Elithis Solutions

Numéro de l'affaire :

82294

Chargé de projet : Lyes YAHIAOUI

Phase : APS-Programme

Version : 1.1

Date de diffusion : 22/08/2024

NOTICE SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

CENTRE ULM

1, rue d'ULM

Paris 5ème arrondissement (75)

UNIVERSITÉ PARIS 1 PANTHÉON SORBONNE

Maitre d'Ouvrage	Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Architecte	Lemoal Lemoal

Historique du document

INDICE	PLANS	CE	MODIFICATION	DATE
A	Plans phase APS- Programme 12/04/2023	LY	1ère diffusion	05/07/2024
B	Plans phase APS- Programme 12/04/2023	LY	Mise à jour suite aux remarques de la MOA et MOE	22/08/2024

SOMMAIRE

SIMULATION THERMODYNAMIQUE (STD)

1. GENERALITES....4

1.1 INTRODUCTION GENERALE ET OBJECTIFS 4
1.2 METHODOLOGIE 5
- MOYENS INFORMATIQUES 5
- VALIDITE DE L'ETUDE 5

2. DONNEES D'ENTREE & HYPOTHESES 6

2.2 DONNEES D'ENTREE 6

3. MODELISATION DU BATIMENT....7

4. CONDITIONS METEOROLOGIQUES 8

4.1 LOCALISATION 8
4.2 METEO DE BASE....9
4.2.1 TEMPERATURE ET HYGROMETRIE....9
4.2.2 RAYONNEMENT SOLAIRE 10
4.2.1 EXPOSITION AU VENT....11
4.3 METEO CANICULAIRE DE 2003 11
4.3.1 TEMPERATURE 11

5. S HYPOTHSES D'ENVELOPPE DU BATIMENT 12

5.2 PERFORMANCES DES PAROIS OPAQUES 12
5.2.1 Après travaux 12
5.3 PERFORMANCES DES MENUISERIES....13
5.3.1 Après travaux 13
5.3.2 Le vitrage à contrôle solaire : 13
5.4 PONT THERMIQUES....14

6. USAGES ET HYPOTHESE DE FONCTIONNEMENT 15

6.2 ZONAGE THERMIQUE....15
6.3 HYPOTHESE OCCUPATION 17
6.4 APPORTS INTERNES HORS OCCUPATION ET ECLAIRAGE....17
6.5 CONSIGNE DE TEMPERATURE 18
6.6 PROFIL DE FONCTIONNEMENT DES STORES....18
6.7 VENTILATION NATURELLE PAR OUVERTURE DE FENETRES....19
6.8 NIVEAU D'ECLAIREMENT 21
6.9 DEFINITIONS DU CONFORT THERMIQUE....21
6.10 OBJECTIFS DU PROGRAMME 22
6.11 VARIANTES ETUDIEES 22
6.12 RESULTATS 24
6.12.1 Cas de climat caniculaire 2003....24
6.12.1 Cas de climat actuel de Paris (été de base) 25
6.12.2 Interprétation des résultats :....26
CONCLUSION....27

7. ANNEXE....28

1. GENERALITES

1.1 INTRODUCTION GENERALE ET OBJECTIFS

La **Simulation Thermique Dynamique (STD) peut être réalisée pour toute construction neuve et/ou toute rénovation**. Elle est tout particulièrement adaptée aux projets pour lesquels la Maîtrise d'Ouvrage souhaite appliquer une **démarche d'optimisation** en vue de la **maîtrise des consommations d'énergie et du confort thermique des occupants** en phase d'exploitation du bâtiment.

La STD est un calcul physique, basé sur la prise en compte la plus réelle possible des différents paramètres et contraintes du bâtiment. Elle ne se substitue pas à l'approche réglementaire basée sur la Réglementation Thermique (RT), qui repose sur des principes de calculs conventionnels, mais est au contraire **complémentaire** à celle-ci.

A partir du comportement réel du bâtiment, elle permet d'analyser ses performances thermiques globales. Elle quantifie les besoins en chauffage et en climatisation à un moment et un endroit donné, pour des conditions climatiques données en tenant compte des caractéristiques du projet qui impactent son bilan énergétique :

- Choix architecturaux
- Orientations et interactions avec les aménagements voisins (masques solaires, etc…)
- Modes constructifs
- Configuration et organisation intérieure
- Scénarii d'occupation
- Usages et activités intérieures
- Apports internes spécifiques
- Choix des installations
- Système de chauffage
- Intérêt de la climatisation
- Impact de la ventilation
- Eau chaude sanitaire
- Eclairage artificiel
  - ETC.

Le but de cette étude est de réaliser une simulation thermodynamique (STD du projet), afin de fournir au client l'ensemble des données pour pouvoir statuer sur une prise de décision quant à l'engagement des travaux de réhabilitation de façades prévus. Ainsi, apporter une réponse à l'axe 4 orientation 6 du carnet de bord du développeent durable de Paris.

1.2 METHODOLOGIE

L'étude est conduite de la manière suivante :

- **Intégration des caractéristiques constructives** de l'enveloppe du bâtiment (caractéristiques des parois opaques et vitrées, perméabilité a l'air, ponts thermiques, inertie…) ;
- **Intégration des hypothèses d'occupation et d'usage** du bâtiment (consignes de température, apports internes, plages d'occupation, utilisation des équipements, utilisation de l'éclairage artificiel) ;
- **Analyse du confort thermique** des occupants. Le confort thermique se mesure à l'aide de plusieurs indicateurs basés sur une approche statistique du ressenti sur une échelle d'individu en fonction de nombreux paramètres :
    - Température de l'air ambiante ;
    - Humidité relative ambiante ;
    - Vitesse de l'air ;
    - Activité du métabolisme des occupants ;
    - Habillement.

• MOYENS INFORMATIQUES

La simulation thermique dynamique est effectuée sur le logiciel PLEIADES COMFIE V6. Développé par l'école des mines de Paris, ce logiciel répond parfaitement aux besoins de ce type d'étude. COMFIE est le moteur de calcul, il s'appuie sur un modèle aux différences finies multizone réduit par analyse modale. À chaque pas de temps, l'algorithme détermine les besoins de chauffage, de refroidissement, l'humidité et les températures dans chaque zone du bâtiment.

Données météorologiques issues de **Meteonorm v8**.

Simulation énergétique dynamique réalisée sous **Pléiades-Comfie.**

PLEIADES

• VALIDITE DE L'ETUDE

L'ensemble des préconisations décrites dans cette étude doivent être respectées.

Toute modification entrainera la remise en cause des calculs et des résultats présentés dans ce document

2. DONNEES D'ENTREE & HYPOTHESES

2.2 DONNEES D'ENTREE

Pour réaliser cette étude STD, nous nous sommes basés sur les données d'entrée suivantes :

- Le **carnet de plans et de façades en date du 29-04-2024** ;
- Le rapport diagnostic de **Sherlock Patrimoine ;**
- Les pièces écrites et graphiques des architectes du 25/08/2024.

En complément de ces éléments, certaines hypothèses ont été formulées par ELITHIS SOLUTIONS pour mener à bien cette étude.

3. MODELISATION DU BATIMENT

La modélisation 3D du bâtiment est faite sur la base des plans fournis par la MOA sous format PDF en phase APS-programmation. Elle vise à reproduire au plus juste les particularités du projet tout en le simplifiant.

Le bâtiment étudié est situé dans un tissu urbain dense, c'est-à-dire qu'il est entouré de bâtiments rapprochés et de hauteurs importantes. Par conséquent, cela crée un fort effet d'ombrage solaire. La modélisation de l'environnement immédiat est donc essentielle pour obtenir des résultats optimaux.

Dans notre cas, le bâtiment se développe sur un plan réctangulaire, dont deux façades sont mitoyennes. Les deux autres côtés représentent les façades concernées par les travaux de rénovation :

- Façade Nord : Place du Panthéon
- Façade Ouest : Rue d'Ulm

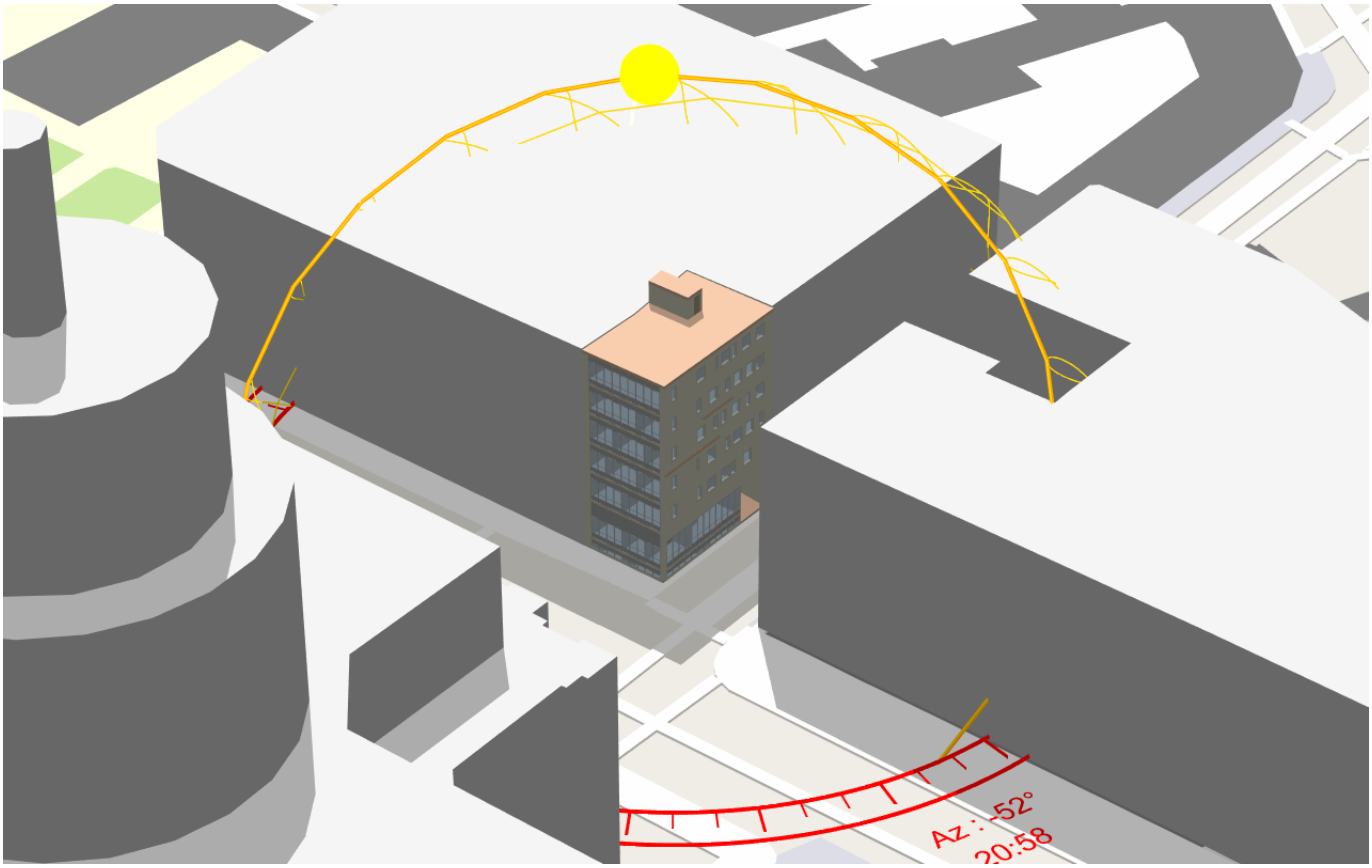


Figure : Vue 3D sur les deux façades - Nord place du Panthéon - Ouest rue d'Ulm

4. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

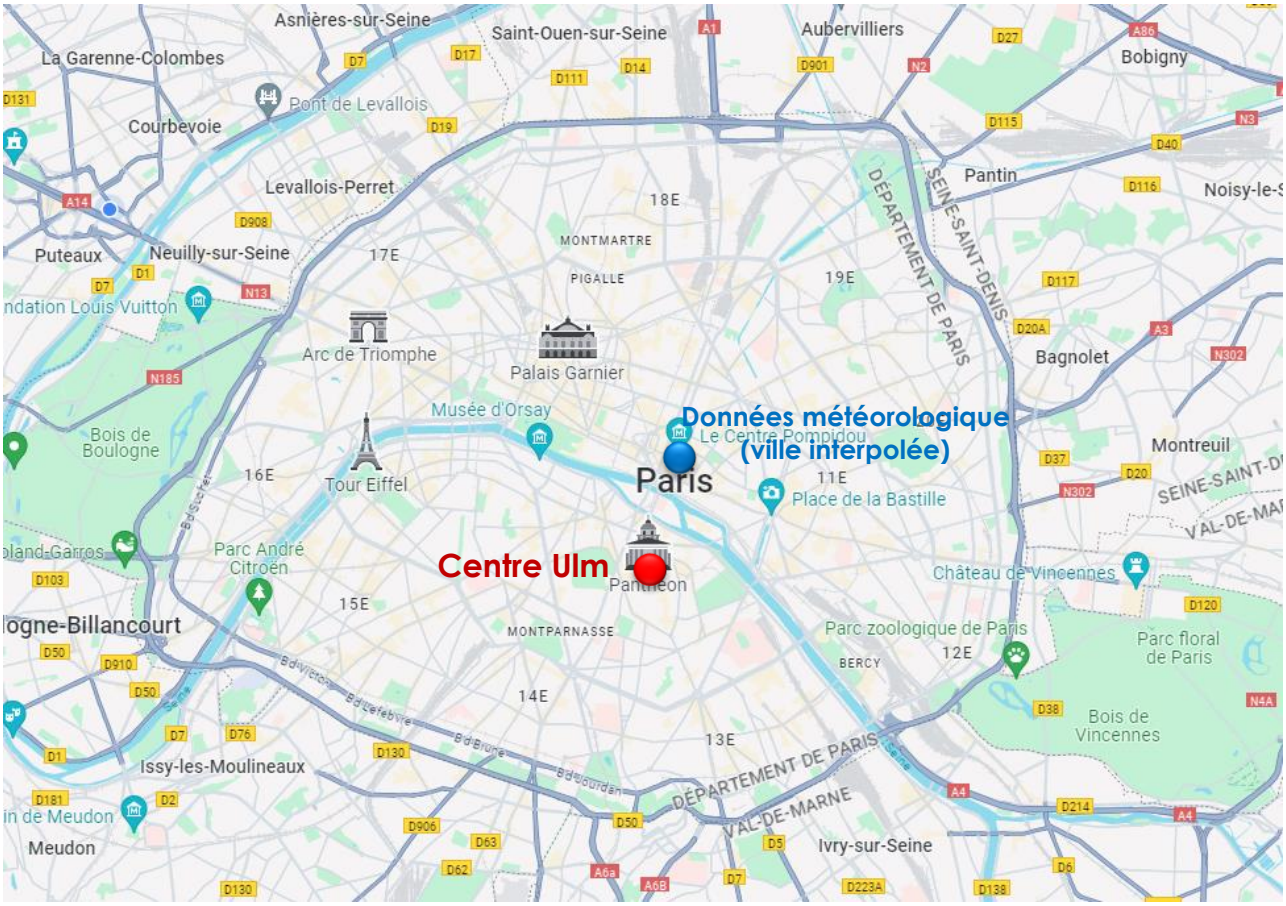
Les données météorologiques sont fondamentales dans une STD. Ces dernières incluent les conditions extérieures telles que la température, l'humidité, la direction et la vitesse du vent, le rayonnement solaire dans ces deux composants (rayonnement direct et diffus), indice de couverture nuageuse.

Localisation de la station météo du projet Site	Zone climatique	Altitude	T° C ext. de base
Paris ville interpolée	H1a	59 m	-7

4.1 LOCALISATION

Le fichier météorologique utilisé a été créé à partir de données issues de Métronome :

- Latitude : 48.9° N
- Longitude : 2.4° E



Afin d'être représentatives d'une année météorologique typique, les données sont issues de mesures moyennes. Les valeurs sont issues de mesures faites pendant les périodes suivantes :

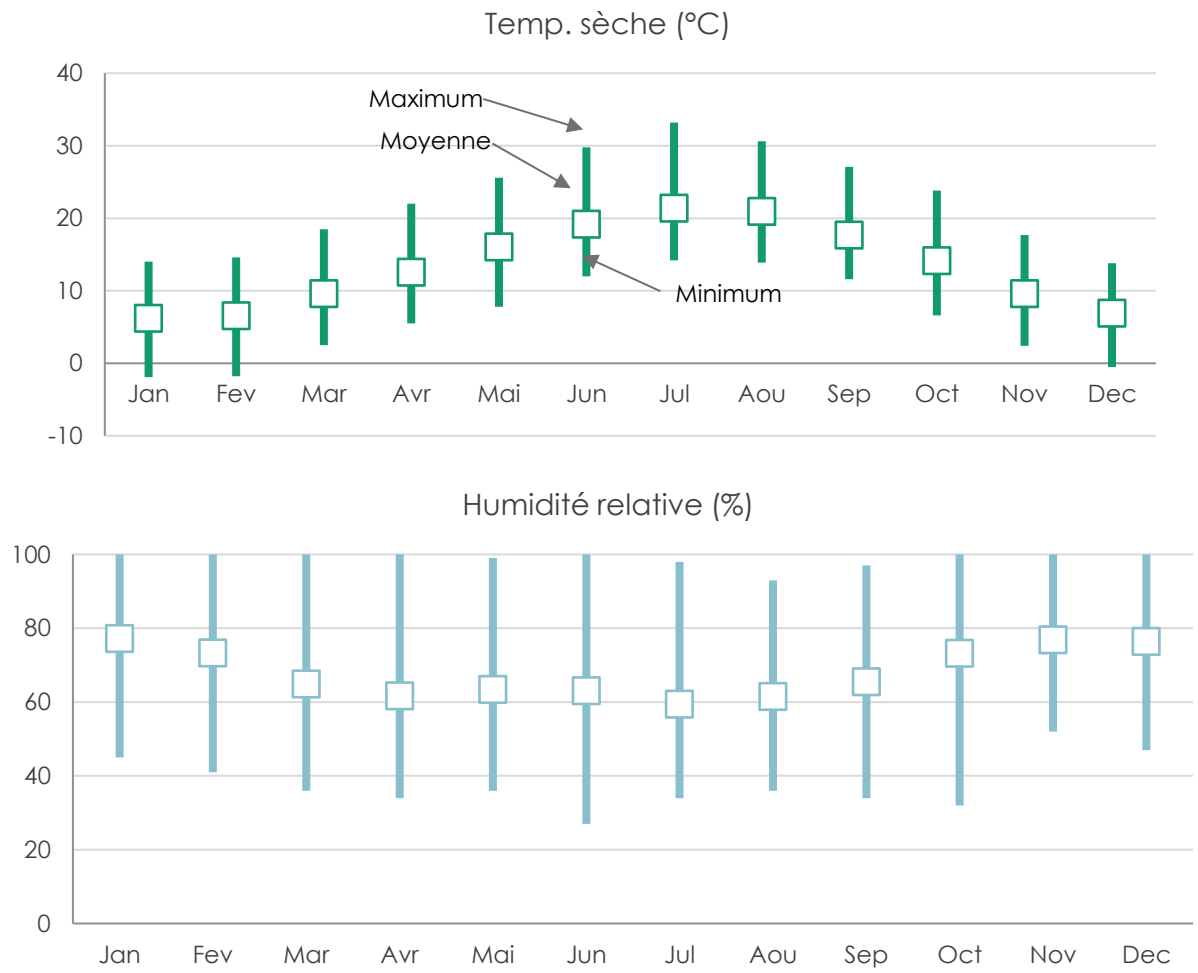
- Températures : période 2000-2019
- Rayonnement solaire : période 2001-2020

4.2 METEO DE BASE

4.2.1 TEMPERATURE ET HYGROMETRIE

- Zone climatique : H1a
- Température maxi : 33.2 °C en juillet
- Température mini : -1.9 °C en Janvier
- Température moyenne : 13.46 °C

Synthèse des données climatiques moyennes du fichier météo de base



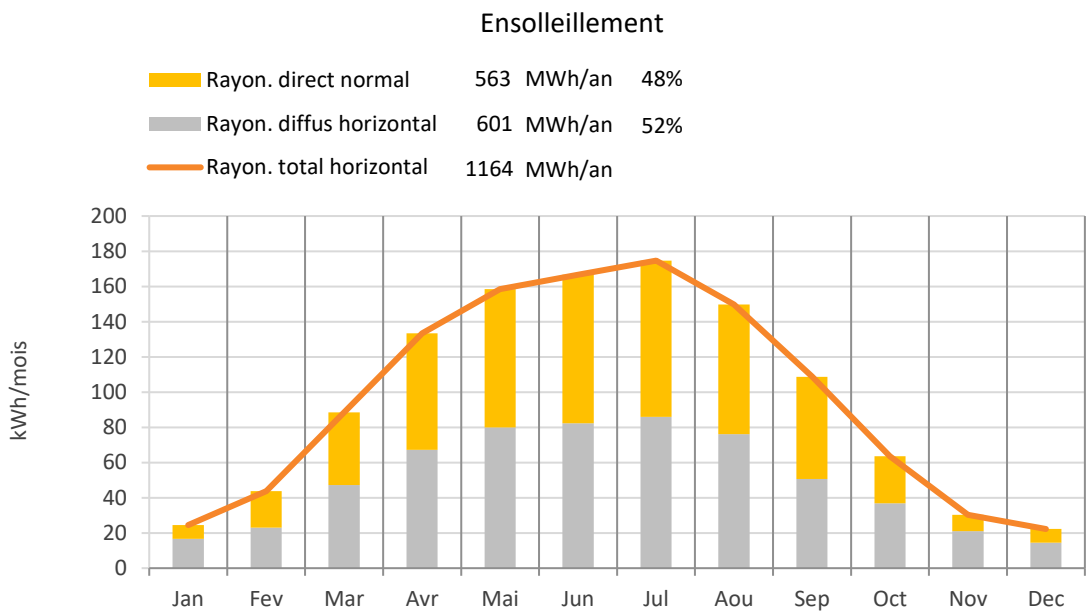
4.2.2 RAYONNEMENT SOLAIRE

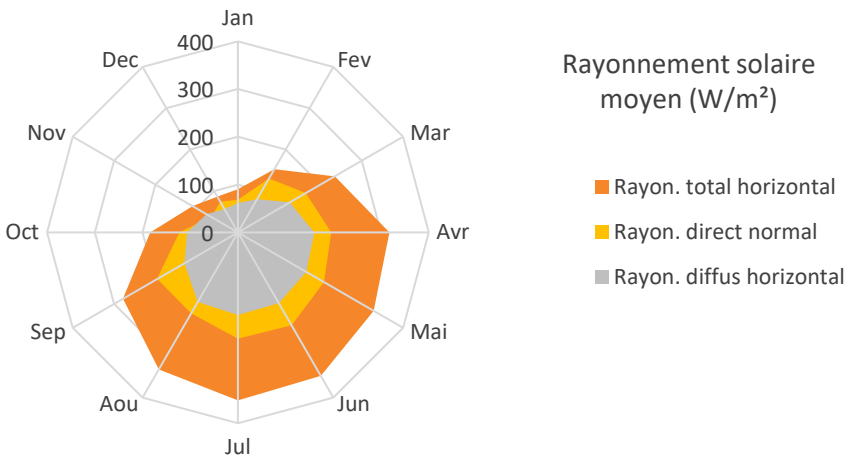
Le rayonnement solaire est l'un des facteurs météorologiques les plus importants dans la conception d'un projet performant du fait de son effet important sur le comportement thermique du bâtiment.

Le rayonnement solaire présente deux composantes :

- **Rayonnement direct** : provient directement du soleil dans une situation de ciel clair. Le rayonnement est directionnel.
- **Rayonnement diffus** : provient du soleil et est réémis par l'atmosphère de manière éclatée. Le rayonnement est non directionnel et vient de toutes directions.
- **Rayonnement global** : c'est l'addition des composantes directe et diffuse.

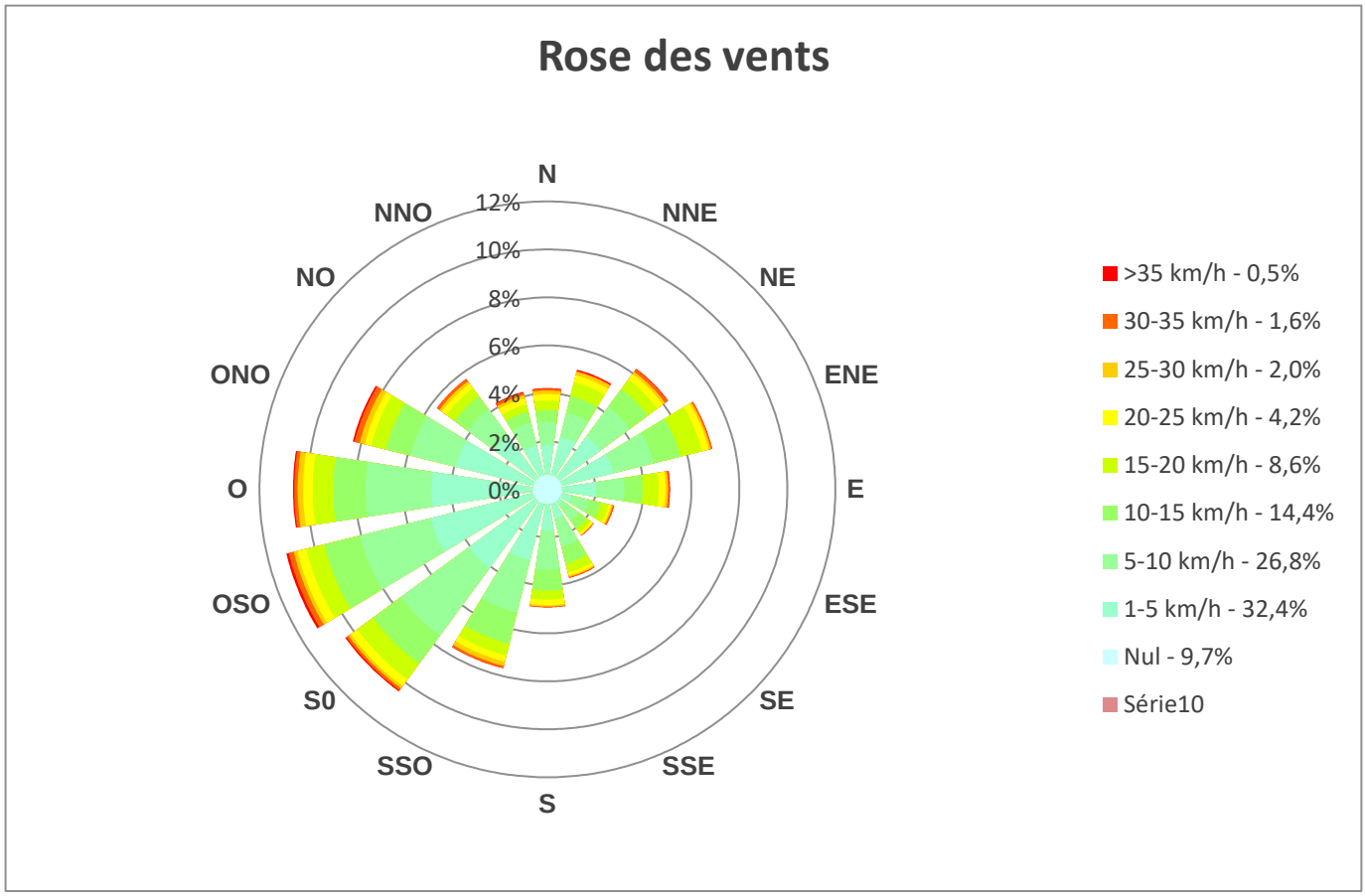
Les graphiques suivants résument la répartition mensuelle des composantes du rayonnement solaire pour le site.





4.2.1 EXPOSITION AU VENT

L'exposition au vent est prise en compte dans le calcul des infiltrations du bâtiment. Des coefficients de pression sont adaptés à l'enveloppe pour prendre en compte l'effet du milieu urbain. Les vents dominants viennent du secteur **Ouest** et **Ouest-Sud-Ouest** et **Sud-Sud-Ouest**, avec des vents pouvant dépasser 35 km/h.



4.3 METEO CANICULAIRE DE 2003

4.3.1 TEMPERATURE

- Température maxi : 42.2 °C en Août
- Température mini : -2.7 °C en Janvier

Ces valeurs sont issues du fichier climat canicule 2003 de Pleiades.

5. HYPOTHSES D'ENVELOPPE DU BATIMENT

5.2 PERFORMANCES DES PAROIS OPAQUES

5.2.1 Après travaux

Dans l'étude STD, et afin d'être coherent, nous avons repris les hypothèses du rapport RTex globale.

Au niveau de la façade ouest – Rue d'ULM, nous proposons la fibre de bois en isolation par intérieur, conformément aux exigences du **carnet de bord du développement durable (70% d'isolants biosourcés).**

Nb : La part de l'isolation biosourcée est simulée entre 70 à 80 % (à confirmer une fois la proposition des architectes fixée). Il est important de préciser qu'une isolation par intérieur en PSE (polystyrène expansé) avec un R équivalent permet de réduire l'épaisseur d'environ 1.5cm*.

Désignation		Structure		Isolation				
Nom	Contact	Type	Epaisseur (cm)	Localisation	Type	Epaisseur (mm)	Résistance ($m^2.K/W$)	U ($W/m^2.K$)
Bureaux								
Mur extérieur – Rue d'ULM	Extérieur	Béton	20	Intérieur	ISONAT FLEX 40	BA13 +132	3.8	0.246
Mur extérieur – Place du Panthéon	Extérieur	Pierre	1.4	Intérieur	KNAUF Thane façade	82	3.7	0.826
Plancher RDC sur TP	Sol	Béton	15	--	--	--	--	--
Toiture terrasse innaccessible existante	Extérieur	Béton	20	Extérieur	Polyuréthane**	100	3.33	0.281

*La mise en oeuve de la fibre de bois nécessite une ossature métallique à prévoir, tandis que le PSE est directement collé au mur.

**Lisolation de la toiture terrasse inaccessible est existante et ne sera pas remplacée

Acronymes :

- TP : terre-plein

Remarque :

- Tous les isolants, marques et modèles cités dans le tableau ci-dessus ne sont donnés qu'à titre indicatif. Il est possible de les remplacer par d'autres modèles ayant une résistance thermique identique ou supérieure, et un mode de fixation équivalent.

5.3 PERFORMANCES DES MENUISERIES

Afin de respecter l'article 22 de l'arrêté du 26 octobre 2010, les baies d'un même local autre qu'à occupation passagère doivent pouvoir s'ouvrir sur au moins 30% de leur surface totale.

Cette exigence est réduite à 10% dans le cas de baies de plus de 4m de hauteur.

5.3.1 Après travaux

Désignation	Type de pose	Châssis	Vitrage	Coefficient de transmission thermique Uw [W/m². K]	Protection solaire
Menuiseries rue d'Ulm	Nu extérieur	Aluminium	4-16(argon)-4	**1.5**	Store extérieur / Store intérieur*
Façade rideau – Place du Panthéon	--	Mur rideau Aluminium	4-16(argon)-4	**1.5**	Store extérieur / Store intérieur /sans protection*

*Le type de protection solaire dépend des variantes proposées par l'étude STD

Afin de respecter l'article 22 de l'arrêté du 26 octobre 2010, les baies d'un même local autre qu'à occupation passagère doivent pouvoir s'ouvrir sur au moins 30% de leur surface totale.

5.3.2 Le vitrage à contrôle solaire :

Il existe des vitrages à contrôle solaire qui permettent à la fois d'obtenir un confort lumineux optimal et réduire l'inconfort de température lié aux apports énergétiques. Cette solution peut éventuellement substituer à la protection solaire standard en store intérieur et/ou extérieur.

Désignation	Type	Composition et épaisseur du vitrage	SWg (%)	TLg (%)
Vitrage à contrôle solaire de chez Saint-gobain	PLANISTAR SUN	4-16 (argon)-4	**39.5**	**72**

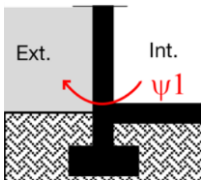
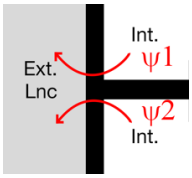
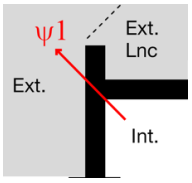
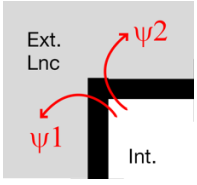
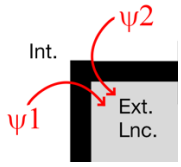
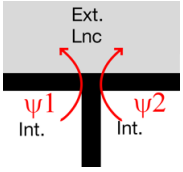
* Respecter les préconisations du rapport « confort visuel » pour la transmission lumineuse du vitrage Tlg ≥70%.

Remarques : Tous les modèles cités dans les tableaux ci-dessus ne sont qu'à titre indicatif. Il est possible de les remplacer par d'autres modèles ayant des caractéristiques équivalentes.

5.4 PONT THERMIQUES

Pour les calculs des déperditions linéiques présentes dans le bâtiment, nous devons référencer des valeurs de ponts thermiques des différentes liaisons de parois.

Les différentes liaisons présentes dans le bâtiment sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Type de pont thermique	Localisation	Psi [m².K/W]	Schéma
Pont thermique linéique	L8TP Plancher bas / Terre plein	**0.65**	
Pont thermique linéique	L9 Mur extérieur / Plancher intermédiaire	**0.96**	
Pont thermique linéique	L10T Mur extérieur / Plancher haut	**0.81**	
Pont thermique vertical	L1 Angle sortant mur extérieur	**0.18**	
Pont thermique vertical	L2 Angle rentrant mur extérieur	**0.02**	
Pont thermique vertical	L3 Mur extérieur / Mur refend	**0.41**	

6. USAGES ET HYPOTHESE DE FONCTIONNEMENT

En combinant les données d'entrée fournies par le maître d'ouvrage, les informations recueillies lors des diverses visites sur site, ainsi que des hypothèses émises lorsque certaines données n'ont pu être confirmées, nous avons fait en sorte de nous rapprocher le plus possible du fonctionnement réel du bâtiment. L'objectif est d'évaluer le confort thermique du bâtiment après la réfection des deux façades :

Les éléments indispensables à la modélisation sont les suivants :

- Zonage thermique ;
- Apports ;
- Consignes de température ;
- Caractéristiques thermiques détaillées de l'enveloppe ;
- Masques et protections solaires ;

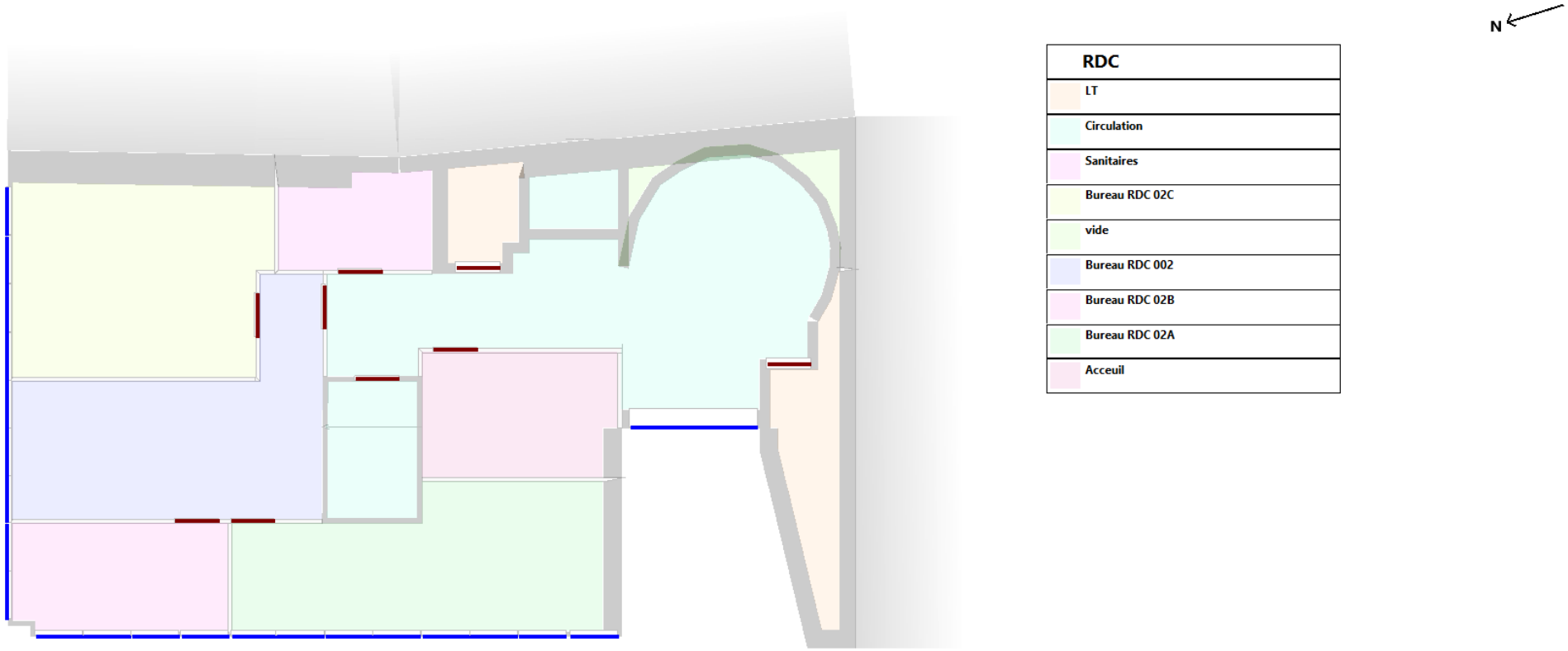
Ces éléments vont permettre de consolider une vision plus précise du fonctionnement énergétique global du site, essentiel pour évaluer et optimiser ses performances énergétiques.

6.2 ZONAGE THERMIQUE

Une zone thermique est un regroupement de pièces ayant un fonctionnement « identique » à savoir :

- Un comportement proche au niveau thermique
- Des scénarios de fonctionnement identiques

LE MOTEUR DE CALCUL CONSIDERE LA ZONE COMME UNE ENTITE UNIQUE. LES RESULTATS DE LA SIMULATION SONT RELATIFS A LA ZONE ET NON A CHAQUE PIECE DE LA ZONE.



EXEMPLE DE ZONAGE THERMIQUE DU RDC (LE RESTE DES NIVEAUX EST MIS EN ANNEXE)

6.3 HYPOTHESE OCCUPATION

Le scénario d'occupation sert à décrire le nombre de personnes présentes sur une plage de temps de 24h. On considère qu'un humain en position assise dégage 80 W, plus le nombre de personnes sera élevé dans une pièce et plus les apports internes liés à l'occupation seront élevés.

Pour ce projet, nous avons adopté les scénarios d'occupation suivants (89 occupants):

Pièces	Occupation (occupant/m²)
Bureau	Jours Afficher le nom S Nom 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 Normal 0.10 0.30 0.30 0.30 0.10 0.10 0.30 0.30 0.30 0.10 Réduit 0.10 0.10 0.10 0.10 0.00 0.00 0.10 0.10 0.10 0.10 Semaines Nom Lundi Mardi Mercredi Jeudi Vendredi Samedi Dimanche Vacances Réduit Réduit Réduit Réduit Réduit Normal Normal Normal Normal Normal Normal
Salle de réunion	Jours Afficher le nom S Nom 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 Jour 0.09 0.19 0.19 0.09 0.09 0.19 0.19 0.19 Semaines Nom Lundi Mardi Mercredi Jeudi Vendredi Samedi Dimanche Semaine Jour Jour Jour Jour Jour
Sanitaires collectifs	Jours Afficher le nom S Nom 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 J Normal 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 J Vacances 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 Semaines Nom Lundi Mardi Mercredi Jeudi Vendredi Samedi Dimanche Normal J Normal J Normal J Normal J Normal J Normal Vacances J Vacances J Vacances J Vacances J Vacances J Vacances
Circulation	Jours Afficher le nom S Nom 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 Jour 1 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 Jour 2 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 Semaines Nom Lundi Mardi Mercredi Jeudi Vendredi Samedi Dimanche Normal Jour 1 Jour 1 Jour 1 Jour 1 Jour 1 Vacances Jour 2 Jour 2 Jour 2 Jour 2 Jour 2

6.4 APPORTS INTERNES HORS OCCUPATION ET ECLAIRAGE

Pièces	Apports internes (W/m²)

Bureau

Jours — Afficher le nom

S	Nom	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	Ouvré Réduit	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	4.40	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	4.40	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
	WE Réduit	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
	WE Normal	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78
	Ouvré Normal	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	8.80	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	8.80	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78

Semaines

Nom	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Vacances	Ouvré Réduit	Ouvré Réduit	Ouvré Réduit	Ouvré Réduit	Ouvré Réduit	WE Réduit	WE Réduit
Normal	Ouvré Normal	Ouvré Normal	Ouvré Normal	Ouvré Normal	Ouvré Normal	WE Normal	WE Normal

Salle de réunion

Jours — Afficher le nom

S	Nom	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	Jour										2.50	5.00	5.00	2.50	2.50	5.00	5.00	5.00							

Semaines

Nom	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Semaine	Jour	Jour	Jour	Jour	Jour		

Remarques : Les apports internes sont engendrés par les équipements internes tels que les ordinateurs, imprimantes etc…

6.5 CONSIGNE DE TEMPERATURE

Pour la consigne de température de chauffage :

Pour les bureaux et salles de réunions, la consigne de chauffage est fixée à 21°C.

Pour les circulations, la consigne de chauffage est fixée à 17°C.

6.6 PROFIL DE FONCTIONNEMENT DES STORES

Afin de simuler au mieux l'abaissement des stores extérieurs / intérieurs, les scénarios suivants sont intégrés à la simulation (les valeurs en % correspondent à la fermeture des stores):

Stores extérieurs / intérieurs (% de fermeture)

Jours — Afficher le nom

S	Nom	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	Hiver	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	Mi-saison	20	20	20	20	20	20	20	20	80	80	80	80	80	80	100	100	100	100	20	20	20	20	20	20
	Eté	20	20	20	20	20	20	20	20	80	80	80	80	80	80	100	100	100	100	20	20	20	20	20	20
	WE	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Semaines

Nom	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Semaine Hiver	Hiver	Hiver	Hiver	Hiver	Hiver	WE	WE
Semaine Mi-saison	Mi-saison	Mi-saison	Mi-saison	Mi-saison	Mi-saison	WE	WE
Semaine été	Eté	Eté	Eté	Eté	Eté	WE	WE

6.7 VENTILATION NATURELLE PAR OUVERTURE DE FENETRES

Une ventilation naturelle est toujours possible. En fonction de la saison et des températures opératives (ressenties), on autorise l'ouverture des fenêtres selon les scénarios suivants (méhode TH-BCE):

Mode d'ouverture manuel			
	Saison de chauffage	**Mi- saison**	**Saison de refroidissement**
Δθ1	3	3	3
Δθ2	1	1	1
θbase	26	24	22
Δθ int-ext	-6	-6	-6
Seuil bas	12	10	8
Seuil haut	18	18	16

Les paramètres de gestion à renseigner constituent 2 groupes de trois paramètres :

D'aobord, les trois paramètres **Seuil bas, Seuil haut et Δθext_int** permettent de déterminer Rouvθei(h) qui caractérise la **"pertinence d'ouvrir"** en fonction de la température extérieure et de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur.

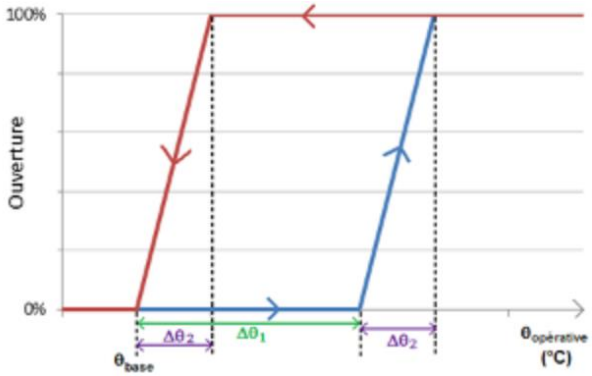
- Si la température extérieure est inférieure au seuil bas, l'ouverture n'est pas pertinente (0%) car le contraste de température serait trop inconfortable pour l'occupant.
- Si la température extérieure est supérieure au seuil haut, l'ouverture est pertinente et potentiellement maximale car le contraste de température n'est plus préjudiciable au confort.
- Entre ces deux seuils, la pertinence d'ouverture évolue linéairement.

Pour autant, une condition de fermeture complète s'ajoute, liée à l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur. La fenêtre est fermée dès lors que cet écart se trouve au-dessous de Δθint -ext. Ce paramètre est très influent sur la qualité du rafraîchissement obtenu.

Dans notre cas, en gestion manuelle, Δθint-ext = -6°C, ce qui signifie que les fenêtres sont refermées lorsque la température extérieure dépasse de plus 6°C celle ressentie à l'intérieure. Cela signifie que la chaleur rentre allègrement dès lors que cet écart est moindre. Les occupants ont donc tendance à laisser rentrer la chaleur. Ils ouvrent surtout pour accroître la sensation de fraîcheur lié à l'évaporation de la sueur sans se préoccuper de l'accroissement de la température intérieure.

Par ailleurs, les trois paramètres **Δθ1, Δθ2 et θbase** servent à déterminer Rouvθop(h) qui caractérise le **"besoin d'ouvrir"** à partir de la température opérative intérieure. Ils caractérisent le cycle d'hystérésis qui peut se comprendre comme suit :

- Si la température opérative (ressentie) est inférieure à θbase, il n'est pas nécessaire d'ouvrir car il n'est pas nécessaire de rafraîchir le local.
- Si la température opérative est supérieure à θbase + Δθ1 + Δθ2, il faut ouvrir le plus possible car il est indispensable de rafraîchir le local.
- Entre ces deux valeurs, la figure d'hystérésis du graphique ci-dessous permet de moduler la valeur de Rouvθop(h).



6.8 NIVEAU D'ECLAIREMENT

Les niveaux d'éclairement adoptés sont définis dans la norme **EN15251** relative à la qualité des ambiances intérieures par type de bâtiment.

Zones	Niveau d'éclairement (Lux)	Scénario d'éclairement
Bureau	**500**	Suivant scénario d'occupation
Salle de réunion	**500**	Suivant scénario d'occupation
Circulations	**100**	Suivant scénario d'occupation
Sanitaires collectifs	**200**	Suivant scénario d'occupation

6.9 DEFINITIONS DU CONFORT THERMIQUE

Les études de confort thermique ont pour but d'évaluer le confort des occupants durant les périodes d'occupation.

Le confort thermique est généralement évalué via deux grandeurs principales :

- La température ressentie (dit aussi température opérative) : Elle prend en compte à la fois la température de l'air mais aussi les températures de surface. On estime que la température ressentie doit se situer entre 21°C et 26°C pour avoir un bon niveau de confort thermique.
- La température extérieure moyenne dominante correspond à la moyenne pondérée exponentiellement des températures moyennes journalières des jours précédents. Cette température est calculée via les équations suivantes :

$$t_{pma\,(out)} = (1 - \alpha * [t_{e\,(d\text{-}1)} + \alpha * t_{e\,(d\text{-}2)}) + \alpha^2 * t_{e\,(d\text{-}3)} + + \alpha^{\,2} * t_{e\,(d\text{-}4)} + \cdots] \qquad \text{Eq. 1}$$

$$t_{pma(out)} = (1 - \alpha) * t_{e(d\text{-}1)} + \alpha * t_{rm(d\text{-}1)} \qquad \text{Eq. 2}$$

Avec

- d le jour
- α une constante comprise entre 0 et 1 contrôlant la rapidité à laquelle la moyenne répondant
- aux changements de température (pour des latitudes moyennes, une valeur de 0.6 est conseillée)
- t_e la température extérieure moyenne de la journée
- $t_{rm(d\text{-}1)}$ la température extérieure moyenne dominante de la veille

L'équation 1 est utilisée afin de calculer les premières valeurs, puis le reste des données est calculé via l'équation 2.

De manière règlementaire (RE2020), la température d'inconfort chaud est calculée d'après la norme **NF EN 16798-1** (remplace la NF EN 15251 depuis 2019). Elle s'appuie sur la notion de confort adaptatif.

6.10 OBJECTIFS DU PROGRAMME

Pour rappel, **l'axe 4 orientation 6 du carnet de bord du développeent durable de Paris** demande de satisfaire l'objectif suivant :

- **DH < 350** : le nombre d'heure d'inconfort pendant la période d'occupation inférieur à 350 degré heure.

6.11 VARIANTES ETUDIEES

Etant donné que les travaux de rénovation touchent uniquement les façades, nous proposons des variantes suivantes :

Nom de la variante	Scénarios
Base canicule 2003 (selon la proposition des architectes)	• Façade ouest - Rue ULM : Isolation par intérieur R = 3.8 , Menuiserie en double vitrage avec U = 1.5 • Façade nord – Place du Panthéon : partire opaque Isolation R = 3.7, mur-rideau avec U =1.5 • Protections solaires en stores extérieurs manuels uniquement rue d'ULM • Protection solaires en stores intérieurs manuels Place du Panthéon • Ventilation naturelle par ouverture des fenêtres • Scénario été caniculaire 2003
Base climat actuel de Paris (selon la proposition des architectes)	• Façade ouest - Rue ULM : Isolation par intérieur R = 3.8 , Menuiserie en double vitrage avec U = 1.5 • Façade nord – Place du Panthéon : partire opaque Isolation R = 3.7, mur-rideau avec U =1.5 • Protections solaires en stores extérieurs manuels uniquement rue d'ULM • Protection solaires en stores intérieurs manuels Place du Panthéon • Ventilation naturelle par ouverture des fenêtres • Scénario été base (climat de base de Paris)
Variante 1 canicule 2003	• Façade ouest - Rue ULM : Isolation par intérieur R = 3.8 , Menuiserie en double vitrage avec U = 1.5 • Façade nord – Place du Panthéon : partire opaque Isolation R = 3.7, mur-rideau avec U =1.5 • Protections solaires en stores extérieurs manuels uniquement rue d'ULM • Vitrage à contrôle solaire (pas de protection solaire) Place du Panthéon • Ventilation naturelle par ouverture des fenêtres • Scénario été caniculaire 2003
Variante 1 climat actuel de Paris	• Façade ouest - Rue ULM : Isolation par intérieur R = 3.8 , Menuiserie en double vitrage avec U = 1.5 • Façade nord – Place du Panthéon : partire opaque Isolation R = 3.7, mur-rideau avec U =1.5 • Protections solaires en stores extérieurs manuels uniquement rue d'ULM • Vitrage à contrôle solaire (pas de protection solaire) Place du Panthéon

	• Ventilation naturelle par ouverture des fenêtres • Scénario été base (climat de base de Paris)
Variante 2 canicule 2003	• Façade ouest - Rue ULM : Isolation par intérieur R = 3.8 , Menuiserie en double vitrage avec U = 1.5 • Façade nord – Place du Panthéon : partire opaque Isolation R = 3.7, mur-rideau avec U =1.5 • Protections solaires en stores intérieurs manuels pour les deux façades (pas de vitrage à contrôle solaire) • Ventilation naturelle par ouverture des fenêtres • Scénario été caniculaire 2003
Variante 2 climat actuel de Paris	• Façade ouest - Rue ULM : Isolation par intérieur R = 3.8 , Menuiserie en double vitrage avec U = 1.5 • Façade nord – Place du Panthéon : partire opaque Isolation R = 3.7, mur-rideau avec U =1.5 • Protections solaires en stores intérieurs manuels pour les deux façades (pas de vitrage à contrôle solaire) • Ventilation naturelle par ouverture des fenêtres • Scénario été base (climat de base de Paris)
Variante 3 canicule 2003	• Façade ouest - Rue ULM : Isolation par intérieur R = 3.8 , Menuiserie en double vitrage avec U = 1.5 • Façade nord – Place du Panthéon : partire opaque Isolation R = 3.7, mur-rideau avec U =1.5 • Protections solaires en stores extérieurs manuels pour les deux façades (pas de vitrage à contrôle solaire) • Ventilation naturelle par ouverture des fenêtres • Scénario été caniculaire 2003
Variante 3 climat actuel de Paris	• Façade ouest - Rue ULM : Isolation par intérieur R = 3.8 , Menuiserie en double vitrage avec U = 1.5 • Façade nord – Place du Panthéon : partire opaque Isolation R = 3.7, mur-rideau avec U =1.5 • Protections solaires en stores extérieurs manuels pour les deux façades (pas de vitrage à contrôle solaire) • Ventilation naturelle par ouverture des fenêtres • Scénario été base (climat de base de Paris)

Remarque : Le carnet de bord du développement durable (TBD) exige de réaliser une simulation avec les conditions climatiques de la canicule de 2003. Cependant, nous avons jugé nécessaire d'intégrer pour chaque scénario une variante avec le climat actuel de Paris (climat de base) afin d'avoir une approche plus réaliste du comportement thermique du projet.

6.12 RESULTATS

Le tableau récapitule les résultats des DH et la vérification de l'exigence du tableau de bord de développement durable à savoir **DH < 350 :**

6.12.1 Cas de climat caniculaire 2003

	Base		V1		V2		V3	
Espace	**DH projet**	**Cible TBD DH<350**	**DH projet**	**Cible TBD DH<350**	**DH projet**	**Cible TBD DH<350**	**DH projet**	**Cible TBD DH<350**
Accueil	163,6	✓	148,3	✓	257,9	✓	133,7	✓
Convivialité SS	9,6	✓	6,3	✓	13,9	✓	4,8	✓
Réunion SS	170,8	✓	142,9	✓	218,4	✓	142,5	✓
Bureau RDC 02C	292,0	✓	244,2	✓	319,7	✓	182,6	✓
Bureau RDC 002	285,1	✓	242,8	✓	356,6	X	192,9	✓
Bureau RDC 02B	380,7	X	333,5	✓	652,3	X	270,8	✓
Bureau RDC 02A	214,4	✓	200,7	✓	442,3	X	188,9	✓
Bureau R+1 105	430,4	X	340,6	✓	471,0	X	219,6	✓
Bureau R+1 104	521,4	X	440,7	X	619,7	X	322,8	✓
Bureau R+1 103	349,3	✓	321,1	✓	539,2	X	288,9	✓
Bureau R+1 102	303,8	✓	288,1	✓	503,7	X	272,2	✓
Bureau R+1 101	245,4	✓	235,1	✓	333,6	✓	224,8	✓
Bureau R+2 201	260,9	✓	248,8	✓	405,2	X	236,4	✓
Bureau R+2 202	315,1	✓	302,8	✓	561,9	X	289,7	✓
Bureau R+2 204	353,9	X	332,7	✓	571,2	X	307,1	✓
Bureau R+2 205	544,8	X	465,5	X	664,3	X	346,3	✓
Bureau R+2 206	588.0	X	475,0	X	649,6	X	314,9	✓
Bureau R+2 207	365,1	X	291,6	✓	417,0	X	199,9	✓
Bureau R+3 301	309,8	✓	295,0	✓	515,3	X	279	✓
Bureau R+3 302	390,2	X	360,4	X	627,5	X	322,8	✓
Bureau R+3 303A	630,1	X	530,3	X	784,0	X	379,3	✓
Bureau R+3 303	635,8	X	514,7	X	711.0	X	340,9	✓
Bureau R+3 304	440,6	X	344,0	✓	493,4	X	222,3	✓
Bureau R+4 401	303,9	✓	288,8	✓	537,5	X	273	✓
Bureau R+4 402	436,2	X	415,3	X	741,4	X	388,7	✓

Bureau R+4 403	593,0	X	502,3	X	768,3	X	365,1	✓
Bureau R+4 404	567,1	X	452,9	X	622,4	X	293,7	✓
Salle de travail R+5	97,4	✓	60,9	✓	122,5	✓	18,6	✓
Bureau R+5 501	387,9	X	374,9	X	744,6	X	361,0	✓
Bureau R+5 503A	503,5	X	458,1	X	798,8	X	394,5	✓
Bibliothèque R+5	452,5	X	438,2	X	876,9	X	422,6	✓
Secretariat R+5	430,9	X	410,4	X	701,4	X	386,1	✓

6.12.1 Cas de climat actuel de Paris (été de base)

	Base		V1		V2		V3	
Espace	**DH projet**	**Cible TBD DH<350**	**DH projet**	**Cible TBD DH<350**	**DH projet**	**Cible TBD DH<350**	**DH projet**	**Cible TBD DH<350**
Accueil	32,2	✓	21,4	✓	77,3	✓	12,5	✓
Convivialité SS	50,9	✓	33,8	✓	60,5	✓	26,1	✓
Réunion SS	104,5	✓	66,0	✓	148,2	✓	62,4	✓
Bureau RDC 02C	306,0	✓	184,3	✓	347,2	✓	79,5	✓
Bureau RDC 002	291,9	✓	192,4	✓	400,5	X	104,9	✓
Bureau RDC 02B	463,2	X	325,9	✓	1088,5	X	188,1	✓
Bureau RDC 02A	113,4	✓	97,1	✓	338,6	X	82,2	✓
Bureau R+1 105	788,6	X	446,6	X	871,9	X	140,1	✓
Bureau R+1 104	876,1	X	581,0	X	1073,6	X	259,6	✓
Bureau R+1 103	281,2	✓	228,3	✓	491,8	X	170,1	✓
Bureau R+1 102	189,5	✓	166,3	✓	369,9	X	143,0	✓
Bureau R+1 101	118,3	✓	106,3	✓	177,4	✓	93,6	✓
Bureau R+2 201	117,2	✓	103,9	✓	211,1	✓	90,1	✓
Bureau R+2 202	189,6	✓	171,8	✓	446,6	X	152,7	✓
Bureau R+2 204	258,9	✓	221,3	✓	510,2	X	177,1	✓
Bureau R+2 205	871,4	X	592,0	X	1095,2	X	274,9	✓
Bureau R+2 206	1218,1	X	761,7	X	1347,3	X	271,0	✓
Bureau R+2 207	528,5	X	297,0	✓	622,2	X	105,5	✓
Bureau R+3 301	153,5	✓	136,2	✓	308,0	✓	117,0	✓
Bureau R+3 302	300,0	✓	243,4	✓	562,0	X	178,4	✓

Bureau R+3 303A	1174,4	X	773,4	X	1442,0	X	318,1	✓
Bureau R+3 303	1376,5	X	864,8	X	1529,0	X	305,4	✓
Bureau R+3 304	836,8	X	454,8	X	949,6	X	136,0	✓
Bureau R+4 401	120,2	✓	104,9	✓	286,3	✓	89,2	✓
Bureau R+4 402	272,9	✓	237,5	✓	607,7	X	195,0	✓
Bureau R+4 403	972,5	X	637,2	X	1286,0	X	267,1	✓
Bureau R+4 404	1157,7	X	686,4	X	1275,4	X	221,6	✓
Salle de travail R+5	420,0	X	242,0	✓	486,9	X	80,8	✓
Bureau R+5 501	123,0	✓	110,9	✓	395,9	X	97,7	✓
Bureau R+5 503A	396,5	X	305,4	✓	782,4	X	192,7	✓
Bibliothèque R+5	204,3	✓	186,9	✓	632,9	X	167,2	✓
Secretariat R+5	217,3	✓	189,8	✓	479,4	X	159,0	✓

6.12.2 Interprétation des résultats :

- En cas de canicule, seule la variante 3 satisfait les exigences du TBD. Les stores extérieurs sur les deux façades permettent d'éviter l'effet du vitrage.
- La variante 1 (store extérieur sur la façade ULM et contrôle solaire sur la façade Place du Panthéon) présente des résultats satisfaisants avec un DH conforme sur 72 % des espaces en cas de climat de base.
- L'option de base (selon la proposition des architectes) avec un store extérieur sur la façade ULM et un store intérieur sur la façade Place du Panthéon atteint un DH conforme dans 60 % des espaces en cas de climat de base.
- La variante 2 (stores intérieurs sur les deux façades) ne satisfait pas les exigences du TBD et constitue la solution la plus défavorable avec 25% des espaces dont le DH est conforme.

CONCLUSION

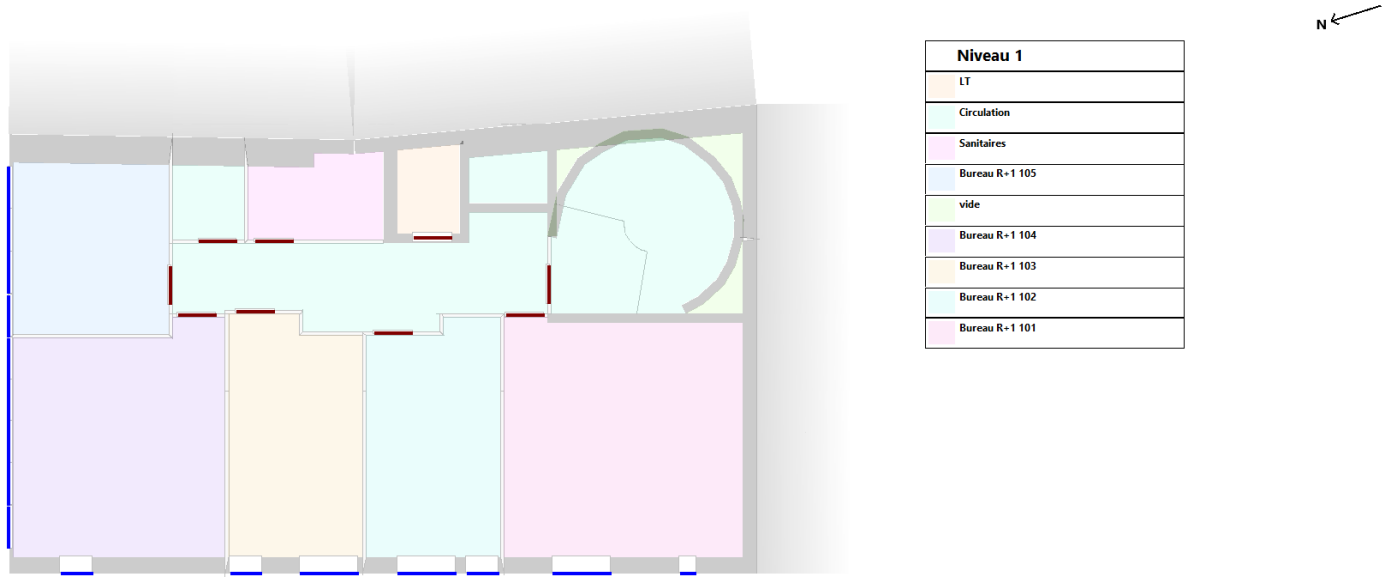
Les travaux de réfection des deux façades apportent une **amélioration du confort thermique** par rapport à l'état existantl malgré des températures intérieures maximales qui restent élevées (30-31°C avec le scénario climat de base).

En effet, l'isolation par intérieur ainsi que les doubles vitrages isolants (menuiseries et mur-rideau) permettent d'avoir un certain confort. Toutefois, et **afin de garantir les exigenges du TBD**, il est nécessaire, en plus des travaux d'isolation et de changement des menuiseries, d'opter pour les solutions suivantes :

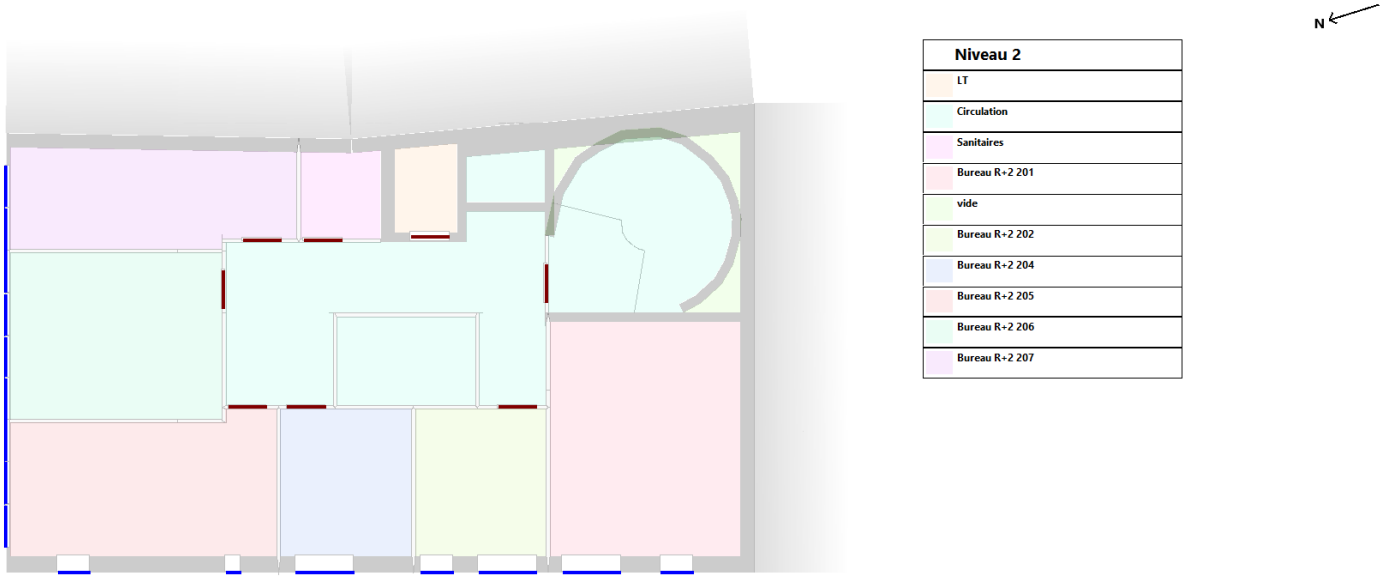
- Protection solaire en store extérieur pour les deux façades ;
- Ventilation naturelle (dans la mesure du possible) par l'ouverture des fenêtres pendant la période d'occupation.

Comme nous l'avons constaté sur le tableau de résultats des DH, **la variante 3** avec store extérieur sur les deux façades constitue la meilleure option, elle permet d'atteindre l'exigence du TBD sur l'ensemble des espaces du projet.

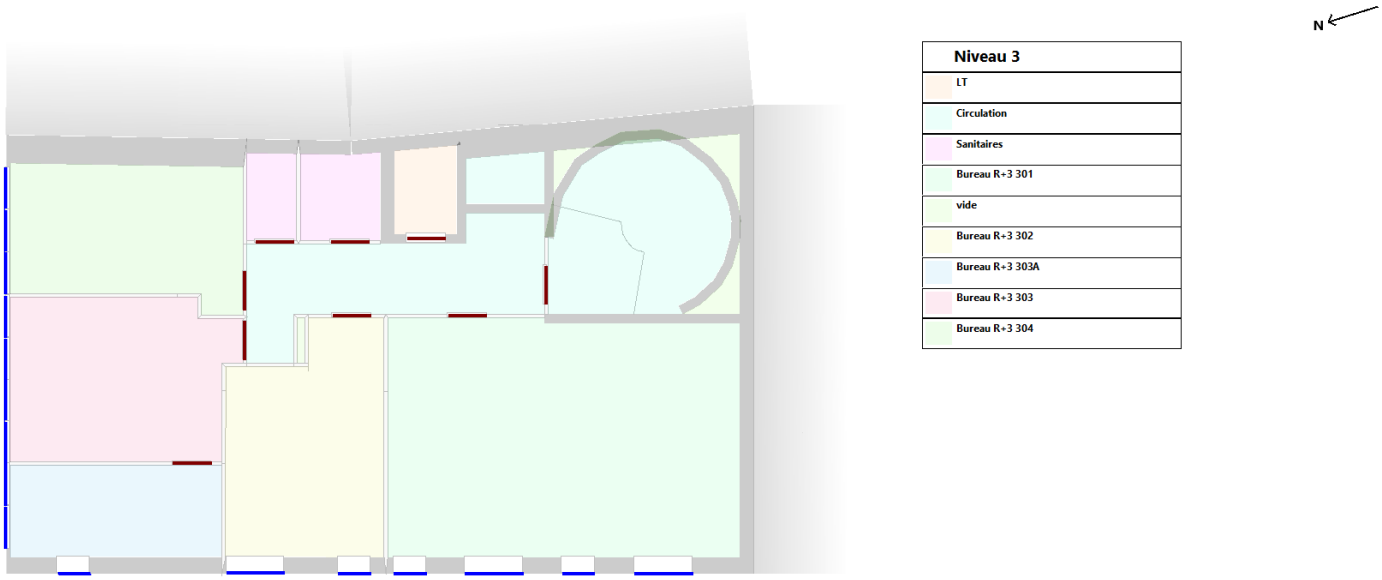
7. ANNEXE



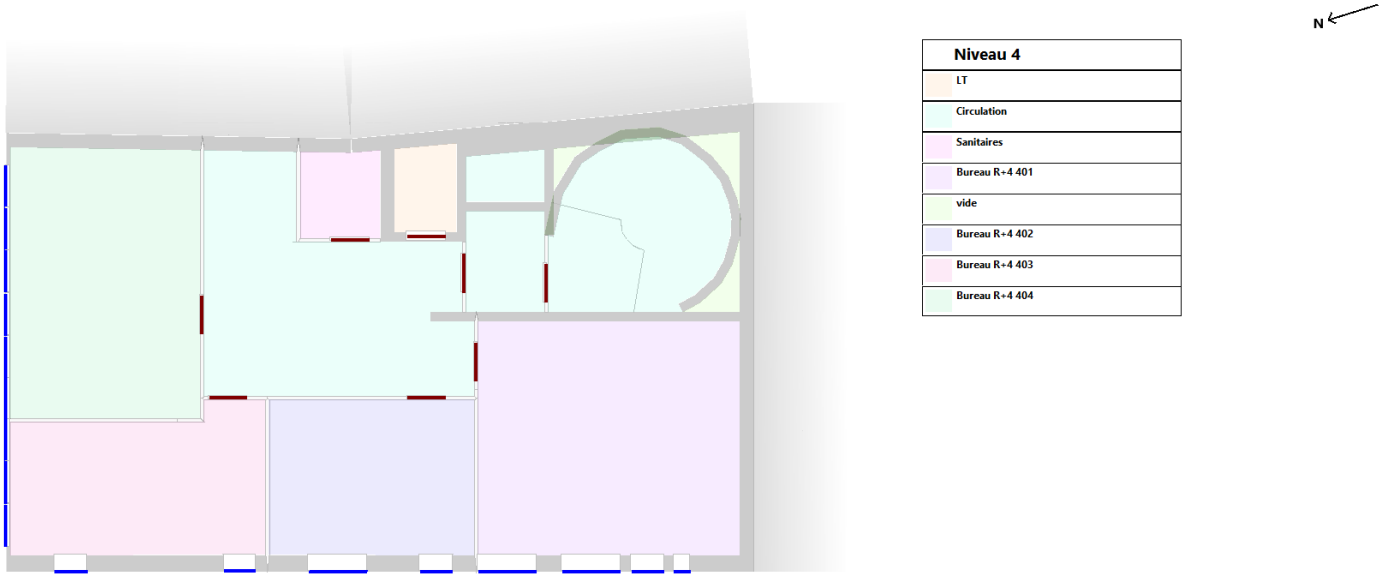
ZONAGE THERMIQUE DU R+1



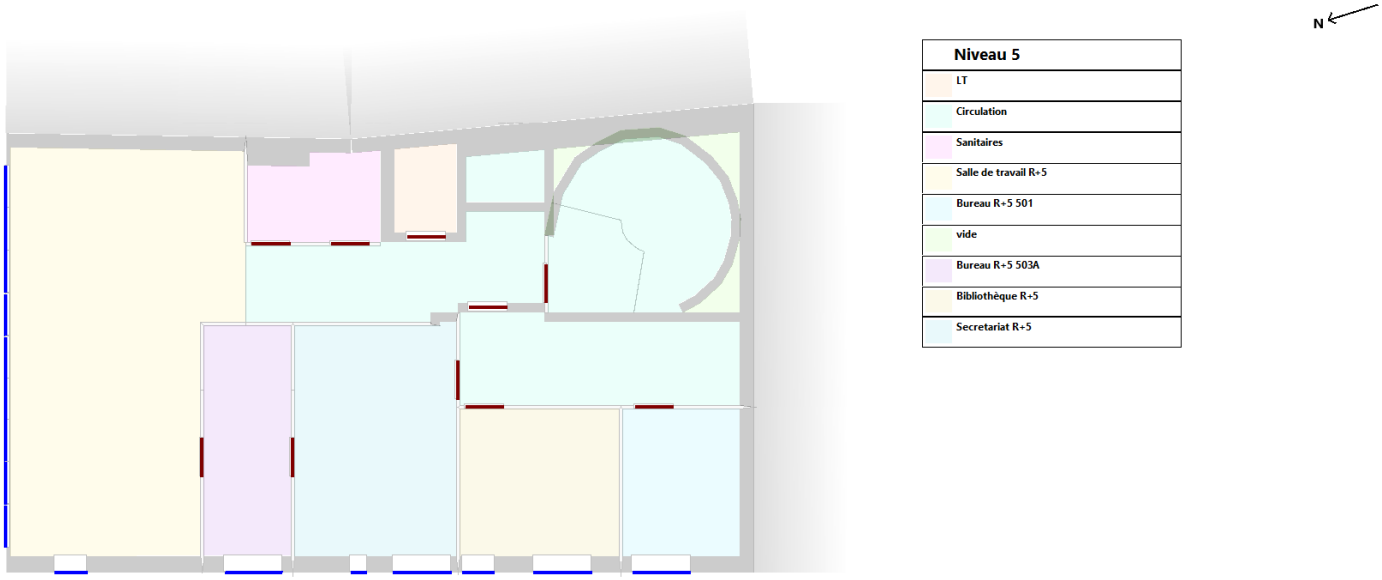
ZONAGE THERMIQUE DU R+2



ZONAGE THERMIQUE DU R+3



ZONAGE THERMIQUE DU R+4



ZONAGE THERMIQUE DU R+5