
Travail de Fin d'Etudes : Contraintes acoustiques et architecturales des espaces ouverts de bureaux - Mise en application de la norme NF S31-199 pour des concepts de plateaux paysagers

Auteur : Papa, Alessandro

Promoteur(s) : Embrechts, Jean-Jacques; Leclercq, Pierre

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10356>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège

Faculté des Sciences Appliquées

Contraintes acoustiques et architecturales
des espaces ouverts de bureaux

Mise en application de la norme NF S31-199
pour des concepts de plateaux paysagers

Travail de fin d'étude

réalisé par

Alessandro PAPA

En vue de l'obtention du grade de Master Ingénieur Civil-Architecte

Membres du jury :

Jean-Jacques EMBRECHTS (Promoteur) – Université de Liège

Pierre LECLERCQ (Co-promoteur) – Université de Liège

Fabienne DUTHOIT – Université de Liège

Sigrid REITER – Université de Liège

Année académique 2019-2020

. Résumé

Les espaces ouverts de bureaux désignent une solution d'aménagement du lieu de travail fortement répandue aujourd'hui. Le succès et la diffusion de ce modèle reposent essentiellement sur les avantages déterminés par l'absence de cloisons fixes entre les postes : gain d'espace, réduction des coûts pour l'entreprise, facilité de communication, ambiance de travail conviviale. Cependant au fil des années, ce type d'agencement a montré certaines limites concernant le bien-être et la satisfaction des personnes travaillant en espace ouvert. Notamment par rapport aux faibles performances acoustiques qui caractérisent souvent le lieu de travail. En France, l'*Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)* a entrepris des actions pour répondre à ces problématiques. Le résultat des recherches effectuées et la révision des précédents standards ont conduit à la réalisation d'une nouvelle approche qui a inspiré la récente norme française *NF S31-199 Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux*, publiée par l'*Association Française de Normalisation (AFNOR)* en mars 2016. Ce document se propose alors comme référence normative nécessaire à la programmation, la conception, la construction, l'aménagement, la gestion et l'utilisation des espaces ouverts de bureaux et s'adresse de manière transversale aux divers intervenants dans l'évolution du projet, afin de pouvoir coordonner leurs actions et fournir les outils nécessaires à la création des ambiances acoustiques performantes et une architecture de qualité.

Le défi de ce *travail de fin d'étude* est de fournir un exemple d'application de la norme *NF S31-199* grâce à l'élaboration et à l'analyse de divers concepts de plateaux paysagers, en considérant à la fois les enjeux acoustiques et les contraintes architecturales relatifs à l'aménagement des espaces ouverts de bureaux. La démarche proposée vise à mettre en évidence l'utilité de la norme *NF S31-199* qui se propose aussi comme un outil de support à l'architecte dans la conception des open spaces. L'analyse acoustique nous montrera la manière d'atteindre les conditions préconisées par la norme grâce au calcul de certains *descripteurs acoustiques*, en utilisant les produits disponibles sur le marché ou en intervenant sur l'aménagement. Ainsi, il sera possible d'observer dans quelle mesure certaines solutions architecturales interviennent sur les performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux.

. Abstract

Nowadays, open space solutions for offices are largely used by architects when planning working spaces; the popularity of this type of design is related to the main feature of absence of fixed partitions between the workstations. This allows to use smaller facilities and a more rational and efficient use of spaces, reducing the management costs for Companies. Furthermore, in open space offices the working environment results more friendly and collaborative for workers. Despite these advantages, over the years this type of space arrangement has shown some limitations in the acoustic performance and the relevant negative impact on workers' wellbeing. Hence, in France the Institute for Research and Security (*Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)*), based on previous standards and procedures, has been developing a new approach to tackle this issue and in March 2016, the French Standard Institute (AFNOR) has released the *NF S31-199 Acoustics - Acoustic performance of open spaces of office*. The standard aims to provide a clear guideline for all the phases of planning, development, realization, management and use of open space offices and is meant to be a transversal and powerful support to all the professional figures involved in the development of an open space project. The guideline helps acousticians and architects to create environments with both high acoustic efficiency and architectural quality.

The aim of the following research work is to provide a practical exemplar of the application of the standard *NF S31-199*, by presenting the planning of different concepts of open space offices and providing the analysis of some of the acoustical parameters recommended into the standard. In compliance with the latter, this work simultaneously considers the acoustic necessities and the architectural instances of open space offices. The mixed approach here presented shows the limits and the advantages of two ways of achieving the recommended values for the acoustical parameters: by using specialistic acoustic products available on the market and by intervening on the architectural design.

Table des matières

. Résumé

. Abstract

. Table des matières

1. Introduction

2. Question de Recherche

2.1. Contexte

2.2. Objectifs et approches

3. Méthodologie du travail de recherche

4. La norme NF S31-199 - Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux

4.1. Introduction

4.2. Les quatre typologies de bureaux ouverts :
activités, ambiances sonores, enjeux acoustiques

4.2.1. Type d'espace n°1 : activité réalisée essentiellement par téléphone

4.2.2. Type d'espace n°2 : activités basées sur un travail collaboratif

4.2.3. Type d'espace n°3 : activités basées sur un travail faiblement collaboratif

4.2.4. Type d'espace n°4 : activités pouvant comporter l'accueil du public

4.3. Les stratégies d'aménagement

4.4. Les Indicateurs acoustiques

4.4.1. Niveau sonore au poste de travail $L_{A,eq}$

4.4.2. Atténuation acoustique in situ D_n

4.4.3. Taux de décroissance spatiale d'intelligibilité de la parole $D_{2,s}$

4.4.4. Durée de réverbération T_r

5. Analyse

5.1. Le projet concept

5.1.1. Introduction

5.1.2. L'architecture des espaces ouverts de bureaux : références

5.1.3. Un projet de rénovation : source d'inspiration pour le *Projet concept*

5.1.4. La conception du *Projet concept* : le bâtiment

5.1.5. La conception des plateaux paysagers

5.1.5.1. Aménagement du type d'espace n°1 :
activité réalisée essentiellement par téléphone

- 5.1.5.2. Aménagement du type d'espace n°2 :
activités basées sur un travail collaboratif
- 5.1.5.3. Aménagement du type d'espace n°3 :
activités basées sur un travail faiblement collaboratif
- 5.1.5.4. Aménagement du type d'espace n°4 :
activités pouvant comporter l'accueil du public

5.2. Analyse acoustique

- 5.2.1. Introduction
- 5.2.2. Analyse acoustique : type d'espace n°1 – Centre d'appels
 - 5.2.2.1. Solution d'aménagement 1
 - 5.2.2.2. Solution d'aménagement 2
 - 5.2.2.3. Solution d'aménagement 3
 - 5.2.2.4. Solution d'aménagement 4
 - 5.2.2.5. Solution d'aménagement 5
 - 5.2.2.6. Solution d'aménagement 6
 - 5.2.2.7. Solution d'aménagement 7
 - 5.2.2.8. Solution d'aménagement 8
 - 5.2.2.9. Solution d'aménagement 9
- 5.2.3. Observations
- 5.2.3. Précision de calcul

6. Conclusions et perspectives d'évolution

. Bibliographie

. ANNEXE

- . ANNEXE 1. PV d'essai (extrait) : ECOPHON - Focus A Extra Bass
- . ANNEXE 2. PV d'essai (extrait) : INTERFACE Stone Course
- . ANNEXE 3. PV d'essai (extrait) : PRINT ACOUSTICS - type Ds
- . ANNEXE 4. PV d'essai (extrait) : PRINT ACOUSTICS - type Db
- . ANNEXE 5. Solution d'aménagement 1 : valeurs de Tr calculées
- . ANNEXE 6. **Solution d'aménagement 2 : valeurs de Tr** . ANNEXE 6. Solution d'aménagement 2 : valeurs de Tr calculées
- . ANNEXE 7. Solution d'aménagement 3 : valeurs de Tr
- . ANNEXE 8. Solution d'aménagement 4 : valeurs de Tr
- . ANNEXE 9. Solution d'aménagement 5 : valeurs de Tr

- . ANNEXE 10. *Solution d'aménagement 6 : valeurs de Tr*
- . ANNEXE 11. *Solution d'aménagement 7 : valeurs de Tr*
- . ANNEXE 12. *Solution d'aménagement 8 : valeurs de Tr*

1. Introduction

Les espaces ouverts de bureaux désignent une solution d'aménagement du lieu de travail fortement répandue aujourd'hui. Le succès et la diffusion de ce modèle reposent essentiellement sur les avantages déterminés par l'absence de cloisons fixes entre les postes : gain d'espace, réduction des coûts pour l'entreprise, facilité de communication, ambiance de travail conviviale. Cependant au fil des années, ce type d'agencement a montré certaines limites concernant le bien-être et la satisfaction des personnes travaillant en espace ouvert. Notamment par rapport aux faibles performances acoustiques qui caractérisent souvent le lieu de travail. En France, l'*Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)* a entrepris des actions pour répondre à ces problématiques. Le résultat des recherches effectuées et la révision des précédents standards ont conduit à la réalisation d'une nouvelle approche qui a inspiré la récente norme française *NF S31-199 Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux*, publiée par l'*Association Française de Normalisation (AFNOR)* en mars 2016. Ce document se propose alors comme référence normative nécessaire à la programmation, la conception, la construction, l'aménagement, la gestion et l'utilisation des espaces ouverts de bureaux et s'adresse de manière transversale aux divers intervenants dans l'évolution du projet, afin de pouvoir coordonner leurs actions et fournir les outils nécessaires à la création des ambiances acoustiques performantes et une architecture de qualité.

Le défi de ce *travail de fin d'étude* est de fournir un exemple d'application de la norme *NF S31-199* grâce à l'élaboration et à l'analyse de divers concepts de plateaux paysagers, en considérant à la fois les enjeux acoustiques et les contraintes architecturales relatifs à l'aménagement des espaces ouverts de bureaux.

Dans un premier temps, nous présentons les caractéristiques principales la récente norme *NF S31-199* : approche, structure, recommandations, outils de vérification (*descripteurs acoustiques*).

Au moyen d'une plateforme d'étude (*projet concept*), nous reprenons les différentes étapes de l'évolution d'un projet d'aménagement qui a été réalisé à l'aide du récent standard et des recherches concernant certaines réalisations d'open spaces. Cette étape permet d'observer dans quelle manière la norme *NF S31-199* se propose comme un outil de support à l'architecte dans la conception des open spaces.

Ensuite, grâce à des simulations numériques, nous vérifions la validité des solutions proposées par rapport aux exigences de la norme en procédant au calcul de certains paramètres acoustiques. Dans

un premier temps, nous appliquerons les traitements acoustiques nécessaires avec des matériaux spécifiques tout en gardant la configuration initiale proposée en phase de conception, pour ensuite intervenir sur l'aménagement en proposant différentes solutions architecturales.

L'analyse des résultats obtenus permet d'élaborer certaines considérations concernant la manière d'atteindre les conditions préconisées par la norme. Ainsi, il est possible d'observer dans quelle mesure le choix des traitements acoustiques et certaines solutions architecturales interviennent sur les performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux.

2. Question de recherche

2.1. Contexte

Les espaces ouverts de bureaux représentent actuellement une solution d'aménagement du lieu de travail très répandue en France et au niveau international. Depuis les années 1980, les plateaux paysagers ont représentés une alternative aux bureaux individuels et ont rencontré progressivement une large diffusion en Europe, en offrant des nombreuses avantages (Pelegrin-Genel, 2006). L'absence de cloisons fixes sur les plateaux ouverts permet principalement une diminution des coûts d'investissement pour les entreprises. Le caractère modulable de ce type d'aménagement permet la réduction de la superficie nécessaire à la répartition des postes de travail et offre une certaine souplesse en vue d'une réorganisation de l'espace, occasionnée par une variation de l'effectif ou par la réalisation d'un projet spécifique (Fontana, 2019). Ainsi, l'adoption de séparations discrètes entre les opérateurs est censée également apporter des bénéfices en termes de productivité. Les interactions verbales et visuelles entre les collègues ont lieu plus facilement tout en simplifiant le transfert d'informations et de connaissances. Les échanges fréquents entre les collaborateurs sont présumés rendre le travail en équipe plus efficace et instaurer une atmosphère motivante et conviviale (Martial, 2019). Néanmoins, les employés manifestent souvent un certain degré d'insatisfaction concernant leur environnement de travail en open space. La présence proche des collègues est perçue généralement comme un manque d'intimité et le contact direct avec les supérieurs hiérarchiques (superviseurs, managers) engendre souvent un sentiment de contrôle de la part des collaborateurs (Pelegrin-Genel, 2006). Ainsi, le partage du même espace conditionne considérablement l'autonomie dans la gestion de la propre zone de travail, notamment pour la maîtrise de l'éclairage et de la température.

Cependant, parmi les nuisances habituellement signalées, les occupants des open space reprochent principalement l'environnement sonore gênant. Malgré l'intensité des bruits normalement rencontrés dans ces espaces de travail soit relativement modeste pour représenter un risque de perte auditive, le mécontentement des usagers dépend principalement par l'exposition aux changements, spectraux ou temporaux, de l'environnement acoustique. Les variations sonores par rapport au bruit de fond sont souvent un motif de distraction pour les personnes travaillant avec des interlocuteurs (collègues, clients, téléphone) ou occupées dans l'exécution de tâches individuelles (Chevret et al., 2017). Ainsi, plusieurs études scientifiques ont récemment démontré que le dérangement produit par les sons indésirés était cofacteur de stress (Evans et al., 2000). Cela

peut également avoir des répercussions plus ou moins importantes et diversifiées sur l'état psychologique et physiologique des employés, en conditionnant négativement la réalisation du travail et les rapports entre les collègues (Radun et al., 2019). Depuis quelques années, le constat de l'influence de la gêne sonore sur l'état de santé des personnes travaillant dans les espaces ouverts a donc suscité l'intérêt de tous les intervenants impliqués dans la prévention et la protection du travail (médecins du travail, employeurs, collaborateurs, scientifiques). Néanmoins, les instruments disponibles à la recherche de solutions appropriées apparaissent inadéquats et les normes en matière d'acoustique étaient centrées principalement sur l'intensité du bruit et ses effets sur l'audition. Cela a rendu nécessaire le développement de nouveaux outils afin de maîtriser l'environnement sonore des espaces ouverts sous tous ses aspects. En France, l'*Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)*, avec le support de plusieurs collaborations (entreprises, centres techniques et scientifiques, professionnels), a entrepris des actions pour répondre à ces problématiques. Le résultat des recherches effectuées et la révision des précédents standards ont conduit à la réalisation d'une nouvelle approche qui a inspiré la récente norme française *NF S31-199 Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux*, publiée par l'*Association Française de Normalisation (AFNOR)* en mars 2016. La diversité et la complexité des situations rencontrées au cours de plusieurs investigations ont montré l'exigence d'une analyse différenciée des activités qui se déroulent habituellement dans les bureaux ouverts. Cette approche inédite a conduit à la différenciation et à la classification des espaces ouverts en diverses catégories et à la détermination des besoins spécifiques à chaque typologie de bureaux ouverts, en termes d'organisation de l'espace de travail et d'aménagement. Ainsi, les collaborations entre ergonomes, psychologues et acousticiens ont consenti l'élaboration d'une démarche de prévention complète qui permet une évaluation globale des nuisances sonores, en intégrant aux mesures physiques les effets psychologiques et physiologiques (Chevret et al., 2017). La norme *NF S31-199* se propose alors comme un outil transversal, qui s'adresse aux différents intervenants impliqués dans l'évolution du projet afin de pouvoir coordonner leurs actions au cours de la programmation, la conception, la construction, l'aménagement, la gestion et l'utilisation des espaces ouverts de bureaux (Le Muet et al., 2014).

2.2. Objectifs et approches

Le nombre d'impératifs à prendre en considération lors de la conception des espaces ouverts de bureaux est important et implique pour l'architecte une analyse minutieuse de tous les facteurs intervenants pour le bon fonctionnement de ce type d'espace de travail. Néanmoins, les enjeux acoustiques sont fréquemment considérés avec un certain retard dans l'état d'avancement du projet. Cette approche engendre des conflits entre les choix architecturaux et les exigences acoustiques, et amène souvent à des solutions de repli qui perturbent l'évolution du projet et le résultat du produit final (Meric et al., 2013). La récente norme française *NF S31-199 Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux* (AFNOR, 2016) se propose alors comme un outil de support à la conception de ces espaces de travail, afin de réaliser des ambiances acoustiques performantes et une architecture de qualité (Le Muet et al., 2014).

Le défi de ce *travail de fin d'étude* est de fournir un exemple d'application de la norme *NF S31-199* en considérant à la fois les enjeux acoustiques et les contraintes architecturales relatifs à l'aménagement des espaces ouverts de bureaux.

L'objectif principal est de montrer en quelle manière la norme *NF S31-199* se propose comme un outil de support à l'architecte dans la conception des plateaux paysagers et comment soit possible intégrer les recommandations de ce standard dans le processus de conception. Au moyen d'une plateforme d'étude (*projet concept*), nous reprendrons les différentes étapes de l'évolution d'un projet d'aménagement qui a été réalisé à l'aide du récent standard et des recherches concernant certaines réalisations d'*open spaces*. Grâce à des simulations numériques, nous vérifierons la validité des solutions proposées par rapport aux exigences de la norme en procédant au calcul de certains paramètres acoustiques et au dimensionnement acoustique. Dans un premier temps, nous appliquerons les traitements acoustiques nécessaires avec des matériaux spécifiques tout en gardant la configuration initiale proposée en phase de conception, pour ensuite intervenir sur l'aménagement en proposant différentes solutions architecturales.

La démarche proposée vise à mettre en évidence les finalités de la norme *NF S31-199* qui ne représente pas seulement un instrument de vérification *a posteriori* mais aussi un outil de support à l'architecte dans la conception des espaces ouverts de bureaux. L'analyse acoustique nous montrera la manière d'atteindre les conditions préconisées par la norme en utilisant les produits disponibles sur le marché ou en intervenant sur l'aménagement. Ainsi, les simulations numériques

permettront d'observer dans quelle mesure certaines solutions architecturales interviennent sur les performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux.

3. Méthodologie du travail de recherche : démarches, actions, outils

Le travail de recherche proposé a été développé grâce à l'ensemble de différentes étapes et actions au cours de trois grandes phases : l'élaboration de l'*état de l'art*, la réalisation de l'*analyse* et la formulation des *réflexions* relatives au travail de recherche effectué (*Figure 1*).

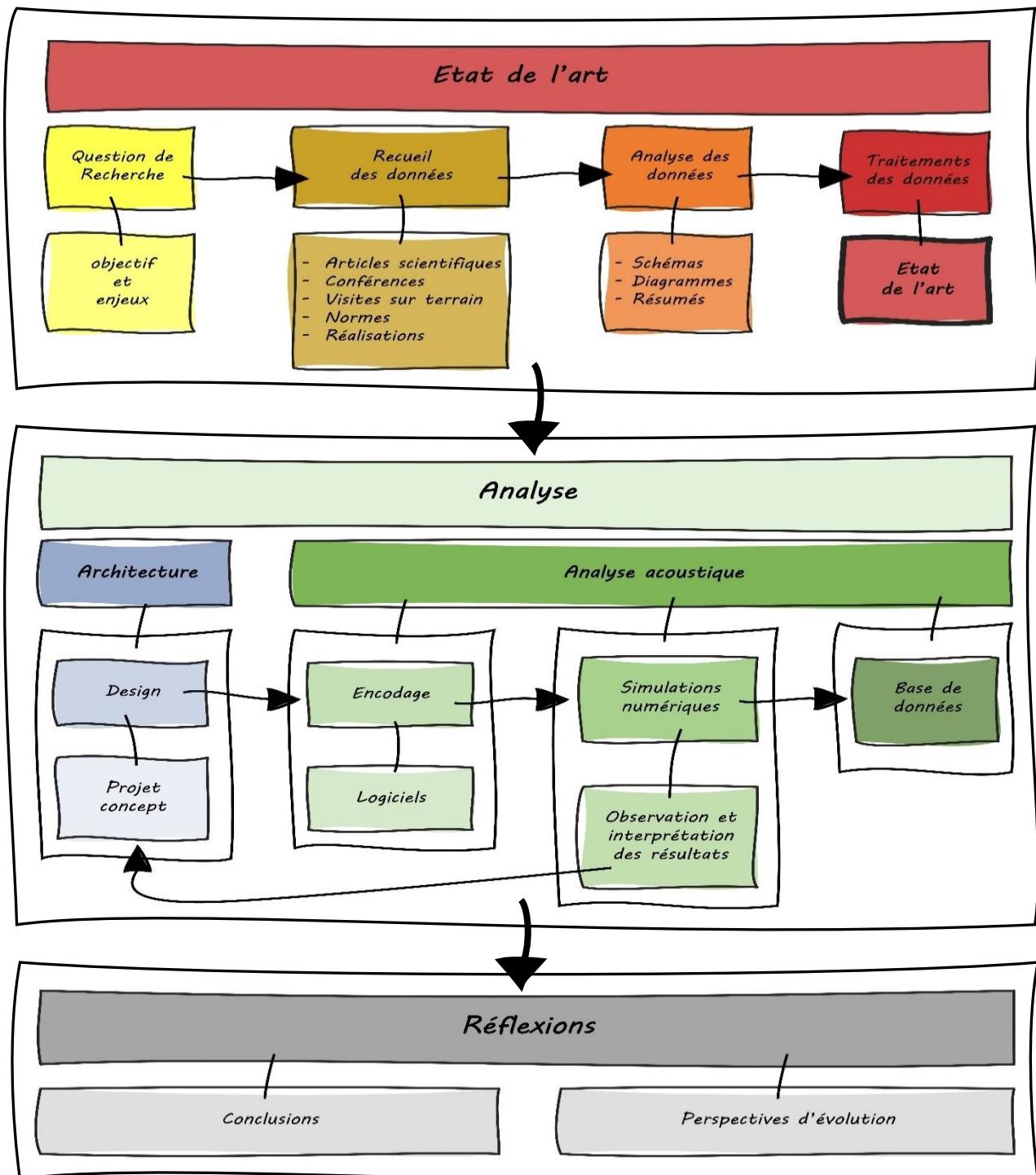


Figure 1.
Méthodologie du travail de recherche – schéma des actions

Dans un premier temps, suite à la définition de la *question de recherche* et des *objectifs* à atteindre, il a été nécessaire de rassembler la documentation relative aux *espaces ouverts de bureaux*, tant pour le domaine de l'*acoustique* que de l'*architecture*. L'élaboration de l'*état de l'art* s'est alors construite en différentes étapes : le *recueil des données*, leur *analyse* et le *traitement* de ces informations. Le matériel a été récolté au moyen de recherches centrées principalement sur la conception, les performances acoustiques et le cadre normatif relatifs aux *open spaces*. Fournir un exemple d'application de la norme *NF S31-199* (AFNOR, 2016) étant un des objectifs de ce travail, des investigations plus approfondies ont été réalisées à ce sujet. En même temps, la participation à certaines *conférences*¹ et les *visites*² au sein de plusieurs immeubles de bureaux ont apporté des éléments et des suggestions intéressants pour le développement de ce travail. Ainsi, des recherches ultérieures ont été amenées concernant les réalisations des espaces ouverts de bureaux, afin de repérer les différentes solutions architecturales adoptées au niveau international et les reposer avec le cas d'étude. L'*analyse* et l'*organisation* de la documentation récoltée (*traitement des données*) ont permis d'*individualiser* les éléments nécessaires à l'*évolution* de ce travail et d'en définir l'*état de l'art*.

La composition du *projet concept* correspond à la première étape de l'*analyse (design)*. Cette action a permis de faire évoluer le projet et d'*élaborer* de la documentation graphique relative au cas d'*étude* nécessaire à la réalisation de l'*analyse acoustique* (*schémas de principes, esquisses, vues en plans, coupes, etc.*).

Afin d'*effectuer* les *simulations numériques* à l'aide du logiciel d'*acoustique* de salle *SalRev (Université de Liège)*, une *méthode d'*encodage** a été élaborée. L'*importation* de modèles réalisés avec d'autres outils de représentation graphique, est impossible : en effet ce logiciel adopte pour la modélisation du volume d'*étude* une interface qui demande l'*encodage* des coordonnées des sommets composants les surfaces, dans un repère cartésien (*x ; y ; z*). La modélisation est usuellement effectuée en introduisant les propriétés géométriques du modèle à l'aide des dessins en *deux dimensions (2D)*. Afin d'*informatiser* et de rendre plus rapide cette opération, nous avons développé la méthode suivante à l'aide de différents logiciels (*Figure 2*). La première étape consiste à modéliser une *maquette en trois dimensions (3D)* grâce au logiciel *SketchUp*, en important les

¹ ACOUSTIC DAY, Bruxelles, le 17/10/19

² Bruxelles Environnement, Bruxelles, le 17/10/19
EVS, Liège, le 23/10/19

dessins en 2D relatifs au projet (*vues en plans, coupes, élévations, etc.*) réalisés en format *dwg* (logiciel *autoCAD*). En même temps, cette opération permet d'obtenir un aperçu du projet en 3D, qui s'avère très utile pour la compréhension des choix adoptés. Ensuite, le modèle 3D a été importé dans le logiciel *AutoCAD* et à l'aide d'une fonction spécifique il a été possible de déterminer les coordonnées cartésiennes (*x ; y ; z*) des sommets composants les surfaces. Puis, le logiciel *Excel* a permis la rédaction du classeur nécessaire à l'organisation de ces données et à la classification des surfaces pour l'encodage du volume d'étude dans le logiciel *SalRev* pour la réalisation des *simulations numériques*.

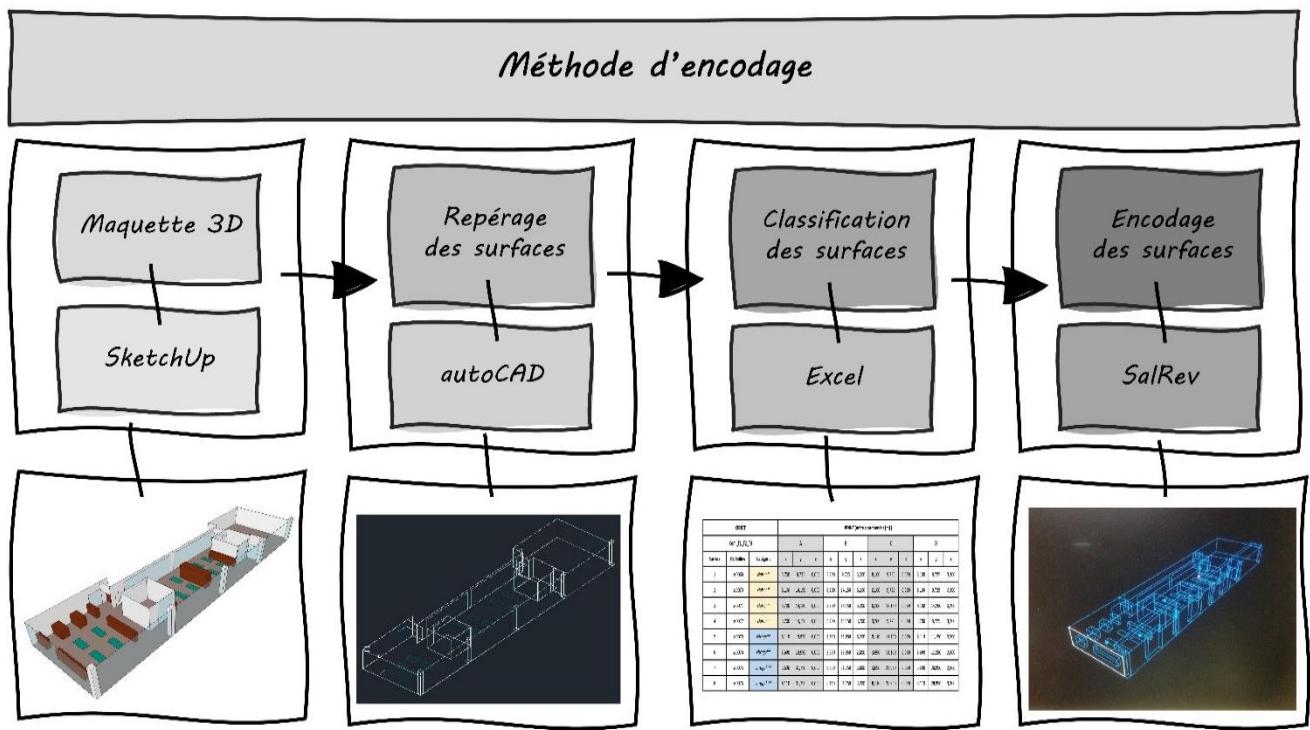


Figure 2.
Méthode d'encodage – schéma des actions

Un des objectifs de ce travail étant d'examiner de quelle façon certains choix architecturaux influencent les performances acoustiques des plateaux paysagers, il a été indispensable de produire plusieurs versions du cas d'étude. En partant de la configuration initiale du projet, *l'observation* et *l'interprétation des résultats* relatifs aux *simulations numériques* ont suggéré à chaque fois quelles solutions adopter pour les configurations successives. De manière cyclique, nous avons donc reformulé le projet en apportant certaines modifications en phase de conception pour ensuite effectuer *l'analyse acoustique*. Cette démarche a permis de produire une *base de données* nécessaire à l'élaboration des *réflexions* concernant le travail effectué.

Enfin, les considérations relatives à l'étude réalisée ont amené à la formulation des *réflexions* concernant le travail de recherche proposé et à l'élaboration des *conclusions* et des *perspectives d'évolution* futures.

4. La norme NF S31-199 - Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux

4.1. Introduction

Les espaces ouverts de bureaux désignent une solution d'aménagement du lieu de travail fréquemment adoptée aujourd'hui. Le succès et la diffusion de ce modèle reposent essentiellement sur les avantages déterminés par l'absence de cloisons fixes entre les postes : gain d'espace, réduction des coûts pour l'entreprise, facilité de communication, ambiance de travail conviviale. Cependant au fil des années, ce type d'agencement a montré certaines limites concernant le bien-être et la satisfaction des personnes travaillant en espace ouvert. Notamment par rapport aux faibles performances acoustiques qui caractérisent souvent le lieu de travail.

Afin d'assurer un confort acoustique adéquat aux occupants d'un open-space, la considération de la gêne sonore lors de la conception et l'aménagement des plateaux paysagers est devenue de plus en plus importante dans le contexte normatif français et international au cours de ces deux dernières décennies (Le Muet et al., 2014). Les recommandations fournies par la norme française *NF S31-080* (2006) et la norme internationale *ISO 3382-3* (2012) ont, de fait, constitué une solution initiale à cette question, en présentant un outil fondamental pour les acteurs intervenant sur le sujet. Néanmoins, malgré les progrès obtenus par l'introduction de ces normes, l'évidence de leurs limites reste importante : aucune distinction n'est effectuée entre les divers types de bureaux ouverts existants et entre les différentes nécessités déterminées par des activités parfois variées (Le Muet et al., 2016).

Sur base de ces réflexions, le groupe de normalisation AFNOR S30D a développé une nouvelle approche à cette problématique et en mars 2016 la norme française *NF S31-199 Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux* a vu le jour. Ce standard s'éloigne des précédents grâce à l'analyse et à la différenciation des principales activités pouvant être accueillies dans les open-spaces et demandant régulièrement l'adoption de solutions acoustiques et architecturales particulières. La détermination de caractéristiques et d'exigences spécifiques des diverses activités a permis la classification des bureaux ouverts selon quatre catégories principales que nous retrouvons habituellement sous les dénominations suivantes : *centre d'appels, espace projet, administration, espace de réception du public* (Le Muet et al., 2014).

Pour chacune de ces catégories, les enjeux et les stratégies ont été définis afin d'atteindre un confort acoustique idoine, selon les besoins d'*intelligibilité*, de *discréction*, voire de *confidentialité* sur le

poste de travail. Dans ce sens, des *descripteurs acoustiques* (et les valeurs cibles associées) et des méthodes de mesurage spécifiques ont été établis de manière à pouvoir analyser et vérifier les performances acoustiques caractérisant l'espace de travail (Kostallari et al., 2016). En aide à la composition et à l'aménagement des plateaux paysagers, une série d'*outils* complémentaires est fournie au moyen d'indications et d'annexes. Un ensemble d'informations reprend par exemple la composition architecturale idéale de l'espace ouvert, l'organisation du plateau et des *espaces support*, le traitement acoustique des surfaces etc. Aussi, des *synoptiques* synthétisent graphiquement les étapes et les actions qui caractérisent la correcte démarche d'un projet d'aménagement. On retrouve ainsi un modèle de *charte d'utilisation collective* destiné aux usagers des plateaux paysagers. Il est recommandé de mettre en place ce type de document afin de sensibiliser les occupants aux enjeux acoustiques du lieu de travail au moyen de simples règles de vie collective. Un autre instrument d'aide à l'élaboration et à la vérification des solutions proposées est l'exemple d'enquête, à destination des usagers, du *questionnaire GABO (Gêne Acoustique dans les Bureaux Ouverts)* réalisé en partenariat entre le *Laboratoire Vibrations Acoustiques de l'INSA de Lyon* et l'*INRS*. Le formulaire, au moyen d'avis et du ressenti des employés, permet d'évaluer la qualité de l'ambiance du lieu de travail et d'élaborer les solutions nécessaires (Le Muet et al., 2016). La *NF S31-199* se propose comme référence normative nécessaire à la programmation, la conception, la construction, l'aménagement, la gestion et l'utilisation des espaces ouverts de bureaux. Ce récent standard s'adresse donc aux divers intervenants dans l'évolution du projet (clients finaux, maître d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, corps d'état, promoteurs, spécialistes) afin de pouvoir coordonner leurs actions (AFNOR, 2016).

Le bien-être et la satisfaction des personnes travaillant dans les espaces ouverts de bureaux dépendent des performances acoustiques du lieu de travail et du comportement des utilisateurs. Il est nécessaire d'analyser l'organisation et le fonctionnement de ces types d'espace afin d'identifier les stratégies d'intervention pour assurer le confort des usagers.

4.2. Les quatre typologies de bureaux ouverts : activités, ambiances sonores, enjeux acoustiques

L'analyse et la différenciation des principales activités qui se déroulent couramment dans les espaces ouverts de bureaux ont permis l'identification des différentes ambiances sonores caractérisant les lieux de travail. L'environnement acoustique peut être caractérisé par un niveau sonore ambiant très varié, de modéré à élevé, selon le type d'activité effectuée et l'organisation de l'espace de travail. Dans la plupart des open spaces les personnes sont habituellement organisées par groupes ou équipes, réparties souvent avec une forte densité sur la surface disponible. Le nombre de sources de bruit peut être important et d'origine différente. Il est lié principalement aux équipements techniques, aux systèmes de téléphonie, aux communications verbales entre les collègues, aux salles d'attente, etc. (AFNOR, 2016).

Les dynamiques et les interactions entre les usagers et leur environnement peuvent donc varier de façon importante et déterminent des exigences spécifiques en termes d'*intelligibilité*, de *discretion* ou *confidentialité* sur les plateaux. Les enjeux acoustiques sont donc différents et strictement liés au type d'activité.

Quatre typologies des espaces ouverts de bureaux ont été définies en fonction des activités :

- *Type d'espace n°1 : activité réalisée essentiellement par téléphone*
- *Type d'espace n°2 : activités basées sur un travail collaboratif*
- *Type d'espace n°3 : activités basées sur un travail faiblement collaboratif*
- *Type d'espace n°4 : activités pouvant comporter l'accueil du public*

Cette classification vise à englober la plupart des activités existantes et permet la formulation de pistes de réflexion pour l'adoption de solutions acoustiques spécifiques. Il est fondamental d'analyser les caractéristiques et les dynamiques intervenant pour chaque type d'espace afin d'identifier l'ambiance sonore et les exigences déterminées par le type d'activité.

4.2.1. Type d'espace n°1 : activité réalisée essentiellement par téléphone

Le *type d'espace n°1* désigne les lieux de travail dont les activités réalisées (commerciale, assistance, sondage, secours, etc.) se déploient essentiellement par téléphone et sont considérées peu collaboratives. Nous les retrouvons le plus souvent sous la dénomination de *centres d'appels (call centers), centres de contact, centres de relation client (CRC)*, etc.

Les personnes sont habituellement organisées par équipes sur des plateaux de grandes dimensions. L'environnement acoustique est caractérisé généralement par un niveau sonore ambiant de modéré à élevé. Les sources de bruit sont nombreuses, liées principalement aux systèmes de téléphonie, aux communications téléphoniques ou aux conversations entre les collègues, les superviseurs et les managers, pendant les périodes de pause entre les appels. De telles ambiances obligent généralement à augmenter le volume d'écoute des appareils téléphoniques et à produire un effort vocal de la part des opérateurs au cours de leur activité (*effet Lombard*).

En réponse à ces contraintes spécifiques, il est fondamental de diminuer l'exposition au bruit ambiant afin de garantir une bonne *intelligibilité* pour les échanges téléphoniques. Aussi, il est nécessaire d'assurer un bon niveau de *discréction* entre les postes, pour l'exécution de tâches intellectuelles individuelles demandant une concentration de modérée à élevée (AFNOR, 2016).

4.2.2. Type d'espace n°2 : activités basées sur un travail collaboratif

Le *type d'espace n°2* désigne les lieux de travail dont les activités réalisées sont considérées principalement comme collaboratives. Ces espaces sont habituellement destinés aux *agences de publicité, départements création/marketing, centres de recherches, bureaux d'études*, etc.

Les groupes de travail sont généralement organisés par équipes de 4 à 10 personnes, travaillant sur des projets communs et devant effectuer des tâches intellectuelles individuelles avec un degré de concentration moyen.

L'environnement acoustique est caractérisé par un niveau sonore ambiant très variable. Les sources de bruit sont liées principalement aux fréquentes interactions verbales entre les collègues, ou éventuellement par téléphone, et souvent à des ambiances très animées.

Les solutions d'aménagement proposées doivent assurer une bonne *intelligibilité* entre les personnes d'une même équipe, ainsi que pour les conversations au téléphone. Aussi, une certaine *discréction*, voire *confidentialité*, est exigée sur le plateau entre les différentes équipes (AFNOR, 2016).

4.2.3. Type d'espace n°3 : activités basées sur un travail faiblement collaboratif

Le *type d'espace n°3* désigne les lieux de travail dont les activités réalisées sont considérées essentiellement peu collaboratives. On retrouve dans cette catégorie les espaces destinés aux *centres d'administration, de comptabilité, ressources humaines*, etc.

Les groupes de travail sont généralement organisés par équipe jusqu'à 12 personnes, devant effectuer principalement des tâches intellectuelles individuelles avec un degré de concentration élevé. Les interactions entre les collègues, ou au téléphone, sont très limitées.

L'environnement acoustique est caractérisé généralement par un niveau sonore ambiant très faible et les sources de bruit ne sont pas nombreuses.

Les mesures proposées doivent garantir un bon niveau de *discréction* entre les personnes d'une même équipe et entre les divers services, pour l'exécution de tâches individuelles demandant une forte concentration. En même temps, une certaine *intelligibilité* est requise entre les postes adjacents pour des conversations très ponctuelles (AFNOR, 2016).

4.2.4. Type d'espace n°4 : activités pouvant comporter l'accueil du public

Le *type d'espace n°4* désigne les lieux de travail destinés à la réception du public et les activités sont considérées peu collaboratives. Peuvent appartenir à cette catégorie les espaces destinés aux zones d'accueil des *organismes publics, banques, assurances*, etc.

La communication entre les collègues est très limitée. La plupart des interactions a lieu entre le personnel et le public, à des postes de type *guichet* ou assis dans des bureaux partiellement ou totalement cloisonnés. Ces échanges, souvent en lien avec la vie privée des clients, demandent un bon niveau de *discréction* entre les postes de réception. Les opérateurs peuvent néanmoins devoir effectuer des tâches intellectuelles individuelles entre les rendez-vous, demandant une concentration très élevée.

En fonction du service fourni au public et de la période considérée, l'environnement acoustique est généralement caractérisé par un niveau sonore ambiant variable, principalement élevé. Les sources de bruit sont liées généralement aux fréquentes interactions verbales et aux équipements (signaux d'appels, musique, etc.).

Pour ce type d'espace, il est nécessaire d'assurer une excellente *intelligibilité* entre le personnel et le public au poste de réception. Inversement, pour des raisons de *confidentialité*, un niveau important de *discréction* est requis entre les points d'attente et entre les zones d'attente et les postes de réception (AFNOR, 2016).

4.3. Les stratégies d'aménagement

Afin d'atteindre les enjeux acoustiques définis pour chaque catégorie d'*open spaces*, les recommandations reportées dans la norme visent de manière générale à réduire les sources de bruit indésirable et à minimiser les phénomènes de réverbération et de propagation du son, lié essentiellement à la parole. Des indications valables pour chaque typologie de bureaux ouverts sont fournies concernant l'organisation du lieu de travail et les systèmes constructifs à adopter.

Par rapport à la conception et à l'aménagement, il est nécessaire de structurer l'espace en considérant principalement l'organisation du travail et les possibles interactions entre les personnes au cours de leurs activités. Ainsi, pour la répartition des postes sur le plateau, il est indispensable de prendre en considération les relations avec les différentes équipes et avec les flux de déplacements entre les zones de travail et les *espaces support* à prévoir (salles de réunion, espaces de détente, salles de reprographie, etc.). Concernant les solutions techniques, il est recommandé d'intervenir principalement sur le plafond, la surface la plus étendue et homogène dans ces espaces, avec des produits à haut pouvoir phono-absorbant. Les autres éléments, tels que le sol, les murs et le mobilier, peuvent offrir en même temps des superficies utiles pour des traitements acoustiques complémentaires. Ainsi, les écrans fixés au plan de travail (*cloisonnettes*) ou sur pied, peuvent représenter des barrières sonores efficaces entre les postes adjacents. Néanmoins, pour des raisons de confort visuel et de satisfaction des employés, la hauteur de ces modules doit garantir aussi une bonne diffusion de la lumière naturelle et assurer une certaine visibilité au poste de travail.

Cependant, l'efficacité des mesures acoustiques proposées, liées principalement à l'aménagement et aux systèmes constructifs adoptés, dépend aussi du comportement des occupants. Il devient indispensable d'attirer l'attention des usagers sur les bonnes pratiques de vie collective afin d'assurer le confort acoustique pour chaque personne (AFNOR, 2016).

4.4. Les indicateurs acoustiques

La norme *NF S31-199* fournit un ensemble d'indications et de recommandations nécessaires à la conception, la réalisation et l'utilisation d'un environnement acoustique performant par rapport au confort et à la satisfaction des occupants dans les bureaux ouverts. Des indicateurs acoustiques, ainsi que des méthodes de mesurage spécifiques, ont été établis afin de vérifier la qualité des solutions proposées. L'adoption de ces paramètres repose sur l'exigence de la description fidèle de l'ambiance sonore perçue par les occupants d'un open space durant leurs activités. L'approche proposée par cette norme est centrée sur l'analyse des phénomènes de propagation du son, principalement liés à la parole, intervenant entre l'usager et son environnement selon trois niveaux d'interaction : au poste de travail, au sein de l'équipe et sur le plateau ouvert (Jagla, 2016).

Sur base de ces considérations, la norme adopte les *descripteurs acoustiques* suivants :

- ($L_{A,eq}$) *niveau sonore au poste de travail* : niveau équivalent ou moyenné sur une période définie, pondéré A ;
- (D_n) *atténuation acoustique in situ* entre postes de travail ;
- (Tr) *durée de réverbération* et ($D_{2,S}$) *taux de décroissance spatiale*, sur le plateau ouvert.

Des simulations numériques et des mesures *in situ* sont conduites de manière à vérifier le respect des valeurs cibles spécifiques à chaque typologie de bureau, en fonction de l'activité et des besoins d'intelligibilité ou de discréption (AFNOR, 2016).

4.4.1. Niveau sonore au poste de travail $L_{A,eq}$

Le descripteur acoustique $L_{A,eq}$ indique le niveau sonore au poste de travail lorsque les activités sur le plateau sont en cours. Cet indicateur exprime l'exposition moyenne d'un opérateur au bruit ambiant du plateau durant une journée normale de travail (AFNOR, 2016).

4.4.2. Atténuation acoustique in situ D_n

Le descripteur acoustique D_n indique la différence, en décibels (dB), entre le niveau de puissance de la source et le niveau de pression acoustique mesuré en un point de réception. Selon les conditions de mesurage, cet indicateur peut exprimer l'atténuation du son entre des postes d'une même équipe ou de groupes de travail différents (AFNOR, 2016).

4.4.3. Taux de décroissance spatiale d'intelligibilité de la parole $D_{2,s}$

Le descripteur $D_{2,s}$ indique le taux de décroissance spatiale du niveau de pression acoustique pondéré A (dBA) de la parole par doublement de la distance (AFNOR, 2016). Cet indicateur peut fournir des informations concernant les performances acoustiques relatives aux cloisons et au plafond lorsque le plateau est caractérisé par des géométrie pas trop complexe (Chevret, 2017).

4.4.4. Durée de réverbération Tr

Le descripteur acoustique Tr indique le temps, en secondes (s), nécessaire pour que le niveau sonore dans le local décroisse de 60 dB, suite à l'interruption instantanée de la source. La norme NF S31-199 adopte deux différents indicateurs pour le temps de réverbération : le Tr_{125} , mesuré pour la bande d'octave à 125 Hz, et le Tr , mesuré comme moyenne arithmétique des durées pour les bandes d'octave centrée sur 250 et 4000 Hz (AFNOR, 2016).

5. Analyse

5.1. Le projet concept

5.1.1. Introduction

Un des objectifs de ce travail est de fournir un exemple d'application de la norme *NF S31-199* en montrant l'utilité des recommandations fournies par cet outil concernant la conception d'un projet d'aménagement des espaces ouverts de bureaux. A cet effet, nous proposons dans ce chapitre la description des différentes étapes de la composition d'un *projet concept*, élaboré comme plateforme d'analyse, à l'aide de cette norme. Le cas d'étude s'inspire d'un projet de rénovation d'un ancien bâtiment industriel destiné à la reconversion en immeuble de bureaux. Des recherches et des visites sur terrain au sein de certains immeubles de bureaux³ ont été effectuées afin de repérer et reproduire les solutions architecturales couramment adoptées pour les open spaces. Les modèles de *plateaux paysagers* présentés ont été développés sur base des références récoltées et des recommandations fournies par la norme *NF S31-199* concernant l'*aménagement de l'espace de travail*, en accord avec les dispositions indiquées par l'*Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)*, liées au *Code du travail*, à la *Sécurité incendie* et à l'*Ergonomie des lieux de travail* (circulation, techniques, orientation, éclairage naturel, dimensions spécifiques, aménagement, etc.).

5.1.2. L'architecture des espaces ouverts de bureaux : les références

Le cas d'étude vise à offrir un modèle d'immeuble de bureaux en intégrant les choix architecturaux couramment adoptés pour les espaces ouverts de bureaux, en termes d'aménagement et de matériaux utilisés. A cet effet, des recherches ont été effectuées concernant des réalisations d'open spaces. Dans cette section, nous parcourons des images⁴ relatives à divers plateaux paysagers, afin de repérer les solutions architecturales les plus fréquentes qui seront proposées avec le *projet concept*.

³ Bruxelles Environnement, Bruxelles, le 17/10/19
EVS, Liège, le 23/10/19

⁴ Source : ArchDaily.
Disponible à l'adresse : <https://www.archdaily.com/>
[Visité du 02/09/19 au 10/08/20]

- *Le vitrage en façade*

Les grandes surfaces vitrées en façade représentent une solution très répandue pour les immeubles de bureaux. Du point de vue esthétique, ces éléments engendrent une connexion visuelle entre le bâtiment et l'environnement circonstant (et inversement) et confèrent une certaine légèreté à l'édifice. En même temps, la transparence du vitrage assure l'accès à la lumière naturelle en réduisant le besoin d'éclairage artificiel.



Figure 4.
Suhrkamp Ensemble Offices
(Berlin, Allemagne)
Bundschuh Architekten, 2020



Figure 3.
1133 Yonge Street Offices
(Toronto, Canada)
Studio JCI, 2019



Figure 5.
Post Headquarter
(Vienne, Autriche)
S.S. Weber, feld72, 2017



Figure 6.
Institut de Génie Civil – Val Benoît
(Liège, Belgique)
B.A.A. Baumans-Deffet, A. Dirix, 2016

- *Le vitrage intérieur*

Le vitrage est fréquemment utilisé dans l'aménagement des espaces ouverts de bureaux en raison des avantages que propose ce matériau. Tout en assurant une connexion visuelle et la diffusion de la lumière entre les locaux, les surfaces vitrées offrent la possibilité de structurer l'espace intérieur en plaçant des séparations légères lorsque l'isolation acoustique est requise.



Figure 8.
Post Headquarter
(Vienne, Autriche)
S.S. Weber, feld72, 2017



Figure 7.
225 Polk Avenue Office Space
(Nashville, US)
HASTINGS Architecture, 2019

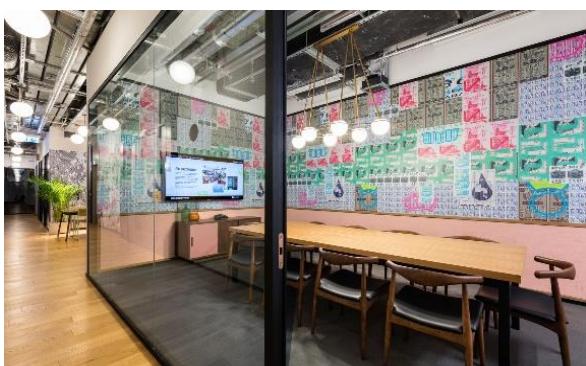


Figure 10.
Tower 535
(Causeway Bay, Hong Kong)
NCDA, 2017



Figure 9.
Centro Internacional Santander Emprendimiento
(Santander, Espagne)
A. Blanco, J. Gomis, 2015



*Figure 11.
1133 Yonge Street Offices
(Toronto, Canada)
Studio JCI, 2019*



*Figure 12.
DSN Office
(Jakarta, Indonesia)
DSN Intervention, 2020*

- *Le mobilier*

Le concept de l'open space repose sur l'idée d'aménager le plateau au moyen de séparations légères en minimisant l'utilisation de cloisons fixes. Le mobilier requis pour le rangement du matériel de travail (armoires, étagères, etc.), permet aussi de structurer l'espace selon cette logique en délimitant les différentes zones du plateau avec la fonction de barrière visuelle et acoustique.

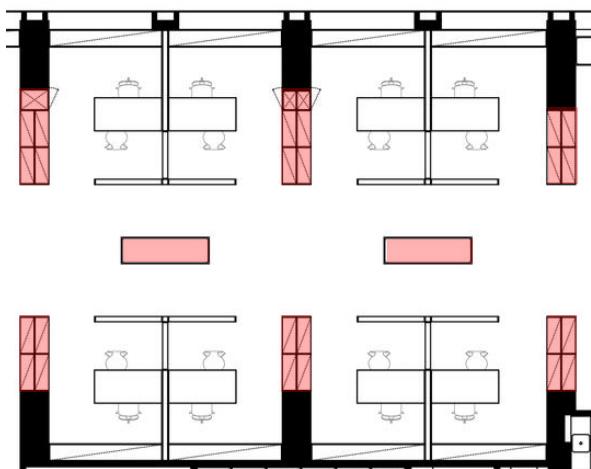
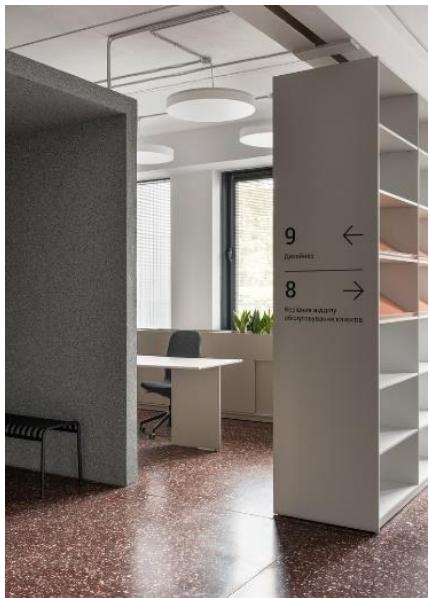


Figure 13.
225 Polk Avenue Office Space
(Nashville, US)
HASTINGS Architecture, 2019

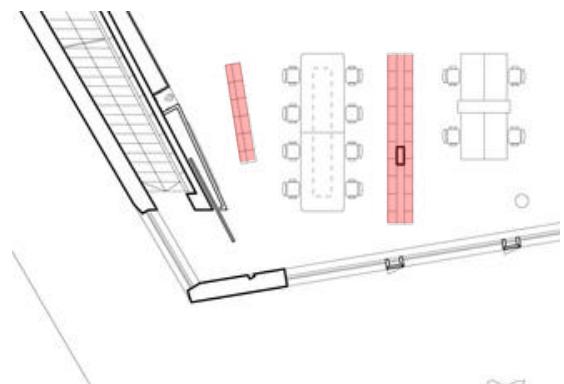


Figure 14.
Suhrkamp Ensemble Offices
(Berlin, Allemagne)
Bundschuh Architekten, 2020

5.1.3. Un projet de rénovation : source d'inspiration pour le *Projet concept*

La société *R-Group SA*, active dans le secteur de la construction sur le territoire belge, souhaite installer son nouveau siège social dans l'ancien bâtiment industriel datant du début des années 1960, situé dans les alentours de Liège (Rue de Tilff, 277 B-4031 Angleur). Notons que ce bâtiment est désaffecté depuis 1979.

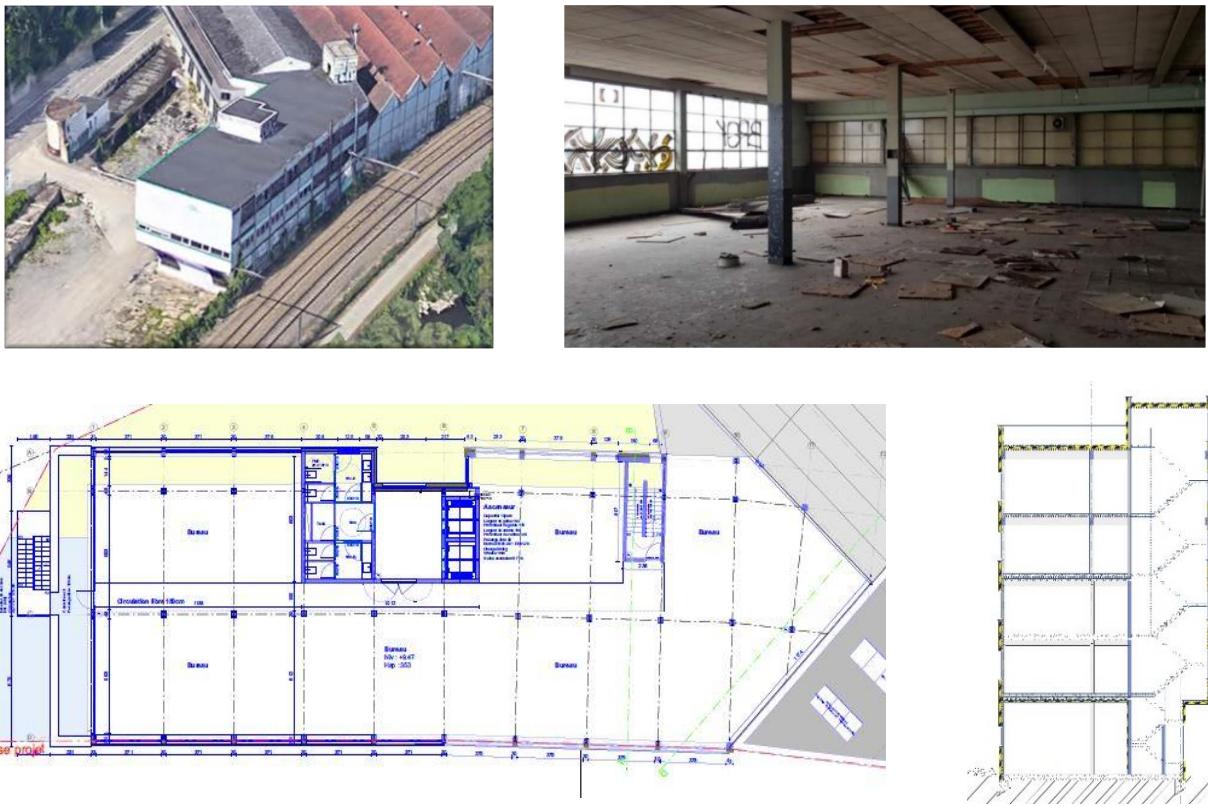


Figure 15.
Documentation graphique relative au projet de rénovation
(Liège, Belgique)
R-Group

L'immeuble a une emprise au sol d'environ 750 m² et se développe sur un total de cinq niveaux pour une hauteur proche de 25 m. Le bâtiment présente une géométrie relativement simple avec une structure à mailles mixtes en béton-acier et des grandes surfaces vitrées en façade. Grâce à sa configuration et à la superficie disponible, l'édifice offre différentes possibilités en vue d'un réaménagement en espace ouvert de bureaux. La société *R-Group SA* souhaite concevoir des plateaux paysagers au R+1, R+2, R+3. Etant structurée par départements de gestion et équipes de chantier, elle prévoit d'organiser ses open spaces par groupe de 4 personnes avec un nombre entre 15 et 20 postes par niveau. Ainsi, certains bureaux individuels pour les chefs d'équipe sont requis.

Des ateliers, un dépôt de matériaux et un parking pour les véhicules de chantier doivent être prévus au R0. Le dernier étage (R+4) doit prévoir une salle de conférence, des salles de réunion et une cafétéria.

Un stage professionnel effectué au sein de la société il nous a permis de récolter les informations relatives à ce projet de rénovation et nous a amené les premiers élément constituant notre projet concept.

5.1.4. La conception du *Projet concept* : le bâtiment

Afin d'inscrire le cas d'étude dans un contexte normatif cohérent, le bâtiment proposé est supposé être situé en France. L'édifice est conçu comme un *centre de bureaux* dont chaque niveau peut fonctionner de manière autonome et accueillir des sociétés ou des services de différentes vocations. Il a une emprise au sol d'environ 800 m², avec approximativement une longueur de 40 m, une profondeur de 20 m et une hauteur de 25 m. L'édifice est composé de cinq niveaux, dont le R0 est destiné aux espaces communs (espace accueil, cafétéria, salles de conférence, etc.). Les niveaux R+1, R+2, R+3, R+4 sont aménagés de manière à pouvoir accueillir respectivement les quatre typologies de bureaux catégorisées par la norme NF S31-199 (*centre d'appels, espace projet, administration, espace de réception du public*).

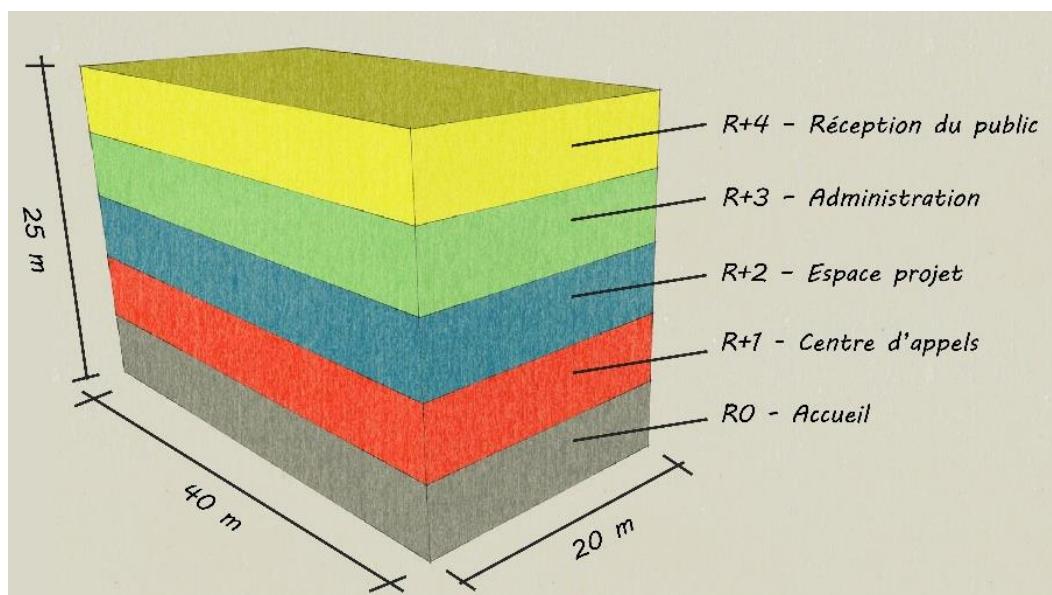


Schéma de principe : volumétrie

La structure est en béton armé et les colonnes sont disposées selon une maille carrée de 10 m. Le bâtiment est caractérisé par de grandes surfaces vitrées en façade, avec une hauteur entre planchers d'environ 5 m. L'étage type est composé d'un plateau d'environ 400 m² à aménager selon les exigences du type de bureau ouvert et d'un espace destiné aux équipements et aux espaces support (circulation, toilettes, espace détente, local technique, local entretien, etc.). Comme recommandé par la norme NF S31-199, la propagation de bruits indésirés vers le plateau est limitée par des sas entre les locaux (*espaces tampons*). L'orientation du bâtiment a été déterminée en considérant les risques d'éblouissement et de surchauffe engendrés par les surfaces vitrées en façade. Le plateau est orienté au nord, afin d'assurer un éclairage naturel homogène au cours de la journée de travail et de limiter l'exposition directe au rayonnement solaire (Guide Bâtiment

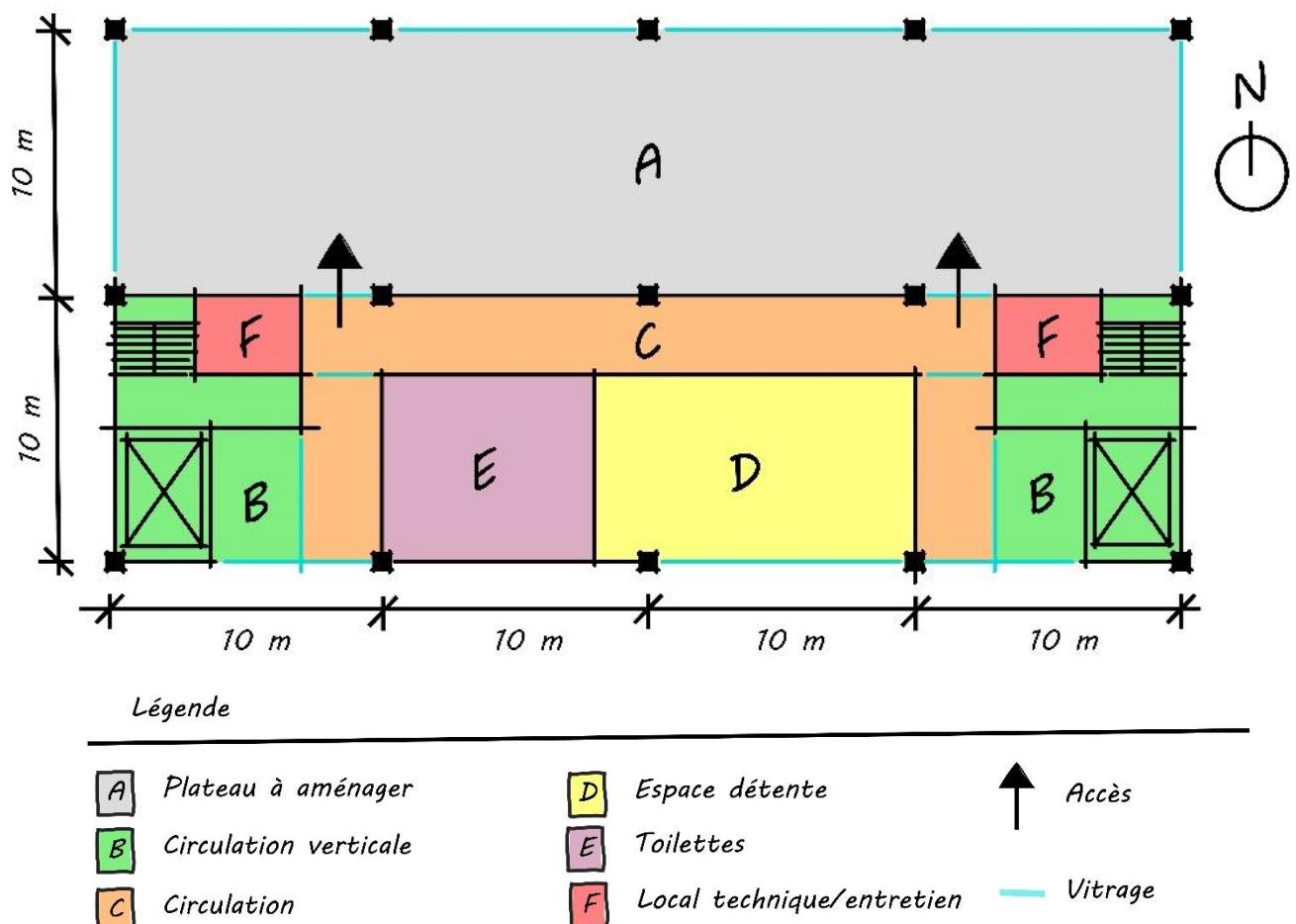
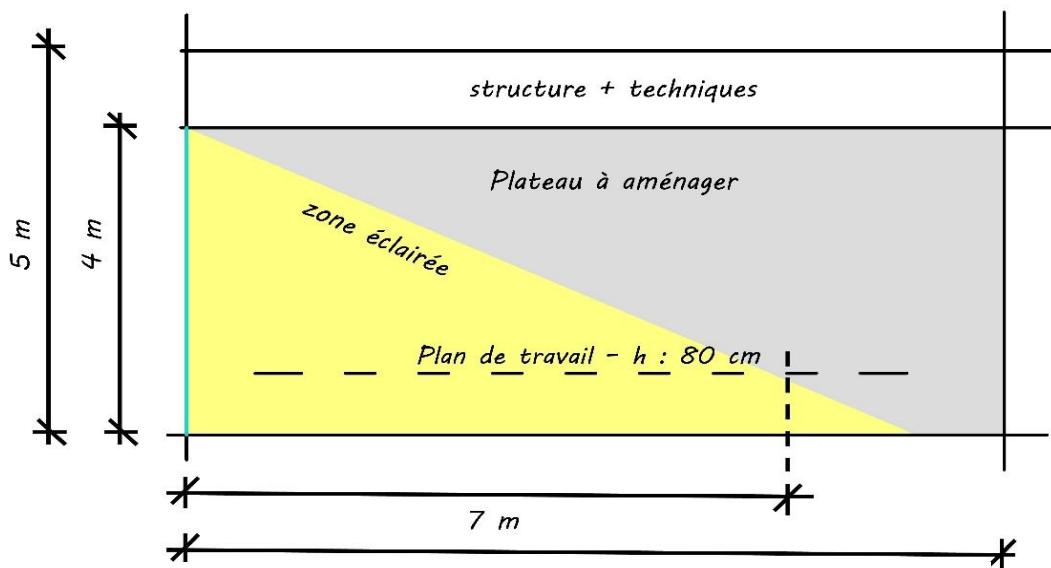
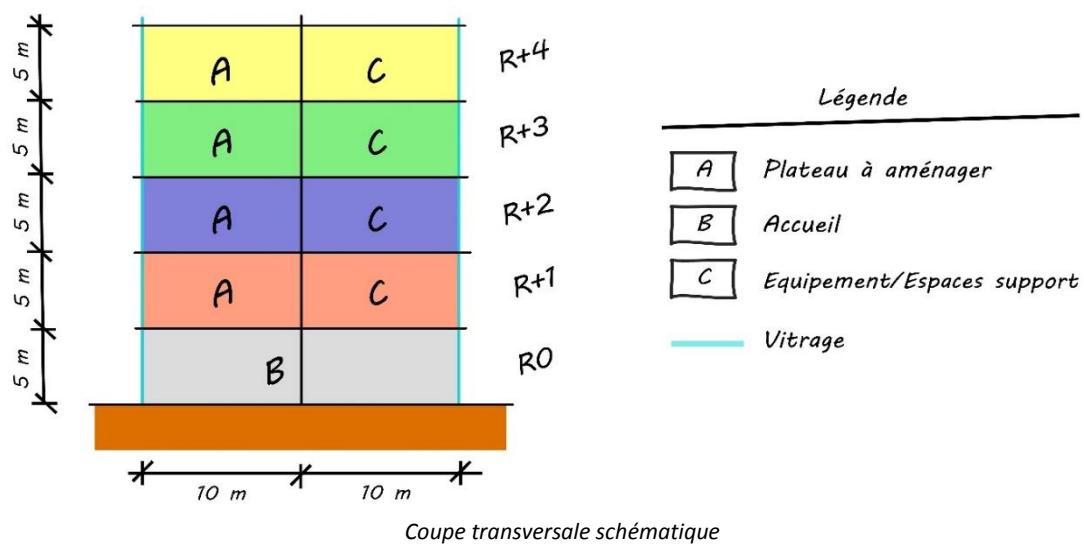


Schéma de principe : étage type

Durable, 2019). Eventuellement, les façades latérales et celles exposées au sud, seront équipées par des systèmes de masquage externes.

Concernant les différents plateaux, la hauteur entre planchers et la dimension des baies sont censées assurer l'accès à la lumière naturelle avec une profondeur utile d'environ 7 m, en considérant les plans de travail placés à 80 cm (+/- 5 cm) du sol (Guide Bâtiment Durable, 2019). Tout en considérant le vitrage en façade, le faux plafond est prévu à environ 4 m du sol pour les encombrements des éléments horizontaux de la structure et le passage des éléments techniques (ventilation, plomberie, climatisation, électricité, dispositifs incendie, etc.).



Coupe transversale schématique – plateau, schéma éclairage naturel

Les schémas de principe permettent d'établir les caractéristiques générales du bâtiment, en termes de dimensions et d'organisation. Ainsi, ces documents fournissent les informations nécessaires concernant la proportion des surfaces attribuées à chaque fonction et les interactions entre les divers espaces qui composent l'édifice. Au fil du temps, le projet a évolué avec un niveau de précision plus élevé en intégrant un nombre important de détails relatifs aux systèmes constructifs et à l'aménagement. Cela a nécessité des adaptations et des ajustements sans néanmoins amener des répercussions trop importantes par rapport aux schémas initiaux.

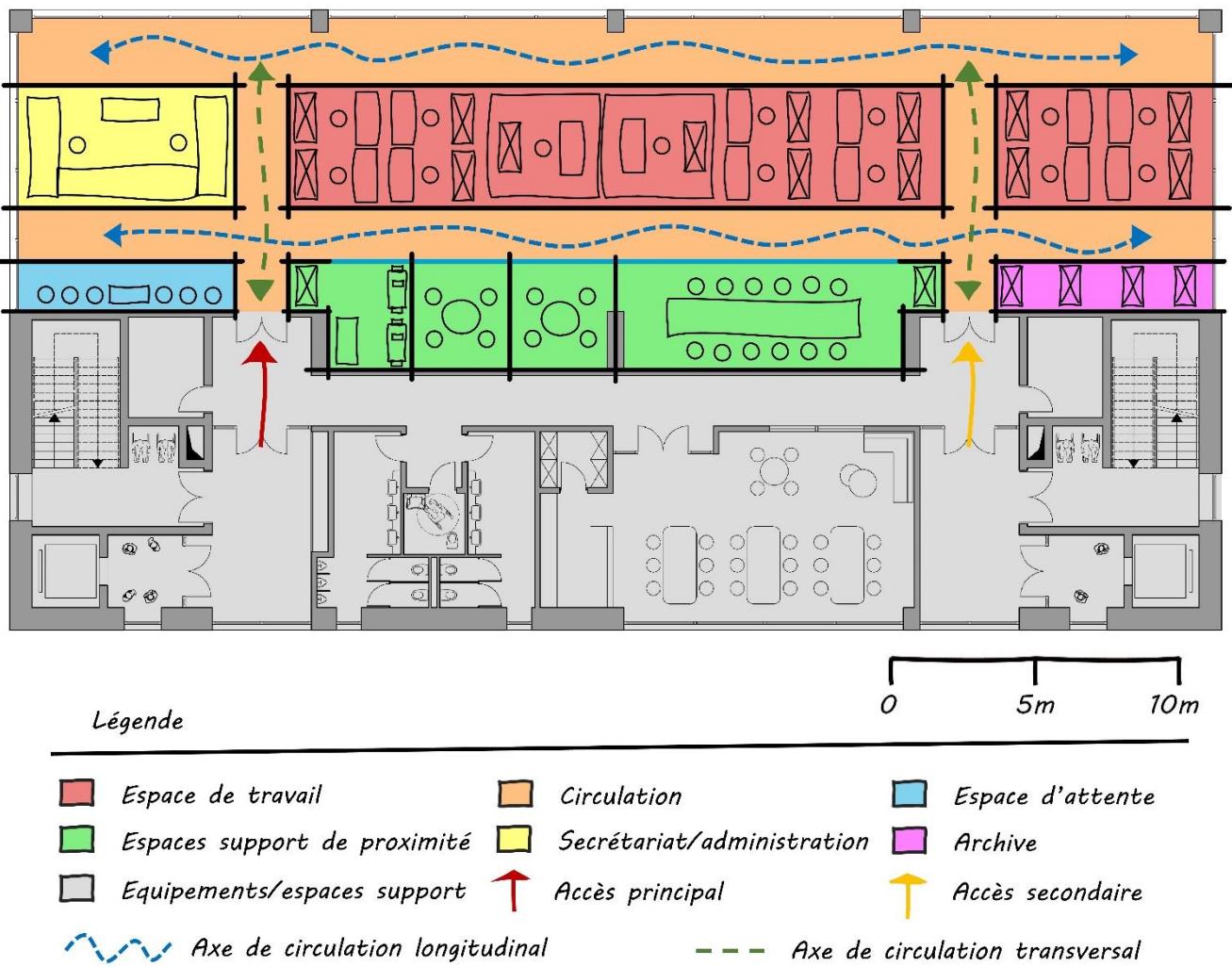
L'étage type a été élaboré jusqu'à obtenir la configuration finale idéale permettant par la suite de concevoir l'aménagement des plateaux et les analyses acoustiques suivantes.



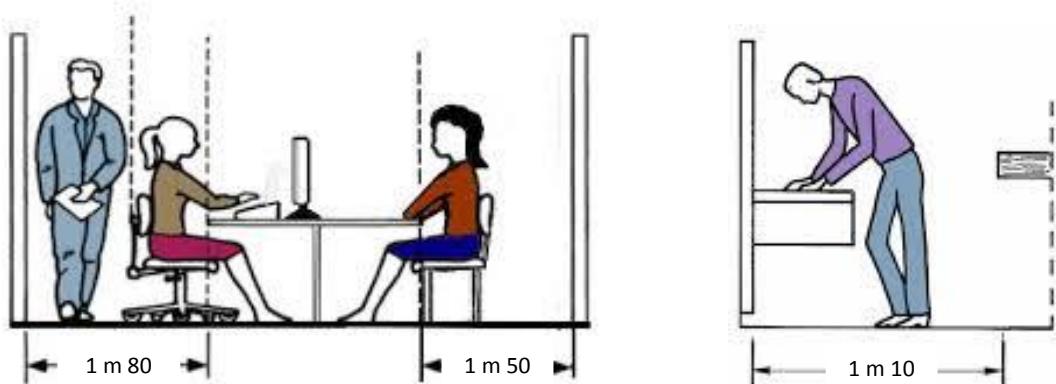
Vue en plan – étage type, schéma fonctions/couleurs

5.1.5. La conception des plateaux paysagers

L'aménagement des *plateaux* a été réalisé en considérant à la fois les enjeux acoustiques et les contraintes architecturales grâce au support de la norme NF S31-199. Une solution commune aux quatre typologies de bureaux ouverts a été élaborée concernant l'organisation générale (accès, circulation, fonctions, etc.). Les espaces ont été aménagés successivement en fonction des exigences spécifiques à chaque type d'activité. Le *schéma de principe* (figure) a été composé en considérant plusieurs éléments : les accès au *plateau*, les exigences liées à la sécurité incendie (en termes de distances et de dimensions spécifiques à respecter), l'accès à la lumière naturelle et les possibles interactions entre les espaces de travail et entre les *équipements* ou les *espaces support* préalablement figés. Ainsi, au niveau acoustique, nous aménageons l'espace de manière à limiter la propagation du son entre les différentes zones qui composent le *plateau*, au moyen de *barrières*



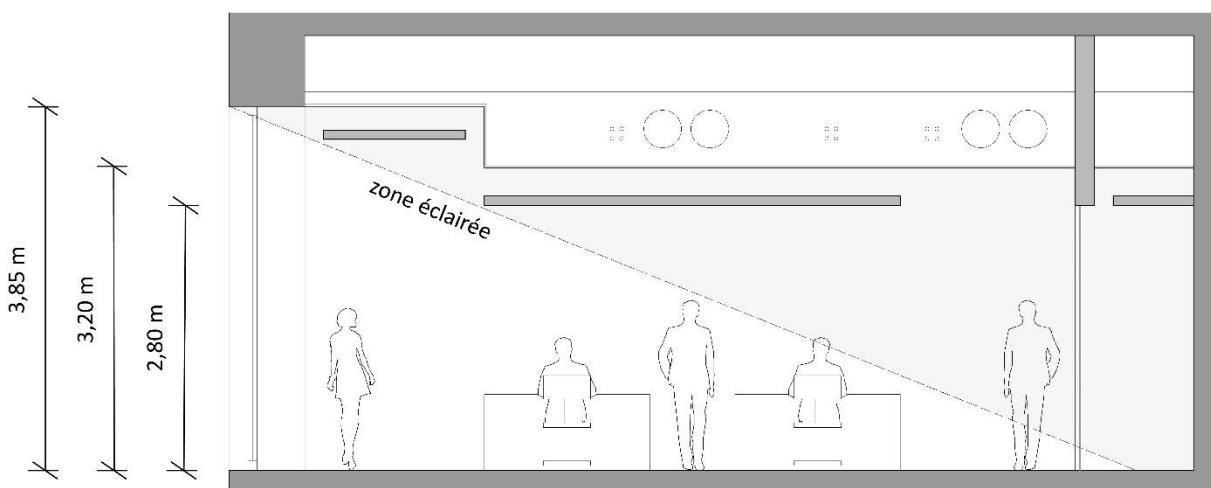
physiques (cloisons, mobilier, etc.) ou d'espacements importants (*distance de distraction*) (AFNOR, 2016). Un *axe transversal* relie l'accès principal à l'espace accueil/attente, dont on retrouve les postes destinés au *secrétariat/administration*. De cet espace, la circulation est doublée selon deux axes *longitudinaux* principaux qui traversent l'entièreté du plateau en croisant le deuxième *axe transversal* qui amène à l'accès secondaire. Ces directrices délimitent les surfaces destinées aux espaces de travail, aux espaces support de proximité (salle de réunion, salles de replis, local reprographie) et à l'archive. La configuration proposée vise à conférer une certaine fluidité aux flux des déplacements entre les différentes zones, au moyen d'un parcours tangentiel aux espaces de travail. Cette organisation est censée réduire le risque de dérangement, visuel et acoustique, occasionné par le passage des opérateurs au travers des postes de travail. Des surfaces vitrées le long des espaces support de proximité assurent une connexion visuelle vers le plateau et un certain degré d'éclairage naturel. Le couloir central destiné aux postes de travail sera aménagé selon les exigences du type de bureau ouvert, en accord avec les dispositions du Code du travail concernant les surfaces minimales par personne (INRS, 2013). A cette étape du projet, nous proposons un schéma d'intentions par rapport à l'aménagement futur. Afin de limiter la propagation du son et de garantir un bon niveau de *discréction* entre les équipes, nous structurerons les espaces de travail en plaçant le mobilier et des cabines destinées aux bureaux individuels, avec la fonction de barrières acoustiques et visuelles entre les postes. Ces éléments proposent le cas échéant des surfaces utiles pour des traitements acoustiques complémentaires. Pour des raisons de confort visuel des opérateurs, les plans de travail seront disposés de manière perpendiculaire à la façade vitrée principale afin de réduire le risque d'éblouissement ou de réflexion de la lumière naturelle sur les



L'aménagement des bureaux, Circulation – Fiche pratique ED23, INRS

écrans des ordinateurs. Les distances autour des postes et les dimensions des plans de travail sont fixées selon les valeurs requis par le Code du travail.

Concernant la taille des locaux, la norme *NF S31-199* recommande de réduire la hauteur sous plafond le plus possible, dans la limite des contraintes ergonomiques prévue par le Code du travail qui impose une hauteur minimale de 2,50 m. Néanmoins, afin d'assurer l'éclairage naturel jusqu'à une certaine profondeur du *plateau*, les dimensions de baies vitrées en façade, et par conséquent la hauteur sous plafond, doivent nécessairement être importantes. La solution à cette problématique est représentée par des hauteurs sous plafond différentes, entre la zone en proximité de la façade vitrée et celle donnant sur les espaces de travail. Ainsi, la distance du faux plafond au sol permet de placer des éléments suspendus (*baffles*) pour des traitements acoustiques complémentaires, tout en respectant la hauteur sous plafond minimale requise.

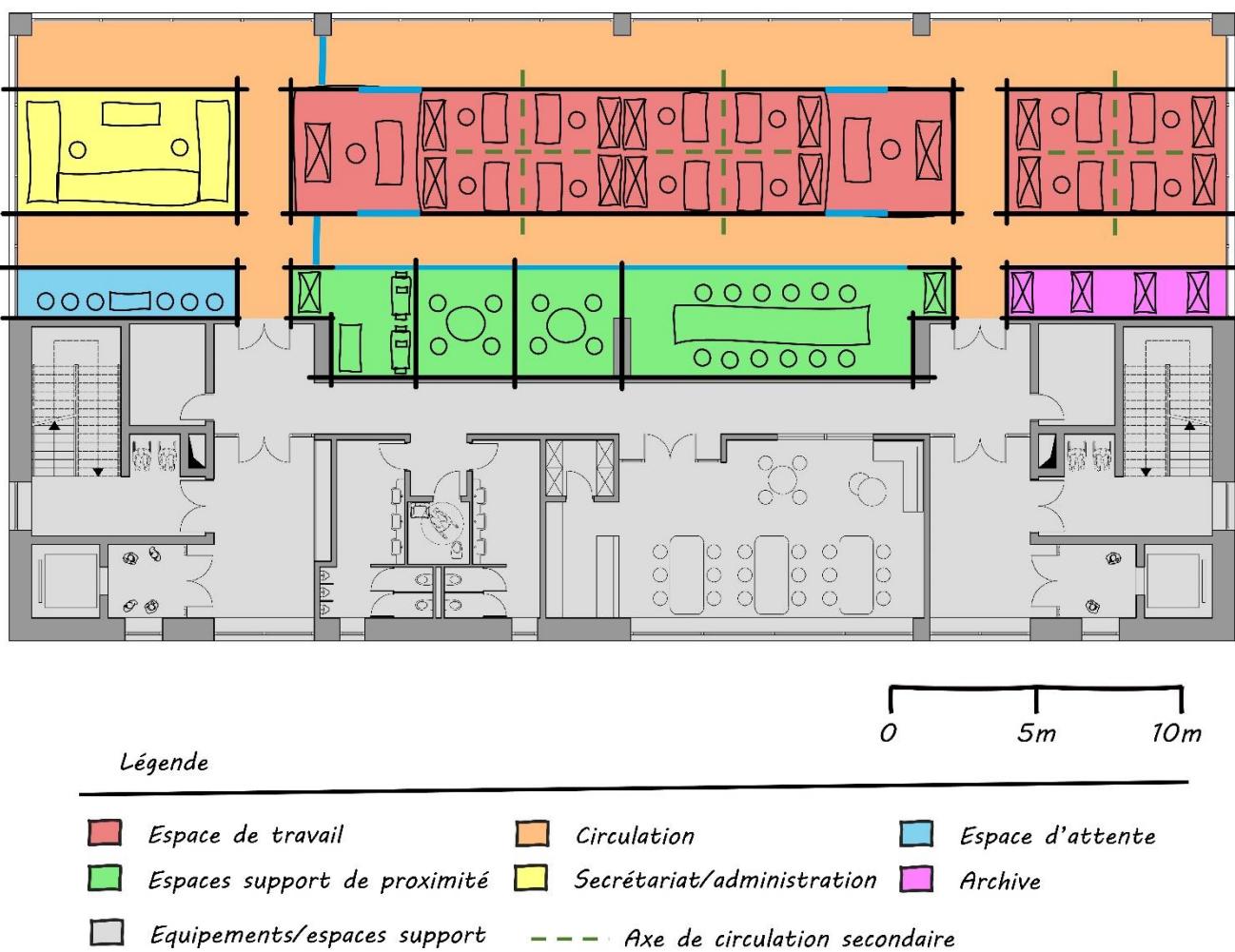


Coupe transversale – plateau, aménagement de l'étage type

Les schémas de principe offrent un aperçu de la configuration des divers plateaux et une esquisse concernant les intentions d'aménagement. Les étapes suivantes du projet amènent à l'évolution des schémas initiaux, pour chaque typologie de bureaux ouverts. A l'aide de la norme *NF S31-199*, nous effectuons préalablement une analyse de l'activité et de l'ambiance sonore de manière à individualiser les éléments nécessaires à la conception, par rapport aux enjeux acoustiques liés à l'espace de travail.

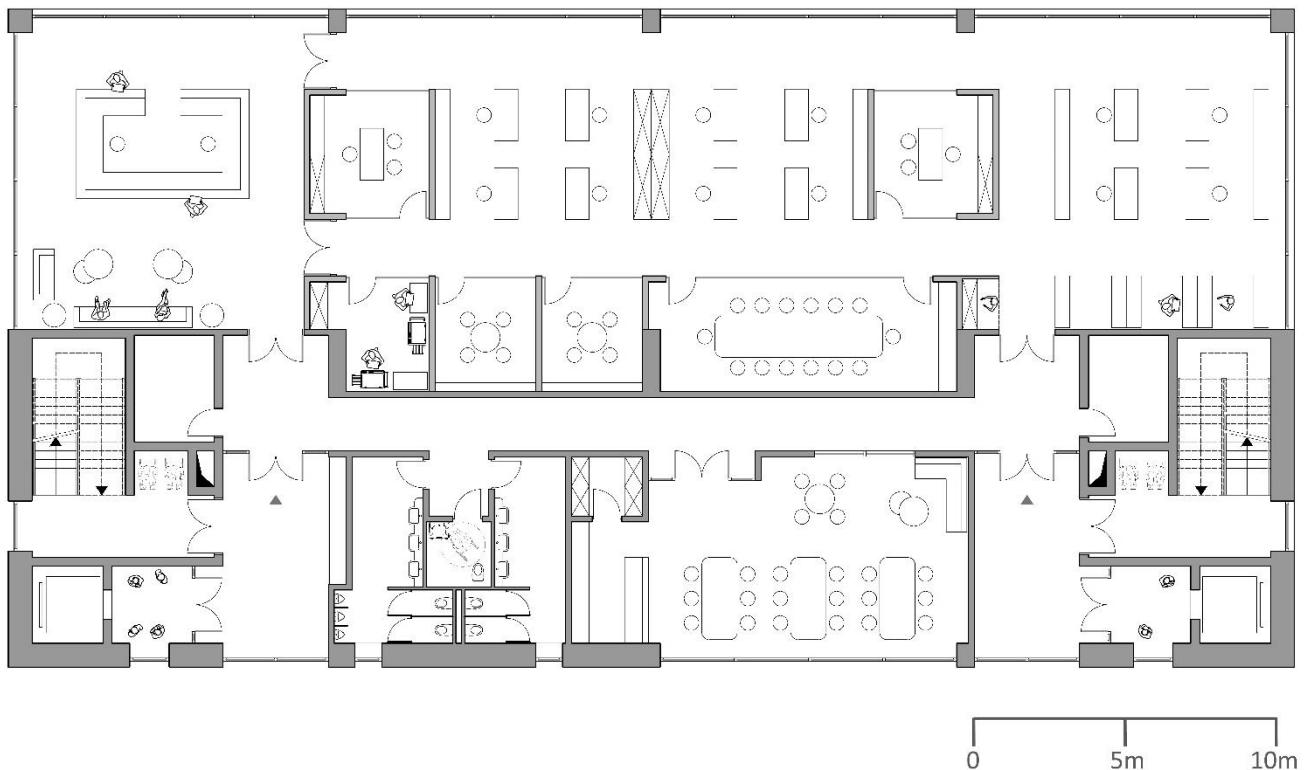
5.1.5.1. Aménagement du type d'espace n°1 : activité réalisée essentiellement par téléphone

L'environnement acoustique du *type d'espace n°1* (*centres d'appels*), dont les activités principales se déplient essentiellement par téléphone, est caractérisé généralement par un niveau sonore ambiant de modéré à élevé. Les systèmes de téléphonie et les communications téléphoniques représentent les sources de bruit principales. L'enjeu acoustique principal est de garantir une bonne *intelligibilité* pour les échanges téléphoniques et en même temps un bon niveau de *discretion* entre les postes pour l'exécution de tâches intellectuelles individuelles (AFNOR, 2016).



La superficie d'environ 150 m² du couloir central destiné aux postes de travail permet d'organiser trois *cellules* de quatre personnes et deux bureaux individuels cloisonnés (INRS, 2013). Afin de limiter la propagation du son des portes vitrées divisent *l'espace d'accueil* du reste du plateau et nous structurons les *espaces de travail* en plaçant le mobilier et les cabines destinées aux bureaux individuels avec la fonction de barrières acoustiques et visuelles (AFNOR, 2016). Les espacements engendrés par les *axes de circulation secondaire* traversant les *cellules* visent à assurer la *discretion* entre les postes et à améliorer l'*intelligibilité* au cours des appels. Cette configuration consentit également les échanges ponctuels entre les opérateurs et les superviseurs en limitant le dérangement vers les autres collègues occupés dans l'exécution de tâches individuelles. Néanmoins, si les discussions peuvent perturber l'espace de travail ou demandent plus de *confidentialité*, des salles de replis ou de réunion sont prévues à cet effet.

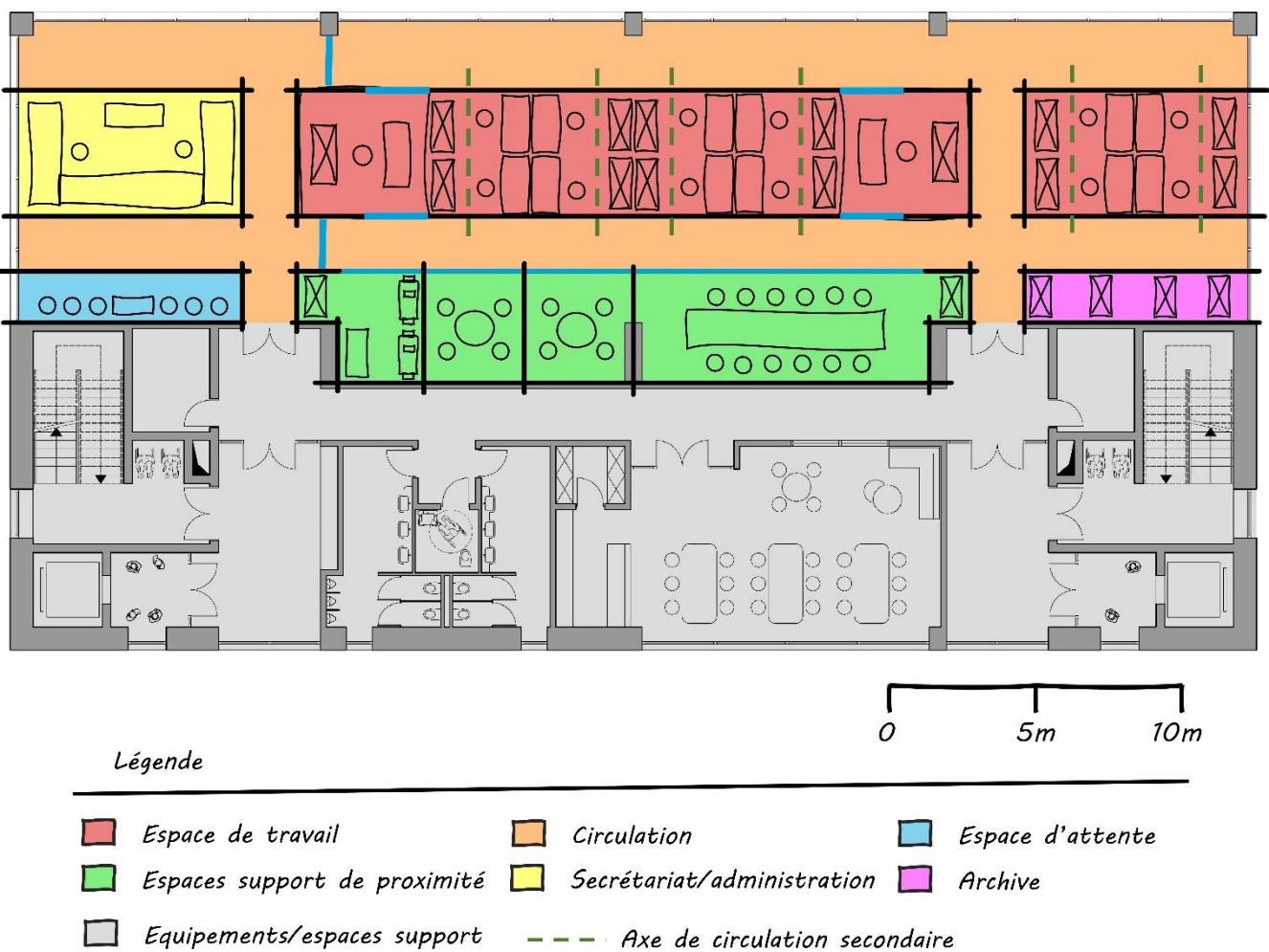
L'aménagement relatif au *type d'espace n°1* a été élaboré jusqu'à une configuration finale du plateau, qui fera l'objet des analyses acoustiques suivantes.



Vue en plan – aménagement du plateau type n°1

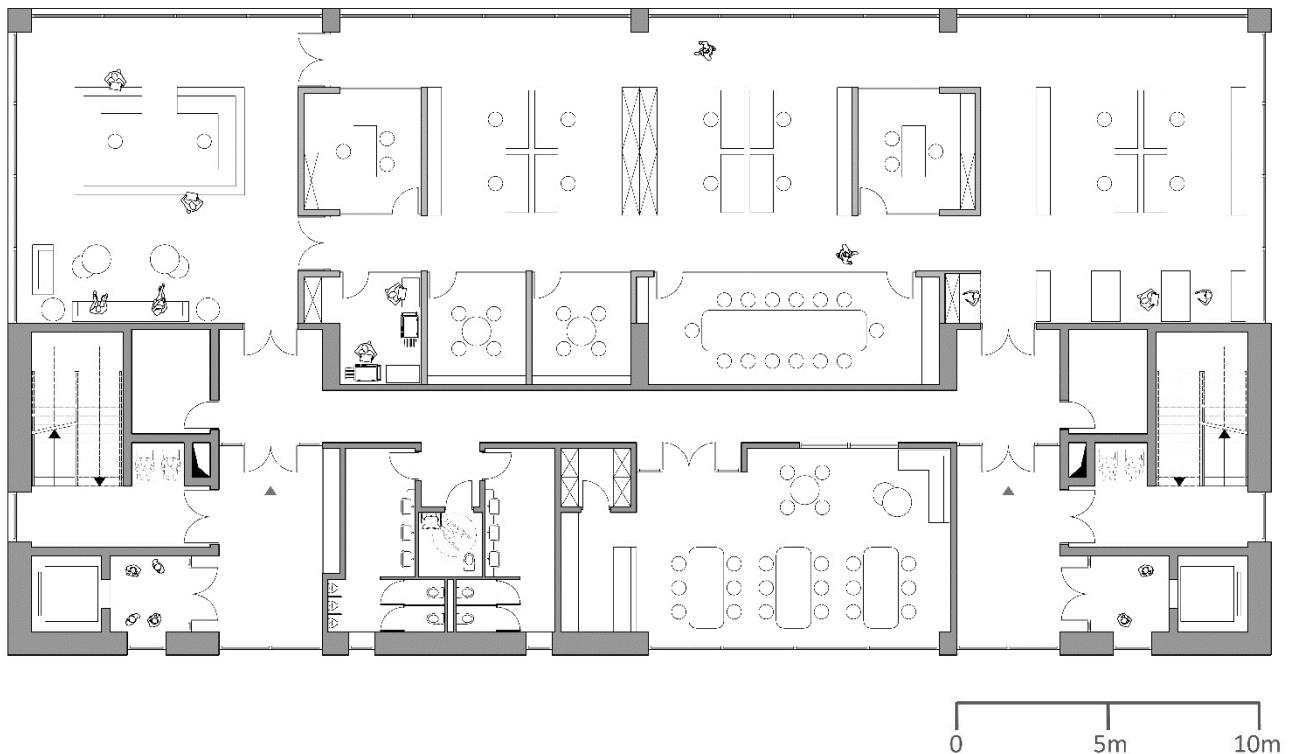
5.1.5.2. Aménagement du type d'espace n°2 : activités basées sur un travail collaboratif

L'environnement acoustique relatif au *type d'espace n°2 (espace projet)* est habituellement caractérisé par un niveau sonore ambiant très variable. Etant donné les activités considérées principalement comme collaboratives, les sources de bruit sont liées principalement aux interactions verbales fréquentes entre les collègues et souvent à des ambiances très animées. Il est nécessaire d'assurer une bonne *intelligibilité* entre les personnes d'une même équipe pour l'élaboration de projets communs, ainsi que pour les conversations au téléphone. Un certain niveau de *discréption* est également exigé entre les postes de travail pour les opérateurs occupés dans la réalisation de tâches intellectuelles individuelles demandant un degré de concentration moyen (AFNOR, 2016).



De manière analogue au *type d'espace n°1*, des portes vitrées divisent l'*espace d'accueil* du reste du plateau, afin de limiter la propagation du son. Ainsi, nous organisons le plateau en trois *cellules* de quatre personnes à l'aide du mobilier et des cabines destinées aux bureaux individuels, tout en assurant un certain degré de *discréction* entre les groupes de travail. Cependant, afin de favoriser les échanges verbaux et visuels entre les opérateurs pour l'activité collaborative et d'améliorer l'*intelligibilité*, nous réduisons les distances entre les postes. La disposition des plans de travail engendre les *axes de circulation secondaire* traversant les *cellules*, censée favoriser les déplacements et les interactions au sein d'une même équipe. Néanmoins, si les conversations trop animées peuvent perturber l'espace de travail ou demandent plus de *confidentialité*, des salles de replis ou de réunion sont prévues à cet effet.

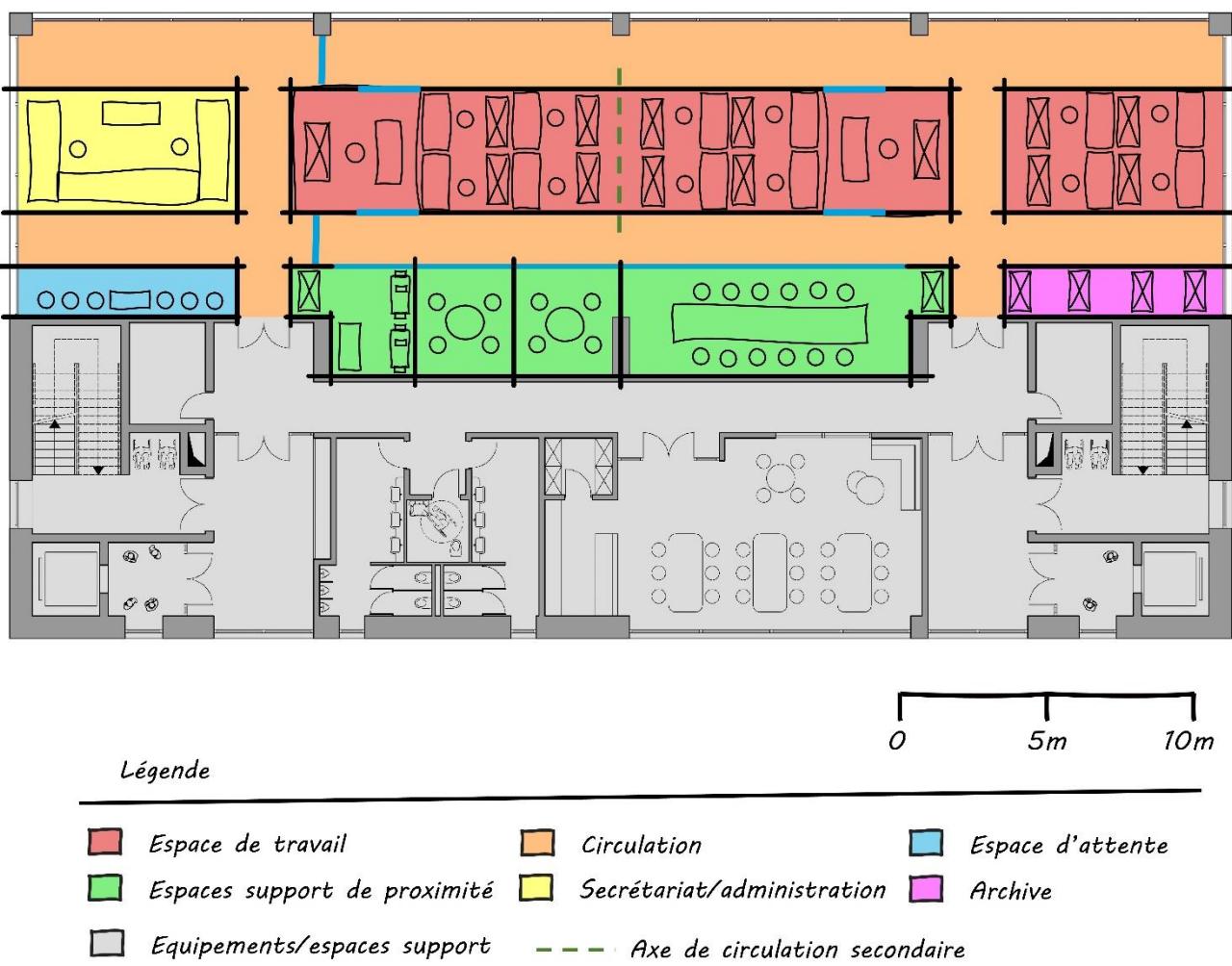
L'évolution du projet relatif au *type d'espace n°2* amène à la configuration finale du plateau de la manière suivante :



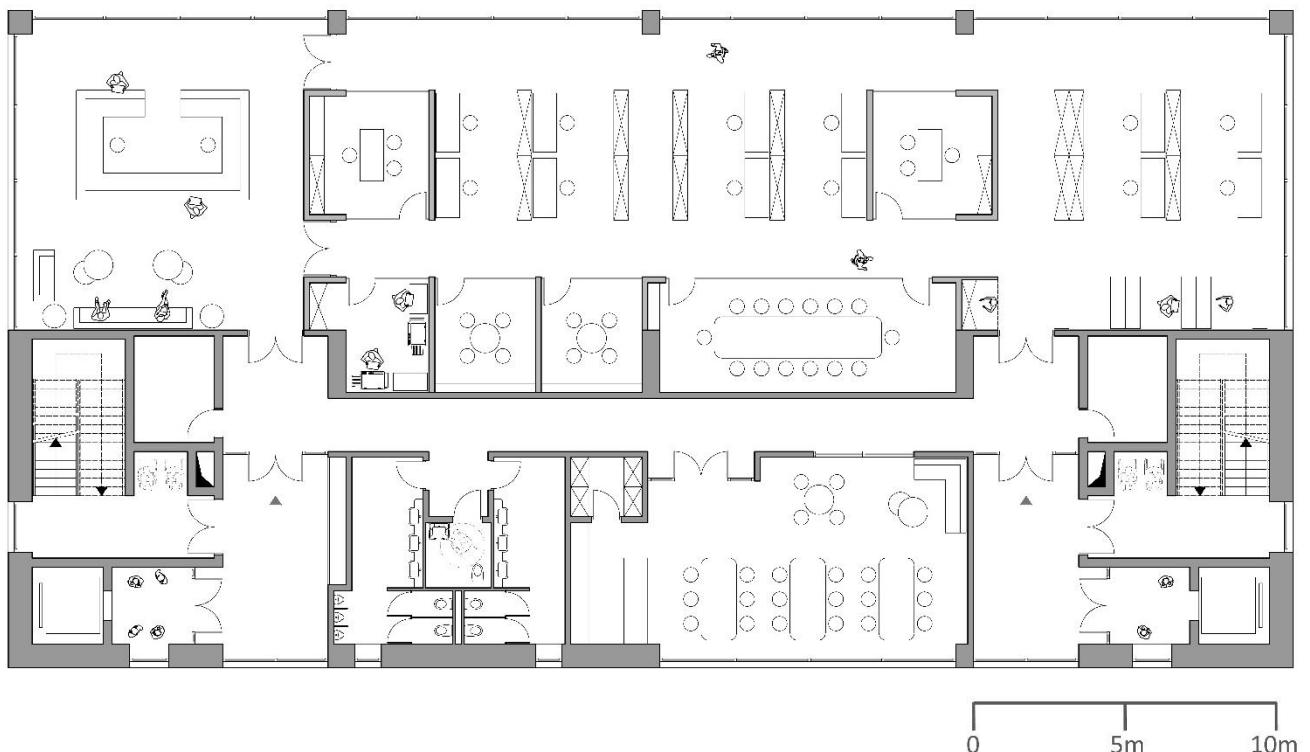
Vue en plan – aménagement du plateau type n°2

5.1.5.3. Aménagement du type d'espace n°3 : activités basées sur un travail faiblement collaboratif

L'environnement acoustique du *type d'espace n°3 (administration)* est caractérisé généralement par un niveau sonore ambiant très faible et les sources de bruit ne sont pas nombreuses. Les activités réalisées sont considérées peu collaboratives et les interactions verbales entre les collègues, ou au téléphone, sont très limitées. Les opérateurs effectuent principalement des tâches intellectuelles individuelles avec un degré de concentration élevé. Un bon niveau de *discréption* est exigé entre les postes pour l'exécution des tâches individuelles et une certaine *intelligibilité* est requise entre les postes adjacents pour des conversations très ponctuelles (AFNOR, 2016).



L'analyse du type d'activité, considérée peu collaborative, amène à structurer l'espace de travail en six groupes de deux personnes. Cette configuration, élaborée à l'aide du mobilier et des cabines destinées aux bureaux individuels, est censée d'assurer le bon niveau de *discretion* requis entre les postes et en même temps de favoriser les échanges ponctuels entre les opérateurs proches. Etant le niveau sonore ambiant très faible, des salles de replis ou de réunion sont prévues pour les conversations qui peuvent perturber l'espace de travail. Ainsi, afin de limiter la propagation du son des portes vitrées divisent *l'espace d'accueil* de l'espace de travail.

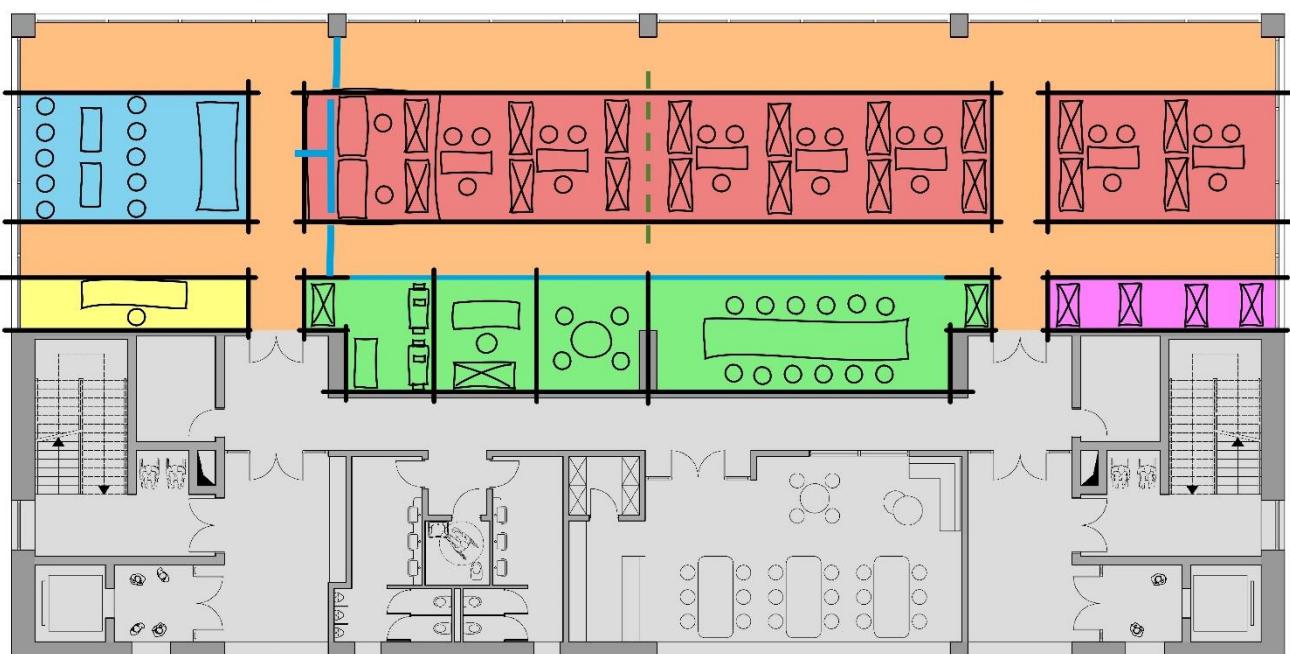


Figure

Vue en plan – aménagement du plateau type n°3

5.1.5.4. Aménagement du type d'espace n°4 : activités pouvant comporter l'accueil du public

Le *type d'espace n°4* (banques, assurances, etc.) est généralement caractérisé par un niveau sonore ambiant variable, habituellement élevé. Etant le bureau destiné principalement à la réception du public, les échanges entre les collègues sont très limités et la plupart des interactions se déroulent entre le personnel et le public, à des postes de type *guichet* ou dans des bureaux partiellement ou totalement cloisonnés. Pour ce type d'espace il est donc nécessaire d'assurer une excellente *intelligibilité* entre les opérateurs et le public. Ainsi, étant que les conversations souvent en lien avec la vie privée des clients, un bon niveau de *discréction*, voire *confidentialité*, est requis entre les postes de réception et les espaces d'attente (AFNOR, 2016).



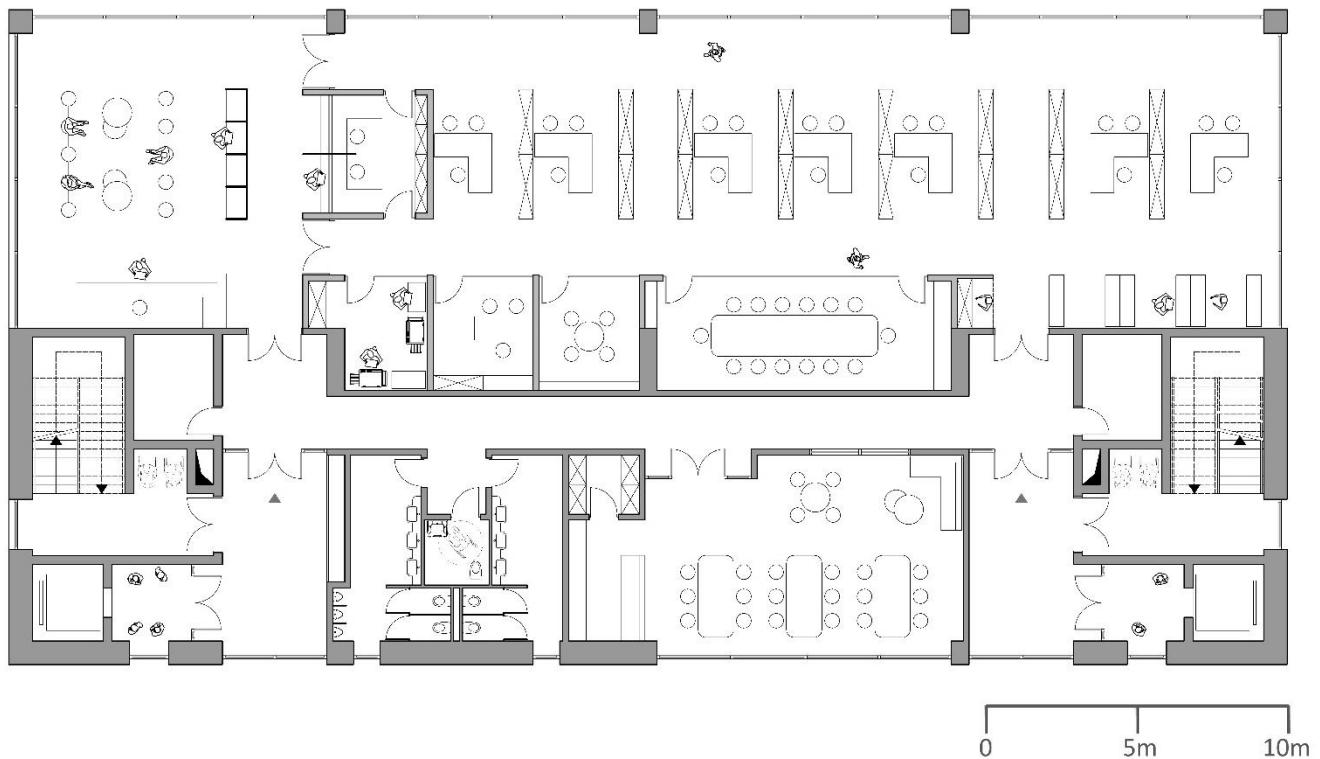
Légende

■	Espace de travail	■	Circulation	■	Espace d'attente
■	Espaces support de proximité	■	Accueil/Secrétariat	■	Archive
□	Equipements/espaces support	— — —	Axe de circulation secondaire		

Figure

Schéma de principe – aménagement du plateau type n°4

Les exigences de ce type d'espace destiné à la réception du public conduisent en premier lieu à une solution spécifique concernant l'aménagement de l'*espace d'accueil*, par rapport aux autres typologies de bureaux ouverts. L'*accès principal* amène au *poste de réception/informations*, à l'*espace d'attente* adjacent et aux postes de type *guichet*. Des portes vitrées divisent ces espaces du reste du plateau, dont nous retrouvons l'*espace reprographie*, un bureau individuel, une salle de replis, une salle de réunion et sept postes de travail individuels. En fonction du type de service fourni, le public est accueilli aux guichets pour des opérations rapides ou aux postes bureaux pour les démarches plus particulières. De manière analogue aux autres types d'espace, le mobilier et les distances entre les postes de réception sont censés limiter la propagation du son et assurer le niveau de *discréption* et de *confidentialité* requis.



Vue en plan : aménagement du plateau pour le type d'espace n°4

5.2. Analyse acoustique

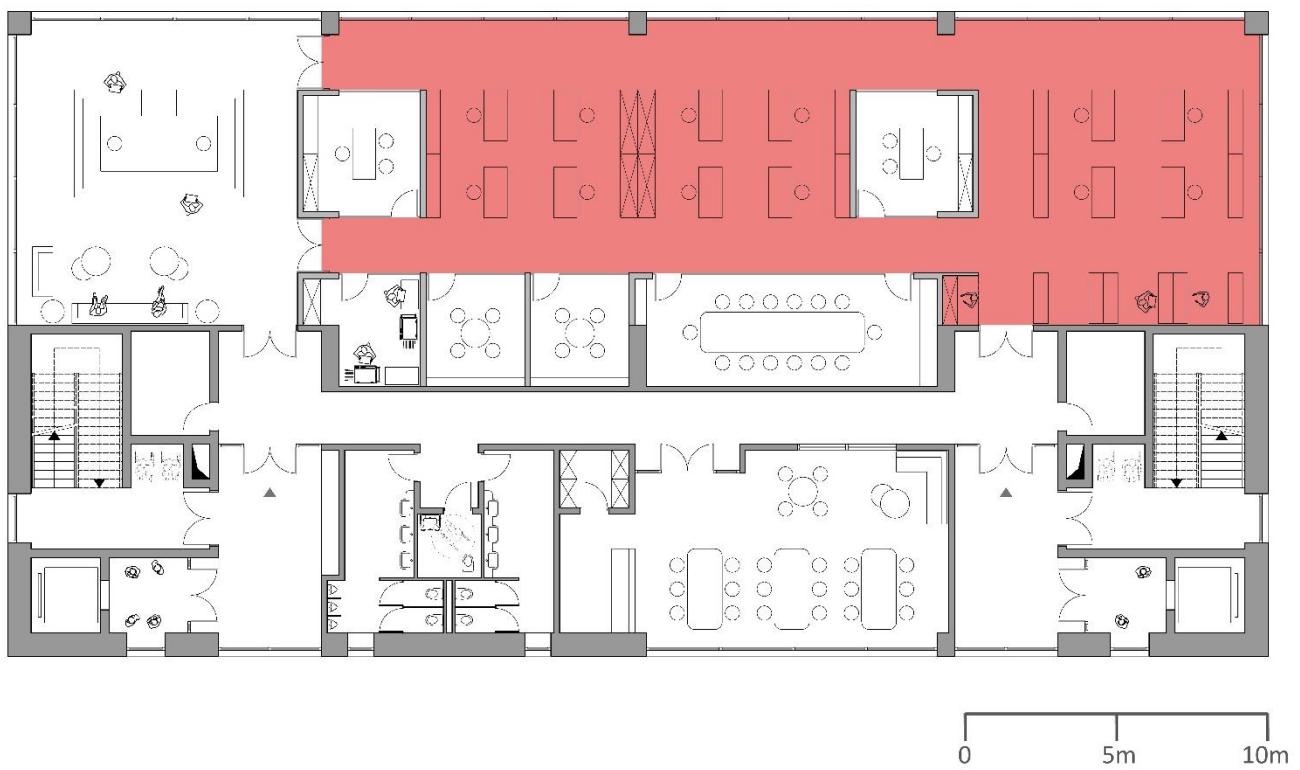
5.2.1. Introduction

Dans cette section nous présenterons les résultats de l'analyse acoustique effectuée grâce aux simulations numériques à l'aide du logiciel d'acoustique de salle *SalRev*, développé par le *Département d'Acoustique de l'Université de Liège – ULiège*. Ce logiciel évalue la distribution des niveaux sonores et des temps de réverbération (et autres indicateurs acoustiques) dans une salle, pour une position de source donnée, à partir d'un lancer de rayons sonores à l'intérieur du volume de cette salle⁵. De manière itérative, nous effectuons le dimensionnement acoustique relatif au projet d'aménagement proposé pour le *type d'espace n°1 – centre d'appels (activité réalisée essentiellement par téléphone)* (***Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.***). Plusieurs *solutions d'aménagement* ont été produites en intervenant avec des matériaux spécifiques pour les traitements acoustiques ou en proposant différentes configurations architecturales. Afin de vérifier la validité des solutions proposées par rapport aux exigences de la norme, l'analyse est centrée sur le calcul de la *durée de réverbération Tr*. Pour rappel, la norme *NF S31-199* adopte deux différents indicateurs pour le temps de réverbération : le Tr_{125} , mesuré pour la bande d'octave à 125 Hz, et le Tr , mesuré comme moyenne arithmétique des durées pour les bandes d'octave centrées sur 250 et 4000 Hz (AFNOR, 2016). Pour la méthode de mesurage, la norme *NF S31-199* renvoie à la norme *NF EN ISO 3382-2 Acoustique — Mesurage des paramètres acoustiques des salles - Partie 2 : Durée de réverbération des salles ordinaires* (AFNOR, 2010). La vérification des paramètres relatifs à l'isolation acoustique entre les divers locaux composants l'espace ouvert sort du cadre de cet étude. Par conséquent, nous assumons l'hypothèse d'une parfaite isolation entre les espaces cloisonnés.

⁵ <http://hdl.handle.net/2268/34824>
<http://hdl.handle.net/2268/34426>

5.2.2. Analyse acoustique : type d'espace n°1 – Centre d'appels

Dans un premier temps, nous avons déterminé le volume à considérer pour l'analyse. Etant donné l'étude centrée principalement sur les performances acoustiques des espaces de travail catégorisés par la norme, *l'espace d'accueil* et les *espaces support* ne sont pas pris en compte dans cette analyse. De plus, en remarquant la présence de différents éléments de séparations (cloisons, portes, etc.), nous assumons que la propagation du son entre ces locaux est très limitée et que les activités peuvent se dérouler de manière indépendante (*Figure 16*).



Légende



Figure 16.
Vue en plan : type d'espace n°1 - Centre d'appels, volume d'analyse

Concernant les propriétés acoustiques (*coefficient d'absorption acoustique α*) des surfaces composants le plateau pour les différentes configurations, nous nous référons aux valeurs indiquées dans la littérature pour les matériaux d'utilisation courante dans la construction (vitrage, cloison, bois, etc.), alors que pour les produits recherchés sur le marché ayant des performances acoustiques spécifiques nous avons consulté les *PV d'essai* fournis par les producteurs (*Tableau 1*).

<i>Identifiant (Id.)</i>	<i>Elément</i>	<i>Produit</i>					
1	Plafond	Faux plafond - ECOPHON - Focus A Extra Bass⁶					
	fréquence [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
	coeff. d'absorption α [-]	0,90	0,90	0,90	0,95	1,00	1,00
2	Sol	Moquette - INTERFACE Stone Course⁷					
	fréquence [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
	coeff. d'absorption α [-]	0,00	0,05	0,10	0,25	0,35	0,55
3	Parois - Mur plein	Plaster on solid backing⁸					
	fréquence [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
	coeff. d'absorption α [-]	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05
4	Parois - Cloison	Plaster, smooth finish, on lath¹					
	fréquence [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
	coeff. d'absorption α [-]	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03
5	Parois - Panneau mural	PRINT ACOUSTICS - type Ds , ép. tot. : 90 mm⁹					
	fréquence [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
	coeff. d'absorption α [-]	0,30	0,85	0,99	0,90	0,75	0,85
6	Vitrage - Châssis	Double glazing, 2-3 mm glass, 1 cm gap⁸					
	fréquence [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
	coeff. d'absorption α [-]	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02
7	Vitrage intérieur	Single pane of glass, > 4 mm⁸					
	fréquence [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
	coeff. d'absorption α [-]	0,10	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02
8	Portes mobilier acoustiques	PRINT ACOUSTICS - type Db , ép. tot. : 70 mm¹⁰					
	fréquence [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
	coeff. d'absorption α [-]	0,60	0,40	0,50	0,55	0,55	0,60
9	Surfaces mobilier	Plywood paneling 1 cm thick⁸					
	fréquence [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
	coeff. d'absorption α [-]	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
10	Plan de travail	Plywood paneling 1 cm thick⁸					
	fréquence [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
	coeff. d'absorption α [-]	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11

⁶ . ANNEXE 1

⁷ . ANNEXE 2

⁸ Cox et al., 2009

⁹ . ANNEXE 3

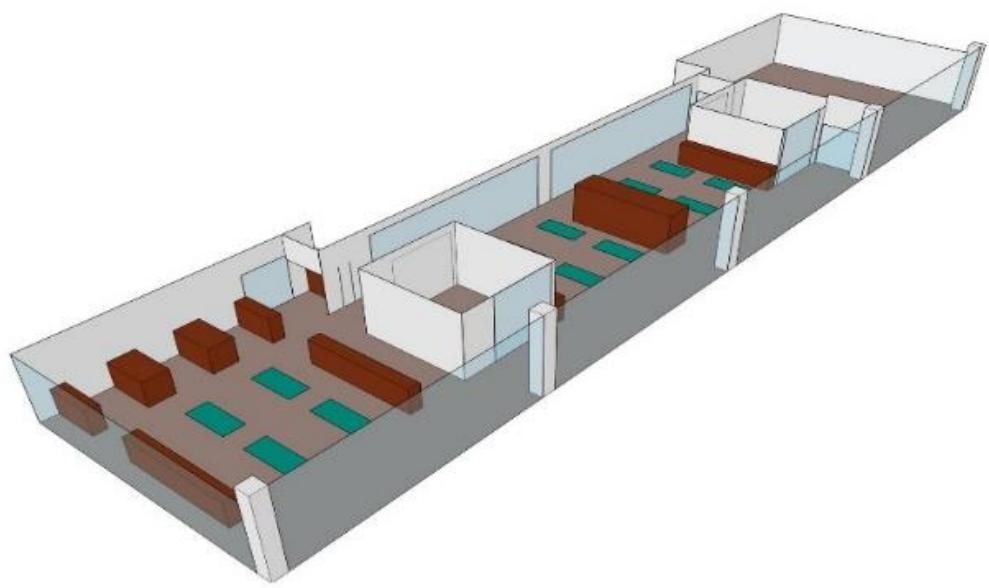
¹⁰ . ANNEXE 4

*Tableau 1.
Coefficients d'absorption acoustique α par bande d'octave 125 – 4000 Hz*

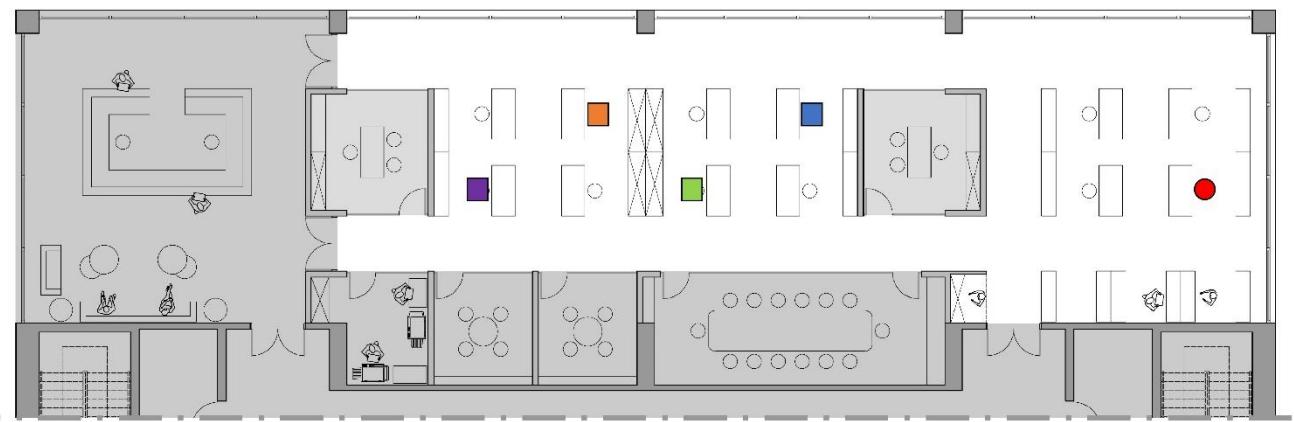
Les produits pour les traitements acoustiques (*Tableau 1, id. : 1,2,5,8*) ont été choisis selon leur propriétés (*coefficient d'absorption acoustique α*), en fonction des nécessités déterminées par les valeurs de *Tr* obtenues au cours des simulations.

Successivement, pour le calcul des *durées de réverbération Tr et Tr₁₂₅*, nous avons déterminé les *positions de mesurage* pour la disposition des *sources* et des *récepteurs (microphones)*. Afin de couvrir la totalité de l'espace de travail, trois *situations de mesurage* ont été établies en disposant à la fois une source et quatre récepteurs. De cette manière, un total de douze *combinaisons source-microphones* a été produit pour l'analyse de chaque configuration du plateau. Afin de reproduire la présence d'un opérateur dans sa position de travail, les sources et les récepteurs sont placés à proximité des plans de travail à la distance de 1,20 m du sol, correspondante à la hauteur de la bouche ou des oreilles d'une personne assise. Ainsi, les positions de mesurage restent identiques pour les différentes solutions d'aménagement proposées (*Figure 18*). Les valeurs finales des *durées de réverbération Tr et Tr₁₂₅* relatives à chaque configuration de plateau ont été élaborées en effectuant la moyenne arithmétique des résultats obtenus pour les trois situations de mesurage (AFNOR, 2010). Dans la section ANNEXES nous reprenons les valeurs calculées pour les *combinaisons source-microphones* pour chaque *situation de mesurage*.

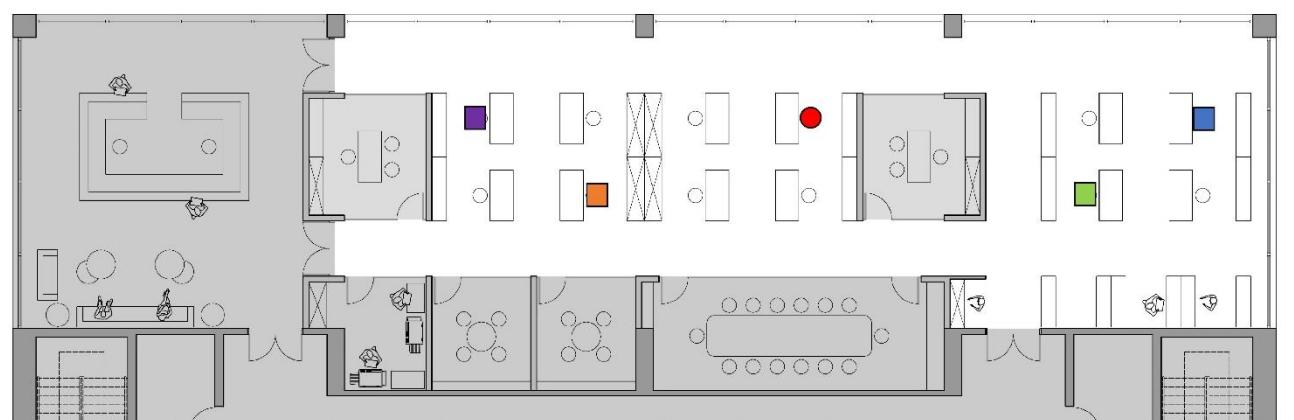
Dans les sections suivantes nous présentons les valeurs des *durées de réverbération Tr et Tr₁₂₅* relatives aux différentes *solutions d'aménagement* élaborées pour le plateau.



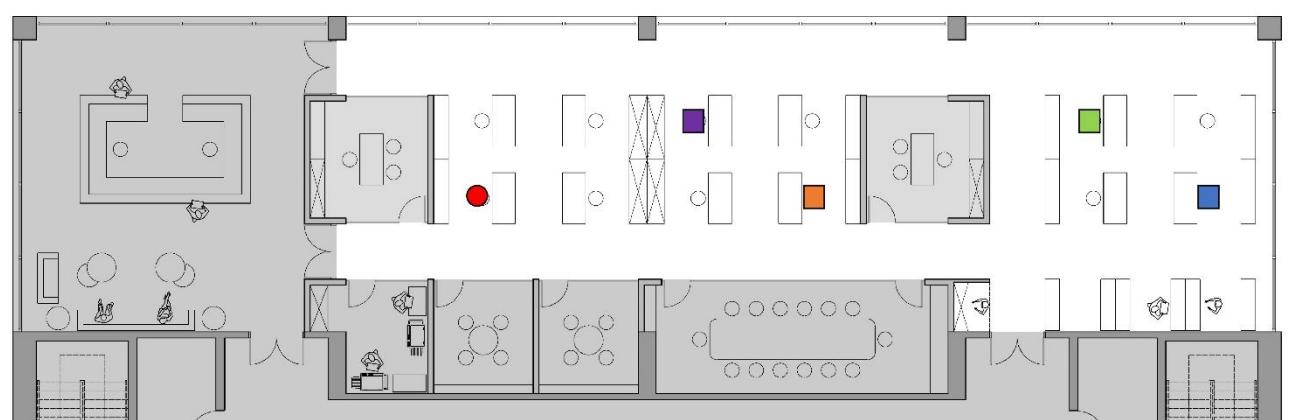
*Figure 17.
Type d'espace n°1 - Centre d'appels : Vue 3D, aménagement du plateau*



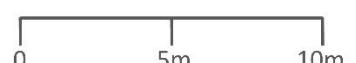
Situation de mesurage 1



Situation de mesurage 2



Situation de mesurage 3



Légende

- | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------|---|-------------|--|-------------|---|-------------|---|-------------|
| ● | Source | | Récepteur 1 | | Récepteur 2 | | Récepteur 3 | | Récepteur 4 |
|----------------------------------|--------|---|-------------|--|-------------|---|-------------|---|-------------|

Figure 18.
Situations de mesurage, positions source - récepteurs

5.2.2.1. Solution d'aménagement 1

La *solution d'aménagement 1* représente le *point de départ* de notre analyse. Cette configuration prévoit des traitements acoustiques exclusivement pour le *plafond* et le *sol* à l'aide de produits très performants (respectivement *Id. 1* et *Id.2*, *Tableau 1*). Nous privilégions cette solution pour les traitements acoustiques initiaux en raison de deux considérations. En premier lieu, les caractéristiques acoustiques (absorption) très modestes des matériaux utilisés habituellement dans la construction (plafonnage, vitrage, etc.) ont conduit à envisager la nécessité de certains traitements spécifiques. Ainsi, la norme *NF S31-199* (AFNOR, 2016) recommande d'intervenir principalement sur ces surfaces en raison de leur extension et de leur homogénéité. Par conséquent, afin d'augmenter la quantité d'absorption sur le plateau, le choix du *faux plafond* a été déterminé par les *coefficients d'absorption acoustique α* relatifs ce produit, montrant des valeurs élevées (proches de 1) pour toutes les bandes d'octaves. Concernant le *sol*, les recherches effectuées ont montré que la plupart des produits disponibles pour le revêtement présentent des propriétés médiocres pour les basses et moyennes fréquences (125 – 500 Hz) et modestes pour les hautes (1000 - 4000 Hz). Néanmoins, la *moquette* a été prévue également comme un élément supplémentaire, afin d'apporter des bénéfices en termes d'absorption au moins pour les bandes d'octave entre 1000 et 4000 Hz. Pour les autres éléments (murs, cloisons, vitrages, etc.) nous adoptons les produits utilisés habituellement dans la construction (*Tableau 1*).

Pour cette configuration du plateau les interventions sont limitées aux traitements acoustiques du plafond et du sol et aucune modification n'a été effectuée concernant la position et les dimensions des surfaces par rapport à l'aménagement de la solution initiale proposée en phase de conception.

Le *Tableau 2* présente les *valeurs recommandées* et les *valeurs de calcul* relatives à ce type d'aménagement. Nous remarquons que la valeur cible pour le Tr_{125} est respectée, alors que la valeur cible pour le Tr n'est pas atteinte. Des solutions acoustiques complémentaires sont donc à prévoir.

Solution d'aménagement	Descripteur acoustique	Tr recommandé (<i>NF S31-199</i>) [s]	Tr de calcul [s]
1	Tr_{125}	< 0,8	0,67
	Tr	< 0,6	0,93

Tableau 2.
Solution d'aménagement 1 : Tr recommandé et Tr de calcul

A cet effet, l'observation des valeurs par bandes d'octave (*Diagramme 1*) fournit des éléments pour les interventions suivantes. Le diagramme montre que la valeur de Tr à 125 Hz est inférieure à la valeur cible d'environ 0,1 s. Pour les bandes d'octave à 250 Hz et à 500 Hz les valeurs commencent à augmenter progressivement. Cependant, l'écart le plus élevé par rapport à la valeur cible indiquée par la norme est observé pour les bandes d'octave comprises entre 1000 et 4000 Hz (0,4 s ca.).

Pour des investigations plus approfondies, le tableau repris dans l'*ANNEXE 5* fournit les valeurs de Tr calculées pour les diverses *situations de mesurage*.

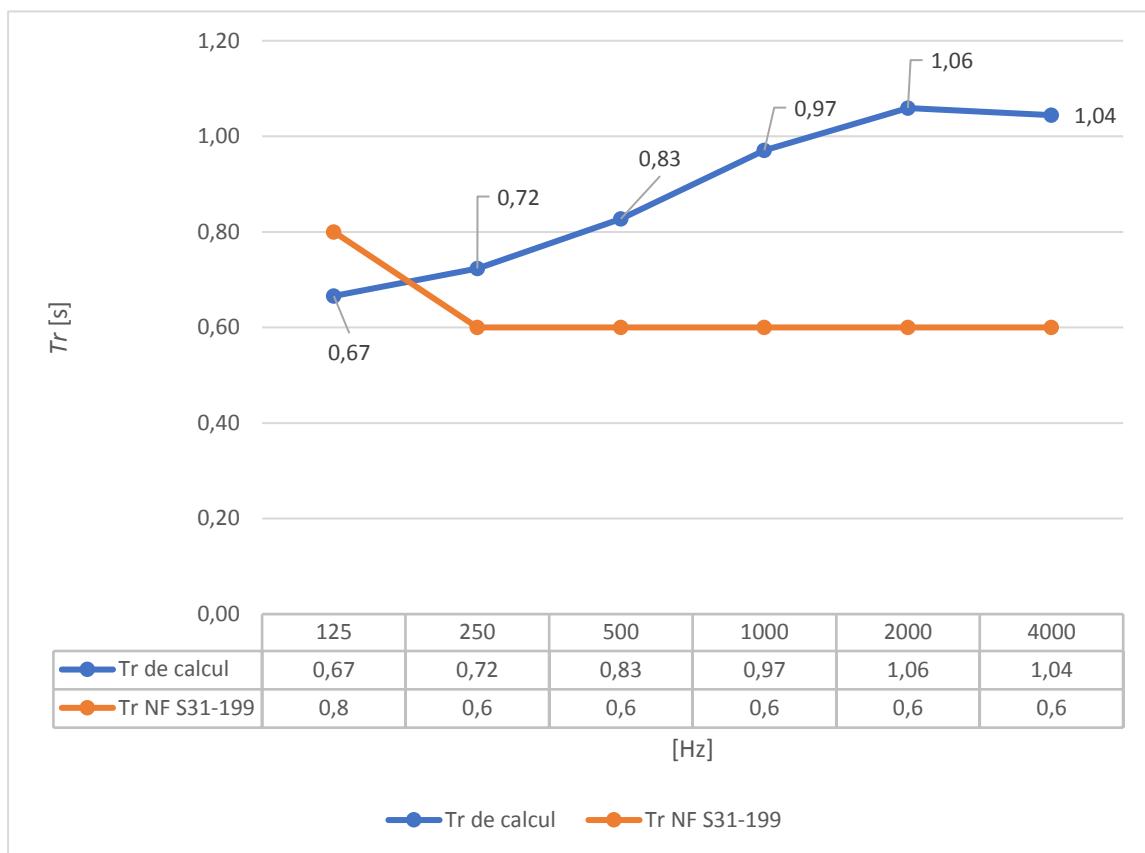


Diagramme 1.
Solution d'aménagement 1 : variation de Tr par bandes d'octave 125 - 4000 Hz

5.2.2.2. Solution d'aménagement 2

Les valeurs obtenues pour la *solution d'aménagement 1* amènent à l'adoption de traitements acoustiques complémentaires. Pour la *solution d'aménagement 2*, en plus du traitement du *plafond* et du *sol*, nous prévoyons le *doublage mural* pour certaines parois à l'aide de *panneaux en bois perforés* (*Id. 5, Tableau 1*), comme indiquée par la *Figure 19*. Afin d'assurer une certaine flexibilité en vue d'un réaménagement de l'espace de travail (changement de l'effectif, projet spécifique, etc.) nous proposons d'intervenir préalablement avec des traitements pour les surfaces fixes. Le choix du produit pour cette intervention a été déterminé sur base des considérations effectuées au cours de la *solution* précédente. L'importance des valeurs enregistrées pour les bandes d'octave comprises entre 1000 et 4000 Hz a amené à la nécessité d'un produit avec des *coefficients d'absorption acoustique* α élevés principalement à ces fréquences et plus modestes pour les autres bandes d'octave. Parmi les produits recherchés, les *panneaux* choisis offrent le meilleur compromis pour les exigences imposées par ce cas. De plus, en termes d'aménagement, l'adoption de ces éléments est très répandue en raison de leur résistance aux impacts et de leurs caractéristiques esthétiques.

Les interventions sont limitées aux traitements acoustiques du plafond, du sol et des surfaces verticales indiquées dans la *Figure 19*. Aucune modification n'a été effectuée par rapport à l'aménagement de la solution initiale proposée en phase de conception.

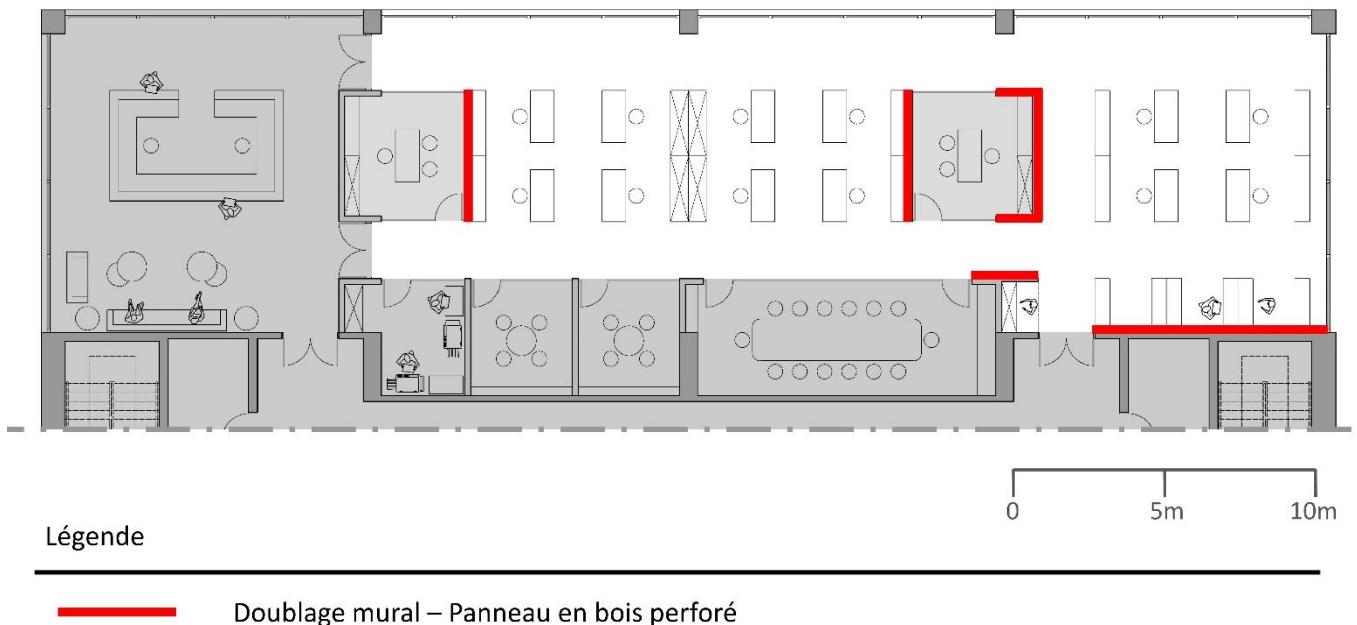


Figure 19.
Vue en plan : solution d'aménagement 2

Le *Tableau 3* présente les *valeurs de calcul* relatives à ce type d'aménagement. Nous remarquons que la valeur cible pour le Tr_{125} est respectée, avec une réduction de 0,12 s par rapport à la *solution 1*. Malgré l'amélioration de 0,24 s par rapport à la *solution* précédente, la valeur cible pour le Tr n'est pas atteinte. En même temps, les valeurs reprises dans le *Diagramme 2* montrent une diminution uniforme de Tr pour toutes les bandes d'octave. Néanmoins, les interventions proposées ne sont pas suffisantes et des solutions acoustiques complémentaires sont à prévoir afin d'augmenter la quantité d'absorption pour les fréquences entre 500 et 4000 Hz.

Pour des investigations plus approfondies, le tableau repris dans l'*ANNEXE 6* fournit les valeurs de Tr calculées pour les diverses *situations de mesurage*.

Solution d'aménagement	Descripteur acoustique	Tr recommandé (NF S31-199) [s]	Tr de calcul [s]
2	Tr_{125}	< 0,8	0,55
	Tr	< 0,6	0,69

Tableau 3.
Solution d'aménagement 2 : Tr recommandé et Tr de calcul

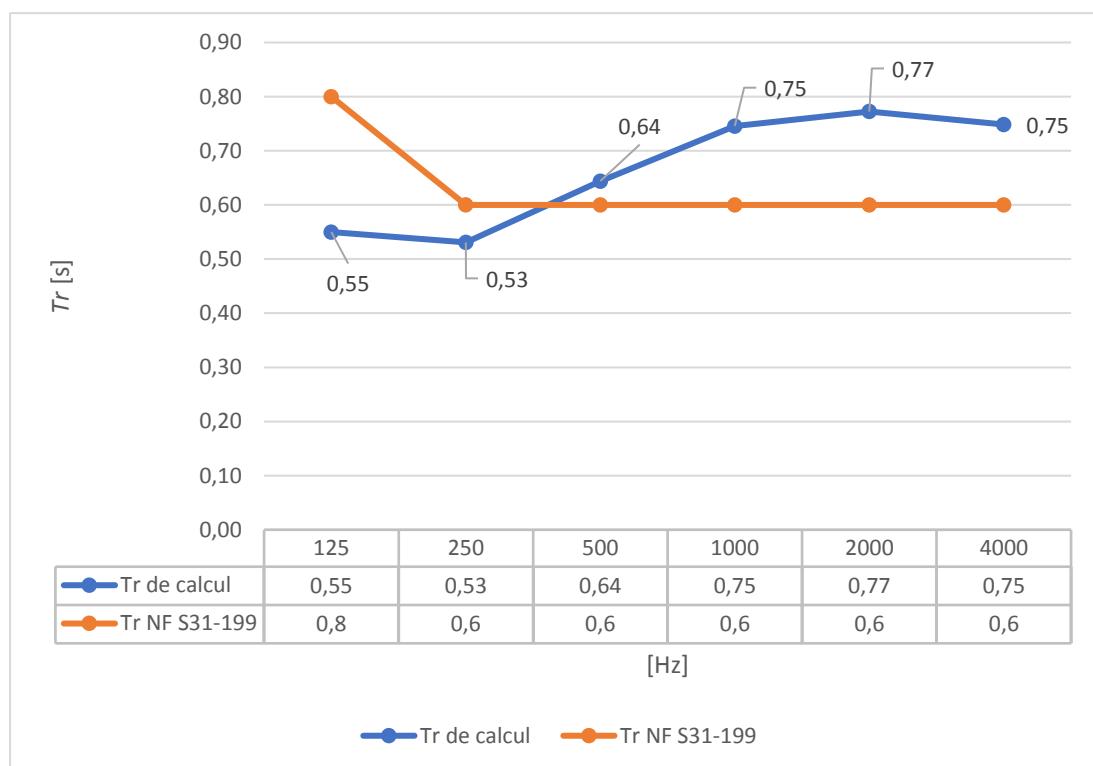


Diagramme 2.
Solution d'aménagement 2 : variation de Tr par bandes d'octave 125 - 4000 Hz

5.2.2.3. Solution d'aménagement 3

Afin d'augmenter la quantité d'absorption sur le plateau, la norme *NF S31-199* (AFNOR,2016) recommande d'utiliser du mobilier intégrant des matériaux absorbant. Dans ce sens, simultanément aux traitements utilisés pour la *solution d'aménagement 2 (sol, plafond, doublage mural)* nous proposons pour la *solution d'aménagement 3* l'adoption de *portes acoustiques* réalisés au moyen de *panneaux en bois perforés* pour les armoires et les meubles de rangements présents sur le plateau (*Figure 20*). Le *Tableau 1* reporte les valeurs des *coefficients d'absorption acoustique α* relatifs aux produits adoptés pour cette configuration de l'espace ouvert. De manière analogue aux *solution 1* et *2*, les interventions sont limitées aux traitements acoustiques de certaines surfaces et aucune modification a été effectuée par rapport à l'aménagement de la solution initiale proposée en phase de conception.

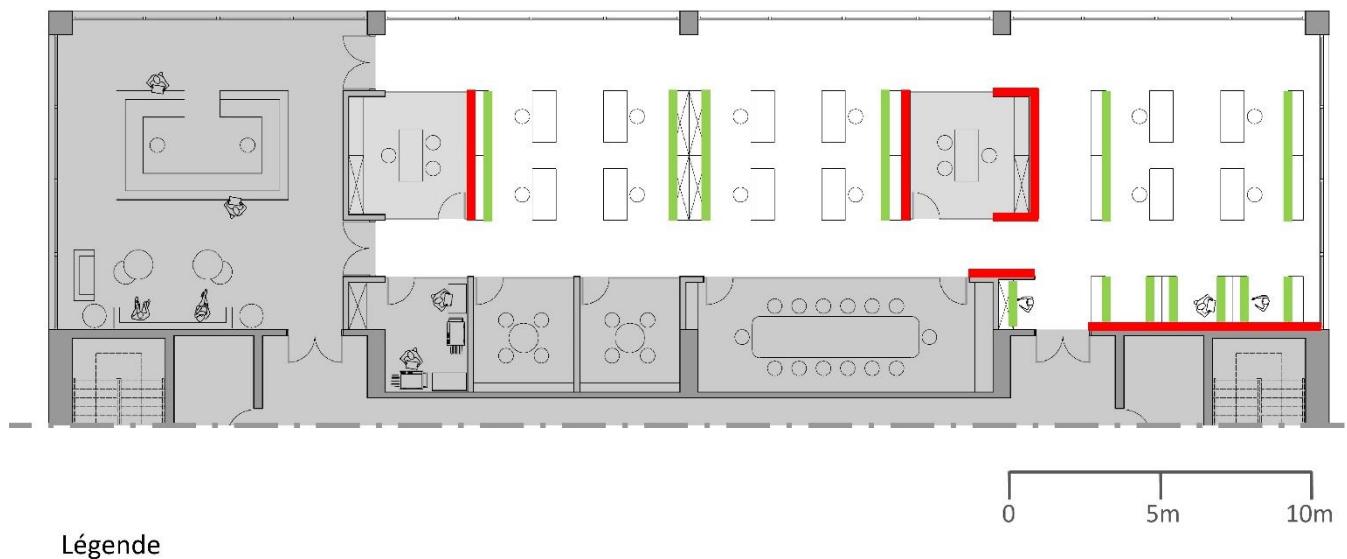


Figure 20.
Vue en plan : solution d'aménagement 3

Le *Tableau 4* présente les *valeurs de calcul* relatives à ce type d'aménagement. Nous remarquons que les valeurs cible sont respectées, tant pour le Tr_{125} que pour le Tr . Les interventions proposées sont donc suffisantes.

Solution d'aménagement	Descripteur acoustique	<i>Tr recommandé (NF S31-199) [s]</i>	<i>Tr de calcul [s]</i>
3	<i>Tr₁₂₅</i>	< 0,8	0,51
	<i>Tr</i>	< 0,6	0,53

Tableau 4.
Solution d'aménagement 3 : *Tr recommandé et Tr de calcul*

Les valeurs reprises dans le *Diagramme 1* montrent une diminution importante de *Tr* pour toutes les bandes d'octave ($\pm 0,20$ s) par rapport à la configuration précédente. En particulière, nous observons que la valeur de *Tr* est relativement uniforme ($\pm 0,04$ s) pour toutes les fréquences.

Pour des investigations plus approfondies, le tableau repris dans l'*ANNEXE 7* fournit les valeurs de *Tr* calculées pour les diverses *situations de mesurage*.

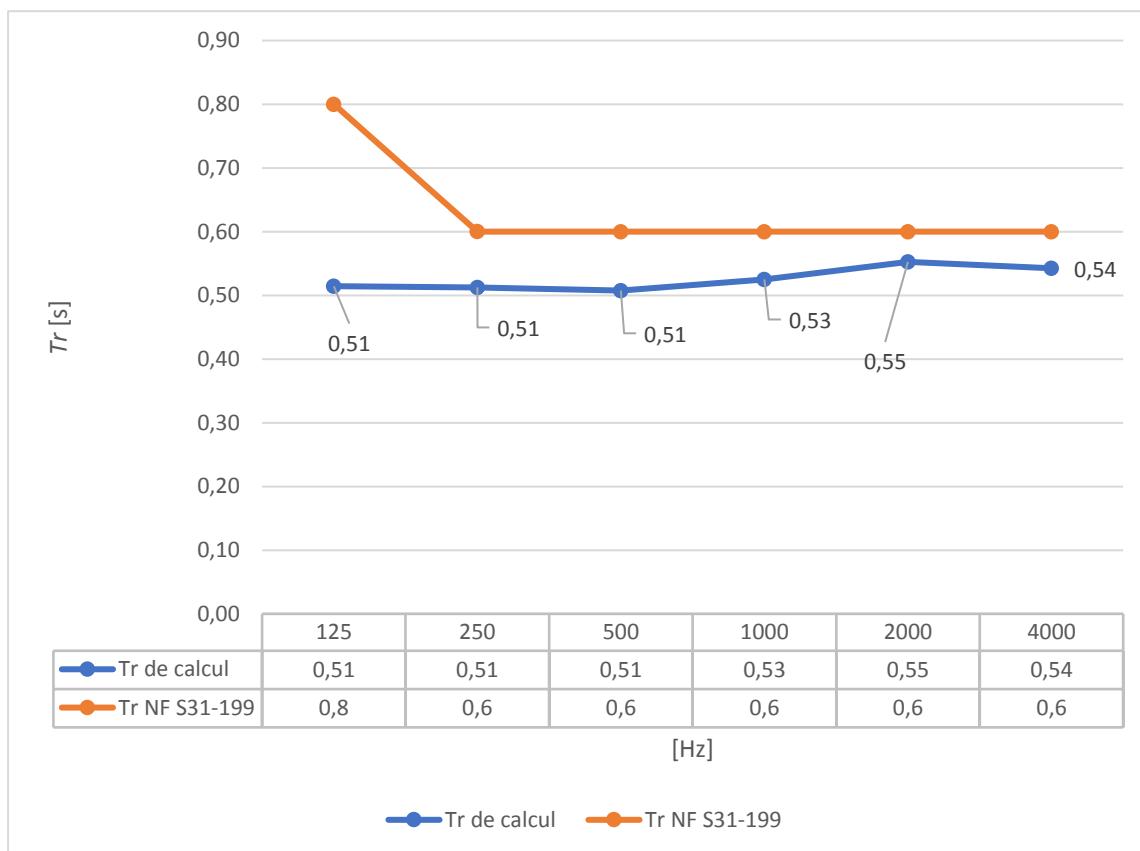


Diagramme 3.
Solution d'aménagement 3 : variation de *Tr* par bandes d'octave 125 - 4000 Hz

5.2.2.4. Solution d'aménagement 4

Contrairement aux *solutions d'aménagement 1, 2 et 3*, la *solution d'aménagement 4* prévoit des modifications par rapport à la configuration de la solution initiale proposée en phase de conception. De manière analogue à la *solution d'aménagement 1* les traitements acoustiques sont limités au *plafond* et au *sol*. Néanmoins, étant la surface vitrée très étendue sur le plateau et estimée très réfléchissante, nous réduisons la largeur des baies en ajoutant des surfaces opaques (*murs*) à la façade principale, tout en assurant l'accès à la lumière naturelle pour un degré d'éclairage suffisant (*Figure 21*). Cette configuration a été élaboré afin d'observer dans quel manière le *vitrage* peut influencer les performances acoustiques du local. Le *Tableau 1* reprends les propriétés acoustiques relatives aux matériaux utilisés pour les simulations.

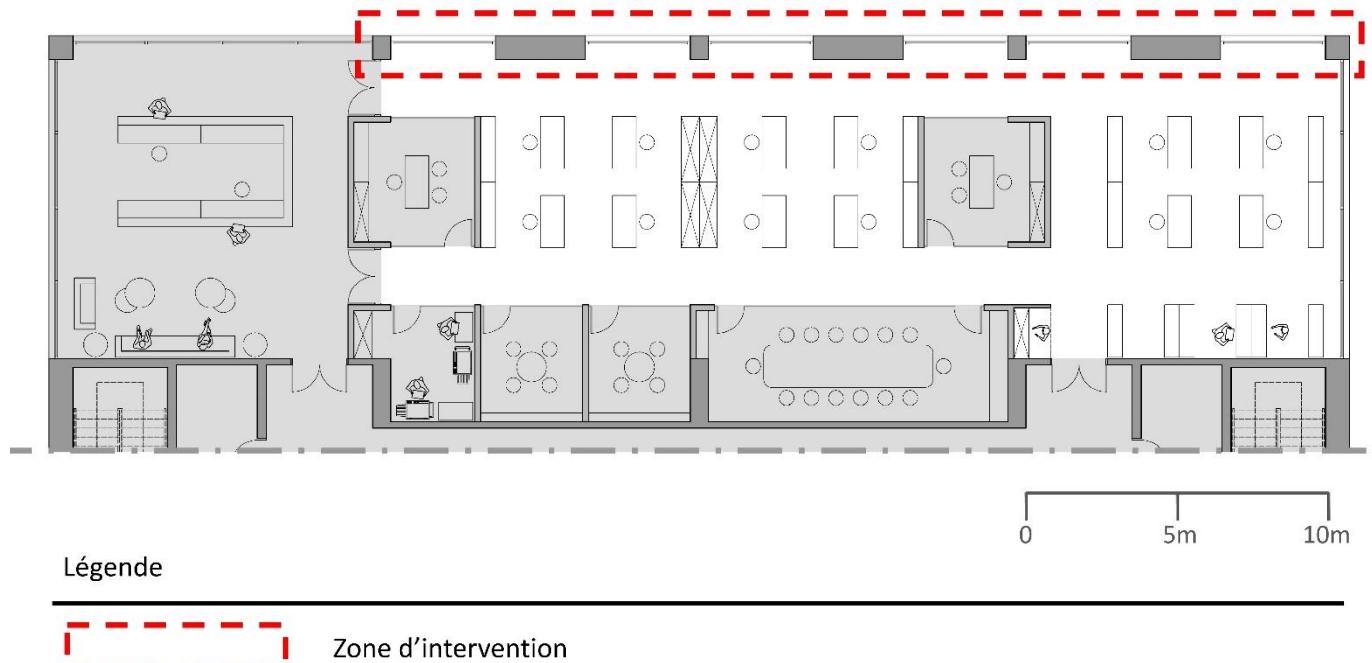


Figure 21.
Vue en plan : solution d'aménagement 4

Le *Tableau 5* présente les *valeurs recommandées* et les *valeurs de calcul* relatives à ce type d'aménagement. Nous remarquons que la valeur cible pour le Tr_{125} est respectée, avec une réduction de 0.26 s par rapport à la *solution 1*. Contrairement, la valeur cible pour le Tr n'est pas atteinte et aucune amélioration a été produite. Néanmoins, ces résultats présentent une anomalie par rapport aux prévisions attendues. En examinant les *coefficients d'absorption* relatifs au *vitrage* sur la façade principale et à la surface opaque du *mur* qui a remplacé une partie des baies (respectivement *Id. 6 et Id. 3, Tableau 1*) nous observons que pour les basses fréquences (125 – 250 Hz) le *vitrage* présente un coefficient plus élevé que le *mur plein*, alors que pour les autres bandes d'octave nous observons des valeurs mineurs. En effet, sur base de ces considérations, les prévisions amenaient à une diminution de Tr et à une légère augmentation de Tr_{125} . Les résultats obtenus amènent à supposer que le facteur déterminant dans cette anomalie pourrait être la *position* des surfaces, différentes dans les deux configurations. En effet, le *vitrage* est en retrait de 50 cm par rapport au *mur* (*Figure 21*). Le remplacement du *vitrage* ne concerne pas seulement les propriétés acoustiques (absorption) de la surface mais aussi sa position dans l'espace. Encore, nous pouvons considérer la totalité de la façade principale et supposer que le facteur déterminant pourrait être l'alternance entre le *mur* et le *vitrage*. De manière générale nous pouvons constater que ce choix architectural a eu des effets sur les performances acoustiques de l'espace ouvert, en particulier pour la bande d'octave à 125 Hz.

Solution d'aménagement	Descripteur acoustique	Tr recommandé (NF S31-199) [s]	Tr de calcul [s]
4	Tr_{125}	< 0,8	0,63
	Tr	< 0,6	0,94

Tableau 5.
Solution d'aménagement 4 : Tr recommandé et Tr de calcul

Les valeurs reprises dans le *Diagramme 4* montrent une diminution importante de Tr à 125 Hz. Néanmoins, les interventions proposées ne sont pas suffisantes et des solutions acoustiques complémentaires sont à prévoir afin d'augmenter la quantité d'absorption pour les fréquences entre 250 et 4000 Hz.

Pour des investigations plus approfondies, le tableau repris dans l'*ANNEXE 8* fournit les valeurs de Tr calculées pour les diverses *situations de mesurage*.

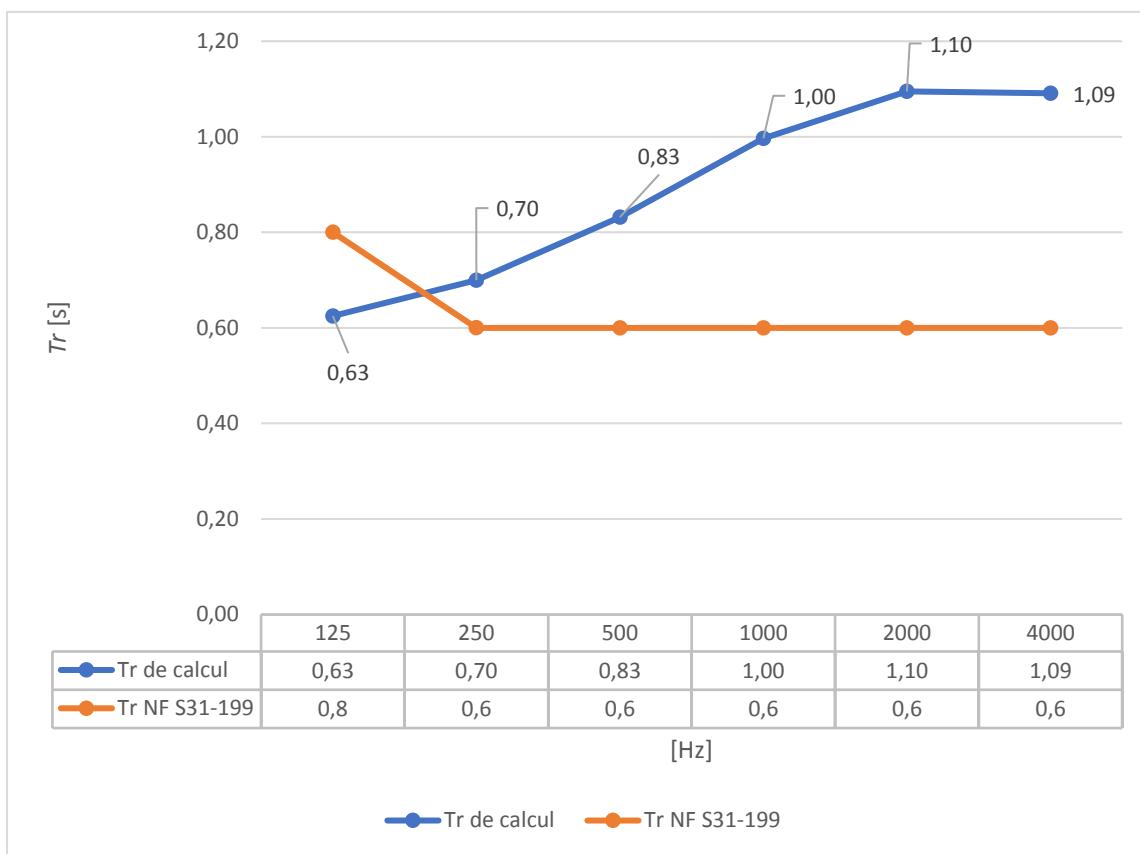
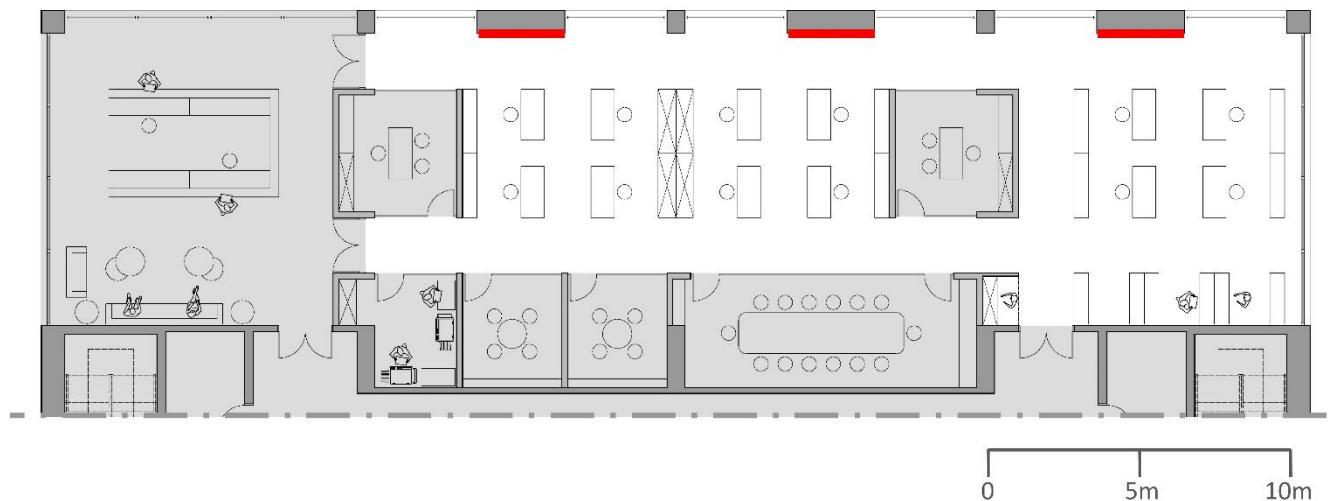


Diagramme 4.
Solution d'aménagement 4 : variation de Tr par bandes d'octave 125 - 4000 Hz

5.2.2.5. Solution d'aménagement 5

La *solution d'aménagement 5* a été développée comme une variante à *solution d'aménagement 4*. En plus du traitement du *plafond* et du *sol*, nous prévoyons le *doublage mural* pour les murs placés sur la façade vitrée principale, à l'aide de *panneaux en bois perforés* (*Id. 5, Tableau 1*). La configuration du plateau reste identique à la solution précédente (*Figure 22*).



Légende

Doublage mural – Panneau en bois perforé

Figure 22.
Vue en plan : solution d'aménagement 5

Le *Tableau 6* présente les *valeurs recommandées* et les *valeurs de calcul* relatives à ce type d'aménagement. Nous remarquons que la valeur cible pour le Tr_{125} est respectée, alors que la valeur cible pour le Tr n'est pas atteinte.

Solution d'aménagement	Descripteur acoustique	Tr recommandé (NF S31-199) [s]	Tr de calcul [s]
5	Tr_{125}	< 0,8	0,56
	Tr	< 0,6	0,69

Tableau 6.
Solution d'aménagement 5 : Tr recommandé et Tr de calcul

Les valeurs reprises dans le *Diagramme 5* montrent une diminution uniforme de Tr à pour toutes les bandes d'octave. Néanmoins, les interventions proposées ne sont pas suffisantes et des solutions acoustiques complémentaires sont à prévoir afin d'augmenter la quantité d'absorption pour les fréquences entre 500 et 4000 Hz.

Pour des investigations plus approfondies, le tableau repris dans l'*ANNEXE 9* fournit les valeurs de Tr calculées pour les diverses *situations de mesurage*.

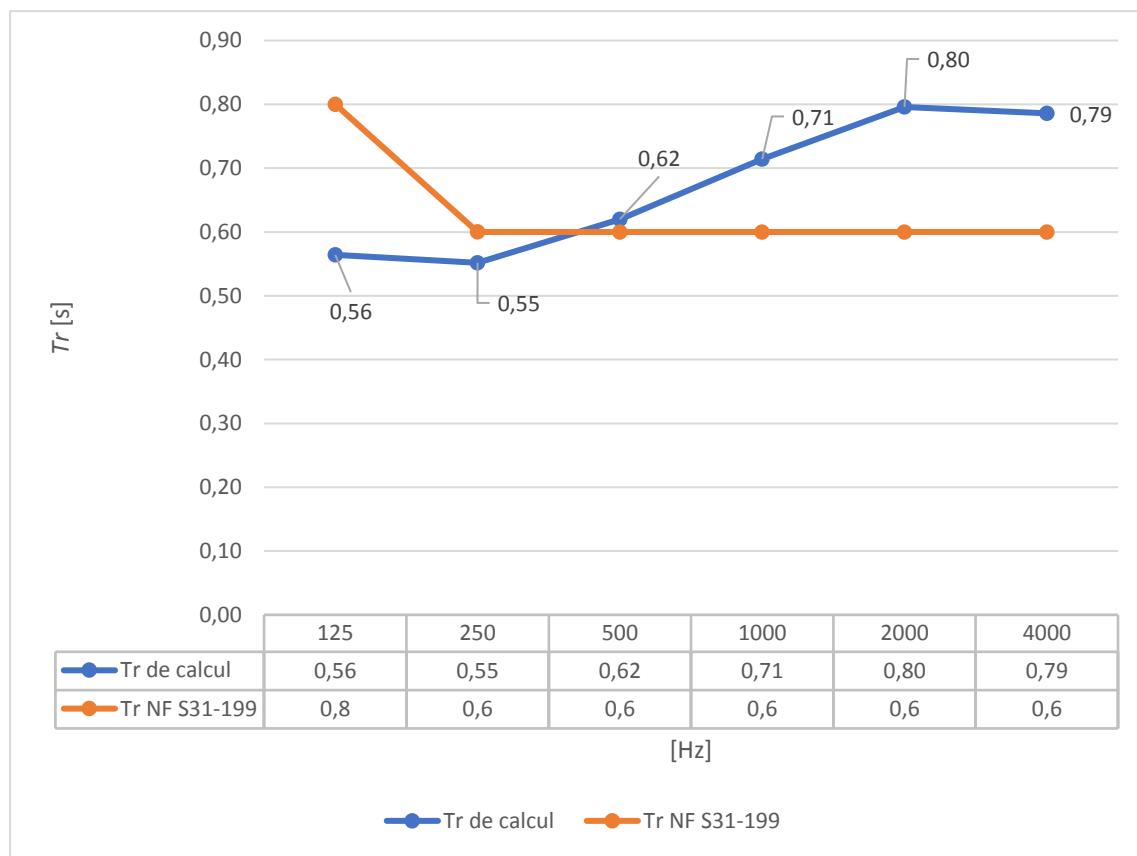
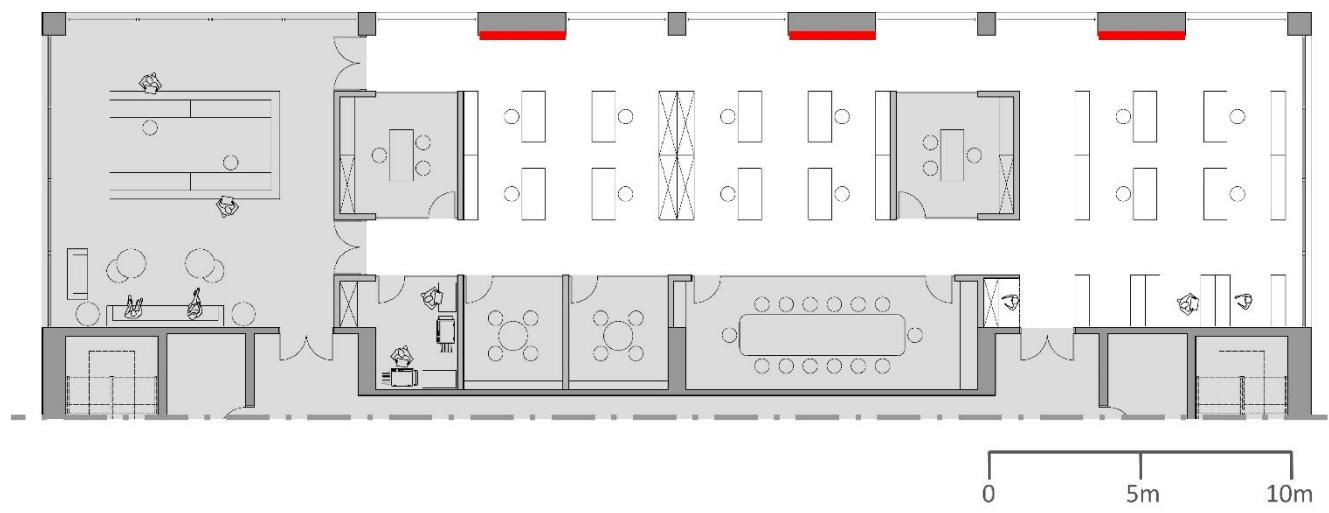


Diagramme 5.
Solution d'aménagement 5 : variation de Tr par bandes d'octave 125 - 4000 Hz

5.2.2.6. Solution d'aménagement 6

La *solution d'aménagement 6* a été développée comme une variante à *solution d'aménagement 4 et 5* (*Figure 23*). En plus du traitement du *plafond*, du *sol* et du *doublage mural* pour les murs placés sur la façade vitrée principale (*panneaux en bois perforés*), nous réduisons la hauteur du plafond de 3,20 m à 2,80 m (*Figure 24*). Cette hauteur est recommandée par la norme *NF S31-199*, selon les limites ergonomiques prévues par le *Code du travail*.



Légende

Doublage mural – Panneau en bois perforé

Figure 23.
Vue en plan : solution d'aménagement 6

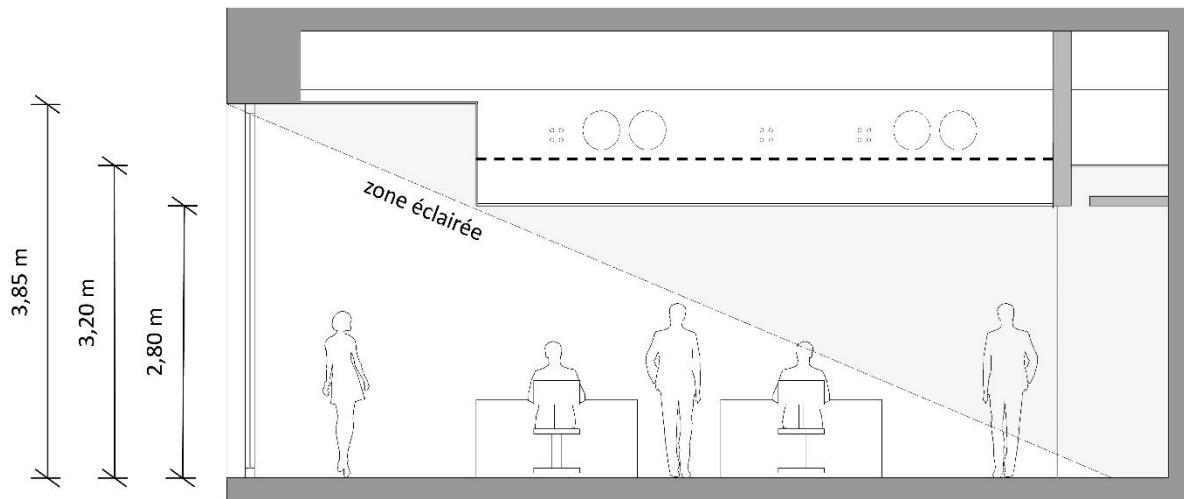


Figure 24.
Coupe transversale : solution d'aménagement 6

Le *Tableau 7* présente les *valeurs recommandées* et les *valeurs de calcul* relatives à ce type d'aménagement. Nous remarquons que la valeur cible pour le Tr_{125} est respectée, alors que la valeur cible pour le Tr n'est pas atteinte. Des solutions acoustiques complémentaires sont donc à prévoir.

Solution d'aménagement	Descripteur acoustique	Tr recommandé (NF S31-199) [s]	Tr de calcul [s]
6	Tr_{125}	< 0,8	0,68
	Tr	< 0,6	0,85

Tableau 7.
Solution d'aménagement 6 : Tr recommandé et Tr de calcul

Les valeurs reprises dans le *Diagramme 6* montrent une augmentation uniforme de Tr à pour toutes les bandes d'octave, par rapport à la *solution* précédente. Malgré la diminution de la hauteur sous plafond nous observons une anomalie, contraire aux prévisions attendues.

Pour des investigations plus approfondies, le tableau repris dans l'. **ANNEXE 10** fournit les valeurs de Tr calculées pour les diverses *situations de mesurage*.

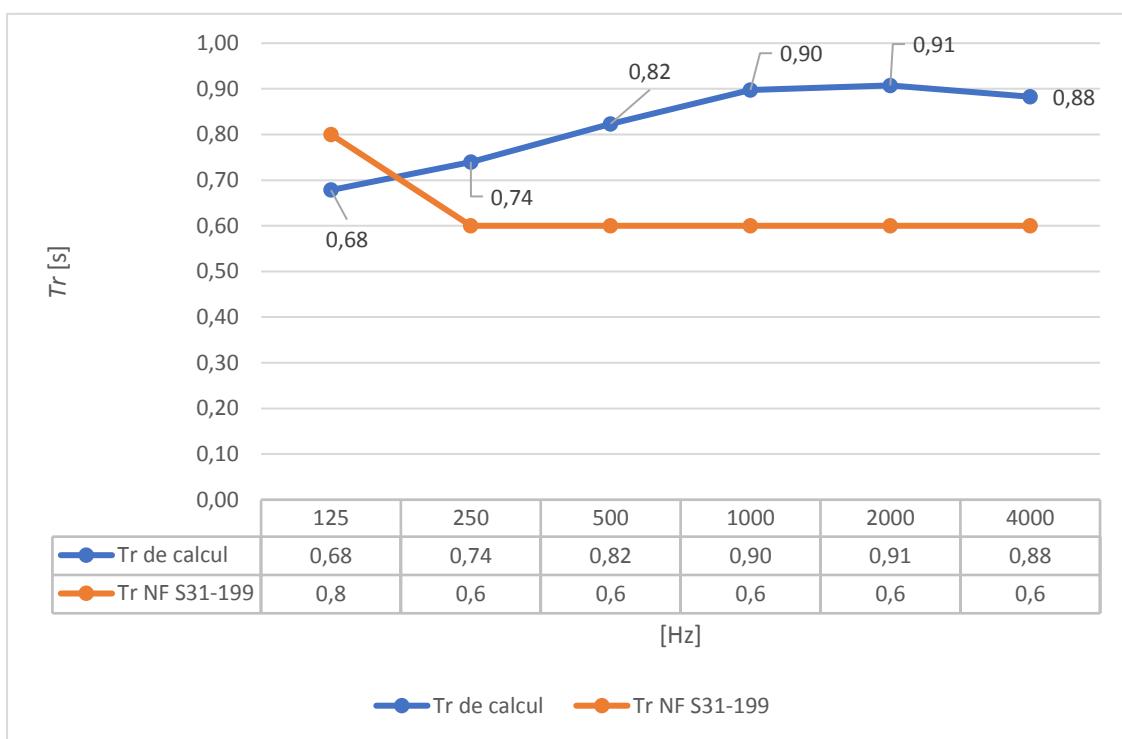
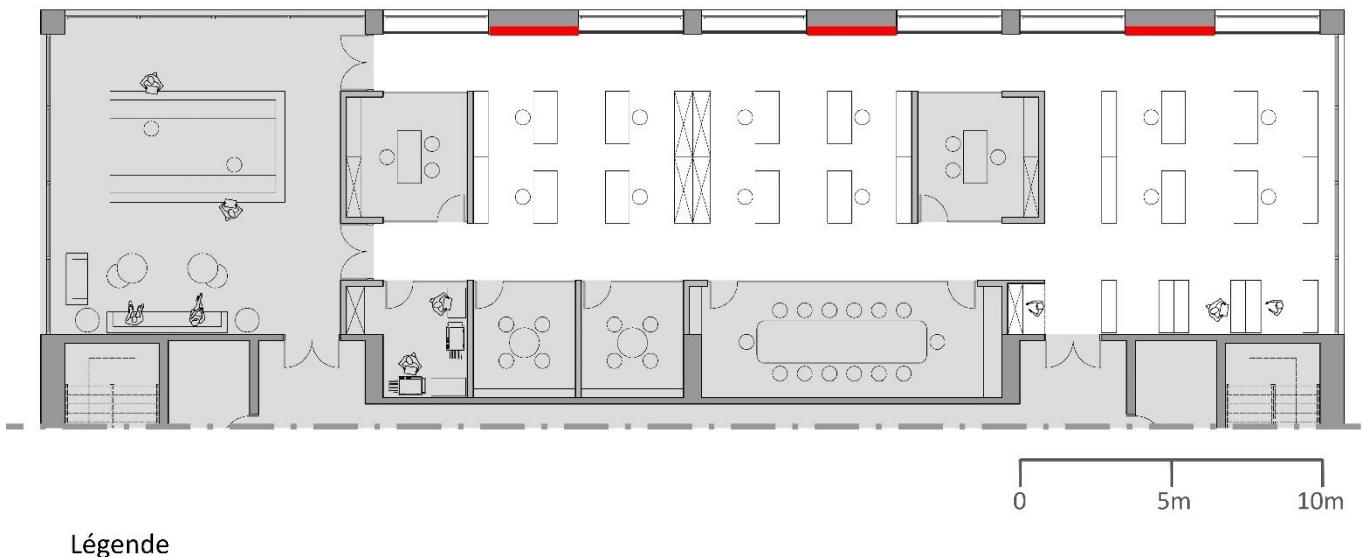


Diagramme 6.
Solution d'aménagement 6 : variation de Tr par bandes d'octave 125 - 4000 Hz

5.2.2.7. Solution d'aménagement 7

La *solution d'aménagement 7* a été développée comme une variante à *solution d'aménagement 6* (Figure 25). En plus du traitement du *plafond*, du *sol* et du *doublage mural* pour les murs placés sur la façade vitrée principale (*panneaux en bois perforés*), nous réduisons la dimension des baies vitrées. Une hauteur d'allège de 90 cm est fixée pour cette ouverture en façade, selon les valeurs limite imposées par le *Code du travail*. Cependant la hauteur des baies reste identique.



Légende

Doublage mural – Panneau en bois perforé

Figure 25.
Vue en plan : solution d'aménagement 7

Le *Tableau 8* présente les *valeurs recommandées* et les *valeurs de calcul* relatives à ce type d'aménagement. Nous remarquons que la valeur cible pour le Tr_{125} est respectée, alors que la valeur cible pour le Tr n'est pas atteinte. Des solutions acoustiques complémentaires sont donc à prévoir.

Solution d'aménagement	Descripteur acoustique	Tr recommandé (NF S31-199) [s]	Tr de calcul [s]
7	Tr_{125}	< 0,8	0,58
	Tr	< 0,6	0,98

Tableau 8.
Solution d'aménagement 7 : Tr recommandé et Tr de calcul

Les valeurs reprises dans le *Diagramme 7* montrent une diminution importante de Tr à 125 et 250 Hz. Néanmoins, pour les moyennes et hautes fréquences nous observons une anomalie par rapport aux prévisions attendues. En effet, malgré l'augmentation de la surface absorbante grâce aux traitements acoustiques adoptés, le Tr augmente considérablement. Une réponse peut être recherche dans la variation de la géométrie de l'espace ouvert, par rapport à la configuration précédente.

Pour des investigations plus approfondies, le tableau repris dans l'*ANNEXE 11* fournit les valeurs de Tr calculées pour les diverses *situations de mesurage*.

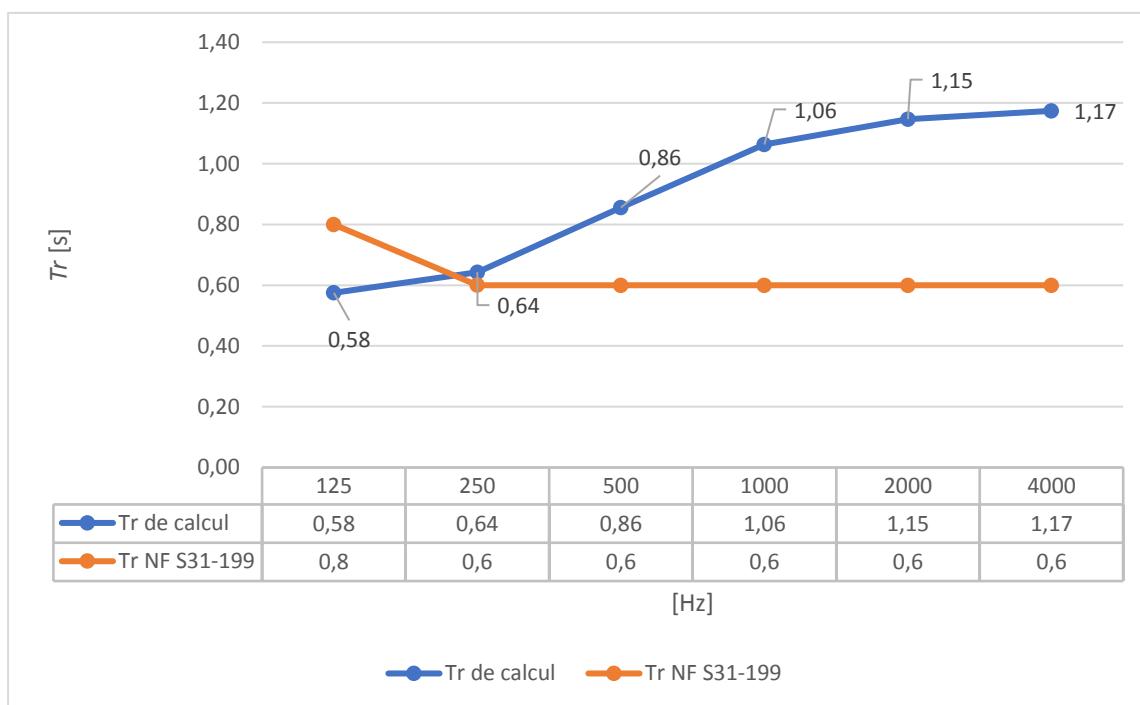


Diagramme 7.
Solution d'aménagement 7 : variation de Tr par bandes d'octave 125 - 4000 Hz

5.2.2.8. Solution d'aménagement 8

La *solution d'aménagement 8* prévoit des modifications par rapport à la configuration de la solution initiale proposée en phase de conception. De manière analogue à la *solution d'aménagement 1* les traitements acoustiques sont limités au *plafond* et au *sol*. Néanmoins, nous réduisons la largeur des baies en ajoutant des surfaces opaques (*murs*) aux façades principale et latérale, tout en assurant l'accès à la lumière naturelle pour un degré d'éclairage suffisant (Figure 26). Cette configuration a été élaboré afin d'observer dans quel manière le *vitrage* peut influencer les performances acoustiques du local. Le *Tableau 1* reprends les propriétés acoustiques relatives aux matériaux utilisés pour les simulations.

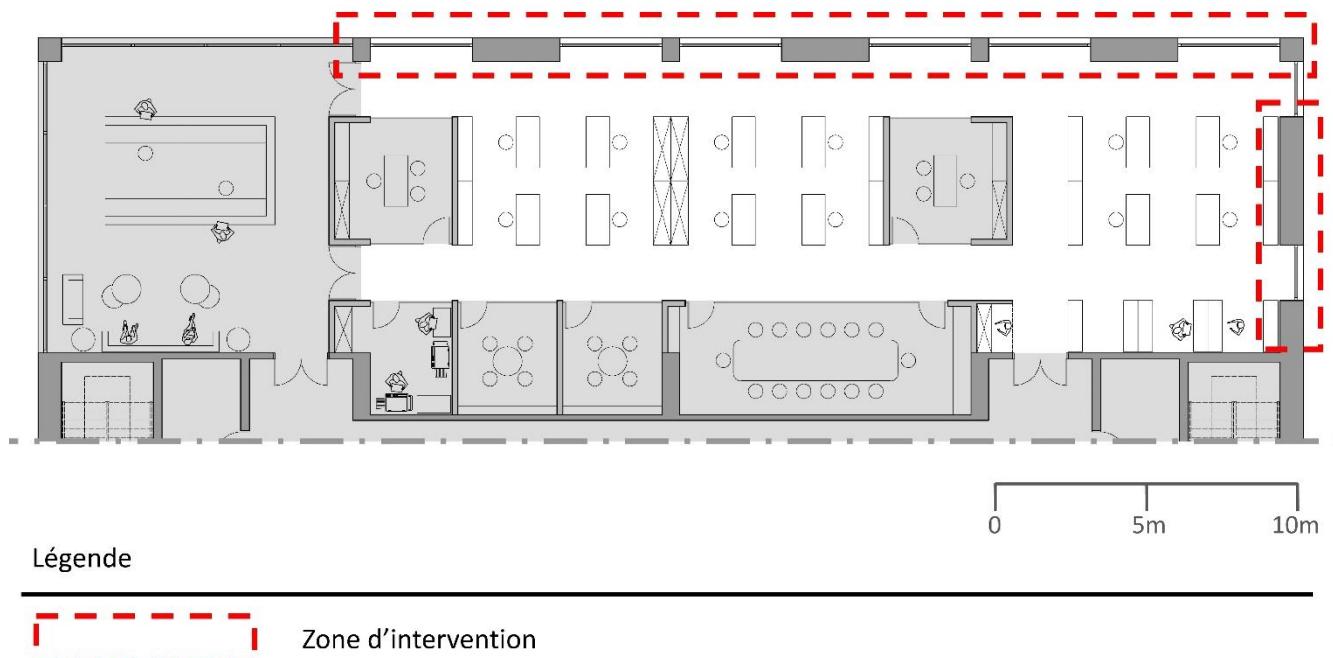


Figure 26.
Vue en plan : solution d'aménagement 8

Le Tableau 9 présente les *valeurs recommandées* et les *valeurs de calcul* relatives à ce type d'aménagement. Nous remarquons que la valeur cible pour le Tr_{125} est respectée, alors que la valeur cible pour le Tr n'est pas atteinte. Des solutions acoustiques complémentaires sont donc à prévoir.

Solution d'aménagement	Descripteur acoustique	Tr recommandé (NF S31-199) [s]	Tr de calcul [s]
8	Tr_{125}	< 0,8	0,60
	Tr	< 0,6	0,81

Tableau 9.
Solution d'aménagement 8 : Tr recommandé et Tr de calcul

Les valeurs reprises dans le Diagramme 8 montrent une diminution uniforme pour toutes les bandes d'octave par rapport à la configuration initiale.

Pour des investigations plus approfondies, le tableau repris dans l'*ANNEXE 12* fournit les valeurs de Tr calculées pour les diverses *situations de mesurage*.

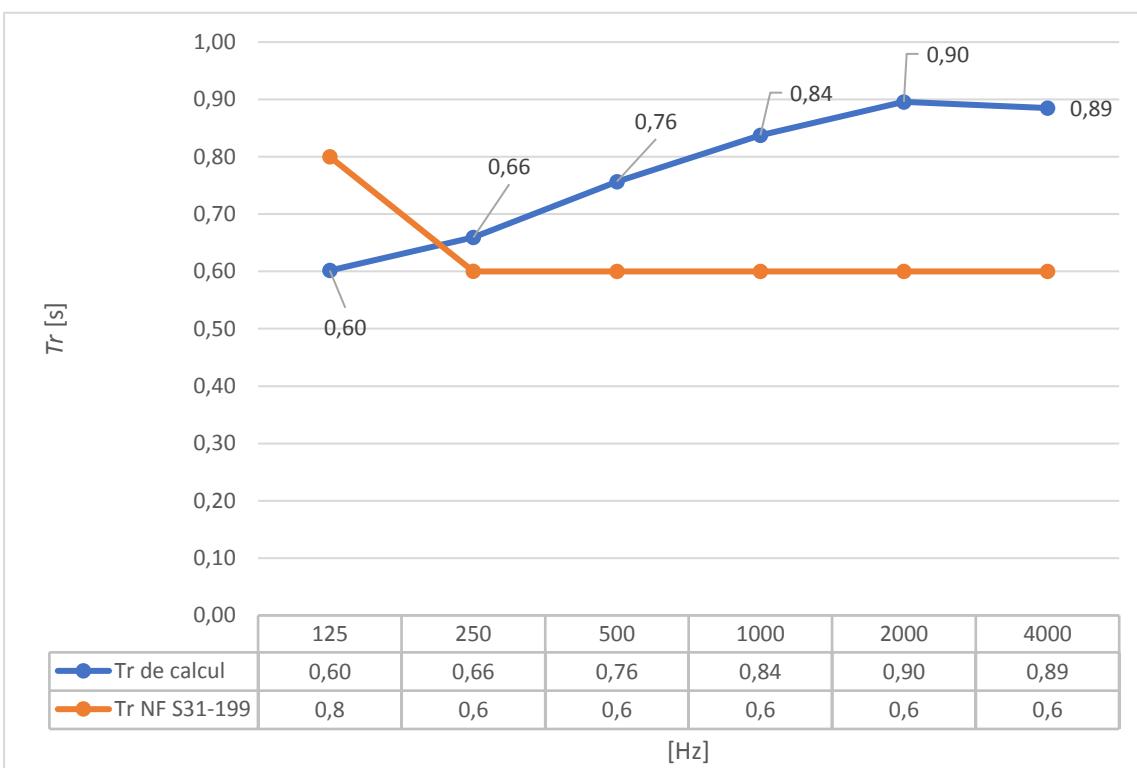
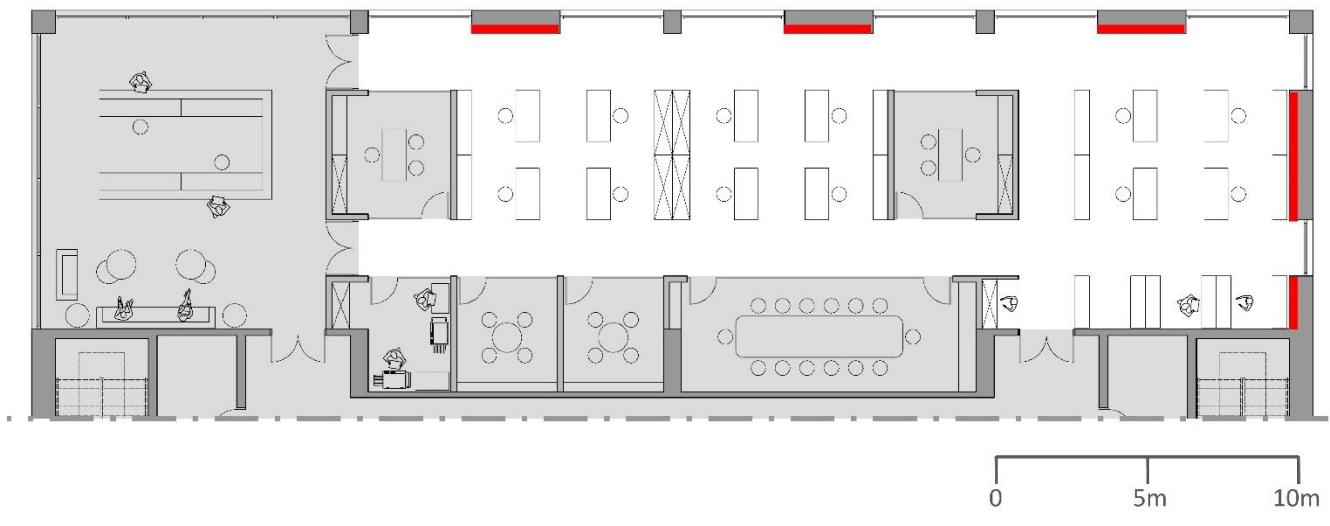


Diagramme 8.
Solution d'aménagement 8 : variation de Tr par bandes d'octave 125 - 4000 Hz

5.2.2.9. Solution d'aménagement 9

La *solution d'aménagement 9* a été développée comme une variante à *solution d'aménagement 8*. En plus du traitement du *plafond* et du *sol*, nous prévoyons le *doublage mural* pour les murs placés sur la façade vitrée principale et latérale, à l'aide de *panneaux en bois perforés* (*Id. 5, Tableau 1*). La configuration du plateau reste identique à la solution précédente (*Figure 27*). Cette solution vise à examiner l'efficacité de ce type de traitement acoustique en termes d'absorption.



Légende

Doublage mural – Panneau en bois perforé

Figure 27.
Vue en plan : solution d'aménagement 9

Le *Tableau 10* présente les *valeurs recommandées* et les *valeurs de calcul* relatives à ce type d'aménagement. Nous remarquons que la valeur cible pour le Tr_{125} est respectée, alors que la valeur cible pour le Tr n'est pas atteinte. Des solutions acoustiques complémentaires sont donc à prévoir.

Solution d'aménagement	Descripteur acoustique	Tr recommandé (NF S31-199) [s]	Tr de calcul [s]
9	Tr_{125}	< 0,8	0,61
	Tr	< 0,6	0,71

Tableau 10.
Solution d'aménagement 9 : Tr recommandé et Tr de calcul

Les valeurs reprises dans le *Diagramme 9* montrent une diminution uniforme de Tr à pour toutes les bandes d'octave. Néanmoins, les interventions proposées ne sont pas suffisantes et des solutions acoustiques complémentaires sont à prévoir afin d'augmenter la quantité d'absorption pour les fréquences entre 2500 et 4000 Hz.

Pour des investigations plus approfondies, le tableau repris dans l'*ANNEXE 13* fournit les valeurs de Tr calculées pour les diverses *situations de mesurage*.

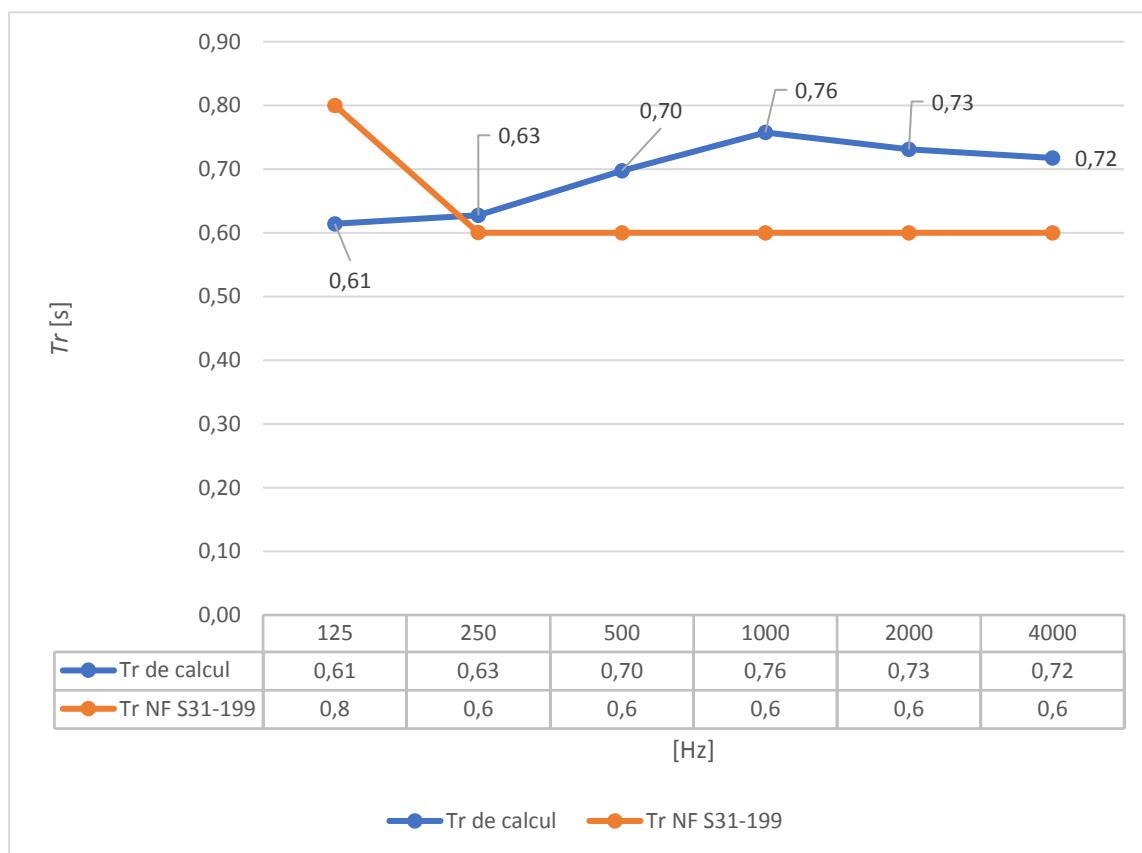


Diagramme 9.
Solution d'aménagement 9 : variation de Tr par bandes d'octave 125 - 4000 Hz

5.2.3. Observations

En examinant les résultats des simulations effectuées pour les différentes *solutions d'aménagement* il est possible de déduire certaines considérations concernant la manière de satisfaire les conditions exigées par la norme *NF S31-199* (AFNOR, 2016). Ainsi, nous pouvons observer dans quelle mesure certaines solutions architecturales peuvent influencer les performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux (*Tableau 11*).

Solution d'aménagement	Tr_{125} [s]	Tr [s]
1	0,67	0,93
2	0,55	0,69
3	0,51	0,53
4	0,63	0,94
5	0,56	0,69
6	0,68	0,85
7	0,58	0,98
8	0,60	0,81
9	0,61	0,71

Tableau 11.
Solutions d'aménagement : Tr de calcul

En analysant les valeurs obtenues pour le *descripteurs acoustiques* Tr_{125} et Tr au cours des simulations nous observons que seulement la *solution 3* permet de satisfaire les exigences de la norme pour les indicateurs Tr_{125} et Tr ($Tr_{125} < 0.8$ s ; $Tr < 0.6$ s). Néanmoins, la valeur cible relative au descripteur acoustique Tr est respectée par toutes les solutions proposées. Cela suggère que la valeur recommandée pour le Tr_{125} peut être atteinte avec le simple traitement du plafond et du sol, alors que pour le Tr sont requises des solutions plus importantes. Afin d'atteindre les recommandations imposées par la norme l'adoption de matériaux très performants en termes d'absorption devient alors indispensable. En observant par exemple les *graphiques* relatifs à la variation de Tr , nous remarquons que les valeurs les plus élevées correspondent aux bandes d'octave entre 1000 – 4000 Hz. Les *solutions 2, 3, 5, 6 et 9* montrent que avec le *doublage mural*, ou

avec l'utilisation de *portes acoustiques* pour le mobilier (*solution 3*), il est possible d'améliorer la quantité d'absorption acoustique du local pour ces fréquences. En même temps, les produits disponibles sur le marché pour les traitements acoustiques offrent un certain degré de liberté dans l'aménagement des espaces ouverts. Pour la *solution 3* en fait, grâce aux traitements acoustiques du plafond, du sol, des parois et du mobilier, aucune modification n'a été effectuée par rapport à l'aménagement de la solution initiale proposée en phase de conception, tout en respectant les valeurs cible pour Tr_{125} et Tr . Ainsi, en effectuant une comparaison entre les valeurs relatives aux *solutions 4* et *5*, ou aux *solutions 8* et *9*, nous constatons que l'habillage des murs en façade avec des matériaux absorbants permet de réduire considérablement le Tr (entre le 15% et le 25%). Néanmoins, un bilan avantages/inconvénients impose une utilisation conscientieuse de ces produits. L'usage des matériaux très performants au niveau acoustique a des répercussions importantes sur les coûts d'investissement et parfois n'apporte pas les bénéfices attendus. A titre d'exemple, la *solution d'aménagement 7* montre comment l'abondance de traitements acoustiques sur la façade principale n'a pas nécessairement conduit à des résultats satisfaisants.

La comparaison des valeurs entre la *solution d'aménagement 1* initiale et les *solutions 5* ou *8* montre de quelle manière l'aménagement peut influencer les performances acoustiques de l'espace de travail. Pour ces configurations les traitements acoustiques sont limités au sol et au plafond et nous intervenons avec la réduction du vitrage sur les deux façades au moyen de surfaces opaques. La *solution 5* propose la réduction de la surface vitrée seulement pour la façade principale et amène à une réduction considérable de Tr_{125} et de Tr par rapport à la solution initiale. Ces résultats ont conduit aux choix proposés pour la *solution 8*, en intervenant aussi sur la façade latérale de la même façon, en préconisant qu'une réduction ultérieure du vitrage pouvait amener à des résultats encore plus satisfaisants. Cependant, les valeurs obtenues pour cette dernière configuration enregistrent une augmentation de Tr_{125} et de Tr par rapport à la *solution 5*. De manière analogue, nous observons que pour la *solution 7* la réduction de la hauteur du plafond par rapport à la *solution 1* n'apporte pas les améliorations prévues par les recommandations de la norme *NF S31-199*.

5.2.4. Précision de calcul

Hormis les imprécisions liées aux hypothèses du modèle de propagation utilisé et celles liées aux valeurs des données acoustiques sur les matériaux (leur évaluation sort du cadre de ce mémoire), il faut considérer l'influence des erreurs statistiques du *tir de rayons*.

La technique du *tir de rayons* est une approche approximative de la prédiction de l'acoustique de salle et repose sur l'hypothèse que le son se déplace en lignes droites sous forme de rayons ou de faisceaux. Le logiciel suit le rayon émis après chaque réflexion et calcule la pression acoustique sur chaque surface en considérant le *coefficient d'absorption* à chaque réflexion et la distance parcourue (Peters et al., 2011).

Les limites de cette approche de l'acoustique de salle sont que la méthode de calcul ne fonctionne, approximativement, lorsque la taille de la surface est grande par rapport à la longueur d'onde et le fait que cette méthode ne peut pas prendre correctement en compte la diffraction de bords de surface. Afin de surmonter cette seconde limitation, le logiciel attribue un coefficient de diffusion aux surfaces (J.J. Embrechts, 1999).

Donc, il faut considérer l'influence des erreurs statistiques du tir de rayons. Les erreurs statistiques sur les valeurs de Tr diminuent si le nombre de rayons augmente, comme le montrent les recherches menées par Embrechts (Liège, 1999). Dans ce travail, on montre que l'erreur statistique (σ/σ_0), ainsi que la variation du temps de réverbération moyen (*NF EN ISO 3382-2*, 2010), diminue lorsque les rayons de simulation sont augmentés de 2×10^6 à 16×10^6 (TABLE VI, pag . 2078). Cependant, l'auteur déclare qu'avec 2×10^6 rayons la précision requise est déjà obtenue. En outre, il est important de souligner que le calcul peut demander beaucoup de temps. Par conséquent, le temps de calcul doit être pris en compte pour une précision donnée (J.J. Embrechts, 1982).

Dans ce projet de recherche, afin d'évaluer l'erreur statistique associée à l'analyse acoustique numérique, de prouver la fiabilité de Tr calculé par le logiciel et de fixer le nombre de rayons nécessaire pour les calculs, deux simulations d'essai ont été réalisées, avec 1×10^6 et 2×10^6 rayons.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant:

Simulation	Descripteur acoustique (NF S31-199)	Tr de calcul [s]
1 M	Tr_{125}	0.58
1×10^6 rayons	Tr	0.60

Simulation	Descripteur acoustique (NF S31-199)	Tr de calcul [s]
2 M	Tr_{125}	0.59
2×10^6 rayons	Tr	0.61

Tableau 12.
Résultats des simulations d'essai

Comme il est possible de le constater, les résultats ne sont éloignés que de $\pm 0,01$ s. En considérant que le *subjective limen* (la plus petite différence perceptible) en réverbération est de 5% sur la valeur de Tr , nous avons alors choisi d'utiliser la configuration avec 1×10^6 rayons.

5. Conclusions et perspectives d'évolution

La norme française *NF S31-199 Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux* (AFNOR, 2016) se propose comme référence normative nécessaire à la programmation, la conception, la construction, l'aménagement, la gestion et l'utilisation des espaces ouverts de bureaux et s'adresse de manière transversale aux divers intervenants dans l'évolution du projet, afin de pouvoir coordonner leurs actions et fournir les outils nécessaires à la création des ambiances acoustiques performantes et une architecture de qualité.

La récente norme représente un instrument de support nécessaire à l'architecte dans la conception des espaces ouverts de bureaux. Le *projet concept* proposé montre comment les recommandations relatives à l'aménagement apparaissent de simple compréhension et application. Néanmoins, l'analyse acoustique montre toute son importance. En effet, les solutions architecturales élaborées par le concepteur peuvent influencer positivement ou négativement les performances acoustiques de l'espace ouvert. La nécessité de ces investigations est donc fondamentale depuis les premières étapes de la conception. Ainsi, l'analyse acoustique montre comment les conditions préconisées par la norme demandent nécessairement l'adoption de matériaux très performants en termes d'absorption acoustique.

Le travail effectué pourrait conduire à des investigations ultérieures plus approfondies. Concernant l'application de la norme *NF S31-199* au cours de la phase de la conception architecturale, l'élaboration d'un projet d'aménagement pour un cas réel pourrait amener des éléments complémentaires. Ainsi, l'analyse acoustique pourrait être étendue aux quatre typologies de bureaux ouverts proposées par la norme et à la vérification des autres *descripteurs acoustiques*.

.Bibliographie

Arnold Architectes d'intérieur (n.d.). **La Norme NF X 35-102 : Conception Ergonomique des espaces de travail** [Online]. Paris : Arnold Architectes d'intérieur.

Disponible à l'adresse : < <https://www.arnold.fr/norme-nf-x-35-102> > [Visité le 31/07/20].

Chevret, P. (2017). Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception. [Rapport de recherche] **Notes scientifiques et techniques NS 352**. Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). France. Disponible à l'adresse :

< <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01618083/document> > [Visité le : 05/03/2020]

Chevret, P. et al. (2017). Réduction de la nuisance sonore dans les bureaux ouverts : un exemple d'utilisation de la norme NF S31-199 en entreprise. **Références en santé au travail**, TF 247 Septembre, pp. 43-61. Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS), France. Disponible à l'adresse :

< <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TF%20247> > [Visité le 02/08/20].

Cox, T.J. et al. (2009). **Acoustic absorbers and diffusers : Theory, Design and Application**. 2nd edition. London and New-York : Taylor & Francis Group, pp. 440-445.

Embrechts, J.J. (1982). **Sound Field Distribution using randomly traced Sound Ray Techniques**. Monteforte Institute, University of Liege, Belgium. Disponible à l'adresse :

< <https://orbi.uliege.be/handle/2268/34426> >

Embrechts, J.J. (1999). **Broad spectrum diffusion model for room acoustics ray-tracing algorithms**. University of Liege, Belgium. Disponible à l'adresse :

< <https://orbi.uliege.be/handle/2268/34824> > [Visité le 29/07/20]

Embrechts, J. (2014). **Acoustique du bâtiment**. Université de Liège. Disponible à l'adresse :< <https://orbi.uliege.be/handle/2268/240337> > [Visité le 29/07/20]

Evans, G.W. and Johnson, D. (2000). **Stress and Open-Office Noise**. *Journal of Applied Psychology*, American Psychological Association, Inc. (2000).

Fontana, L. (2019). Open space : la déchéance d'une fausse bonne idée. **Le Soir.be – Génération** [Online], Août. Disponible à l'adresse :

< <https://www.lesoir.be/280372/article/2019-08-07/open-space-la-decheance-dune-fausse-bonne-idee> > [Visité le: 02/08/20]

Guide Bâtiment Durable (2019). **Assurer le confort visuel au moyen de la lumière naturelle – Capter la Lumière naturelle** [Online]. Disponible à l'adresse :

< <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/2-capter-la-lumiere-naturelle.html?IDC=7970> > [Visité le 20/04/20]

Horvath, S. et Garcin, M. (n.d.). **Conception Architecturale et Sécurité Incendie : Guide à l'usage des jeunes architectes**. Collection Technique Cimbéton – Centre d'Information sur le ciment et ses applications.

Jagla, J. (2016). **Acoustic simulation in open plan offices : How to comply with NF S31-199?**. *CFA / VISHNO 2016, 11-15 Avril 2016, Le Mans.*

Kostallari, K. et al. (2016). **Indicateurs de confort acoustique dans les bureaux ouverts.**

CFA 2016 / VISHNO, at Le Mans. Disponible à l'adresse :

<https://www.researchgate.net/publication/317569494_Indicateurs_de_confort_acoustique_dans_les_bureaux_ouverts> [Visité le 29/07/20].

L'aménagement des bureaux Principales données ergonomiques (2013). **Fiche pratique de sécurité**, ED 23 Septembre. Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS), France. Disponible à l'adresse :

< <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%2023> > [Visité le 02/08/20]

Larrieu, F. et Harvie-Clark, J. (2017). **Contrasting Open Plan Office Design implications from emerging French, German And Finnish standards.** *24th International Congress on Sound and Vibration 23-27 July 2017, London.*

Le Muet, Y. et Chevret, P. (2014). **Acoustique des bureaux ouverts : vers une nouvelle norme française.** *CFA 2014, 22-25 Avril 2014, Poitiers.*

Le Muet, Y. et Chevret, P. (2016). **Les dessous de la norme NF S 31-199 sur les bureaux ouverts.**

CFA / VISHNO 2016, 11-15 Avril 2016, Le Mans.

Martial, P. (2019). Les bureaux flexibles sont-ils (déjà) vécus? **Le Soir.be** [Online], May.

Disponible à l'adresse :

< <https://references.lesoir.be/article/les-bureaux-flexibles-sont-ils-deja-vecu-/> > [Visité le 02/08/20]

Meric, I. et Caliskan M. (2013). **Acoustics education for architects : Developing a base of knowledge for professional experience.** *Noise control for quality of life, Inter noise, 15-18 September 2013 in Innsbruck, Austria.*

Norme Française (2006). **NF S 31-080 Acoustique — Bureaux et espaces associés – Niveaux et critères de performances acoustiques par type d'espace.** La Plaine Saint-Denis Cedex : Association Française de Normalisation (AFNOR).

Norme Française (2010). **NF EN ISO 3382-2 Acoustique — Mesurage des paramètres acoustiques des salles - Partie 2 : Durée de réverbération des salles ordinaires.** La Plaine Saint-Denis Cedex : Association Française de Normalisation (AFNOR).

Norme Française (2016). **NF S 31-1999 Acoustique — Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux.** La Plaine Saint-Denis Cedex : Association Française de Normalisation (AFNOR).

Pelegrin-Genel, E. (1995). **L'art de vivre au bureau.** France : Flammarion.

Pelegrin-Genel, E. (2006). **25 espaces de bureaux.** France : Le Moniteur.

Peters, R.J., Smith, B.J. & Hollins, M. (2011). **Acoustics and Noise Control** (Third Edition). Routledge, New York.

Radun, J. et al. (2019). **Physiological, psychological, and performance effects of office noise.** *23rd International Congress on Acoustics, 9 to 13 September 2019 in Aachen, Germany.*

Vorländer, M. (2008). **Auralization - Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality.** Berlin : Springer-Verlag, pp 304-310.

.ANNEXES

. ANNEXE 1. PV d'essai (extrait) : ECOPHON - Focus A Extra Bass



24/38

TEST REPORT N°AC17-26072298



PRACTICAL SOUND ABSORPTION COEFFICIENT α_p OF SUSPENDED CEILING PANELS

Test 6
Date 12/12/17
Station ALPHA

AA45

REQUESTER. MANUFACTURER SAINT-GOBAIN ECOPHON

NAMES Focus A with Extra Bass

CONFIGURATION 200 mm overall depth of construction

STANDARDS EN ISO 354, EN ISO 11654, EN 16487

FITNESS FOR PURPOSE Unchecked

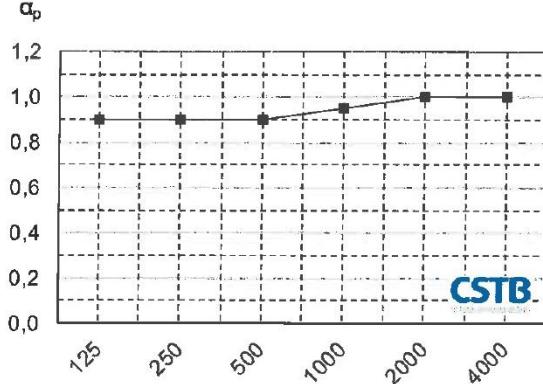
MAIN CHARACTERISTICS

Dimensions in mm : 3555 x 2963
Area in m² : 10.55
Thickness in mm : 70
Mass per unit area in kg/m²: 2.51
Mounting type : E-200

MEASUREMENT CONDITIONS

Empty room: Temperature: 21 °C
Room with sample: Temperature: 21 °C
Relative humidity: 50 % Relative humidity: 52 %

RESULTS



f	α_s	α_p
100	0,71	
125	0,82	0,90
160	1,15	
200	0,82	
250	0,90	0,90
315	0,97	
400	0,91	
500	0,84	0,90
630	0,88	
800	0,92	
1000	0,99	0,95
1250	0,98	
1600	0,99	
2000	1,00	1,00
2500	1,01	
3150	1,04	
4000	0,99	1,00
5000	1,05	
Hz		

$\alpha_w = 0,95$
classement / class A

NRC = 0,95
SAA = 0,93

. ANNEXE 2. PV d'essai (extrait) : INTERFACE Stone Course

Issued by University of Salford (Acoustics Test Laboratory) UKAS ACCREDITED TEST LABORATORY NO. 1262

Page 9 of 9

BS EN ISO 11654:1997 Acoustics - Sound absorbers for use in buildings

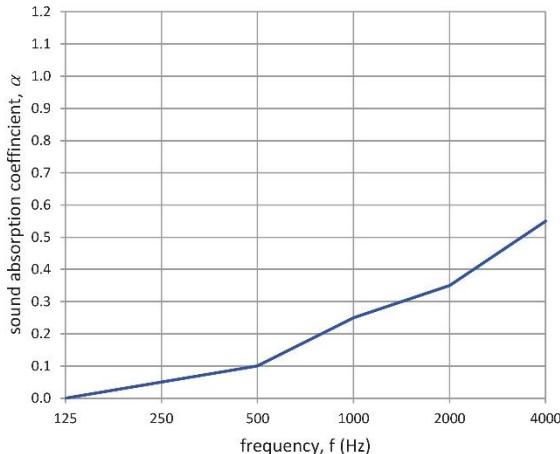
Client:	Interface Shelf Mills, Shelf, Halifax, West Yorkshire HX3 7PA	
Product Identification:	Stone Course	
Description of Sample:	Carpet Tiles - Type A Mounting	

Room Volume:	221 m ³	Location:	Acoustic Transmission Suite
Sample Size:	12.03 m ²	Test Room Large reverberation Room	
Sample Thickness:	8.5 mm	Condition:	Clean

Sample Out	Sample In
Temperature	21.8 °C
Relative Humidity	53.6 %
Static Pressure	101.8 kPa
	22.1 °C
	54.2 %
	101.7 kPa

Random Incidence Sound Absorption Coefficient

Frequency [Hz]	α_{pi}
125	0.00
250	0.05
500	0.10
1000	0.25
2000	0.35
4000	0.55



$\alpha_w = 0.20$ (H)

Classification: E

Signed:

If a shape indicator is given, it is strongly recommended to use this single-number rating in combination with the complete absorption coefficient curve that can be obtained on request.

Test reference: 3618-3336

Date: 29 May 2018

University of Salford, School of Computing Science & Engineering

. ANNEXE 3. PV d'essai (extrait) : PRINT ACOUSTICS - type Ds

page 5 sur 10



eco-scan bvba
Industrieweg 114H
B-9032 Wondelgem
Belgium
BTW nr.: BE 0887 763 992



N° 0451-TEST
NBN EN ISO 17025:2005

www.eco-scan.be

NOISE LAB RAPPORT D'ESSAIS N° A-2018_ES_10-4-43116_F

α_s

COEFFICIENT D'ABSORPTION ACOUSTIQUE

EN ISO 354:2003

Acoustique - Mesurage de l'absorption acoustique en salle réverbérante (ISO 354:2003)

EN ISO 11654:1997

Acoustique - Absorbants pour l'utilisation dans les bâtiments - Évaluation de l'absorption acoustique

N° de l'élément d'essai :

4

Date: 16/01/2018

Salle de réverbération:

V = 296,9 m³

S_{tot} = 278,2 m²

Conditions pendant les mesures:

la salle réverbérante vide avec du matériel d'essai

Température :

T = 18 °C

Pression atmosphérique :

p = 99,4 kPa

Humidité atmosphérique :

h_r = 48 %

Type d'élément de test:

Absorbeur de surface plane

Caractéristiques de construction :

* en utilisant plan absorbeur:

Surface de l'échantillon : 12,85 m²

Epaisseur totale (mm) : 90 mm

Nombre de couches, vide d'air inclus : 3

Connection des couches : lâchement

* en utilisant baffles (montage Type J):

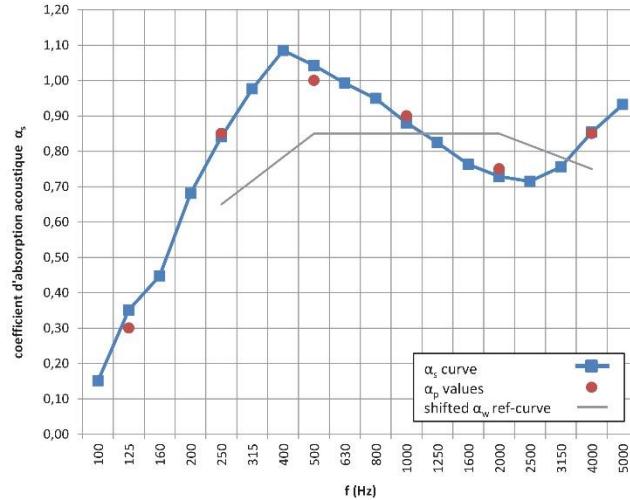
Dimension (Long. x Larg. x H): -

Distance entre les lignes: -

Nombre d'objets: -

* en utilisant des objets discrets:

f(Hz)	T1 (s)	T2 (s)	α_s
50			
63			
80			
100	11,08	7,64	0,15
125	11,14	5,44	0,35
160	9,48	4,44	0,45
200	9,17	3,43	0,68
250	9,11	2,98	0,84
315	9,35	2,71	0,98
400	8,71	2,47	1,08
500	8,62	2,53	1,04
630	9,42	2,69	0,99
800	9,20	2,75	0,95
1000	8,89	2,87	0,88
1250	8,05	2,90	0,82
1600	6,95	2,88	0,76
2000	6,00	2,78	0,73
2500	4,86	2,54	0,71
3150	3,90	2,20	0,76
4000	2,94	1,78	0,85
5000	2,27	1,48	0,93



$\alpha_w = 0,85$ () *
classe d'absorption acoustique: B

NRC = 0,9 **
SAA = 0,87 **

Demandeur: Triplaco nv, Generaal Deprezstraat 2, 8530 Harelbeke

ELEMENT D'ESSAI: (description sommaire par l'entreprise, détails: voir annexe 2)

Panneaux Acoustiques Print acoustics type Ds , épaisseur 19,5mm - cavité 70mm avec 50mm rockwool

* Il est recommandé d'utiliser cette seule note de valeur en combinaison avec la courbe complète de l'absorption acoustique.

** Ces résultats se situent en dehors de l'accréditation

. ANNEXE 4. PV d'essai (extrait) : PRINT ACOUSTICS - type Db

page 5 sur 10



eco-scan bvba
Industrieweg 114H
B-9032 Wondelgem
Belgium
BTW nr.: BE 0887 763 992



www.eco-scan.be

N° 0451-TEST
NBN EN ISO 17025:2005

NOISE LAB RAPPORT D'ESSAIS N° A-2015_ZO_1405-9-42137_F

α_s

COEFFICIENT D'ABSORPTION ACOUSTIQUE

EN ISO 354:2003

Acoustique - Mesurage de l'absorption acoustique en salle réverbérante (ISO 354:2003)

EN ISO 11654:1997

Acoustique - Absorbants pour l'utilisation dans les bâtiments - Évaluation de l'absorption acoustique

N° de l'élément d'essai :

9

Date: 13/05/2015

Salle de réverbération:

V =

296,9 m³

S_{tot} = 278,2 m²

Conditions pendant les mesures:

la salle réverbérante vide

avec du matériel d'essai

Température :

T = 16,8

16,8 °C

Pression atmosphérique :

p = 101,5

101,6 kPa

Humidité atmosphérique :

h_r = 59

62 %

Type d'élément de test:

Absorbeur de surface plane

Caractéristiques de construction :

* en utilisant plan absorbeur:

Surface de l'échantillon : 12,76 m²

Epaisseur totale (mm) : 520 mm

Nombre de couches, vide d'air inclus : 3

Connection des couches : lâchement

* en utilisant baffles (montage Type J):

Dimension (Long. x Larg. x H): -

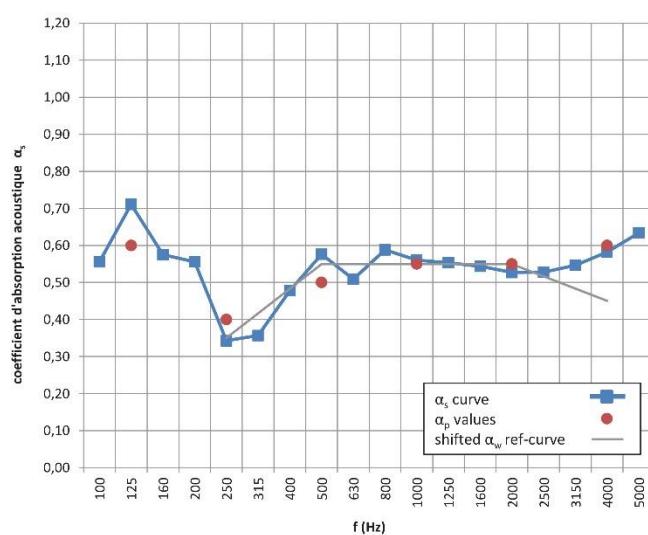
Distance entre les lignes: -

Nombre d'objets: -

* en utilisant des objets discrets:

f(Hz)	T1 (s)	T2 (s)	α_s
50			
63			
80			
100	12,65	4,42	0,56
125	10,07	3,48	0,71
160	9,14	3,82	0,57
200	9,60	3,98	0,56
250	9,25	5,03	0,34
315	9,29	4,95	0,36
400	8,86	4,18	0,48
500	9,11	3,81	0,58
630	9,79	4,23	0,51
800	9,72	3,87	0,59
1000	9,53	3,95	0,56
1250	8,69	3,83	0,55
1600	7,49	3,62	0,54
2000	6,53	3,44	0,53
2500	5,45	3,12	0,53
3150	4,40	2,72	0,55
4000	3,51	2,32	0,58
5000	2,69	1,90	0,63

f(Hz)	α_p
125	0,60
250	0,40
500	0,50
1000	0,55
2000	0,55
4000	0,60



$\alpha_w = 0,55$ () *
classe d'absorption acoustique: D

NRC = 0,5 **
SAA = 0,51 **

Demandeur: Triplaco nv, Generaal Deprezstraat 2, 8530 Harelbeke

ELEMENT D'ESSAI: (description sommaire par l'entreprise, détails: voir annexe 2)

Panneaux Acoustiques Print acoustics type Db , épaisseur 19,5mm - cavité 500mm avec 20mm PRIMAWOOL

* Il est recommandé d'utiliser cette seule note de valeur en combinaison avec la courbe complète de l'absorption acoustique.

** Ces résultats se situent en dehors de l'accréditation

. ANNEXE 5. Solution d'aménagement 1 : valeurs de Tr calculées

Solution d'aménagement		Tr de calcul [s]					
		Fréquence [Hz]				Moyenne 250 - 4000 Hz	
Situation de mesurage	récepteur	125	250	500	1000	2000	4000
1	1	0,68	0,68	0,77	0,84	0,90	0,97
	2	0,60	0,65	0,80	0,93	1,23	1,22
	3	0,68	0,69	0,82	1,01	1,13	1,07
	4	0,79	0,83	0,95	1,05	1,16	1,17
Moyenne		0,69	0,71	0,84	0,96	1,11	0,94
2	1	0,92	0,90	0,94	1,16	1,23	1,23
	2	0,67	0,71	0,77	1,08	1,18	1,19
	3	0,51	0,62	0,74	1,04	1,13	1,15
	4	0,58	0,72	0,81	0,90	0,94	0,94
Moyenne		0,67	0,74	0,82	1,05	1,12	0,97
3	1	0,84	0,97	1,11	1,11	1,24	1,09
	2	0,59	0,57	0,57	0,56	0,46	0,47
	3	0,55	0,64	0,78	0,99	1,08	1,07
	4	0,58	0,70	0,87	0,98	1,03	0,96
Moyenne		0,64	0,72	0,83	0,91	0,95	0,86
Moyenne Totale				0,67	0,83	0,97	1,04
				Tr_{125}		Tr	

. ANNEXE 6. Solution d'aménagement 2 : valeurs de Tr calculées

Solution d'aménagement		Tr de calcul [s]					
		Fréquence [Hz]			Moyenne 250 - 4000 Hz		
1	2	125	250	500	1000	2000	4000
	récepteur	0,58	0,68	0,86	0,84	0,84	0,85
	1	0,64	0,58	0,86	1,08	1,07	1,05
	2	0,47	0,49	0,60	0,64	0,71	0,71
	Moyenne	0,55	0,56	0,71	0,76	0,74	0,70
2	1	0,60	0,65	0,76	0,90	0,83	0,83
	2	0,67	0,51	1,00	1,27	1,25	1,26
	3	0,46	0,43	0,44	0,49	0,52	0,56
	4	0,49	0,54	0,59	0,68	0,72	0,66
	Moyenne	0,56	0,53	0,70	0,84	0,83	0,74
3	1	0,64	0,44	0,48	0,48	0,53	0,52
	2	0,48	0,49	0,46	0,47	0,57	0,53
	3	0,55	0,51	0,52	0,59	0,72	0,56
	4	0,50	0,55	0,63	0,73	0,77	0,75
	Moyenne	0,54	0,50	0,52	0,57	0,65	0,59
Moyenne Totale		0,53	0,64	0,75	0,77	0,75	0,69
Tr ₁₂₅							

. ANNEXE 7. Solution d'aménagement 3 : valeurs de Tr calculées

Solution d'aménagement		Tr de calcul [s]					
		Fréquence [Hz]				Moyenne 250 - 4000 Hz	
3		125	250	500	1000	2000	4000
1	Situation de mesurage	récepteur	125	250	500	1000	2000
	1	0,54	0,52	0,39	0,40	0,42	0,39
	2	0,42	0,41	0,39	0,39	0,41	0,41
	3	0,49	0,49	0,54	0,39	0,36	0,39
	4	0,66	0,92	1,07	1,07	0,70	0,78
2	Moyenne	0,53	0,59	0,60	0,56	0,47	0,49
	1	0,49	0,55	0,56	0,53	0,53	0,50
	2	0,74	0,57	0,47	0,49	0,71	0,51
	3	0,45	0,49	0,53	0,57	0,59	0,59
	4	0,57	0,44	0,43	0,46	0,60	0,56
3	Moyenne	0,56	0,51	0,50	0,51	0,61	0,54
	1	0,47	0,40	0,34	0,33	0,39	0,34
	2	0,45	0,47	0,44	0,51	0,57	0,65
	3	0,45	0,47	0,47	0,61	0,68	0,74
	4	0,44	0,42	0,46	0,55	0,67	0,65
	Moyenne	0,45	0,44	0,43	0,50	0,58	0,60
			0,51	0,51	0,53	0,54	0,53
	Moyenne Totale						
		Tr_{125}		Tr			

. ANNEXE 8. Solution d'aménagement 4 : valeurs de Tr calculées

Solution d'aménagement		Tr de calcul [s]					
4		Fréquence [Hz]				Moyenne 250 - 4000 Hz	
Situation de mesurage	récepteur	125	250	500	1000	2000	4000
1	1	0,66	0,76	0,85	0,92	0,96	0,97
	2	0,61	0,71	0,83	1,23	1,35	1,34
	3	0,76	0,94	1,17	1,50	1,71	1,64
	4	0,65	0,73	1,08	1,35	1,50	1,45
Moyenne		0,67	0,79	0,98	1,25	1,38	1,35
2	1	0,56	0,64	0,81	1,31	1,68	1,72
	2	0,73	0,78	0,78	0,90	1,02	1,05
	3	0,49	0,55	0,67	0,79	0,86	0,89
	4	0,59	0,65	0,70	0,71	0,73	0,74
Moyenne		0,59	0,66	0,74	0,93	1,07	1,10
3	1	0,73	0,83	0,90	0,90	0,94	0,91
	2	0,68	0,63	0,84	0,82	0,78	0,78
	3	0,50	0,56	0,66	0,80	0,84	0,83
	4	0,54	0,62	0,69	0,73	0,77	0,77
Moyenne		0,61	0,66	0,77	0,81	0,83	0,82
Moyenne Totale				0,70	0,83	1,00	1,10
				Tr_{125}		Tr	
				0,63		0,94	

. ANNEXE 9. Solution d'aménagement 5 : valeurs de Tr calculées

<i>Solution d'aménagement</i>		<i>Tr de calcul [s]</i>					
5		Fréquence [Hz]					
<i>Situation de mesurage</i>	<i>récepteur</i>	125	250	500	1000	2000	4000
1	1	0,55	0,49	0,61	0,72	0,80	0,82
	2	0,63	0,65	0,68	0,68	0,72	0,74
	3	0,77	0,64	0,49	0,69	0,81	0,72
	4	0,54	0,54	0,89	1,07	1,08	0,98
<i>Moyenne</i>		0,62	0,58	0,67	0,79	0,85	0,82
2	1	0,49	0,53	0,58	0,56	0,83	0,94
	2	0,47	0,45	0,49	0,47	0,54	0,52
	3	0,45	0,42	0,46	0,66	0,73	0,77
	4	0,46	0,46	0,51	0,58	0,67	0,73
<i>Moyenne</i>		0,47	0,47	0,51	0,57	0,69	0,74
3	1	0,71	0,93	1,11	1,32	1,30	1,25
	2	0,78	0,63	0,63	0,65	0,68	0,54
	3	0,46	0,45	0,49	0,57	0,59	0,59
	4	0,46	0,43	0,50	0,60	0,80	0,83
<i>Moyenne</i>		0,60	0,61	0,68	0,79	0,84	0,80
<i>Moyenne Totale</i>				0,56	0,62	0,71	0,79
				<i>Tr₂₅</i>			0,69
							<i>Tr</i>

. ANNEXE 10. Solution d'aménagement 6 : valeurs de Tr calculées

Solution d'aménagement		Tr de calcul [s]				Moyenne 250 - 4000 Hz	
6		Fréquence [Hz]					
Situation de mesurage	récepteur	125	250	500	1000	2000	4000
1	1	0,51	0,52	0,57	0,63	0,62	
	2	0,74	0,86	0,93	0,95	0,95	0,85
	3	0,61	0,78	0,94	1,50	1,30	1,40
	4	1,87	2,23	2,49	2,17	1,95	1,58
	Moyenne	0,93	1,10	1,22	1,30	1,21	1,11
2	1	0,51	0,62	0,71	0,71	0,73	0,90
	2	0,68	0,57	0,73	0,86	0,96	0,99
	3	0,45	0,48	0,60	0,73	0,76	0,80
	4	0,52	0,46	0,50	0,54	0,59	0,56
	Moyenne	0,54	0,53	0,64	0,71	0,76	0,81
3	1	0,67	0,79	0,87	0,92	0,92	0,91
	2	0,58	0,49	0,41	0,49	0,62	0,56
	3	0,49	0,53	0,60	0,70	0,75	0,73
	4	0,51	0,55	0,58	0,63	0,73	0,69
	Moyenne	0,56	0,59	0,62	0,69	0,76	0,72
Moyenne Totale		0,68	0,74	0,82	0,90	0,91	0,88
Tr_{125}						Tr	0,85

. ANNEXE 11. Solution d'aménagement 7 : valeurs de Tr calculées

Solution d'aménagement		Tr de calcul [s]								
		Fréquence [Hz]								
		125			500		1000	2000	4000	Moyenne 250 - 4000 Hz
1	Situation de mesurage	récepteur	125	250	500	1000	2000	4000		
	1	0,58	0,67	0,77	0,85	0,80	0,80	0,93		
	2	0,61	0,65	1,24	1,58	1,66	1,66	1,63		
	3	0,58	0,55	0,64	0,66	0,64	0,64	0,72		
	4	0,51	0,53	0,55	0,59	0,76	0,76	0,73		
2	Moyenne	0,57	0,60	0,80	0,92	0,97	1,00	0,86		
	1	0,59	0,90	1,07	1,19	1,25	1,25	1,29		
	2	0,52	0,66	0,79	1,34	1,50	1,50	1,52		
	3	0,55	0,51	0,54	0,65	0,72	0,72	0,72		
	4	0,58	0,60	0,65	0,76	0,79	0,79	0,78		
3	Moyenne	0,56	0,67	0,76	0,99	1,07	1,08	0,91		
	1	0,71	0,98	1,10	1,24	1,34	1,34	1,38		
	2	0,71	0,74	1,63	2,07	2,39	2,39	2,54		
	3	0,48	0,46	0,81	1,21	1,21	1,21	1,14		
	4	0,48	0,47	0,48	0,62	0,70	0,70	0,71		
	Moyenne	0,60	0,66	1,01	1,29	1,41	1,44	1,16		
			0,64	0,86	1,06	1,15	1,17	0,98		
		Moyenne Totale			Tr_{125}		Tr			

. ANNEXE 12. Solution d'aménagement 8 : valeurs de Tr calculées

Solution d'aménagement		Tr de calcul [s]					
8		Fréquence [Hz]					
Situation de mesurage	récepteur	125	250	500	1000	2000	4000
1	1	0,57	0,60	0,61	0,65	0,66	0,65
	2	0,66	0,67	0,70	0,74	0,76	0,80
	3	0,51	0,65	0,91	0,93	0,92	0,83
	4	0,53	0,58	0,65	0,75	0,74	0,73
Moyenne		0,57	0,63	0,72	0,77	0,75	0,73
2	1	0,73	0,83	0,94	0,93	1,05	1,11
	2	0,56	0,56	0,76	0,96	1,02	1,01
	3	0,51	0,60	0,68	0,82	1,07	0,99
	4	0,77	0,85	0,92	1,01	1,05	1,00
Moyenne		0,64	0,71	0,83	0,93	1,05	1,03
3	1	0,54	0,60	0,71	0,80	0,89	0,92
	2	0,71	0,75	0,93	1,09	1,17	1,14
	3	0,59	0,61	0,62	0,66	0,69	0,72
	4	0,54	0,61	0,65	0,71	0,73	0,72
Moyenne		0,60	0,64	0,73	0,82	0,87	0,88
Moyenne Totale				0,66	0,76	0,84	0,89
Tr_{125}							0,81
							Tr
Moyenne 250 - 4000 Hz							

. ANNEXE 13. Solution d'aménagement 9 : valeurs de Tr calculées

Solution d'aménagement		Tr de calcul [s]					
9		Fréquence [Hz]				Moyenne 250 - 4000 Hz	
Situation de mesure	récepteur	125	250	500	1000	2000	4000
1	1	0,56	0,63	0,75	0,93	0,87	0,80
	2	0,45	0,39	0,42	0,49	0,56	0,53
	3	0,60	0,60	0,73	0,66	0,54	0,45
	4	1,22	1,55	1,59	1,23	0,55	0,52
Moyenne		0,71	0,79	0,87	0,83	0,63	0,58
2	1	0,54	0,42	0,37	0,51	0,60	0,51
	2	0,60	0,56	0,61	0,65	0,64	0,77
	3	0,47	0,45	0,47	0,50	0,57	0,55
	4	0,45	0,45	0,51	0,59	0,69	0,77
Moyenne		0,52	0,47	0,49	0,56	0,63	0,65
3	1	1,04	1,05	1,18	1,28	1,27	1,24
	2	0,48	0,47	0,69	0,93	0,98	0,93
	3	0,49	0,50	0,54	0,69	0,79	0,80
	4	0,47	0,46	0,51	0,63	0,71	0,74
Moyenne		0,62	0,62	0,73	0,88	0,94	0,93
Moyenne Totale				0,61	0,63	0,70	0,73
						0,72	0,71
							Tr

