



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté en vue de l'obtention du titre :

INGENIEUR D'ETAT

Par

Mohammed TAYOR

Département : Génie des Procédés Industriels

Option : Génie Energétique

Sujet :

Simulation et Optimisation Thermique et Acoustique de Bâtiment Commercial pour Certification HQE

Jury :

Mme R. IDCHABANI	Directrice du projet	(ENSMR)
M. A. RACHEK	Co-directeur du projet	(ENSMR)
M. J. ALAOUI SOSSE	Parrain industriel	(NOVEC)
Mme N. QADIRI	Membre du jury	(ENSMR)

Année académique : 2016/2017

DEDICACE

A mes parents,

A la mémoire de mon oncle et ma tante,

A mon grand-père et ma grand-mère,

A toute la famille TAYOR,

A toute la famille REGGAB,

A mes très chers amis : Yassine et Khalid.

REMERCIEMENTS

Le stage que j'ai effectué au sein du département environnemental à NOVEC SA, a été pour moi une expérience forte intéressante, non seulement sur le côté technique mais également sur le côté relationnel.

Je tiens à signaler que ce travail n'a pu être achevé sans l'aide de plusieurs facteurs et du soutien de plusieurs personnes qui ont contribué pleinement à son élaboration.

Au terme de ce travail, j'adresse mon profond respect et mes vifs remerciements à mon parrain, **M. ALAOUI SOSSE**, pour le grand intérêt et confiance qu'il a porté à mon travail. Je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance pour son encadrement, les conseils qu'il m'a prodigué, le temps qu'il m'a accordé pour achever ce travail ainsi que son suivi tout au long de la période du stage.

Je remercie aussi, **Mme. IDCHABANI** et **M. RACHEK**, mes encadrants de l'Ecole, et qui m'ont été toujours disponible afin de m'aider et me donner les remarques les plus pertinentes. Ce projet de fin d'études n'aurait pu parvenir à sa réussite sans le précieux encadrement qui m'a été accordé.

Mes remerciements s'adressent également à **Mme. QADIRI** pour accepter d'être membre du jury et pour ses remarques constructives.

Finalement, je présente ma profonde gratitude, respect et remerciements à tous les gens qui ont contribué, de près ou de loin, dans la réalisation de ce travail.

RESUME

Ce projet de fin d'étude réalisé au sein du bureau d'étude NOVEC a pour objectif de simuler et d'optimiser sur le plan thermique et acoustique un bâtiment commercial à Casablanca. Ce bâtiment est composé de différentes zones, à savoir des espaces de stockage, de conditionnement et d'exposition. Le but final est de le certifier Haute Qualité Environnementale (HQE) cible énergie et cible confort acoustique.

Pour ce faire, le bâtiment a fait l'objet d'une simulation thermique dynamique pour évaluer les besoins énergétiques en chauffage et climatisation pour le cas de base, soit 55 MWh/an et 84 MWh/an respectivement.

Une optimisation énergétique de ce bâtiment en utilisant les algorithmes génétiques a conduit à réduire les besoins énergétiques de 31%, en plus d'un recours à l'énergie solaire qui les a réduits encore de 19% , les deux optimisations ayant respectivement les temps de retour sur investissement de 2,15 ans et 4,3 ans. Ceci a permis de rendre le bâtiment conforme aux exigences de la HQE.

On est passé ensuite au confort acoustique dont on a fait recours à la simulation pour étudier la réponse du bâtiment aux exigences de de la certification.

Finalement, on a développé un programme basé sur les réseaux de neurones artificiels pour la prédiction des besoins de chauffage et de climatisation de bâtiment type depuis des paramètres simples.

Mots clés : Simulation thermique dynamique, Simulation acoustique, Optimisation, Certification HQE, DesignBuilder, CYPE, Photovoltaïque, Emissions CO2

ABSTRACT

This end-of-study project carried out within the NOVEC aims at simulating and optimizing thermal and acoustic aspects of a commercial building in Casablanca. This building is composed of different areas, namely storage, conditioning and exhibition spaces. The ultimate goal is to certify it High Environmental Quality (HQE) energy target and acoustic comfort target.

To achieve this, the building was subjected to a dynamic thermal simulation to assess the heating and cooling energy requirements for the base case, ie 55 MWh / year and 84 MWh / year respectively.

An energy optimization of this building using genetic algorithms led to a 31% reduction in energy requirements and a 19% reduction in solar energy, with the two optimizations have respectively the return on investment of 2.15 years and 4.3 years. This allowed the building to comply with the requirements of the HQE.

We then moved on to the acoustic comfort by using simulation of the building to study the agreement of the building with respect to the requirements of the certification.

Finally, a program based on artificial neural networks has been developed for predicting the heating and cooling requirements of typical buildings from simple parameters.

Keywords: Dynamic thermal simulation, Acoustic simulation, Optimization, HQE certification, DesignBuilder, CYPE, Photovoltaic, CO2 emissions

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	2
REMERCIEMENTS	3
RESUME.....	4
ABSTRACT	5
TABLE DES MATIERES.....	6
LISTES DE FIGURES	9
LISTE DES TABLES	10
LISTE DES ABREVIATIONS	11
Introduction générale.....	1
Chapitre 1: Contexte général du projet.....	3
Introduction	4
1. Présentation de l'organisme d'accueil.....	4
1.1. Groupe Caisse de Dépôt et de Gestion	4
1.2. NOVEC	4
1.3. Présentation de la HQE	7
1.4. Gestion de l'énergie	9
1.5. Confort acoustique	11
2. Présentation du projet.....	14
3. Problématique.....	15
Conclusion.....	15
Chapitre 2 : Simulation énergétique du bâtiment	16
Introduction	17
1. Méthodologie.....	17
2. Généralités sur la simulation thermique dynamique (STD)	17
3. Préparation des données	18
3.1. Zone climatique.....	18
3.2. Coordonnées du site	18
3.3. Scénario d'occupation des locaux	18
3.4. Consignes de confort	19
3.5. Composition des parois de l'enveloppe du BDA	20
4. Calcul manuel.....	22
4.1. Hypothèses de base pour le calcul du bilan thermique.....	22

4.2.	Bilan thermique en été.....	23
4.3.	Bilan thermique en hiver	25
4.4.	Evaluation du bilan thermique de la zone de référence.....	26
5.	Résultats DesignBuilder	30
5.1.	Conception de chauffage	30
5.2.	Conception de la climatisation	31
5.3.	Résultats de la simulation.....	33
	Conclusion.....	37
	Chapitre 3 : Optimisation énergétique du bâtiment.....	38
	Introduction	39
1.	Méthodologie.....	39
2.	Optimisation	40
2.1.	Fonctionnement	40
2.2.	Paramètres d'optimisation	41
2.3.	Paramètres des algorithmes génétiques	42
2.4.	Simulation sur Cloud.....	43
2.5.	Résultats	43
3.	Energie solaire	45
3.1.	Calcul manuel.....	46
3.2.	Résultat de simulation	47
4.	Chambres froides.....	48
4.1.	Enveloppe.....	48
4.2.	Fluide frigorigène	48
5.	Evaluation des résultats obtenus selon les exigences du HQE.....	49
	Conclusion.....	50
	Chapitre 4 : Simulation acoustique du bâtiment.....	51
	Introduction	52
1.	Méthodologie.....	52
2.	Généralité sur l'acoustique architecturale	52
2.1.	Son.....	53
2.2.	Pression acoustique	53
2.3.	Niveau de la pression	53
2.4.	Niveau global de pression	53
2.5.	Bruit.....	54
2.6.	Transmission du bruit dans un local	54
2.7.	Fréquences propres d'un local parallélépipédique	55

2.8.	Phénomène d'absorption acoustique	56
2.9.	Air d'absorption	57
2.10.	Temps de réverbération acoustique Tr	57
2.11.	Isolation acoustique	59
3.	Simulation acoustique	62
3.1.	Présentation du logiciel	62
3.2.	Entrées du modèle	63
3.3.	Résultats de simulations	66
3.4.	Exemple de local : Salle produits maintenance au RDC	69
3.4.1.	Bruit aérien intérieur	69
3.4.2.	Bruit de choc	71
3.4.3.	Bruit aérien extérieur	73
3.4.4.	Temps de réverbération	74
4.	Discussion et commentaires	74
6.	Evaluation des résultats obtenus selon les exigences du HQE	75
	Conclusion.....	75
	Chapitre 5 : Modélisation énergétique de bâtiment par réseau de neurones artificiel.....	76
	Introduction	77
1.	Méthodologie.....	77
2.	Collecte de données.....	78
3.	Constitution du modèle empirique	80
3.1.	Normalisation des données.....	80
3.2.	Construction du réseau de neurones	80
3.3.	Entraînement à l'apprentissage.....	80
4.	Résultats et discussion.....	82
	Conclusion.....	83
	Conclusion générale	84
	BIBLIOGRAPHIE	85
	WEBOGRAPHIE.....	85
	Annexes.....	86

LISTES DE FIGURES

Figure 1: Organigramme de NOVEC.....	7
Figure 2: Evaluation de la cible 4 de la HQE.....	10
Figure 3: Evaluation de la cible 9 de la HQE.....	13
Figure 4: Bâtiment Les Domaines Agricoles	15
Figure 5: Zone de stockage	27
Figure 6: Confort durant le jour le plus chaud	32
Figure 7: Résultats annuelles de confort	33
Figure 8: Apports internes et solaire annuels	34
Figure 9: Distribution des besoins énergétiques de référence.....	35
Figure 10: Pourcentages des puissances de dimensionnement des chambres froides.....	37
Figure 11: Rapport énergie économisée et coût isolation des solutions trouvées.....	44
Figure 12: Comparaison des besoins énergétiques du BDA de référence et optimisé.....	45
Figure 13: Disposition des panneaux photovoltaïques sur la terrasse.....	46
Figure 14: Types de bruit	54
Figure 15: Modes de transmission du bruit entre	55
Figure 16: Phénomène de transmission des ondes acoustiques	56
Figure 17: Types d'absorption acoustique.....	56
Figure 18: Temps de réverbération	58
Figure 19: Temps de réverbération optimal par rapport au volume du local	59
Figure 20: Paramètres d'entrée et sortie de la simulation acoustique.....	63
Figure 21: Rez-de-chaussée BDA en 2D et 3D.....	64
Figure 22: Sous-sol BDA en 2D et 3D.....	65
Figure 23: Résumé de l'isolation au bruit aérien intérieur relative aux éléments verticaux de séparation des locaux du BDA	67
Figure 24: Résumé de l'isolation au bruit aérien intérieur relative aux éléments horizontaux de séparation des locaux du BDA	67
Figure 25: Résumé de l'isolation au bruit de choc des locaux du BDA	68
Figure 26: Résumé de l'isolation au bruit aérien extérieur des locaux du BDA.....	69
Figure 27: Bâtiment de base pour les simulations.....	78
Figure 28: Précision du RNA	81
Figure 29: Erreur du RNA.....	82

LISTE DES TABLES

Table 1: Les scénarios d'occupation du bâtiment	19
Table 2: Température de consigne de chaque zone.....	20
Table 3: Données de construction	21
Table 4: Caractéristiques du vitrage des dômes	22
Table 5: Les conditions de base extérieures et intérieures	22
Table 6: Données relatives au calcul des charges par transmission des parois.....	28
Table 7: Résultats du calcul manuel pour bilan thermique été	29
Table 8: Données relatives au calcul des déperditions par transmission des parois	29
Table 9: Résultats de calcul manuel des déperditions.....	30
Table 10: Résultats de dimensionnement de chauffage	30
Table 11: Energie totale de référence.....	35
Table 12: Consommations énergétiques de référence.....	35
Table 13: Puissances de dimensionnement des chambres froides en kW	36
Table 14: Propriétés des isolants utilisés.....	42
Table 15: Paramètres fixés des algorithmes génétiques.....	43
Table 16: Energie totale du BDA	44
Table 17: Consommations énergétiques du BDA optimisé	45
Table 18: Dimensions et nombres des groupements photovoltaïques	46
Table 19: Gain de l'énergie solaire	47
Table 20: Coefficients de transmission des chambres froides	48
Table 21: Points obtenus dans la cible 4 de la HQE	49
Table 22: Coefficient d'absorption des matériaux utilisés dans le BDA.....	66
Table 23: Élément séparatif.....	69
Table 24: Ouvertures verticales.....	70
Table 25: Éléments de flanc	70
Table 26: Isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs (zone tampon).....	70
Table 27: Isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs (Réserve boucherie) ...	71
Table 28: Isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs (Zone personnel)	71
Table 29: Élément excité par le bruit de choc	72
Table 30: Éléments de flanc	72
Table 31: Isolation acoustique au bruit de choc (Zone tampon)	72
Table 32: Isolation acoustique au bruit de choc (Réserve boucherie).....	73
Table 33: Couverture.....	73
Table 34: Éléments de flanc	73
Table 35: Isolation acoustique au bruit aérien dans les façades, les couvertures et les sols en contact avec l'air extérieur	74
Table 36: Résultats du temps de réverbération	74
Table 37: 10 premiers résultats de simulation.....	79
Table 38: Les variables et leurs désignations.....	79

LISTE DES ABREVIATIONS

AMEE : Agence Marocaine pour l'Efficacité Energétique (Ex. ADEREE)

BDA : Boutique « Les Domaines Agricoles »

CDG : Caisse de Dépôt et de Gestion

COP : Coefficient de performance

CVC : Climatisation, ventilation, chauffage

ECS : Eau chaude sanitaire

IGWP : Indice de potentiel de réchauffement global

LR : Laine de roche

LV : Laine de verre

NRA : Nouvelle Réglementation Acoustique

QEB : la Qualité Environnementale du Bâtiment

RDC : Rez-de-chaussée

RTCM : Règlement Thermique de Construction au Maroc

SMO : Système de Management de l'Opération

STD : Simulation thermique dynamique

Tr : Temps de réverbération

Introduction générale

Le secteur du bâtiment est considéré parmi les secteurs énergivores, environ 36% de la consommation énergétique totale du Maroc dont 29% pour le résidentiel et 7% pour le tertiaire. La climatisation, représente une part non négligeable de cette consommation, essentiellement en été. En effet, le pic électrique se produit au cours des mois les plus chauds (Juillet-Aout). La réduction de la consommation de l'énergie dans le bâtiment est ainsi devenue une priorité dans la stratégie énergétique nationale et un programme a été dédié à cela avec pour objectif la mise en place d'un code d'efficacité énergétique du bâtiment.

Dans ce cadre, NOVEC, bureau d'étude et filiale de la CDG développement est chargé de réaliser une étude d'un bâtiment commercial relevant du domaine agricole, à savoir la boutique Les Domaines Agricoles. L'objectif de cette étude est de certifier ce bâtiment HQE notamment par rapport aux cibles énergie (cible 4) et confort acoustique (cible 9).

L'objectif principal de la démarche Haute Qualité Environnementale est de consommer le moins possible d'énergie, et assurer aux occupants une atmosphère intérieure saine (bonne hygrométrie, absence de polluants) et un bon confort acoustique.

Pour ce faire, le présent projet se basera sur des simulations thermiques dynamiques et acoustiques du bâtiment, suivi de propositions de solutions techniques adéquates.

L'objectif est de réduire la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre, rendre le bâtiment confortable sur le plan acoustique et par conséquent le rendre conforme aux exigences de la HQE.

C'est ainsi que ce travail trace les phases du déroulement du projet. Le présent rapport se compose de 5 chapitres :

- Le premier chapitre présente le bureau d'étude NOVEC filiale du Groupe Caisse de Dépôt et de Gestion (CDG) en tant qu'organisme d'accueil, ainsi que le contexte général du projet.
- Le second chapitre est consacré pour l'étude des besoins énergétiques du BDA de référence à l'aide d'une simulation thermique dynamique.

- Le troisième chapitre traite la réduction de la consommation énergétique par l'optimisation de l'enveloppe et l'orientation du bâtiment de référence, en plus du recours aux énergies renouvelables. Il englobe aussi la certification HQE du bâtiment pour la cible d'énergie.
- Le quatrième chapitre est consacré à la cible du confort acoustique dont on fait recours à la simulation acoustique pour répondre aux exigences de la certification.
- Le dernier chapitre rapporte le développement d'un programme de prédiction des besoins en chauffage et climatisation d'un modèle de bâtiment type basé sur les réseaux de neurones et l'analyse paramétrique de simulation sur Cloud.

Chapitre 1: Contexte général du projet

Introduction

Ce chapitre englobe une présentation de l'organisme d'accueil ainsi qu'une description du projet de « la boutique « Les Domaine Agricole » » (BDA) objet de la présente étude.

1. Présentation de l'organisme d'accueil

1.1. Groupe Caisse de Dépôt et de Gestion

CDG est une institution financière, créée sous forme d'établissement public en 1959. Elle a pour rôle central de recevoir, conserver et gérer des ressources d'épargne qui, de par leur nature ou leur origine, requièrent une protection spéciale.

La CDG centralise l'équivalent de 35% du stock de l'épargne institutionnelle et totalise près de 100 milliards de dirhams en actifs sous gestion. Elle est le principal investisseur en valeurs du Trésor avec 50% environ des actifs gérés.

A travers ses interventions, la Caisse de Dépôt et de Gestion s'est transformée au fil du temps en un Groupe de premier plan, acteur majeur de l'économie nationale.

1.2. NOVEC

• Description

NOVEC est le fruit de la fusion entre les sociétés Ingéma et Scet-Scom, dont CDG Développement est l'actionnaire de référence. Elle regroupe désormais les activités des deux bureaux d'étude, dont il convient de rappeler les plus importantes :

- Scet-Scom (fondée en 1958) : Bâtiment, Aménagements urbains, Agriculture, développement rural, Alimentation en eau et Assainissement.
- Ingéma (fondée en 1973) : Grandes infrastructures (Barrages, Autoroutes, Ouvrages d'art, Ports, Tunnels), Ressources en eau, Energie et Environnement. NOVEC emploie plus de 600 collaborateurs, intervient dans des domaines d'activité variés et dispose de nombreuses implantations régionales. Ainsi, dont le siège social est à Rabat, et présente également à l'échelle régionale à travers ses agences. Elle opère également à l'international, où elle est appelée à devenir l'un des bureaux de référence, notamment en Afrique et au Moyen-Orient.

A travers sa création, CDG Développement ambitionne de doter le pays d'une ingénierie d'excellence, offrant des services de haut niveau dans les métiers en rapport avec le développement territorial durable, tant à l'intérieur du Royaume qu'à l'international.

Novec est un bureau d'ingénieurs pluridisciplinaire intervenant dans des domaines d'activité variés aussi bien au niveau national qu'à l'international où il est appelé à jouer un rôle majeur au Maghreb et au Moyen Orient.

Fort de l'expertise des deux bureaux précités, NOVEC est désormais un acteur de premier ordre dans le domaine de l'ingénierie, employant près de 600 collaborateurs dont près de 200 ingénieurs, intervenant dans des domaines d'activité variés.

- Effectif : 600 personnes
- Capital social : 50 000 000 DH
- Chiffre d'affaires : 317 MDH
- Nombre de références : plus de 3000 projets réalisés au Maroc et à l'international

Les domaines d'activités:

Fort de 50 années d'expérience dans la réalisations de projets divers et complexes et des compétences les plus pointues, NOVEC est un bureau d'ingénierie et de conseil pluridisciplinaire couvrant divers secteurs d'activité, il assure l'ensemble des processus des métiers de l'ingénierie, depuis les études de faisabilité jusqu'à l'assistance à la réalisation et à l'exploitation, à savoir:

- **Les études générales** : plans et schémas directeurs, études stratégiques, évaluations environnementales...
- **Les prestations de maîtrise d'œuvre** : études de conception et de réalisation des ouvrages, suivis et contrôle des travaux...
- **Les prestations d'assistance à maîtrise d'ouvrage** : montage et définition des projets, organisation et gestion des projets et assistance technique.

• Ordonnancement, pilotage et coordination

Simulation et optimisation thermique et acoustique d'un bâtiment commercial pour certification HQE

- **Audit et conseil** : audit environnemental, audit et évaluation techniques...
- **Formation et accompagnement**: diagnostic participatif, accompagnement des projets d'infrastructures ...

NOVEC est présente dans le domaine de l'environnement depuis plus de 20 ans. Ses équipes de spécialistes travaillent en étroite collaboration avec les administrations, les entreprises et la communauté afin de concilier le développement économique et les préoccupations environnementales. NOVEC ne néglige aucun effort pour harmoniser les projets touristiques, énergétiques, industriels ou d'infrastructures avec le milieu environnemental. Le Département Environnement compte 19 collaborateurs (dont 16 Ingénieurs et Scientifiques), travaillant à titre permanent au siège de NOVEC, et possédant une formation de haut niveau en gestion des ressources naturelles et protection de l'environnement.

Les membres de cette équipe travaillent répartis sur deux activités principales : études environnementales, études d'assainissement solide et développement durable.

• Organigramme



Figure 1: Organigramme de NOVEC

1.3. Présentation de la HQE

La Haute Qualité Environnementale se définit comme étant une démarche de management de projet visant à obtenir la qualité environnementale d'une opération de construction ou de réhabilitation.

L'obtention des performances environnementales de l'ouvrage est autant une question de management environnemental qu'une question architecturale et technique. Une des méthodes les plus fiables pour y parvenir est de s'appuyer sur une organisation efficace et rigoureuse du projet. C'est pourquoi le référentiel technique de certification comporte deux éléments structurants :

- le Système de Management de l'Opération (SMO)
- la Qualité Environnementale du Bâtiment (QEB)

La mise en œuvre d'un Système de Management d'Opération permet de définir la Qualité Environnementale visée pour le bâtiment et d'organiser l'opération pour l'atteindre, tout en maîtrisant l'ensemble des processus opérationnels liés à la programmation, la conception et la réalisation de l'ouvrage.

La Qualité Environnementale du Bâtiment se structure, quant à elle, en 14 cibles (ensembles de préoccupations), qu'on peut regrouper en 4 familles :

- **Site et construction**

Cible n°01 : Relation du bâtiment avec son environnement immédiat

Cible n°02 : Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction

Cible n°03 : Chantier à faible impact environnemental

- **Gestion**

Cible n°04 : Gestion de l'énergie

Cible n°05 : Gestion de l'eau

Cible n°06 : Gestion des déchets d'activités

Cible n°07 : Maintenance – Pérennité des performances environnementales

- **Confort**

Cible n°08 : Confort hygrothermique

Cible n°09 : Confort acoustique

Cible n°10 : Confort visuel

Cible n°11 : Confort olfactif

- **Santé**

Cible n°12 : Qualité sanitaire des espaces

Cible n°13 : Qualité sanitaire de l'air

Cible n°14 : Qualité sanitaire de l'eau

- Dans cette étude on s'intéresse aux cibles 4 de l'énergie et la cible 9 du confort acoustique.

1.4.Gestion de l'énergie

Dans cette cible de QEB on considère la consommation d'énergie durant la phase d'exploitation. Le contenu énergétique des matériaux et produits (l'énergie nécessaire à leur fabrication, etc...) relève de la cible de QEB n°02 : Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction.

L'utilisation de l'énergie tout au long du cycle de vie du bâtiment, et particulièrement lors de la phase d'exploitation, pose schématiquement deux grands types de problèmes environnementaux :

- L'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables ;
- La pollution atmosphérique et le changement climatique, ainsi que la production de déchets radioactifs.

Les choix architecturaux de départ conditionnent fortement les consommations d'énergie pour le chauffage des locaux en hiver et pour leur rafraîchissement en été. La recherche d'un bon compromis entre hiver et été est nécessaire.

En conséquence, cette cible se structure en trois ensembles de préoccupations :

- Choix architecturaux visant à optimiser les consommations d'énergie
- Réduction de la consommation d'énergie primaire et recours aux énergies renouvelables
- Maîtrise des pollutions

CIBLE 04	SOUS-CIBLES								
	4.1			4.2			4.3		
	B	P	TP	B	P	TP	B	P	TP
BASE									
PERFORMANT									
TRES PERFORMANT									

Figure 2: Evaluation de la cible 4 de la HQE

Avec :

B : Base

P : Performant

TP : Très performant

• Interactions avec les autres cibles

• Cible 01 "Relation du bâtiment avec son environnement immédiat"

Utilisation du solaire passif, faisabilité du recours à des énergies renouvelables locales

• Cible 02 "Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction"

Performances énergétiques des produits ;

• Cible 07 "Maintenance – Pérennité des performances environnementales"

Les dispositions prises en matière de gestion de l'énergie conditionnent le niveau de complexité des équipements à mettre en œuvre pour assurer le suivi de cette gestion et la pérennité des performances ;

• Cible 08 "Confort hygrothermique"

Répercussions des choix faits pour assurer le confort des usagers sur les consommations énergétiques

• Cible 10 "Confort visuel"

Répercussions des choix faits pour assurer le confort des usagers sur les consommations énergétiques ;

• Cible 11 "Confort olfactif"

Répercussions énergétiques de l'efficacité de la ventilation pour assurer le confort olfactif;

• Cible 13 "Qualité sanitaire de l'air"

Répercussions énergétiques de l'efficacité de la ventilation pour assurer la qualité d'air intérieur.

• Interactions avec les SMO

- Etude de faisabilité sur le recours à des énergies renouvelables.
- Justification du respect de la RT2000 (pour les bâtiments ou parties de bâtiments soumis à la RT2000).

1.5. Confort acoustique

La notion de "confort acoustique", comme celle de "qualité d'ambiance sonore" d'un lieu, peut être appréhendée en ayant recours à deux dimensions ou facettes complémentaires. A savoir, la qualité et quantité d'énergie émise par les sources, et la qualité et quantité des événements sonores du point de vue de l'auditeur ; Point de vue qui dépend non seulement de l'histoire individuelle mais également des valeurs propres au groupe social auquel on appartient.

Cette qualité, et le confort qu'elle procure, peuvent avoir une influence sur la qualité du travail, du sommeil, et sur les relations entre les usagers du bâtiment. Quand la qualité de l'ambiance se détériore et que le confort se dégrade, les effets observés peuvent se révéler rapidement très négatifs, comme la baisse de productivité, des conflits de voisinage, voire même des problèmes de santé.

Les attentes des usagers concernant le confort acoustique consistent généralement à vouloir concilier deux besoins :

- d'une part, ne pas être dérangés ou perturbés dans leurs activités quotidiennes par des bruits aériens (provenant d'autres locaux voisins), des bruits de chocs ou d'équipements (provenant des différentes parties du bâtiment) et par les bruits de l'espace extérieur (transports, passants, chantier, etc.);
- mais, d'autre part, garder le contact auditif avec l'environnement intérieur (logement, salle de classe, bureau) et extérieur en percevant les signaux qui leur sont utiles ou qu'ils jugent intéressants.

Pour obtenir les conditions techniques les plus favorables, il convient d'assurer :

- l'isolation acoustique des locaux ;
- l'affaiblissement des bruits de chocs et d'équipements ;
- le zonage acoustique pour certains locaux pour répondre à la variété des activités des usagers pour lesquels les locaux ont été conçus ;
- l'adaptation de l'acoustique interne des locaux et la réduction des bruits gênants produits à l'intérieur même du local.

Le confort acoustique dépend également des conditions locales, de l'aménagement de la parcelle et des caractéristiques du bâtiment lui-même.

Dans un projet de bâtiment, les préoccupations de confort acoustique doivent se traiter à différents niveaux et se structurent ainsi :

- les dispositions architecturales spatiales, incluant l'organisation du plan-masse, responsabilisant les intervenants dans les premières phases de la conception ;
- l'isolation acoustique du bâtiment par rapport aux bruits de l'espace extérieur ;
- l'isolation acoustique des locaux vis-à-vis des bruits intérieurs (aériens, de chocs, d'équipements, et d'origine vibratoire) ;
- l'acoustique interne des locaux en fonction de leur destination ;
- la création d'une ambiance acoustique extérieure satisfaisante : ce point est traité dans la Cible n°01 « Relation du bâtiment avec son environnement immédiat », § 1.2.2. « Créer une ambiance acoustique extérieure satisfaisante » ;
- la protection des riverains contre les bruits engendrés par le bâtiment (activités et équipements techniques): ce point est traité dans la Cible n°01 « Relation du bâtiment avec son environnement immédiat », § 1.3.5. « Assurer le droit au calme aux riverains ».

Ainsi la structure de la cible n°09 se décompose selon les deux préoccupations majeures suivantes:

- Optimisation des dispositions architecturales pour protéger les usagers du bâtiment des nuisances acoustiques
- Création d'une qualité d'ambiance acoustique adaptée aux activités accueillies dans les différents locaux

Dans la suite du texte, la typologie des locaux utilisée est la suivante :

- Local très sensible : à vocation de repos ;
- Local sensible : salle de classe, internat, CDI, bureau, salle de musique, de conférence, de réunion, de restauration ;
- Local bruyant : local technique, atelier, zone de circulation commune, équipements (VMC, évacuation d'eaux, etc.), salle de sports, etc.

CIBLE 09	SOUS-CIBLES					
	9.1			9.2		
	B	P	TP	B	P	TP
BASE						
PERFORMANT		+			+	
TRES PERFORMANT			+			

Figure 3: Evaluation de la cible 9 de la HQE

• Interactions avec les autres cibles

• Cible 01 "Relation du bâtiment avec son environnement immédiat"

Ambiance acoustique extérieure pour les usagers de la parcelle – Droit au calme pour les riverains

• Cible 02 "Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction"

Performances acoustiques des produits

• Cible 03 "Chantier à faibles nuisances"

Bruit de chantier sur les riverains et le personnel

• Cible 08 "Confort hygrothermique"

Bruit des équipements assurant le confort en hiver et/ou en été

• Cible 13 "Qualité sanitaire de l'air"

Bruit des équipements de ventilation

• Interactions avec les SMO

- L'analyse du site, faite en amont, fournit entre autres des données sur les sources de bruit présentes dans l'environnement immédiat (classement des infrastructures de transport par exemple).
- Bureaux paysagers et plateaux non aménagés : des précautions sont à prendre par celui qui aménagera les lieux.

2. Présentation du projet

Les Domaines Agricoles interviennent dans de nombreuses filières de production agricole : les agrumes, le maraîchage, l'arboriculture fruitière, l'élevage, la transformation laitière, les plantes aromatiques, les cultures annuelles, l'apiculture et l'aquaculture.

La nouvelle boutique de Casablanca a pour objectif la commercialisation des 9 filières précédentes.

Le bâtiment s'étend sur une superficie totale de 375 m² et comprend :

- Un sous-sol avec un plafond technique de 1 mètre d'épaisseur, et où réside 8 chambres froides à température positive.
- Un rez-de-chaussée (RDC) avec un espace de présentation et circulation de clients d'une surface de 222 m².
- Un parking pour les clients
- Deux dômes totalement fenêtrés.



Figure 4: Bâtiment Les Domaines Agricoles

3. Problématique

Il s'agit d'un bâtiment encore en phase d'étude. L'objectif du présent PFE est de le préparer pour sa certification HQE notamment la cible d'énergie et confort acoustique. Pour ce faire, le modèle de base sera étudié puis on proposera toute sorte d'optimisation capable de faciliter cette certification. Et vu la complexité de tous les paramètres qui entrent en jeu, rendant une analyse analytique difficile, on fera recours à la simulation numérique afin de répondre à ces exigences au niveau de l'économie d'énergie mais aussi du confort acoustique des gens.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré essentiellement à la présentation de l'environnement dans lequel a été effectué le projet de fin d'études à savoir le bureau d'étude NOVEC département environnement. Ce chapitre met aussi de l'accent sur la présentation du contexte du projet et ses objectifs, à savoir la certification HQE. Pour y arriver, la première phase consiste à réaliser les simulations énergétiques du BDA. C'est l'objectif du chapitre suivant.

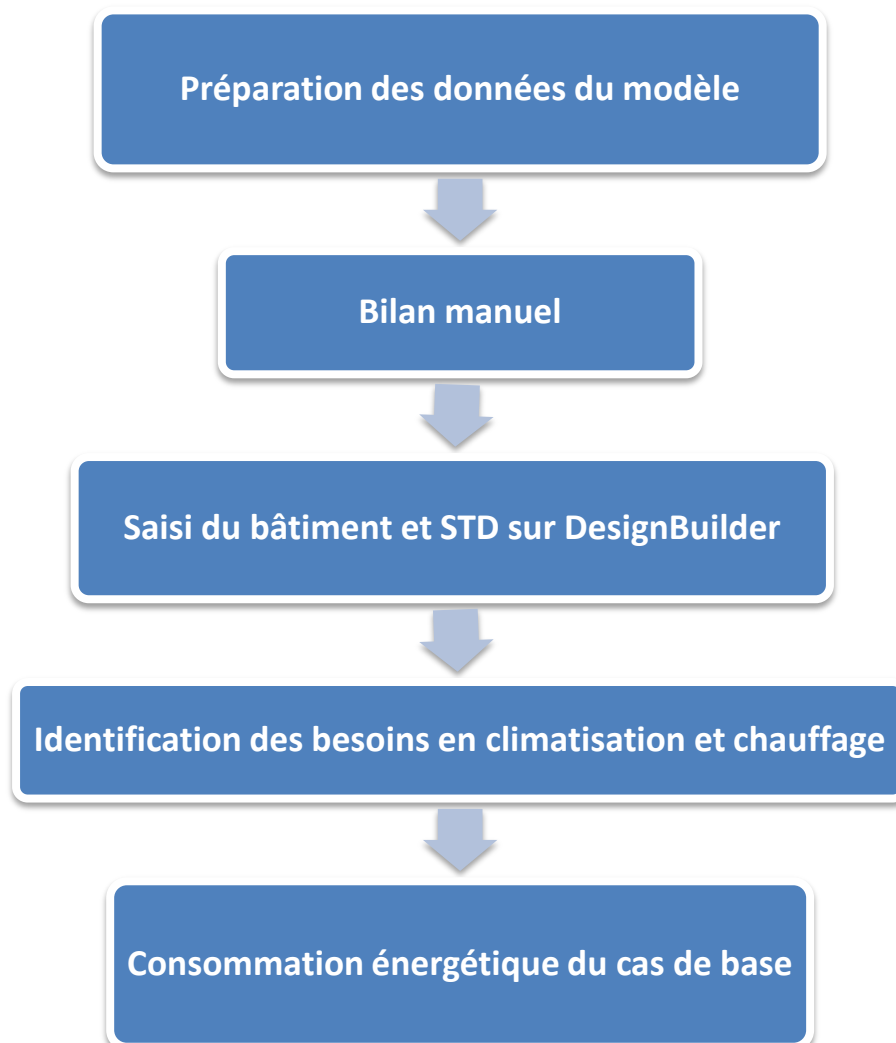
Chapitre 2 : Simulation énergétique du bâtiment

Introduction

Dans ce chapitre il serait question de modéliser le bâtiment de base à l'aide du logiciel DesignBuilder en saisissant tous les plans architecturaux et les données énergétiques relatives au site.

1. Méthodologie

Le schéma ci-après présente la démarche suivie pour atteindre les objectifs de cette partie.



2. Généralités sur la simulation thermique dynamique (STD)

Voir annexe F.

3. Préparation des données

3.1. Zone climatique

Le Maroc est localisé entre les régions sèches du Sahara occidental et les régions atlantiques et méditerranéennes. Les zones sèches sont marquées par des faibles variations saisonnières avec des chutes de pluie non-fréquentes. Tandis que, les régions méditerranéennes et atlantiques sont caractérisées par un hiver humide et un été sec et chaud. Casablanca possède un climat méditerranéen très doux influencé fortement par les courants froids de l'océan Atlantique qui réduisent les variations saisonnières de la température. Elle possède une moyenne de 74 jours de précipitation significative avec un total de 427 millimètres par année. La plus grande et la plus petite valeur de température détectées dans la ville sont respectivement 30 °C et 6,3 °C. DesignBuilder utilise les données climatiques ASHRAE dans son calcul numérique selon la définition de la zone climatique.

3.2. Coordonnées du site

Le site où sera construit le bâtiment est identifié par la longitude 33,55° et la latitude -7,66°.

3.3. Scénario d'occupation des locaux

Les scénarios d'occupation du bâtiment sont un élément de base pour la STD. Le tableau suivant regroupe les caractéristiques d'utilisation du bâtiment :

Nom de la zone	9H00 à 22H00	
	Lundi au vendredi	Weekend
Réserve produits laitiers	1	1
Réserve fruits et légumes	1	1
Zone stockage	6	6
Bureau magasin	3	3
Réserve produits sec	1	1
Chambres froides positives	1	1
Bureau responsable	3	3
Zone matériel	3	3
Réserve poisson	1	1
Zone présentation	50	70
Boucherie	1	1
Zone personnel	15	15
Zone préparation	1	1
Totaux	87	107

Table 1: Les scénarios d'occupation du bâtiment

Les scénarios d'occupation proposés représentent un niveau d'occupation maximal.

3.4. Consignes de confort

La température de confort retenue dans ce projet est de :

	Consigne
T_{AIR}-PERSON	Zone personnelle (26°C été et 20°C Hiver)
T_{AIR}-SEC	Réserves produits secs (15°C)
T_{AIR}-LAIT	Réserves produit laitiers (entre 2 et 6°C)
T_{AIR}-RESFRUIT	Réserves Fruits et légumes (entre 6 et 10 °C)
T_{AIR}-RESPOISS	Réserves poissonneries (entre 0 et 4°C)
T_{AIR}-BOUCHERIE	Réserves boucherie et saucisse rie (entre 0 et 4°C)
T_{AIR}-POISS	Salle de préparation et de découpe (entre 8 et 10°C)
T_{AIR}-PRESEN	Zone de vente (entre 20 et 26°C)
T_{AIR}-CHPOSI	Chambre froide (entre 0 et 3°C)
T_{AIR}-BUREAU1	Bureau Magasinier (26°C été et 20°C Hiver)
T_{AIR}-BUREAU2	Bureau responsable (26°C été et 20°C Hiver)
T_{AIR}-STOCKAGE	Zone de Stockage (26°C été et 20°C Hiver)

Table 2: Température de consigne de chaque zone

- Généralement toutes les autres zones ont une température de consigne entre 20 °C et 26 °C.

3.5.Composition des parois de l'enveloppe du BDA

La composition des parois ainsi que leurs caractéristiques physiques, sont regroupés dans le tableau ci-dessous. Les données de murs extérieurs, internes, le plancher et la toiture sont les mêmes utilisées dans le cadre de la RTCM et du BDA de référence.

Paroi	Composition	Épaisseur (cm)	Coefficient de transfert thermique U (W/m².K)	Conductivité thermique λ	Densité ρ (kg/m³)	Chaleur spécifique C (J/kg.K)
Externe	Enduit extérieur	1	115,00	1,150	1700	1000,8
	Brique à 6 trous	7	1,817	0,184	1853	759,6
	Lame d'air	10	6,25	0,625	1	1224
	Brique à 6 trous	7	1,817	0,184	1853	759,6
	Enduit intérieur	1	115,00	1,150	1700	1000,8
Interne	Enduit intérieur	1	115,00	1,150	1700	759,6
	Brique à 6 trous	7	1,817	0,184	1853	1224
	Enduit intérieur	1	115,00	1,150	1700	759,6
Plancher	Béton lourd	20	17,50	1,750	2300	921,6
	Carrelage	2	5,503	1,705	2300	698,4
Toiture	Béton lourd	5	17,50	1,750	2300	921,6
	Hourdis de 6 en béton	20	1,727	0,539	1903	813,6
	Carrelage	2	5,503	1,705	2300	698,4
Chambres Froides	Couche intérieur (Polyuréthane)	6	0,42	0,0270	45,00	1000

Table 3: Données de construction

Pour les 8 chambres froides, une couche interne de Polyuréthane de 6 cm est ajoutée.

Le tableau suivant donne les données d'entrée globales de la simulation en termes de vitrage des dômes.

Caractéristiques globales	Type de vitrage	Coefficient U_w (W/m ² .K)	Facteur solaire S_w	Épaisseur (mm)	Châssis
	Simple	5,8	0,8	6	Aluminium

Table 4: Caractéristiques du vitrage des dômes

Un **COP** de **3,4** est utilisé pour tous les systèmes de chauffage et un **COP** de **3** pour les systèmes de climatisation y compris pour les entrepôts frigorifiques à température dirigée positive. Ces deux COP sont plus grands que ceux conseillés par la RTCM et on peut considérer pour une autre étude deux autres COP qui sont moins inférieurs.

4. Calcul manuel

4.1. Hypothèses de base pour le calcul du bilan thermique

• Conditions de base

Les conditions de base comportent essentiellement les températures intérieures et extérieures du bâtiment.

Les tableaux ci-dessous synthétisent les données relatives à ces conditions :

	Température extérieure (en °C)		Température de consigne (en °C)
	Température sèche	Température humide	
Eté	30	25,3	26
Hiver	6,3	5,7	20

Table 5: Les conditions de base extérieures et intérieures

• Méthode de calcul du bilan thermique

Le calcul du bilan thermique permet de déterminer la puissance de l'installation qui pourrait répondre aux exigences de confort.

Ce calcul se fait manuellement par des méthodes comme AIRWELL, CARRIER... Dans la pratique, il existe des logiciels de calcul comme BLOAK LOAD, CLIMAWIN, HAP, ADVANCED LOAD...

Dans ce projet, nous avons utilisé la méthode de CARRIER pour le calcul manuel du bilan thermique d'une zone et le logiciel DesignBuilder pour le calcul du bilan thermique total du bâtiment.

Le calcul manuel (réf. manuel de Carrier) est effectué en estimant les différentes charges réelles, c'est à dire au moment où les apports calorifiques atteignent leur maximum dans le local. On distinguera :

- **Les apports externes** : ce sont les apports de chaleur sensible dus à l'ensoleillement et à la conduction à travers les parois extérieures et les toits.
- **Les apports internes** : ce sont les dégagements de chaleur sensibles et / ou latents ayant leurs sources à l'intérieur du local (occupants, éclairage et autres équipements).

En été, le bilan thermique doit être établi pour les applications destinées au confort humain, les équipements à installer devront combattre les apports calculés. **En hiver**, le matériel à installer devra compenser les pertes thermiques afin de garantir les conditions internes ciblées.

4.2. Bilan thermique en été

• Apports externes

✓ Apport par transmission

C'est l'ensemble des apports transmis à travers les parois (mur, plafond, plancher). Ils sont calculés par la formule suivante :

$$\phi = \sum_i K_i \cdot S_i \cdot \Delta T_{éqi} \quad (2.1)$$

Avec :

- ϕ : la puissance transmise au local en W ;
- K_i : coefficient d'échange global en W/ m². °C ;

$-\Delta T_{\text{eq}}$: Différence équivalente de température ($^{\circ}\text{C}$) dépend de l'orientation de la paroi, la latitude du site et le mois le quel le bilan est fait;

- S_i : surface d'échange en m^2 .

✓ Apport par renouvellement d'air

Le renouvellement d'air dans un local climatisé est nécessaire pour maintenir les conditions de confort hygiénique.

Il se fait en règle générale par la ventilation (naturelle ou mécanique) des locaux ainsi que par infiltration, introduisant de l'air extérieur dans le local climatisé. Il est source d'apport de chaleur sensible et latent dans le local à conditionner.

- Gains sensibles par renouvellement d'air :

$$q_s = 0.34 \times q_{AN} \times (T_{AN} - T_L) \quad (2.2)$$

- Gains latentes par renouvellement d'air :

$$q_L = 0.84 \times q_{AN} \times (r_{AN} - r_L) \quad (2.3)$$

Avec :

- q_s : chaleur sensible en W ;
- q_{AN} : débit d'air neuf recommandé en m^3/h ;
- T_{AN} : température d'air neuf ;
- T_L : température du local ;
- r_{AN} : teneur en humidité de l'air neuf en (Kgeau/Kgas) ;
- r_L : teneur en humidité de l'air du local en (Kgeau/Kgas).

• Apports internes

✓ Apports par les occupants

Le corps humain dégage deux formes de chaleur : chaleur latente et chaleur sensible.

Cette chaleur se calcule comme suite :

$$\phi_V = C. N_{oc}. (\phi_S + \phi_L) \quad (2.4)$$

Avec :

- C : Coefficient correctif (réf. Manuel de Carrier)
- N_{oc} : Nombre d'occupant ;
- ϕ_S : Chaleur sensible dégagée par personne en (W/personne);
- ϕ_L : Chaleur latente dégagée par personne (W/personne).

✓ Apports par l'éclairage

Les appareils d'éclairage transforment une partie de l'énergie consommée à une énergie sensible par l'effet de joule. Cette énergie se calcule par la formule suivante :

$$\phi_E = 1.25 \times W \times S \quad (2.5)$$

Avec :

- 1.25 : coefficient de ballast pour les luminaires fluorescents ;
- W : ratio d'éclairage donné en (W/m²) ;
- S : surface du local en m².

✓ Apports par les appareils électriques

Ces machines représentent une source de chaleur, qui est fonction de la puissance électrique absorbée. Certaines machines peuvent agir comme sources d'humidité. Si ces apports sont très importants, on a intérêt à prévoir une extraction mécanique qui permet une diminution importante des apports dans le local. Dans notre cas, un apport de 200 W a été adopté pour les équipements du bureau (Réf. Manuel de Carrier).

4.3. Bilan thermique en hiver

Pour assurer une température adéquate en hiver, on est amené à fournir une quantité de chaleur pour compenser les déperditions à travers les parois (murs, plafonds, planchers, portes....) et à travers le renouvellement d'air.

• Déperdition par les parois, toiture et les locaux non climatisés

Les déperditions par transmission sont calculées par :

$$DPR_T = \sum (K.S + k.L). \Delta T \quad (2.6)$$

Avec :

- DPR_T : déperdition en (W) ;
- ΔT : différence de température entre les deux côtés de la paroi ;
- S : surface en m^2 ;
- L : longueur intérieure des ponts thermiques linéiques à l'intérieur du local ;
- k : coefficient de transmission linéique de la paroi ($W/m^2.K$) ;
- K : coefficient de transmission thermique de la paroi ($W/m^2.K$).

Dans le cas pratique, on néglige $\sum k.L$ devant $\sum K.S$

• Déperdition par renouvellement d'air

Les déperditions par renouvellement d'air sont calculées par :

$$DPR_V = 0.34. (Q_V + Q_S). (\theta_i - \theta_e) \quad (2.7)$$

Avec :

- DPR_V : Les déperditions par renouvellement d'air en W ;
- 0.34 : C'est coefficient d'apport volumique en $Wh/m^3. ^\circ C$;
- Q_V : Le débit volumique de renouvellement d'air en m^3/h ;
- Q_S : Le débit volumique supplémentaire entrant par les ouvertures en m^3/h ;
- θ_i : la température de l'air entrant en $^\circ C$;
- θ_e : la température de l'air sortant en $^\circ C$.

4.4. Evaluation du bilan thermique de la zone de référence

En utilisant les relations citées auparavant, nous avons calculé le bilan thermique d'un local. Ces résultats seront comparés ultérieurement par ceux obtenus par le logiciel DesignBuilder.

Le local que nous avons choisi comme référence est le local de stockage d'une surface de 57,95 m² et d'un volume de 190,77 m³. La figure ci-dessous représente le dessin en perspective de la zone par rapport au RDC:

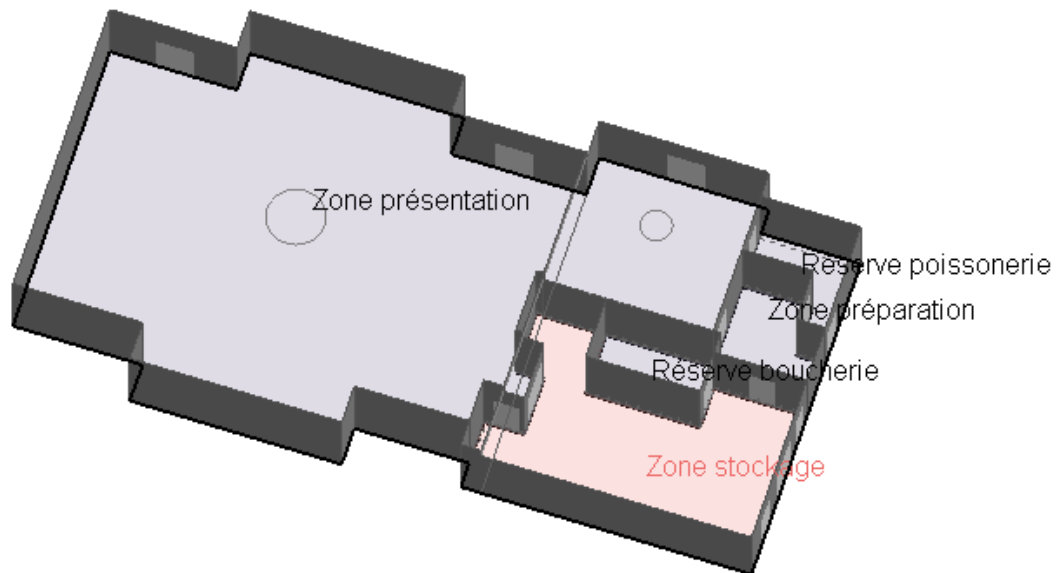


Figure 5: Zone de stockage

• Bilan thermique en été

Les données de calcul sont représentées comme suit :

- **Données relatives au calcul des charges par transmission :**

	Surface en m ²	température extérieure en °C	Différence de température équivalente en °C	Coefficient d'échange globale en W/m ² .°C
Plancher	63,76	26	0	0,13
Cloisons	57,71	26	0	1,76
Murs	67,64	30	4	1,81
Cloisons	29,44	4	-22	1,76
Toitures	63,75	30	4	1,81
Portes	5,5	26	0	2,82
Portes	9,46	30	4	2,82
Porte	2,2	9	-17	2,82
Porte	2,07	4	-22	2,82

Table 6: Données relatives au calcul des charges par transmission des parois

- **Dans ce local il n'y a pas de vitrage.**
 - **Données relatives au calcul des charges par ventilation :**
 - Débit d'air neuf recommandé : $q_{AN} = 231,56 \text{ m}^3/\text{h}$ (Ref. DesignBuilder)
 - Température d'air neuf : $T_{AN} = 30 \text{ °C}$;
 - Température d'air intérieur: $T_{int} = 26 \text{ °C}$;
 - Humidité absolue d'air neuf $w_{AN} = 0.0077 \text{ Kgeau/Kgas}$;
 - Humidité absolue d'air intérieur $w_{int} = 0.0089 \text{ Kgeau/Kgas}$.
 - **Occupation :** local de 6 personnes avec : $Q_s = 100 \text{ W}$ et $Q_L = 70 \text{ W}$ (Réf. Manuel de Carrier).
 - **Eclairage :** de type référence 400 lux non ventilé avec un ratio de : $W = 20 \text{ W/m}^2$.

Ainsi on obtient les résultats suivants :

	Apports sensibles en W	Apports latentes en W
Transmission	-316	-
Ventilation	315	-0,23
Eclairage	1159	-
Occupant	643	450
Totale	1801	449,77

Table 7: Résultats du calcul manuel pour bilan thermique été

- ✓ On a donc besoin d'un système de climatisation d'une puissance de 2251 W pour climatiser notre local.

• Bilan thermique en hiver

Le calcul du bilan thermique en hiver revient à déterminer les déperditions par transmission et par renouvellement d'air.

Le tableau suivant résume les données nécessaires pour le calcul par transmission :

	Surface en m ²	température extérieure en °C	Différence de température équivalente en °C	Coefficient d'échange globale en W/m ² .°C
Plancher	63,76	20	0	0,13
Cloisons	57,71	20	0	1,76
Murs	67,64	6,3	-13,7	1,81
Cloisons	29,44	4	-16	1,76
Toitures	63,75	6,3	-13,7	1,81
Portes	5,5	20	0	2,82
Portes	9,46	6,3	-13,7	2,82
Porte	2,2	9	-11	2,82
Porte	2,07	4	-16	2,82

Table 8: Données relatives au calcul des déperditions par transmission des parois

La température extérieure est de 6,3 °C et la température intérieure est 20 °C, débit de renouvellement d'air est 231,56 m³/h et on néglige le débit d'infiltration en proposant l'utilisation de rideaux d'air par exemple.

Ainsi les résultats de calcul de déperditions sont comme suite :

Déperditions par transmission en W	Déperditions par renouvellement d'air en W
4614	1079

Table 9: Résultats de calcul manuel des déperditions

- ✓ On a donc besoin d'un système de chauffage d'une puissance de 5693 W pour chauffer notre local.

Dans la partie précédente, on s'est intéressé à l'établissement des relations théoriques qui régissent en général le comportement thermique d'un bâtiment, afin de maîtriser les différents entrées de la STD et puis préparer les différentes données y afférentes. Ces relations ont été appliquées à une partie objet de l'étude. Dans ce qui suit, une STD sera réalisée à cette même partie et puis généralisée à l'ensemble du bâtiment.

5. Résultats DesignBuilder

On prend le même local de stockage au RDC.

5.1. Conception de chauffage

Le tableau et graphes ci-après présentent les résultats obtenus à l'aide de DesignBuilder pour la conception du chauffage pour le jour le plus froid de l'année.

Température d'air (°C)	22,33
Température radiante (°C)	17,67
Température opérative (°C)	20
Température sèche air extérieur (°C)	6,3
Murs (kW)	-1,07
Planchers (int) (kW)	0,17
Cloisons (int) (kW)	-0,27
Toits (kW)	-1,7
Infiltration extérieure (kW)	-0,75
Vent. externe (kW)	-1,25
Chaleur sensible zone (kW)	4,87

Table 10: Résultats de dimensionnement de chauffage

➤ Commentaires

- ✓ Les apports par transmissions représentent la plus grande partie des apports tels que le confirme le bilan déjà établi.
- ✓ Le dimensionnement de la puissance de chauffage par le logiciel donne une valeur de **6,09 kW** tandis qu'avec le calcul manuel on a obtenu une puissance totale de **5,69 kW** soit un écart de 6 %.

5.2. Conception de la climatisation

Les calculs de conception de climatisation servent à déterminer la puissance de l'équipement de climatisation mécanique correspondant aux conditions météo de conception d'été les plus chaudes, susceptibles de se produire au niveau de la localisation du site.

Ces calculs de conception sont effectués à l'aide de DesignBuilder, qui utilise la méthode ASHRAE.

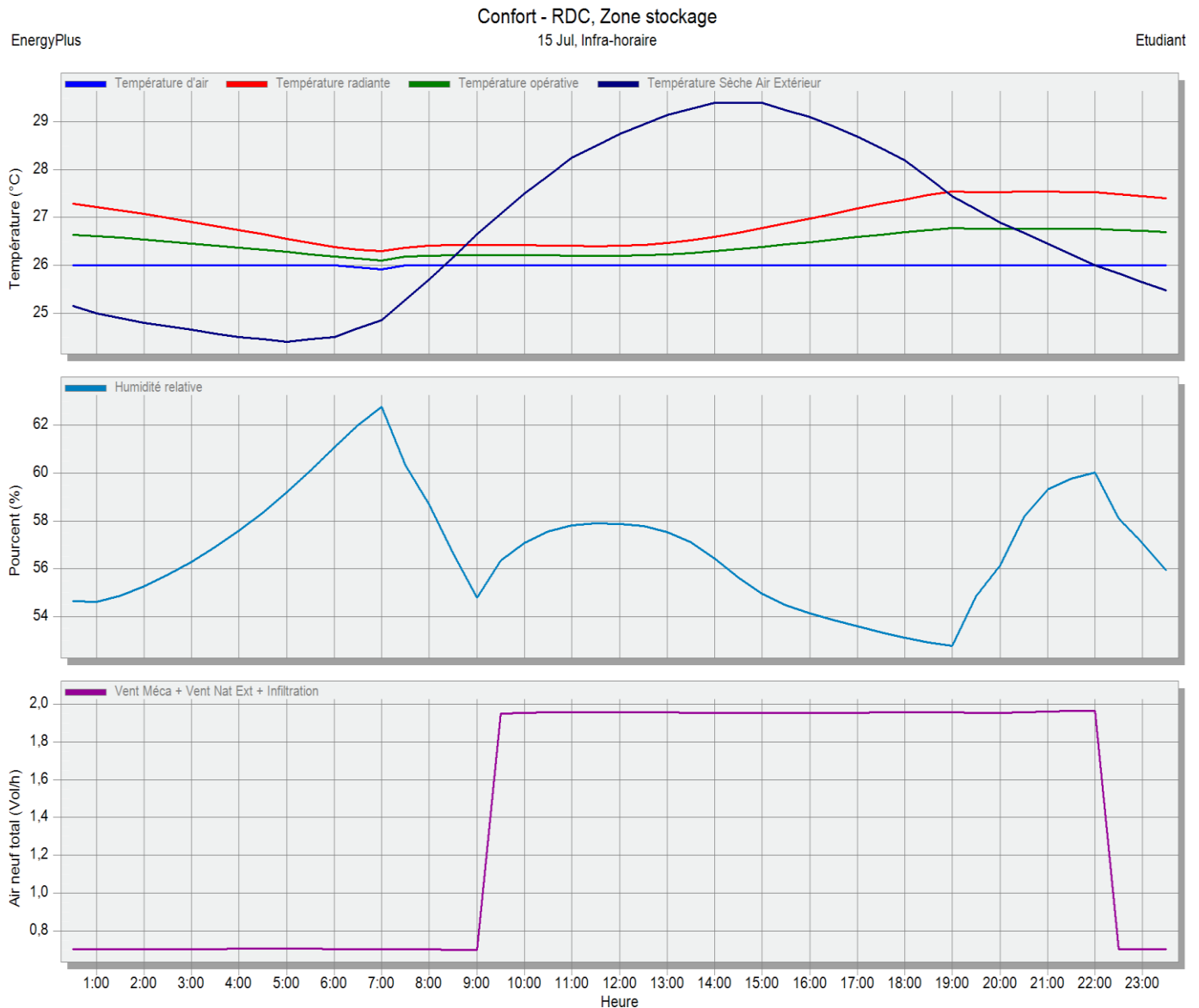


Figure 6: Confort durant le jour le plus chaud

➤ Commentaire

- ✓ Pour le dimensionnement de la puissance de climatisation DesignBuilder donne **2,98 kW** et le bilan donne une valeur de **2,25 kW** ce qui présente un écart relatif de 24 % de la valeur calculée par rapport à la valeur simulée, vu que le logiciel fait un calcul plus poussé qu'un bilan manuel rapide. On constate sur le dernier graphe de l'air neuf du local qu'il atteint le niveau demandé durant le profil d'occupation choisi entre 9h-22h.

5.3. Résultats de la simulation

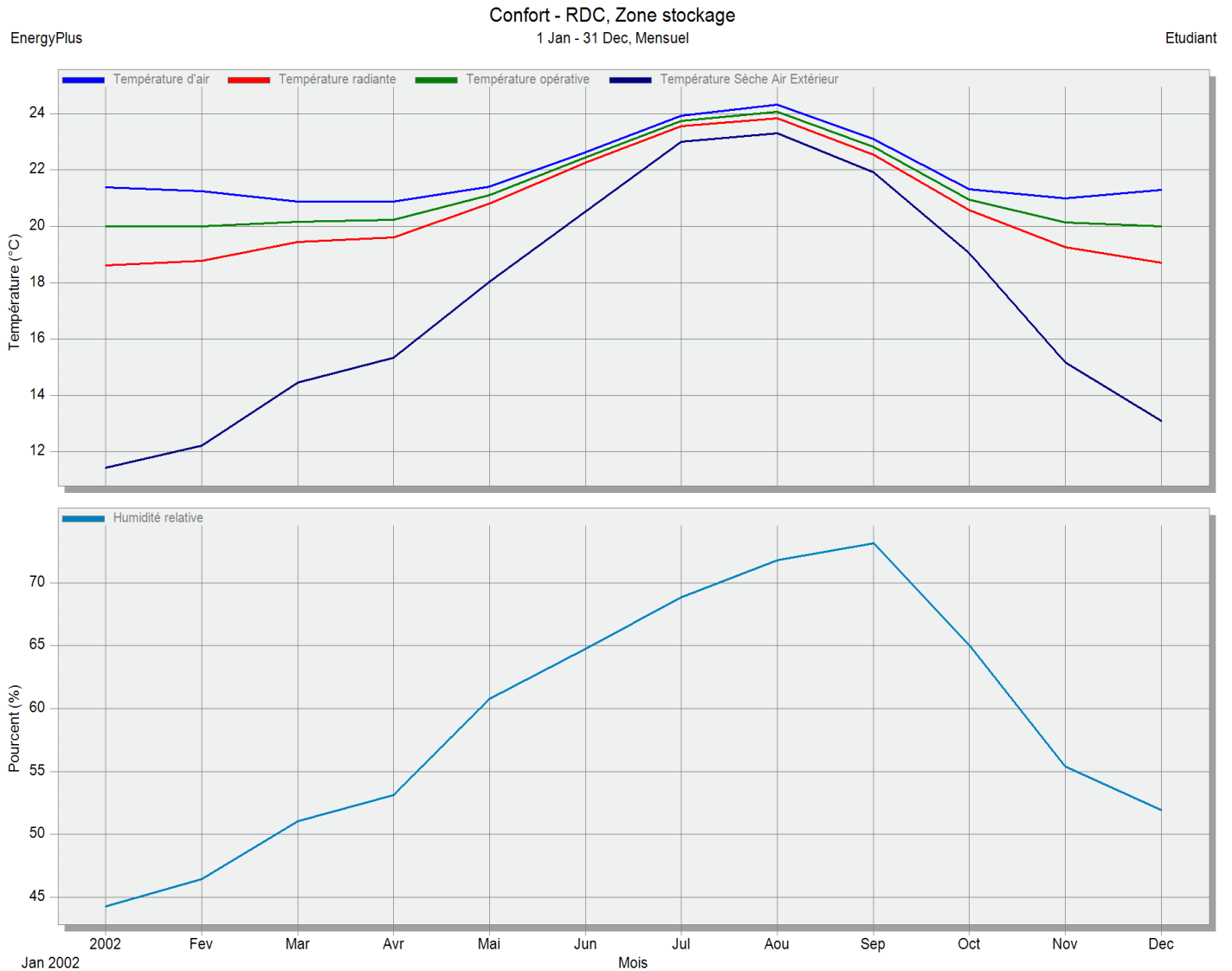


Figure 7: Résultats annuelles de confort

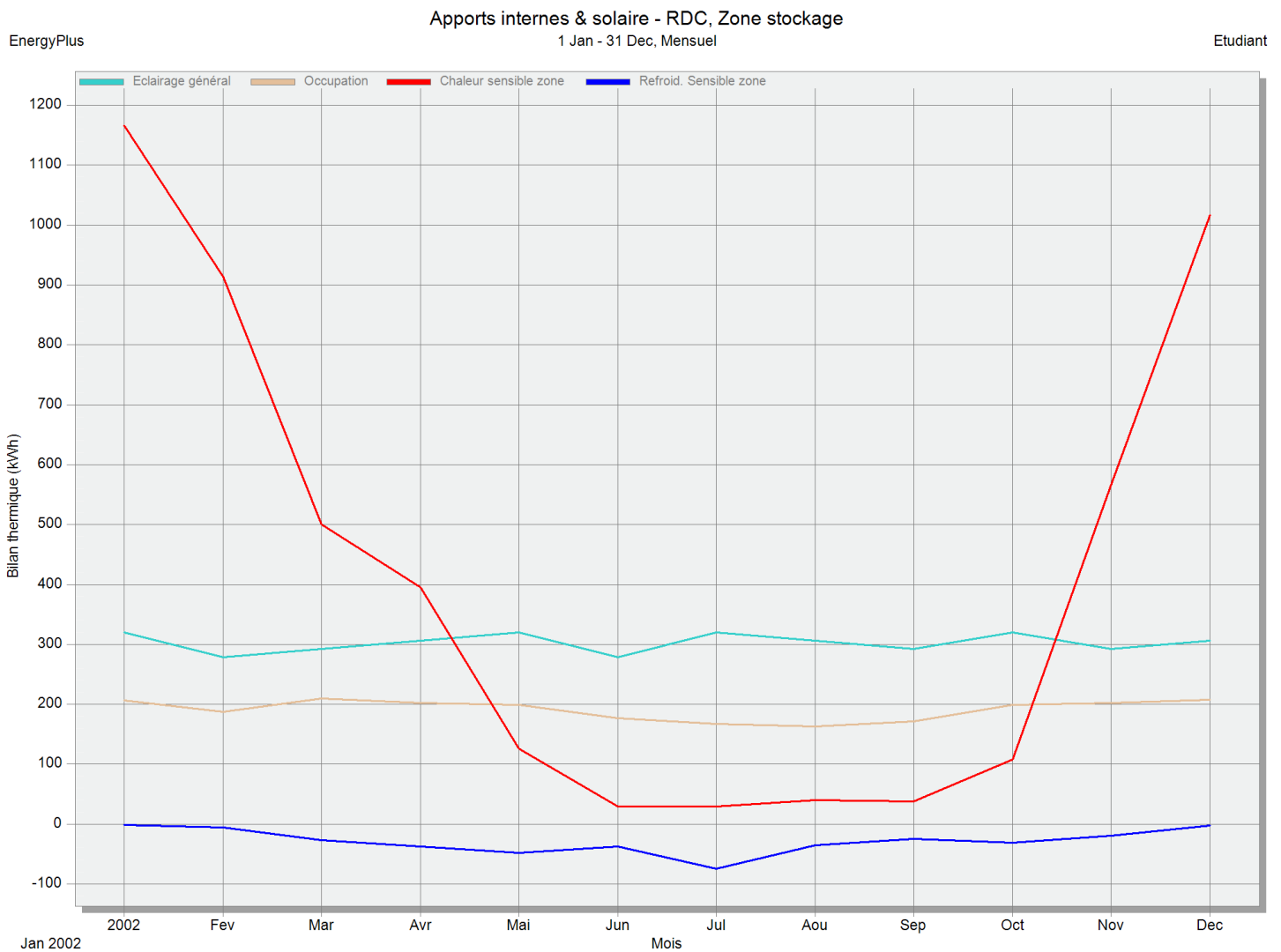


Figure 8: Apports internes et solaire annuels

➤ Commentaires

- ✓ Les apports par le refroidissement sensible sur la zone de l'air introduit par le système CVC est le plus important.
- ✓ Les apports internes dus aux occupants et l'éclairage viennent en seconde place. Ainsi ils permettent de diminuer les besoins en chauffage.
- ✓ Il n'y a pas d'apport solaire vu qu'il n'y a pas de vitrage dans le local avec l'extérieur.

➤ Généralisation de la STD à l'ensemble du bâtiment

Il convient de rappeler que le bâtiment BDA comportent plusieurs zones réparties selon leur caractéristiques notamment la température de consigne exigée, les scénarios d'occupation ou encore l'emplacement dans le bâtiment.

L'analyse du bâtiment a conduit à sa répartition en 18 zones. Les résultats de simulation du bâtiment de base en termes de besoins énergétiques sont récapitulés sur les tableaux ci-dessous :

	Energie totale [kWh]	Energie par surface [kWh/m2]
Energie du site totale	189365	247

Table 11: Energie totale de référence

Energie	Besoin (kWh)
Chauffage	55099,21
Climatisation	84546,08
Eclairage	47943,49
Equipement	1359,4
ECS	417,58
Total	189365

Table 12: Consommations énergétiques de référence

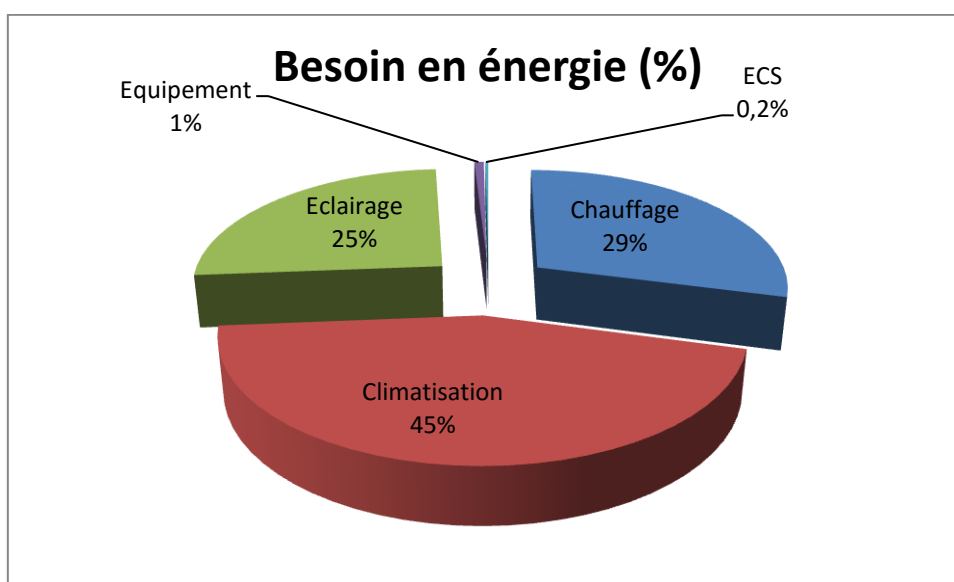


Figure 9: Distribution des besoins énergétiques de référence

➤ Commentaire

✓ On remarque que l'utilisation la plus grande de l'énergie électrique du site est dans la climatisation, avec le besoin en ECS est la partie la plus petite de l'exploitation de l'énergie reçue.

Le tableau et graphe suivants montrent la répartition des puissances respectives des chambres froides et leur pourcentage de la puissance totale de climatisation du BDA.

	Puissance de dimensionnement (kW)
Zone préparation	2,13
Réserve poissonnerie	1,81
Réserve boucherie	3,03
Chambre positive 1	2,48
Chambre positive 2	2,2
Réserve produits laitiers	4,36
Réserve fruits et légumes	2,54
Réserve produits secs	1,27
Autres zones	20,29

Table 13: Puissances de dimensionnement des chambres froides en kW

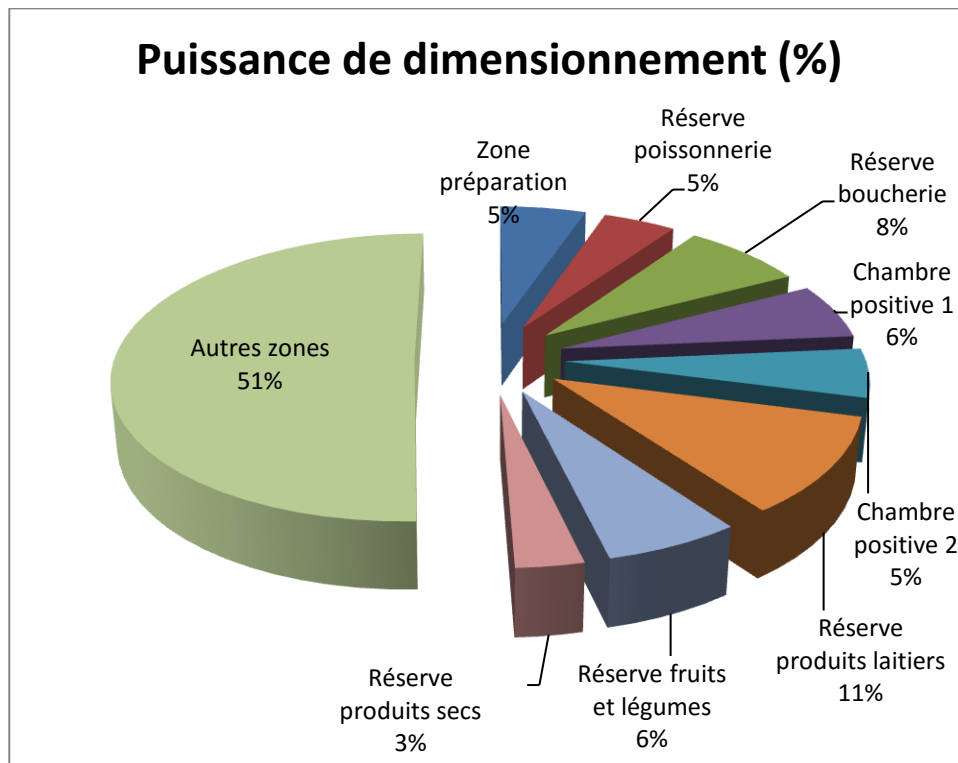


Figure 10: Pourcentages des puissances de dimensionnement des chambres froides

➤ Commentaires

La distribution de puissance entre les chambres froides et la climatisation totale du BDA explique le résultat trouvé avant sur le besoin important de climatisation par rapport au chauffage du fait qu'on a 8 chambres froides positives dont l'énergie vient de cette partie de climatisation.

Conclusion

Dans ce chapitre on a pu faire un bilan manuel d'une zone local avec un écart de 6% pour le chauffage et 24% pour la climatisation par rapport au logiciel DesignBuilder. Le besoin énergétique total annuel du BDA de référence était de 189MWh. Ensuite on a présenté la répartition des utilisations de la consommation énergétique et la partie des chambres froides positives qui consomme la moitié de la puissance de climatisation. Dans le chapitre suivant, on va faire recours à l'optimisation pour proposer un bâtiment moins énergivore et le plus économique possible.

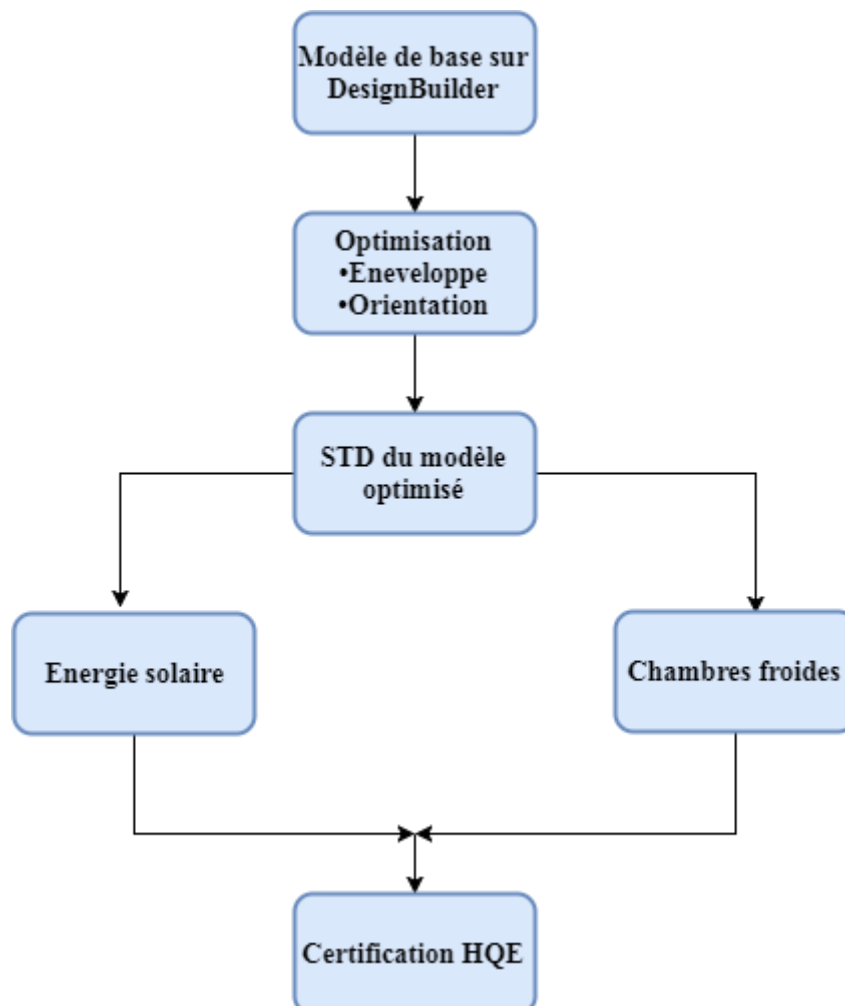
Chapitre 3 : Optimisation énergétique du bâtiment

Introduction

Comme le montre l'étude précédente notre projet est énergivore, alors l'objectif de ce chapitre est de proposer un modèle optimisé sur le plan énergétique capable d'être certifié HQE. Pour cela on s'intéressera à plusieurs paramètres, à savoir : l'orientation, l'enveloppe, les chambres froides et l'énergie solaire.

1. Méthodologie

Afin de répondre aux exigences de la certification HQE nous avons opté pour suivre la démarche suivante dans le traitement de ce chapitre :



2. Optimisation

L'optimisation est une technique de recherche et d'identification des options de conception qui répondent le mieux aux objectifs clés de performance. L'optimisation est semblable en plusieurs façons à l'analyse paramétrique, une technique plus connue pour analyser comment les performances de conception varient selon les changements dans la configuration du bâtiment grâce à l'utilisation de courbes de conception. Une analyse paramétrique consisterait généralement à adapter 1, 2 ou 3 variables de conception de façon systématique pour illustrer les tendances et trouver des modèles présentant les caractéristiques les plus favorables (par exemple, faible consommation d'énergie, meilleur confort, etc.). Avec l'analyse paramétrique, un maximum de 3 variables est normalement utilisé car :

- Les résultats de plus de 3 dimensions à un problème de conception sont difficiles à visualiser.
- Le grand nombre de simulations requises avec 4 ou plus de variables de conception prendrait trop de temps pour être achevée.

Dans l'optimisation de DesignBuilder, les algorithmes génétiques (AG) sont utilisés pour rechercher des solutions de conception optimales, beaucoup plus efficacement par rapport à une analyse paramétrique quand plus de variables sont impliquées.

2.1.Fonctionnement

DesignBuilder utilise un algorithme génétique (GA) basé sur la méthode NSGA-II, qui est largement utilisé comme une méthode «rapide et élitiste multi-objectif» fournissant un bon échange entre un ensemble de solutions bien réparties. Il fonctionne comme suit:

1. Premièrement, la population est initialisée au hasard.
2. Les chromosomes (variantes de conception) sont triés et mis en façades selon les ensembles non dominés de Pareto. Dans un front de Pareto, les chromosomes sont classés en fonction des distances euclidiennes entre les solutions ou I-dist (terme utilisé dans NSGA-II). En règle générale, les solutions qui sont loin et non encombrées bénéficient d'une préférence plus élevée dans le processus de sélection afin de créer un ensemble de solutions diverses et d'éviter le surpeuplement.

3. Les meilleurs modèles sont choisis parmi la population actuelle et placés dans un ensemble d'accouplement.
4. Dans l'ensemble d'accouplement, la sélection de la mutation, le croisement et l'accouplement sont effectués.
5. L'ensemble d'accouplement et la population actuelle sont combinés. L'ensemble résultant est trié et les meilleurs chromosomes sont transmis à la nouvelle population.
6. On passe à l'étape 2, à moins qu'un nombre maximum de générations n'ait été atteint.
7. L'ensemble de solutions est l'ensemble le plus classé de Pareto non dominé de toutes les populations.

2.2. Paramètres d'optimisation

• Objectifs

On choisit deux fonctions objectifs pour notre optimisation, à savoir : la minimisation de l'énergie totale du site et la minimisation du coût d'investissement, ainsi cela va nous permettre de trouver des épaisseurs d'isolation les plus économiques et les plus efficaces sur le côté énergétique.

• Contraintes

Ils permettent de définir des limites sur la performance du bâtiment. Dans notre cas on n'utilise aucune contrainte.

• Variables

Ces variables permettent de définir les éléments de la conception du bâtiment qui peuvent être modifiés ainsi que les valeurs autorisées dont la variable peut prendre pendant l'analyse. Voici les différentes variables qui sont entrées dans notre analyse :

✓ Orientation

Pour balayer les orientations possibles du site encore en phase de conception on a opté pour les orientations 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 265° , 310° et 355° .

✓ Isolation du mur extérieur, plancher et toiture

Deux matériaux d'isolation sont utilisés, à savoir, la laine de roche (rock wool-unbonded) et la laine de verre (glass fibre/wool –fibre quilt), avec des épaisseurs de 2cm, 4cm et 6cm pour chacun.

✓ Isolation des chambres froides

L'isolation des chambres froides est réalisée à travers une couche de Polystyrène expansé à l'intérieur sur les parois des murs et du plafond. Les épaisseurs choisies sont : 8cm, 10cm et 12 cm.

Le tableau suivant montre les propriétés physiques et les coûts volumiques des 3 matériaux d'isolation utilisés dans cette étude :

	Conductivité (W/m-k)	Densité massique (kg/m3)	Chaleur spécifique (J/kg-k)	MAD/m3
Laine de verre	0,04	12	840	417,312
Laine de roche	0,047	92	840	490,3416
Polystyrène expansé	0,056	8,5	1450	1008,504

Table 14: Propriétés des isolants utilisés

2.3.Paramètres des algorithmes génétiques

On choisit après plusieurs expériences manuelles de fixer le hyper paramètres des algorithmes génétiques comme le montre le tableau suivant :

	Valeur
Générations maximales	5
Taille population initiale	10
Taille population maximale	20
Taille du tournoi	2
Taux de mélange	1
Probabilité de mutation individuelle	0,4

Table 15: Paramètres fixés des algorithmes génétiques

Des généralités sur la méthode sont données en **Annexe E**.

2.4.Simulation sur Cloud

Les simulations ont été faites sur la plateforme Cloud Amazon AWS vu qu'il s'agit d'activités exigeantes de beaucoup de ressources de calcul. Un serveur C4 High-CPU Eight Extra Large, qui se caractérise par 60 GB en RAM et 36 processeurs (vCPUs) fonctionnant sous Windows. L'optimisation complète a pris à peu près 2 heures, pour un coût total de calcul de 6,18\$.

2.5.Résultats

Après la 5ème génération on a pu avoir notre meilleure solution. En réalisant une STD d'un modèle de base et le comparant aux résultats obtenus on a pu extraire le coût de l'isolation seule et le gain énergétique correspondant à cette isolation. Le graphe suivant montre la distribution des solutions trouvées durant les 73 itérations totales suivant ces 2 critères.

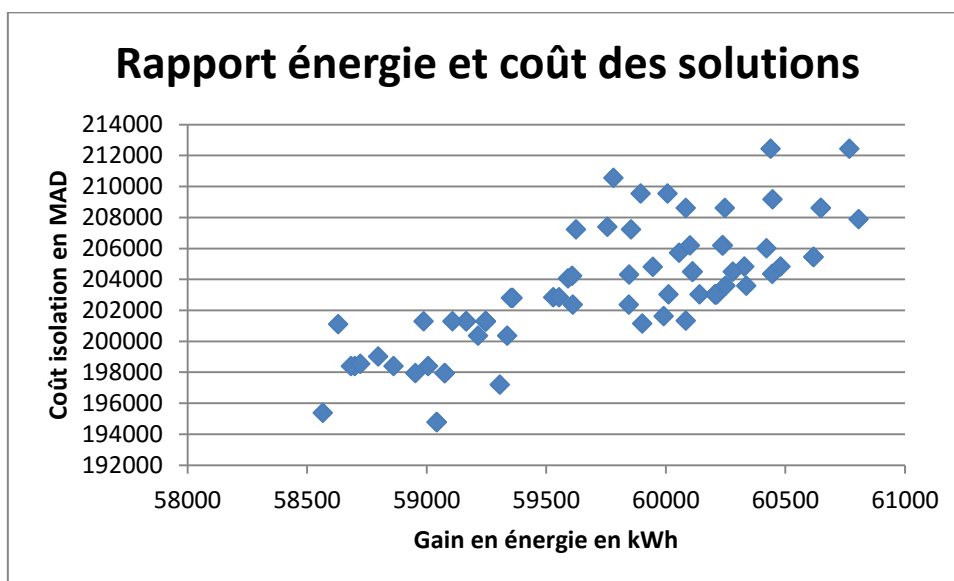


Figure 11: Rapport énergie économisée et coût isolation des solutions trouvées

La solution retenue par le logiciel représente un optimum de Pareto. Il s'agit d'une allocation des ressources pour laquelle il n'existe pas une alternative dans laquelle tous les acteurs seraient dans une meilleure position. C'est-à-dire une solution qui présente le meilleur compromis entre la maximisation du gain en énergie et la minimisation du coût d'isolation. Elle se caractérise par les valeurs ci-jointes :

- ✓ Orientation de 180°
- ✓ Isolation de 4 cm de la laine de verre sur les murs extérieurs, 2 cm sur la toiture et 6 cm de la laine de roche sur les planchers.
- ✓ 10 cm de Polystyrène dans les chambres froides

La consommation énergétique annuelle de la solution est **130028 kWh** et le coût de l'isolation est de **200360 MAD**, ce qui présente un gain de **31%** et un temps de retour sur investissement de **2,15 ans**.

Une STD de la solution donne les détails suivants :

	Energie totale [kWh]	Energie par surface [kWh/m2]
Energie du site totale	130028	172,75

Table 16: Energie totale du BDA

Energie	Besoins (kWh)	Besoins de référence (kWh)	Réduction d'énergie (%)
Chauffage	17790,03	55099,21	67,71
Climatisation	63321,51	84546,08	25,10
Eclairage	47147,57	47943,49	1,66
Equipement	1352,40	1359,4	0,51
ECS	416,55	417,58	0,25
Total	130028,05	189365,76	31,33

Table 17: Consommations énergétiques du BDA optimisé

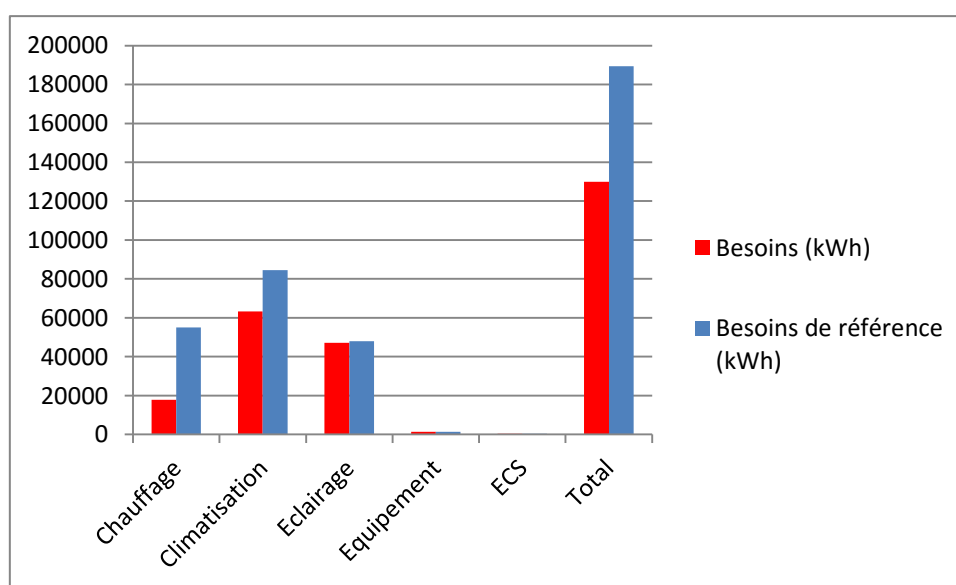


Figure 12: Comparaison des besoins énergétiques du BDA de référence et optimisé

On remarque que c'est surtout le chauffage qui a été le plus optimisé par rapport au cas de référence. Arrivé à ce stade, les besoins du bâtiment sont diminués de 31%. Il convient de rappeler que la certification HQE exige un gain d'au moins 20%. A cet effet, on conclut que l'objectif est atteint.

3. Energie solaire

Pour répondre à la sous-cible 4.2.4 de la HQE du recours aux énergies renouvelables on choisit d'installer des panneaux solaires en série. La société Ecowell commercialise la marque Resun Solaire des panneaux solaires. Ils ont une puissance de 260Wc et leurs dimensions sont 1640 x 992 x 40mm (64.87 x 39.06 x 1.57in). Le prix unitaire est de 1450 DH HT. Ils sont

connectés à un convertisseur DC/AC. On fait ensuite une simulation par DesignBuilder du bâtiment avec cette installation pour trouver le gain en énergie solaire gagné.

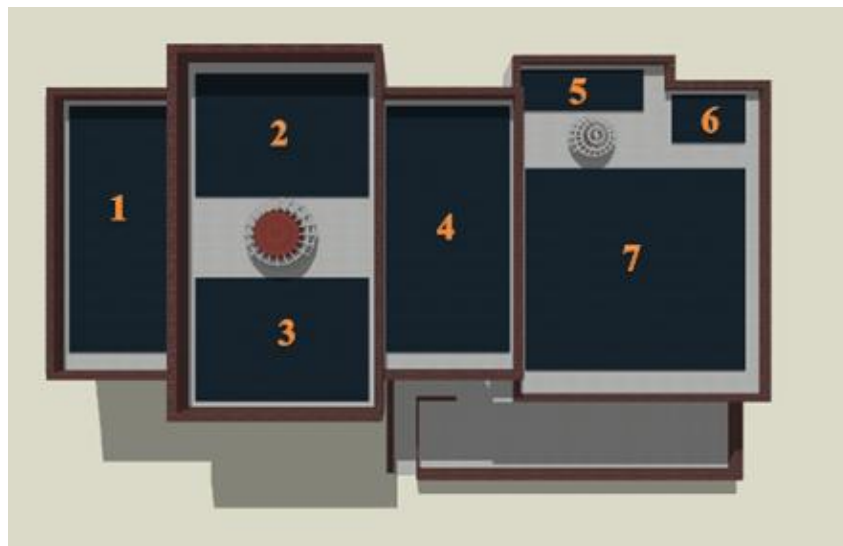


Figure 13: Disposition des panneaux photovoltaïques sur la terrasse

Zone	Largeur (m)	Longueur (m)	Nombre de panneaux
1	3,968	9,84	24
2	6,944	4,92	21
3	6,944	4,92	21
4	4,96	9,84	30
5	4,96	1,64	5
6	2,976	1,64	3
7	8,928	8,2	45

Table 18: Dimensions et nombres des groupements photovoltaïques

3.1. Calcul manuel

L'énergie électrique générée dans la production d'un système photovoltaïque est donnée par la formule suivante:

$$E = A * r * H * PR \quad (3.1)$$

(Réf. www.photovoltaiic-software.com)

E : Energie (kWh)

A : Surface totale des panneaux solaires (m²)

r : Rendement du panneau solaire en (%) donné par le quotient de sa puissance en kWc sur sa surface en m². (Réf. www.photovoltaiic-software.com/PV-solar-energy-calculation.php)

H : Rayonnement solaire moyen annuel sur les panneaux inclinés

PR : Rapport de performance, coefficient de pertes (plage entre 0,5 et 0,9, valeur du cas de BDA = 0,75)

Pour le cas des panneaux installés sur le BDA on a une surface totale A=242,4 m², un rayonnement H = 1960 kWh/m² (Réf. PVGIS) et r=0,16 %.

D'où : **E=56479 kWh**

3.2. Résultat de simulation

Une simulation thermique dynamique permet d'avoir les résultats d'énergie fournie sur le site par l'installation.

	Electricité [kWh]
Energie photovoltaïque	50046,962
Energie de conversion	-3984,00
Réduction dû au stockage	-10206,93
Total d'énergie générée sur site	35856,028

Table 19: Gain de l'énergie solaire

L'installation photovoltaïque compte 149 panneaux d'une surface totale de 242,4 m² et injecte une énergie annuelle totale de 35856 kWh. Il y'a ainsi un écart de **11%** entre la simulation et le calcul manuel. Les besoins en énergie du bâtiment optimisé sont réduits à 94172 kWh, ce qui représente une couverture de **27 %** des besoins énergétiques du bâtiment isolé.

Le cout total de l'installation est de 216050 DH HT. Donc pour un prix unitaire du kWh de 1,4 DH on aura un temps de retour sur investissement de **4,30 ans**.

➤ Réduction des émissions de polluants dans l'atmosphère

1 kWh en électricité est équivalent à 0,29 kg en CO₂ et à 0,39 Kg en SO₂ (Source : www.energieplus-lesite.be).

Notre bâtiment initial consomme en totale **189365,76 kWh** équivalente à 54,91 tonnes de CO₂ et 73,85 tonnes de SO₂. Après optimisation on est arrivé à une consommation de 130028

kWh qui est ensuite réduite avec le recours à l'énergie solaire de 35856 kWh. Donc l'énergie gagnée en totale est **95193,74 kWh/an** équivalente à **27,6** tonnes de CO₂ et **37,12** tonnes de SO₂. Le gain en émission de CO₂ et SO₂ est de **50,26 %**.

4. Chambres froides

Par ailleurs, pour répondre aux exigences de la HQE relatives aux chambres froides, à savoir l'amélioration de l'aptitude de l'enveloppe des entrepôts frigorifiques à limiter les déperditions ($U_{moy} < 0.24 \text{ W/m}^2\text{.K}$), les 8 chambres froides positives du BDA ont été vérifiées en utilisant le logiciel BINAYATE. A rappeler qu'il s'agit des coefficients de transmission thermique après isolation optimale.

4.1.Enveloppe

Les couches des murs extérieurs, intérieurs et toitures des chambres froides isolées aux Polyuréthane et Polystyrène expansé sont représentées dans le logiciel BINAYATE :

Paroi chambre froides	Coefficient de transmission thermique U (W/m ² .K)
Mur extérieur	0,20
Mur intérieur	0,22
Toiture	0,23

Table 20: Coefficients de transmission des chambres froides

On remarque que les toitures et les parois verticales des chambres froides du bâtiment optimisé ont tous un coefficient de transmission inférieur strictement à 0,23 W/m².K ce qui permet d'avoir un point dans la certification HQE.

4.2.Fluide frigorigène

Pour le fluide frigorigène on choisit d'utiliser **R134a** qui présente un indice de potentiel de réchauffement global de l'installation IGWP (kg eqCO₂/kW) de 1430 qui est supérieure à la valeur imposée par la certification HQE de 750 .

5. Evaluation des résultats obtenus selon les exigences du HQE

Le tableau ci-dessus résume les résultats obtenus durant notre étude vis-à-vis la cible 4 de la HQE :

Cibles	Points obtenus
4.1. Réduction de la demande énergétique par la conception architecturale	
<ul style="list-style-type: none"> Améliorer l'aptitude du bâtiment à réduire ses besoins énergétiques Améliorer l'aptitude de l'enveloppe des entrepôts frigorifiques à limiter les déperditions 	PR
✓ U _{moyen} < 0,24 W/m²K	1
4.2. Réduction de la consommation d'énergie primaire	PR
<ul style="list-style-type: none"> Réduire la consommation d'énergie primaire due au chauffage, au refroidissement, à l'éclairage, à l'ECS, à la ventilation, et aux auxiliaires de fonctionnement, liés au confort des usagers 	
✓ Gain de 30%	6
<ul style="list-style-type: none"> Recours à des énergies renouvelables 	PR
✓ Besoins couverts à hauteur de 20%	2
<ul style="list-style-type: none"> Efficacité des systèmes frigorifiques des entrepôts frigorifiques 	
✓ Entrepôts à température dirigée positive de 0 à 5°C: COP > 2,75	3
4.3. Réduction des émissions de polluants dans l'atmosphère	
<ul style="list-style-type: none"> Quantités d'équivalent CO₂ générées par l'utilisation de l'énergie 	PR
✓ Diminution des émissions de quantité de CO ₂ 30%	3
<ul style="list-style-type: none"> Quantités d'équivalent SO₂ générées par l'utilisation de l'énergie 	1
Total de points obtenus	16

Table 21: Points obtenus dans la cible 4 de la HQE

On est arrivé à un niveau **Performant (P)** pour le BDA au niveau de la cible énergie.

Conclusion

Dans ce chapitre on a pu proposer un bâtiment nettement performant que notre bâtiment de référence avec une réduction de la consommation énergétique de 31% par optimisation de l'enveloppe et de l'orientation et 19% avec le recours à l'énergie solaire qui nous a finalement laissé avec une certification de la cible d'énergie de la HQE du bâtiment. Dans le chapitre suivant il sera question de certifier le BDA optimisé HQE niveau cible 9 du confort acoustique.

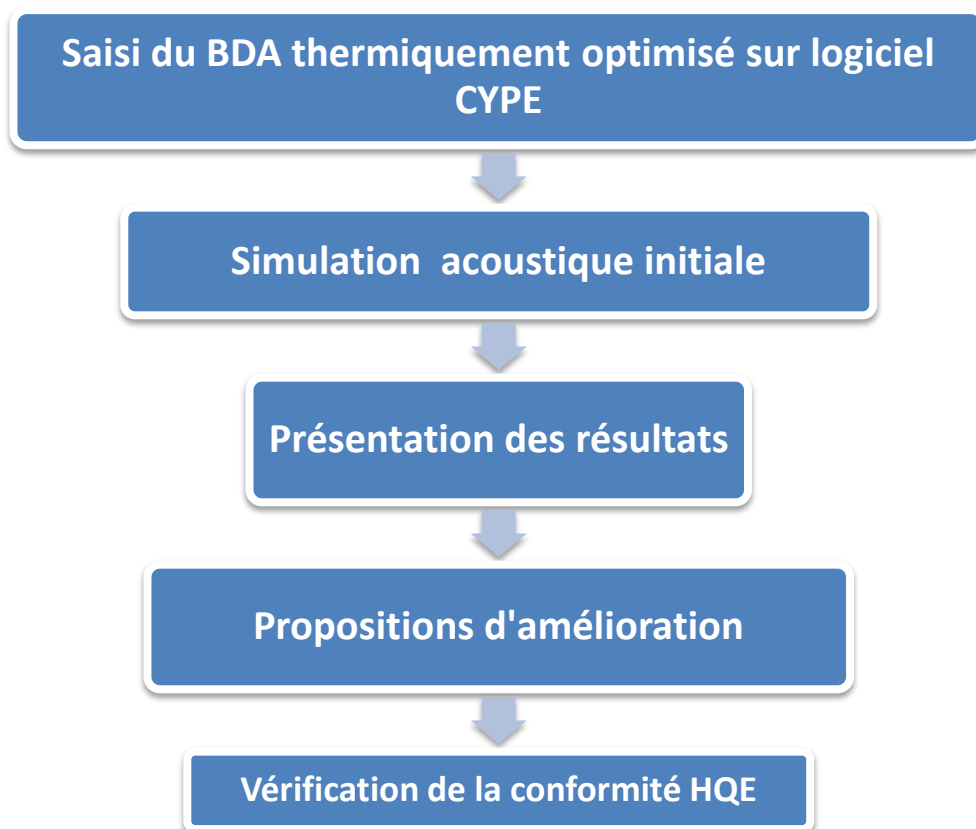
Chapitre 4 : Simulation acoustique du bâtiment

Introduction

Dans ce dernier chapitre nous nous intéresserons à l'aspect phonique du bâtiment optimisé dans la partie précédente afin de voir sa réponse aux exigences de la HQE. Pour ce faire une simulation avec le logiciel CYPE sera menée afin de réaliser les calculs et vérifier l'accord vis-à-vis des normes en vigueur de la HQE.

1. Méthodologie

Durant cette partie, notre étude va consister à suivre la méthodologie présentée ci-dessus :



2. Généralité sur l'acoustique architecturale

L'acoustique architecturale est une science qui étudie la transmission du son à l'intérieur des bâtiments et s'intéresse aux problèmes phoniques posés par l'art du bâtiment. Elle vise à traiter les problèmes concernant la protection des locaux contre les bruits, et des conditions optimales d'émission et de réception des ondes sonores dans un local pour une meilleure qualité possible d'écoute.

2.1.Son

C'est une sensation auditive engendrée par la vibration d'une onde acoustique qui va créer un déplacement des particules du milieu de propagation autour d'une position d'équilibre.

2.2.Pression acoustique

C'est la pression mesurée au niveau d'un récepteur lors de l'émission d'un son, elle représente la variation de la pression atmosphérique, et elle s'exprime en Pa.

2.3.Niveau de la pression

Le niveau de pression est défini par :

$$L_p = 20 \log \frac{P_{eff}}{P_0} \quad (4.1)$$

P_{eff} : Pression acoustique efficace.

$P_0 = 2.10^{-5}$ Pa : Pression de référence au seuil d'audition.

2.4.Niveau global de pression

Le niveau global de pression est le niveau résultant du mélange de deux ou plusieurs sons indépendants, définit comme le suivant :

$$L_{ptot} = 10 \log \sum 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \quad (4.2)$$

Avec:

L_{pi} : Niveau de pression du son i.

2.5. Bruit

Le bruit est une somme infinie de sons purs dont les fréquences n'ont pas de lien entre elles.

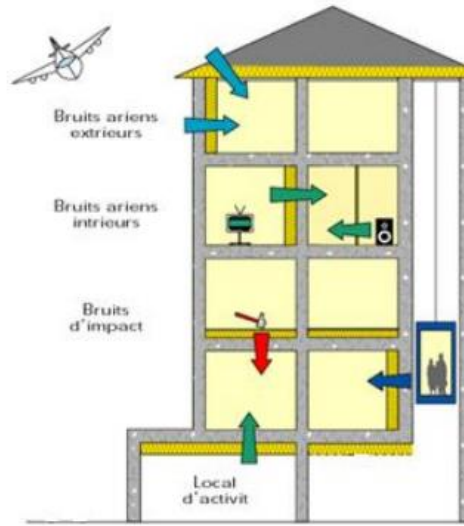


Figure 14: Types de bruit

- Le **bruit rose** : est un bruit aérien intérieur (entre locaux) dont le niveau sonore est le même pour chaque bande d'octave.
- Le **bruit routier** : est un bruit aérien extérieur dont le niveau sonore varie pour chaque bande d'octave.
- Le **bruit d'impact** : est un bruit produit par effet aux chocs (masse frappant le sol).

2.6. Transmission du bruit dans un local

La transmission du bruit se fait dans diverses directions, elle dépend de la qualité mécanique du matériau, des liaisons internes, etc...

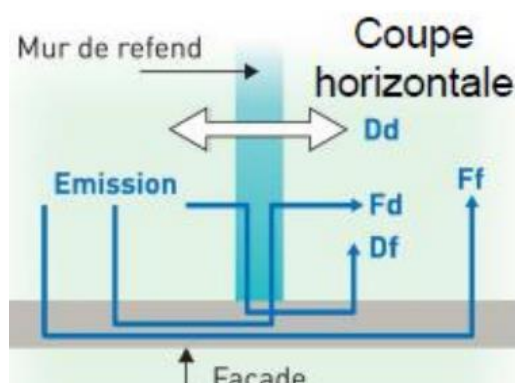


Figure 15: Modes de transmission du bruit entre

Le schéma au-dessus illustre ces modes de transmissions. Avec :

Dd : Directe à directe (direct direct).

Df : Directe à latérale (direct flancking).

Fd : Latérale à directe flancking direct).

Ff : Latérale à latérale (flancking flancking).

2.7. Fréquences propres d'un local parallélépipédique

Les modes propres ou les fréquences propres sont les fréquences des vibrations naturelles d'un local. Elles correspondent aux fréquences pour lesquelles existent des ondes stationnaires qui représentent la superposition de deux ondes progressives de sens de propagation opposés.

La formule de Rayleigh suivante détermine ces modes propres :

$$F_{l,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{x}\right)^2 + \left(\frac{m}{y}\right)^2 + \left(\frac{n}{z}\right)^2} \quad (\text{en Hz}) \quad (4.3)$$

Avec : l, m, n sont des nombres entiers quelconques

X, Y et Z sont les dimensions du parallélépipède

C : Vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

2.8. Phénomène d'absorption acoustique

Lorsqu'une onde sonore rencontre une paroi, une partie de cette onde est transmise dans le local de réception, l'autre est réfléchiée dans le local d'émission. Mais une partie peut être absorbée par cette paroi. C'est ce qu'on appelle absorption acoustique.

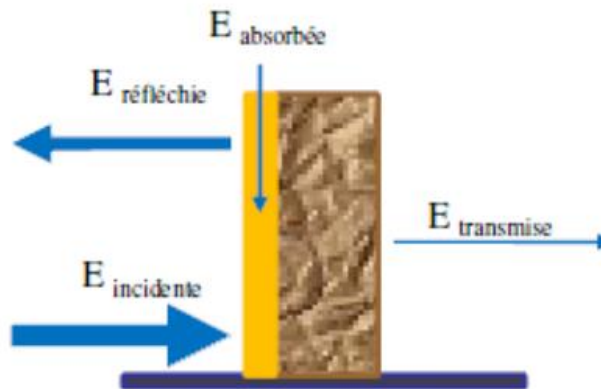


Figure 16: Phénomène de transmission des ondes acoustiques

Le schéma suivant résume les différents mécanismes d'absorption :

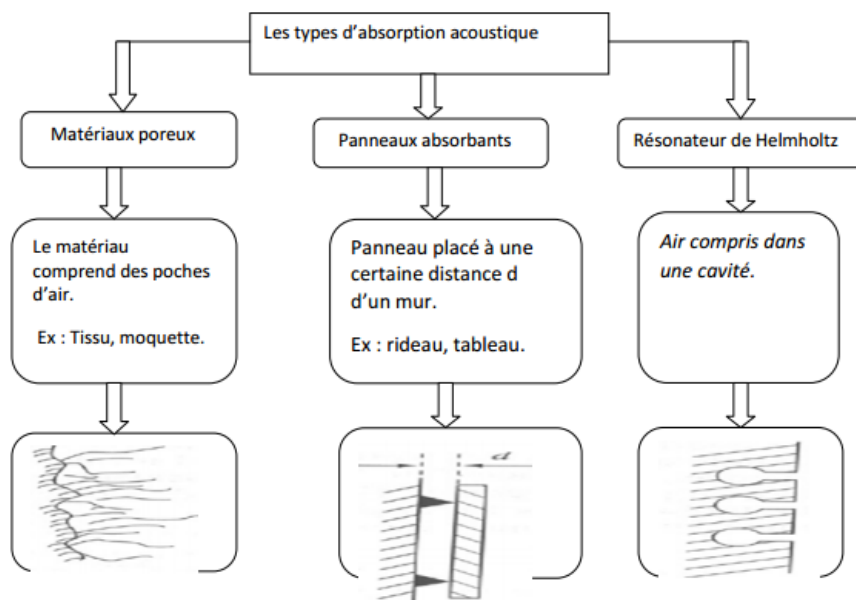


Figure 17: Types d'absorption acoustique

• Coefficient d'absorption

Chaque matériau est caractérisé par un coefficient d'absorption défini par :

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (4.4)$$

Avec :

E_a : Energie absorbée par le matériau.

E_i : Energie incidente au matériau.

Généralement, on utilise un coefficient d'absorption moyen α pour chaque matériau, ou encore la valeur α à 1000 Hz.

- **Coefficient d'absorption moyen d'un local**

On définit le coefficient d'absorption moyen d'un local par la formule suivante :

$$\alpha_{moy} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i} \quad (4.5)$$

α_i : Coefficient d'absorption du matériau i.

S_i : Surface occupée par le matériau i.

2.9. Air d'absorption

On définit l'air d'absorption A ou la surface équivalente d'absorption d'une salle par:

$$A = \sum_i A_i = \sum_i \alpha_i S_i \quad (m^2) \quad (4.5)$$

2.10. Temps de réverbération acoustique Tr

Le temps de réverbération est le temps nécessaire à un bruit, après extinction de la source, pour décroître de 60 dB

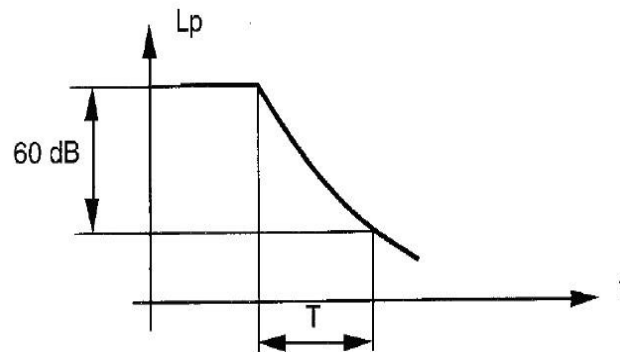


Figure 18: Temps de réverbération

Suivant les caractéristiques du local, deux formules peuvent être utilisées pour le calcul du

Tr :

- La formule de SABINE :

$$T_r = \frac{0.16 \times V}{A} \quad (4.6)$$

Elle est utilisable pour les matériaux réfléchissants dont $\alpha_{\text{moy}} < 0.2$

- La formule d'EYRING :

$$T_r = \frac{-0.16 \times V}{A \times \ln(1 - \alpha)} \quad (4.7)$$

Elle est utilisable pour les matériaux absorbants dont $\alpha_{\text{moy}} > 0.2$

.

V : Volume du local (m³).

S : Surface totale du local (m²).

α : Coefficient d'absorption moyenne du local.

• Temps de réverbération optimal

C'est la durée de réverbération (dans la réglementation acoustique) qu'on doit atteindre pour avoir une bonne qualité d'écoute. On l'a déterminé selon le volume du local d'après le graphe suivant:

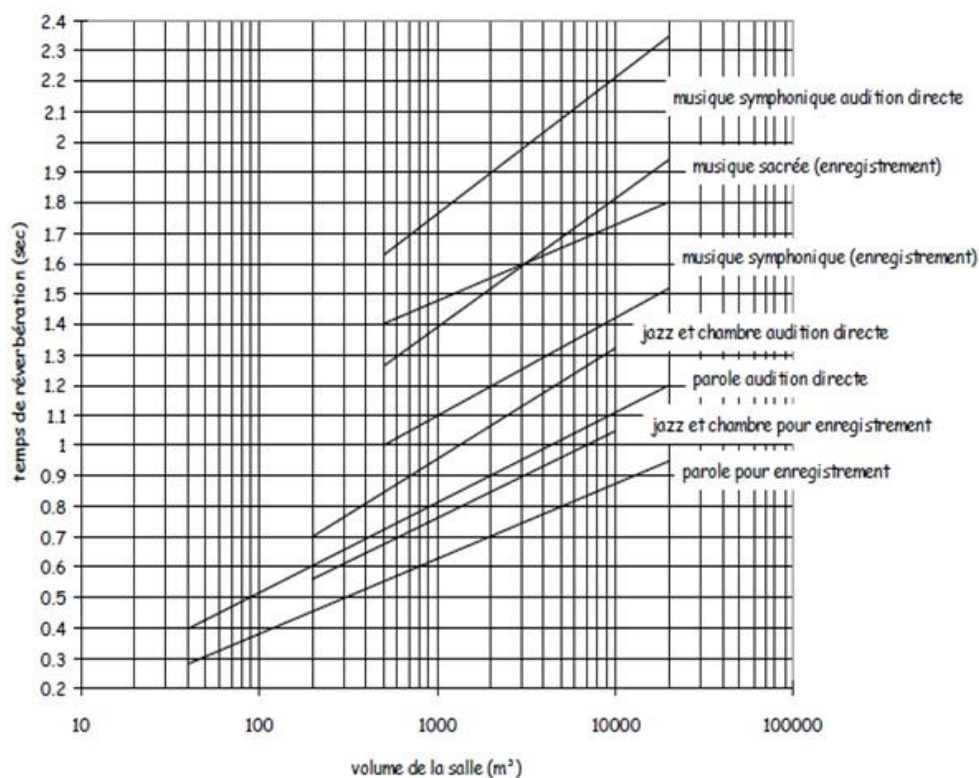


Figure 19: Temps de réverbération optimal par rapport au volume du local

2.11. Isolation acoustique

• Indice d'affaiblissement acoustique

C'est un indice qui représente l'aptitude d'un matériau (paroi, plafond, fenêtre, porte,..) à atténuer la transmission du bruit. On définit l'indice d'affaiblissement acoustique R par la Formule suivante :

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log(S/A) \quad (4.8)$$

L1 : Niveau de pression acoustique à l'émission en dB.

L2 : Niveau de pression acoustique à la réception en dB.

S : Surface de matériau testée en m².

A: Air d'absorption présente dans le local de réception en m².

Il est mesuré en laboratoire en l'absence de toutes transmissions latérales. Il s'exprime en dB par rapport à un bruit rose ou routier (cas des indices R_{rose} et R_{route}).

On définit également un indice d'affaiblissement pondéré R_w selon la norme NF EN ISO dont la valeur est obtenue par une translation de la courbe de référence vers la courbe mesurée d'un écart de 1 dB jusqu'à ce que la somme des écarts défavorables soit la plus grande possible sans dépasser le 32dB par bande de tiers d'octave et 10dB par bande d'octave. La valeur qui correspond à 500 Hz de cette courbe représente l'indice d'affaiblissement R_w .

Pour déterminer l'indice d'affaiblissement pondéré au bruit rose, routier, on ajoute un terme d'adaptation C, C_{tr} respectivement, qui représente une valeur, en décibel, à ajouter à la valeur unique pour prendre en compte les caractéristiques de spectres sonores particuliers :

Au bruit rose :

$$R_{w, A} = R_w + C \quad (4.9)$$

Au bruit routier :

$$R_{w, tr} = R_w + C_{tr} \quad (4.10)$$

Généralement, on le note : $R_w(C ; C_{tr})$

Ex : $R_w(C, C_{tr}) = 50(-1 ; -2)$

• Isolement acoustique

✓ Isolement acoustique standardisé D_n, T

C'est l'isolement brut correspondant à une valeur de référence de la durée de réverbération du local de réception qui simule les conditions ultérieures d'utilisation. Cette grandeur, exprimée en dB par bande d'octave, est donnée par la formule suivante :

$$D_{nT} = L1 - L2 + 10 \log (T/T0) \quad (4.11)$$

Où :

L1 : Niveau de pression acoustique à l'émission en dB.

L2 : Niveau de pression acoustique à la réception en dB.

T₀ : Durée de réverbération de référence (T₀ = 0,5 s à toutes les fréquences) exprimée en s

T : Durée de réverbération du local de réception exprimée en s.

✓ Isolement acoustique standardisé pondéré D_{nT}, W

C'est l'isolement qui permet de caractériser, par une valeur unique, l'isolement acoustique entre deux locaux en tenant compte de la durée de réverbération du local de réception, il s'exprime en dB. Et pour le calculer, on utilise une courbe de référence selon la norme NF EN ISO (courbe de référence pour l'isolement aux bruits aériens).

✓ Isolement acoustique standardisé pondéré au bruit rose D_{nT}, A

Cet isolement est égale à la somme de l'isolement acoustique standardisé pondéré D_{nT,W} et du terme d'adaptation C.

$$D_{nT,A} = D_{nT,W} + C \quad (4.12)$$

✓ Isolement acoustique standardisé pondéré au bruit routier D_{nT,A,tr}

Cet isolement est égal à la somme de l'isolement acoustique standardisé pondéré D_{nT,w} et du terme d'adaptation C_{tr}.

$$D_{nT,A} = D_{nT,W} + C_{tr} \quad (4.13)$$

• Loi de masse

La loi de masse ou loi des masses est une loi de l'isolation phonique. Les bruits provenant d'un milieu (émetteur) (exemple, rue animée) sont transmis jusqu'à un milieu récepteur (exemple, local) par voie solidienne (murs, sols, plafonds) ou par voie aérienne (interstices au niveau des portes et des fenêtres, ventilations). Toute paroi homogène et sans élasticité (ne vibrant pas), soumise à une onde sonore d'incidence normale à l'une des surfaces de cette paroi, génère un isolement régi par la loi de masse :

$$R = 20 \log \frac{\omega M}{2\rho c} \quad (4.14)$$

avec :

- R : l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi, en dB ;
- ω : la pulsation, en rad/s ;
- M : la masse surfacique de la paroi, en kg/m² ;
- $Z=\rho c$: l'impédance caractéristique (ou impédance spécifique) de l'air (~410 Ns/m³).

La « loi de masse » signifie que dans le cas idéal d'une paroi infiniment grande (ou fortement amortie), R augmente de 6 dB par doublement de la fréquence et de 6 dB par doublement de la masse surfacique.

3. Simulation acoustique

3.1. Présentation du logiciel

Le CYPECAD MEP est un module du package de CYPE (CYPECAD, CYPE 3D, CYPETHERM HVAC, CYPELUX...). Il permet de réaliser les études acoustique, thermique, climatique et dynamique d'incendie des bâtiments à partir d'une modélisation commune de l'ouvrage.

Pour notre étude on s'est intéressé seulement à la partie acoustique du logiciel qui vise à déterminer le temps de réverbération du bâtiment introduit ainsi que l'isolement aux bruits aériens extérieurs, intérieurs, et aux bruits aux chocs. Or CYPECAD MEP fait le calcul suivant les normes EN 12354-1, 2, 3 (ISO 15712-1, 2, 3).

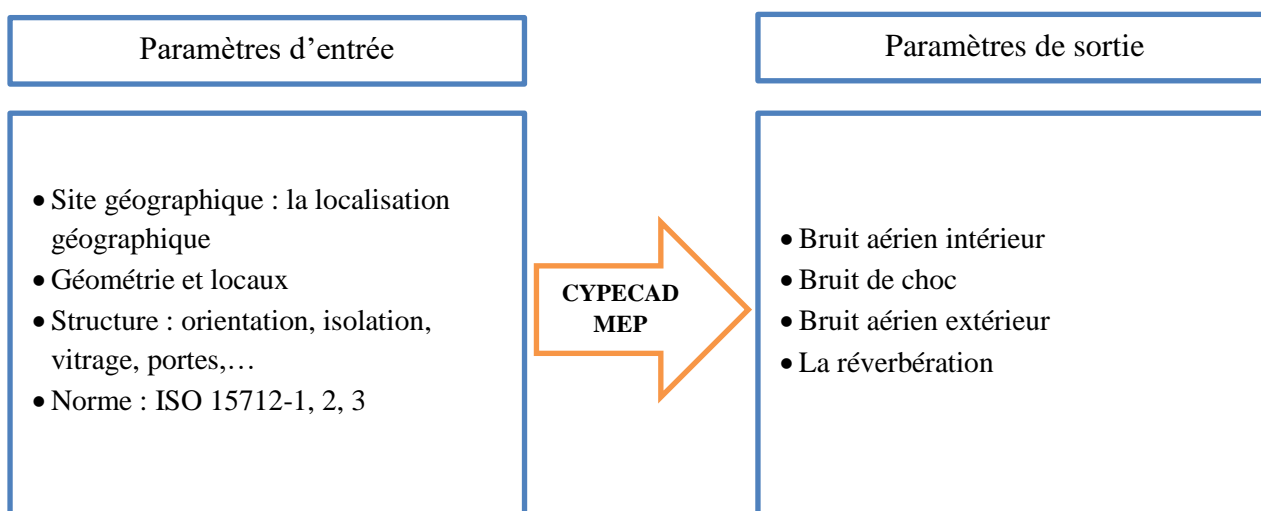


Figure 20: Paramètres d'entrée et sortie de la simulation acoustique

3.2. Entrées du modèle

On utilise l'outil de dessin graphique de CYPECAD MEP pour introduire le bâtiment optimisé avec les caractéristiques de construction des murs, de l'isolation, l'orientation et la menuiserie.

• Plan du BDA

Les figures suivantes montrent les plans 2D et la vue en 3D de BDA utilisé dans le logiciel CYPECAD MEP :

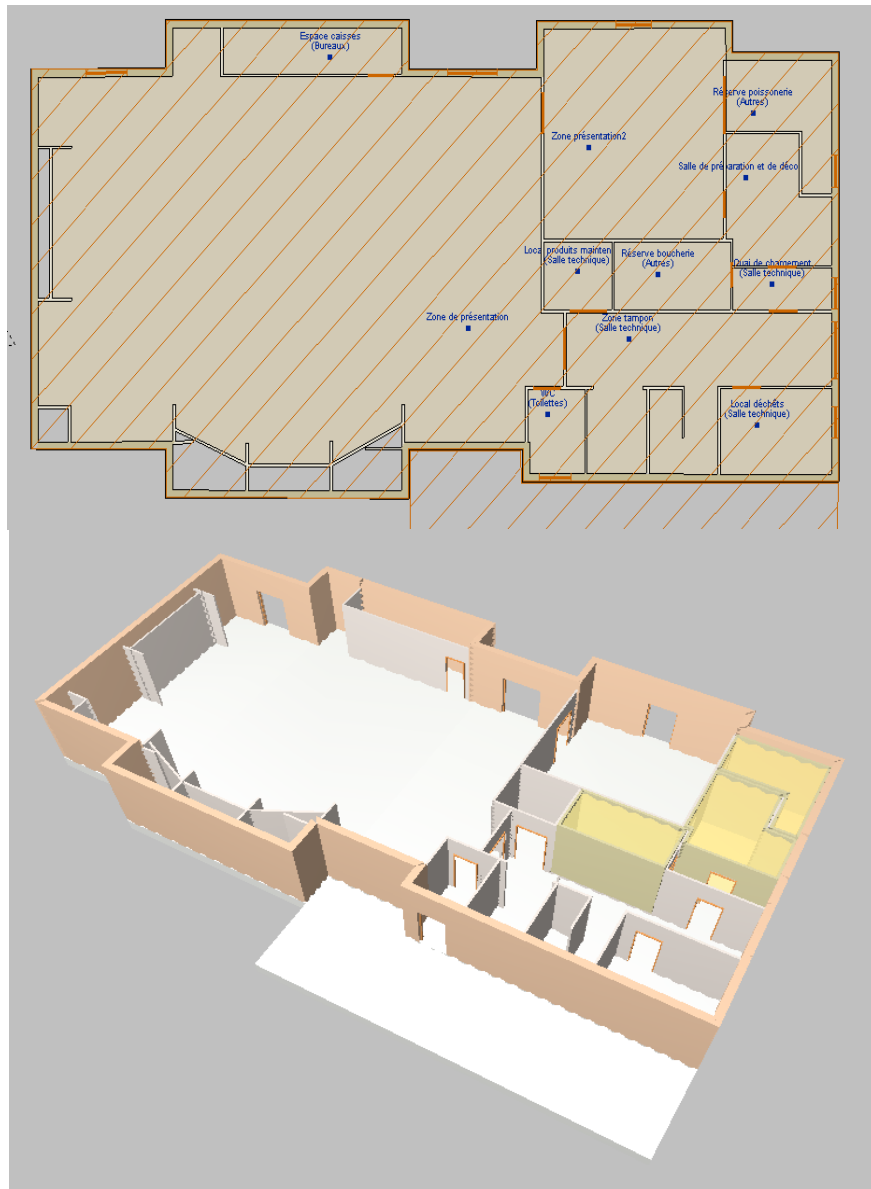


Figure 21: Rez-de-chaussée BDA en 2D et 3D

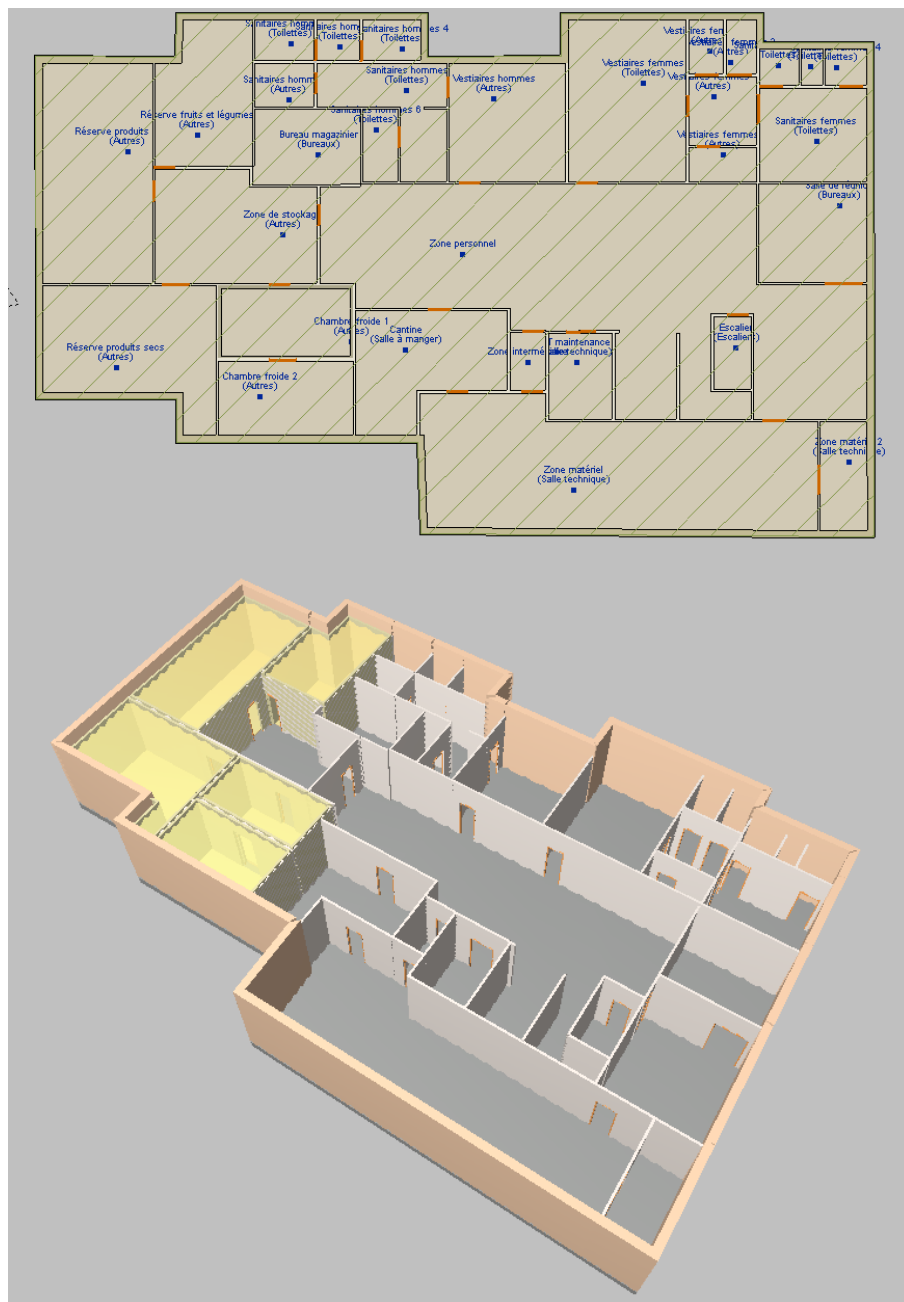


Figure 22: Sous-sol BDA en 2D et 3D

• Caractéristiques acoustiques des matériaux utilisés

Le tableau ci-dessous représente les coefficients d'absorption acoustique des différents matériaux utilisés dans le BDA :

	Fréquences centrales d'octave(Hz)		
	500	1000	2000
Enduit	0,05	0,05	0,05
Brique	0,03	0,04	0,05
Carrelage	0,02	0,03	0,04
Laine de verre	0,6	0,64	0,62
Verre	0,03	0,02	0,02
Aluminium	0,05	0,05	0,06
Bois	0,03	0,04	0,05
Laine de roche	0,36	0,32	0,3
Polyuréthane	0,48	0,65	0,82
Béton	0,02	0,03	0,04
Hourdis	0,02	0,03	0,04

Table 22: Coefficient d'absorption des matériaux utilisés dans le BDA

L'annexe C donne la description des matériaux et des éléments constructifs thermique saisie et acoustique calculée par le logiciel utilisés dans la simulation de notre BDA optimisé.

3.3. Résultats de simulations

Cette étude de l'isolation acoustique du bâtiment est le résultat du calcul de toutes les combinaisons possibles de couples émetteurs récepteurs acoustiques présents dans le bâtiment, conformément à la norme en vigueur. Elle est obtenue sur la base des méthodes de calcul pour l'estimation de l'isolation acoustique au bruit aérien entre locaux, au niveau de bruit de choc entre locaux et à l'isolation au bruit provenant de l'extérieur, décrits dans les normes EN 12354-1,2,3 (ISO 15712-1,2,3).

• Isolation au bruit aérien intérieur relative aux éléments verticaux de séparation du BDA

20 locaux récepteurs au bruit aérien ont été comptabilisés dans le bâtiment, ce qui donne lieu à 64 couples de locaux émetteur/récepteur séparés par des éléments constructifs verticaux. L'isolation acoustique moyenne au bruit aérien entre ces couples est de 34.9 dBA, avec un écart standard de 6.7 dBA. Est affichée ci-après la distribution fréquentielle des résultats obtenus pour l'indice acoustique calculé, (DnT,A):

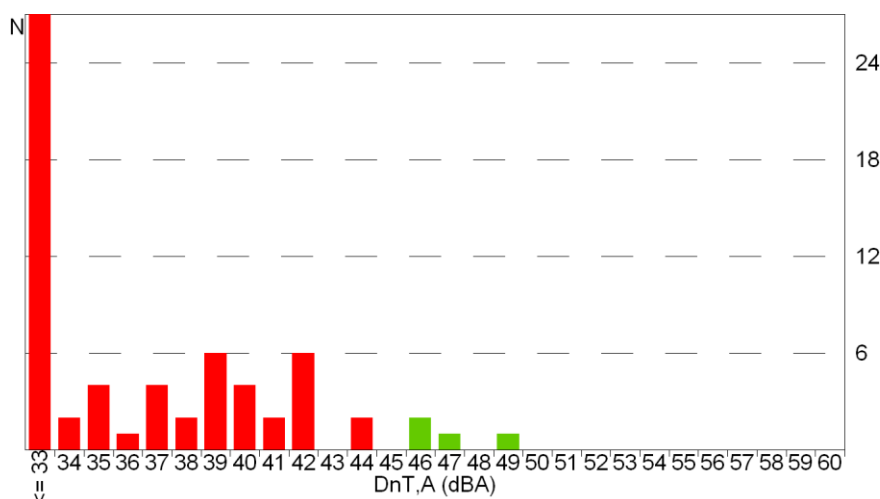


Figure 23: Résumé de l'isolation au bruit aérien intérieur relative aux éléments verticaux de séparation des locaux du BDA

• Isolation au bruit aérien intérieur relative aux éléments horizontaux de séparation du BDA

12 locaux récepteurs au bruit aérien ont été comptabilisés dans le bâtiment, ce qui donne lieu à 20 couples de locaux émetteur/récepteur séparés par des éléments constructifs horizontaux. L'isolation acoustique moyenne au bruit aérien entre ces couples est de 55.5 dBA, avec un écart standard de 4.3 dBA. Est affichée ci-après la distribution fréquentielle des résultats obtenus pour l'indice acoustique calculé, (DnT,A):

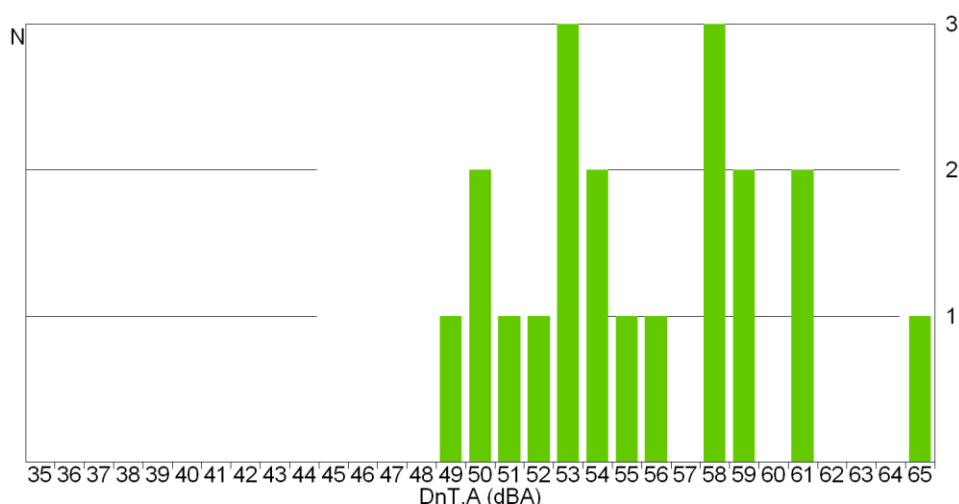


Figure 24: Résumé de l'isolation au bruit aérien intérieur relative aux éléments horizontaux de séparation des locaux du BDA

• Isolation au bruit de choc du BDA

20 locaux récepteurs au bruit de choc ont été comptabilisés, ce qui donne lieu à 75 couples de locaux émetteur/récepteur. Le niveau de pression moyenne au bruit de choc dans ces locaux est de 64.3 dB, avec un écart standard de 6.5 dB. Est affichée ci-après la distribution fréquentielle des résultats obtenus pour l'indice acoustique calculé, ($L'_{nT,w}$):

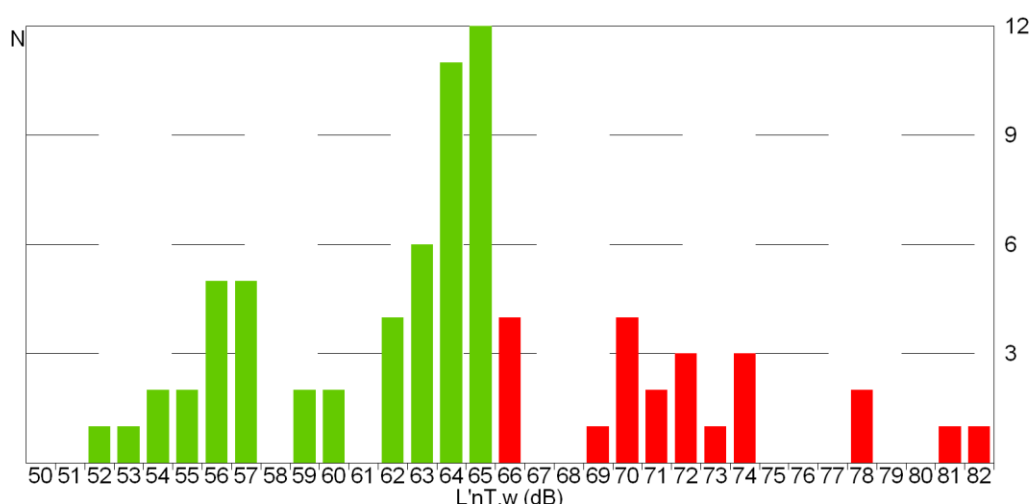


Figure 25: Résumé de l'isolation au bruit de choc des locaux du BDA

• Isolation au bruit aérien extérieur du BDA

16 locaux récepteurs au bruit aérien et avec des surfaces exposées à l'extérieur ont été comptabilisés, ce qui donne lieu à 35 calculs d'exposition au bruit extérieur, en combinant les différentes orientations de façade. L'isolation acoustique moyenne au bruit aérien provenant de l'extérieur dans ces locaux est de 37.4 dBA, avec un écart standard de 6.6 dBA. Est affichée ci-après la distribution fréquentielle des résultats obtenus pour l'indice acoustique calculé, ($D_{2m,nT,Atr}$):

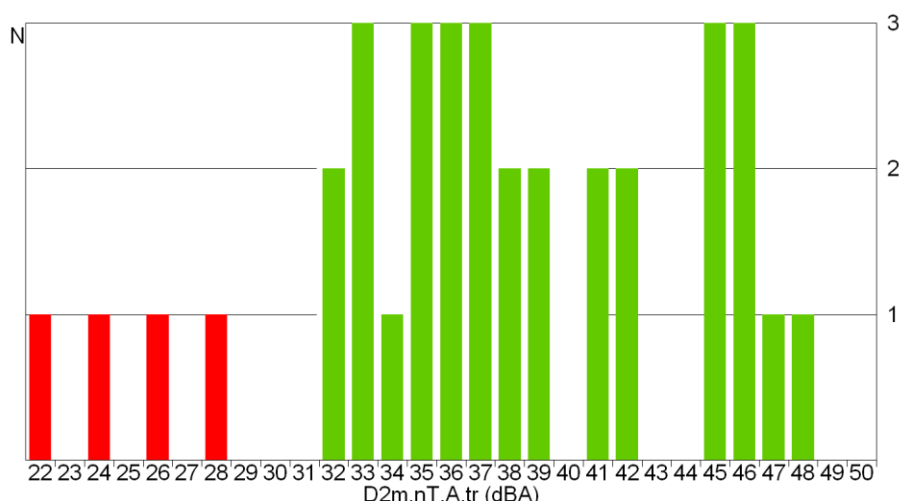


Figure 26: Résumé de l'isolation au bruit aérien extérieur des locaux du BDA

3.4.Exemple de local : Salle produits maintenance au RDC

3.4..1. Bruit aérien intérieur

Local de réception:	Local produits maintenance (Salle technique)
Situation du local récepteur:	Rez-de-Chaussée
Local d'émission:	Zone tampon (Salle technique)

Surface de séparatif commun aux deux locaux, S_s : 5.3 m²

Volume du local récepteur, V : 16.9 m³

$$D_{nT,A} = R'_A + 10 \log \left(\frac{0.16 \cdot V}{T_0 \cdot S_s} \right) = 23 \text{ dBA} \geq 45 \text{ dBA}$$



= 22.6 dBA

• Données d'entrée pour le calcul

Les tables ci-dessous présentent les différents éléments d'entrée dans le calcul acoustique de ce local :

Élément structural basique	m (kg/m ²)	R _A (dBA)	S _i (m ²)
Mur intérieur	164	40.0	2.48

Table 23: Élément séparatif

Ouvertures en façade	R_w (dB)	C (dB)	R_A (dBA)	S_i (m ²)
Porte (Sans caractérisation acoustique)	21.0	-1	20	2.86

Table 24: Ouvertures verticales

	Élément structural basique	m (kg/m ²)	R_A (dBA)	L_f (m)	S_i (m ²)
F1	Mur intérieur	164	40.0	3.2	5.3
f1	Mur intérieur	164	40.0		
F2	Mur intérieur	164	40.0	3.2	5.3
f2	Mur intérieur	164	40.0		
F3	Plancher intermédiaire	506	58.4	1.7	5.3
f3	Plancher intermédiaire	506	58.4		
F4	Toiture	542	59.5	1.7	5.3
f4	Toiture	542	59.5		

Table 25: Eléments de flanc

• **Calcul de l'isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs:**

Le tableau suivant regroupe les résultats de calcul des différentes grandeurs liées à l'isolation au bruit aérien entre locaux intérieurs :

	Valeur (dBA)
Contribution directe, $R_{Dd,A}$	22,7
Contribution de flanc à flanc, R_{Ff}	44,8
Contribution de flanc à direct, $R_{Fd,A}$	44,7
Contribution de direct à flanc, $R_{Df,A}$	44,7
Indice d'affaiblissement acoustique apparent, adapté au bruit rose, R'_A	22,6
Isolement acoustique standardisé adapté au bruit rose, $D_{nT,A}$	23

Table 26: Isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs (zone tampon)

Local de réception:	Local produits maintenance (Salle technique)
Situation du local récepteur:	Rez-de-Chaussée
Local d'émission:	Réserve boucherie (Salle technique)

Surface de séparatif commun aux deux locaux, S_s:	6.8 m ²
Volume du local récepteur, V:	16.9 m ³

$$D_{nT,A} = R'_A + 10 \log \left(\frac{0.16 \cdot V}{T_0 \cdot S_s} \right) = 37 \text{ dBA} \geq 45 \text{ dBA}$$

$$= 37.5 \text{ dBA}$$

• **Calcul de l'isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs:**

Le tableau suivant regroupe les résultats de calcul des différentes grandeurs liées à l'isolation au bruit aérien entre locaux intérieurs :

	Valeur (dBA)
Contribution directe, $R_{Dd,A}$	40
Contribution de flanc à flanc, R_{Ff}	45,9
Contribution de flanc à direct, $R_{Fd,A}$	45,8
Contribution de direct à flanc, $R_{Df,A}$	45,8
Indice d'affaiblissement acoustique apparent, adapté au bruit rose, R'_A	37,5
Isolement acoustique standardisé adapté au bruit rose, $D_{nT,A}$	37

Table 27: Isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs (Réserve boucherie)

Local de réception:	Local produits maintenance (Salle technique)
Situation du local récepteur:	Rez-de-Chaussée
Local d'émission:	Zone personnel (Bureaux)
Surface de séparatif commun aux deux locaux, S_s:	5.3 m ²
Volume du local récepteur, V:	16.9 m ³

$$D_{nT,A} = R'_A + 10 \log \left(\frac{0.16 \cdot V}{T_0 \cdot S_s} \right) = 50 \text{ dBA} \geq 45 \text{ dBA}$$

= 49.4
dBA

• Calcul de l'isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs:

Le tableau suivant regroupe les résultats de calcul des différentes grandeurs liées à l'isolation au bruit aérien entre locaux intérieurs :

	Valeur (dBA)
Contribution directe, $R_{Dd,A}$	58,4
Contribution de flanc à flanc, R_{Ff}	54,1
Contribution de flanc à direct, $R_{Fd,A}$	56,4
Contribution de direct à flanc, $R_{Df,A}$	54,1
Indice d'affaiblissement acoustique apparent, adapté au bruit rose, R'_A	49,4
Isolement acoustique standardisé adapté au bruit rose, $D_{nT,A}$	50

Table 28: Isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs (Zone personnel)

3.4..2. Bruit de choc

Local de réception:	Local produits maintenance (Salle technique)
Situation du local récepteur:	Rez-de-Chaussée
Local d'émission:	Zone tampon (Salle technique)

Aire totale de l'élément excité, S_s :

5.3 m²

Volume du local récepteur, V :

16.9 m³

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10 \log \left(\frac{0.16 \cdot V}{A_0 \cdot T_0} \right) = 66 \text{ dB} \leq 65 \text{ dB}$$



= 63.4 dB

• Données d'entrée pour le calcul

Les tables ci-dessous présentent les différents éléments d'entrée dans le calcul acoustique de ce local :

Élément structural basique	m (kg/m ²)	L _{n,w} (dB)	R _w (dB)	ΔL _{d,w} (dB)	S _i (m ²)
Plancher intermédiaire	506	69.4	59.4	0	17.03

Table 29: Élément excité par le bruit de choc

	Élément structural basique	m (kg/m ²)	R _w (dB)	L _f (m)	S _i (m ²)
D1	Plancher intermédiaire	506	59.4	1.7	17.0
f1	Plancher intermédiaire	506	59.4		
D2	Plancher intermédiaire	506	59.4	1.7	17.0
f2	Mur intérieur	164	41.0		

Table 30: Éléments de flanc

• Calcul de l'isolation acoustique au bruit de choc

Le tableau suivant regroupe les résultats de calcul des différentes grandeurs liées à l'isolation au bruit de choc:

	Valeur (dBA)
Contribution de direct à flanc, L _{n,w,Df} :	63,4
Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, L' _{n,w}	63,4
Niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé, L' _{nT,w}	66

Table 31: Isolation acoustique au bruit de choc (Zone tampon)

Local de réception:	Local produits maintenance (Salle technique)
Situation du local récepteur:	Rez-de-Chaussée
Local d'émission:	Réserve boucherie (Salle technique)

Aire totale de l'élément excité, S_s :

6.8 m²

Volume du local récepteur, V :

16.9 m³

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10 \log \left(\frac{0.16 \cdot V}{A_0 \cdot T_0} \right) = 70 \text{ dB} \leq 65 \text{ dB}$$



$$= 67.7 \text{ dB}$$

	Valeur (dBA)
Contribution de direct à flanc, $L_{n,w,Df}$:	67,7
Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, $L'_{n,w}$	67,7
Niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé, $L'_{nT,w}$	70

Table 32: Isolation acoustique au bruit de choc (Réserve boucherie)

3.4..3. Bruit aérien extérieur

Surface totale en contact avec l'extérieur, S_s :

5.3 m²

Volume du local récepteur, V :

16.9 m³

$$D_{2m,nT,Atr} = R'_{Atr} + \Delta L_{fs} + 10 \log \left(\frac{V}{6T_0 S_s} \right) = 45 \text{ dBA} \geq 30 \text{ dBA}$$



$$= 45.1 \text{ dBA}$$

• Données d'entrée pour le calcul

Élément structural basique	m (kg/m ²)	$R_{A,tr}$ (dBA)	S_i (m ²)
Toiture	542	53.5	5.26

Table 33: Couverture

	Élément structural basique	m (kg/m ²)	$R_{A,tr}$ (dBA)	Revêtement	L_f (m)	S_i (m ²)
F1	Toiture	542	53.5		2.1	5.3
f1	Mur intérieur	164	37.0			
F2	Toiture	542	53.5	Chambre froide	1.8	5.3
f2	Mur intérieur	164	37.0			
F3	Toiture	542	53.5		0.7	5.3
f3	Mur intérieur	164	37.0			
F4	Toiture	542	53.5		1.7	5.3
f4	Mur intérieur	164	37.0			
F5	Toiture	542	53.5		2.5	5.3
f5	Mur intérieur	164	37.0			

Table 34: Éléments de flanc

- **Calcul de l'isolation acoustique au bruit aérien dans les façades, les couvertures et les sols en contact avec l'air extérieur:**

Le tableau suivant regroupe les résultats de calcul des différentes grandeurs liées à l'isolation à ce type de bruit :

	Valeur (dBA)
Contribution directe, $R_{Dd,A,tr}$	53,5
Contribution de flanc à flanc, $R_{Ff,A,tr}$	50,2
Contribution de flanc à direct, $R_{Fd,A,tr}$	51,2
Contribution de direct à flanc, $R_{Df,A,tr}$	50,2
Indice d'affaiblissement acoustique apparent, adapté au bruit route, $R'_{A,tr}$	45,1
Isolement acoustique standardisé adapté au bruit route, $D_{nT,A,tr}$	45

Table 35: Isolation acoustique au bruit aérien dans les façades, les couvertures et les sols en contact avec l'air extérieur

3.4..4. Temps de réverbération

✓ **Calcul de l'aire d'absorption acoustique équivalente et de la durée de réverbération:**

Le tableau ci-dessous présente les résultats de calcul du temps de réverbération pour le local :

Finition	Position	Aire d'absorption acoustique (m²)		
		$A_{500 \text{ Hz}}$	$A_{1000 \text{ Hz}}$	$A_{2000 \text{ Hz}}$
Béton lourd	Sol	0.11	0.16	0.21
	Plafond	0.05	0.05	0.05
Mur intérieur	Élément vertical	1.33	1.33	1.33
Porte		0.09	0.11	0.14
Air		0.000	0.051	0.186
Aire d'absorption acoustique (m²):		1.58	1.71	1.93
Durée de réverbération (s):		1.7	1.6	1.4
		Moyenne arithmétique: 1.6 s		

Table 36: Résultats du temps de réverbération

4. Discussion et commentaires

On remarque que pour la totalité des locaux du BDA les critères sur le bruit aérien intérieur et le bruit de choc ne sont pas respecté, tandis que pour le bruit extérieur la totalité des locaux est conforme à la réglementation EN 12354-1, 2, 3 (ISO 15712-1, 2, 3). Ceci nous pousse à proposer des solutions afin de rendre le BDA confortable acoustiquement notamment à travers l'utilisation d'un revêtement phonique tel que la laine de verre ou la laine de roche qu'il faut déterminer l'épaisseur optimal.

6. Evaluation des résultats obtenus selon les exigences du HQE

Le tableau ci-dessus résume les résultats obtenus durant notre étude vis-à-vis de la cible 9 de la HQE :

Cibles	Points obtenus
9.1. Création d'une qualité d'ambiance acoustique adaptée aux différents locaux	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ ESPACES COMMUNS DEDIES A LA CIRCULATION DES CLIENTS (COMMERCE – HALL D'EXPOSITION) <ul style="list-style-type: none"> • Optimisation de la qualité acoustique des espaces • Réalisation d'une étude acoustique et solutions 	PR 3
<ul style="list-style-type: none"> ➤ ESPACES DEDIES A LA VENTE (COMMERCE) <ul style="list-style-type: none"> • Optimisation de la qualité acoustique des espaces • Réalisation d'une étude acoustique et solutions 	PR 3
Total de points obtenus	6

On est arrivé à un niveau de **prérequis (PR)** pour le BDA au niveau du confort acoustique.

➤ Remarque

On peut avoir encore plus de point en ajoutant une étude de la sonorité à la marche et le niveau de bruit des équipements aux grandeurs déjà calculés.

Conclusion

Dans ce chapitre sur la simulation acoustique on a pu faire une modélisation et une étude sur le BDA suivant la norme en vigueur, ce qui a montré la non-conformité à toutes les caractéristiques, notamment au bruit de choc. Les solutions les plus adaptées ont été proposé et on a fini par les points obtenus du bâtiment optimisé pour la cible 9 du confort acoustique. Dans le chapitre suivant, on développera notre propre outil de simulation thermique de bâtiment à l'aide des réseaux de neurones artificiels.

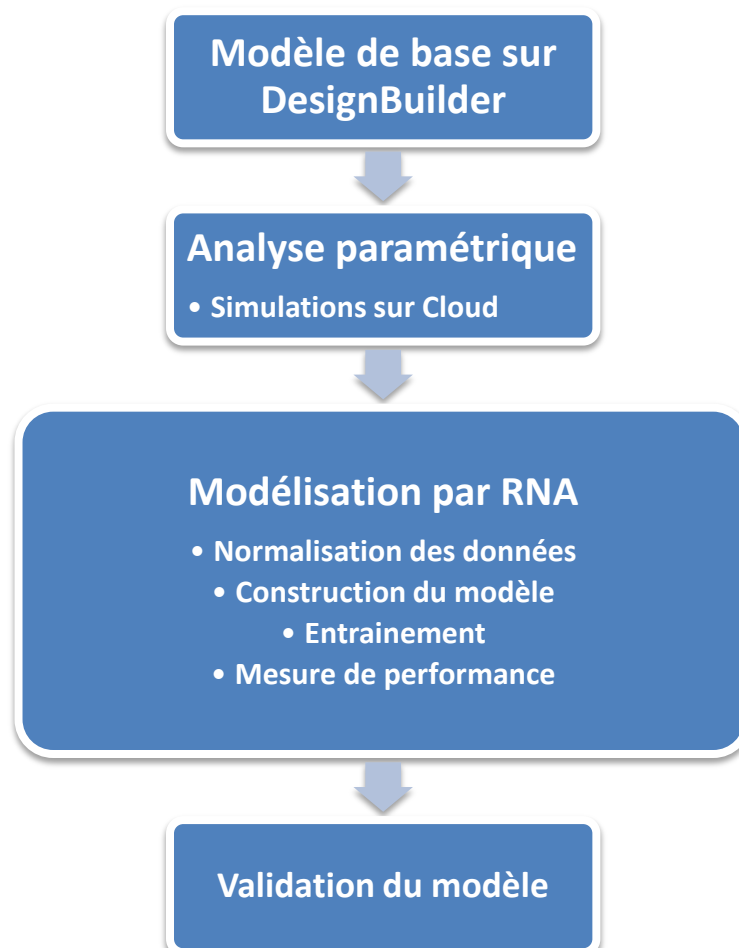
Chapitre 5 : Modélisation énergétique de bâtiment par réseau de neurones artificiel

Introduction

Dans ce chapitre nous allons développer un modèle de prédiction des besoins en chauffage et climatisation basé sur les réseaux de neurones artificiels. A cause de la complexité de la simulation thermique dynamique et des ressources de calcul dont elle a besoin, ce modèle présentera une approche plus rapide permettant de faire une estimation préliminaire des besoins d'un bâtiment type sans passer par l'interface de DesignBuilder.

1. Méthodologie

Le schéma ci-dessous explicite l'approche de réalisation d'une telle modélisation :



2. Collecte de données

Afin de bien concevoir notre système, nous avons besoin de construire une base de données de la manière suivante :

- Créer un fichier (.idf) de bâtiment depuis l'interface graphique de DesignBuilder aux dimensions de base (20mx10mx3.5m) avec un taux de vitrage des murs de 10% et une construction de murs conforme à la RTCM et la même que le BDA de base.

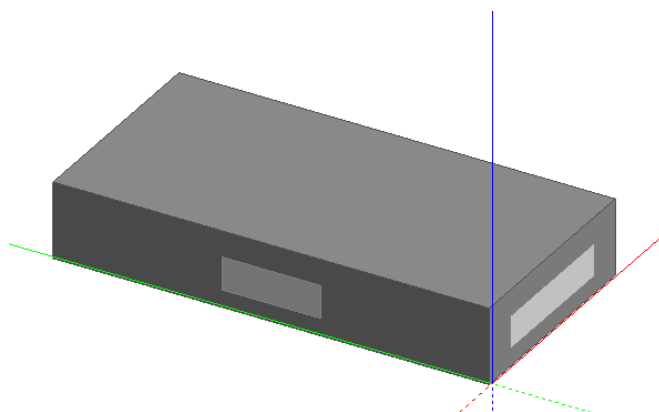


Figure 27: Bâtiment de base pour les simulations

- Créer plusieurs fichiers (.idf) dans le Cloud à l'aide d'une analyse paramétrique des variables initiaux du bâtiment (longueur, largeur, hauteur, orientation, taux de vitrage).
- Extraire les résultats des simulations depuis les rapports d'EnergyPlus, à savoir : le besoin en chauffage et le besoin en climatisation. Le code utilisé est inclus dans l'annexe A.
- La transformation des données initiaux aux données finaux, à savoir : la surface des murs, la surface de la toiture, la surface totale, la compacité relative.

La variation de ces paramètres est faite en respectant les valeurs réelles possibles dans la construction.

Le code utilisé pour toute la procédure de collecte de données des simulations sur Cloud est présenté sur l'annexe A de ce document.

Le tableau suivant montre les premiers 10 valeurs obtenues depuis la simulation sur un total de 1050 résultats.

Surface murs (m ²)	Surface toiture (m ²)	Surface totale (m ²)	Hauteur (m)	Compacité relative	Orientation (°)	Vitrage (%)	Climatisation (kWh/an)	Chauffage (kWh/an)
210	200	610	3,5	0,171948805	0	0,1	12380,98	3587,87
210	200	610	3,5	0,171948805	0	0,15	10701,25	3330,77
210	200	610	3,5	0,171948805	0	0,2	9377,16	3152,68
210	200	610	3,5	0,171948805	0	0,25	8295,99	3024,26
210	200	610	3,5	0,171948805	0	0,3	7403,74	2927,41
210	200	610	3,5	0,171948805	0	0,35	6662,48	2853,71
210	200	610	3,5	0,171948805	0	0,4	6038,92	2796,92
420	200	820	7	0,203049446	0	0,1	20975,66	4733,81
420	200	820	7	0,203049446	0	0,15	17696,7	4209,74
420	200	820	7	0,203049446	0	0,2	15236,44	3859,87

Table 37: 10 premiers résultats de simulation

Le tableau ci-après explicite les désignations respectives des variables que nous avons considérées dans notre étude.

variable	Désignation
X1	Surface des murs (m²)
X2	Surface de la toiture (m²)
X3	Surface totale (m²)
X4	Hauteur (m)
X5	Compacité relative
X6	Orientation(°)
X7	Taux de vitrage
Y1	Besoin en climatisation (kWh/an)
Y2	Besoin en chauffage (kWh/an)

Table 38: Les variables et leurs désignations

La compacité d'un bâtiment est définie par le rapport de son volume sur sa surface. Ainsi la compacité relative est égale à la compacité du bâtiment sur la compacité d'une sphère ayant le même volume que le bâtiment.

3. Constitution du modèle empirique

Elle est composée de trois sous-étapes qu'on essayera d'expliciter dans ce qui suit :

3.1. Normalisation des données

En effet, comme nous avons fait une analyse de plusieurs données hétérogènes, avec des unités différentes et des valeurs minimales et maximales différentes pour chaque variable, nous devons les normaliser afin d'avoir une bonne régression non linéaire, chose qui est incluse automatiquement dans la fonction **normalize()** du package **sklearn** de **Python**.

3.2. Construction du réseau de neurones

Le schéma ci-dessous donne l'architecture de notre réseau : il est composé de 7 entrées (X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7), deux couches de neurones, et 2 sorties(Y1,Y2) (les besoins en chauffage et climatisation).

Nous avons choisi deux couches cachées de neurones, la première avec 4 neurones et la secondes avec 2 neurones.

3.3. Entraînement à l'apprentissage

Une fois que nous avons choisi l'architecture du réseau de neurones, nous devons déterminer les autres paramètres ajustables du modèle que sont les poids qui permettent de connecter les entrées aux neurones cachées et les neurones cachées aux neurones de sortie. Le processus d'ajustement de ces paramètres est de telle sorte que le réseau soit en mesure d'approcher la relation fonctionnelle sous-jacente entre les 7 entrées et les deux cibles ; ce qui est connu sous le nom d'apprentissage. C'est au cours de ce processus que le réseau de neurones va apprendre à modéliser les données par des exemples (les 1050 résultats de simulation qu'on a fait).

Bien qu'il existe différentes manières de réaliser l'apprentissage des réseaux de neurones, la plupart d'entre elles utilisent des algorithmes numériques qui sont en mesure d'effectuer la tâche au cours d'un nombre fini d'itérations. Nous avons recours à ces algorithmes itératifs essentiellement en raison de la nature fortement non-linéaire des modèles de réseau de neurones pour lesquels une solution en forme fermée n'est généralement pas disponible. Un algorithme d'apprentissage itératif va ajuster graduellement les poids du réseau de neurones de telle sorte que pour toute donnée d'entrée, le réseau de neurones est en mesure de produire une sortie aussi proche que possible de l'output.

Ensuite, il faudra optimiser les poids via un algorithme d'optimisation. Pour notre cas, nous avons opté pour l'algorithme de **rétro propagation du gradient** qui permet de calculer le gradient de l'erreur pour chaque neurone d'un réseau de neurones, de la dernière couche vers la première. Une définition de cet algorithme est donnée en **annexe G**.

Le code de ce RNA est présenté dans **l'annexe B**.

Les figures ci-dessous montrent l'évolution de la précision et l'erreur quadratique durant l'entraînement et le test :

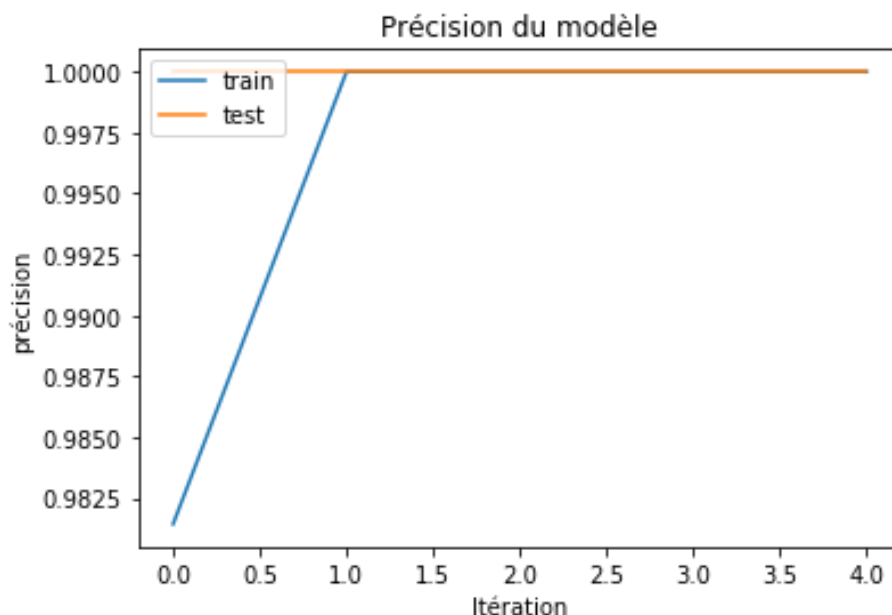


Figure 28: Précision du RNA

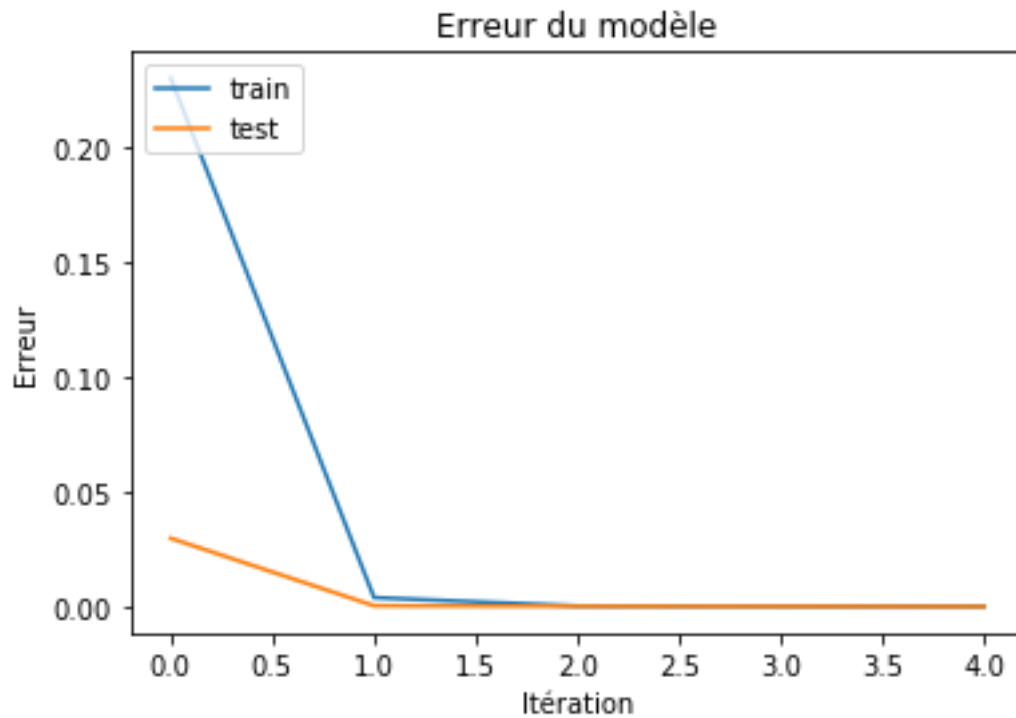


Figure 29: Erreur du RNA

Le réseau de neurones est ainsi créé, il faudra le valider avec des données dont on connaît les résultats.

On le testant avec une valeur de départ on a eu une erreur quadratique moyenne de 1.11×10^{-4}

4. Résultats et discussion

Après exécution du programme (voir l'annexe B), les données sont importées à partir du fichier csv après on construit le modèle pour l'entraîner et finalement le tester sur une valeur d'entraînement.

• Commentaires

- ✓ L'erreur obtenue est une erreur très acceptable. Elle reflète le bon entraînement et le bon choix minimal des couches de du RNA.

- ✓ Le programme reste un outil d'approximation première pour les projets et ne présente en aucun cas une substitution d'une STD détaillée par logiciels spécialisés.

Conclusion

Dans cette partie on a développé un programme basé sur les réseaux de neurones et la recherche paramétrique dans les simulations capable de donner une première estimation des besoins en chauffage et climatisation, elle trouve usage pour vérifier grossièrement la consommation d'un design d'un bâtiment nouveau ou existant sans passer par les logiciels de simulation ni en passant par des bilans. Une autre utilisation est l'optimisation, en adaptant le code pour faire des itérations sur l'espaces des valeurs de variables voulues et de minimiser les valeurs calculées de besoins par des algorithmes génétiques par exemple.

Conclusion générale

Au terme de ce projet intitulé «Simulation et optimisation Thermique et Acoustique de Bâtiment Commercial pour Certification HQE », nous avons traité les principaux objectifs cités au début, à savoir l'élaboration du bilan thermique, la simulation thermique dynamique du bâtiment et l'optimisation de la consommation énergétique de notre bâtiment pour le certifier HQE au niveau de la cible 4 d'énergie. Nous avons aussi traité la cible 9 de la HQE du confort acoustique par une simulation acoustique du bâtiment optimisé thermiquement.

Dans une première partie, nous avons commencé à collecter les données qui nous ont été utiles pour établir le bilan thermique et ensuite, on a pu obtenir les puissances nécessaires de la climatisation et du chauffage. L'objectif principal dans cette partie était d'évaluer la consommation énergétique de référence qui se mesurait à 189365 kWh/an de toutes les zones du projet y compris celles des chambres froides.

Dans une deuxième partie, nous avons entamé l'optimisation du bâtiment, tout d'abord à travers la recherche de l'isolation la plus performante sur le plan économique et énergétique et l'orientation idéale, ensuite nous avons fait recours à l'exploitation de l'énergie solaire que présente le site durant l'année ce a fini par réduire la consommation totale du BDA de 50%. Finalement, on a fait le bilan sur les points obtenus pour la certification.

Dans le chapitre sur l'acoustique on a pu réaliser une simulation acoustique suivant les dernières normes en vigueur, ce qui nous a permis de proposer facilement les meilleures mesures pour rendre le bâtiment encore plus conforme au confort acoustique des gens.

Finalement, on a proposé une modélisation énergétique de bâtiment à l'aide des réseaux de neurones à partir de données simples et qui permette de prédire les besoins en chauffage et climatisation de toute résidence ayant les mêmes ou proches caractéristiques. Ce qui a permis de créer un programme capable d'être exploitée par la suite dans la phase de conception ou de recherche d'idées dans des projets de construction.

Il serait aussi intéressant d'avoir étudié la totalité des modules du moteur de simulation thermique dynamique du logiciel DesignBuilder, notamment la partie d'éclairage et de CFD (Computational Fluid Dynamics), pour pouvoir effectuer des études plus détaillées et rigoureuses concernant d'autres niches d'économies d'énergies.

BIBLIOGRAPHIE

- Référentiel d'Evaluation de la Performance Environnementale de Bâtiment non résidentiels
- PLAN SECTORIEL « ECO-CONSTRUCTION ET BÂTIMENT DURABLE » : MAROC, Ministère délégué chargé de l'Environnement et al. , Mars 2016
- Manuel de DesignBuilder
- Manuel de Carrier
- Aide-mémoire, Génie climatique, édité par DUNOD, 2012
- Memotech génie énergétique, CASTEILLA, 2010
- Réglementation F-GAS concernant les fluides frigorigènes
- Nouvelle Réglementation Acoustique
- A. Tsanas, A. Xifara. (2012). "Accurate quantitative estimation of energy performance of residential buildings using statistical machine learning tools" , Energy and Buildings, Vol. 49, pp. 560-567
- La norme ASHRAE 90.1 d'efficacité énergétique

WEBGRAPHIE

- http://www.topbladi.com/banques/caisse_depot_gestion.htm
- www.one.org.ma
- <http://www.archilink.com/~FM/ALFA-DDQE/FOV7-0011B181/>
- <http://www.energieplus-lesite.be>
- <http://www.batisim.net/>
- <http://www.toutsurlisolation.com/>
- <https://unmethours.com>
- <http://www.archimedia.ma/avis-paroles-dexperts/construction-durable-/20111-exigences-croissantes-du-marche-marocain-de-la-construction>
- <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15568>
- <http://www.batisim.net/>
- www.designbuilder.co.uk/
- <http://www.toutsurlisolation.com>
- <http://www.acouphile.fr>

Annexes

Annexe A : Code d'extraction des résultats de simulations

➤ [Fichier main.py](#)

```
from eppy import modeleditor
from eppy.modeleditor import IDF
import pandas as pd
import re
import os
import subprocess
from eppy.results import readhtml
from glob import glob
import multiprocessing
from time import time
from geometry_utils import *
iddfile = "Energy+.idd"
IDF.setiddname(iddfile)

#variables utilisées
city=[" casa "]
orientation=[0, 90, 180]
lengths=[10,30,50,70,90]
widths=[20,40,60,80,100]
heights=[3.5,7]
fenestration=[0.1,0.15,0.2,0.25,0.3,0.35,0.4]
fname=[]
for f in city:
    fname.append(f+".idf")
weather=["weather/"+w+".epw" for w in city]
total= len(fname)*len(orientation)*len(lengths)*len(widths)*len(heights)*len(fenestration)

#fonction de génération de fichiers
def batch():
    t_id=[]
    city_id=[]
    length=[]
    width=[]
    height=[]
    window=[]
    orient=[]
    i=1
    for fname1 in fname:
        idf1 = IDF('baseline/'+fname1)
        for orientation1 in orientation:
            for length1 in lengths:
```

```
for width1 in widths:
    for height1 in heights:
        for fenes in fenestration:
            idf1.idfobjects["ZONE"][[0].Direction_of_Relative_North=orientation1
            idf1=surfaces(idf1, x=length1, y=width1, z=height1)
            idf1=windows(idf1, p=fenes)
            city1=re.search('(.*)idf',fname1).group(1)
            t_id.append(i)
            city_id.append(city1)
            length.append(length1)
            width.append(width1)
            height.append(height1)
            window.append(fenes)
            orient.append(orientation1)
            idf1.saveas('idf_files/'+city1+str(i)+'.idf')
            print(str(i)+"/"+str(total))
            i+=1
data_raw={'id':t_id,
          'city': city_id,
          'length':length,
          'width': width,
          'height': height,
          'orientation':orient,
          'window_ratio': window
          }
df=pd.DataFrame(data_raw)
df.to_csv("model_inputs.csv",index=False)

#fonction de simulation
def simulate(fname):
    subprocess.call("EnergyPlus -d sim_result -p "+fname+" -w weather/"+re.search("([a-z]+)([0-9]+).idf",fname).group(1)+".epw -r idf_files/"+fname, shell=True)

#fonction de simulation parallèle
def multi_simulation(n_files=None):
    begin=time()
    pool = multiprocessing.Pool(processes=multiprocessing.cpu_count())
    if n_files==None:
        files = os.listdir('idf_files/')
    else:
        files = os.listdir("idf_files/")[0:n_files]
    r = pool.map_async(simulate, files)
    r.wait()
    print("Finished in: "+str(time()-begin))

#fonction d'extraction des résultats
def results():
```

```
t_id=[]
cooling=[]
heating=[]
files=glob('sim_result/*.htm')
i=1
for file1 in files:
    filehandle = open(file1, 'r').read()
    htables = readhtml.titletable(filehandle)
    t_id.append(re.search('sim_result/([a-z]*)([0-9]*).idf(.*)\.htm',file1).group(2))
    cooling.append(htables[3][1][-1][4])
    heating.append(htables[3][1][-1][5])
    print(str(i)+"-"+str(total))
    i=i+1
data_raw={'id':t_id,
          'cooling': cooling,
          'heating': heating
          }
df=pd.DataFrame(data_raw)
df.to_csv("model_outputs.csv",index=False)

#fonction de résultat final
def join_final():
    inputs=pd.read_csv('model_inputs.csv')
    outputs=pd.read_csv('model_outputs.csv')
    df=inputs.merge(outputs,on='id')
    df.to_csv("model_final.csv",index=False)

if __name__ == '__main__':
    batch()
    multi_simulation()
    results()
    join_final()
```

[Fichier geometry_utils.py](#)

```
from math import sqrt
#fonction de generation d'une surface
def surface_util(surface,x1=0,y1=0,z1=0,x2=0,y2=0,z2=0,x3=0,y3=0,z3=0,x4=0,y4=0,z4=0):
    surface.Vertex_1_Xcoordinate=x1
    surface.Vertex_1_Ycoordinate=y1
    surface.Vertex_1_Zcoordinate=z1
    surface.Vertex_2_Xcoordinate=x2
    surface.Vertex_2_Ycoordinate=y2
    surface.Vertex_2_Zcoordinate=z2
    surface.Vertex_3_Xcoordinate=x3
    surface.Vertex_3_Ycoordinate=y3
```

```
surface.Vertex_3_Zcoordinate=z3
surface.Vertex_4_Xcoordinate=x4
surface.Vertex_4_Ycoordinate=y4
surface.Vertex_4_Zcoordinate=z4
return surface
```

#fonction de génération de toutes les surfaces

```
def surfaces(batiment, x=10, y=20, z=3.5):
    surfaces=batiment.idfobjects["BUILDINGSURFACE:DETAILED"]
    surfaces[0]=surface_util(surfaces[0], x1=x, y3=y, x4=x, y4=y)
    surfaces[1]=surface_util(surfaces[1], z1=z, x2=x, z2=z, x3=x, y3=y, z3=z, y4=y, z4=z)
    surfaces[2]=surface_util(surfaces[2], x1=x, x2=x, y2=y, x3=x, y3=y, z3=z, x4=x, z4=z)
    surfaces[3]=surface_util(surfaces[3], x1=x, y1=y, y2=y, y3=y, z3=z, x4=x, y4=y, z4=z)
    surfaces[4]=surface_util(surfaces[4], y1=y, z3=z, y4=y, z4=z)
    surfaces[5]=surface_util(surfaces[5], x2=x, x3=x, z3=z, z4=z)
return batiment
```

#fonction de generation d'une fenêtre

```
def window_util(s, w, p):
    w.Vertex_1_Xcoordinate = s.Vertex_1_Xcoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_4_Xcoordinate+s.Vertex_2_Xcoordinate- 2*s.Vertex_1_Xcoordinate)/2
    w.Vertex_1_Ycoordinate = s.Vertex_1_Ycoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_4_Ycoordinate+s.Vertex_2_Ycoordinate- 2*s.Vertex_1_Ycoordinate)/2
    w.Vertex_1_Zcoordinate= s.Vertex_1_Zcoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_4_Zcoordinate+s.Vertex_2_Zcoordinate- 2*s.Vertex_1_Zcoordinate)/2
    w.Vertex_2_Xcoordinate= s.Vertex_2_Xcoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_1_Xcoordinate+s.Vertex_3_Xcoordinate- 2*s.Vertex_2_Xcoordinate)/2
    w.Vertex_2_Ycoordinate= s.Vertex_2_Ycoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_1_Ycoordinate+s.Vertex_3_Ycoordinate- 2*s.Vertex_2_Ycoordinate)/2
    w.Vertex_2_Zcoordinate= s.Vertex_2_Zcoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_1_Zcoordinate+s.Vertex_3_Zcoordinate- 2*s.Vertex_2_Zcoordinate)/2
    w.Vertex_3_Xcoordinate= s.Vertex_3_Xcoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_2_Xcoordinate+s.Vertex_4_Xcoordinate- 2*s.Vertex_3_Xcoordinate)/2
    w.Vertex_3_Ycoordinate= s.Vertex_3_Ycoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_2_Ycoordinate+s.Vertex_4_Ycoordinate- 2*s.Vertex_3_Ycoordinate)/2
    w.Vertex_3_Zcoordinate= s.Vertex_3_Zcoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_2_Zcoordinate+s.Vertex_4_Zcoordinate- 2*s.Vertex_3_Zcoordinate)/2
    w.Vertex_4_Xcoordinate= s.Vertex_4_Xcoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_3_Xcoordinate+s.Vertex_1_Xcoordinate- 2*s.Vertex_4_Xcoordinate)/2
    w.Vertex_4_Ycoordinate= s.Vertex_4_Ycoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_3_Ycoordinate+s.Vertex_1_Ycoordinate- 2*s.Vertex_4_Ycoordinate)/2
    w.Vertex_4_Zcoordinate= s.Vertex_4_Zcoordinate +
    sqrt(p)*(s.Vertex_3_Zcoordinate+s.Vertex_1_Zcoordinate- 2*s.Vertex_4_Zcoordinate)/2
return w
```

#fonction de génération de toutes les fenêtres

```
def windows(batiment, p=0.10):
```

```
surfaces=batiment.idfobjects["BUILDINGSURFACE:DETAILED"]  
windows=batiment.idfobjects["FENESTRATIONSURFACE:DETAILED"]  
for i in range(2,6):  
    windows[i-2]=window_util(surfaces[i],windows[i-2], p)  
return batiment
```

ANNEXE B : Entraînement et test du RNA

```
import numpy as np
import pandas as pd
from keras.models import Sequential
from keras.layers import Dense
from sklearn.preprocessing import normalize
from sklearn.metrics import mean_squared_error
import matplotlib.pyplot as plt

#Lecture des données
def load_data():
    print('Loading data...')
    data=pd.read_csv('data.csv',encoding = "ISO-8859-1").as_matrix()
    X=normalize(data[:,0:7])
    y=normalize(data[:,7:9])
    return X,y

#Structure du modèle
def dnn():
    model = Sequential()
    model.add(Dense(4,input_dim=7,init='normal'))
    model.add(Dense(2))
    model.compile(loss='mean_squared_error',optimizer='rmsprop', metrics=['accuracy'])
    return model
seed = 7
np.random.seed(seed)
X, y = load_data()
model=dnn()

#Entraînement du modèle
history = model.fit(X, y, validation_split=0.33, epochs=5, batch_size=5, verbose=0)
print(history.history.keys())

# Graph de la précision
plt.plot(history.history['acc'])
plt.plot(history.history['val_acc'])
plt.title('Précision du modèle')
plt.ylabel('précision')
plt.xlabel('Itération')
plt.legend(['train', 'test'], loc='upper left')
plt.show()
```

```
# Graph de l'erreur
plt.plot(history.history['loss'])
plt.plot(history.history['val_loss'])
plt.title('Erreur du modèle')
plt.ylabel('Erreur')
plt.xlabel('Itération')
plt.legend(['train', 'test'], loc='upper left')
plt.show()

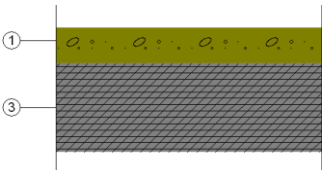
#Test avec la première simulation
mean_squared_error(model.predict(X[0,:].reshape(-1,7)), y[0,:].reshape(-1,2))
```

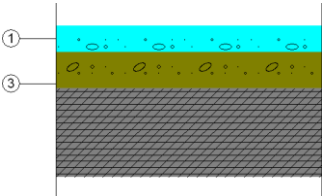
ANNEXE C : Description des matériaux et des éléments constructifs

1.- SYSTÈME ENVELOPPE

1.1.- Dallages et planchers sur vide sanitaire

1.1.1.- Dalles

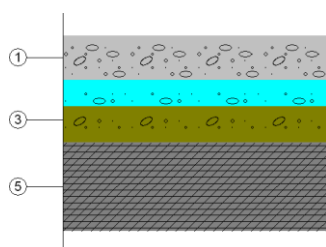
Plancher		Surface totale 327.73 m ²
	Liste des couches:	
	1 - Laine de roche 2 - Carrelage 3 - Béton lourd Épaisseur totale:	6 cm 2 cm 20 cm 28 cm
Caractérisation thermique	U: 0.22 W/(m ² ·K) (Pour un dallage de longueur caractéristique B' = 9.5 m)	
Détail de calcul (U)	Surface du plancher, A: 464.81 m ² Périmètre du plancher, P: 97.90 m Résistance thermique du plancher, R _f : 1.40 m ² ·K/W Sans isolant périmétrique Type de terrain: Sable semi-dense	
Caractérisation acoustique	Masse superficielle: 511.52 kg/m ² Masse superficielle de l'élément de base: 506.00 kg/m ² Caractérisation acoustique, R _w (C; C _{tr}): 59.4(-1; -7) dB Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, L _{n,w} : 69.4 dB	

Plancher - Chambre froide		Surface totale 68.37 m ²
	Liste des couches:	
	1 - Polyuréthane 2 - Laine de roche 3 - Carrelage 4 - Béton lourd Épaisseur totale:	6 cm 6 cm 2 cm 20 cm 34 cm
Caractérisation thermique	U: 0.14 W/(m ² ·K) (Pour un dallage de longueur caractéristique B' = 9.5 m)	
Détail de calcul (U)	Surface du plancher, A: 464.81 m ² Périmètre du plancher, P: 97.90 m Résistance thermique du plancher, R _f : 3.62 m ² ·K/W Sans isolant périmétrique Type de terrain: Sable semi-dense	
Caractérisation acoustique	Masse superficielle: 514.22 kg/m ²	

Masse superficielle de l'élément de base: 506.00 kg/m²
Caractérisation acoustique, $R_w(C; C_{tr})$: 59.4(-1; -7) dB
Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, $L_{n,w}$: 69.4 dB

Plancher - Chambre froide. laine de verre

Surface totale 9.65 m²



Liste des couches:

1 - laine de verre	10 cm
2 - Polyuréthane	6 cm
3 - Laine de roche	6 cm
4 - Carrelage	2 cm
5 - Béton lourd	20 cm
Épaisseur totale:	44 cm

Caractérisation thermique

U : 0.11 W/(m²·K)
(Pour un dallage de longueur caractéristique $B' = 9.5$ m)

Détail de calcul (U)

Surface du plancher, A : 464.81 m²
Périmètre du plancher, P : 97.90 m
Résistance thermique du plancher, R_f : 6.12 m²·K/W
Sans isolant périmétrique

Caractérisation acoustique

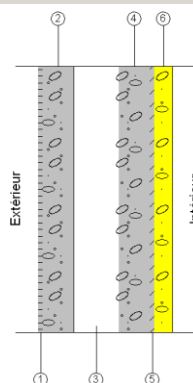
Type de terrain: Sable semi-dense
Masse superficielle: 515.42 kg/m²
Masse superficielle de l'élément de base: 506.00 kg/m²
Caractérisation acoustique, $R_w(C; C_{tr})$: 59.4(-1; -7) dB
Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, $L_{n,w}$: 69.4 dB

1.2.- Murs de façades

1.2.1.- Partie opaque des parois verticales extérieures

Mur extérieur

Surface totale 382.24 m²



Liste des couches:

1 - Enduit extérieur	1 cm
2 - Brique à 6 trous	7 cm
3 - Lame d'air non ventilée	10 cm
4 - Brique à 6 trous	7 cm
5 - Enduit intérieur	1 cm
6 - Laine de verre	4 cm
Épaisseur totale:	30 cm

Caractérisation thermique U : 0.47 W/(m²·K)

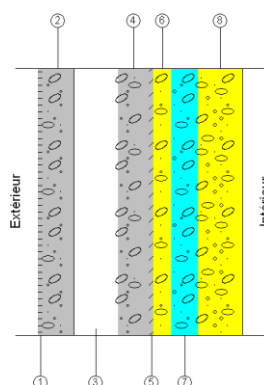
Caractérisation acoustique Masse superficielle: 293.90 kg/m²

Masse superficielle de l'élément de base: 146.71 kg/m²

Caractérisation acoustique, $R_w(C; C_{tr})$: 39.2(-1; -3) dB

Mur extérieur

Surface totale 132.60 m²



Liste des couches:

1 - Enduit extérieur	1 cm
2 - Brique à 6 trous	7 cm
3 - lame d'air non ventilée	10 cm
4 - Brique à 6 trous	7 cm
5 - Enduit intérieur	1 cm
6 - Laine de verre	4 cm
7 - Polyuréthane	6 cm
8 - Polystyrène expansé	10 cm
Épaisseur totale:	46 cm

Caractérisation thermique U: 0.16 W/(m²·K)

Caractérisation acoustique Masse superficielle: 297.45 kg/m²

Masse superficielle de l'élément de base: 146.71 kg/m²

Caractérisation acoustique, $R_w(C; C_{tr})$: 39.2(-1; -3) dB

1.2.2.- Baies de façade

Porte

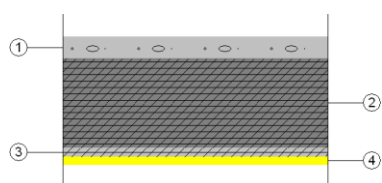
Dimensions	Largeur x Hauteur: 150 x 220 cm	nombre d'unités: 1
	Largeur x Hauteur: 180 x 220 cm	nombre d'unités: 2
	Largeur x Hauteur: 130 x 220 cm	nombre d'unités: 1
	Largeur x Hauteur: 114.2 x 220 cm	nombre d'unités: 1
	Largeur x Hauteur: 100 x 220 cm	nombre d'unités: 3
Caractérisation thermique	Transmittance thermique, U: 2.00 W/(m ² ·K)	
	Absorptivité, α_s : 0.6 (couleur intermédiaire)	
Caractérisation acoustique	Isolation acoustique, $R_w(C; C_{tr})$: 21 (-1;-2) dB	
	Absorption, $\alpha_{500Hz} = 0.03$; $\alpha_{1000Hz} = 0.04$; $\alpha_{2000Hz} = 0.05$	

1.3.- Couvertures

1.3.1.- Partie opaque des planchers hauts horizontaux

Toiture

Surface totale 323.77 m²



Liste des couches:

1 - Béton lourd	5 cm
2 - Hourdis de 6 en béton	20 cm
3 - Carrelage	2 cm
4 - Laine de verre	2 cm
Épaisseur totale:	29 cm

Caractérisation thermique

U refroidissement: 0.89 W/(m²·K)

U chauffage: 0.95 W/(m²·K)

Caractérisation acoustique

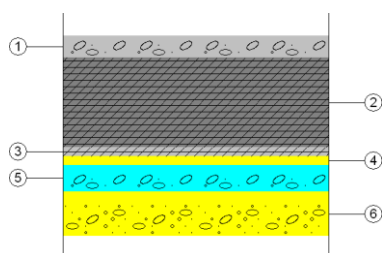
Masse superficielle: 541.84 kg/m²

Masse superficielle de l'élément de base: 541.60 kg/m²

Caractérisation acoustique, R_w(C; C_{tr}): 60.5(-1; -7) dB

Chambre froide - Toiture

Surface totale 25.93 m²



Liste des couches:

1 - Béton lourd	5 cm
2 - Hourdis de 6 en béton	20 cm
3 - Carrelage	2 cm
4 - Laine de verre	2 cm
5 - Polyuréthane	6 cm
6 - Polystyrène expansé	10 cm
Épaisseur totale:	45 cm

Caractérisation thermique

U refroidissement: 0.19 W/(m²·K)

U chauffage: 0.20 W/(m²·K)

Caractérisation acoustique

Masse superficielle: 545.39 kg/m²

Masse superficielle de l'élément de base: 541.60 kg/m²

Caractérisation acoustique, R_w(C; C_{tr}): 60.5(-1; -7) dB

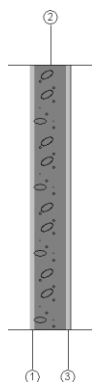
2.- SYSTÈME DISTRIBUTIF ET SÉPARATIF

2.1.- Parois verticales intérieures

2.1.1.- Partie opaque des parois verticales intérieures

Mur intérieur

Surface totale 593.44 m²



Liste des couches:

1 - Enduit intérieur	1 cm
2 - Brique à 6 trous	7 cm
3 - Enduit intérieur	1 cm
Épaisseur totale:	9 cm

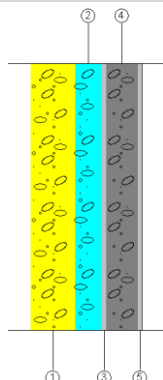
Caractérisation thermique $U: 1.52 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Caractérisation acoustique Masse superficielle: $163.71 \text{ kg}/\text{m}^2$

Caractérisation acoustique, $R_w(C; C_{tr}): 41.0(-1; -4) \text{ dB}$

Mur intérieur

Surface totale 48.87 m^2



Liste des couches:

1 - Polystyrène expansé	10 cm
2 - Polyuréthane	6 cm
3 - Enduit intérieur	1 cm
4 - Brique à 6 trous	7 cm
5 - Enduit intérieur	1 cm
Épaisseur totale:	25 cm

Caractérisation thermique $U: 0.21 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

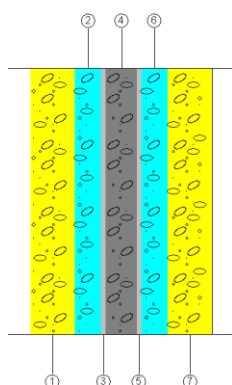
Caractérisation acoustique Masse superficielle: $167.26 \text{ kg}/\text{m}^2$

Masse superficielle de l'élément de base: $163.71 \text{ kg}/\text{m}^2$

Caractérisation acoustique, $R_w(C; C_{tr}): 41.0(-1; -4) \text{ dB}$

Mur intérieur

Surface totale 68.78 m^2



Liste des couches:

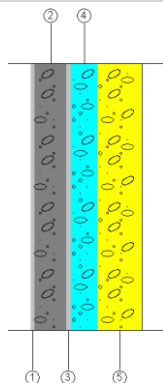
1 - Polystyrène expansé	10 cm
2 - Polyuréthane	6 cm
3 - Enduit intérieur	1 cm
4 - Brique à 6 trous	7 cm
5 - Enduit intérieur	1 cm
6 - Polyuréthane	6 cm
7 - Polystyrène expansé	10 cm
Épaisseur totale:	41 cm

Caractérisation thermique $U: 0.12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Caractérisation acoustique Masse superficielle: 170.81 kg/m²
 Masse superficielle de l'élément de base: 163.71 kg/m²
 Caractérisation acoustique, $R_w(C; C_{tr})$: 41.0(-1; -4) dB

Mur intérieur

Surface totale 75.88 m²



Liste des couches:

1 - Enduit intérieur	1 cm
2 - Brique à 6 trous	7 cm
3 - Enduit intérieur	1 cm
4 - Polyuréthane	6 cm
5 - Polystyrène expansé	10 cm
Épaisseur totale:	25 cm

Caractérisation thermique U: 0.21 W/(m²·K)

Caractérisation acoustique Masse superficielle: 167.26 kg/m²
 Masse superficielle de l'élément de base: 163.71 kg/m²
 Caractérisation acoustique, $R_w(C; C_{tr})$: 41.0(-1; -4) dB

2.1.2.- Ouvertures verticales intérieures

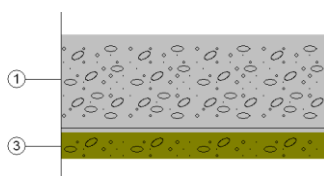
Porte

Dimensions	Largeur x Hauteur: 72.5 x 190 cm	nombre d'unités: 13
	Largeur x Hauteur: 80 x 190 cm	nombre d'unités: 7
	Largeur x Hauteur: 100 x 190 cm	nombre d'unités: 3
	Largeur x Hauteur: 57.6 x 210 cm	nombre d'unités: 1
	Largeur x Hauteur: 94 x 220 cm	nombre d'unités: 2
	Largeur x Hauteur: 72.5 x 199 cm	nombre d'unités: 1
	Largeur x Hauteur: 94 x 190 cm	nombre d'unités: 1
	Largeur x Hauteur: 52 x 190 cm	nombre d'unités: 1
	Largeur x Hauteur: 70.4 x 190 cm	nombre d'unités: 1
	Largeur x Hauteur: 130 x 190 cm	nombre d'unités: 1
	Largeur x Hauteur: 130 x 220 cm	nombre d'unités: 3
	Largeur x Hauteur: 100 x 220 cm	nombre d'unités: 4
	Largeur x Hauteur: 80 x 220 cm	nombre d'unités: 2
	Largeur x Hauteur: 170.9 x 220 cm	nombre d'unités: 1
Caractérisation thermique	Transmittance thermique, U: 2.00 W/(m ² ·K)	
	Absorptivité, α_s : 0.6 (couleur intermédiaire)	
Caractérisation acoustique	Isolation acoustique, $R_w(C; C_{tr})$: 21 (-1; -2) dB	
	Absorption, $\alpha_{500\text{Hz}} = 0.03$; $\alpha_{1000\text{Hz}} = 0.04$; $\alpha_{2000\text{Hz}} = 0.05$	

2.2.- Parois horizontales intérieures

Plancher intermédiaire

Surface totale 327.79 m²



Liste des couches:

1 - Béton lourd	20 cm
2 - Carrelage	2 cm
3 - Laine de roche	6 cm
Épaisseur totale:	28 cm

Caractérisation thermique

U refroidissement: 0.62 W/(m²·K)

U chauffage: 0.57 W/(m²·K)

Caractérisation acoustique

Masse superficielle: 511.52 kg/m²

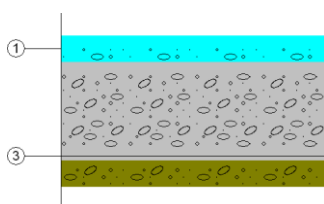
Masse superficielle de l'élément de base: 506.00 kg/m²

Caractérisation acoustique, $R_w(C; C_{tr})$: 59.4(-1; -7) dB

Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, $L_{n,w}$: 69.4 dB

Plancher intermédiaire - Chambre froide

Surface totale 25.93 m²



Liste des couches:

1 - Polyuréthane	6 cm
2 - Béton lourd	20 cm
3 - Carrelage	2 cm
4 - Laine de roche	6 cm
Épaisseur totale:	34 cm

Caractérisation thermique

U refroidissement: 0.26 W/(m²·K)

U chauffage: 0.25 W/(m²·K)

Caractérisation acoustique

Masse superficielle: 514.22 kg/m²

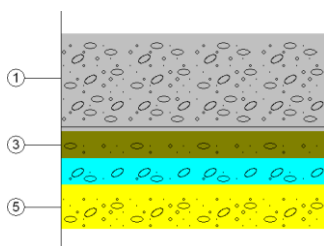
Masse superficielle de l'élément de base: 506.00 kg/m²

Caractérisation acoustique, $R_w(C; C_{tr})$: 59.4(-1; -7) dB

Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, $L_{n,w}$: 69.4 dB

Chambre froide - Plancher intermédiaire

Surface totale 78.02 m²



Liste des couches:

1 - Béton lourd	20 cm
2 - Carrelage	2 cm
3 - Laine de roche	6 cm
4 - Polyuréthane	6 cm
5 - Polystyrène expansé	10 cm
Épaisseur totale:	44 cm

Caractérisation thermique

U refroidissement: 0.18 W/(m²·K)

Caractérisation acoustique

U chauffage: 0.17 W/(m²·K)

Masse superficielle: 515.07 kg/m²

Masse superficielle de l'élément de base: 506.00 kg/m²

Caractérisation acoustique, R_w(C; C_{tr}): 59.4(-1; -7) dB

Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, L_{n,w}: 69.4 dB

3.- MATÉRIAUX

Couches					
Matériau	e	ρ	λ	RT	Cp
Béton lourd	5	2300	1.75	0.0286	922
Béton lourd	20	2300	1.75	0.1143	922
Brique à 6 trous	7	1853	0.184	0.3804	1224
Brique à 6 trous	7	1853	0.184	0.3804	760
Carrelage	2	2300	1.705	0.0117	698
Enduit extérieur	1	1700	1.15	0.0087	1001
Enduit intérieur	1	1700	1.15	0.0087	1001
Enduit intérieur	1	1700	1.15	0.0087	760
Hourdis de 6 en béton	20	1903	0.539	0.3711	814
Laine de roche	6	92	0.047	1.2766	840
laine de verre	10	12	0.04	2.5	840
Laine de verre	2	12	0.04	0.5	840
Laine de verre	4	12	0.04	1	840
Polystyrène expansé	10	8.5	0.056	1.7857	1450
Polyuréthane	6	45	0.027	2.2222	1000
Abréviations utilisées					
e	Épaisseur (cm)		RT	Résistance thermique (m ² ·K/W)	
ρ	Densité (kg/m ³)		Cp	Chaleur spécifique (J/(kg·K))	
λ	Conductivité thermique (W/(m·K))				

Annexe D : Rapport des résultats acoustiques

Sont présentés ici les résultats les plus défavorables de l'isolation acoustique calculés dans le bâtiment, classés selon les différentes combinaisons de locaux émetteurs et récepteurs présents dans la norme en vigueur.

Les résultats finaux affichés sont accompagnés des valeurs intermédiaires les plus significatives. Le détail des résultats obtenus est présenté dans le chapitre de justification des résultats de ce même document, pour chacune des entrées dans les tableaux de résultats.

Isolation au bruit aérien intérieur au moyen d'éléments de séparation verticaux

Id	Local de réception	Local d'émission	$[R_w + C]_{Dd}$ (dBA)	$[R_w + C]'$ (dBA)	S_S (m²)	V (m³)	$D_{nT,A}$ (dBA)	
							exigé	projet
	type1 - type1							
1	Local produits maintenance (Rez-de-Chaussée)	Zone tampon	22.7	22.6	5.34	16.9	45	23
2	Zone personnel (Sous-sol)	Salle de réunion	40.0	37.7	11.26	263.1	45	46

Notes:
Id: Identificateur de la fiche de calcul détaillé pour l'entrée des résultats dans le tableau
 $[R_w + C]_{Dd}$: Indice d'affaiblissement acoustique pour la transmission directe
 $[R_w + C]'$: Indice d'affaiblissement acoustique apparent
 S_S : Surface de séparatif commun aux deux locaux
V: Volume du local récepteur
 $D_{nT,A}$: Isolement acoustique standardisé pondéré

Isolation au bruit aérien intérieur au moyen d'éléments de séparation horizontaux

Id	Local de réception	Local d'émission	$[R_w + C]_{Dd}$ (dBA)	$[R_w + C]'$ (dBA)	S_S (m ²)	V (m ³)	$D_{nT,A}$ (dBA)	
							exigé	projet
	type1 - type1							
3	Quai de chargement (Rez-de-Chaussée)	Salle de réunion	58.4	48.7	4.49	14.9	45	49
<div>Notes:</div> <div><i>Id</i>: Identificateur de la fiche de calcul détaillé pour l'entrée des résultats dans le tableau</div> <div><i>$[R_w + C]_{Dd}$</i>: Indice d'affaiblissement acoustique pour la transmission directe</div> <div><i>$[R_w + C]'$</i>: Indice d'affaiblissement acoustique apparent</div> <div><i>S_S</i>: Surface de séparatif commun aux deux locaux</div> <div><i>V</i>: Volume du local récepteur</div> <div><i>$D_{nT,A}$</i>: Isolement acoustique standardisé pondéré</div>								

Niveau de pression du bruit de choc

Id	Local de réception	Local d'émission	L _{n,w,Dd} (dB)	L _{n,w,Df} (dB)	L' _{n,w} (dB)	V (m³)	L' _{nT,w} (dB)	
							exigé	projet
	type1 - type1							
1	Quai de chargement (Rez-de-Chaussée)	Zone tampon	---	78.3	14.9	65	82	
2	Zone personnel (Sous-sol)	Réserve boucherie	69.4	72.5	74.2	263.1	65	65

Notes:

Id: Identificateur de la fiche de calcul détaillé pour l'entrée des résultats dans le tableau
L_{n,w,Dd}: Niveau global de pression de bruit des impacts normalisé pour la transmission directe
L_{n,w,Df}: Niveau global de pression de bruit des impacts normalisé pour la transmission indirecte
L'_{n,w}: Niveau global de pression de bruit de choc normalisé
V: Volume du local récepteur
L'_{nT,w}: Niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé

Isolation au bruit aérien extérieur

Id	Local de réception	% ouvertures	[R _w + C _{tr}] _{Dd} (dBA)	[R _w + C _{tr}]' (dBA)	S _S (m ²)	V (m ³)	D _{2m,nT,Atr} (dBA)	
							exigé	projet
1	Quai de chargement (type1), Rez-de-Chaussée	52.6	21.7	21.5	4.19	14.9	30	22
2	Zone matériel 2 (type1), Sous-sol	0.0	36.2	34.4	12.06	19.3	30	32

Notes:

Id: Identificateur de la fiche de calcul détaillé pour l'entrée des résultats dans le tableau
% ouvertures: Pourcentage de l'aire d'ouverture par rapport à l'aire totale
[R_w + C_{tr}]_{Dd}: Indice d'affaiblissement acoustique pour la transmission directe
[R_w + C_{tr}]': Indice d'affaiblissement acoustique apparent
S_S: Surface totale en contact avec l'extérieur
V: Volume du local récepteur
D_{2m,nT,Atr}: Isolement acoustique standardisé pondéré

➤ Justification des résultats de calcul de l'isolation acoustique

1.- Isolation acoustique au bruit aérien entre locaux

Est présenté ci-après le calcul détaillé de l'estimation de l'isolation acoustique au bruit aérien entre couples de locaux émetteur - récepteur, pour les valeurs les plus défavorables présentées dans les tableaux de résumé du chapitre précédent, selon le modèle simplifié pour la transmission structurale décrit dans en EN 12354-1:2000 (ISO 15712-1:2005), en utilisant les indices pondérés des éléments impliqués pour connaître l'indice d'affaiblissement acoustique apparent, selon les procédures de pondération décrites dans la norme EN ISO 717-1.

Afin que la justification de calcul et la présentation des résultats du chapitre précédent correspondent, les fiches suivantes sont numérotées conformément à la numérotation des entrées dans les tableaux de résumé des résultats.

1 Isolement acoustique standardisé adapté au bruit rose, $D_{nT,A}$

Local de réception:	Local produits maintenance (Salle technique)	type1
Situation du local récepteur:		Rez-de-Chaussée
Local d'émission:	Zone tampon (Salle technique)	type1
Surface de séparatif commun aux deux locaux, S_s:		5.3 m ²
Volume du local récepteur, V:		16.9 m ³

$$D_{nT,A} = R'_A + 10 \log \left(\frac{0.16 \cdot V}{T_0 \cdot S_s} \right) = 23 \text{ dBA} \geq 45 \text{ dBA}$$



= 22.6
dBA

Données d'entrée pour le calcul:





Élément séparatif

Élément structural basique	m (kg/m ²)	R_A (dBA)	Revêtement local d'émission	$\Delta R_{D,A}$ (dBA)	Revêtement local de réception	$\Delta R_{d,A}$ (dBA)	S_i (m ²)
Mur intérieur	164	40.0		0		0	2.48

Ouvertures verticales

Ouvertures en façade	R_w (dB)	C (dB)	R_A (dBA)	S_i (m ²)
Porte	21.0	-1	20.0	2.86

Éléments de flanc

	Élément structural basique	m (kg/m ²)	R _A (dBA)	Revêtement	ΔR _A (dBA)	L _f (m)	S _i (m ²)	Assemblages
F1	Mur intérieur	164	40.0		0	3.2	5.3	
f1	Mur intérieur	164	40.0		0			
F2	Mur intérieur	164	40.0		0	3.2	5.3	
f2	Mur intérieur	164	40.0		0			
F3	Plancher intermédiaire	506	58.4		0	1.7	5.3	
f3	Plancher intermédiaire	506	58.4		0			
F4	Toiture	542	59.5		0	1.7	5.3	
f4	Toiture	542	59.5		0			

Calcul de l'isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs:

Contribution directe, R_{Dd,A}:

Élément séparatif	R _{D,A} (dBA)	ΔR _{D,A} (dBA)	ΔR _{d,A} (dBA)	S _S (m ²)	S _i (m ²)	R _{Dd,A} (dBA)	τ _{Dd}
Mur intérieur	40.0	0	0	5.3	2.5	43.3	4.64628e-005
Porte	20.0		0	5.3	2.9	22.7	0.00535372
						22.7	0.00540018

Contribution de flanc à flanc, R_{Ff,A}:

Latéral	R _{F,A} (dBA)	R _{f,A} (dBA)	ΔR _{Ff,A} (dBA)	K _{Ff} (dB)	L _f (m)	S _i (m ²)	R _{Ff,A} (dBA)	S _i /S _S ·τ _{Ff}
1	40.0	40.0	0	5.7	3.2	5.3	47.9	1.62181e-005
2	40.0	40.0	0	5.7	3.2	5.3	47.9	1.62181e-005
3	58.4	58.4	0	0.2	1.7	5.3	63.7	4.2658e-007
4	59.5	59.5	0	-0.1	1.7	5.3	64.5	3.54813e-007
							44.8	3.32176e-005

Contribution de flanc à direct, R_{Fd,A}:

Latéral	R _{F,A} (dBA)	R _{d,A} (dBA)	ΔR _{Fd,A} (dBA)	K _{Fd} (dB)	L _f (m)	S _i (m ²)	R _{Fd,A} (dBA)	S _i /S _S ·τ _{Fd}
1	40.0	40.0	0	5.7	3.2	5.3	47.9	1.62181e-005
2	40.0	40.0	0	5.7	3.2	5.3	47.9	1.62181e-005
3	58.4	40.0	0	7.1	1.7	5.3	61.4	7.24436e-007
4	59.5	40.0	0	7.2	1.7	5.3	62.0	6.30957e-007
							44.7	3.37916e-005

Contribution de direct à flanc, $R_{Df,A}$:

Latéral	$R_{D,A}$ (dBA)	$R_{f,A}$ (dBA)	$\Delta R_{Df,A}$ (dBA)	K_{Df} (dB)	L_f (m)	S_i (m ²)	$R_{Df,A}$ (dBA)	$S_i/S_s \cdot \tau_{Df}$
1	40.0	40.0	0	5.7	3.2	5.3	47.9	1.62181e-005
2	40.0	40.0	0	5.7	3.2	5.3	47.9	1.62181e-005
3	40.0	58.4	0	7.1	1.7	5.3	61.4	7.24436e-007
4	40.0	59.5	0	7.2	1.7	5.3	62.0	6.30957e-007
							44.7	3.37916e-005

Indice d'affaiblissement acoustique apparent, adapté au bruit rose, R'_A :

	R'_A (dBA)	τ
$R_{Dd,A}$	22.7	0.00540018
$R_{Ff,A}$	44.8	3.32176e-005
$R_{Fd,A}$	44.7	3.37916e-005
$R_{Df,A}$	44.7	3.37916e-005
	22.6	0.00550098

Isolement acoustique standardisé adapté au bruit rose, $D_{nT,A}$:

R'_A (dBA)	V (m ³)	T_0 (s)	S_s (m ²)	$D_{nT,A}$ (dBA)
22.6	16.9	0.5	5.3	23

2 Isolement acoustique standardisé adapté au bruit rose, $D_{nT,A}$

Local de réception:	Zone personnel (Bureaux)	type1
Situation du local récepteur:		Sous-sol
Local d'émission:	Salle de réunion (Bureaux)	type1
Surface de séparatif commun aux deux locaux, S_s:		11.3 m ²
Volume du local récepteur, V:		263.1 m ³

$$D_{nT,A} = R'_A + 10 \log \left(\frac{0.16 \cdot V}{T_0 \cdot S_s} \right) = 46 \text{ dBA} \geq 45 \text{ dBA}$$








= 37.7
dBA

Données d'entrée pour le calcul:

Élément séparatif

Élément structural basique	m (kg/m ²)	R _A (dBA)	Revêtement local d'émission	ΔR _{D,A} (dBA)	Revêtement local de réception	ΔR _{d,A} (dBA)	S _i (m ²)
Mur intérieur	164	40.0		0		0	11.26

Éléments de flanc

	Élément structural basique	m (kg/m ²)	R _A (dBA)	Revêtement	ΔR _A (dBA)	L _f (m)	S _i (m ²)	Assemblages
F1	Mur intérieur	164	40.0		0	3.2	11.3	
f1	Mur intérieur	164	40.0		0			
F2	Sans flanc émetteur					3.2	11.3	
f2	Mur intérieur	164	40.0		0			
F3	Plancher	506	58.4		0	3.4	11.3	
f3	Plancher	506	58.4		0			
F4	Plancher intermédiaire	506	58.4		0	0.7	11.3	
f4	Plancher intermédiaire	506	58.4		0			
F5	Plancher intermédiaire	506	58.4		0	0.2	11.3	
f5	Plancher intermédiaire	506	58.4		0			

Calcul de l'isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs:

Contribution directe, R_{Dd,A}:

Élément séparatif	R _{D,A} (dBA)	ΔR _{D,A} (dBA)	ΔR _{d,A} (dBA)	S _S (m ²)	R _{Dd,A} (dBA)	τ _{Dd}
Mur intérieur	40.0	0	0	11.3	40.0	0.0001
					40.0	0.0001

Contribution de flanc à flanc, R_{Ff,A}:

Latéral	R _{F,A} (dBA)	R _{f,A} (dBA)	ΔR _{Ff,A} (dBA)	K _{Ff} (dB)	L _f (m)	S _i (m ²)	R _{Ff,A} (dBA)	S _i /S _S ·τ _{Ff}
1	40.0	40.0	0	5.7	3.2	11.3	51.1	7.76247e-006
3	58.4	58.4	0	0.2	3.4	11.3	63.8	4.16869e-007
4	58.4	58.4	0	1.7	0.7	11.3	72.1	6.16595e-008
5	58.4	58.4	0	6.4*	0.2	11.3	82.0	6.30957e-009
							50.8	8.24731e-006

Contribution de flanc à direct, R_{Fd,A}:

Latéral	$R_{F,A}$ (dBA)	$R_{d,A}$ (dBA)	$\Delta R_{Ff,A}$ (dBA)	K_{Ff} (dB)	L_f (m)	S_i (m ²)	$R_{Ff,A}$ (dBA)	$S_i/S_s \cdot \tau_{Ff}$
1	40.0	40.0	0	5.7	3.2	11.3	51.1	7.76247e-006
3	58.4	40.0	0	7.1	3.4	11.3	61.5	7.07946e-007
4	58.4	40.0	0	10.1	0.7	11.3	71.3	7.4131e-008
5	58.4	40.0	0	7.1	0.2	11.3	73.5	4.46684e-008
							50.7	8.58922e-006

Contribution de direct à flanc, $R_{Df,A}$:

Latéral	$R_{D,A}$ (dBA)	$R_{f,A}$ (dBA)	$\Delta R_{Df,A}$ (dBA)	K_{Df} (dB)	L_f (m)	S_i (m ²)	$R_{Df,A}$ (dBA)	$S_i/S_s \cdot \tau_{Df}$
1	40.0	40.0	0	5.7	3.2	11.3	51.1	7.76247e-006
2	40.0	40.0	0	-1.5*	3.2	11.3	43.9	4.0738e-005
3	40.0	58.4	0	7.1	3.4	11.3	61.5	7.07946e-007
4	40.0	58.4	0	10.1	0.7	11.3	71.3	7.4131e-008
5	40.0	58.4	0	7.1	0.2	11.3	73.5	4.46684e-008
							43.1	4.93272e-005

(*) Valeur minimale pour l'indice de réduction vibratoire, obtenue par des relations de longueur et de surface dans la liaison des éléments constructifs, conformément à l'équation 23 de EN 12354-1 (ISO 15712-1).

Transmission aérienne indirecte, $D_{n,s,A}$ * :

Local intermédiaire	$R_{G,F,A}$ (dBA)	S_F (m ²)	$R_{G,f,A}$ (dBA)	S_f (m ²)	A (m ²)	A_0 (m ²)	S_s (m ²)	C_{pos} (m ²)	$D_{n,s,A}$ (dBA)	τ_s
Bureau responsable	26.7	12.0	27.0	6.3	8.1	10	11.3	0	54.0	3.53528e-006
$D_{n,s,A}^* =$									54.5	3.53528e-006

Indice d'affaiblissement acoustique apparent, adapté au bruit rose, R'_A :

	R'_A (dBA)	τ
$R_{Dd,A}$	40.0	0.0001
$R_{Ff,A}$	50.8	8.24731e-006
$R_{Ff,A}$	50.7	8.58922e-006
$R_{Df,A}$	43.1	4.93272e-005
$D_{n,s,A}^*$	54.5	3.53528e-006
	37.7	0.000169699

Isolement acoustique standardisé adapté au bruit rose, $D_{nT,A}$:

R'_A (dBA)	V (m ³)	T_0 (s)	S_S (m ²)	$D_{nT,A}$ (dBA)
37.7	263.1	0.5	11.3	46

3 Isolement acoustique standardisé adapté au bruit rose, $D_{nT,A}$

Local de réception:	Quai de chargement (Salle technique)	type1
Situation du local récepteur:		Rez-de-Chaussée
Local d'émission:	Salle de réunion (Bureaux)	type1
Surface de séparatif commun aux deux locaux, S_S:		4.5 m ²
Volume du local récepteur, V:		14.9 m ³

$$D_{nT,A} = R'_A + 10 \log \left(\frac{0.16 \cdot V}{T_0 \cdot S_S} \right) = 49 \text{ dBA} \geq 45 \text{ dBA}$$







= 48.7
dBA

Données d'entrée pour le calcul:

Élément séparatif

Élément structural basique	m (kg/m ²)	R_A (dBA)	Revêtement local d'émission	$\Delta R_{D,A}$ (dBA)	Revêtement local de réception	$\Delta R_{d,A}$ (dBA)	S_i (m ²)
Plancher intermédiaire	506	58.4		0		0	4.49

Éléments de flanc

	Élément structural basique	m (kg/m ²)	R_A (dBA)	Revêtement	ΔR_A (dBA)	L_f (m)	S_i (m ²)	Assemblages
F1	Sans flanc émetteur							
f1	Mur intérieur	164	40.0		0	1.1	4.5	
F2	Mur extérieur	147	38.2		0			
f2	Mur extérieur	147	38.2		0	1.3	4.5	
F3	Plancher intermédiaire	506	58.4		0			
f3	Mur intérieur	164	40.0		0	3.4	4.5	
F4	Plancher intermédiaire	506	58.4		0			
f4	Mur intérieur	164	40.0		0	3.2	4.5	

Calcul de l'isolation acoustique au bruit aérien entre locaux intérieurs:

Contribution directe, $R_{Dd,A}$:

Élément séparatif	$R_{D,A}$ (dBA)	$\Delta R_{D,A}$ (dBA)	$\Delta R_{d,A}$ (dBA)	S_S (m ²)	$R_{Dd,A}$ (dBA)	τ_{Dd}
Plancher intermédiaire	58.4	0	0	4.5	58.4	1.44544e-006
					58.4	1.44544e-006

Contribution de flanc à flanc, $R_{Ff,A}$:

Latéral	$R_{F,A}$ (dBA)	$R_{f,A}$ (dBA)	$\Delta R_{Ff,A}$ (dBA)	K_{Ff} (dB)	L_f (m)	S_i (m ²)	$R_{Ff,A}$ (dBA)	$S_i/S_S \cdot \tau_{Ff}$
2	38.2	38.2	0	14.9	1.3	4.5	58.5	1.41254e-006
3	58.4	40.0	0	7.1	3.4	4.5	57.5	1.77828e-006
4	58.4	40.0	0	7.1	3.2	4.5	57.7	1.69824e-006
							53.1	4.88906e-006

Contribution de flanc à direct, $R_{Fd,A}$:

Latéral	$R_{F,A}$ (dBA)	$R_{d,A}$ (dBA)	$\Delta R_{Fd,A}$ (dBA)	K_{Fd} (dB)	L_f (m)	S_i (m ²)	$R_{Fd,A}$ (dBA)	$S_i/S_S \cdot \tau_{Fd}$
2	38.2	58.4	0	7.3	1.3	4.5	61.0	7.94328e-007
3	58.4	58.4	0	7.0*	3.4	4.5	66.6	2.18776e-007
4	58.4	58.4	0	1.6*	3.2	4.5	61.4	7.24436e-007
							57.6	1.73754e-006

Contribution de direct à flanc, $R_{Df,A}$:

Latéral	$R_{D,A}$ (dBA)	$R_{f,A}$ (dBA)	$\Delta R_{Df,A}$ (dBA)	K_{Df} (dB)	L_f (m)	S_i (m ²)	$R_{Df,A}$ (dBA)	$S_i/S_S \cdot \tau_{Df}$
1	58.4	40.0	0	4.4	1.1	4.5	59.5	1.12202e-006
2	58.4	38.2	0	7.3	1.3	4.5	61.0	7.94328e-007
3	58.4	40.0	0	7.1	3.4	4.5	57.5	1.77828e-006
4	58.4	40.0	0	7.1	3.2	4.5	57.7	1.69824e-006
							52.7	5.39287e-006

(*) Valeur minimale pour l'indice de réduction vibratoire, obtenue par des relations de longueur et de surface dans la liaison des éléments constructifs, conformément à l'équation 23 de EN 12354-1 (ISO 15712-1).

Indice d'affaiblissement acoustique apparent, adapté au bruit rose, R'_A :

	R'_A (dBA)	τ
$R_{Dd,A}$	58.4	1.44544e-006
$R_{Ff,A}$	53.1	4.88906e-006
$R_{Fd,A}$	57.6	1.73754e-006
$R_{Df,A}$	52.7	5.39287e-006
	48.7	1.34649e-005

Isolement acoustique standardisé adapté au bruit rose, $D_{nT,A}$:

R'_A (dBA)	V (m ³)	T_0 (s)	S_S (m ²)	$D_{nT,A}$ (dBA)
48.7	14.9	0.5	4.5	49

2.- Isolation acoustique au bruit de choc entre locaux

Est présenté ci-après le calcul détaillé de l'estimation de l'isolation acoustique au bruit d'impact entre couples de locaux émetteur - récepteur, pour les valeurs les plus défavorables présentées dans les tableaux de résumé du chapitre précédent, selon le modèle simplifié pour la transmission structurale décrit dans en EN 12354-2:2000 (ISO 15712-2:2005), en utilisant les indices pondérés des éléments impliqués pour connaître l'indice pondéré de niveau de pression acoustique apparente globale, selon les procédures de pondération décrites dans la norme EN ISO 717-2.

Afin que la justification de calcul et la présentation des résultats du chapitre précédent correspondent, les fiches suivantes sont numérotées conformément à la numérotation des entrées dans les tableaux de résumé des résultats.

1 Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, $L'_{nT,w}$

Local de réception:	Quai de chargement (Salle technique)	type1
Situation du local récepteur:		Rez-de-Chaussée
Local d'émission:	Zone tampon (Salle technique)	type1
Aire totale de l'élément excité, S_s:		11.4 m ²
Volume du local récepteur, V:		14.9 m ³

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10 \log \left(\frac{0.16 \cdot V}{A_0 \cdot T_0} \right) = 82 \text{ dB} \leq 65 \text{ dB}$$





$$= 78.3 \text{ dB}$$

Données d'entrée pour le calcul:

Élément excité par le bruit de choc

Élément structural basique	m (kg/m ²)	$L_{n,w}$ (dB)	R_w (dB)	Sol local d'émission	$\Delta L_{D,w}$ (dB)	Revêtement local de réception	$\Delta L_{d,w}$ (dB)	S_i (m ²)
Plancher intermédiaire	506	69.4	59.4		0		0	0.81

Éléments de flanc

	Élément structural basique	m (kg/m ²)	R_w (dB)	Revêtement	$\Delta L_{D,w}$ (dB)	$\Delta R_{f,w}$ (dB)	L_f (m)	S_i (m ²)	Assemblages
D1	Plancher intermédiaire	506	59.4		0	---	3.4	0.8	
f1	Plancher intermédiaire	506	59.4		---	0			
D2	Plancher intermédiaire	506	59.4		0	---	3.4	0.8	
f2	Mur intérieur	164	41.0		---	0			

Calcul de l'isolation acoustique au bruit de choc:

Contribution de direct à flanc, $L_{n,w,Df}$:

Latéral	$L_{n,w}$ (dB)	$\Delta L_{D,w}$ (dB)	$R_{D,w}$ (dB)	$R_{f,w}$ (dB)	$\Delta R_{f,w}$ (dB)	K_{Df} (dB)	L_f (m)	S_i (m ²)	$L_{n,w,Df}$ (dB)	$S_i/S_{S \cdot \tau_{Df}}$
1	69.4	0	59.4	59.4	0	7.1*	3.4	0.8	68.6	514893
2	69.4	0	59.4	41.0	0	7.1*	3.4	0.8	77.8	4.28269e+006
									78.3	4.79759e+006

(*) Valeur minimale pour l'indice de réduction vibratoire, obtenue par des relations de longueur et de surface dans la liaison des éléments constructifs, conformément à l'équation 23 de EN 12354-1 (ISO 15712-1).

Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, $L'_{n,w}$:

	$L'_{n,w}$ (dB)	τ
$L_{n,w,Df}$	78.3	6.75003e+007
	78.3	6.75003e+007

Niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé, $L'_{nT,w}$:

$L'_{n,w}$ (dB)	V (m ³)	A_0 (m ²)	T_0 (s)	$L'_{nT,w}$ (dB)
78.3	14.9	10	0.5	82

2 Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, $L'_{nT,w}$

Local de réception:	Zone personnel (Bureaux)	type1
Situation du local récepteur:		Sous-sol
Local d'émission:	Réserve boucherie (Salle technique)	type1
Aire totale de l'élément excité, S_s:		6.8 m ²
Volume du local récepteur, V:		263.1 m ³

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10 \log \left(\frac{0.16 \cdot V}{A_0 \cdot T_0} \right) = 65 \text{ dB} \leq 65 \text{ dB}$$









$$= 74.2 \text{ dB}$$

Données d'entrée pour le calcul:

Élément excité par le bruit de choc

Élément structural basique	m (kg/m ²)	L _{n,w} (dB)	R _w (dB)	Sol local d'émission	ΔL _{D,w} (dB)	Revêtement local de réception	ΔL _{d,w} (dB)	S _i (m ²)
Plancher intermédiaire	506	69.4	59.4	Chambre froide	0		0	6.83

Éléments de flanc

	Élément structural basique	m (kg/m ²)	R _w (dB)	Revêtement	ΔL _{D,w} (dB)	ΔR _{f,w} (dB)	L _f (m)	S _i (m ²)	Assemblages
D1	Plancher intermédiaire	506	59.4	Chambre froide	0	---	0.2	6.8	
f1	Mur intérieur	164	41.0		---	0			
D2	Plancher intermédiaire	506	59.4	Chambre froide	0	---	1.8	6.8	
f2	Plancher intermédiaire	506	59.4		---	0			
D3	Plancher intermédiaire	506	59.4	Chambre froide	0	---	0.4	6.8	
f3	Mur intérieur	164	41.0		---	0			
D4	Plancher intermédiaire	506	59.4	Chambre froide	0	---	1.2	6.8	
f4	Mur intérieur	164	41.0		---	0			
D5	Plancher intermédiaire	506	59.4	Chambre froide	0	---	3.8	6.8	
f5	Plancher intermédiaire	506	59.4		---	0			
D6	Plancher intermédiaire	506	59.4	Chambre froide	0	---	3.7	6.8	
f6	Plancher intermédiaire	506	59.4		---	0			

Calcul de l'isolation acoustique au bruit de choc:

Contribution directe, L_{n,w,Dd}:

Élément séparatif	L _{n,w} (dB)	ΔL _{D,w} (dB)	ΔL _{d,w} (dB)	S _s (m ²)	L _{n,w,Dd} (dB)	τ _{Dd}
Plancher intermédiaire	69.4	0	0	6.8	69.4	8.70964e+006
					69.4	8.70964e+006

Contribution de direct à flanc, L_{n,w,Df}:

Latéral	L _{n,w} (dB)	ΔL _{D,w} (dB)	R _{D,w} (dB)	R _{f,w} (dB)	ΔR _{f,w} (dB)	K _{Df} (dB)	L _f (m)	S _i (m ²)	L _{n,w,Df} (dB)	S _i /S _s ·τ _{Df}
1	69.4	0	59.4	41.0	0	4.4	0.2	6.8	57.9	616595
2	69.4	0	59.4	59.4	0	0.2	1.8	6.8	63.4	2.18776e+006
3	69.4	0	59.4	41.0	0	4.4	0.4	6.8	62.1	1.62181e+006
4	69.4	0	59.4	41.0	0	4.4	1.2	6.8	66.8	4.7863e+006
5	69.4	0	59.4	59.4	0	0.2	3.8	6.8	66.6	4.57088e+006

6	69.4	0	59.4	59.4	0	0.9*	3.7	6.8	65.9	3.89045e+006
									72.5	1.76738e+007

(*) Valeur minimale pour l'indice de réduction vibratoire, obtenue par des relations de longueur et de surface dans la liaison des éléments constructifs, conformément à l'équation 23 de EN 12354-1 (ISO 15712-1).

Niveau global de pression de bruit de choc normalisé, $L'_{n,w}$:

	$L'_{n,w}$ (dB)	τ
$L_{n,w,Dd}$	69.4	1.14815e-007
$L_{n,w,Df}$	72.5	1.76738e+007
	74.2	1.76738e+007

Niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé, $L'_{nT,w}$:

$L'_{n,w}$ (dB)	V (m ³)	A ₀ (m ²)	T ₀ (s)	$L'_{nT,w}$ (dB)
74.2	263.1	10	0.5	65

3.- Isolation acoustique au bruit aérien contre le bruit de l'extérieur

Est présenté ci-après le calcul détaillé de l'estimation de l'isolation acoustique au bruit aérien contre le bruit de l'extérieur, pour les valeurs les plus défavorables présentées dans les tableaux de résumé du chapitre précédent, selon le modèle simplifié pour la transmission structurale décrit dans en EN 12354-3:2000 (ISO 15712-3:2005), en utilisant les indices pondérés des éléments impliqués pour connaître l'indice d'affaiblissement acoustique apparent, selon les procédures de pondération décrites dans la norme EN ISO 717-1.

Afin que la justification de calcul et la présentation des résultats du chapitre précédent correspondent, les fiches suivantes sont numérotées conformément à la numérotation des entrées dans les tableaux de résumé des résultats.

1 Isolement acoustique standardisé adapté au bruit route, $D_{2m,nT,Atr}$

Type de local récepteur:	Quai de chargement (type1)
Situation du local récepteur:	Rez-de-Chaussée
Orientation de la façade:	269.1° (Ouest)
Surface totale en contact avec l'extérieur, S_s :	4.2 m ²
Volume du local récepteur, V :	14.9 m ³

$$D_{2m,nT,Atr} = R'_{Atr} + \Delta L_{fs} + 10 \log \left(\frac{V}{6T_0 S_s} \right) = 22 \text{ dBA} \geq 30 \text{ dBA}$$



= 21.5
dBA

Données d'entrée pour le calcul:


Façade




Élément structural basique	m (kg/m ²)	$R_{A,tr}$ (dBA)	Revêtement intérieur	$\Delta R_{d,A,tr}$ (dBA)	S_i (m ²)
Mur extérieur	147	36.2		0	1.99

Ouvertures en façade

Ouvertures en façade	R_w (dB)	C_{tr} (dB)	$R_{A,tr}$ (dBA)	S_i (m ²)
Porte	21.0	-2	19.0	2.20

Éléments de flanc

	Élément structural basique	m (kg/m ²)	$R_{A,tr}$ (dBA)	Revêtement	$\Delta R_{A,tr}$ (dBA)	L_f (m)	S_i (m ²)	Assemblages
F1	Mur extérieur	147	36.2		0	3.2	4.2	

f1	Mur intérieur	164	37.0		0			
F2	Mur extérieur	147	36.2		0	3.2	4.2	
f2	Mur intérieur	164	37.0		0			
F3	Mur extérieur	147	36.2		0	1.3	4.2	
f3	Plancher intermédiaire	506	52.4		0			
F4	Sans flanc émetteur					1.3	4.2	
f4	Toiture	542	53.5		0			

Calcul de l'isolation acoustique au bruit aérien dans les façades, les couvertures et les sols en contact avec l'air extérieur:

Contribution directe, $R_{Dd,A,tr}$:

Élément séparatif	$R_{D,A,tr}$ (dBA)	$\Delta R_{Dd,A,tr}$ (dBA)	$R_{Dd,A,tr}$ (dBA)	S_s (m ²)	S_i (m ²)	$R_{Dd,m,A,tr}$ (dBA)	τ_{Dd}
Mur extérieur	36.2	0	36.2	4.2	2.0	39.4	0.000113804
Porte	19.0		19.0	4.2	2.2	21.8	0.00661675
						21.7	0.00673055

Contribution de flanc à flanc, $R_{Ff,A,tr}$:

Latéral	$R_{F,A,tr}$ (dBA)	$R_{f,A,tr}$ (dBA)	$\Delta R_{Ff,A,tr}$ (dBA)	K_{Ff} (dBA)	L_f (m)	S_i (m ²)	$R_{Ff,A,tr}$ (dBA)	$S_i/S_s \cdot \tau_{Ff}$
1	36.2	37.0	0	5.7	3.2	4.2	43.5	4.46684e-005
2	36.2	37.0	0	5.7	3.2	4.2	43.5	4.46684e-005
3	36.2	52.4	0	7.3	1.3	4.2	56.7	2.13796e-006
							40.4	9.14747e-005

Contribution de flanc à direct, $R_{Fd,A,tr}$:

Latéral	$R_{F,A,tr}$ (dBA)	$R_{d,A,tr}$ (dBA)	$\Delta R_{Fd,A,tr}$ (dBA)	K_{Fd} (dBA)	L_f (m)	S_i (m ²)	$R_{Fd,A,tr}$ (dBA)	$S_i/S_s \cdot \tau_{Fd}$
1	36.2	36.2	0	6.4	3.2	4.2	43.8	4.16869e-005
2	36.2	36.2	0	6.4	3.2	4.2	43.8	4.16869e-005
3	36.2	36.2	0	14.9	1.3	4.2	56.2	2.39883e-006
							40.7	8.57727e-005

Contribution de direct à flanc, $R_{Df,A,tr}$:

Latéral	$R_{D,A,tr}$ (dBA)	$R_{f,A,tr}$ (dBA)	$\Delta R_{Df,A,tr}$ (dBA)	K_{Df} (dBA)	L_f (m)	S_i (m ²)	$R_{Df,A,tr}$ (dBA)	$S_i/S_s \cdot \tau_{Df}$
1	36.2	37.0	0	5.7	3.2	4.2	43.5	4.46684e-005

2	36.2	37.0	0	5.7	3.2	4.2	43.5	4.46684e-005
3	36.2	52.4	0	7.3	1.3	4.2	56.7	2.13796e-006
4	36.2	53.5	0	5.5	1.3	4.2	55.4	2.88403e-006
							40.3	9.43587e-005

Indice d'affaiblissement acoustique apparent, adapté au bruit route, $R'_{A,tr}$:

	$R'_{A,tr}$ (dBA)	τ
$R_{Dd,A,tr}$	21.7	0.00673055
$R_{Ff,A,tr}$	40.4	9.14747e-005
$R_{Fd,A,tr}$	40.7	8.57727e-005
$R_{Df,A,tr}$	40.3	9.43587e-005
	21.5	0.00700216

Isolement acoustique standardisé adapté au bruit route, $D_{nT,A,tr}$:

$R'_{A,tr}$ (dBA)	ΔL_{fs} (dBA)	V (m ³)	T_0 (s)	S_S (m ²)	$D_{nT,A,tr}$ (dBA)
21.5	0	14.9	0.5	4.2	22

2 Isolement acoustique standardisé adapté au bruit route, $D_{2m,nT,Atr}$

Type de local récepteur:	Zone matériel 2 (type1)
Situation du local récepteur:	Sous-sol
Orientation de la façade:	269.1° (Ouest)
Surface totale en contact avec l'extérieur, S_S :	12.1 m ²
Volume du local récepteur, V:	19.3 m ³

$$D_{2m,nT,Atr} = R'_{Atr} + \Delta L_{fs} + 10 \log \left(\frac{V}{6T_0 S_S} \right) = 32 \text{ dBA} \geq 30 \text{ dBA}$$





= 34.4
dBA

Données d'entrée pour le calcul:

Façade

Élément structural basique	m (kg/m ²)	$R_{A,tr}$ (dBA)	Revêtement intérieur	$\Delta R_{d,A,tr}$ (dBA)	S_i (m ²)
Mur extérieur	147	36.2		0	12.06

Éléments de flanc

	Élément structural basique	m (kg/m ²)	R _{A,tr} (dBA)	Revêtement	ΔR _{A,tr} (dBA)	L _f (m)	S _i (m ²)	Assemblages
F1	Sans flanc émetteur							
f1	Mur extérieur	147	36.2		0	3.2	12.1	
F2	Mur extérieur	147	36.2		0	3.2	12.1	
f2	Mur intérieur	164	37.0		0			
F3	Sans flanc émetteur							
f3	Plancher	506	52.4		0	3.7	12.1	
F4	Sans flanc émetteur							
f4	Plancher intermédiaire	506	52.4		0	3.5	12.1	

Calcul de l'isolation acoustique au bruit aérien dans les façades, les couvertures et les sols en contact avec l'air extérieur:

Contribution directe, R_{Dd,A,tr}:

Élément séparatif	R _{D,A,tr} (dBA)	ΔR _{Dd,A,tr} (dBA)	R _{Dd,A,tr} (dBA)	S _S (m ²)	S _i (m ²)	R _{Dd,m,A,tr} (dBA)	τ _{Dd}
Mur extérieur	36.2	0	36.2	12.1	12.1	36.2	0.000239883
						36.2	0.000239883

Contribution de flanc à flanc, R_{Ff,A,tr}:

Latéral	R _{F,A,tr} (dBA)	R _{f,A,tr} (dBA)	ΔR _{Ff,A,tr} (dBA)	K _{Ff} (dBA)	L _f (m)	S _i (m ²)	R _{Ff,A,tr} (dBA)	S _i /S _S ·τ _{Ff}
2	36.2	37.0	0	5.7	3.2	12.1	48.0	1.58489e-005
							48.0	1.58489e-005

Contribution de flanc à direct, R_{Fd,A,tr}:

Latéral	R _{F,A,tr} (dBA)	R _{d,A,tr} (dBA)	ΔR _{Fd,A,tr} (dBA)	K _{Fd} (dBA)	L _f (m)	S _i (m ²)	R _{Fd,A,tr} (dBA)	S _i /S _S ·τ _{Fd}
2	36.2	36.2	0	6.4	3.2	12.1	48.3	1.47911e-005
							48.3	1.47911e-005

Contribution de direct à flanc, R_{Df,A,tr}:

Latéral	R _{D,A,tr} (dBA)	R _{f,A,tr} (dBA)	ΔR _{Df,A,tr} (dBA)	K _{Df} (dBA)	L _f (m)	S _i (m ²)	R _{Df,A,tr} (dBA)	S _i /S _S ·τ _{Df}
---------	------------------------------	------------------------------	--------------------------------	--------------------------	-----------------------	-------------------------------------	-------------------------------	---

1	36.2	36.2	0	-0.5*	3.2	12.1	41.4	7.24436e-005
2	36.2	37.0	0	5.7	3.2	12.1	48.0	1.58489e-005
3	36.2	52.4	0	5.1	3.7	12.1	54.5	3.54813e-006
4	36.2	52.4	0	5.1	3.5	12.1	54.8	3.31131e-006
40.2								9.5152e-005

(*) Valeur minimale pour l'indice de réduction vibratoire, obtenue par des relations de longueur et de surface dans la liaison des éléments constructifs, conformément à l'équation 23 de EN 12354-1 (ISO 15712-1).

Indice d'affaiblissement acoustique apparent, adapté au bruit route, $R'_{A,tr}$:

	$R'_{A,tr}$ (dBA)	τ
$R_{Dd,A,tr}$	36.2	0.000239883
$R_{Ff,A,tr}$	48.0	1.58489e-005
$R_{Fd,A,tr}$	48.3	1.47911e-005
$R_{Df,A,tr}$	40.2	9.5152e-005
	34.4	0.000365675

Isolement acoustique standardisé adapté au bruit route, $D_{nT,A,tr}$:

$R'_{A,tr}$ (dBA)	ΔL_{fs} (dBA)	V (m ³)	T_0 (s)	S_s (m ²)	$D_{nT,A,tr}$ (dBA)
34.4	0	19.3	0.5	12.1	32

➤ CONDITIONNEMENT ACOUSTIQUE

1.- Calcul de la durée de réverbération

1.1.- Résultats obtenus pour la durée de réverbération

Durée de réverbération

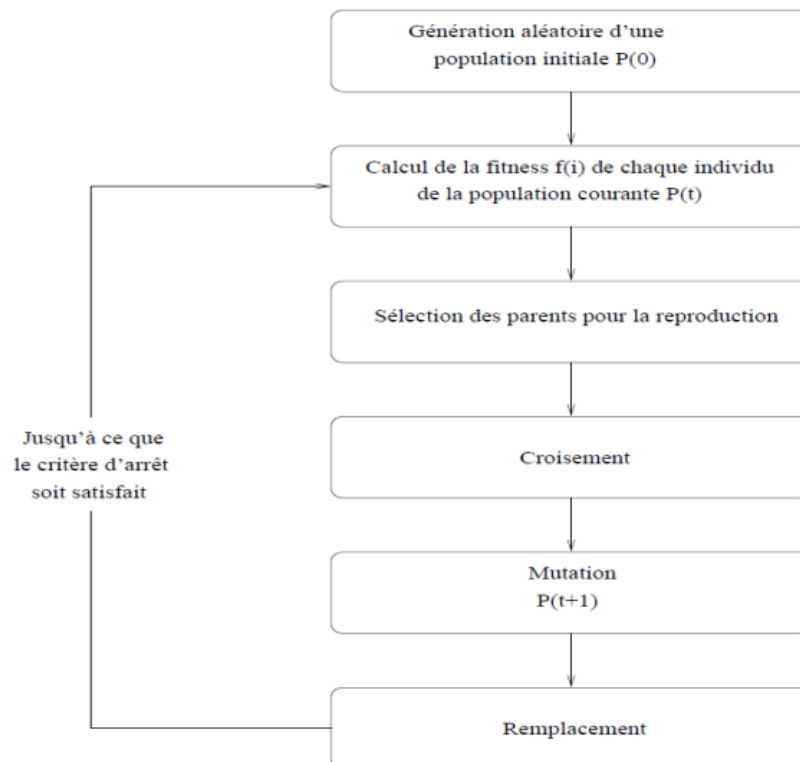
		V	A	T
Id	Local	(m ³)	(m ²)	(s)
1	Zone personnel (Bureaux), Niveau 0	263.1	34.98	1.2
2	Zone matériel (Salle technique), Niveau 0	176.3	21.29	1.3
3	LT maintenance (Salle technique), Niveau 0	21.4	3.76	0.9
4	Chambre froide 2 (Salle technique), Niveau 0	29.3	4.02	1.3
5	Chambre froide 1 (Salle technique), Niveau 0	28.0	3.80	1.3
6	Réserve produits secs (Salle technique), Niveau 0	60.5	6.61	1.6
7	Réserve produits laitiers (Salle technique), Niveau 0	76.2	6.89	1.9
8	Réserve fruits et légumes (Salle technique), Niveau 0	39.1	4.88	1.4

9	Bureau magasinier (Bureaux), Niveau 0	31.1	5.39	0.9
10	Zone de stockage (Salle technique), Niveau 0	67.8	10.34	1.0
11	Salle de réunion (Bureaux), Niveau 0	40.9	5.51	1.2
12	Zone matériel 2 (Salle technique), Niveau 0	19.3	2.95	1.0
13	Bureau responsable (Bureaux), Niveau 0	56.4	8.01	1.1
14	Espace caisses (Bureaux), Niveau 1	29.2	1.82	2.4
15	Local produits maintenance (Salle technique), Niveau 1	16.9	1.66	1.6
16	Zone tampon (Salle technique), Niveau 1	111.4	5.13	3.3
17	Local déchets (Salle technique), Niveau 1	34.2	1.73	3.0
18	Réserve boucherie (Salle technique), Niveau 1	21.1	3.45	1.1
19	Salle de préparation et de découpe (Salle technique), Niveau 1	32.5	4.35	1.3
20	Réserve poissonnerie (Salle technique), Niveau 1	23.9	4.21	1.0
21	Quai de chargement (Salle technique), Niveau 1	14.9	1.58	1.5
<p>Notes:</p> <p><i>Id: Pourcentage de l'aire d'ouverture par rapport à l'aire totale</i></p> <p><i>V: Volume du local</i></p> <p><i>A: Aire d'absorption équivalente</i></p> <p><i>T: Durée de réverbération</i></p>				

Annexe E : Généralités sur les algorithmes génétiques

• Principe de base

Les algorithmes génétiques simulent le processus d'évolution d'une population. A partir d'une population de N solutions du problème représentant des individus, on applique des opérateurs simulant les interventions sur le génome tel que le croisement (cross-over) ou la mutation pour arriver à une population de solutions de mieux en mieux adaptée au problème. Cette adaptation est évaluée grâce à une fonction coût.



• Les opérateurs génétiques

1. L'opérateur d'initialisation

Cet opérateur est utilisé pour générer la population initiale de l'algorithme génétique. La population initiale doit contenir des chromosomes qui soient bien répartis dans l'espace des solutions pour fournir à l'algorithme génétique un matériel génétique varié. La façon la plus simple est de générer aléatoirement les chromosomes.

2. L'opérateur de sélection

La sélection tend à augmenter l'importance des bonnes solutions par rapport aux mauvaises. C'est une heuristique utilisée par l'algorithme génétique : les bonnes solutions sont supposées être les plus prometteuses pour la génération de descendants. Il existe plusieurs méthodes de

sélection. Les plus connues sont la sélection proportionnelle à la fonction fitness, la sélection sur le rang et la sélection en tournoi. L'indice de qualité (fitness), aussi appelé indice de performance, est une mesure abstraite permettant de classer les chromosomes.

3. L'opérateur de croisement (crossover)

L'opérateur de croisement combine le matériel de un ou plusieurs parents pour obtenir un ou plusieurs enfants. Il existe différents types de croisement, nous allons brièvement présenter les trois principaux : Le croisement un point détermine aléatoirement un point de coupure et échange la deuxième partie des deux parents. Le croisement deux points (qui peut être étendu à points) possède 2 points (ou) de coupures qui sont déterminés aléatoirement. Enfin le crossover uniforme échange chaque bit avec une probabilité fixé à $\frac{1}{2}$.

4. L'opérateur de mutation

Le rôle de la mutation consiste à faire apparaître de nouveaux gènes. Cet opérateur introduit une diversité nécessaire à l'exploration de l'espace de recherche en permettant de générer des points dans des régions a priori sans intérêt .La mutation la plus simple sur un chromosome change un bit de façon aléatoire. Un chromosome a une probabilité de mutation d'un taux .

5. Remplacement

Cette dernière étape du processus itératif consiste en l'incorporation des nouvelles solutions dans la population courante. Les nouvelles solutions sont ajoutées à la population courante en remplacement (total ou partiel) des anciennes solutions. Généralement, les meilleures solutions remplacent les plus mauvaises ; il en résulte une amélioration de la population. Lorsque la nouvelle population n'est constituée que de nouvelles solutions, on parle d'algorithme génétique générationnel.

- Pseudo code de l'algorithme NSGA-IIr

Algorithm 1 Pseudocode of NSGA-IIr.

```
1: Input:  $n$  // the population size
2:  $P \leftarrow \text{Random\_Population}()$  //  $P$  = population
3:  $Q \leftarrow \emptyset$  //  $Q$  = auxiliar population
4: while not Termination\_Condition() do
5:   for  $i \leftarrow 1$  to  $(n)$  do
6:      $\text{randValue} \leftarrow \text{rand}()$ ;
7:     if  $(\text{randValue} \leq 1/3)$  then
8:        $\text{parent} \leftarrow \text{Selection1}(P)$ ; // only one parent is selected
9:        $\text{offspring} \leftarrow \text{PolynomialMutation}(\text{parent})$ ;
10:    else
11:      if  $(\text{randValue} \leq 2/3)$  then
12:         $\text{parents} \leftarrow \text{Selection2}(P)$ ; // two parents are selected
13:         $\text{offspring} \leftarrow \text{SBX}(\text{parents})$ ;
14:      else
15:         $\text{parents} \leftarrow \text{Selection3}(P)$ ; // three parents are selected
16:         $\text{offspring} \leftarrow \text{DE}(\text{population}[i], \text{parents})$ ;
17:      end if
18:    end if
19:    Evaluate\_Fitness( $\text{offspring}$ );
20:    Insert( $\text{offspring}, Q$ );
21:  end for
22:   $R \leftarrow P \cup Q$ 
23:  Ranking\_And\_Crowding( $R$ );
24:   $P \leftarrow \text{Select\_Best\_Individuals}(R)$ 
25: end while
26: Return  $P$ ;
```

Annexe F : Généralités sur la STD

• Définition et principes

C'est un outil d'analyse dynamique qui permet d'évaluer de manière détaillée les besoins énergétiques et le confort thermique d'un bâtiment, d'hiver comme d'été. La simulation permet une réelle optimisation des coûts d'investissement et de fonctionnement des bâtiments et de leur système, notamment par une meilleure prise en compte des besoins énergétiques et des contraintes climatiques.

Son but est de réduire les besoins énergétiques de l'enveloppe ainsi que la taille des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation. Elle permet également d'améliorer le confort, la qualité d'usage du bâtiment et le coût global sur toute sa durée de vie.

Le principe d'une STD en général est le suivant : la construction et modélisation du bâtiment sous le logiciel puis l'analyse de ses interactions avec son environnement au pas de temps horaire tout au long de l'année, avec des données météo locales, en fonction de ses caractéristiques et de ses matériaux.

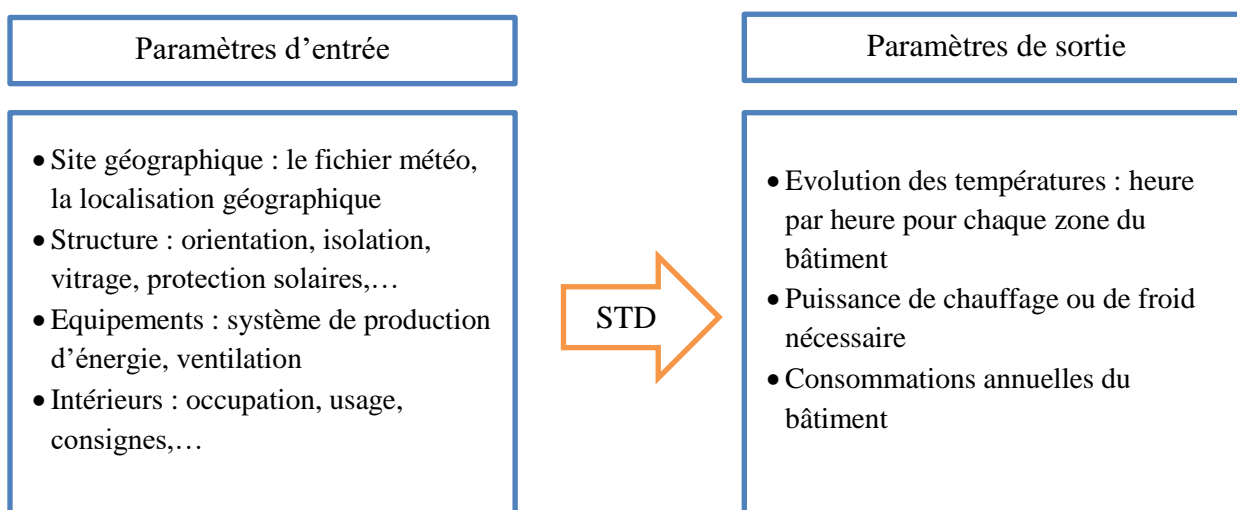


Figure: Entrées et sorties de la STD

• Le logiciel de calcul (DesignBuilder)

DesignBuilder est un logiciel de modélisation et de simulation thermique dynamique, possédant une interface graphique reposant sur le moteur de calcul EnergyPlus. Il offre de nombreuses fonctionnalités non disponibles simultanément dans les logiciels existants :

- Calcul des déperditions/gains thermiques de l'enveloppe en hiver/été.
- Dimensionnement du chauffage.
- Dimensionnement du rafraîchissement par ventilation naturelle et/ou climatisation.
- Simulation dynamique (STD) restituant des données de confort, de bilan thermique, ventilation, etc.
- Construction en 3D réaliste avec vue des ombres portées (maquette BIM).
- Modeleur du bâtiment incluant des assistants de création de fenêtre, composition de la construction, détection automatique du type de paroi qui vous évitent de nombreuses saisies ou dessin.
- Gestion de l'occupation, de la ventilation mécanique, des ouvertures de fenêtre, de l'occultation des baies, des apports internes ... par planning paramétrable selon le type de jour, les mois, les heures (ou infra horaire).
- Economie d'énergie : free-cooling, récupérateur d'énergie sur air extrait, ventilation nocturne, gradation de l'éclairage selon la luminosité, régulation des températures d'air soufflé selon la demande, volume d'air variable.
- Carte d'éclairement naturel, FLJ.
- Calculs RT2012.
- Calculs LEED concernant ASHRAE 90.1.
- Calcul en coût global à l'aide de fonction puissante d'estimation des coûts de construction, d'énergie, de cycle de vie basé sur la maquette BIM.
- Module d'optimisation vous permettant de déterminer les paramètres du bâtiment offrant le meilleur compromis coût, confort, GES.

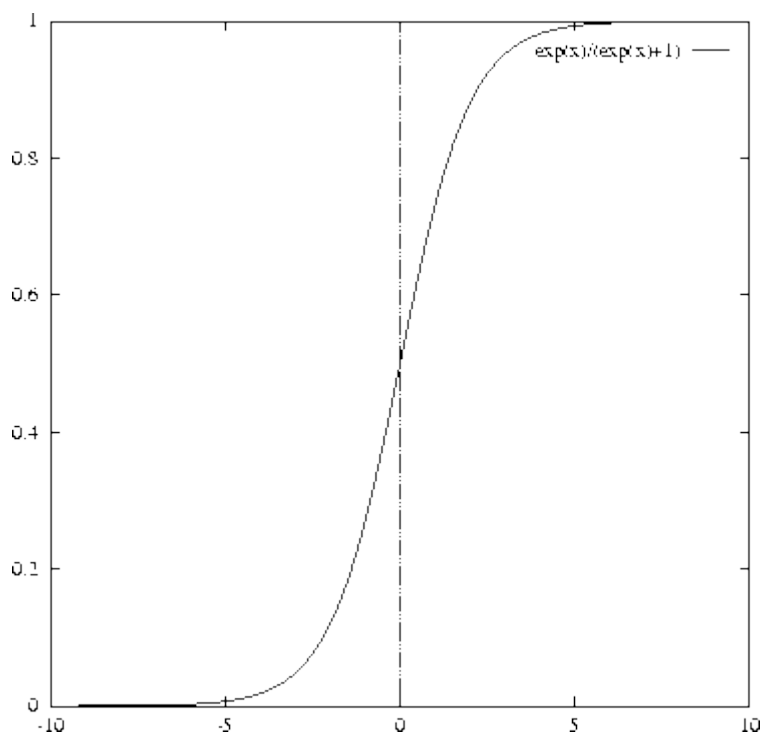
ANNEXE G: rétro propagation du gradient

L'algorithme de rétropropagation du gradient suit la démarche de Widrow-Hoff. Définir une notion d'erreur sur un exemple puis calculer la contribution à cette erreur de chacun des poids synaptique. C'est cette deuxième étape qui n'est pas évidente. Elle est parfois désignée sous le nom de "Credit Assignment Problem".

Afin de pouvoir appliquer la méthode du gradient, on a besoin de calculer des dérivées et donc de "lisser" les calculs.

On remplace pour cela la fonction à seuil de Heaviside par une fonction sigmoïde

$$\sigma(x) = \frac{e^{kx}}{e^{kx} + 1} = \frac{1}{1 + e^{-kx}} \text{ (où } k > 0 \text{)}$$



La fonction sigmoïde

Cette fonction est une approximation indéfiniment dérivable de la fonction à seuil de Heaviside, d'autant meilleure que k est grand. Nous prendrons $k=1$ dans la suite.

On peut remarquer que la dérivée de la fonction σ est simple à calculer :

$$\sigma'(x) = \frac{e^x}{(1 + e^x)^2} = \sigma(x)(1 - \sigma(x))$$

Il est essentiel que ce calcul soit simple, puisqu'il doit être effectué autant de fois qu'il y a de cellules, à chaque étape de modification des poids synaptiques. On

utilise aussi parfois, pour cette raison, la fonction $th(x)$ dont la dérivée est égale à $1 - th^2(x)$.

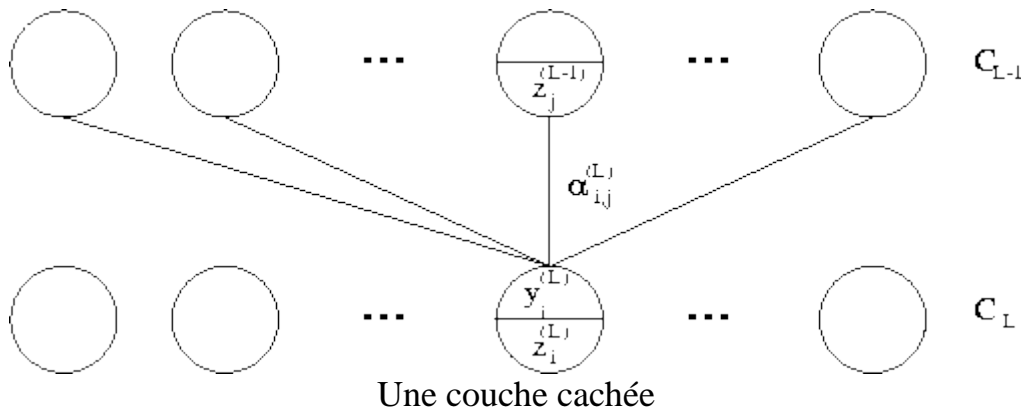
On suppose maintenant que la sortie de chaque neurone est calculée à l'aide de cette fonction :

$$O = \sigma\left(\sum_i w_i I_i - \theta\right)$$

On considère un réseau comprenant $q+1$ couches numérotées de 0 à q . On suppose que le seuil de chaque cellule est nul (c'est-à-dire qu'il a été remplacé par un coefficient synaptique).

On note

- n_L le nombre de cellules de la couche L
- $y_i^{(L)}$ l'entrée totale de la i -ème cellule de la couche L pour $L \geq 1$.
- $z_i^{(L)}$ l'état de la i -ème cellule de la couche L . L'état coïncide avec l'entrée si $L=0$ et avec la sortie si $L=q$.
- $\alpha_{ij}^{(L)}$ le coefficient synaptique entre la j -ème cellule de la couche $L-1$ et la i -ème cellule de la couche L
- $t_j^{(q)}$ la sortie attendue de la j -ème cellule de la couche de sortie



On a donc :

$$z_i^{(L)} = \sigma(y_i^{(L)}) \text{ et } y_i^{(L)} = \sum_j \alpha_{ij}^{(L)} z_j^{(L-1)}$$

L'erreur du réseau pour une entrée $\mathbf{s} = (y_1^{(0)}, \dots, y_n^{(0)})$ est égale à :

$$E(\mathbf{s}) = \frac{1}{2} \sum_j (z_j^{(q)} - t_j^{(q)})^2$$

Nous allons montrer que l'on peut facilement calculer récursivement les quantités $\frac{\partial E}{\partial y_j^{(L)}}$

1. Pour $L=q$, on a :

$$\frac{\partial E}{\partial y_j^{(q)}} = \frac{\partial E}{\partial z_j^{(q)}} \frac{\partial z_j^{(q)}}{\partial y_j^{(q)}} = z_j^{(q)} (1 - z_j^{(q)}) \frac{\partial E}{\partial z_j^{(q)}} = z_j^{(q)} (1 - z_j^{(q)}) (z_j^{(q)} - t_j^{(q)})$$

2. Pour $L < q$, on a :

$$\frac{\partial E}{\partial y_j^{(L)}} = \frac{\partial E}{\partial z_j^{(L)}} \frac{\partial z_j^{(L)}}{\partial y_j^{(L)}} = z_j^{(L)} (1 - z_j^{(L)}) \frac{\partial E}{\partial z_j^{(L)}}$$

et

$$\frac{\partial E}{\partial z_j^{(L)}} = \sum_k \alpha_{kj}^{(L+1)} \frac{\partial E}{\partial y_k^{(L+1)}}$$

Les quantités $\frac{\partial E}{\partial y_j^{(L)}}$ étant connues, on peut facilement calculer la contribution à l'erreur des coefficients $\alpha_{ji}^{(L)}$

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha_{ji}^{(L)}} = \frac{\partial E}{\partial y_j^{(L)}} \frac{\partial y_j^{(L)}}{\partial \alpha_{ji}^{(L)}} = z_i^{(L-1)} \frac{\partial E}{\partial y_j^{(L)}}$$

Si maintenant, on applique la méthode du gradient, on trouve donc :

$$\Delta \alpha_{ji}^{(L)} = -\epsilon \frac{\partial E}{\partial \alpha_{ji}^{(L)}}$$