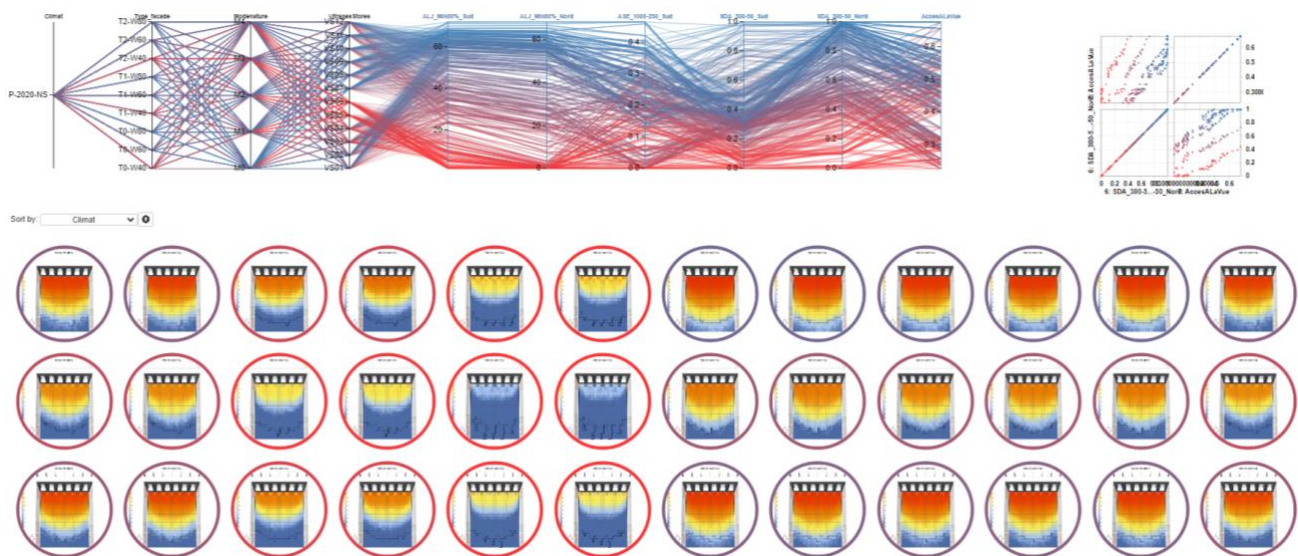


# ANALYSE PARAMÉTRIQUE MULTICRITÈRE DES SYSTÈMES DE FAÇADE

ÉNERGIE – CARBONE – CONFORT THERMIQUE – CONFORT VISUEL



## MÉTHODE ET HYPOTHÈSES

## **ARCORA INGENIERIE STRUCTURES ET ENVELOPPES**

18, rue des Deux Gares - CS 70081 - 92563 Rueil Malmaison Cedex - France  
Tél : + 33 (0)1 49 04 67 00 - [arcora@arcora.com](mailto:arcora@arcora.com) - [www.arcora.com](http://www.arcora.com)

### ***Direction de projet***

*Florent Cappoen, Arcora*  
*Coralie Balère, Actierra*

### ***Coordination des études***

*Aymeric de La Bachelerie, Arcora*

### ***Études et rédaction du rapport***

*Thibaut Buessler, Arcora*  
*Arnaud Clavreul, Arcora*  
*Aymeric de La Bachelerie, Arcora*  
*Franck Marcilloux, Actierra*  
*Emma Onofri, Actierra*

# SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>AVANT-PROPOS</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>OBJECTIFS ET LIMITES DE L'ÉTUDE</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>MÉTHODE ET INDICATEURS</b>	<b>4</b>
3.1.	MODÉLISATION THERMIQUE ET ÉNERGÉTIQUE	5
3.2.	MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE DU SYSTÈME VITRAGE ET PROTECTION SOLAIRE MOBILE	7
3.2.1.	Modèle de calcul RE2020	7
3.2.2.	Modèle SED	8
3.2.3.	Calcul d'éclairement naturel	9
3.3.	ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)	13
3.3.1.	Préambule	13
3.3.2.	Données environnementales des produits de construction	13
3.3.3.	Méthode de calcul	15
<b>4.</b>	<b>HYPOTHÈSES</b>	<b>16</b>
4.1.	BÂTIMENT MODÉLISÉ	16
4.1.1.	Volumétrie du modèle et représentation des zones fonctionnelles	16
4.2.	CONTEXTE, MASQUES PROCHES ET ORIENTATION	18
4.3.	LOCALISATION ET FICHER CLIMATIQUE DU BÂTIMENT D'ÉTUDE	18
4.4.	HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / TYPOLOGIES CONSTRUCTIVES	19
4.4.1.	T0 - Châssis dans voile percé	19
4.4.2.	T1 - Façade mur rideau grille	19
4.4.3.	T2 - Façade mur rideau cadre	20
4.4.4.	T3 - Façade mur rideau grille à isolation renforcée	20
4.4.5.	Performance thermique des modes constructifs T0, T1, T2, T3	20
4.5.	HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / RATIO OPAQUE – VITRE	21
4.6.	HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / VITRAGES	22
4.7.	HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / PROTECTIONS SOLAIRES MOBILES	22
4.8.	HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / PERFORMANCE DE L'ENSEMBLE VITRAGE + STORE	23
4.9.	HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / SCÉNARIOS DE GESTION DES PROTECTIONS SOLAIRES MOBILES	25
4.9.1.	Calcul RE2020	25
4.9.2.	Calcul SED	26
4.9.3.	Calcul d'éclairement naturel	27
4.10.	Hypothèses sur les façades / Performance thermique des menuiseries	28
4.11.	HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / MODENATURES ET BRISE-SOLEIL FIXES	29
4.12.	HYPOTHÈSES GÉNÉRALES DU MODÈLE	30
4.12.1.	Hypothèses spécifiques au modèle RE2020	30
4.12.2.	Performances énergétiques de l'enveloppe	30
4.12.3.	Modélisation des systèmes d'approvisionnement énergétique	33
4.12.4.	Modélisation des systèmes de traitement thermique	34
4.12.5.	Modélisation des systèmes d'éclairage et de leur mode de gestion	37

## 1. AVANT-PROPOS

L'étude « Analyse paramétrique multicritère des systèmes de façade », réalisée entre janvier 2023 et juillet 2024, s'inscrit dans le contexte de la recherche de l'amélioration de la qualité environnementale des projets de construction de bureaux en France. La qualité environnementale des bâtiments est aujourd'hui évaluée au regard de grands enjeux que sont **la consommation des ressources en énergie et en matière, l'impact sur le réchauffement climatique**, la limitation des pollutions, le respect de la biodiversité, **le confort et la santé des usagers**. Il est ici à noter que le réchauffement climatique ne vaut pas seulement comme une contrainte portant sur la réduction des impacts mais aussi comme un enjeu de résilience des projets face aux problématiques d'inconfort thermique. Toutes ces thématiques sont déclinées dans les certifications nationales et internationales (on peut citer par exemple les référentiels HQE BD, LEED, BREEAM, WELL, OSOZ, BBKA, etc.), et font également en partie l'objet de la réglementation environnementale RE2020. Ces référentiels permettent de caractériser la performance des projets de construction, notamment en phase de conception, au moyen d'indicateurs quantitatifs, calculés par des logiciels de modélisation et de simulation. **Les indicateurs de qualité environnementale des bâtiments jouent donc un rôle important dans la prescription.**

À cet égard, **les façades et le choix des solutions techniques qui y sont associés tiennent une place stratégique**. En effet, la part imputable au lot façade de l'impact carbone des matériaux d'un projet de construction neuf en France peut représenter entre 15% et 25% du total<sup>1</sup>.

Les consommations de chauffage, de climatisation et d'éclairage sont également particulièrement sensibles à la forme des façades (géométrie, trame, ratio opaque-vitré, orientation, etc.) et la nature de ses composants (modes constructifs, menuiseries extérieures, vitrages, isolants, protections solaires, etc.). Enfin, le confort thermique et le confort visuel (qualité de l'éclairage naturel, maîtrise de l'éblouissement, vues vers l'extérieur) sont fortement influencés par ces choix de conception.

**Ces enjeux sont interdépendants et parfois contradictoires**. La recherche de performance doit alors s'intéresser en parallèle aux différents enjeux pour proposer des solutions équilibrées.

Il est donc **nécessaire d'adopter une approche multicritère pour comparer des scénarios**.

C'est dans ce contexte que Saint-Gobain Glass, acteur majeur du domaine de la construction, offrant notamment une large gamme de produits verriers, a souhaité réaliser **une étude paramétrique visant à caractériser la qualité environnementale et la conformité réglementaire RE2020 de solutions de façades**. Cette étude a été réalisée par le groupe Ingérop, et ses deux filiales spécialisées :

- Arcora, bureau d'études expert dans le domaine des enveloppes et structures de bâtiment ;
- Actierra, Ingénierie conseil spécialisée dans la transition écologique.

Ce document en présente **les objectifs, la méthodologie et les hypothèses de calcul**.

Les résultats font l'objet d'autres documents ou synthèses.





---

<sup>1</sup> D'après l'étude IFPEB/Carbone4 pour le Hub des Prescripteurs Bas Carbone – Brief Façade, juin 2022, étude basée sur les données issues de l'observatoire E+C- au 1er février 2022, transposées selon la méthode RE2020.

## 2. OBJECTIFS ET LIMITES DE L'ÉTUDE

L'étude vise à caractériser la performance environnementale d'un grand nombre de types de façades (combinaisons des paramètres), par la modélisation énergétique dynamique d'un bâtiment type, la modélisation thermique réglementaire, des simulations d'éclairage naturel et des calculs carbone, et selon différents scénarios d'orientation et de conditions climatiques.













Les scénarios sont donc évalués à travers une approche multicritère selon :

-  **La performance énergétique**
-  **Le confort visuel des usagers**
-  **Le confort thermique**
-  **L'impact carbone**

L'étude se limite aux bâtiments neufs à usage de bureaux, classés Code du Travail<sup>2</sup>, en France métropolitaine. Les conclusions de l'étude ne seront donc a priori pas transposables à d'autres contextes<sup>3</sup>. La performance acoustique de l'enveloppe et les hypothèses portant sur la sécurité incendie ne sont pas des paramètres variables de la présente étude<sup>4</sup>.

## 3. MÉTHODE ET INDICATEURS

Les outils de simulation et principaux indicateurs calculés pour chaque scénario sont présentés dans le tableau qui suit.

RE2020	SED	Confort visuel	ACV
 Pléiades v5.23.6.1	 EnergyPlus v22.2	 LBNL Radiance v5.4a	 <i>Évaluation carbone de l'enveloppe</i>
 Bbio [pts] Cep [kWh <sub>ep</sub> /m <sup>2</sup> /an] Cep-enr [kWh <sub>ep</sub> /m <sup>2</sup> /an]	 Energie finale [kWh <sub>ef</sub> /m <sup>2</sup> /an] Chauffage, Climatisation, Éclairage, Auxiliaires  Pmax [W/m <sup>2</sup> ]	 Autonomie Lumière Jour (HQE BD)  Annual Sunlight Exposure (ASE)  Spatial Daylight Autonomy (LEED / WELL)  Accès aux vues vers l'extérieur (taux de fermeture des protections solaires)  Useful Daylight Illuminance (UDI)	 IC-Façades dyn50ans [kgCO <sub>2e</sub> /m <sup>2</sup> façade] [kgCO <sub>2e</sub> /m <sup>2</sup> SRT]
 DH [°C.h]	 Tair [°C] Top [°C] PMV [-]		
 IC - énergie [kgCO <sub>2e</sub> /m <sup>2</sup> SRT]	 IC - énergie [kgCO <sub>2e</sub> /m <sup>2</sup> SRT]		

<sup>2</sup> Les bâtiments classés Immeubles de Grande Hauteur ne font pas partie du champ d'investigation.

<sup>3</sup> Les métriques et la méthode de calcul RE2020 sont spécifiques à la France. Par ailleurs, les fichiers climatiques utilisés pour les simulations correspondent à des localisations en France métropolitaine. Enfin, les hypothèses sous-jacentes à la constitution des scénarios (géométrie, trame de façade, densité urbaine, etc.) sont plutôt représentatifs d'usages de la promotion immobilière en France. Les caractéristiques typo-morphologiques des bâtiments pourraient nécessiter des adaptations dans le cas d'une étude hors de France.

<sup>4</sup> Les prestations ont été fixées à des niveaux considérés comme standards/réglementaires, et sont explicités dans ce rapport technique. L'évaluation du coût des solutions de façade ne fait pas l'objet de l'étude.

### 3.1. MODÉLISATION THERMIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

La performance énergétique d'un bâtiment peut être évaluée soit dans le cadre d'un calcul réglementaire (RE2020), soit dans le cadre d'une Simulation Énergétique Dynamique (SED).

Dans le premier cas, le calcul RE2020 est cadré par des objectifs gouvernementaux de réduction des consommations d'énergie et de limitation des émissions de gaz à effet de serre. Un ensemble de textes législatifs (décrets et arrêtés) définissent précisément les exigences (de moyens et de résultats) à respecter et les méthodes de calcul à prendre en compte.

Dans le second cas, la SED vise à étudier de façon plus fine et plus réaliste le comportement thermique et énergétique, au travers de différents scénarios de fonctionnement (occupation, apports internes, niveaux d'éclairage, consignes de température, ventilation, etc.), traduisant l'usage et le fonctionnement du bâtiment en exploitation. Les outils de calcul offrent une plus grande souplesse quant à la définition des indicateurs et la granulométrie de l'analyse, temporelle (pas de temps de calcul) et spatiale (résultats au niveau de composants spécifiques du modèle et non pas seulement du bâtiment dans son ensemble). De nombreuses hypothèses peuvent être spécifiées pour les besoins de l'étude.

Les différences entre l'approche énergétique dans le modèle RE2020 et dans le modèle SED sont synthétisées ci-dessous :

	RE2020 Pléiades v5.23.6.1	SED EnergyPlus v22.2
<b>Données d'entrée</b>	Scénarios d'occupation et de fonctionnement standardisés  Données climatiques standardisées	Planning de fonctionnement et contrôle des systèmes personnalisables, notamment concernant les protections solaires mobiles.  Données climatiques spécifiques, y compris scénario futur de réchauffement global
<b>Modèle de calcul</b>	Méthode ThBCE, comprenant certaines simplifications pour la prise en compte de l'inertie des parois (méthode Th-I avec classes légères, moyennes, lourdes selon mode constructif), du rayonnement solaire et du calcul des ombres portées, du comportement des baies vitrées, etc.  Effet boîte-noire entre la méthodologie définie par les textes et leur implémentation dans les logiciels	Outil de calcul open source offrant une grande flexibilité dans l'intégration de briques logicielles complémentaires et de modèles validés par les recherches scientifiques.  On notera en particulier : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prise en compte du comportement thermique des parois multicouches avec caractéristiques physiques détaillées des composants, notamment inertie et transferts d'humidité ;</li> <li>• Prise en compte détaillée de la convection et de la radiation (courte et grandes longueurs d'ondes) aux conditions limites des surfaces ;</li> <li>• Calcul solaire précis tenant compte de la réflexion à l'extérieur et l'intérieur du bâtiment, calcul détaillé des ombres portées ;</li> <li>• Prise en compte précise de la dépendance angulaire des caractéristiques lumineuses et énergétiques des systèmes de vitrage et store par l'intégration des données sous forme de matrices BSDF</li> <li>• Modélisation détaillée des systèmes CVC</li> </ul>
<b>Résultats</b>	Résultats agrégés sur une période annuelle, indicateurs réglementaires seulement	Résultats détaillés, granulométrie temporelle au pas de temps de calcul (horaire voire infra-horaire), granulométrie spatiale fine (résultats à l'échelle des surfaces, des zones thermiques ou du bâtiment selon le besoin de l'analyse)

Dans le cadre des calculs réglementaires, les indicateurs de performance définis par la RE2020 sont analysés pour chaque scénario.

- Le coefficient Bbio (exprimé en points) caractérise l'efficacité énergétique du bâti. Il permet de l'apprécier par rapport aux besoins de chauffage, de refroidissement et d'éclairage artificiel ;
- Le coefficient en consommation d'énergie primaire dit « Cep », évalué en kWhep/m<sup>2</sup>/an, pour les principaux postes de consommation : Chauffage, Refroidissement, Eau Chaude Sanitaire (dit « ECS »), Éclairage, Ventilation et auxiliaires<sup>5</sup> ;
- Le coefficient en consommation d'énergie primaire non renouvelable dit « Cep,nr » (comptabilise uniquement les vecteurs non renouvelables) ;
- Ic Energie, évaluant l'impact sur le changement climatique de la consommation des énergies en n kg eq CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> pendant l'utilisation du bâtiment sur une durée de vie de 50 ans ;
- Degrés Heures dit « DH », caractérisant le niveau d'inconfort en été perçu par les occupants.

La conformité réglementaire est vérifiée si et seulement si chaque indice respecte le seuil maximal<sup>6</sup> :

- Bbio Projet ≤ Bbio max (évolution du seuil 2022, 2025, 2028)
- Cep,nr Projet ≤ Cep,nr max
- Cep Projet ≤ Cep max
- Ic Energie Projet ≤ Ic Energie max (évolution du seuil 2022, 2025, 2028)
- DH Projet ≤ DH max

Au moyen de la Simulation Energétique Dynamique (SED), chaque scénario est caractérisé par le besoin thermique idéal, les consommations en énergie finale, les appels de puissance thermique informant sur le dimensionnement des installations de traitement. Une analyse détaillée des plannings d'utilisation et des consommations énergétiques des stores a pu être produite.

La SED permet d'obtenir des résultats relatifs à la performance énergétique mais également au confort thermique des usagers, à travers le PMV et la température opérative.

L'indice PMV<sup>7</sup> (Predicted Mean Vote) prédit la valeur moyenne des votes d'un groupe d'individus sur une échelle de sensation thermique allant de +3 très chaud à -3 très froid. Il est déterminé par l'équation de Fanger en fonction du métabolisme (met), de l'isolement vestimentaire (clo) et des quatre paramètres climatiques (température de l'air, température moyenne radiante, humidité relative, vitesse de l'air). Pour cette étude, les valeurs de met, clo et la vitesse de l'air (va) sont des paramètres définis, invariants selon les scénarios, et indépendants du calcul thermique dynamique. Les valeurs suivantes sont prises en compte : 1,1 met / Hiver 1,0 clo – Été 0,6 clo – Mi-saison 0,75 / Va = 0,10 m/s.

---

<sup>5</sup> Sont également compris les consommations liées aux Déplacements (ascenseurs et/ou escalateurs), à l'éclairage et à la ventilation des parkings, et des circulations en logements collectifs.

<sup>6</sup> Les seuils maximaux sont définis selon l'usage du bâtiment et des coefficients de modulation qui dépendent de la localisation géographique, de la surface ou encore de l'exposition au bruit des infrastructures de transport à proximité du bâtiment.

<sup>7</sup> Le PMV est décrit par la norme ISO 7730 "Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local".

Les classes de confort visées correspondent à la norme ISO 7730. La classe de confort B (PMV compris entre -0,5 – sensation « légèrement frais » – et +0,5 – légèrement chaud – est la classe recommandée par les certifications environnementales LEED et WELL. C'est donc principalement vis-à-vis du respect de cette catégorie que nous avons analysé les résultats des simulations. Nous considérons dans cette étude que la catégorie de confort est atteinte pour un cas d'étude donné lorsque la part du temps d'occupation est supérieure à 95%. On considère à l'inverse que le confort thermique n'est pas satisfait si elle n'est pas atteinte plus de 15% du temps d'occupation. La température opérative (Top) est un des indicateurs de la température ressentie par l'occupant<sup>8</sup>. Elle prend donc en compte la température de l'air dans la zone d'occupation et les effets de rayonnement. De manière simplifiée, on dit qu'elle est égale à la moyenne entre la température moyenne pondérée des surfaces du local et la température de l'air<sup>9</sup>. On s'intéresse dans l'étude à la part du temps d'occupation pour laquelle la température opérative est comprise dans l'intervalle de confort [20,5 ; 26,5].

### 3.2. MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE DU SYSTÈME VITRAGE ET PROTECTION SOLAIRE MOBILE

#### 3.2.1. Modèle de calcul RE2020

Les règles de calcul sont détaillées dans le fascicule Th-bât – parois vitrées. Ces coefficients sont calculés à incidence normale selon la norme EN 410 pour le vitrage, la norme 14500 et 14501 pour la protection solaire mobile, la norme ISO52022-3 et XP P50-777 pour l'assemblage des deux.

Dans la présente étude, les coefficients  $U_w$ ,  $U_{ws}$ ,  $T_{lw}$ ,  $T_{lws}$ ,  $Sw(1,2,3)$ <sup>10</sup>,  $S_{ws}(1,2,3)$  ont été calculés selon ces mêmes normes au moyen du logiciel Vitrage Décision selon la modalité d'un calcul spectral<sup>11</sup>.

Le calcul RE2020 tient compte de la dépendance angulaire des indices de transmission et de réflexion énergétique et lumineuse des parois vitrées (vitrage + store) à travers un coefficient forfaitaire compris entre 0,9 et 1. La dépendance angulaire des caractéristiques énergétiques des stores à lamelles est prise en compte au moyen d'abaques.

---

<sup>8</sup> La température opérative est définie par la norme EN 7726 (2002) comme la température d'une enceinte isotherme dans laquelle un occupant échange la même quantité de chaleur par rayonnement et convection que dans l'enceinte dans laquelle il se trouve réellement.

<sup>9</sup> Approximation valable lorsque les vitesses d'air sont inférieures à 0,2 m/s – courant pour l'intérieur d'un bâtiment, hors stratégie de ventilation naturelle ou brassage d'air.

<sup>10</sup> Le facteur solaire global est la somme des composantes  $Sw1$  (CLO),  $Sw2$  (GLO) et  $Sw3$  (énergie réémise vers l'intérieure par la cavité ventilée dans le cas de la présence d'une protection solaire intérieure).

<sup>11</sup> L'outil Vitrages Décision, développé par Ginger CEBTP, permet de réaliser le calcul des caractéristiques lumineuses et énergétiques de compositions de vitrage et stores selon les normes et réglementations de référence. Lorsque les données spectrales des différents composants sont connues (coefficients de transmission, absorption, réflexion des différentes couches par bande de longueur d'onde), la modalité de "calcul spectral" prévoit le calcul des caractéristiques résultantes de l'ensemble de la composition pour chaque bande de longueur d'onde avant de réaliser le calcul des valeurs intégrées. L'intégration a lieu a posteriori. Ce calcul est par conséquent plus précis et physiquement réaliste que celui plus simple consistant à la combinaison des valeurs intégrées de chaque couche.

### 3.2.2. Modèle SED

Les possibilités de modélisation offertes par EnergyPlus, outil de calcul utilisé pour les Simulations Energétiques Dynamiques sont décrites par les articles correspondants du manuel Engineering Reference<sup>12</sup> et Input/Output Reference.

Pour les vitrages, quatre modes de saisies sont possibles :

- Simple Window Model > les caractéristiques du vitrage calculées à incidence normale  $U_g$ ,  $S_g$ ,  $T_{lg}$  sont renseignées. Des corrections forfaitaires sont appliquées pour tenir compte de la modification de ces indices selon les conditions d'exposition (angle d'incidence notamment)
- Detailed Layers Model : SpectralAverage > chaque couche de la composition est renseignée avec les propriétés énergétiques en valeurs intégrées
- Detailed Layers Model : Spectral > les couches ont des valeurs spectrales mais EnergyPlus ne fait pas un calcul spectral pour autant au pas de temps horaire. Il réalise une intégration pour les courtes longueurs d'onde et les grandes longueurs d'onde. Cette méthode ajoute la finesse d'une combinaison spectrale des différents vitrages entre eux.
- Detailed Layers Model : BSDF > modèle très complet sur la dépendance angulaire des valeurs mais les données spectrales sont moyennées tel que décrit dans le mode de saisie SpectralAverage

Un modèle de dépendance angulaire est bien présent pour tous les cas mais c'est véritablement le BSDF qui est le plus complet de ce point de vue.

Par ailleurs, deux grandes familles existent pour saisir des protections solaires mobiles :

- La définition classique pour « Shades », « Blinds », « Screens » qui sont des objets différents représentant respectivement les stores toiles, les vénitiens et les écrans poreux. Nous avons prévu d'utiliser ce mode de définition qui est relativement précis et souple (gestion automatisée) mais pour lequel il n'est pas possible de spécifier des valeurs spectrales pour le store. Une dépendance angulaire simplifiée est prévue dans ce cas pour les types « Blinds » et « Screens » mais pas pour les « Shades ».
- BSDF : modèle complet avec dépendance angulaire complète, données spectrales moyennées

Le modèle EnergyPlus SpectralAverage (Winkelmann Average) pour les vitrages, associé à une définition classique des protections solaires mobiles, est utilisé dans la plupart des simulations réalisées par les praticiens. C'est cette approche de modélisation qui avait été retenue par défaut dans le cadre de cette étude paramétrique.

---

<sup>12</sup> EnergyPlus v22.2, Engineering Reference, U.S. Department of Energy, 2022, consultable en ligne depuis le site <https://energyplus.net/> Le document Input Output Reference est consultable à la même adresse.

Cette approche ne tient pas compte de la combinaison spectrale des vitrages et d'une éventuelle protection solaire. La réalisation du calcul au moyen du logiciel LBNL Window avant injection d'un fichier de matrices BSDF dans EnergyPlus permet une prise en compte plus juste des caractéristiques énergétiques du complexe vitrage + store au prix d'un temps de calcul très fortement augmenté (multiplié par 10).

L'approche BSDF comporte les améliorations suivantes :

- la combinaison spectrale des deux verres qui constituent le double vitrage est bien prise en compte mais il n'y a pas de combinaison spectrale avec le store, même lorsque celui-ci est renseigné par un fichier texte de type Dir/diff Spectral Material Shade file avec valeurs spectrales détaillées.
- la dépendance angulaire est précise, résultat de la combinaison des modèles angulaires de chaque couche, y compris pour le store dont les caractéristiques solaires et optiques (résultats des intégrations sur les bandes solaires d'une part et optiques d'autre part du spectre) sont renseignées par différentes matrices BSDF.

Les deux approches de calcul – SpectralAverage et BSDF – ont été confrontées. Etant donné l'observation d'écarts parfois significatifs (notamment sur les consommations de climatisation dans les scénarios avec store toile et en particulier toiles faiblement émissives), les résultats des calculs SED qui sont présentés mobilisent la méthode BSDF<sup>13</sup>.

### 3.2.3. Calcul d'éclairage naturel

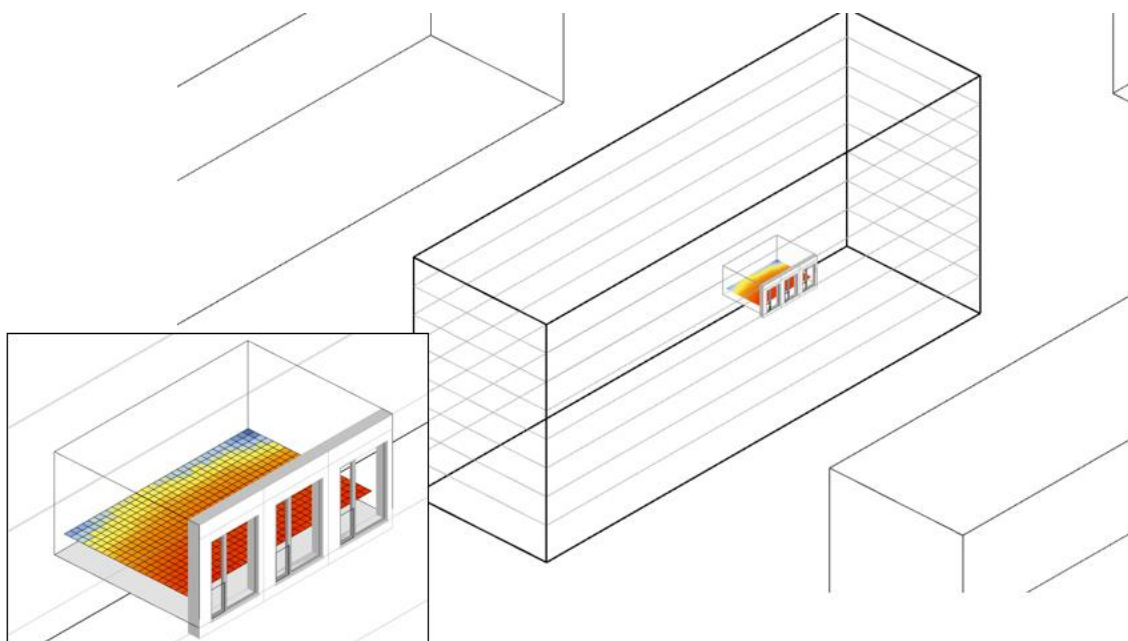
Les simulations d'éclairage naturel pour caractériser le confort visuel des usagers pour chaque scénario de façade sont réalisées au moyen du logiciel Radiance<sup>14</sup>, outil de simulation numérique validé par la communauté scientifique et admis pour les calculs d'éclairage par toutes les certifications environnementales dans le domaine du bâtiment.

Les simulations sont réalisées pour chaque scénario pour une zone par orientation représentant un local type de 6 trames de 1,35 m, pour un niveau moyen (R+4), et pour les fichiers climatiques de la période actuelle. Maille de calcul = 0,25 m / Hauteur du plan de travail : 70 cm conformément aux préconisations de la certification HQE BD 2016 pour un usage bureaux / Modèle de ciel calculé pour chaque heure selon le fichier climatique.

---

<sup>13</sup> Réduction moyenne de 8,3% (tous scénarios confondus) et jusqu'à 34,7% au maximum des consommations de climatisation dans le cas de la méthode BSDF. Peu de variations observées sur les consommations de chauffage entre les deux méthodes.

<sup>14</sup> Développé au Laboratoire Lawrence Berkeley, puis à l'EPFL, il s'agit d'un moteur de calcul physiquement réaliste de lancer de rayons (Hybrid deterministic/stochastic Monte Carlo backward-raytracing) permettant de calculer de manière précise les valeurs de luminance énergétique ou radiance ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ), d'irradiance ( $W/m^2$ ) et d'éclairage lumineux (lux).



*Illustration de la simulation d'éclairage naturel réalisée pour un local type selon les hypothèses de calcul exposées ci-dessus, pour chaque orientation de façade. Ce calcul est conduit pour chaque indicateur (voir description ci-après) et chaque scénario de façade.*

Conformément à la méthodologie de la certification HQE BD 2016 et en l'absence d'hypothèses spécifiques, les facteurs de réflexion des parois internes sont égaux à 70% pour les plafonds, 50% pour les murs, 20% pour les sols.

Taux de réflexion lumineuse de 20 % pour le sol extérieur et de 30% pour les bâtiments voisins, 30% pour les masques proches et modénatures, les menuiseries. L'épaisseur de façade est prise en compte.

Les vitrages sont modélisés au moyen d'un matériau de type « Glass material » dont la transmission lumineuse est égale à la valeur Tlg à incidence normale calculée au moyen de Vitrages Décision (calcul spectral) sur la composition vitrée du scénario correspondant.

Les stores toiles sont considérés comme des matériaux poreux parfaitement diffusant et isotropes (la transmission lumineuse renseignée est prise égale au taux de porosité). C'est ainsi que les toiles sont couramment modélisées.

Les indicateurs de performance suivants sont calculés :

- **Autonomie en Lumière du Jour (ALJ)** correspond au pourcentage de temps sur les heures de jour de la période d'occupation, pendant lequel le niveau d'éclairement en lumière du jour, sur 80 % de la surface du plan utile est supérieur ou égal au niveau d'éclairement préconisé pour l'activité pratiquée (selon la norme EN 12464-1). D'après la méthodologie du référentiel HQE Bâtiment durable 2016 v3, la période d'occupation de référence est 8h-18h et le niveau d'éclairement est de 300 lux / Stores non pris en compte.  
On s'intéresse notamment au respect des classes de confort A,  $ALJ_{\min 80} \in [65\% ; 100\%]$ , et B-C ( $ALJ_{\min 80} \in [10\% ; 65\%]$ ).  
Les dispositifs de protection solaire mobile ne sont pas pris en compte dans le cadre de la méthodologie de calcul de cet indicateur qui vise à qualifier le potentiel d'éclairement naturel de l'ouvrage sans considérer la variabilité spécifique à l'exploitation, et contrairement à l'indicateur sDA défini ci-après.
- **L'autonomie spatiale en lumière du jour (sDA)**, indicateur du système de notation LEED, évalue le pourcentage de la zone, pour laquelle le niveau d'éclairement naturel est supérieur à 300 lux plus de 50% du temps d'occupation. La certification LEED v4.1 spécifie trois niveaux de performance : « bas » si  $sDA > 40\%$ , « correct » pour  $sDA > 55\%$  et « préféré » pour  $sDA > 75\%$ . Planning d'occupation : 8h-18h / Stores pris en compte, baissés lorsqu'au moins 2% de la surface reçoit une illuminance directe (hors réflexion, hors ensoleillement diffus) supérieure à 1000lux<sup>15</sup>.
- **L'indicateur ASE**, indicateur du système de notation LEED, identifie les surfaces recevant trop de lumière directe du soleil, entraînant un risque de gêne visuelle (éblouissement). Il mesure le pourcentage de la surface du plan de travail dépassant un seuil d'éclairement naturel de 1 000 lux plus de 250 heures occupées par an. La certification LEED v4.1 spécifie trois niveaux de performance : « exemplary » si  $ASE < 10\%$ , « acceptable » si  $10\% < ASE < 20\%$ , « unacceptable » si  $ASE > 20\%$ . Planning d'occupation : 8h-18h / Eclairage direct uniquement, pas d'éclairage diffus, réflexion lumineuse sur les surfaces non considérée.  
Pour le calcul de cet indicateur, les protections solaires mobiles ne sont pas considérées, l'objectif étant justement de qualifier le besoin d'ajouter des dispositifs mobiles pour améliorer le confort visuel et limiter ainsi les risques d'éblouissement<sup>16</sup>.
- **Accès aux vues extérieures** : la qualité des vues sur l'extérieur fait l'objet d'une définition dans la norme EN 17037. Néanmoins les critères et la méthode d'évaluation n'étaient pas applicables à la présente étude paramétrique car trop génériques et pas suffisamment différenciant pour les scénarios considérés. C'est pourquoi cet enjeu est évalué à travers le taux de fermeture des protections solaires qui ont un impact direct sur le rapport à l'environnement extérieur et la qualité des vues.

---

<sup>15</sup> IES LM-83-12 : *Illuminating Engineering Society, Lighting Measurement 83: Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*. La méthode de calcul prévoit également que les concepteurs puissent utiliser un autre scénario d'usage des protections solaires que le scénario de référence LEED décrit ici. C'est pourquoi, l'indicateur a également fait l'objet d'un calcul basé sur le seuil d'activation selon calcul SED (voir §4.9.2).

<sup>16</sup> La norme EN 17037 constitue également une norme de référence pour l'évaluation des risques d'éblouissement au moyen de l'indicateur Daylight Glare Probability (DGP), dont le calcul demande des ressources computationnelles beaucoup plus importantes, incompatibles avec une étude paramétrique sur un grand nombre de scénarios.

- **UDI (Useful Daylight Illuminance)**<sup>17</sup>, indicateur caractérisant le pourcentage du temps d'occupation (pour un planning 8h-18h) pour lequel l'éclairage naturel est compris entre 100 lux et 3000 lux. UDI-down et UDI-Up correspondent respectivement au pourcentage du temps d'occupation pour lequel l'éclairage est en-dessous ou au-dessus de ces bornes. Les critères suivants sont calculés pour l'analyse :

- UDI 50% : pourcentage de la surface pour laquelle UDI > 50%<sup>18</sup>
- UDI moyen : moyenne des UDI de l'ensemble des points de la surface
- UDI Down 25% : pourcentage de la surface pour laquelle UDI Down > 25%
- UDI Down moyen : moyenne des UDI Down de l'ensemble des points de la surface
- UDI Up 10% : pourcentage de la surface pour laquelle UDI Up > 10%
- UDI Up moyen : moyenne des UDI Up de l'ensemble des points de la surface

Le calcul UDI est réalisé avec ou sans store. Une approche sans store est pertinente, puisqu'elle permet de quantifier le risque de surexposition, qui est un des objectifs principaux de l'UDI. Un UDI hors store favorisera les bâtiments avec protections solaires passives. L'indicateur est alors assimilable à une combinaison d'ALJ et ASE. L'analyse avec store permet quant à elle de prendre en compte tous les facteurs du bâtiment en utilisation. L'indicateur est alors assimilable au SDA, mais il considère en plus le risque de surexposition.

Pour le planning des stores pris en compte dans les calculs d'éclairage naturel, on se référera au paragraphe §4.9 de ce document.

*NB : Le document de synthèse qui illustre les messages-clés des études privilégie les résultats de l'indicateur sDA par rapport aux autres indicateurs de confort visuel. Cet indicateur rend compte en effet de l'impact de l'usage des stores sur les indicateurs de qualité environnementale et est par conséquent plus représentatif du fonctionnement du bâtiment.*

---

<sup>17</sup> Défini par deux chercheurs, A.Nabil et J.Mardaljevic, dans un article de recherche « Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings » publié en mars 2005. Cette approche propose de considérer une plage de valeurs considérées 'utiles' sur un plan de travail, ne générant pas d'inconfort (ni trop basses, ni trop hautes).

<sup>18</sup> Cette définition est celle proposée par le New Buildings Institute.

### 3.3. ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)

#### 3.3.1. Préambule

L'évaluation comparative de l'impact sur le réchauffement climatique des différentes solutions constructives de façades est établie selon la méthodologie de calcul ACV de l'approche réglementaire française RE2020<sup>19</sup>. L'étude se limite à l'évaluation des façades (parois verticales) – hors prestations communément imputées au lot gros-œuvre (voiles béton dans le cas du mode constructif T0 – châssis dans le voile).

L'impact carbone des produits de constructions est mis en parallèle avec un indicateur carbone lié à l'impact des consommations énergétiques du bâtiment obtenu par la SED et par la RE2020.

#### 3.3.2. Données environnementales des produits de construction

##### 3.3.2.1. Vitrage

Les données environnementales pour les produits verriers de Saint-Gobain seront issues des FDES disponibles sur la base INIES. A noter que ces FDES sont valables pour des doubles et triples vitrages, elles se décomposent selon deux caractéristiques principales :

- L'épaisseur de verre (en mm) : chaque FDES a un domaine de validité de 2 mm,
- La nature feuilleté ou bi-feuilleté des vitrages.

La donnée environnementale ne se distingue pas en fonction du type ou de la référence de couche de vitrage. En effet, les vitrages ECLAZ, COOL-LITE XTREME, COOL-LITE SKN sont décrits par les mêmes FDES. En l'occurrence et compte-tenu des épaisseurs de vitrages prises en compte, l'étude utilise la FDES (5-573:2021) :

*« Double vitrage de sécurité avec une face en verre feuilleté, à isolation thermique renforcée avec ou sans protection solaire (sans isolation acoustique renforcée : CLIMAPLUS PROTECT / avec isolation acoustique renforcée : CLIMAPLUS PROTECT SILENCE), composition de référence 44.2 (16 Argon 90%) 6, Epaisseur totale de verre de 14 mm à 15 mm, avec une face en verre feuilleté dont la composition peut être 22.x, 33.x, 44.x, 55.x, 64.x, 66.x, avec x allant de 1 à 4 feuilles de PVB PLANITHERM, ECLAZ, PLANISTAR SUN, COOL-LITE SKN, COOL-LITE XTREME, Espaceur : SWISSPACER, en aluminium ou en polypropylène de 10 à 22 mm ».*

---

<sup>19</sup> NB : Les résultats obtenus pour l'impact des produits de construction ne sauraient être utilisés dans le cadre d'un calcul complet RE2020 dans la mesure où certaines données ne sont pas issues de FDES. En effet, l'étude privilégie une approche d'aide à la conception et précise certaines données par des interpolations ou le recours à des bases de données européennes alternatives, en l'absence de données pertinentes sur la base INIES.

### 3.3.2.2. Menuiserie

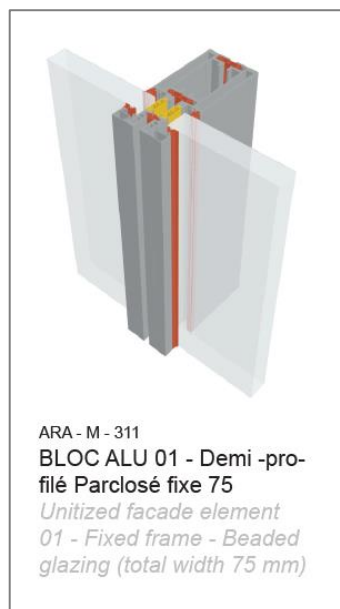
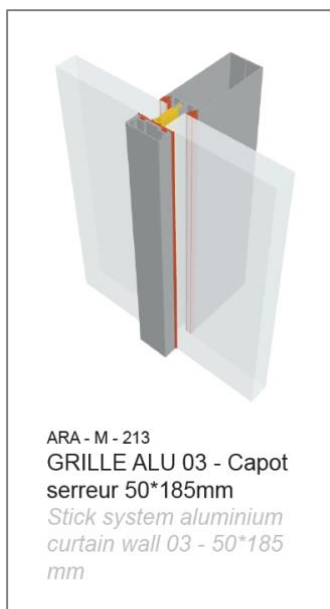
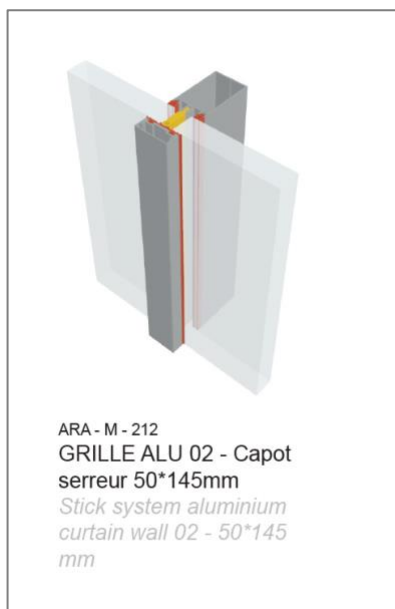
Les menuiseries utilisées pour les différentes configurations sont basées sur la bibliothèque de menuiserie d'Arcora inspirée de gamme de menuiserie courante du marché actuelle.

Les menuiseries ci-dessous sont notamment prises en compte :

Menuiserie des châssis (y compris profilés d'encadrement, de précadre et de bavette ainsi que les membranes et joints d'étanchéité) :



Mur-rideaux (y compris pièces d'assemblage et les sabots de fixation au gros-œuvre).



### 3.3.2.3. Isolant

L'isolant mis en œuvre dans les différentes configurations est une laine de verre de 18 cm avec une conductivité thermique de 0,032 W/K.m. La FDES retenue est la FDES du produit Isover « Isofacade 32R 180 mm » (id: 29521).

#### 3.3.2.4. Bardage

Le bardage des parties opaques des différentes configurations est composé d'une tôle aluminium, la FDES retenue pour ce composant est la FDES « Feuille d'aluminium formé à froid » d'Aluminium Deutschland (id: 27801).

#### 3.3.2.5. Protection solaire mobiles

Les différentes protections solaires mobiles telle que présentées dans le paragraphe §4.7 seront modélisées conformément aux données du configurateur DE-Baie les données saisies pour les différentes configurations sont :

Type	Surface de la baie
Store toile intérieur motorisé – avec coffre – sans guidage	$1 \text{ m}^2 \leq S < 2,72 \text{ m}^2$
	$2,72 \text{ m}^2 \leq S < 4 \text{ m}^2$
Store toile extérieur motorisé – avec coffre – coulisses de guidage	$1 \text{ m}^2 \leq S < 2,72 \text{ m}^2$
	$2,72 \text{ m}^2 \leq S < 4 \text{ m}^2$

#### 3.3.2.6. Modénatures et protections solaires fixes

##### Brise-soleils verticaux

Les lames de brise-soleil verticaux sont modélisées comme des feuilles d'aluminium thermolaquées et pliées de profondeur 400 mm par 50 mm de largeur. Cette configuration est décrite par la FDES n° 30883 « Tôles en aluminium pliées et laquées MESIMA - Habillage de finition de façade. Bandeaux et façonnés prélaqués ».

##### Balcon - Casquette

Les balcons sont modélisés en prenant en compte les composants suivants :

- Une dalle de balcon en béton armé (BALCON BA ép 0,2 m C25/30 XC4/XF1 CEM II/A – SNBPE)
- Un garde-corps acier remplissage tubes (FDES « garde-corps acier remplissage tubes » de l'Union des Métalliers / Fédération Française du Bâtiment)
- Un rupteur de pont thermique (« RUPTEURS THERMIQUES RUTHERMA® » des établissements Schock)

### 3.3.3. Méthode de calcul

Le calcul d'impact carbone est réalisé en calcul d'impact dynamique sur le réchauffement climatique en considérant une durée de vie de 50 ans et en prenant en compte les renouvellements des matériaux. L'unité Fonctionnelle sera  $1\text{m}^2$  de façade. Les niveaux d'isolation thermique (Umoyen ou Ucw) varient suivant les configurations.

Le calcul des quantitatifs ainsi que l'affectation des coefficients d'impact dynamique au sens de la RE2020 seront réalisés par les outils spécifiques d'Arcora, notamment le code source du configurateur [Ecale.io](http://Ecale.io) disponible en libre accès en ligne.

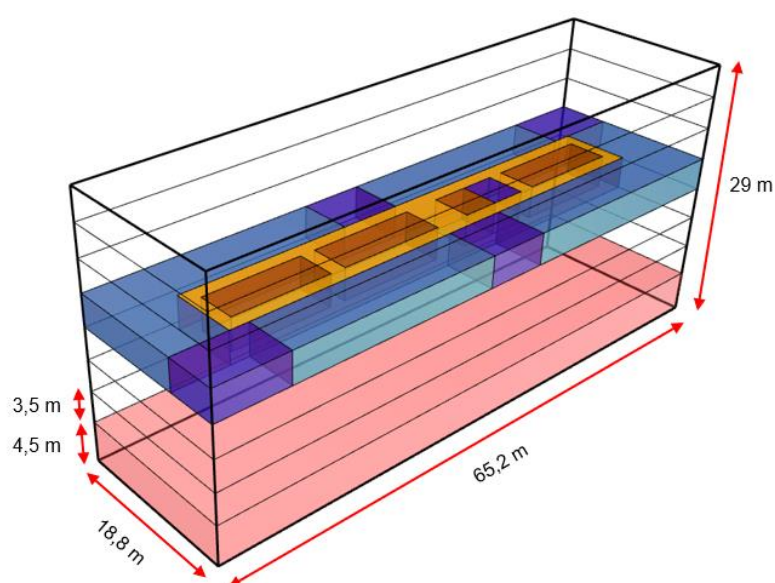
## 4. HYPOTHÈSES

### 4.1. BÂTIMENT MODÉLISÉ

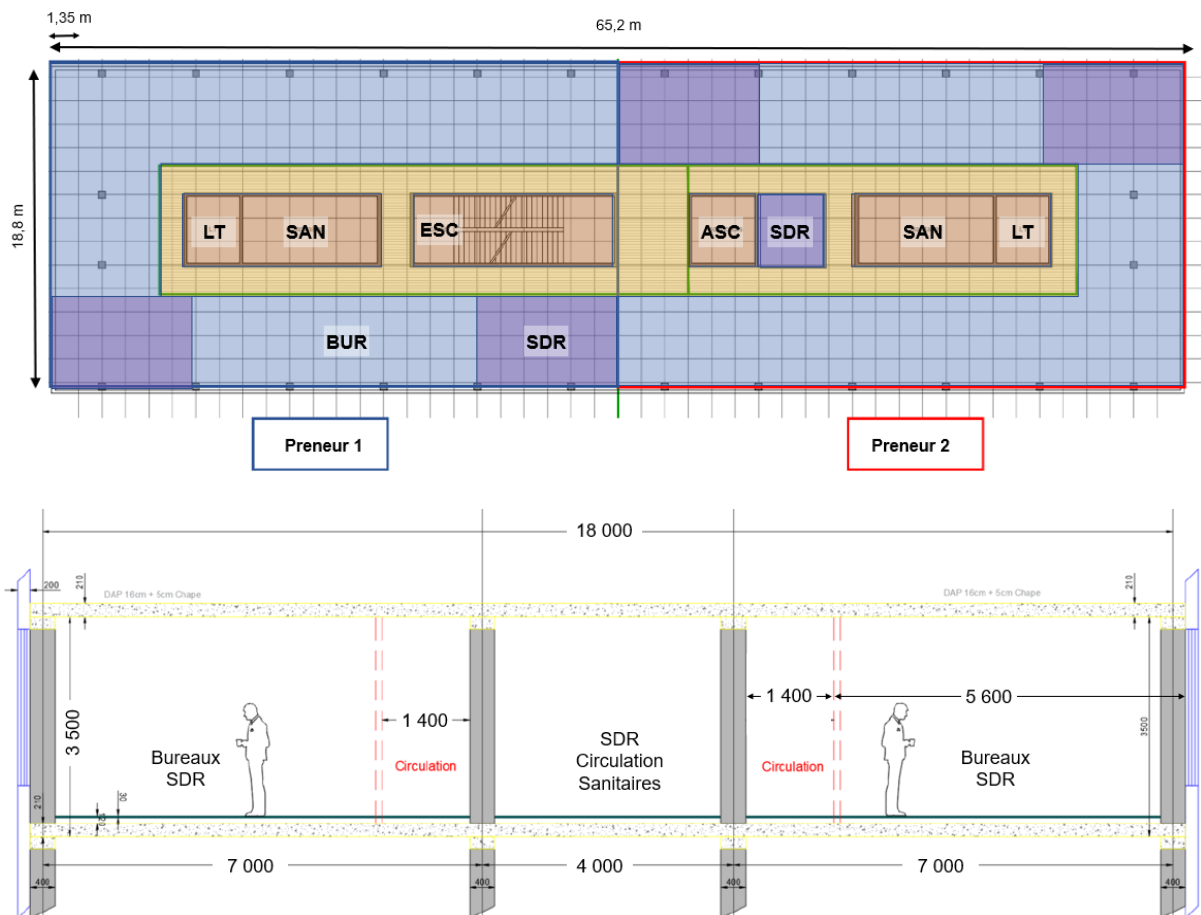
Le scénario de forme bâtie est un bâtiment linéaire de 8 niveaux (R+7, dernier plancher en dessous de 28 m) et d'une surface utile de bureaux d'environ 6 000 m<sup>2</sup>. Les 4 façades sont orientées selon les 4 points cardinaux.

La largeur du plateau, le positionnement des circulations horizontales et verticales, l'emplacement et la dimension des noyaux techniques suivent les standards du marché tertiaire en France pour un bâtiment de cette morphologie.

#### 4.1.1. Volumétrie du modèle et représentation des zones fonctionnelles



- Socle : Espace tampon chauffé et climatisé  
Condition aux limites avec les bureaux : adiabatique
- Bureaux
- Salles de réunion
- Circulations horizontales
- Autres (circulations verticales, LT, Gaines, Sanitaires)



### Bâtiment à usage de bureaux, classé Code du Travail

R+7 : Socle (4,5 m) + 7 niveaux (3,5 m), hauteur totale : 29 m

Surface brute totale : 9 806 m<sup>2</sup> / Surface Utile Nette (SUN) Bureaux + SdR (hors RDC) : 5 960 m<sup>2</sup>

SDP (estimation) : 8 700 m<sup>2</sup> / Surface Utile Brute (SUB) = SRT = Sref = 7 155 m<sup>2</sup> (hors RDC)

Répartition bureaux / SdR : 80% / 20%

Hauteur d'étage : 3,5 m / Hauteur sous plafond : 2,7 m

Prise en compte du socle : espace tampon, en condition adiabatique avec le reste de l'édifice

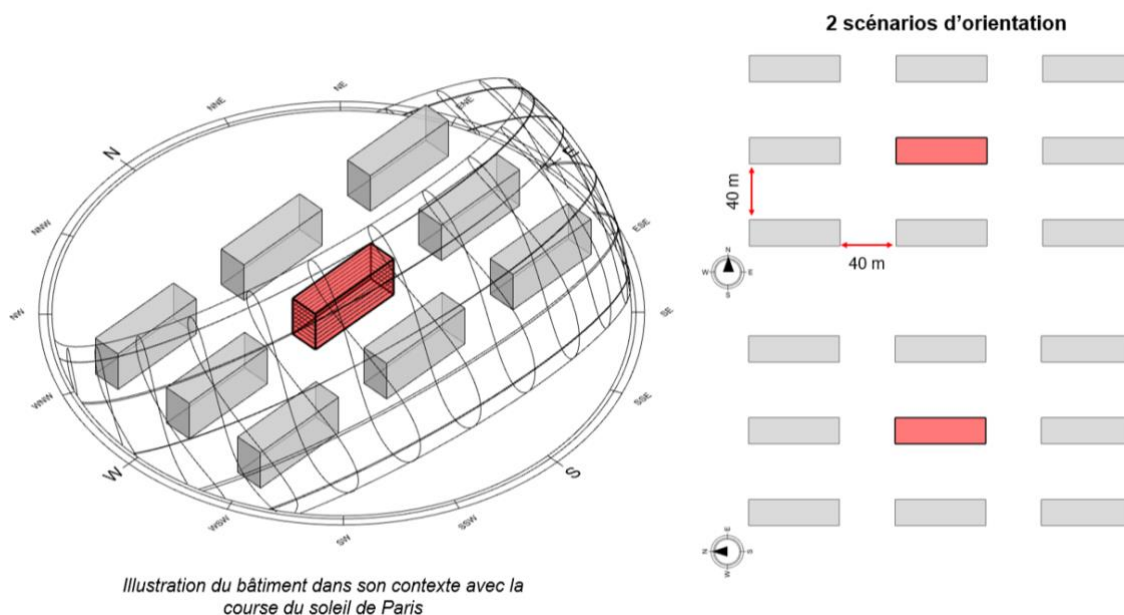
### Analyse morphologique

Volume : 35 547 m<sup>3</sup> / Surface d'enveloppe : 7 320 m<sup>2</sup> / Compacité volumique : 0,2 m<sup>-1</sup>

Surface de façades : 4 872 m<sup>2</sup> / Compacité des façades en rapport à la SDP : 0,56 (estimation)

## 4.2. CONTEXTE, MASQUES PROCHES ET ORIENTATION

Le contexte est fixé pour tous les scénarios. Des bâtiments de même gabarit entourent le bâtiment modélisé avec une largeur de voirie de 40 m<sup>20</sup>. Ils constituent des masques solaires pour les modélisations énergétiques et d'éclairage naturel.



## 4.3. LOCALISATION ET FICHIER CLIMATIQUE DU BÂTIMENT D'ÉTUDE

Scénarios de localisation :

- Paris, France : station météorologique de Paris Orly, Lat : 48.72 / Lon : 2.38 / elev : 90
- Marseille, France : aéroport Marseille Provence, Lat : 43.44 / Lon : 5.22 / elev : 32

Scénarios climatiques pour tous les calculs à l'exception des calculs RE2020 :

- Année météorologique type sur la période 2000-2019 – source : meteonorm0F21
- Projection climatique à 2050 selon scénario GIEC RCP 8,5 – source : meteonorm

Données climatiques pour le calcul RE2020 : données réglementaires pour les deux localités définies ci-dessus situées dans les zones géographiques de référence, H1a pour Paris, H3 pour Marseille.

<sup>20</sup> Ce contexte correspond à un coefficient d'emprise au sol de 0,2 et une densité bâtie de 1,4. Ce modèle s'apparente ainsi à la morphologie d'opérations d'urbanisme à usage mixte récentes situées en zone urbaine modérément dense (proche banlieue parisienne par exemple).

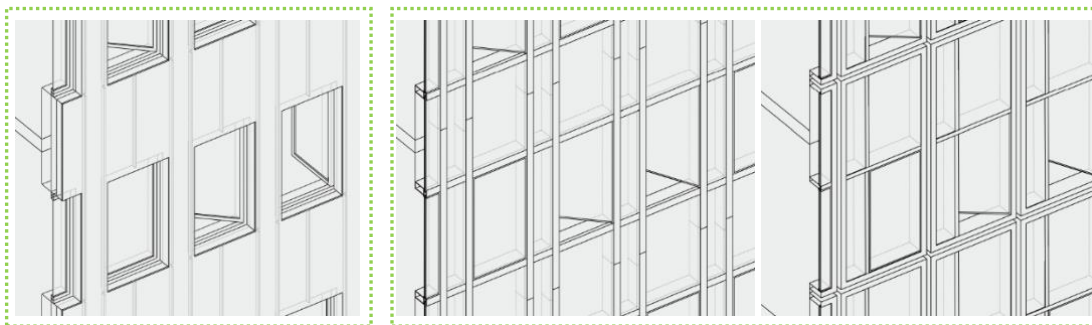
<sup>21</sup> Meteonorm v8, logiciel de référence contenant une base très complète de données météorologiques et des algorithmes permettant de créer, à partir des valeurs mesurées, des fichiers météo de n'importe quel endroit sur le globe (source : CSTB)

#### 4.4. HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / TYPOLOGIES CONSTRUCTIVES

Les scénarios sont appliqués à l'ensemble des façades du bâtiment modélisé sans distinction selon les orientations.

Deux grandes familles de façades sont évaluées : d'une part les façades de type châssis ou menuiseries extérieures intégrées à un voile béton, et d'autre part les façades légères de type mur rideau autoportant sur un étage rapportées sur une structure primaire poteau-poutre.

La deuxième famille est décomposée en deux sous-familles : mur rideau grille et mur rideau cadre.



##### 4.4.1.T0 - Châssis dans voile percé

La façade modélisée est constituée :

- pour les parties vitrées : menuiserie en aluminium à rupture de pont thermique, vitrage selon scénario, 50% ouvrant à la française, pose en applique extérieure au moyen d'un précadre périphérique, jonction entre la menuiserie et le précadre au moyen d'un joint mousse et bavette en aluminium côté extérieur en recouvrement de l'appui.
- pour les parties opaques : de l'intérieur vers l'extérieur, voile en béton armé d'épaisseur 20 cm, isolation de type laine minérale  $\lambda = 0,032 \text{ W/m}^2\text{K}$  épaisseur 18 cm, ossature secondaire en aluminium support de parement extérieur de type bardage ventilé en cassettes aluminium. Retournement du parement au droit des percements de la façade en voussure et en tableau.

##### 4.4.2.T1 - Façade mur rideau grille

La façade est constituée d'une ossature montants-traverses en profilés tubulaires en aluminium extrudé de dimension 50 x 200 mm, espacés selon une trame de 1,35 m et autoportant sur la hauteur d'un étage. Les remplissages sont parcosés au moyen de serreurs habillés par des capots en aluminium de 50 x 25 mm. Les remplissages sont :

- Pour les parties vitrées : vitrage selon scénario. 1 trame sur deux est équipée d'un ouvrant à la française (menuiserie en aluminium à rupture de pont thermique)
- Pour les parties opaques : tôle aluminium en parement extérieur, isolation de type laine minérale  $\lambda = 0,032 \text{ W/m}^2\text{K}$  épaisseur 18 cm, caisson aluminium étanché sur les montants et les traverses faisant finition côté intérieur.

#### 4.4.3.T2 - Façade mur rideau cadre

La façade de type mur rideau cadre reprend les mêmes principes géométriques et les caractéristiques des remplissages de la façade mur rideau grille. L'ossature est constituée de profilés spécifiques au droit du périmètre extérieur du cadre (1,35 x 3,50) de type double-profil de largeur totale 90 mm. Les double-profilés sont connectés de manière étanche au moyen de joints EPDM.

#### 4.4.4.T3 - Façade mur rideau grille à isolation renforcée

La typologie T3 correspond au mur rideau grille T1 avec des menuiseries aux performances renforcées par des rupteurs thermiques plus performants et l'ajout de blocs isolants. La valeur  $U_f$  des montants et traverses de la grille est ainsi optimisée à 1,5 W/m<sup>2</sup>K. De même, la conductance des châssis ouvrants intégrés à la grille est de 1,8 W/m<sup>2</sup>K contre 2,4 environ pour une menuiserie aluminium plus classique.

#### 4.4.5. Performance thermique des modes constructifs T0, T1, T2, T3

Les valeurs de performance énergétique sont calculées pour chaque mode constructif sur la base du ratio opaque-vitré et de la performance du remplissage vitré.

Par exemple, sur la base d'un remplissage vitré de type double-vitrage avec  $U_g = 1,0$  W/m<sup>2</sup>K, pour un ratio opaque-vitré W60 (voir §4.6), nous obtenons les valeurs  $U_{moy}$  ou  $U_{cw}$  suivantes :

- $U_{moy}$  (T0) = 1,09 W/m<sup>2</sup>K
- $U_{cw}$  (T1) = 1,20 W/m<sup>2</sup>K
- $U_{cw}$  (T2) = 1,30 W/m<sup>2</sup>K
- $U_{cw}$  (T3) = 1,07 W/m<sup>2</sup>K

#### 4.5. HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / RATIO OPAQUE – VITRE

Pour chacune des typologies constructives, trois options de ratio opaque-vitré sont prévues, approximativement 40%, 60% et 80%. La géométrie des percements a un impact sur les résultats de l'étude, en particulier pour le calcul des indicateurs de confort visuel et de carbone.

Ces options sont donc représentées par les élévations ci-dessous :



*Illustration des géométries de façade modélisées*

**WWR (Window to Wall ratio) :** C'est le ratio opaque-vitré, c'est-à-dire le pourcentage de la surface de baies (y compris menuiseries) par rapport à la surface totale de la façade.

**Taux d'ouverture :** Il s'agit du pourcentage d'ouvrants sur la surface de baies. Ce taux fait l'objet de l'art. 25 de l'Arrêté du 4 août 2021 selon les termes suivants : « Sauf si les règles d'hygiène ou de sécurité l'interdisent, les baies d'un même local autre qu'à occupation passagère s'ouvrent sur au moins 30 % de leur surface totale. Cette limite est ramenée à 10 % dans le cas des locaux pour lesquels la différence d'altitude entre le point bas de son ouverture la plus basse et le point haut de son ouverture la plus haute est égale ou supérieure à 4 m. »

**Porosité :** Il s'agit de la part d'ouvrants par rapport à la surface totale de façades.

Dans le cadre de la présente étude, les scénarios de ventilation naturelle ne sont pas prévus, les ouvrants sont considérés comme fermés. C'est pourquoi, les ouvrants n'impactent les résultats de modélisation qu'à travers les variations du ratio de clair de vitrage et de la performance thermique des menuiseries qu'ils entraînent.

Ces trois scénarios de calepinage de la façade sont choisis selon les règles couramment appliquées dans les projets de bureaux neufs en France :

- Une trame de 1,35 m de large facilitant une cloisonnabilité en unités de bureaux individuels de 2,7 m de large, en bureaux bench pour 4 personnes sur 4 trames soit 5,4 m, etc.
- Un alignement de la traverse haute de la baie vitrée avec la hauteur du faux-plafond (2,7 m) ;
- Une allège pleine basse (0,45 m), l'ajout de zones opaques sous forme de trumeau étant privilégié pour des raisons architecturales ;
- Une zone en allège vitrée feuilleté avec une traverse à 1 m à fonction de garde-corps au droit de l'ouvrant.

Ces règles ne sont pas des impératifs à suivre et ne sont pas la conséquence d'une norme ou d'une réglementation, il s'agit plutôt de tendances observées.

#### 4.6. HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / VITRAGES

L'étude prévoit l'analyse des scénarios suivants :

- Vitrages à contrôle solaire de type XT 70-33, XT 61-29, SKN 183, XT 50-22 II
- Vitrages clairs dits Low-e (bas-émissifs) ou à Isolation Thermique Renforcée (ITR) de type ECLAZ LUMI

Les références sont des doubles vitrages de marque Saint-Gobain Glass, à couche faiblement émissive pour ECLAZ LUMI, et de contrôle solaire pour les gammes COOL-LITE XTREME (XT) et COOL-LITE SKN. Composition de type 44.2/16 (Ar)/6, vitrage feuilleté extérieur avec PVB standard, espaceur de type warm-edge. Ce dimensionnement des épaisseurs de verre est standard et compatible avec les scénarios présentés. Il offre une performance acoustique équivalente  $R_w(C;Ctr) = 39 (-2;-6)$  dB. Tout substrat est de type Planiclear.

#### 4.7. HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / PROTECTIONS SOLAIRES MOBILES

Les systèmes mobiles de protection solaire sont prévus motorisés et asservis à une commande de GTB dans tous les scénarios. Le principe de commande est précisé dans les hypothèses de modélisation de calcul énergétique, de confort visuel et de confort thermique. Les hypothèses sous-jacentes à l'analyse carbone sont détaillées dans le paragraphe §3.3.2.5.

Quatre systèmes sont envisagés en combinaison avec les vitrages :

- Store toile intérieur à haute réflexion solaire et faible émissivité, Sv 3%<sup>22</sup> ;
- Store toile extérieur de teinte gris-foncé, Sv 4%<sup>23</sup> ;

Le choix d'une protection solaire mobile est guidé par la recherche de la performance énergétique mais aussi du confort visuel des usagers (utilisation de la lumière naturelle, contrôle de

---

<sup>22</sup> Mermet M-Screen Ultimetal® 202

<sup>23</sup> Mermet External Screen Classic Satiné 5500 - 3001 Charcoal – 4%

l'éblouissement, intimité, contact avec l'extérieur ou accès aux vues, rendu des couleurs). La caractérisation des performances de confort thermique et lumineux et une méthode de classification des produits sont encadrées par la norme EN 14501-2021. La certification HQE attribuée par ailleurs des points selon le type de protection solaire et le risque d'éblouissement.

Le classement des systèmes envisagés vis-à-vis du risque d'éblouissement est reporté dans le tableau de synthèse des résultats. Enfin, d'autres critères comme la pérennité, le coût et des considérations esthétiques (intégration architecturale) ont un impact sur le choix du produit. Ces critères ne font pas l'objet de la présente étude.

#### 4.8. HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / PERFORMANCE DE L'ENSEMBLE VITRAGE + STORE

Le tableau et le graphe ci-dessous rassemblent les performances des vitrages et protections solaires mobiles retenus pour l'étude. Ces valeurs sont obtenues par un calcul spectral (combinaison spectrale des caractéristiques de transmission et de réflexion des vitrages et store) selon la norme XP P50-777.

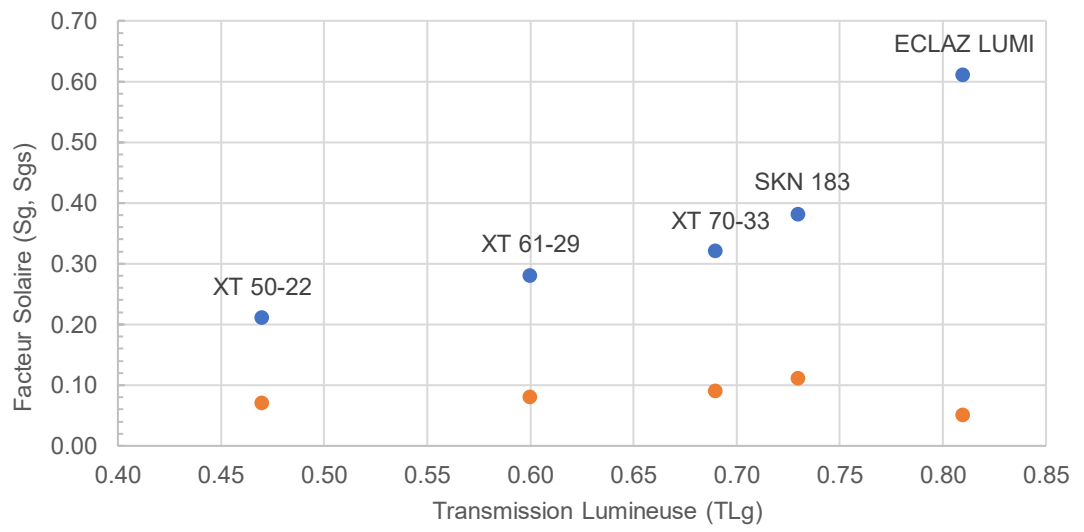
Il s'agit de caractéristiques à incidence normale et de valeurs globales (CLO + GLO + Réémission de chaleur de la cavité ventilée vers l'intérieur dans le cas d'une protection solaire intérieure).

La prise en compte de la dépendance angulaire et de la combinaison spectrale dépend du modèle de calcul. Elle est différente entre le modèle réglementaire RE2020 et le modèle SED qui mobilise l'outil EnergyPlus (se référer au §3.2).

À noter donc que ces valeurs « statiques » sont en réalité actualisées par le logiciel de calcul au pas de temps de calcul (horaire ou infra-horaire) selon les conditions extérieures (selon l'angle d'incidence du rayonnement solaire direct et de la composante réfléchiée par l'environnement proche, le coefficient d'échange thermique superficiel entre les ambiances intérieures et extérieures et les faces de la paroi par phénomène de convection et par rayonnement). Ces indicateurs n'en sont pas moins pertinents pour comparer les performances énergétiques des différents scénarios, en cela qu'ils font souvent référence pour les études et la prescription en phase de conception.

Couche de vitrage	Protection solaire mobile	Ug	TLg	Sg	Ugs	TLgs	Sgs
XT 70-33	toile_int_blanc_metal	1,0	0,69	0,32	0,8	0,03	0,09
XT 61-29	toile_int_blanc_metal	1,0	0,60	0,28	0,8	0,03	0,08
XT 50-22	toile_int_blanc_metal	1,0	0,47	0,21	0,8	0,02	0,07
SKN 183	toile_int_blanc_metal	1,0	0,73	0,38	0,8	0,04	0,11
ECLAZ LUMI	toile_ext_gris	1,1	0,81	0,61	1,0	0,04	0,05

*Performances spectrophotométriques  
Vitrage et store Sg et Sgs en fonction de la transmission lumineuse TLg*



## 4.9. HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / SCENARIOS DE GESTION DES PROTECTIONS SOLAIRES MOBILES

Lorsque l'on construit un modèle énergétique en phase conception afin de calculer les consommations énergétiques futures et/ou d'évaluer le confort thermique ou visuel des usagers, dans le cadre d'une approche SED performancielle, pour un calcul réglementaire RE2020 ou encore dans le cadre d'un calcul d'éclairage naturel, les algorithmes de gestion des stores doivent être définis.

Si les protections solaires mobiles sont désormais très majoritairement motorisés dans les bâtiments de bureaux, leur gestion n'est pas nécessairement automatisée. Dans ces cas, l'utilisateur opère manuellement la protection, et lorsque les bureaux sont climatisés, il le fait le plus souvent pour des raisons de confort visuel (réduction des conditions d'éblouissement ou modulation de l'éclairage naturel). Il n'est pas rare que la commande des stores soit gérée par le système de Gestion Technique du Bâtiment (GTB), dans une logique d'optimisation des consommations. Il est à noter que la prise en compte d'un algorithme de gestion des stores dans une modélisation énergétique n'est pas conditionnée à la présence d'un contrôle automatisé des stores par GTB dans le bâtiment réel, projet ou existant. En effet, l'utilisation d'un tel algorithme peut être aussi simplement un moyen de modéliser le comportement probable des occupants futurs.

### 4.9.1. Calcul RE2020

Le mode de gestion des protections solaires mobiles est définie dans la méthode Th-BCE (Arrêté du 4 aout 2021 ANNEXE III), à travers le §5.9 C\_BAT\_Gestion\_protections\_mobiles.

Nous prévoyons dans le cadre de cette étude :

- une seule protection mobile PM1, disposée en intérieur pour des stores enroulables et de manière extérieure ou intégrée pour des vénitiens ;
- des protections solaires mobiles motorisées pour tous nos scénarios d'étude ;
- une gestion automatique des protections solaires (cas courant en usage bureaux et hypothèse cohérente avec les calculs en simulation énergétique dynamique) ;

Pour une gestion automatique, les ratios de fermeture dépendent du critère Jour/nuit, de l'éclairage global incident, de la température opérative moyenne, de l'occupation du groupe, de la vitesse du vent et de la saison. Le ratio de fermeture suit des abaques conventionnels et intègre une part de temps où l'utilisateur déroge aux règles de gestion automatique. Certains seuils d'utilisation ne sont pas définis de manière conventionnelle mais sont retenus de manière courante par les concepteurs<sup>24</sup>. Les paramètres suivants ont été pris en compte dans les calculs RE2020 de cette étude :

- Top\_h-1\_limh\_auto = 25°C, Top\_h-1\_limb\_auto = 24°C
- Eclim\_auto = 20 000 lux
- Vventlim = 10 m/s

---

<sup>24</sup> Il est à noter que certains logiciels de calcul ne permettent pas de modifier ces valeurs.

#### 4.9.2. Calcul SED

Dans le cadre d'un calcul SED, la plupart des logiciels de modélisation propose une gamme variée d'algorithmes prédéfinis pour contrôler, avec une précision pouvant aller jusqu'au pas de temps de calcul, l'activation de la protection solaire : contrôle selon une consigne d'irradiation en  $W/m^2$  sur les façades ou sur un plan horizontal, contrôle selon un planning horaire, selon la température intérieure ou extérieure, selon la vitesse de vent du fichier de données climatiques, ou une combinaison de plusieurs conditions.

EnergyPlus offre de nombreuses possibilités de gestion des protections solaires<sup>25</sup>.

Dans cette étude paramétrique, par défaut, la plupart des simulations a été réalisée en considérant que les protections solaires s'activent (ouverts ou fermés sans position intermédiaire) dès lors que l'irradiation incidente en façade dépasse le seuil de  $200 W/m^2$ . Le capteur est situé localement au centre de chaque baie et l'activation dépend ainsi de la présence et du type de modénatures, de l'orientation de la façade, des ombres portées générées par le contexte et du fichier climatique.

Par ailleurs, une analyse de sensibilité de l'impact du mode de gestion des protections solaires sur les consommations énergétiques et le confort a été conduite.

Les scénarios suivants ont été évalués :

1. Base : Activation dès lors que l'irradiation incidente dépasse le seuil de  $200 W/m^2$ .
2. Modification du seuil d'activation à  $150 W/m^2$
3. Modification du seuil d'activation à  $175 W/m^2$
4. Modification du seuil d'activation à  $225 W/m^2$
5. Modification du seuil d'activation à  $250 W/m^2$
6. Modification du seuil d'activation à  $275 W/m^2$
7. Modification du seuil d'activation à  $300 W/m^2$
8. Modification du seuil d'activation à  $350 W/m^2$
9. Modification du seuil d'activation à  $400 W/m^2$
10. Base + désactivation si vitesse vent  $> 50 km/h$
11. Base + désactivation aléatoire sur 15% du temps d'occupation (forçage utilisateur)
12. Seuil de  $550 W/m^2$  - mesure de l'irradiation sur plan horizontal en toiture
13. Seuil de  $700 W/m^2$  - mesure de l'irradiation sur plan horizontal en toiture

---

<sup>25</sup> Les algorithmes de gestion des stores déjà pré-implémentés sont décrits dans le manuel Input Output Reference, 2022, consultable en ligne : <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/22-2/input-output-reference/group-thermal-zone-description-geometry.html#field-shading-control-type>. D'autres modalités de gestion peuvent être implémentées par l'intermédiaire de script EMS, qui permettent de personnaliser le fonctionnement du moteur de calcul.

Les résultats présentés en synthèse retiennent en particulier les seuils 200 W/m<sup>2</sup> et 400 W/m<sup>2</sup>. Ces seuils ont été retenus car, en l'absence de publication de référence établissant un seuil représentatif des pratiques, ils correspondent :

- à un usage intensif de la protection solaire dans le premier cas (200 W/m<sup>2</sup>), qui d'après les retours d'expérience est néanmoins couramment pris en compte en phase de conception par les maîtres d'œuvre et bureaux d'études thermiques. En effet, si l'on considère une façade exposée au Sud à Paris, sans modénature, le taux de fermeture des protections solaires qui en résulte s'élève à 35% du temps annuel d'occupation. Il est supérieur à 40% à Marseille pour ce même seuil d'activation. Dans ces conditions, considérer un seuil d'activation moins élevé semble irréaliste au regard de l'usage et incompatible avec le confort visuel des usagers (la protection solaire est utilisée plus de la moitié du temps d'occupation).
- à un usage modéré dans le second cas (400 W/m<sup>2</sup>), conduisant à une utilisation de la protection solaire sur 16% du temps annuel d'occupation à Paris pour une façade exposée au Sud et 27% à Marseille. Ce seuil d'activation correspond par ailleurs à une valeur implémentée sur quelques analyses fonctionnelles de GTB dans le contexte d'opérations de bureaux récentes en région parisienne.

#### 4.9.3. Calcul d'éclairement naturel

Pour les calculs de confort visuel, l'activation des protections solaires mobiles dépend de l'indicateur :

- L'indicateur ALJ (Autonomie en Lumière Jour) est calculé avec des protections solaires mobiles relevées. L'objectif est de caractériser la quantité d'éclairement naturel comme un potentiel du bâtiment hors considération d'usage des stores.
- L'indicateur SDA est calculé avec les stores baissés lorsqu'au moins 2% de la surface reçoit une illuminance directe (hors réflexion, hors ensoleillement diffus) supérieure à 1000lux (intitulé planning LEED et correspondant à la méthode définie par IES LM-83-12). Cet indicateur est également calculé en appliquant le seuil d'activation selon calcul SED (voir §4.9.2).
- L'indicateur ASE est calculé sans considérer les stores et permet d'identifier les espaces recevant trop de lumière directe du soleil, entraînant un risque de gêne visuelle (éblouissement).
- L'UDI (Useful Daylight Illuminance) a été calculé selon trois modalités de gestion : sans store, avec store selon le planning SED et selon le planning LEED.

#### 4.10. Hypothèses sur les façades / Performance thermique des menuiseries

Les valeurs de performance thermique des façades vitrées sont calculées avec les hypothèses suivantes :

- Espaceurs warm-edge Swisspacer  $\Psi_g = 0,06$  W/mK – valeur de transmission thermique linéique dans le cas de menuiseries en aluminium à rupteur de pont thermique ;
- Châssis aluminium à rupteur de pont thermique de gamme standard, Uf-fixe = 2,4 / Uf-OF = 2,6
- Capot serreur série 50 mm de gamme standard, Uf-fixe (montant) = 2,8 / Uf-fixe (traverse) = 2,3 / Uf-OF (ouvrant intégré) - dormant = 2,4 / Uf-OF (ouvrant intégré) - ouvrant = 2,6 / Pont thermique d'intégration  $\Psi_i = 0,11$  W/mK ;
- Menuiserie bloc cadre demi-profils VEP de conception standard, Uf-fixe (montant) = 3,0
- Une typologie T3, correspondant aux principes constructifs du mur rideau grille T1 avec des menuiseries aux performances renforcées, a également été étudiée sur certains scénarios. Cela correspond à l'intégration de rupteurs thermiques plus performants et l'ajout de blocs isolants. Les profils sont couramment désignés HI ou Haute Isolation par les fournisseurs. La valeur Uf des montants et traverses de la grille peut être optimisée à 1,5 W/m<sup>2</sup>K, et à 1,8 W/m<sup>2</sup>K pour les châssis ouvrants intégrés.
- Pont thermique linéique de précadre acier (appui, tableau, linteau), comptabilisé dans le cas de la pose en applique extérieure de la menuiserie (mode constructif : T0 - châssis dans voile béton),  $\Psi_p = 0,14$  W/mK

*NB : En vertu de l'art. 24 de l'Arrêté du 4 août 2021, pour les bâtiments neufs à usage de bureaux, et à l'exception des baies des locaux à occupation passagère, le facteur solaire doit respecter une exigence de moyen. Pour l'usage de bureaux, dans le cadre des deux scénarios de localisation choisis, Paris et Marseille, et dans l'hypothèse d'un niveau réglementaire d'exposition au bruit BR3, les baies verticales autres que nord doivent permettre d'atteindre un facteur solaire (store baissé) inférieur ou égal à 0,25.*

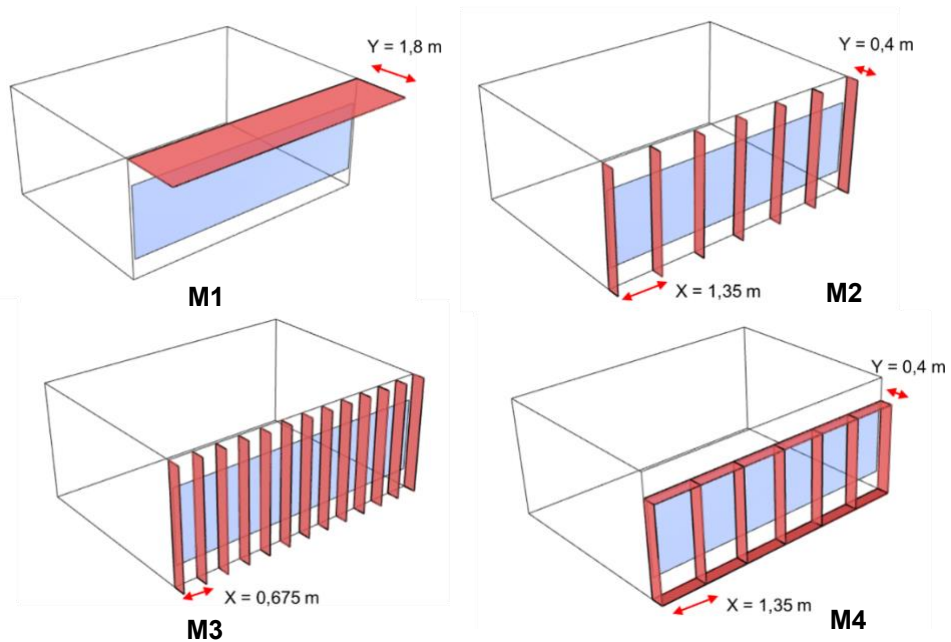
Tous les scénarios de calcul sont conformes à ces dispositions.

#### 4.11. HYPOTHÈSES SUR LES FAÇADES / MODÉNATURES ET BRISE-SOLEIL FIXES

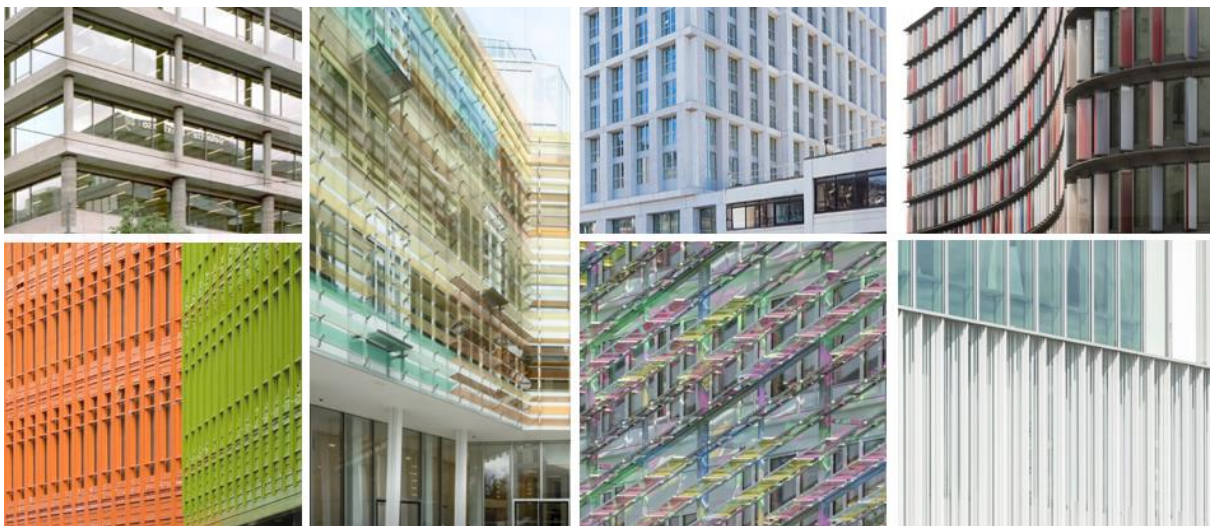
Cinq scénarios de modénatures seront testés dans le cadre de cette étude :

- M0 : Pas de modénature
- M1 : Casquette horizontale ou balcon au droit du nez de plancher de largeur 1,8 m
- M2 : Modénatures faisant lames brise-soleil verticales de profondeur 0,4 m, espacement 1,35 m
- M3 : Modénatures faisant lames brise-soleil verticales de profondeur 0,4 m, espacement 0,67 m
- M4 : Modénatures croisées de profondeur 0,4 m, trame verticale 1,35 m, trame horizontale 3,5 m

Quel que soit le scénario, elles sont modélisées comme des objets opaques avec une réflectance lumineuse de 0,4.



Même si les modèles proposés sont relativement récurrents dans nos retours d'expérience, le choix des modénatures et brise-soleil ne représentera pas l'infinie diversité des formes rencontrées dans l'architecture contemporaine :



## 4.12. HYPOTHÈSES GÉNÉRALES DU MODÈLE

### 4.12.1. Hypothèses spécifiques au modèle RE2020

Compte tenu du caractère « urbain » du bâtiment modélisé dans cette étude, nous considérerons le bâtiment exposé à une catégorie d'infrastructure terrestre intermédiaire de type catégorie 3, et l'ensemble des façades et de leurs baies en BR3. Par conséquent, la catégorie de contrainte extérieure (paramètre en lien avec l'indicateur DH) est de niveau 1 pour le modèle du bâtiment situé en zone climatique H1a (bureaux climatisés, sans règles d'hygiène ou de sécurité spécifiques, hors IGH, en zone de bruit BR3) et de niveau 2 pour la zone climatique H3.

Des hypothèses standards sont prises en compte pour le calcul des consommations associées aux déplacements internes des occupants (ascenseurs ou escalators), ainsi que les consommations associées à l'éclairage et la ventilation des parties communes et des éventuels parkings.

Le bâtiment modélisé dans cette étude ne comporte pas de parking, ni de sous-sol.

Aux étages, dans le cas du bâtiment modélisé dans cette étude, seront considérés comme « espaces tampons » les locaux techniques (LT), gaines techniques, gaine d'ascenseur, cage d'escalier (non chauffée).

### 4.12.2. Performances énergétiques de l'enveloppe

La performance des parois opaques de l'enveloppe est calculée sur la base des hypothèses suivantes.

#### 4.12.2.1. Murs opaques en façade

Les parties opaques de la façade dans le cas de la typologie T0 sont modélisés avec les matériaux selon le tableau suivant<sup>26</sup> :

Description de la couche	Épaisseur [mm]	Conductivité $\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Mur béton - 200 mm	200	2,000	0,10
Isolant en laine minérale GR32	180	0,032	5,63
Lame d'air ventilée	30		non compté
Bardage extérieur en aluminium thermolaquée (tôle 2 mm)	20		non compté
Résistances superficielles		Rsi	0,13
		Rse	0,04
<b>Résistance totale</b>			<b>5,90</b>
<b>Conductance - hors ponts thermiques spécifiques</b>		<b>Up [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0,17</b>
	<b>Densité [U/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Conductivité Xsi [W/K]</b>	<b>Xsi total [W/m<sup>2</sup>K]</b>
Ponts thermiques - chevilles de fixation de l'isolant	4	0,001	0,004
Ponts thermiques - fixation des ossatures de bardage	2	0,04	0,08
<b>Conductance - y compris ponts thermiques d'accroche</b>		<b>Up [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0,25</b>

<sup>26</sup> Le calcul présenté correspond à la valeur de conductance thermique. La capacité thermique massique ou chaleur spécifique, la densité volumique, l'émissivité, l'absorptivité, la rugosité sont également renseignées pour chaque matériau dans le modèle SED.

#### **4.12.2.2. Autres parois**

- Murs intérieurs sur locaux non chauffés : Béton d'épaisseur 210 mm + Isolant thermo acoustique de type isolation de type laine minérale, ou équivalent en épaisseur 100 mm,  $\lambda = 0,035 \text{ W/(m.K)}$  soit  $R = 2,89 \text{ m}^2.\text{K/W}$ .  $U_p = 0,33 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Plancher bas sur socle : Béton d'épaisseur 210 mm + Isolant thermo acoustique de type isolation de type Fibraroc, ou équivalent en épaisseur 150 mm,  $\lambda = 0,035 \text{ W/(m.K)}$  soit  $R = 4,28 \text{ m}^2.\text{K/W}$ .  $U_p = 0,22 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Toiture terrasse : Béton d'épaisseur 210 mm + Isolant sous étanchéité de type Efigreen Duo+ (deux couches croisées d'isolant rigide de type polyuréthane),  $\lambda = 0,022 \text{ W/(m.K)}$  soit  $R = 9,0 \text{ m}^2.\text{K/W}$ .  $U_p = 0,11 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Planchers intermédiaires (du haut vers le bas) : Dalles de faux-plancher et finition de 30 mm, vide technique de 120 mm, Béton 210 mm (DAP 160 mm et chape 50 mm), vide technique de 380 mm, isolation acoustique de type laine minérale 40 mm, faux-plafond en plaques de plâtre suspendues 20 mm.

#### **4.12.2.3. Perméabilité à l'air**

Perméabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment :  $Q_4 \leq 1,2 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$  sous 4 pascals.

#### 4.12.2.4. Ponts thermiques

Selon les modes constructifs des façades, il convient de considérer les ponts thermiques complémentaires suivants, dont les valeurs sont établies suivants les règles Th-BCE 2020 :

Nom	Psi (W/mK)	Schéma	Donnée
Dallage sur terre-plein Isolation en sous-face du socle ITE en façade	0,49 W/m.K		ep plancher = 23 cm -20 cm < z < 20 cm 0 cm < d < 20 cm
Plancher bas en béton plein isolé en sous-face, ITE	0,66 W/m.K		ep plancher = 23 cm em = 20 cm d > 30 cm
Plancher int. / mur extérieur ITE	0,07 W/m.K		ep plancher = 21 cm Ri > 3 m².K/W
Plancher haut / mur extérieur ITE en façade <i>Emballage de l'acrotère par retour d'isolant (au moins 4 cm d'isolant type laine minérale)</i>	0,26 W/m.K		ep plancher = 21 cm
Angle sortant entre deux murs ITE en façade	0,14 W/m.K		Ri > 3 m².K/W em = 20 cm
Refend vertical entre mur intérieur vertical et toiture horizontale en ITE	0,02 W/m.K		Ri > 4 m².K/W

### 4.12.3. Modélisation des systèmes d'approvisionnement énergétique

#### 4.12.3.1. Production de chaleur et de froid

Les besoins en chauffage et en froid, ainsi que ceux liés au pré-traitement de l'air neuf, du bâtiment modélisé dans l'étude, sont couverts par une sous-station raccordée à un réseau de chaleur.

La puissance de raccordement de la sous-station est dimensionnée pour l'intégralité des besoins.

Les caractéristiques suivantes sont prises en compte :

- Production de chaud : 85 g eq CO<sub>2</sub>/ kWh, Taux d'ENR de 65%
- Production de froid : 11 g eq CO<sub>2</sub>/ kWh, Taux d'ENR non considéré<sup>27</sup>

Ces caractéristiques sont des valeurs représentatives d'un réseau fictif moyen, commun aux deux zones climatiques de l'étude, établies sur la base des données récoltées dans le cadre de l'enquête annuelle FEDENE et SNCU<sup>28</sup>. Nous tenons compte par ailleurs des perspectives d'évolution de ces caractéristiques, en adéquation future avec la RE 2020, présentées dans une étude du CEREMA de 2022<sup>29</sup>.

#### 4.12.3.2. Production d'ECS

Dans la plupart des bâtiments de bureaux neufs construits à ce jour, compte tenu des besoins assez limités en eau chaude sanitaire (limité aux locaux sanitaires), la production d'ECS reste de type locale, traitée par des ballons électriques de stockage avec une production en mode nuit.

Chaque bloc sanitaire d'étage pour chaque preneur est supposé être équipé d'un ballon électrique de 50 litres, d'une puissance unitaire électrique de 1 kW, soit un total de 14 ballons sur le projet.

L'eau chaude est produite à 55°C.

La valeur des pertes thermiques des ballons est de type « justifiée », et correspond à 1.08 kWh/jr.

Les besoins unitaires hebdomadaire à 40°C réglementaire d'ECS en RE 2020 sont fixés de manière conventionnelle à 1.25 litres/m<sup>2</sup> SU pour l'ensemble de l'usage bureaux.

---

<sup>27</sup> Le rapport entre énergie primaire et énergie finale est conventionnellement de 1 pour les réseaux de froid en RE2020

<sup>28</sup> Enquête réseaux de chaleur et de froid, Rapport Global 2021, FEDENE. Enquête réalisée sur 833 réseaux de chaleur et 33 réseaux de froid.

<sup>29</sup> « Quelle place pour les réseaux de chaleur dans la RE2020 ? », CEREMA, 2022.

#### 4.12.4. Modélisation des systèmes de traitement thermique

Toutes les hypothèses ci-dessous sont susceptibles d'évoluer au cours de la modélisation.

Débits de VENTILATION					
Données	Part de la surface utile	Débit AN hygiénique	Occupation	Foisonnement	Sous-total débit par CTA
Su = 5960 m <sup>2</sup>	[%]	[m <sup>3</sup> /h]	[pers/m <sup>2</sup> ]	[-]	[m <sup>3</sup> /h]
<b>CTA « Bureaux »</b>	80%	25	0,1	-	<b>11 920</b>
<b>CTA « Salles de réunion »</b>	20%	30	0,5	-	<b>17 880</b>

SYSTÈME DE TRAITEMENT D'AIR – CTA « BUREAUX »				
<b>CTA</b> <b>« Bureaux »</b> <b>DOUBLE FLUX (DF)</b> <b>Type DAC</b>	<b>Échangeur</b>	Efficacité échangeur		85 %
		Puissance électrique échangeur (W)		100 W
	<b>Spécificités</b>	Taux d'air neuf		100%
		Dégivrage		Pas de dégivrage
		By-pass Si oui : T°C seuils		Sans By-pass
	<b>Aéraulique et hydraulique</b>	Puissance ventilateur soufflage SFP (W/(m <sup>3</sup> /h))		0,35
		Puissance ventilateur reprise SFP (W/(m <sup>3</sup> /h))		0,30
		Débit soufflage	En occupation :	25 m <sup>3</sup> /h par personne AN
			En inoccupation :	0 Vol/h (CTA en arrêt)
		Débit reprise	En occupation :	25 m <sup>3</sup> /h par personne AN
			En inoccupation :	0 Vol/h (CTA en arrêt)
		Classe étanchéité réseaux aérauliques		Classe B
		Classe isolation réseau hydrauliques chaud		Classe 3
		Isolation réseau chaud		U = 0,30 W/(m.K)
		Régime T°C batterie chaude		60°C / 40°C
	Classe isolation réseau froid		Classe 3	
	Isolation réseau froid		U = 0,30 W/(m.K)	
	Régime T°C batterie froide		7°C / 15°C	
	<b>Régulation</b>	Régulation circulateurs		Vitesse variable et pression constante
		Régulation des débits		Modulation en fonction de la température extérieure Régulation à débit variable

## SYSTEME DE TRAITEMENT D'AIR – CTA « SDR »

<b>CTA</b> <b>« Salles de réunions »</b> <b>DOUBLE FLUX (DF)</b> <b>Type DAC</b>	Échangeur	Efficacité échangeur		85 %	
		Puissance électrique échangeur (W)		100 W	
	Spécificités	Taux d'air neuf		100%	
		Dégivrage		Pas de dégivrage	
		By-pass Si oui : T°C seuils		Sans By-pass	
	Aéraulique et hydraulique	Puissance ventilateur soufflage SFP (W/(m3/h))		0,35	
		Puissance ventilateur reprise SFP (W/(m3/h))		0,30	
		Débit soufflage	En occupation :		30 m3/h par personne AN
			En inoccupation :		0 Vol/h (CTA en arrêt)
		Débit reprise	En occupation :		30 m3/h par personne AN
			En inoccupation :		0 Vol/h (CTA en arrêt)
		Classe étanchéité réseaux aérauliques		Classe B	
		Classe isolation réseau hydrauliques chaud		Classe 3	
		Isolation réseau chaud		U = 0,30 W/(m.K)	
		Régime T°C batterie chaude		60°C / 40°C	
		Classe isolation réseau froid		Classe 3	
		Isolation réseau froid		U = 0,30 W/(m.K)	
	Régime T°C batterie froide		7°C / 15°C		
	Régulation	Régulation circulateurs		Vitesse variable et pression constante	
		Régulation des débits		Modulation en fonction de la température extérieure Régulation à débit variable	

## SYSTEME DE TRAITEMENT D'AIR – VMC « Sanitaires »

## HYPOTHÈSES RETENUES

<b>CTA</b> <b>Sanitaires</b> <b>SIMPLE FLUX (SF)</b> <b>Type VMC « sanitaires »</b>	Aéraulique	Puissance ventilateur soufflage SFP (W/(m3/h))		0,40	
		Puissance ventilateur reprise SFP (W/(m3/h))		0,40	
		Débit d'extraction	En occupation :		Selon débits réglementaires des blocs sanitaires qui doit disposer d'un débit d'extraction permanent en de (en cas de cabinets d'aisances groupés) : 30+15*7 = 135 m3/h par bloc sanitaires  Soit 14*135 = <b>1 890 m3/h</b>
			En inoccupation :		
		Classe étanchéité réseaux aérauliques		Classe B	

SYSTÈME D'ÉMISSION de type Plafond rayonnant « 4 tubes »			HYPOTHÈSES RETENUES
Plafond rayonnant chauffant et rafraichissant <b>PRCR</b>	Chaud	Température consigne chauffage	19°C
		Régime T°C EC	35°C / 30°C
		Classe isolation réseau chaud	Classe 3
		Isolation réseau chaud	U = 0,24 W/(m.K)
		Pertes au dos par défaut	5%
		Variation spatiale chaud	Classe B3
Toutes zones climatiques	Froid	Variation temporelle chaud (°C)	0,5
		Température consigne refroidissement	26°C
		Régime T°C EF	16°C / 19°C
		Classe isolation réseau froid	Classe 3
		Isolation réseau froid	U = 0,24 W/(m.K)
		Pertes au dos par défaut	5%
<b>Bureaux</b>	Froid	Variation spatiale froid	Classe B3
		Variation temporelle froid (°C)	-0,5
<b>Salles de réunions</b>	Froid		
<b>Circulations</b>	Régulation	Type de programmation Chaud/Froid	Modulation en fonction de la température extérieure
		Régulation circulateurs	Régulation à débit variable Vitesse variable et pression constante

SYSTÈME D'ÉMISSION de type Radiateurs			HYPOTHÈSES RETENUES
Radiateurs <b>RAD</b>	Chaud	Température consigne chauffage	19°C
		Régime T°C EC	50°C / 30°C
		Classe isolation réseau	Classe 3
		Isolation réseau	U = 0,24 W/(m.K)
		Variation spatiale	Classe C
		Variation temporelle chaud (°C)	0,2
Toutes zones climatiques	Froid		
<b>Circulations</b>	Régulation	Type de programmation Chaud/Froid	Modulation en fonction de la température extérieure
		Régulation circulateurs	Régulation à débit variable Vitesse variable et pression constante
<b>Sanitaires</b>	Régulation		

#### 4.12.5. Modélisation des systèmes d'éclairage et de leur mode de gestion

SYSTÈME D'ÉCLAIRAGE		HYPOTHÈSES RETENUES
Éclairage <b>Bureaux et salles de réunions</b>	Éclairage requis	300 lux moyen à maintenir
	Puissance électrique installée d'éclairage	4,5 W/m <sup>2</sup> + 0,10 W/m <sup>2</sup> (périphériques de gestion veille)
	Pourcentage ayant accès à la lumière naturelle	< 87 % pour les bureaux sur façades mono orienté et < 88 % pour les salles de réunions sur façades mono orienté et < 96 % pour les salles de réunions sur façades mono orienté et (Calculé automatiquement par le logiciel) 0% pour les salles de réunion internes
	Mode de commande de l'éclairage	Marche et arrêt automatique par détection de présence
	Gestion fractionnée	Oui pour les bureaux et salles de réunion en façade, non pour les salles de réunion internes
	Type de gestion	Gradation automatique assurant éclairage constant en fonction des apports de lumière naturelle
	Éclairage <b>Circulations</b>	Éclairage requis
Puissance électrique installée d'éclairage		2,25 W/m <sup>2</sup> + 0 W/m <sup>2</sup> (périphériques de gestion veille)
Pourcentage ayant accès à la lumière naturelle		0 %
Mode de commande de l'éclairage		Marche et arrêt automatique par détection de présence
Type de gestion		Gestion impossible avec lumière du jour Pas de fractionnement
Éclairage <b>Sanitaires</b>	Éclairage requis	200 lux moyen à maintenir
	Puissance électrique installée d'éclairage	3 W/m <sup>2</sup> + 0 W/m <sup>2</sup> (périphériques de gestion veille)
	Pourcentage ayant accès à la lumière naturelle	0 %
	Mode de commande de l'éclairage	Marche et arrêt automatique par détection de présence
	Type de gestion	Gestion impossible avec lumière du jour Pas de fractionnement