique et le fonctionnement adopté par le locataire actuel (locaux occupés de 07h00 à 22h00, éclairage de 04h30 à 23h00, locaux tempérés à 23°C hiver comme été, pas de réduction de la ventilation en période d'inoccupation,...)
- 2) Importance des postes bureautique et éclairage
- 3) Pertinence du logiciel utilisé (TRNSYS) : l'écart entre les consommations calculées et mesurées est inférieur à 5%

❖ Acoustique

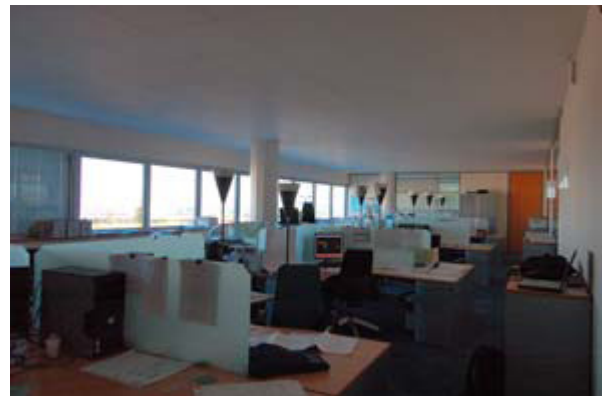
Le bon déroulement des activités dans des locaux de bureau dépend de la maîtrise des niveaux sonores (bien communiquer) et de la maîtrise des isolements interpostes (ne pas être perturbé par les autres). Ces aspects sont analysés à l'aide d'outils de simulation qui déterminent, en tout point du volume d'étude, les niveaux sonores ambiants et l'intelligibilité.



❖ Eclairage

Les simulations ont été effectuées par GRECAU à l'aide du logiciel DIAL Europe. Cet outil permet de calculer le facteur de lumière du jour et l'indicateur d'autonomie qui est le % du temps où l'éclairage naturel est suffisant.

Nous en illustrons l'utilisation pour les bureaux de l'immeuble GA situés au 1^{er} étage et donnant sur la façade Nord-Est :



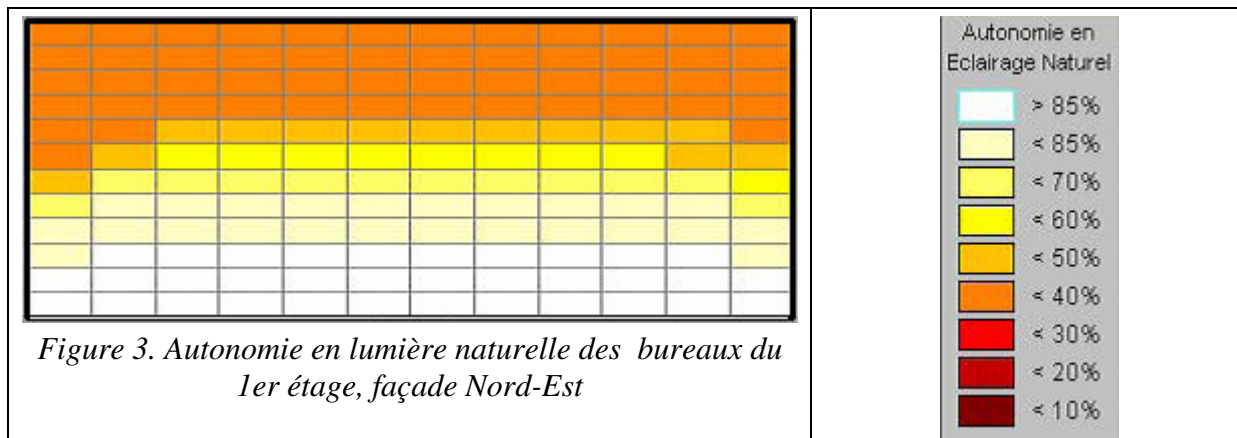


Figure 3. Autonomie en lumière naturelle des bureaux du 1er étage, façade Nord-Est

Compte tenu du niveau d'éclairage requis de 300 Lux, l'autonomie en lumière naturelle de ce bureau est médiocre, avec une autonomie inférieure à 50% sur la moitié de la surface. Cela peut facilement s'améliorer avec un vitrage qui transmet plus (double vitrage sélectif clair, facteur de transmission de 75%) et un sol plus clair (facteur de réflexion de 35%).

Ces modifications amènent à une autonomie en éclairage naturel très élevée (>85%), ce qui est un bon résultat pour une pièce de 7 mètres de profondeur (et 2,77 m sous plafond).

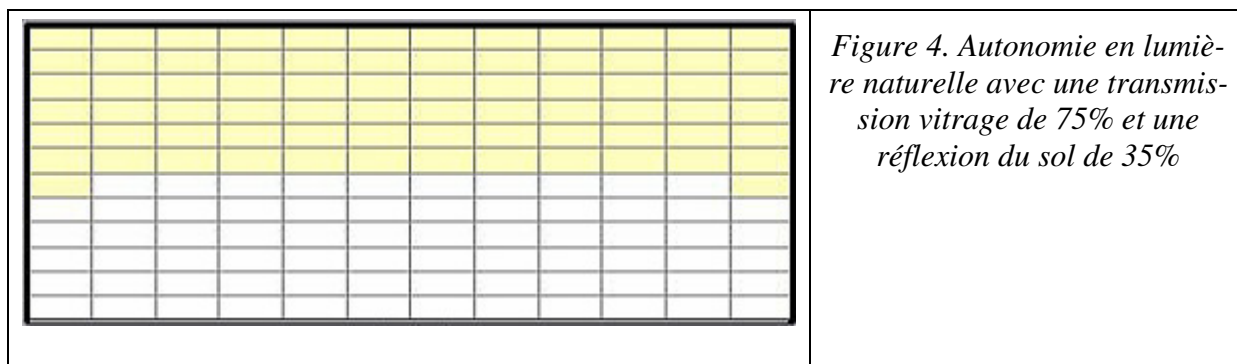
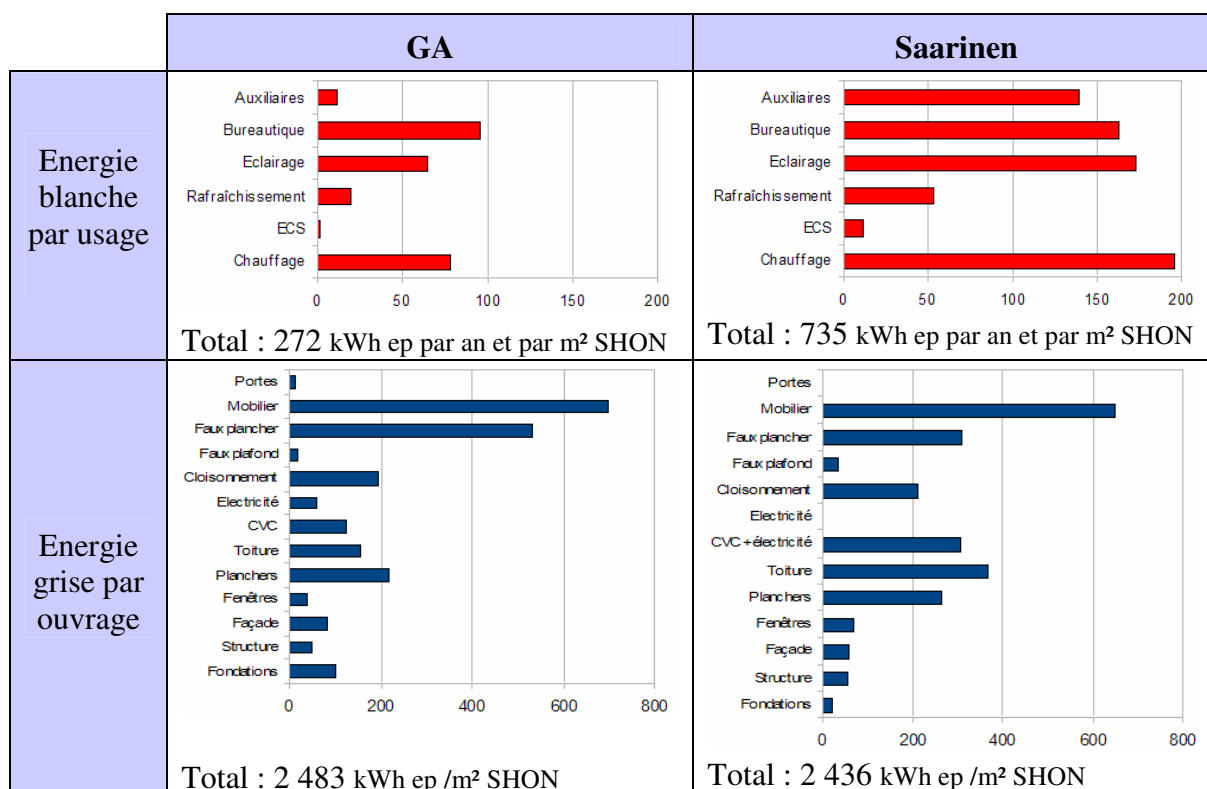


Figure 4. Autonomie en lumière naturelle avec une transmission vitrage de 75% et une réflexion du sol de 35%

❖ Energie blanche et énergie grise



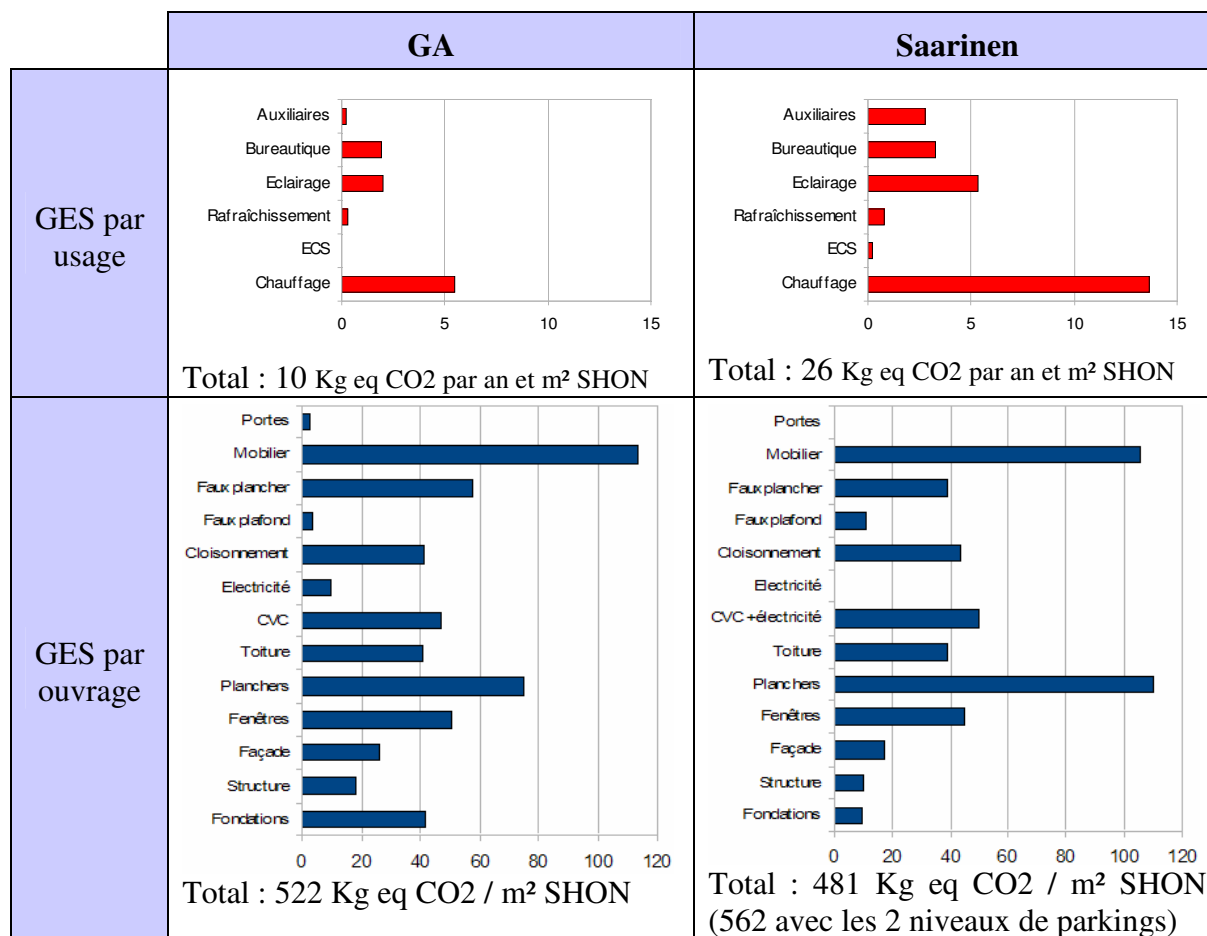
L'écart important entre les consommations d'énergie par usage est essentiellement dû à l'influence du comportement des occupants.

Le ratio énergie grise ramené au m² SHON semble peu sensible aux différences architecturales et constructives des bâtiments étudiés.

L'énergie grise mobilisée pour la construction est 3 à 10 fois plus importante que l'énergie blanche consommée annuellement. On peut estimer que ce facteur sera de l'ordre de 20 pour les futurs bâtiments BBC.

65 à 70 % de l'énergie grise de construction est due aux aménagements et aux équipements techniques.

❖ Emissions de gaz à effet de serre



- La construction du bâtiment (avec aménagement) génère autant de GES que les émissions induites par 20 à 50 années de consommation. Plus le bâtiment est économe et plus le poids de la construction et de l'aménagement est important.
- Si les bâtiments étudiés étaient BBC, les émissions induites par la construction du bâtiment représenteraient plus de 100 ans d'émissions induites par les consommations.
- Le poste aménagement intérieur et équipement technique représente 50 à 60 % de ce bilan.

❖ Synthèse

Nous en avons conclu que l'on ne peut prétendre à une réduction significative des émissions de gaz à effets de serre qu'en faisant aussi porter l'effort sur le poste construction et en particulier, sur l'aménagement intérieur et les équipements techniques

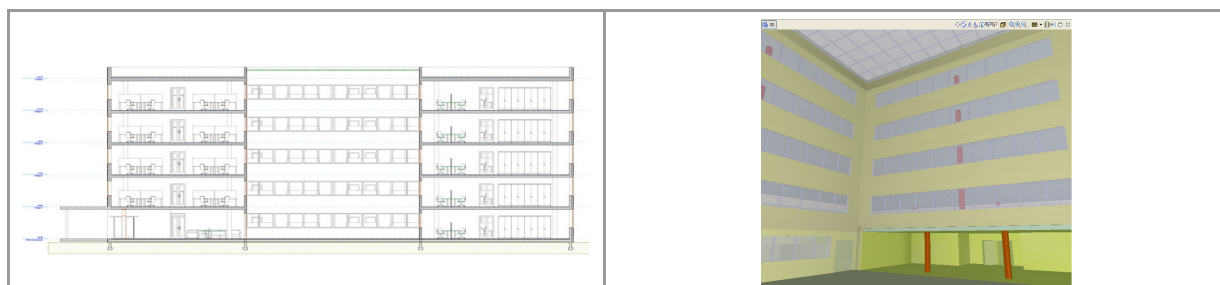
Cette prise de conscience nous a guidés dans les solutions mises en œuvre dans l'immeuble virtuel. Nous nous sommes notamment orientés vers des solutions d'aménagement à base de matériaux biosourcés, et vers des mesures plus radicales comme la recherche de la suppression des faux plafonds et/ou des faux planchers ainsi que le décroissement massif des plateaux.

Les études acoustiques ont montré qu'il existe des solutions permettant la maîtrise des niveaux sonores et des isollements inter-postes en espace non cloisonné, ce qui est un point fondamental à satisfaire pour le confort des usagers.

3.3 ETUDE DE L'IMMEUBLE VIRTUEL ET DE SES VARIANTES

❖ Présentation

C'est un immeuble de 5 étages, d'une surface de 10 000 m² SHON, organisé autour d'un patio fermé. Ce bâtiment virtuel et ses variantes ont fait l'objet d'études thermiques, acoustiques, économiques et d'impact environnemental.



Quatre variantes ont été évaluées et comparées :

	<p>Base : immeuble standard respectant la réglementation thermique 2005 avec les solutions courantes du marché</p>
	<p>Grenelle : bâtiment optimisé du point de vue de l'enveloppe et des systèmes pour réduire de 50% ses consommations d'énergie primaire pour les usages (énergie blanche) et mériter le label BBC</p>
	<p>Facteur 4 consommations : bâtiment optimisé du point de vue de l'enveloppe et des systèmes jusqu'à obtenir un bilan d'énergie primaire nul ou inférieur à zéro pour les usages (énergie blanche). Compensations des consommations d'énergie par une production d'énergie renouvelable. Soit un objectif BEPOS.</p>
	<p>Facteur 4 construction : bâtiment optimisé du point de vue de l'enveloppe, des aménagements et des systèmes afin d'obtenir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Un bilan d'énergie primaire égal ou inférieur à zéro pour les usages (énergie blanche). Compensation des consommations d'énergie par une production d'énergie renouvelable - Une division par 4 (par rapport à la moyenne du parc actuel neuf) des consommations d'énergie grise et d'émission de GES liées à la construction, à l'entretien et à la fin de vie des matériaux et équipements du bâtiment.

❖ Variation des paramètres

Les différents paramètres ayant fait l'objet de modifications d'une variante à l'autre sont les suivants :

La morphologie	<ul style="list-style-type: none">- variation du ratio de surface vitrée de 70 à 35%.- forte compacité: rapport surface d'enveloppe/Surface utile = 0.48
La matérialité	<ul style="list-style-type: none">- niveau d'isolation des parois opaques :<ul style="list-style-type: none">• U mur = 0,36 W/m².K à 0,15 W/m²K• U toiture = 0,27 W/m².K à 0,1 W/m²K• U plancher = 0,27 W/m².K à 0,2 W/m²K- Isolation des vitrages : 2,1 W/m².K à 0,85 W/m²K (triple vitrage + menuiserie bois-alu)- Inertie : de moyenne à lourde- Perméabilité à l'air : de 1,2 m³/(h.m²) sous 4 Pa à 0,6 m³/(h.m²) sous 4 Pa
La spatialité	<ul style="list-style-type: none">- Eclairage : de 12 W/m², à 5W/m² avec pilotage sur présence et luminosité- Informatique : de 120 W/poste (écran+tour), à 25 W/poste (ordinateurs portables)- Chauffage et rafraîchissement: de thermodynamique réversible air-eau avec COP annuel > 2.45, à thermodynamique réversible eau-eau avec COP annuel > 4.5- Emission : de surface radiative + prétraitement de l'air à du chauffage uniquement par l'air- Ventilation : de double flux sans échangeur, à double flux à débit variable, avec récupération ($\eta=80\%$) et by-pass de l'échangeur en fonction de la température de reprise et de la température extérieure- Protections solaires : de protections extérieures à facteur réglementaire, jusqu'à protections extérieures à lames horizontales orientables et relevables

❖ Résultats des simulations thermiques dynamiques

Les ratios des consommations sont exprimés soit en kWh_{ep}/m² SHON, tous postes confondus, soit en kWh_{ep}/m² SHON en comptant uniquement les postes comptabilisés dans la RT2005 (chauffage, rafraîchissement, éclairage et auxiliaires de ventilation).

	BASE		GRENNELLE		Facteur 4 conso		Facteur 4 CO2			
		Delta/Sbase		Delta/Sbase		Delta/Sbase		Delta/Sbase		
Puissances (kW)	Chauffage	151.6	29%	52	20%	84	40%	76	37%	-50%
	ECS	-	0%	-	0%	-	0%	-	0%	0%
	Rafraîchissement	169.2	32%	56	22%	36	17%	41	20%	-75%
	Eclairage	123.2	23%	62	24%	50	24%	50	24%	-60%
	Equipements	68.7	13%	69	27%	23	11%	23	11%	-66%
	Aux. Ventil.	14.9	3%	15	6%	15	7%	15	7%	0%
Total	527.59	100%	253	100%	208	100%	205	100%	205	-61%
Consommations (kWh)	Chauffage	45 227	6%	5 170	1%	8 224	4%	8 726	4%	-81%
	ECS	-	0%	-	0%	-	0%	-	0%	0%
	Rafraîchissement	93 736	13%	12 808	3%	5 244	2%	7 363	3%	-92%
	Eclairage	347 967	47%	93 362	25%	100 050	43%	100 050	43%	-71%
	Equipements	214 524	29%	214 524	58%	71 261	31%	71 261	31%	-67%
	Aux. Ventil.	45 458	6%	45 458	12%	45 458	20%	45 458	20%	0%
Total	746 913	100%	371 323	100%	230 237	100%	232 858	100%	232 858	-69%
Dépenses (€)	kWh _{ep} /m ² SC	78.1		38.8		24.1		24.3		-69%
	kWh _{ep} /m ² SHON	73		36		23		23		-69%
	kWh _{ep} /m ² SHON RT2005	52		15		16		16		-70%
	kWh _{ep} /m ² SC	201		100		62		63		-69%
	kWh _{ep} /m ² SHON	189		94		58		59		-69%
	kWh_{ep}/m² SHON RT2005	134.8		39.7		40.3		40.9		-70%
Chauffage	3 583	7%	493	2%	792	4%	828	4%	-77%	
ECS	-	0%	-	0%	-	0%	-	0%	0%	
Rafraîchissement	3 224	6%	452	2%	206	1%	287	1%	-91%	
Eclairage	18 881	34%	6 178	21%	5 990	30%	5 990	30%	-68%	
Equipements	11 324	21%	11 324	39%	3 799	19%	3 799	19%	-66%	
Aux. Ventil.	2 404	4%	2 404	8%	2 404	12%	2 404	12%	0%	
Abonnement	15 545	28%	8 238	28%	6 841	34%	6 533	33%	-58%	
Total	54 962	100%	29 088	100%	20 032	100%	19 841	100%	19 841	-64%

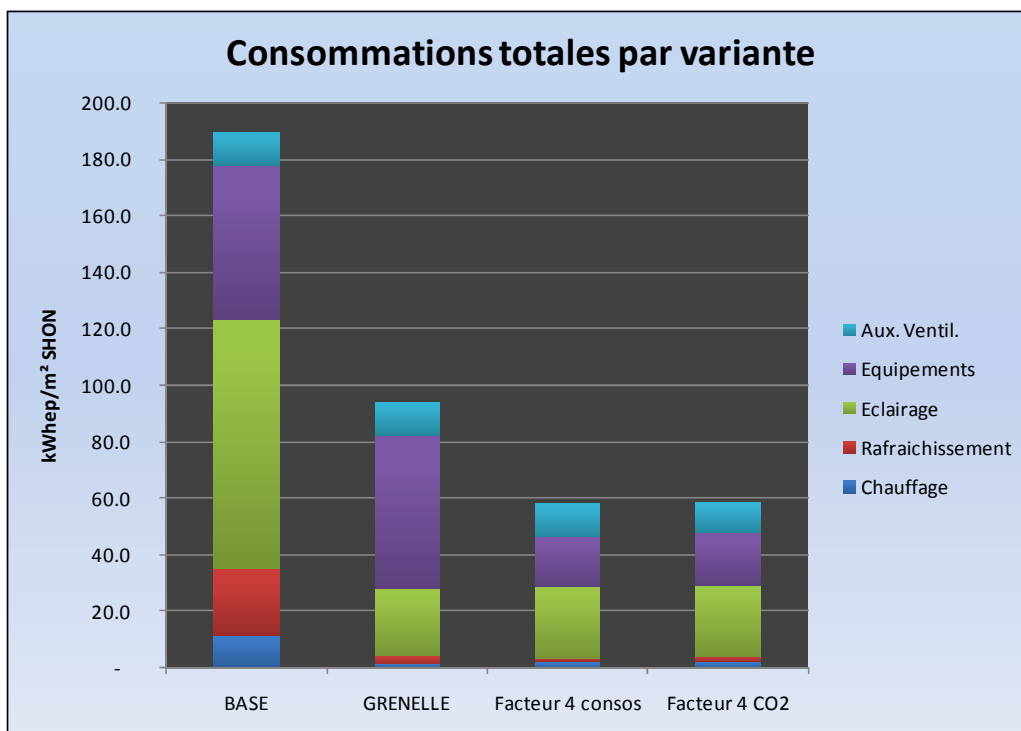


Figure 5. Consommations totales d'énergie par variante

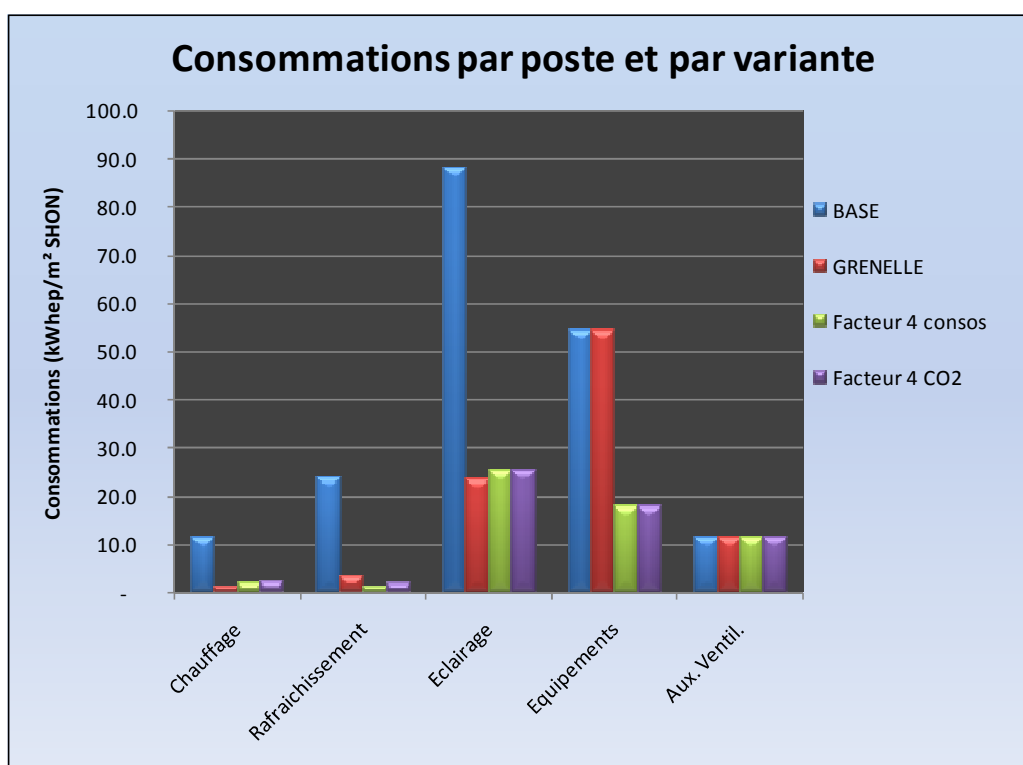


Figure 6. Consommations totales d'énergie par poste et par variante

Version Grenelle : Le passage de la version de base à la version Grenelle permet de réduire de 50% les consommations totales en améliorant la qualité des systèmes de traitement d'air, la qualité de l'isolation de l'enveloppe ainsi que les performances des systèmes de production de chaleur et de froid. Dans la version Grenelle, le plus gros poste de consommation sont les équipements : 58%.

Version Facteur 4 : Un travail sur les postes informatiques (équipement) et sur le ratio de percement de l'enveloppe permet de réduire encore les consommations totales du bâtiment de 38% par rapport à la version Grenelle. Les consommations du bâtiment très optimisé sont de 40 kWh_{ep}/m² SHON, à comparer avec les consommations du bâtiment calé au niveau réglementaire RT2005 : 135 kWh_{ep}/m² SHON.

L'ensemble des optimisations a permis de réduire de 70% les consommations du bâtiment virtuel par rapport au niveau réglementaire, et de s'inscrire en deçà de la demande future de 50 kWh_{ep}/m² SHON/an.

Le graphe ci-dessous indique les consommations en énergie primaire en comptabilisant tous les postes sauf les équipements, conformément à la RT2005.

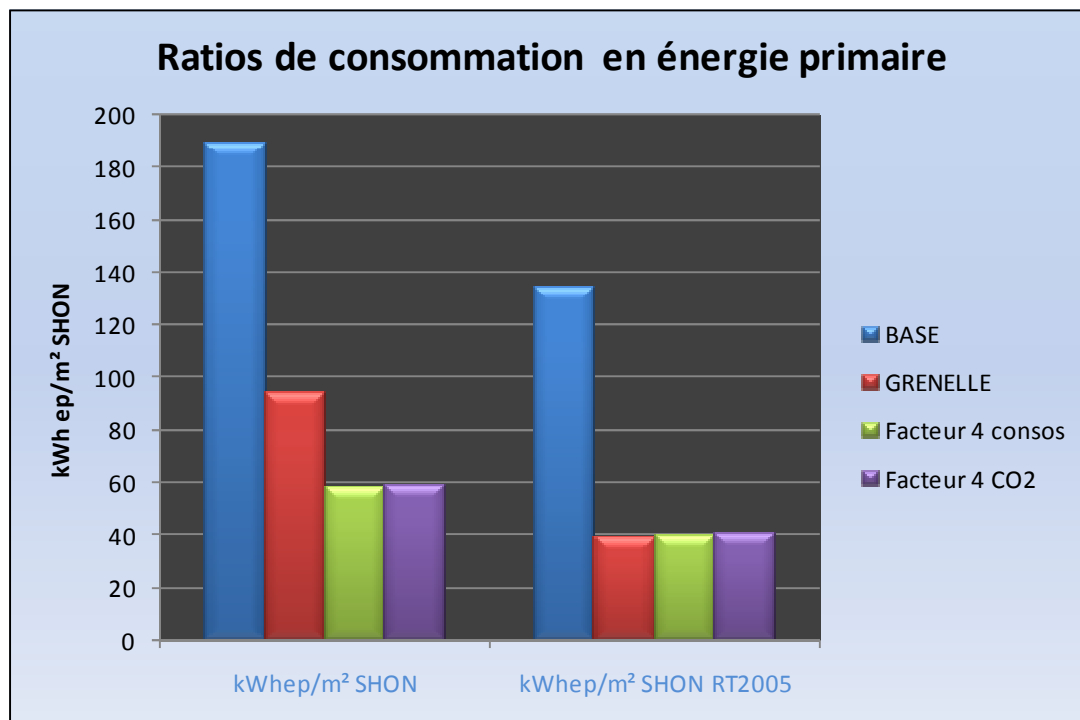


Figure 7. Ratios de consommations en énergie primaire

Dans la première série du graphe, correspondant à l'ensemble des postes de consommation, on constate que la variante « Grenelle » est nettement plus consommatrice que celles du « Facteur 4 », du fait de la consommation des postes informatiques (portable, contre ordinateur tour).

Par contre dans la deuxième série du graphe, tenant compte des seuls postes de consommations RT 2005, on note que les consommations entre ces deux variantes sont très proches. En effet, le poste de consommation d'équipement ne jouant plus, l'amélioration importante des consommations de rafraîchissement est compensée par l'augmentation très sensible des consommations de chauffage (dus à la réduction importante des charges internes imputables à l'informatique participant à chauffer le bâtiment).

Le calcul RT 2005 montre sa limite et ne favorise pas le projet « bon élève » qui est vertueux sur tous les postes (notamment les équipements qui représentent dans le cas du projet « Grenelle » 58% des consommations totales du bâtiment).

❖ Synthèse

Pour atteindre le niveau Facteur 4, il ne suffit pas de travailler sur un seul poste. Toutes les sources de consommations d'énergie doivent être prise en compte et optimisées. La future

réglementation devrait prendre en compte la totalité des consommations sous peine d'induire des effets pervers tel que décrit ci avant.

Energie positive : La mise en place de 2000 m² de capteur photovoltaïque polycristallin permet de rendre la version Facteur 4 à énergie positive (toutes consommations confondues). Cela permet de répondre au futur Label BEPOS, qui envisage de comptabiliser la totalité des consommations. Ici, la surface de toiture opaque du bâtiment correspond parfaitement à la surface nécessaire soit 2000 m².

NOTA IMPORTANT : le coefficient de forme d'un projet favorisant la compacité pour des raisons énergétiques peut trouver sa limite selon l'échelle (hauteur) du bâti. Pour obtenir un bâtiment BEPOS en site urbain dense, où seule la toiture peut être généralement utilisée, un effort substantiel est indispensable sur les consommations (au-delà du BBC – généralement Cep = - 70% Cep ref), et une surface de toiture de minimum 20% de la surface Shon est indispensable, pour garantir la faisabilité de la production. D'où la difficulté d'aller au-delà de 5 niveaux utiles.

En prenant en compte uniquement les postes comptabilisés dans la RT2005 (chauffage, rafraîchissement, ECS, éclairage, auxiliaires de ventilation), la surface de capteurs à installer passe à 1 400m² de panneau photovoltaïques polycristallins, amenant le bâtiment à 7 niveaux utiles.

❖ Acoustique

Les objectifs de performance des bureaux sont établis sur la base de la cible 9 de la démarche HQE® et sur la base des préconisations habituelles de Tisseyre & Associés relatives au bon déroulement des activités :

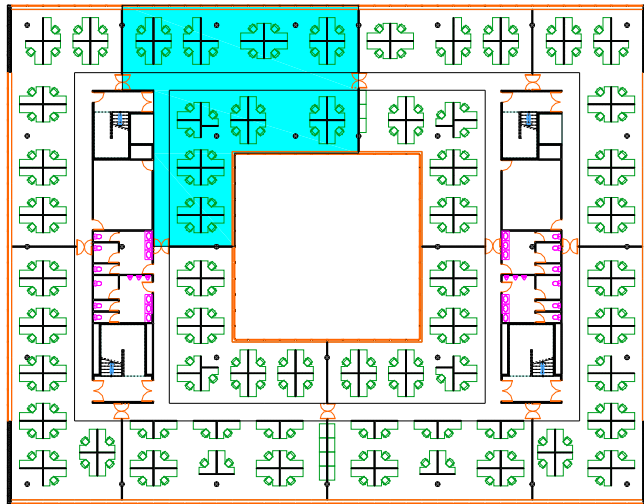
- maîtrise des niveaux sonores (bien communiquer)
- maîtrise des isollements inter-postes (ne pas être perturbé par les autres)

Les pages suivantes retracent l'étude acoustique menée sur un espace ouvert type de l'immeuble virtuel. Deux scénarios d'activité sont étudiés :

- une activité de type centre d'appel
- une activité de type bureau tertiaire

Ces dernières sont deux activités habituellement rencontrées dans les espaces ouverts et présentent des caractères d'occupation et d'activité extrêmes.

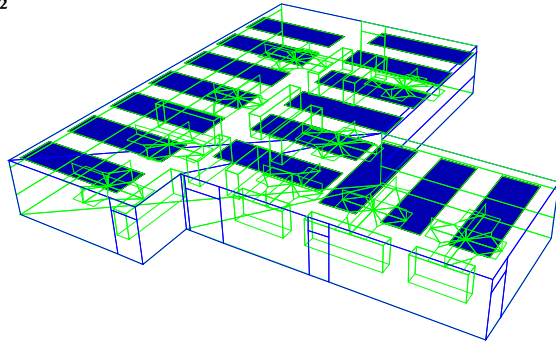
La zone étudiée est la zone bleue repérée sur le plan ci-dessous. Cette zone est représentative des espaces ouverts du bâtiment.



IMMEUBLE VIRTUEL : ACTIVITE DE TYPE CENTRE D'APPEL

TRAITEMENT ACOUSTIQUE ET MOBILIER

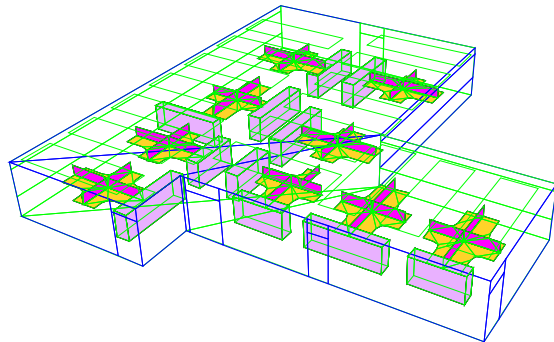
Plafond îlots bois et tissu acoustique,
 $S = 136 \text{ m}^2$
 $\alpha_w = 0.7$



Les façades sont vitrées.
Les murs sont constitués de plâtre ou de béton.
Le sol est constitué de moquette rase.

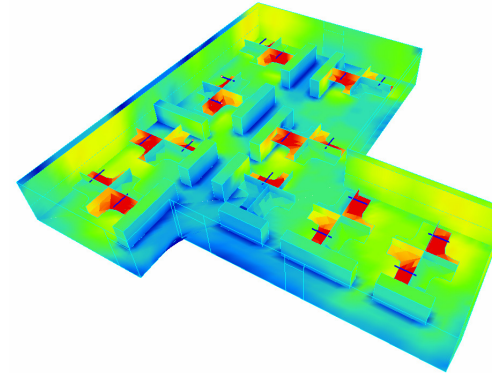
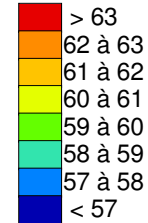
MOBILIER

Plan de travail : $S = 76 \text{ m}^2$, $\alpha_w = 0.07$
Séparatifs postes de travail : $S = 31 \text{ m}^2$, $\alpha_w = 0.07$, $h = 1.3 \text{ m}$
Armoires : $\alpha_w = 0.07$, $h = 1.3 \text{ m}$



NIVEAU SONORE AMBIANT

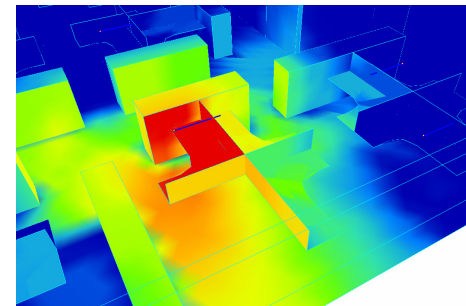
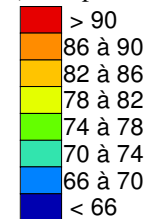
Leq en dB(A)



Le niveau sonore ambiant est proche de 58 à 60 dB(A). Ceci est obtenu en instantané en occupation maximale et en période de forte activité. Le traitement acoustique plafond permet donc de limiter le niveau sonore ambiant à des valeurs inférieures à 60 dB(A). L'objectif est atteint.

INTELLIGIBILITE

Intelligibilité
(% de phonèmes)



L'intelligibilité d'un locuteur à un poste voisin soumis au brouhaha du plateau est inférieure à 80 %. L'objectif de perte d'intelligibilité inter-postes est atteint.

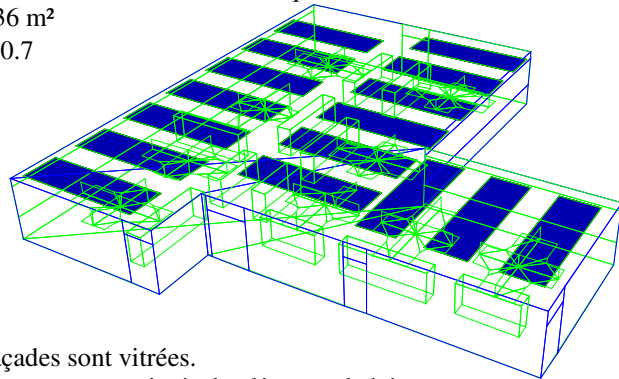
Conclusion : avec un traitement acoustique plafond et un mobilier étudiés,

- Le niveau sonore ambiant est conforme à l'objectif.
- postes face à face et dos à dos : l'intelligibilité est inférieure à 85 %. L'objectif est atteint.
- Par contre, l'absence ou l'excès d'absorbant en plafond et/ou un mobilier non étudié conduit irrémédiablement à des dysfonctionnements acoustiques (voir page 15)

IMMEUBLE VIRTUEL : ACTIVITE DE TYPE BUREAU TERTIAIRE

TRAITEMENT ACOUSTIQUE ET MOBILIER

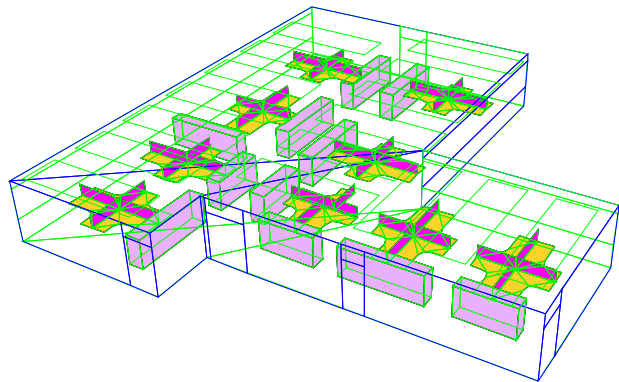
Plafond filots bois et tissu acoustique,
 $S = 136 \text{ m}^2$
 $\alpha_w = 0.7$



Les façades sont vitrées.
Les murs sont constitués de plâtre ou de béton.
Le sol est constitué de moquette rase.

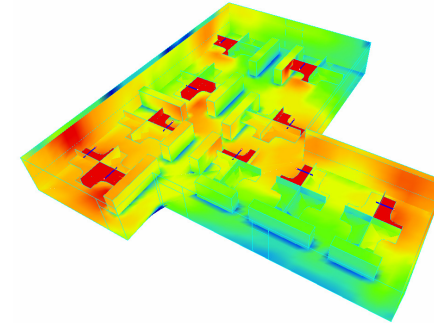
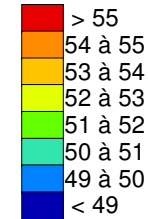
MOBILIER

Plan de travail : $S = 76 \text{ m}^2$, $\alpha_w = 0.07$
Séparatifs postes de travail : $S = 31 \text{ m}^2$, $\alpha_w = 0.07$, $h = 1.3 \text{ m}$
Armoires : $\alpha_w = 0.07$, $h = 1.3 \text{ m}$



NIVEAU SONORE AMBIANT

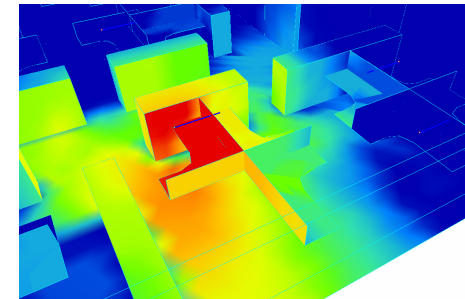
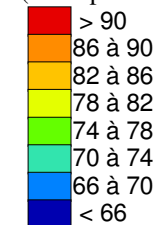
Leq en dB(A)



Le niveau sonore ambiant est de l'ordre de 51 à 55 dB(A) en occupation maximale des postes de travail.
L'objectif de non-dépassement des 55 dB(A) est atteint. Le traitement acoustique plafond est donc suffisant.

INTELLIGIBILITE

Intelligibilité
(% de phonèmes)



L'intelligibilité d'un locuteur à un bureau voisin non occupé soumis au brouhaha des autres postes est inférieure à 82 %.

L'objectif est atteint, les postes peuvent fonctionner indépendamment les uns des autres.

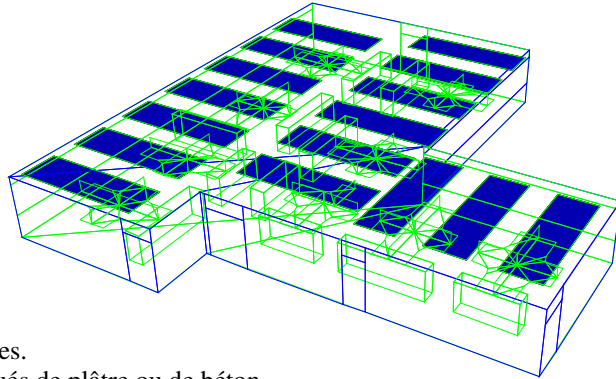
Conclusion : avec un traitement acoustique plafond et un mobilier étudiés,

- le niveau sonore ambiant est conforme à l'objectif.
- La perte d'intelligibilité entre zones de travail est aussi conforme à l'objectif
- Par contre, l'absence ou l'excès d'absorbant en plafond et/ou un mobilier non étudié conduit irrémédiablement à des dysfonctionnements acoustiques (voir page suivante)

IMMEUBLE VIRTUEL : EXEMPLES DE DYSFONCTIONNEMENTS ACOUSTIQUES

EFFET D'UN FAUX-PLAFOND INSUFFISAMMENT ABSORBANT

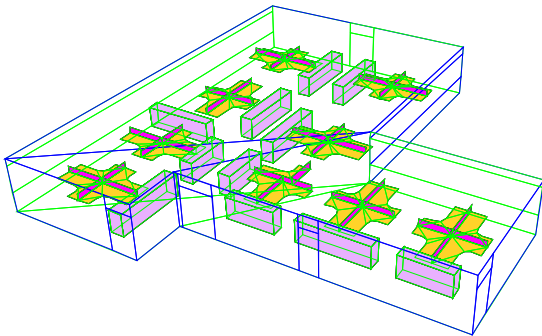
Plafond îlots bois et tissu acoustique,
 $S = 136 \text{ m}^2$
 $\alpha_w = 0.3$



Les façades sont vitrées.
Les murs sont constitués de plâtre ou de béton.
Le sol est constitué de moquette rase.

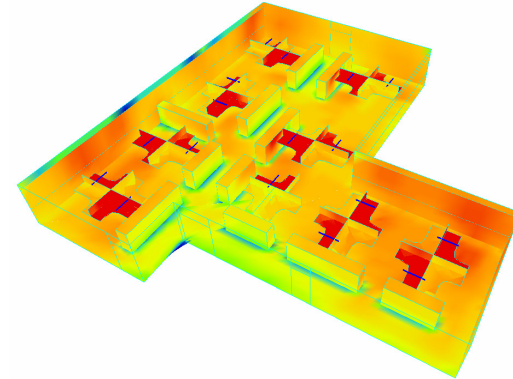
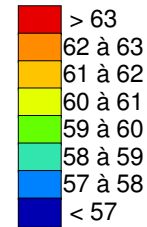
MOBILIER HAUTEUR 1.10 m

- Plan de travail : $S = 76 \text{ m}^2$, $\alpha_w = 0.07$
- Séparatifs postes de travail : $S = 31 \text{ m}^2$, $\alpha_w = 0.07$, $h = 1.1 \text{ m}$
- Armoires : $\alpha_w = 0.07$, $h = 1.1 \text{ m}$



NIVEAU SONORE AMBIANT version centre d'appel

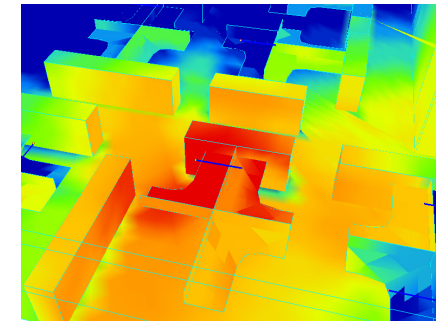
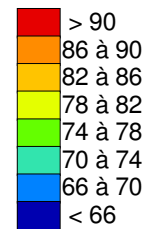
Leq en dB(A)



Le niveau sonore ambiant est de l'ordre de 61 à 63 dB(A) en occupation maximale des postes de travail.
L'objectif de non-dépassement des 60 dB(A) n'est pas atteint.
Le traitement acoustique plafond est donc insuffisant.

INTELLIGIBILITE

Intelligibilité
(% de phonèmes)

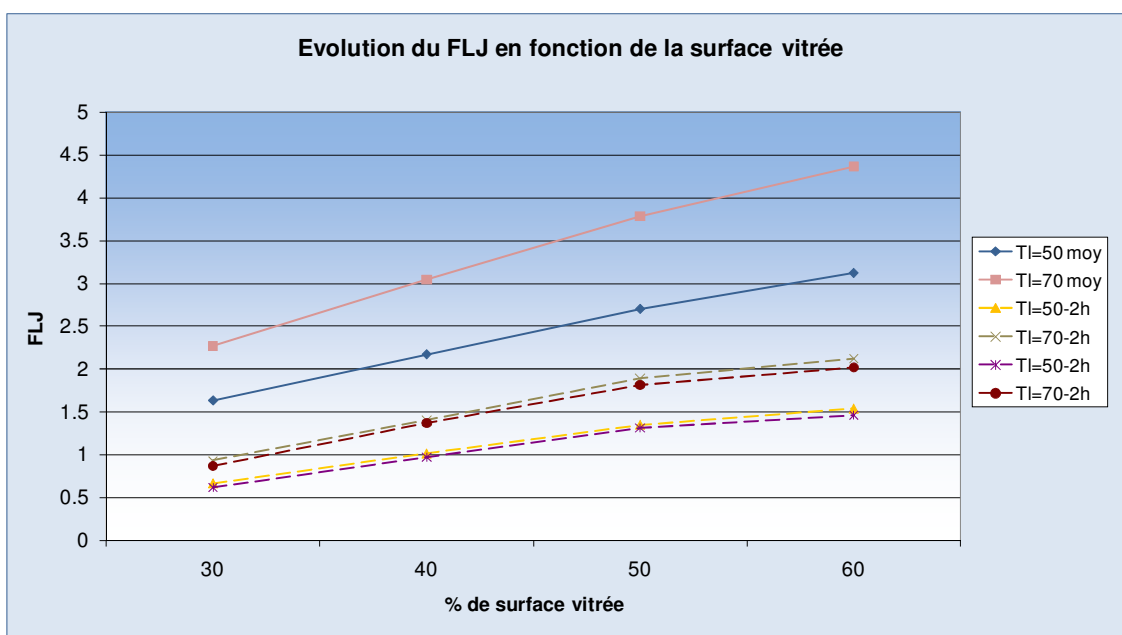
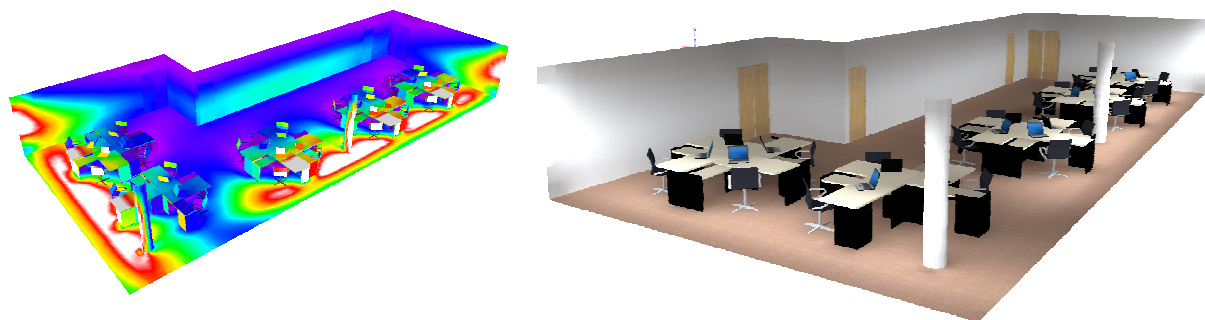


L'intelligibilité d'un locuteur à un bureau voisin non occupé soumis au brouhaha des autres postes est supérieure à 90 %. L'objectif n'est pas atteint, les postes ne peuvent fonctionner indépendamment les uns des autres.

Conclusion : avec un traitement acoustique plafond et/ou un mobilier non étudiés, des désordres acoustiques conduisant à l'impossibilité d'utiliser les locaux apparaissent.

❖ Eclairage

Illustration avec la zone Nord Ouest en R+1 (256m²)



Lorsque la surface vitrée dépasse 50% de la surface de façade, les facteurs de lumière du jour se stabilisent rapidement. A partir de ce niveau d'ouverture des façades, le gain supplémentaire en autonomie d'éclairage naturel devient donc faible.

Afin de garder un bon équilibre entre les réductions des consommations de chauffage et une bonne autonomie en éclairage naturel, il est inutile de trop percer les façades.

Si la surface vitrée est trop faible, il faut recourir à l'éclairage artificiel pendant une longue période de l'année avec le risque d'augmenter fortement les consommations liées à l'éclairage (poste représentant de 25 à 47% des consommations selon les versions), et d'augmenter indirectement les consommations de rafraîchissement si l'éclairage fonctionne en période estivale.

Plus les postes de consommations sont optimisés, plus toute variation même faible d'un paramètre, peut perturber de manière importante l'ensemble du projet.

❖ Consommations et impacts environnementaux

1 : siège GA, 2 : immeuble Saarinen, 10 à 13 : l'immeuble virtuel (base) et ses variantes (Grenelle, facteur 4 conso et facteur 4 conso et construction)

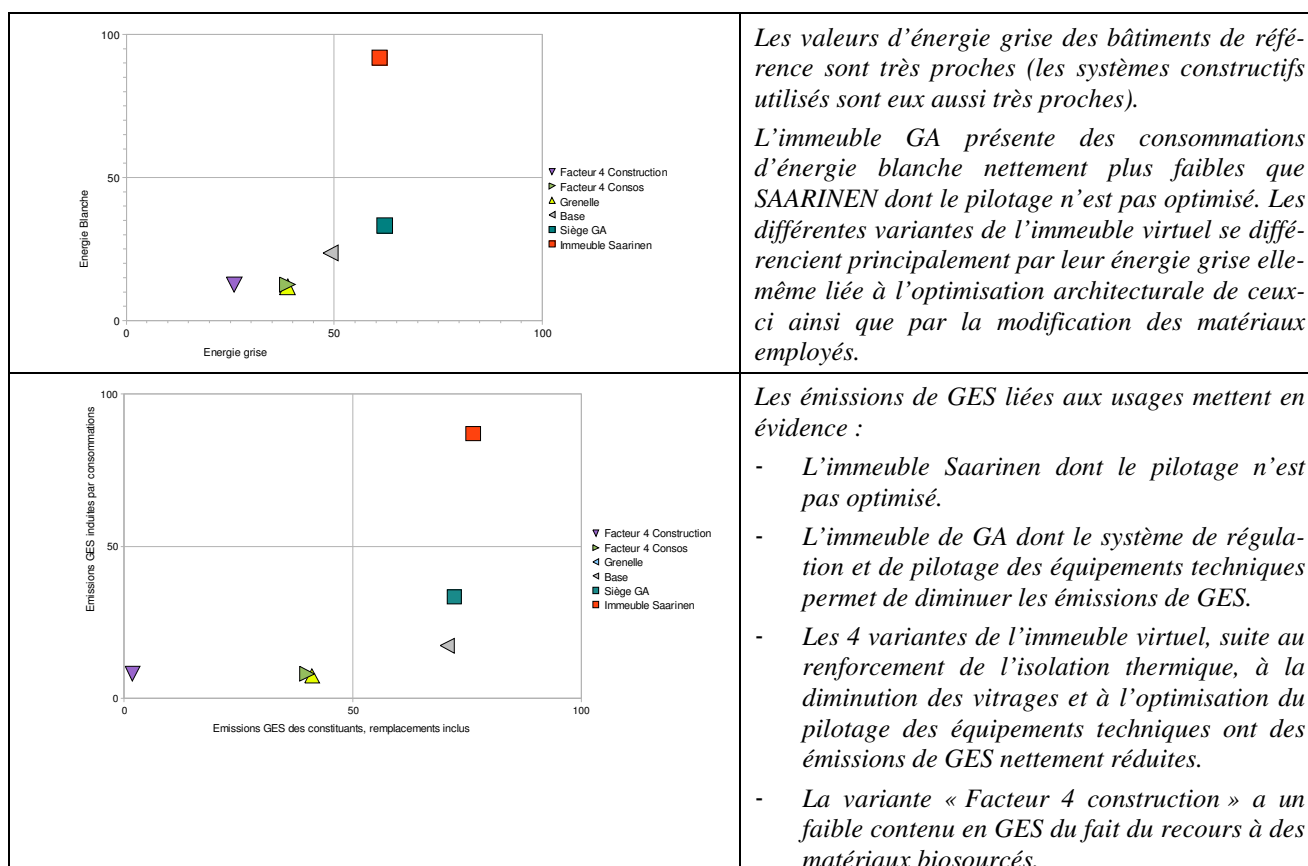
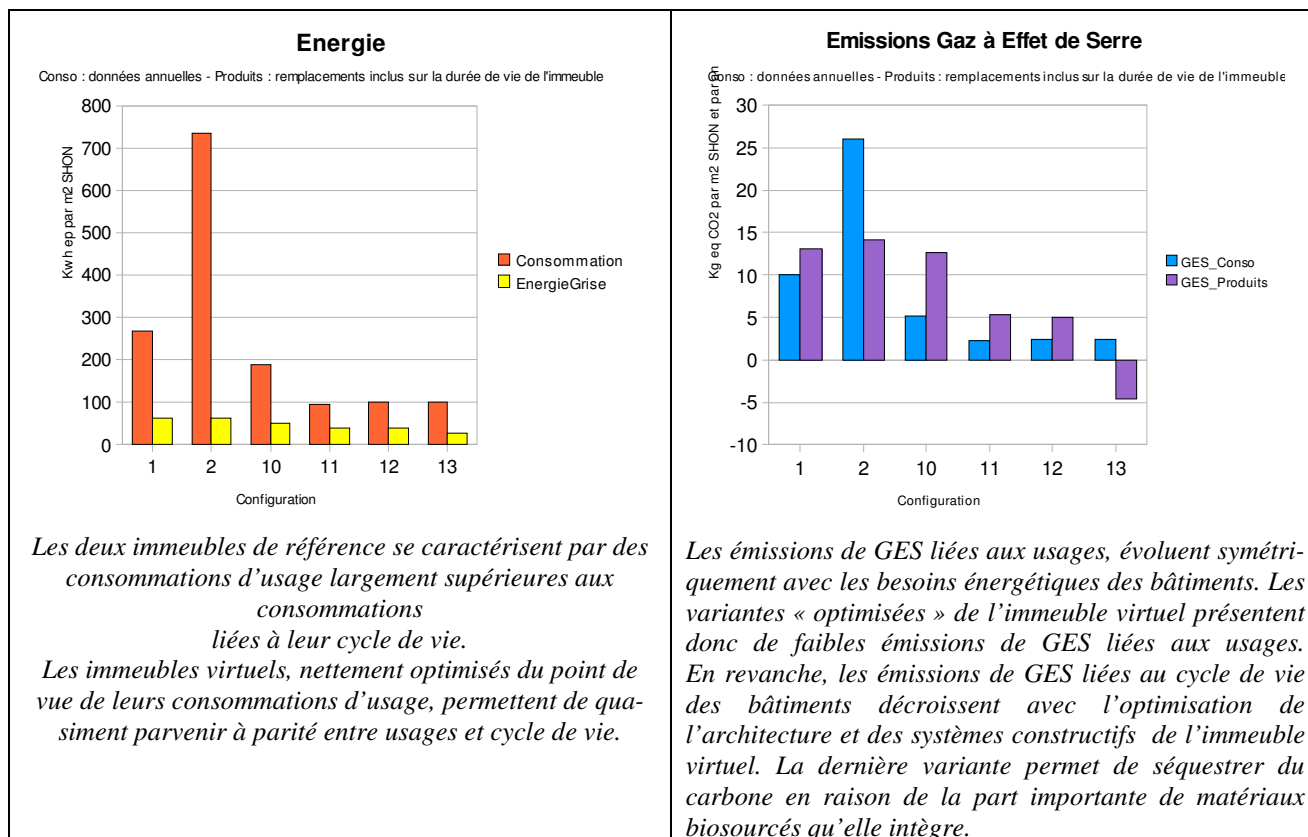


Figure 8: Répartition des GES annualisées entre usages et construction des immeubles

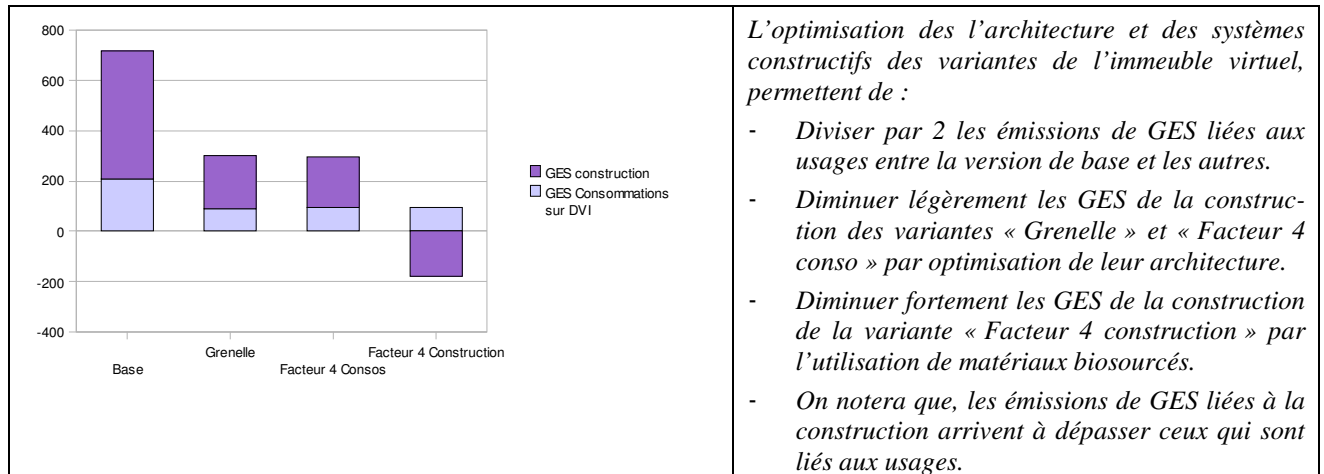
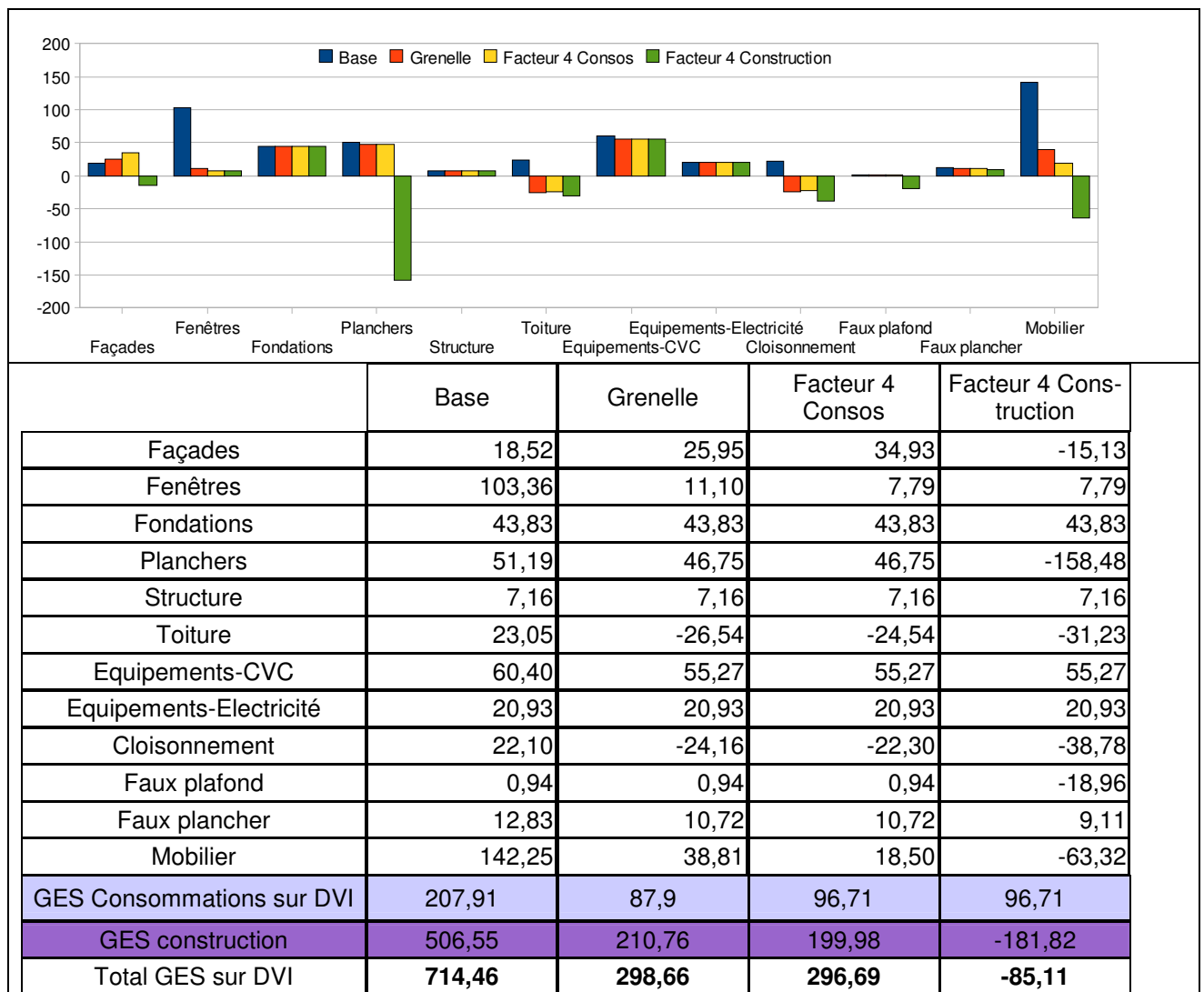


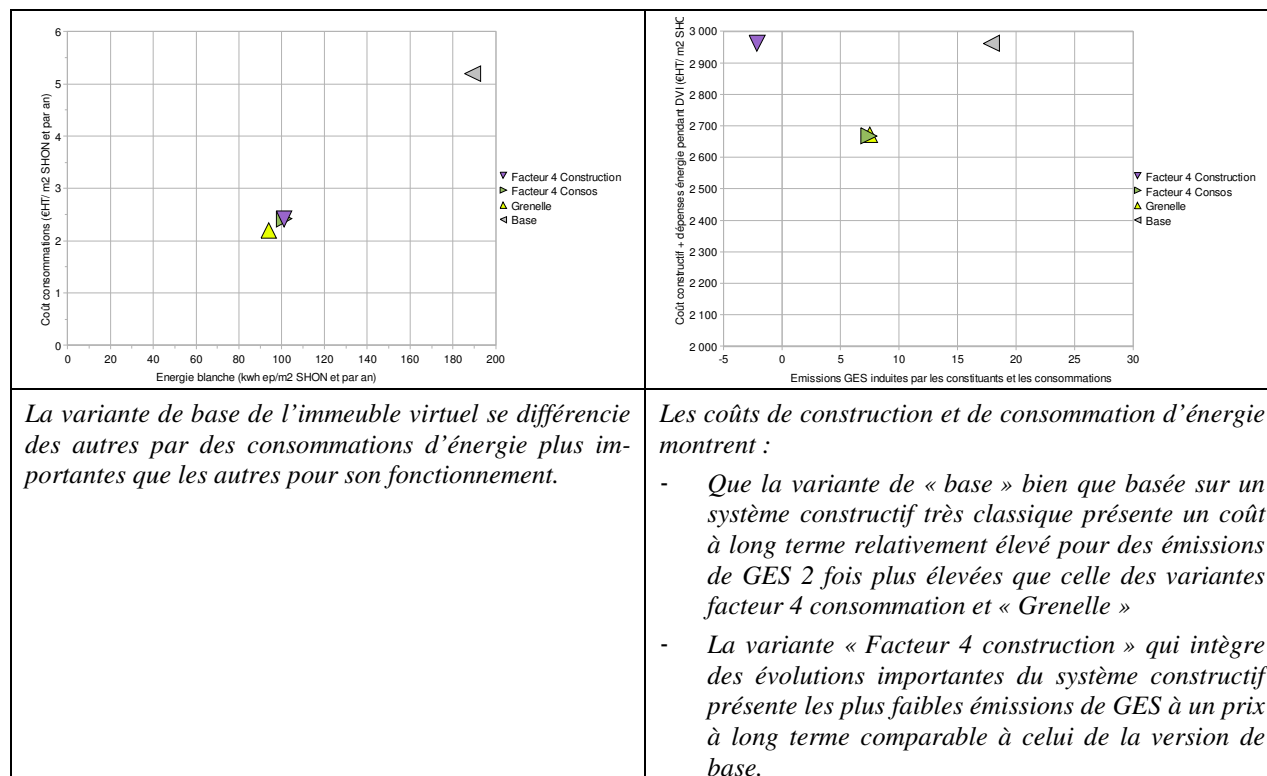
Figure 9: Emissions de GES par ouvrages de construction



- Les équipements techniques constituent le poste principal d'émissions de GES de construction car constitués de matériaux complexes et transformés (métaux, plastiques...).
- A matériaux constants, l'épaississement des isolants se traduit par une légère augmentation de GES.
- La diminution ou la suppression de certains ouvrages permet de faire baisser les GES (faux plafonds, protections acoustiques).

Certains ouvrages se prêtent à l'utilisation totale ou partielle de matériaux biosourcés. Ceci se traduit par une diminution des GES qui peut être importante (planchers en bois et mobiliers en bois massifs par exemple).

Figure 10: Comparaison entre le coût des variantes d'immeubles et leurs impacts



❖ Coût global détaillé

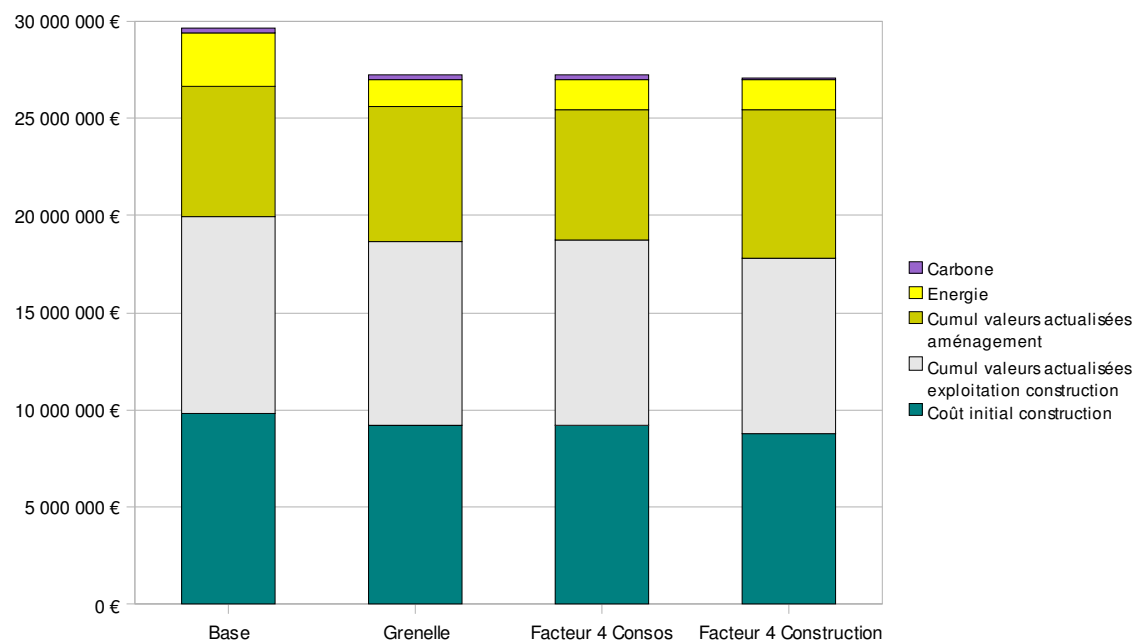
Le calcul est sensible aux paramètres suivants :

Taux d'actualisation	4,0%
Taxe carbone	27 €/tonne
Durée	40 ans
Maintenance et renouvellement hors aménagement en fonction du coût initial	2,1%

Ainsi qu'aux valeurs du facteur d'actualisation de chaque objet type :

Code	DV	FacteurActualisation	EnergieGrise	EmissionGES	CoûtConstructif
1 Unite de PAC GA FACADE	10,00	3,16	1 503,93	256,54	2 400,00
ArmoireAcierPVC	8,00	3,99	748,92	126,60	100,00
ArmoireBois	8,00	3,99	6,62	-113,78	300,00
ASCENSEUR	30,00	0,95	0,00	0,00	32 607,00
Bureau classique	8,00	3,99	281,66	54,23	200,00

Variante	SHON	Construction				Aménagement	Energie				Carbone				Coût global partagé
		Coût initial construction	Coûts exploitation annuels	Taux de glissement	Cumul valeurs actualisées exploitation construction	Cumul valeurs actualisées aménagement	€/m2 SHON par an	€/an	Taux de glissement	Cumul valeurs actualisées	Tonnes eq CO2	€/an	Taux de glissement	Cumul valeurs actualisées	
Base	10 190	9 831 795 €	206 468	5,0%	10 110 107 €	6 722 064 €	5,39	54 962	5,0%	2 691 335 €	187	5 058	6,0%	306 219 €	29 661 521 €
Grenelle	10 190	9 218 275 €	193 584	5,0%	9 479 220 €	6 880 866 €	2,85	29 092	5,0%	1 424 548 €	161	4 354	6,0%	263 645 €	27 266 554 €
Facteur 4 Consos	10 190	9 235 816 €	193 952	5,0%	9 497 257 €	6 697 119 €	3,09	31 458	5,0%	1 540 404 €	161	4 341	6,0%	262 823 €	27 233 420 €
Facteur 4 Construction	10 190	8 796 324 €	184 723	5,0%	9 045 324 €	7 573 404 €	3,09	31 458	5,0%	1 540 404 €	64	1 715	6,0%	103 821 €	27 059 277 €



❖ Synthèse

L'étude de l'immeuble virtuel a démontré la faisabilité d'obtenir un immeuble performant et sobre sans surcoût notable. Ce résultat a été obtenu en faisant seulement appel à des technologies et à des solutions éprouvées.

Le renforcement de l'isolation réduit les postes chauffage et rafraîchissement qui passent au second plan derrière l'éclairage et la bureautique

Plus les consommations diminuent et plus il faut porter attention aux émissions de GES induites par les matériaux.

L'aménagement intérieur (mobilier en particulier) pèse lourd dans ces émissions pour deux raisons : d'une part, les matériaux actuellement utilisés comportent une proportion importante et donc pénalisante de composants métalliques, et d'autre part, les produits d'aménagement intérieurs sont amenés à être changés à plusieurs reprises durant le cycle de vie du bâtiment.

Nos outils de simulation et d'analyse nous permettent de confirmer que ces bureaux auront un niveau de confort thermique, acoustique et lumineux satisfaisant car la performance n'a pas été obtenue au détriment de la qualité des ambiances.

4. Méthodes et outils

4.1 DEMARCHE DE DEVELOPPEMENT

Notre proposition initiale prévoyait que nous utiliserions des progiciels et applications existantes, déjà maîtrisés par les partenaires du projet dans les domaines de la simulation thermique dynamique, de l'acoustique et de l'éclairage.

Elle envisageait aussi des développements spécifiques pour aboutir à un outil de coût global partagé avec pour principales fonctionnalités :

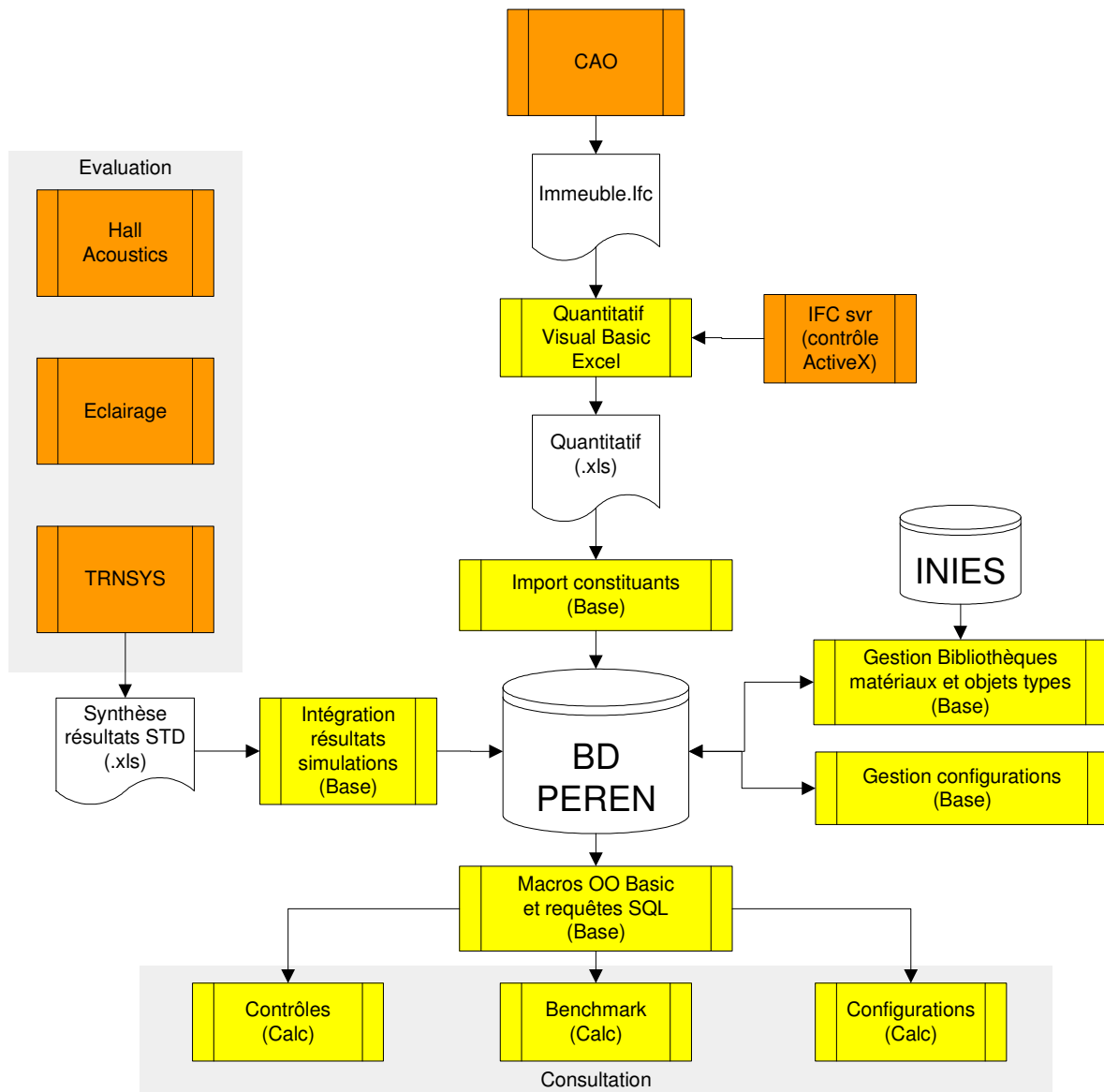
- la gestion d'une bibliothèque d'impacts environnementaux et de coûts
- la détermination d'indicateurs permettant la comparaison de différents immeubles ou de différentes variantes d'un même immeuble
- la fédération des informations nécessaires à cette détermination (caractéristiques de l'immeuble, résultats des simulations)

Nous nous étions également engagés à utiliser les standards d'échange pour que notre outil puisse évoluer ultérieurement en communiquant avec d'autres outils que ceux initialement prévus.

4.2 ARCHITECTURE GENERALE

Les blocs de couleur orange représentent les logiciels tiers. Les blocs de couleur jaune correspondent à ce qui a été développé dans le cadre du projet et dont l'ensemble constitue « l'outil PEREN » :

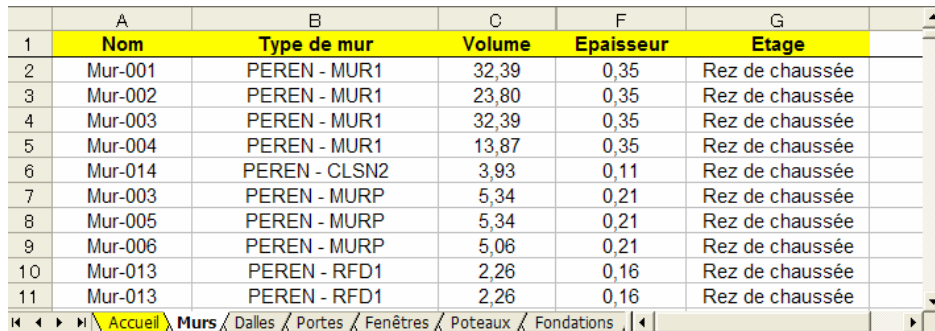
- un module de production d'un quantitatif des constituants de l'immeuble à partir d'un fichier au format IFC produit par un logiciel de CAO
- des modules pour intégrer à la base de données le résultat de ce quantitatif et la synthèse des calculs thermiques
- un module de gestion des bibliothèques
- un module de gestion des configurations
- un ensemble de macros et de requêtes pour alimenter les outils de consultation



4.3 QUANTITATIF A PARTIR D'UNE MAQUETTE NUMERIQUE AU FORMAT IFC

Nous avons mis en œuvre une solution basée sur le composant ActiveX IFCsvr développé par la société SECOM et disponible gratuitement¹. IFCsvr contient des fonctions d'analyse et d'extraction du contenu d'un fichier au format IFC. Ces fonctions sont appelées par une macro Visual basic qui remplit les onglets correspondant à chaque catégorie d'objet à partir du fichier IFC.

Nota : cette macro fonctionne uniquement lorsque le logiciel de CAO exporte les quantités sous la forme d'instances de la classe IfcElementQuantity. Cette convention est appliquée pour l'instant par les logiciels Archicad et Bentley Architecture.



	A	B	C	F	G
1	Nom	Type de mur	Volume	Epaisseur	Etage
2	Mur-001	PEREN - MUR1	32,39	0,35	Rez de chaussée
3	Mur-002	PEREN - MUR1	23,80	0,35	Rez de chaussée
4	Mur-003	PEREN - MUR1	32,39	0,35	Rez de chaussée
5	Mur-004	PEREN - MUR1	13,87	0,35	Rez de chaussée
6	Mur-014	PEREN - CLSN2	3,93	0,11	Rez de chaussée
7	Mur-003	PEREN - MURP	5,34	0,21	Rez de chaussée
8	Mur-005	PEREN - MURP	5,34	0,21	Rez de chaussée
9	Mur-006	PEREN - MURP	5,06	0,21	Rez de chaussée
10	Mur-013	PEREN - RFD1	2,26	0,16	Rez de chaussée
11	Mur-013	PEREN - RFD1	2,26	0,16	Rez de chaussée

Figure 11. Quantitatif IFC : Onglet Murs

4.4 INTEGRATION DES RESULTATS DE SIMULATION

Les seules valeurs produites par TRNSYS que nous intégrons à la base de données PEREN sont les consommations, les dépenses d'énergie par usage (chauffage, rafraîchissement, ECS, éclairage, auxiliaires et équipements techniques dont la bureautique) et le coût de l'abonnement annuel.

Le nombre de valeurs par configuration est donc faible et elles sont saisies manuellement.

Tout logiciel de thermique capable de les produire peut être utilisé.

4.5 BIBLIOTHEQUE DES MATERIAUX ET OBJETS TYPES

Tout constituant d'un immeuble est associé à un objet type auquel sont associés des valeurs unitaires des coûts et des impacts environnementaux, la durée au bout de laquelle il doit être remplacé et un facteur d'actualisation défini au paragraphe suivant.

Lorsqu'on dispose d'une fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES), les valeurs des impacts et en particulier l'énergie grise et les émissions de GES sont extraites de la fiche et saisies telles quelles, sans aucune conversion pour réduire le risque d'erreur. L'énergie grise notamment est saisie en Méga Joules. Mais les cas où il n'existe pas de FDES sont encore nombreux. On décrit alors la composition de l'objet type à partir d'une bibliothèque de matériaux et les impacts environnementaux de l'objet type sont déduits automatiquement des quantités et des impacts unitaires des matériaux qui le composent.

¹ S'inscrire au groupe <http://tech.groups.yahoo.com/group/ifcsvr-users/?yguid=40247048> pour télécharger l'application et sa documentation

4.6 COUT GLOBAL PARTAGE

❖ Définition

Le développement durable motive actuellement des approches en coût global non limitées au strict point de vue économique.

Le coût global fait l'objet d'une norme internationale (ISO/DIS 15686-5) qui est prise comme référence par un document récent du MEDDAT². Cette norme introduit la notion de coût global étendu lorsqu'il intègre des externalités, c'est-à-dire « *des contraintes (externalité négative) ou des bénéfiques (externalité positive) revenant à des tiers. En particulier, les émissions en CO2 pourront être monétisées en valorisant la tonne de carbone suivant des études sur l'évolution des prix du marché ou suivant son coût institutionnel.* ³ »

Cette notion de **coût global étendu** est équivalente à celle du **coût global partagé** introduite dans le document « Ouvrages publics et coût global⁴ ». C'est l'option que nous avons retenue dès le début du projet PEREN avec le développement d'un outil de coût global partagé, complémentaire aux autres outils utilisés par les membres de l'équipe de recherche pour l'évaluation des immeubles de bureau.

❖ Formules de calcul

Soit a le taux réel d'actualisation. La norme ISO 15686-5 fixe une fourchette de 0 à 4%.

Nous avons retenu la valeur de 4% pour l'ensemble des biens et services intervenant dans le cycle de vie de l'ouvrage.

Soit g le taux de glissement des prix dont la valeur pourra varier suivant les postes. Nous avons pris les valeurs suivantes que l'outil permet de modifier si nécessaire :

Consommations électriques	5%
Consommations gaz	10%
Carbone	6%
Maintenance	5%
Remplacements	3%

La valeur actualisée d'un coût dépensé l'année n et dont la valeur l'année de la construction est de C est donnée par la formule [1] :

$$VA(n) = C \times \left(\frac{1+g}{1+a} \right)^n$$

² Calcul du Coût Global. Objectifs, méthodologie et principes d'application selon la norme ISO/DIS 15686-5 MEDDAT/CGDD/SEEI, version du 10/2/2009

www-coutglobal-developpement-durable-gouv-fr.aw.atosorigin.com/aide/download/filename/resume_norme.pdf

³ <http://www-coutglobal-developpement-durable-gouv-fr.aw.atosorigin.com/glossaire>

⁴ Ouvrages publics & coût global : une approche actuelle pour les constructions publiques ». Publication de la Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques (MIQCP).

La formule suivante [2] donne le cumul sur n années des valeurs actualisées d'un coût C qui est réglé avec une périodicité p :

Si $a \neq g$

$$CVA(n, p) = C \times \frac{1 - \left(\frac{1+g}{1+a}\right)^n}{\left(\frac{1+a}{1+g}\right)^p - 1}$$

Si $a = g$, $CVA(n, p) = C \times n / p$

Nous appelons **facteur d'actualisation** le facteur multiplicatif à appliquer à une dépense effectuée avec une périodicité p pour obtenir le cumul des valeurs actualisées de ces dépenses au bout de n années :

$$CVA(n, p) = C \times \text{Facteur d'actualisation}$$

Lorsqu'actualisation et glissement ont même valeur, il convient de multiplier la dépense par le ratio n/p , soit par 5 pour une dépense effectuée tous les 8 ans pendant 40 ans. Pour un glissement supérieur (inférieur) à l'actualisation, le cumul sera supérieur (inférieur) à ce ratio :

Périodicité	Facteur d'actualisation			
	3%	4%	5%	6%
1	33,0	40,0	49,0	60,5
4	8,1	10,0	12,4	15,6
8	4,0	5,0	6,3	8,1
16	1,9	2,5	3,3	4,3
24	1,2	1,7	2,3	3,1
32	0,9	1,3	1,8	2,5
40	0,7	1,0	1,5	2,1

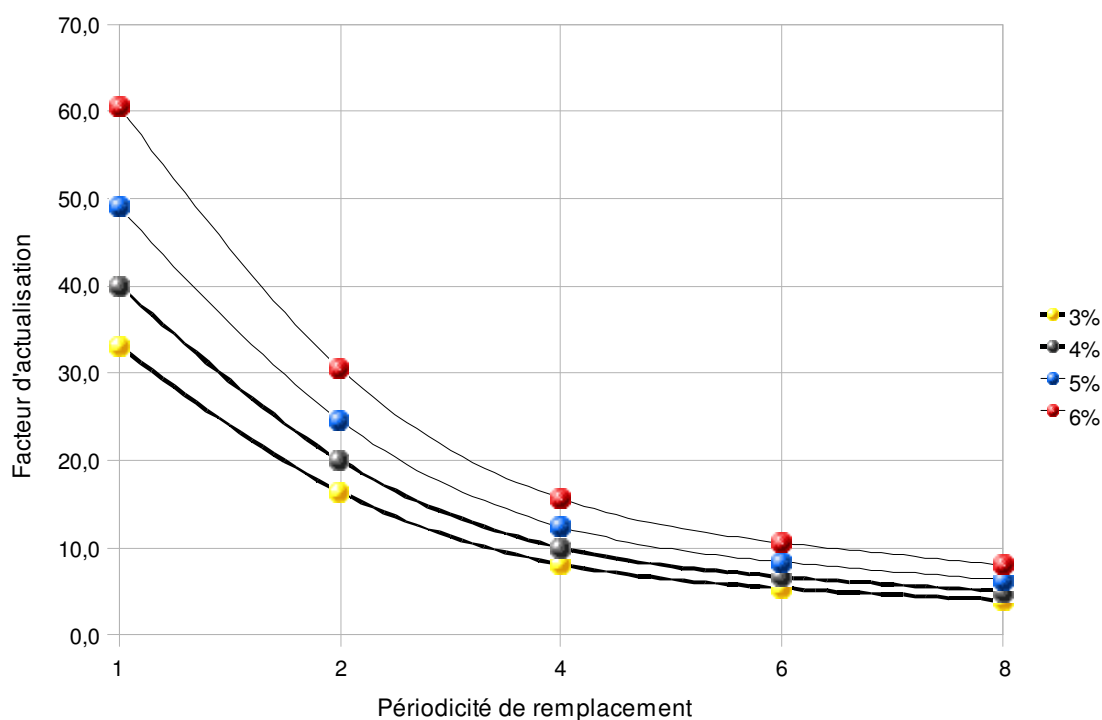


Figure 12. Variations du facteur d'actualisation pour des périodicités de 1 à 8 ans

❖ Périmètre de l'outil et traitement des différents postes de coût

Etudes

Ce poste de coût n'a pas été pris en compte pour l'instant.

D'une part, son poids est faible, de l'ordre de 2% du coût global. D'autre part, il serait peut-être plus judicieux d'évaluer le coût des études, non plus classiquement en proportion du coût des travaux, mais en raison de la complexité des études qui sont nécessaires à l'obtention de performances élevées et à la maîtrise de la qualité des ambiances (simulations thermiques dynamiques, calculs acoustiques,...). L'écart ne serait sans doute pas significatif rapporté au coût global.

Coût constructif initial

Il est calculé automatiquement par requête à partir des quantités des constituants et des prix unitaires des objets types associés à ces constituants. Il englobe le clos couvert, les équipements et les frais divers.

Maintenance et renouvellements annuels hors aménagement

Même avec l'aide des entreprises membres du consortium, il nous a été difficile d'estimer des prix unitaires relatifs à l'exploitation.

Nous estimons le coût annuel de maintenance et de renouvellement en pourcentage du coût constructif initial.

Nous avons pris la valeur 2,1% proposée pour les bureaux non IGH⁵ et avons ainsi obtenu une valeur annuelle qui est actualisée à l'aide de la formule [2] avec un taux de glissement de 3%.

Aménagement

Les constituants dont la durée de vie est inférieure à celle de l'immeuble font l'objet de renouvellements. Ceux-ci sont déjà pris en compte dans le calcul des émissions de GES.

Pour chaque objet type, nous avons saisi le facteur d'actualisation correspondant à sa durée de vie et à une hypothèse de taux de glissement (3%). Le coût des remplacements est actualisé en multipliant le prix unitaire de l'objet type par la quantité mise en œuvre puis par le facteur d'actualisation.

Fluides

Les dépenses énergétiques annuelles sont actualisées à l'aide de la formule [2]. Elles prennent en compte l'abonnement et les dépenses induites par les usages suivants : chauffage, rafraîchissement, éclairage, bureautique et auxiliaires.

Les dépenses relatives à l'eau ne sont pas traitées. Elles sont réduites à l'eau froide dans la mesure où la tendance actuelle est de ne pas proposer d'ECS.

Carbone

On distingue trois sources d'émissions de GES :

- les consommations d'énergie
- les émissions induites par les constituants initiaux de l'immeuble en prenant en compte la construction et l'aménagement
- les émissions induites par les constituants dont la durée de vie est inférieure à celle de l'immeuble et qui font l'objet de remplacements.

⁵ Calcul du Coût Global. Objectifs, méthodologie et principes d'application selon la norme ISO/DIS 15686-5 MEDDAT/CGDD/SEEI, version du 10/2/2009

Ces émissions sont calculées chaque fois que disponible à partir des FDES qui prennent en compte les émissions tout au long du cycle de vie des produits.

En anticipant l'application d'une taxe carbone, il est possible de monétiser les émissions de GES en prenant comme assiette l'ensemble des émissions que nous venons d'énumérer. En toute rigueur, il faudrait actualiser les versements de la taxe carbone sur une base annuelle pour celles liées aux consommations et en fonction de la périodicité pour celles dues aux remplacements.

Par simplification et parce que ce poste est très faible par rapport aux autres composantes du coût global partagé, nous avons ramené l'ensemble des émissions à un tonnage annuel, monétarisé par la taxe carbone puis actualisé à l'aide de la formule [2]. Le taux de glissement a été supposé égal à 6%.

Transport

Les incidences du transport en matière d'émissions de GES ne sont pas prises en compte car, spécifiques à l'implantation de l'immeuble, elles doivent être traitées à une autre échelle avec des outils dédiés.

Déconstruction

Pas pris en compte car le pourcentage prévisionnel est faible et il est écrasé par l'effet de l'actualisation.

4.7 BILAN DU DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL

❖ Fonctionnalités disponibles

La version actuelle dispose des principales fonctionnalités dont nous avons besoin :

- Extraction d'un quantitatif à partir d'une description de l'immeuble au format IFC
- Gestion d'une bibliothèque de matériaux et d'objets types permettant de tenir compte des impacts environnementaux de produits pour lesquels on ne dispose pas encore de FDES
- Calcul automatique des principaux indicateurs pour comparer les différentes configurations d'étude
- Détermination d'un coût global partagé intégrant un poste carbone
- Tableurs de contrôle et d'analyse alimentés automatiquement à partir de la base de données à l'aide de la technologie des pilotes de données.

❖ Quantitatif

L'intérêt d'extraire un quantitatif détaillé à partir du fichier IFC produit par un logiciel de CAO est confirmée. Cette automatisation simplifie et fiabilise grandement le travail de préparation des données nécessaires aux calculs, notamment de thermique et d'impacts environnementaux.

Elle rend l'interface indépendante d'un logiciel particulier puisqu'il est conforme à une norme internationale.

❖ Améliorations potentielles de l'outil

L'outil doit être considéré comme un prototype, principalement du point de vue de l'interface utilisateur.

Nous avons identifié les améliorations suivantes :

1. Extension du quantitatif à d'autres classes d'objets

Le module pourrait être étendu à d'autres classes d'objets pour le rendre plus polyvalent.

2. Meilleure prise en compte des durées de vie

Dans nos évaluations, le paramètre « Durée de vie de l'immeuble » a été supposé égal à 40 ans. Lorsqu'un objet type a une durée de vie inférieure, nous prenons en compte les renouvellements ce qui a des répercussions sur les calculs d'énergie grise, d'émissions de GES et de coût. Nous ne réduisons pas les impacts si la durée de vie est supérieure à 40 ans ce qui est souvent le cas pour les éléments structurels et pénalise les composants dont la durée de vie est élevée.

3. Une interface utilisateur conviviale et sécurisée

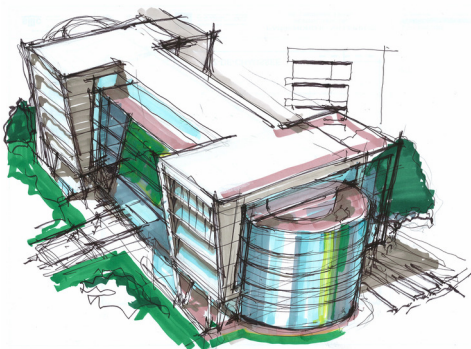
C'est l'évolution la plus importante. Elle sera indispensable pour que l'outil puisse servir à d'autres utilisateurs que les partenaires du projet et elle nécessitera sans doute un changement d'environnement.

Une amélioration de la convivialité et de la sécurisation des saisies ne résoudra toutefois pas tous les problèmes car les principales difficultés que nous avons eu à surmonter au cours de la recherche ont été l'estimation de certaines quantités (réseaux notamment) et la détermination de certains impacts environnementaux.

5. Le projet pilote Narval

Début 2009, SILIC a retenu une opération susceptible d'être menée comme un projet pilote auquel sera associée l'entreprise GA et sur lequel les deux entreprises pourront mettre en application les enseignements de la recherche Peren. Il s'agit de l'opération appelée « extension Narval » (11 000 m² SHON) :

Opération :	Extension Narval ZA du Petit Nanterre 31 rue des Hautes Pâtures 92737 Nanterre cedex
Maîtrise d'ouvrage :	SILIC c/o SOCOMIE 33, Boulevard des Bouvets 92741 NANTERRE Cedex
Maîtrise d'œuvre :	Paul MAYLA Architecture & Associés 18/20 Avenue de la Marne 92120 MONTROUGE



Objectifs et attentes du maître d'ouvrage :

- appliquer les enseignements du projet PEREN jusqu'à obtention d'un bâtiment à énergie positive
- expérimenter une sélection des solutions préconisées par l'équipe de recherche
- mettre en évidence leurs incidences sur les aménagements techniques et le coût

Cette opération a été choisie assez tôt pour qu'il soit possible d'organiser des réunions à trois reprises entre le maître d'œuvre et l'équipe PEREN.

6. Guide à l'intention des concepteurs

Cette partie du document s'adresse aux concepteurs d'immeubles de bureaux désireux de contribuer de façon significative à l'effort général de réduction des émissions de gaz à effet de serre tout en restant compétitifs vis-à-vis des attentes et contraintes du marché.

Nos recommandations sont complétées par une sélection de solutions commentées. Elles s'appuient sur l'expérience des membres de l'équipe ainsi que sur les enseignements que nous avons tirés de l'étude détaillée de deux immeubles existants, puis de l'immeuble virtuel. Celui-ci a fait office d'un véritable banc d'essai pour tester la pertinence de nos intuitions et comparer différentes combinaisons de solutions.

Nous considérons que ces recommandations sont applicables à tout projet d'immeuble de bureau. Elles prennent en compte leurs particularités et notamment que :

- Ce sont des locaux à occupation intermittente.
- Les espaces ouverts se développent dans l'objectif d'optimiser la densité d'occupation : des réponses adaptées sont indispensables faute de quoi les conditions de travail ne seront pas satisfaisantes.

6.1 REDUIRE LES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES

Les recommandations classiques relatives à l'isolation, la compacité, à l'orientation et au dimensionnement des vitrages, aux protections solaires,... sont évidemment pertinentes pour des bureaux.

Recommandations

- [R1] Rechercher la compacité afin de limiter les surfaces déperditives de l'enveloppe, réduire les consommations énergétique, réduire les coûts de construction,....
- [R2] Isolation thermique par l'extérieur, suppression des faux plafonds pour mieux tirer partie de l'inertie thermique des planchers
- [R3] Ne pas vitrer inutilement les façades : trouver le bon compromis entre apports de lumière naturelle et limitations des déperditions/apports solaires par les vitrages. Une surface vitrée est environ 6 fois plus déperditif qu'une surface opaque.
- [R4] Favoriser l'éclairage naturel pour réduire les consommations électriques liées à l'éclairage artificiel, sans induire de risques de surchauffe estivale (rester si possible en deçà d'un ratio de 35% surface vitrée / surface sol de la pièce en BBC, 25% en BEPOS).
- [R5] Protéger efficacement les vitrages des entrants solaires afin de réduire les apports en période estivale (respect de valeurs RT 2005 en zone H2 pour inertie moyenne à faible, soit 0,15 à 0,25 en façade Est, Sud et Ouest, et 0,45 au Nord)
- [R6] Répondre aux besoins de chauffage et de rafraîchissement là où c'est nécessaire et seulement quand c'est nécessaire. On note tout de même que lorsqu'un bâtiment est extrêmement bien isolé, étanche à l'air et ayant une très bonne inertie, la suppression des ralentis de température en période d'inoccupation peut être bénéfique aux coûts d'exploitation du bâtiment du fait de la réduction des appels de puissance de chauffage (influence du coût de l'abonnement électrique, et de la puissance globale à installer).
- [R7] Piloter et réduire les puissances d'éclairage installées : piloter l'éclairage en fonction de l'occupation et ajuster la puissance d'éclairage par gradation des luminaires en

fonction du niveau d'éclairage naturel permet de réduire considérablement les consommations d'électricité. La réduction des consommations d'éclairage permet indirectement de réduire les apports internes et donc de réduire les besoins de rafraîchissement.

- [R8] Choisir des équipements informatiques moins consommateurs pour réduire les consommations d'énergie électrique et les besoins de rafraîchissement.

Sélection de solutions

[S1] Favoriser la compacité horizontale

Réduire au maximum le périmètre de chaque niveau de plancher. Pour cela :

- Eviter les niveaux séparés en plusieurs parties ; ou laissés en une seule partie mais avec un périmètre tourmenté (angles de façade concaves ou au contraire convexes mais aigus).
- Regrouper au centre du plan, pour l'épaissir, tous les locaux ne nécessitant pas de vitrage car occupés brièvement (sanitaires, archives, salles de réunion ponctuelle,...). L'allongement du plan devant être limité à ceux qui le nécessitent.

Mais deux autres améliorations de la compacité pure ont un intérêt final ambigu, donc à vérifier par un calcul global :

- Approfondir les locaux vitrés épaissit certes aussi le plan, mais à économie d'éclairage égale (voir plus haut) cela exige plus de m² de vitrage par m² de bureau.
- Un atrium supprime certes la surface des 2 pignons qui seraient nécessaires à un plan en barre de même surface et aux mêmes épaisseurs de locaux. Mais l'orientation des vitrages y est moins unanimement bonne que dans une barre allongée ayant 2 principales orientations ; et les vitrages côté atrium ont une lumière naturelle affaiblie par le proche bâti en face. Si l'atrium est couvert d'une verrière, il fait un espace tampon entre l'extérieur et les zones chauffées. L'atrium ajoute de la surface utilisable au projet. Afin de ne pas trop pénaliser l'éclairage naturel des bureaux donnant sur le patio, la verrière et les vitrages de bureaux doivent avoir une très bonne transmission lumineuse (vitrage extra clair, voire lentille ETFE).

[S2] Favoriser la compacité verticale

Quand le nombre de niveaux n'est pas imposé par les contraintes du terrain, calculer l'optimum compte tenu des différences entre m² de toiture et de façade opaque, des fondations possibles, des règles de sécurité, etc.

Eviter des plans ne se superposant pas d'un niveau à l'autre, accroissant les surfaces de toiture et de plancher sur air froid.

Supprimer les faux plafonds dans les bureaux : ils représentent habituellement 1/5^{ème} de la hauteur des façades ; et ils occultent l'inertie thermique du dallage, propice au rafraîchissement naturel ; leurs utilités (acoustique, cacher les gaines) peuvent être assurées autrement.

Abaisser la hauteur sous plafond a par contre un intérêt ambigu car réduit la hauteur maxi du linteau du vitrage, exigeant pour des bureaux profonds, plus de m² de vitrage par m² de bureau, à économie d'éclairage égale (voir plus haut).

[S3] Bien dimensionner les surfaces vitrées

D'une part, un vitrage coûte bien plus que la façade opaque dont il prend la place (environ 3 fois plus en coût global, et il est 6 fois plus déperditif qu'une surface

opaque). D'autre part ce vitrage, indispensable à la vue, allège la consommation d'éclairage artificiel (qui devient, grâce à la qualité des isolants, plus importante que celle de rafraîchissement et de chauffage) :

Lorsqu'on accroît progressivement le vitrage d'un local, l'économie d'éclairage artificiel croît aussi, puis cesse à un moment donné (vitrer les allèges n'apporte par exemple quasiment pas d'autonomie en éclairage naturel), par contre, tous ses autres coûts (chauffage, rafraîchissement, construction, impacts environnementaux) continuent d'augmenter. Son bilan global ne peut donc que se dégrader à partir de cette **surface critique**.

Cette surface critique est d'autant plus petite, donc économique, que le vitrage a un **linteau haut** par rapport aux plans de travail à éclairer. Un local peu profond bénéficie davantage d'éclairage naturel qu'un local profond.

La surface vitrée optimale doit donc faire l'objet d'un **calcul global** propre à chaque projet et chaque type de local. Mais la 2^{ème} particularité ci-dessus donne déjà quelques préceptes de répartition de cette surface :

- Proscrire les **allèges** vitrées, qui n'éclairent guère les plans de travail, (de ce fait exclure les façades 100 % vitrées)
- Les parties de vitrage à **hauteur d'œil** étant indispensables pour la vue mais d'un rendement lumineux moyen, ne pas les élargir au maximum (par exemple pour en faire une bande horizontale continue d'un pignon à l'autre).
- Les vitrages en imposte ayant le meilleur rendement, **monter jusqu'au plafond** le plus de surface vitrée possible.

[S4] Bien orienter les vitrages

- Les vitrages à l'**Est** et surtout à l'**Ouest** provoquent la plus forte consommation de rafraîchissement (devenue équivalente à celles du chauffage). En période estivale, le rayonnement solaire au levant et au couchant est quasiment perpendiculaire à façade, ce qui augmente les apports, et génère des problèmes d'éblouissement.
- Les vitrages **Sud** provoquent moins de consommation de rafraîchissement et ils soulagent celle de chauffage (bonne captation solaire hivernale).
- Les vitrages au **Nord** entraînent peu d'apports solaires, et de consommations de rafraîchissement complémentaires. Ils sont les seuls à pouvoir utiliser des dispositifs brise soleil et anti-éblouissement à plus faible coût, affaiblissant moins le rendement lumineux des vitrages.

Du seul point de vue des orientations, l'optimum énergétique est donc un bâtiment aux façades Est et Ouest aveugles ou très faiblement vitrées, et aux vitrages réservés essentiellement aux **façades Sud et Nord**.

La surface vitrée optimale doit être calculée orientation par orientation, en particulier lorsque des vitrages Est et Ouest s'imposent pour d'autres raisons.

[S5] Double ou triple vitrage au gaz rare

Les performances thermiques du bâtiment peuvent être améliorées par mise en place de vitrages performants de type double ou triple vitrage avec gaz rare (argon, krypton), associés à des menuiseries à rupture de pont thermique simple, voire double

[S6] Couverture ventilée en sous face afin de réduire les besoins de rafraîchissement

Les simulations thermiques dynamiques réalisées montrent que la mise en place d'une couverture ventilée en sous face permet de réduire très significativement les besoins de rafraîchissement d'un bâtiment. Cette option constructive peut être couplée avec la mise en place de panneaux solaires.

[S7] Ventilation triple flux naturelle

Dans le but de renouveler l'air et de rafraîchir de nuit un bâtiment dont les fenêtres ne s'ouvrent pas, il peut être envisagé de mettre en place une ventilation double flux avec échangeur de chaleur performant dédié à la période hivernale, complétée d'obturateurs répartis uniformément sur les parties opaques de façades. Les ouvertures automatiques des obturateurs de façade permettent ainsi de dissiper naturellement les calories générées par l'activité au sein du bâtiment pendant la mi-saison et les nuits d'été, sans faire fonctionner obligatoirement la ventilation double flux.

Lien : Moniteur du 2 avril 2009

[S8] Eclairage basse consommation, détecteurs de présence et gradation

Dans un bâtiment très optimisé du point de vue de l'isolation thermique et des consommations liées à la production de chaud et de froid, le poste éclairage devient prépondérant. Afin de réduire ce poste, il est nécessaire de mettre en place un système d'éclairage économe en énergie possédant une durée de vie et une fiabilité importantes. La réduction de la puissance d'éclairage installée et le pilotage de l'éclairage en fonction du niveau d'éclairement naturel permet de réduire considérablement les consommations de ce poste.

Les sources lumineuses de type incandescent ayant un faible rendement seront retirées progressivement de la vente d'ici 2012. Il est nécessaire de prévoir des sources lumineuses basse consommation (fluocompact, appoints LED,...) et présentant de bonnes caractéristiques de recyclage.

[S9] Serveurs informatiques déportés

Dans les bâtiments très isolés du point de vue thermique, le risque de surchauffe en été dû à l'apport de calories des unités informatiques liées à chaque poste de travail est réel. Il peut être intéressant de remplacer les unités informatiques de chaque poste de travail par un serveur déporté dans un local. Ce local doit être ventilé. Les calories dissipées par ce local peuvent éventuellement être réutilisées pour le chauffage du bâtiment ou la préparation d'eau chaude sanitaire.

Il faut tout de même faire attention à la concentration de charges informatiques dans un seul local. Celui-ci devant être rafraîchi, il peut appeler des besoins de rafraîchissement toute l'année et donc pénaliser le bilan total annuel des consommations, soit l'inverse de l'effet recherché (privilégier une très bonne ventilation de ce local). Tout cela est à voir au cas par cas en fonction de la localisation, des concentrations de charges internes,...

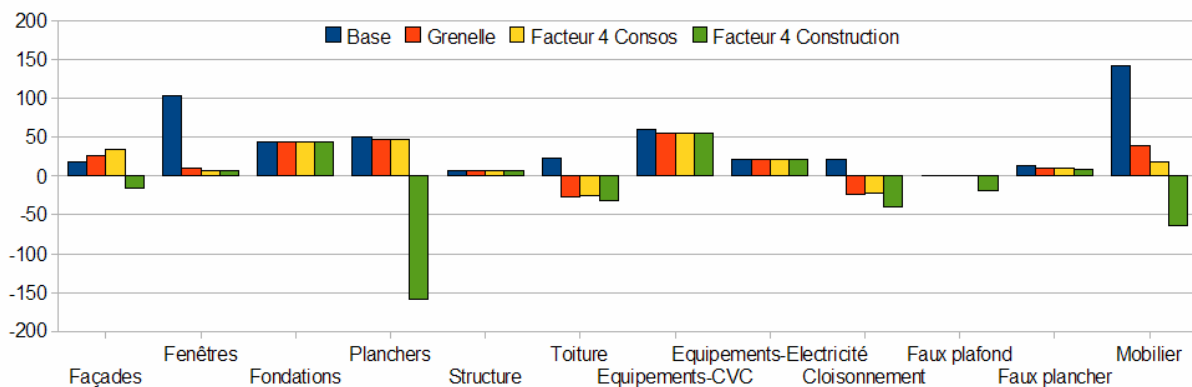
[S10] Ordinateur portable ou PC basse consommation

Afin de réduire l'apport de calories et la consommation électrique due aux PC traditionnels de bureau, il peut être envisagé de remplacer ces équipements par des ordinateurs portables ou des PC basse consommation, réduisant ainsi par un facteur 3, les consommations électriques directes des équipements, ainsi que l'énergie rayonnée dans les pièces. Cette réduction des puissances informatiques réduit de même les besoins éventuels de rafraîchissement des zones (l'informatique classique peut augmenter de 2 à 3°C la température d'un bureau en période estivale).

6.2 REDUIRE LES EMISSIONS DE GES

Les émissions de GES induites par les consommations seront réduites de fait par l'application des recommandations du paragraphe précédent. Reste à choisir des matériaux à faible impact environnemental aussi bien pour les éléments constructifs que pour l'aménagement, trop souvent négligé.

Comme on le voit dans les comparaisons des variantes de l'immeuble virtuel, il est possible d'avoir des effets significatifs sur plusieurs catégories de constituants comme les planchers et le mobilier.



Le bilan des émissions de GES est grandement influencé par le second œuvre et le mobilier.

Recommandations

[R9] Opter pour des menuiseries de type bois-aluminium afin de gagner en performance thermique et environnementale tout en conservant une grande longévité et un faible entretien. Ces menuiseries sont constituées d'une partie bois intérieure et d'une coque aluminium extérieure. La pose est réalisée par des équipes habituellement retenues sur ce type de chantier. Les performances thermiques sont meilleures que celles des menuiseries aluminium avec un prix au m² proche.

Lien : www.minco.fr

[R10] Eliminer faux plafond et/ou faux plancher. Outre l'élimination de cet aménagement, il est possible de réduire la hauteur entre deux étages et d'obtenir ainsi une réduction des émissions induites par les éléments constructifs. De plus, le plancher contribue ainsi à l'inertie thermique de l'immeuble. En l'absence de faux plafond, la correction acoustique est apportée par des systèmes de faux plafond suspendus décollés de la dalle, ne gênant pas ainsi les transferts thermiques. Par ailleurs l'absence de faux plafond facilite l'éventuel cloisonnement des plateaux. Dans le cas d'absence de faux plafond et de faux plancher, il est nécessaire de concevoir un système de distribution courant faible et informatique adapté (caniveaux, perches, intégration dans les dalles, intégration en noyau central périphérique, etc.)

[R11] Décloisonner massivement : avoir recours aux espaces ouverts afin de limiter l'impact des aménagements intérieurs qui représentent 43 à 49% du bilan carbone global pour les immeubles existants (valeurs provenant des évaluations des immeubles Saarinen et siège GA).

[R12] Choisir du mobilier sobre en carbone et durable dans le temps pour réduire la fréquence des renouvellements

Sélection de solutions

[S11] Murs pré coffrés : les murs en béton banché peuvent être remplacés par une solution de type Prémur. Cette solution constructive est constituée de deux parois minces en béton reliées par des fers. Les avantages sont les suivants :

- Léger au transport, à la manipulation et à la pose.
- Réduction des terrassements.

- Plus d'huile de coffrage sur chantier.
- Fiabilité des qualités de fabrication industrielle
- Rapidité et sécurité de pose.
- Surface lisse et prête à peindre ou laissée brut.
- Intégration possible d'isolant à l'intérieur du prémur.

Lien : www.fehr-technologies.com

[S12] Ductal : afin de réduire l'impact environnemental du bâtiment, il peut être envisagé d'utiliser du béton haute résistance avec fibres organiques qui permet de réduire les quantités de matières.

[S13] Élément de façade non porteur en béton de bois : les éléments béton de façades non porteurs habituels peuvent être remplacés par des éléments en béton de bois. Ces éléments sont préfabriqués en usine à base de béton de bois et possèdent les avantages suivants :

- Réduction de l'impact environnemental du bâtiment.
- $\lambda = 0.11 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.
- Fabrication en usine.
- Régulation des niveaux de vapeur d'eau.

Lien : <http://cap2020.be/files/3/Documents/News/08.10.23-5-Prechanvre.pdf>

[S14] Mur rideau à ossature bois. Les ossatures de murs rideaux peuvent être réalisées en bois afin de réduire l'impact environnemental du bâtiment.

Lien : <http://www.stabalux.fr>

[S15] Poteaux et poutres en bois à âme isolante: les structures béton métallique habituelles peuvent être remplacées par une structure porteuse bois. Poutres et poteaux sont constitués de deux pièces de bois reliées par une âme en fibre dure de 8 mm d'épaisseur. Ces éléments permettent de réduire l'impact environnemental du bâtiment tout en conservant une bonne gestion des ponts thermiques.

Lien : http://www.steico.com/download/pdf/products/data/steico_datenblatt_0192.pdf

[S16] Panneaux Sylvactis isolants. L'isolation thermique peut être réalisée à l'aide de panneau en fibre de bois. Ce matériau est composé à 92 % de fibres naturelles permettant de réduire l'impact environnemental du bâtiment.

Lien : www.actis-isolation.com

[S17] Utilisation de matériaux et de constituants "bio-sourcés" pour l'isolation et la construction. La réalisation de l'isolation des bâtiments à l'aide d'un matériau "bio-sourcés" permet de réduire l'impact environnemental du bâtiment et d'assurer un bon recyclage des matériaux. Ces matériaux isolants sont fabriqués à base de fibres animales ou végétales. Le choix du matériau est à effectuer en fonction des contraintes d'emploi.

[S18] Courant porteur : le courant peut être utilisé comme moyen de porter de l'information. Ceci induit une économie importante par rapport au câblage informatique et au niveau des prises. La réduction de ces quantités conduit à une amélioration de l'impact environnemental du bâtiment.

[S19] Faux-plancher sulfate de calcium : afin de réduire l'impact environnemental du bâtiment, il peut être envisagé de remplacer les habituels faux plancher en aggloméré de

bois et acier par des faux plancher en sulfate de calcium. Ces dalles de faux plancher sont fabriquées à partir de sulfate de calcium et de fibres de cellulose incorporées.
Lien : <http://fra.hyperlinesystems.com/catalog/floor/gips.shtml>

[S20] Ilots acoustiques plafond en laine de roche : la suppression complète des faux-plafond habituellement utilisés (dalle de laine minérale sur ossature métallique) doit être compensée du point de vue acoustique par la mise en place d'îlots plafond absorbant acoustique. Le gain en gaz à effet de serre est directement lié à la réduction de la surface de plafond traitée. Ces panneaux peuvent être de type panneau de laine de roche suspendus sous dalles structurelles par des câbles. Un calepinage est à effectuer avec les équipements techniques et les luminaires car ces derniers ne sont pas intégrables dans les panneaux. L'inconvénient est l'utilisation d'un matériau au bilan carbone défavorable et qui est responsable du largage des fibres.

Lien : www.armstrong.fr - Plafond Canopy

[S21] Ilots acoustiques plafond bois et toile acoustique : ces îlots acoustiques peuvent être réalisés à base d'une trame bois et d'un tissu absorbant acoustique. Les avantages sont multiples :

- Absence de fibres.
- Intégration possible de luminaires ou de techniques pour la ventilation.
- Amélioration de l'impact environnemental du bâtiment.

Lien : www.laudescher.com

[S22] Mobilier bois : remplacement du mobilier de bureau habituel composé d'acier et de mélaminé par du mobilier bois. La conception et la réalisation de ce mobilier en bois brut conduit à une importante réduction de l'impact environnemental du bâtiment. Ce mobilier pourra en outre être réalisé sur mesure par une entreprise de menuiserie, le marché n'offrant pas aujourd'hui de solution de ce type.

6.3 MAITRISER LA QUALITE DES AMBIANCES

Recommandations

[R13] Favoriser l'éclairage naturel sans toutefois sur-dimensionner les vitrages dont les plus performants restent de piètres isolants comparés aux parois opaques

[R14] Choisir et dimensionner correctement les éléments de mobilier et d'aménagement pour la maîtrise des niveaux sonores et des isolements inter-postes. Cet élément est essentiel car un décroissement n'est accepté par les occupants que si l'équilibre acoustique est atteint.

Sélection de solutions

[S23] La qualité de l'acoustique interne de plateaux de bureaux cloisonnés ou d'espaces ouverts passent par la réalisation d'une étude acoustique basée sur un maquettage informatique prenant en compte l'ensemble des parois du local et principalement les dispositions et hauteurs de mobilier. L'objet de l'étude est de viser à satisfaire les objectifs de limitation de niveau sonore ambiant et de perte d'intelligibilité entre postes de travail et ce afin d'obtenir l'équilibre acoustique qui conduit au confort des usagers

7. Guide à l'intention de la maîtrise d'ouvrage

Cette partie du document s'adresse aux maîtres d'ouvrages et à leurs assistants. Nous leurs proposons quelques clauses destinées à spécifier les performances des bureaux et à faciliter la comparaison des projets.

7.1 AUTORISER LES VARIANTES

L'avant projet de guide pour la prise en compte du coût global dans les marchés publics de maîtrise d'œuvre et de travaux⁶ préconise d'autoriser les variantes. C'est dans la logique même du raisonnement en coût global.

C'est aussi dans la logique du coût global partagé et nous préconisons également que les variantes soient expressément autorisées dans le règlement des consultations.

7.2 EXPRESSION DES OBJECTIFS

Les objectifs classiques en matière de coûts et de ratios de consommations énergétiques devront être complétés par des objectifs dans le domaine des émissions de GES.

Exemple :

Les émissions de GES induites par les constituants initiaux et leurs renouvellements pour une période de 40 années devront être inférieures à 100 Kg eq CO2 par m2 SHON.

Les émissions de GES devront être prises en compte pour la construction de l'enveloppe des bâtiments mais aussi pour l'ensemble des aménagements. Même si le programme ne porte pas sur le détail mobilier, il est nécessaire de coordonner les hypothèses d'aménagement mobilier avec les choix de constitutions et matériaux relatifs à l'ensemble des postes second œuvre et équipement technique de l'opération.

7.3 TAXE CARBONE⁷

Le programme demandera l'estimation de la taxe carbone qui serait exigible pour un tarif et une assiette donnés. Cette estimation de taxe carbone sera obligatoirement subdivisée en trois postes :

- Poste lié à la consommation annuelle du bâtiment.
- Poste lié à la construction de l'enveloppe du bâtiment.
- Poste lié au second œuvre et aménagement mobilier du bâtiment.

⁶ Version n°4 du 18 février 2009. Document de travail du sous groupe construction de l'atelier coût global de l'observatoire économique de l'achat public

⁷ Cette rédaction est antérieure à l'annonce en mars 2010 de l'abandon du projet de loi portant sur une contribution climat énergie, plus connue sous le nom de taxe carbone.