

Nos objectifs : inverser les tendances

Dans son étude sur les îlots de chaleur urbains à Paris [Apur], l'APUR met en évidence un écart d'environ 2°C sur les températures moyennes annuelles entre Paris (plus chaude) et le reste de l'Ile de France (plus froide), avec des écarts pouvant avoisiner 8°C sur les températures nocturnes instantanées (p.ex. lors de la canicule de 2003). Alors que les activités humaines contribuent déjà pour 20% à ce phénomène, les stratégies d'adaptation ne se sont pas révélées des plus sobres. Un doublement des consommations de climatisation des commerces parisiens a ainsi été constaté au cours des 20 dernières années (figure 1), traduisant en outre des exigences de confort thermique renforcées.

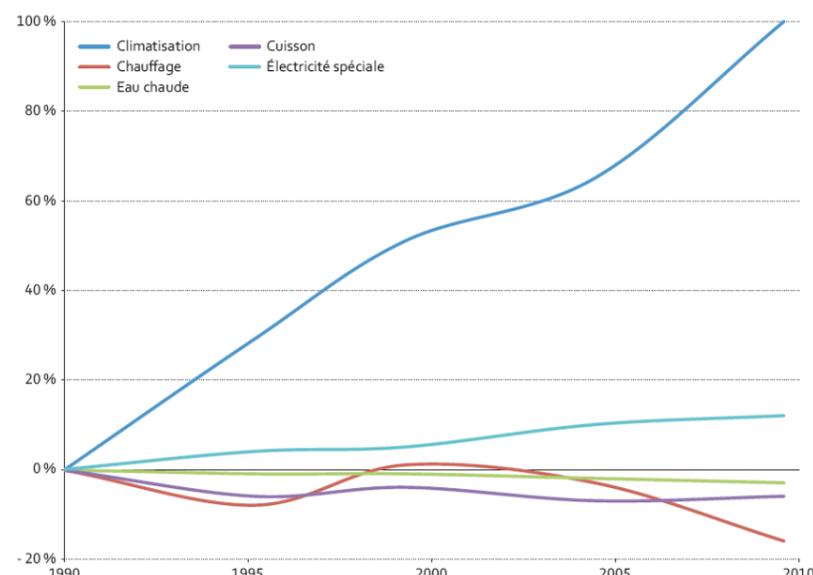


Figure 1 : Evolution des consommations d'énergie des commerces parisiens de 1990 à 2009 (source CEREN 2011)

Le plan climat de Paris [Paris] met ainsi en avant la nécessité d'améliorer la conception et la réhabilitation thermique des bâtiments en prenant en compte le confort d'été : orientation bioclimatique, ventilation, humidification, stores, volets, pare-soleil, puits canadien, meilleures propriétés réfléchissantes des matériaux, etc.

C'est dans cette optique que s'est opérée la conception environnementale du projet : garantir un confort maximum des usagers en minimisant les consommations d'énergie.

- Si cet objectif est facilement accessible en hiver (via une enveloppe isolée et étanche à l'air) il constitue un véritable challenge en été : de fait les consommations de chauffage diminuent et les consommations de refroidissement explosent (cf. figure 1).
- Par ailleurs la figure 1 révèle aussi une augmentation tendancielle de la consommation des équipements électriques alors même que

leur efficacité énergétique ne cesse de s'améliorer. La vocation du bâtiment étant résolument tournée vers les nouvelles technologies, il est apparu crucial de développer une stratégie de compensation.

En termes quantitatifs, les objectifs que nous nous fixons sont les suivants.

- Partie existante (auditorium et restaurant)
 - Objectif Effinergie Rénovation soit une consommation conventionnelle inférieure de 40% à la consommation de référence
 - Objectif de perméabilité à l'air fixé à 1.0 m3/h.m2
- Partie nouvelle (hôtel et workshop)
 - Objectif Effinergie+ soit un besoin bioclimatique et une consommation conventionnelle inférieurs de 20% et 40% aux valeurs de la réglementation thermique 2012
 - Objectif de perméabilité à l'air fixé à 1.0 m3/h.m2

Notre environnement

La conception est fondée sur une analyse approfondie des données climatiques et de l'environnement du projet.

Psychrométrie

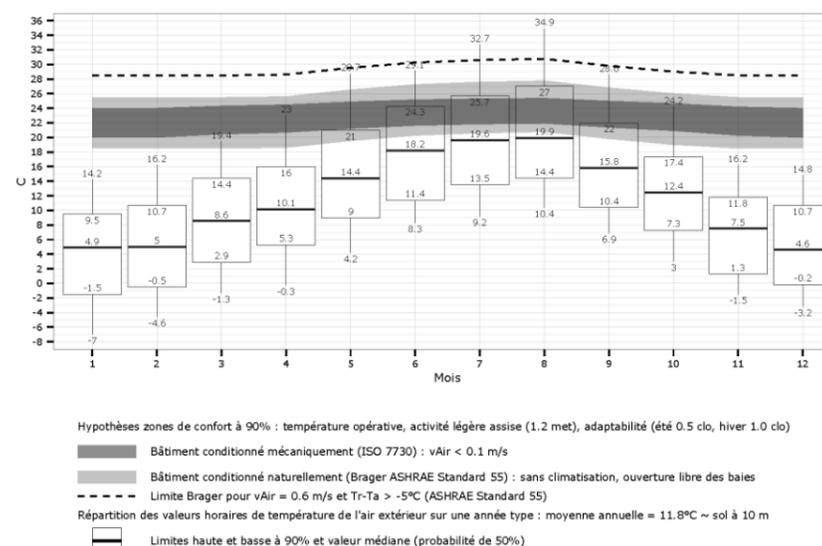


Figure 2 : Année type à Paris Montsouris – Distribution des températures de l'air extérieur

La figure 2 présente les températures de l'air extérieur au cours d'une année type à Paris Montsouris. Deux zones de confort thermique sont représentées :

- ISO 7730
 - Il s'agit de la zone de confort spécifiée par la norme [Iso7730] dans le cas de bâtiments conditionnés mécaniquement.
- Brager ASHRAE 55
 - Il s'agit de la zone de confort spécifiée dans le référentiel [Ashrae55] dans le cas de bâtiments ventilés naturellement par ouverture des baies (pour une vitesse d'air similaire à celle du scénario à ventilation mécanique).
 - La courbe en pointillés correspond à la limite haute de cette zone dans le cas où la ventilation naturelle conduit à des vitesses d'air de l'ordre de 0.6 m/s.

Pour retrouver les caractéristiques de l'air extérieur à l'intérieur d'un bâtiment, les taux (sécuritaires) de renouvellement d'air vont de 15 à 20 h-1 selon les caractéristiques du bâtiment et l'intensité des charges internes. Ces ordres de grandeur ne sont pas compatibles avec une bonne performance énergétique dans le cas d'un système mécanique qui, en outre, conduit à un réchauffement de l'air insufflé de 1.5 à 2°C du fait de la chaleur dissipée par le moteur du ventilateur. D'où la nécessité d'un refroidissement actif dans ce cas. En revanche ces taux sont tout à fait accessibles via un système de ventilation naturelle bien conçu. Les vitesses d'air sont alors supérieures à 0.6 m/s (la gêne n'apparaissant qu'autour de 2.5 m/s) et moins de 1% des heures d'occupation restent a priori inconfortables l'été. Toutefois la figure 3 montre que l'écart de température jour / nuit est au minimum de 8°C lorsque les températures dépassent 30°C en journée à Paris. Une conception valorisant ce différentiel de température (via une ventilation nocturne et une inertie suffisante) permet d'abaisser la température opérative de quelques degrés en dessous de la température d'air et de minimiser les risques d'inconfort résiduels.

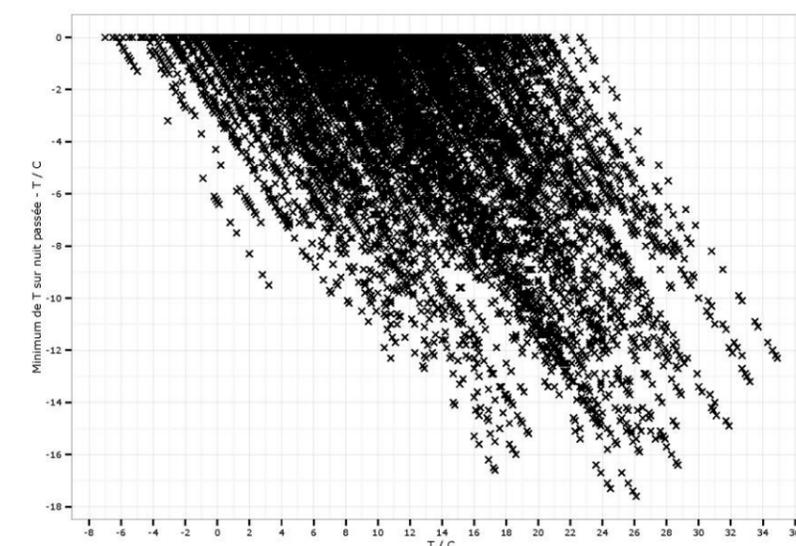


Figure 3 : Année type à Paris Montsouris – Ecart entre la température minimale au cours de la nuit passée et la température courante

Avec le climat parisien et compte tenu des usages prévus (permettant notamment l'hypothèse d'adaptabilité), nous n'identifions donc pas a priori de limite haute (en température extérieure) pour l'utilisation d'un tel procédé en vue du maintien du confort intérieur. La limite basse se situe au voisinage de 16°C et correspond à l'apparition des risques d'inconfort liés aux courants d'air froid. Le relais par un système mécanique est alors nécessaire, l'air extérieur restant utilisable par la centrale de traitement d'air pour un refroidissement en free-cooling. Le taux de fonctionnement annuel du système mécanique est ainsi estimé à 60% sur la plage 9h-24h (sans prise en compte des intermittences sur cette plage).

Vent

Les roses des vents déduites des observations Météo-France à la station de Paris-Montsouris montrent que la région est soumise à des vents dominants de secteur sud-ouest (surtout en été). Ces vents sont souvent assez forts et associés à des régimes maritimes. Avec une moindre fréquence, des vents de secteur nord-est sont relevés, généralement plus faibles et liés à des régimes continentaux (surtout en hiver). Les vents des secteurs sud-est et nord-ouest sont rares.

Les principaux masques locaux sont constitués par le bâtiment M10C (R+8 en vis-à-vis de la façade nord) et les immeubles de grande hauteur du quartier Massena-Bruneseau pour ce qui concerne la composante nord-est. La composante sud-ouest est quant à elle plus disponible, les bandes boisées en bordure du boulevard Massena étant les principaux obstacles.

Le design aérodynamique du procédé de ventilation privilégie donc la direction sud-ouest et fait l'hypothèse d'une façade nord complètement déventée du fait des bâtiments environnants.

Toutefois l'axe de développement du bâtiment (OSO-ENE) étant proche de la direction des vents dominants un design aérothermique doit être envisagé en complément.

Bruit

Les cartes de bruit dont nous disposons (cf. figure 4) datent de 2007 : elles ne prennent donc pas en compte la circulation apaisée du boulevard Massena consécutive à la mise en service du tramway (15/12/2012), ni les voies nouvelles du projet Massena-Bruneseau (patte d'oie).

Les cartes de bruit révèlent un classement du boulevard Massena en catégorie 3 (70 à 76 dB) soit un niveau de stress acoustique significatif en 2007. Une diminution de 5 à 10 dB liée au tramway est une hypothèse de projection réaliste qui ramène à un niveau de bruits courants.

Remarque : Le trafic est quasi-constant de 8 h à 21 h mais une tendance (de fond) à la décroissance du trafic sur les Maréchaux est constatée : 15000 à 30000 v/j en 2002, moins de 15000 v/j en 2012.

Nous retenons que la façade sud ne doit donc pas être fermée à tout prix mais que des dispositions de protection acoustique contre les bruits extérieurs sont néanmoins à étudier. Par ailleurs la façade nord peut être considérée bien abritée compte tenu du caractère semi-

piétonnier de l'extrémité de la rue Regnault et du développement de la façade en contrebas du boulevard, derrière la bande boisée.

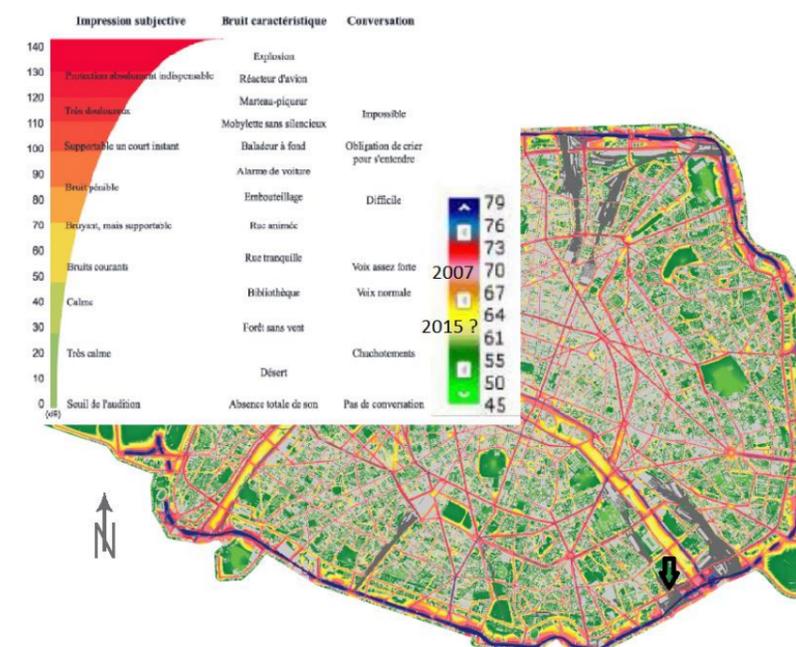


Figure 4 : Carte du bruit à Paris sur la plage de 6 à 18 h (source Mairie de Paris, 2007)

Pollution de l'air

Là encore les données disponibles (cf. figure 5) sont antérieures à la mise en service du tramway. Elles révèlent une exposition significative aux oxydes d'azote notamment et poussent en l'état à localiser les prises d'air neuf à distance du boulevard Massena.

Bilan

En synthèse nous disposons :

- d'une façade sud exposée au bruit, à la pollution et au rayonnement solaire ;
- d'une façade nord en contrebas du boulevard, séparée par une bande boisée, en vis-à-vis direct d'un bâtiment de 8 niveaux et donc bien protégée du bruit, de la pollution, du rayonnement solaire et du vent... en bref un véritable puits climatique à ciel ouvert.

Malgré une exposition plus probable aux vents dominants la façade sud est donc privilégiée en extraction et la façade nord en admission.

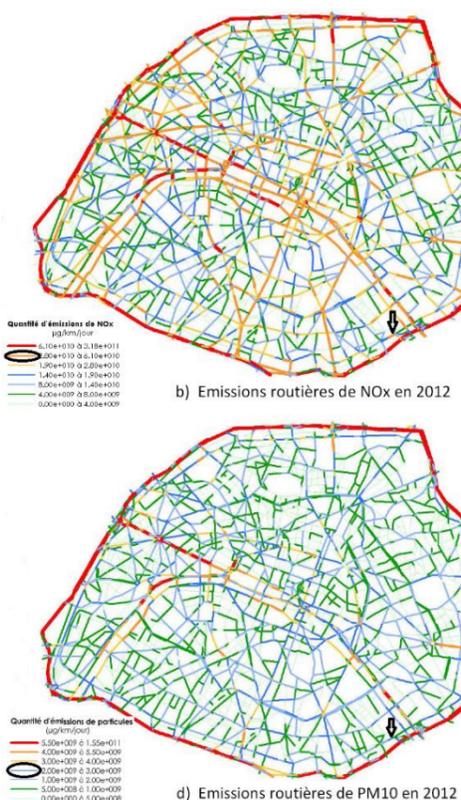


Figure 5 : Carte des polluants de l'air à Paris (source AirParif, 2012)

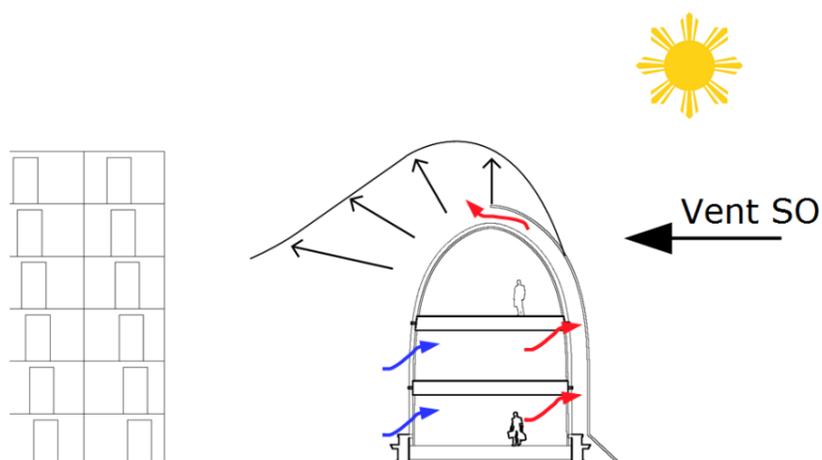
Notre solution : un système ultra-hybride

Au cœur du design : une double peau photovoltaïque ventilée naturellement et recouvrant partiellement la façade sud et la toiture. Le bâtiment a donc son cœur à l'extérieur ! Un organe assurant les fonctions vitales suivantes.

Extraction aéraulique

Dès que les apports solaires compensent les déperditions dans le volume tampon formé par la double peau, un différentiel positif de température avec l'air intérieur apparaît, favorable à l'extraction d'air. L'extraction mécanique peut être mise hors service au profit d'une extraction naturelle (mode hybride).

A noter que l'extraction est grandement favorisée par le profil aérodynamique de la double peau en toiture qui permet l'utilisation des vents dominants de sud-ouest en générant une forte portance. Le risque de reflux par les vents de nord-est est exclu compte tenu des masques environnants : autrement dit s'il y a un minimum de vent, son effet viendra toujours se conjuguer avec le tirage thermique, jamais s'y opposer.



A mi-saison, lorsque l'air extérieur est suffisamment chaud pour être utilisé directement, l'insufflation mécanique est elle aussi mise à l'arrêt. Les locaux publics fonctionnent alors sans aucun appoint mécanique, en mode purement naturel.

Le chargement thermique de la façade sud au cours de la journée permet de prolonger le phénomène de tirage au-delà des plages d'ensoleillement et d'organiser ainsi une ventilation nocturne, favorisée par d'éventuelles brises thermiques.

Ce mode est opérationnel en été lors des jours les plus chauds. L'étude [Prebat] montre qu'un écart de température de 10°C est atteint entre l'espace tampon de la double peau et l'extérieur (soit encore davantage par rapport à l'intérieur) au cours de journées ensoleillées et peu ventées où la température extérieure dépasse 30°C. Un tel écart suffit pour réaliser les taux de renouvellement d'air cibles (15 h-1) avec une hauteur de tirage supérieure à 5 m. Le confort est alors obtenu par des vitesses d'air accrues (de l'ordre de 1 m/s), des parois lourdes refroidies par ventilation nocturne et, au-delà, par cette impression inouïe d'être à l'air libre à l'intérieur.

Production électrique

Les cellules photovoltaïques intégrées à la double peau offrent une surface capteuse d'environ 350 m², dont 2/3 en façade sud et 1/3 en toiture. La puissance crête mise en œuvre est de l'ordre de 40 kW.

L'intégration des cellules en façade diminue leur rendement moyen d'environ 30% par rapport à une inclinaison fixe optimale. Toutefois la ventilation de la façade en été conduit à un abaissement de la température des cellules de l'ordre de 20°C [Prebat] avec un gain retour sur le rendement de l'ordre de 10%.

La production moyenne de notre centrale solaire est donc estimée à environ 30 000 kWh/an soit 45 kWh/m².an.

Protection solaire

L'intégration des modules photovoltaïques en façade sud est réalisée selon un schéma limitant l'incidence directe du rayonnement solaire sur

les baies en saison chaude. Le rayonnement solaire ne contribue donc pas significativement aux apports en été.

En revanche le schéma d'intégration favorise les apports solaires en hiver, en profitant de l'angle au zénith plus important sur les périodes d'irradiation de la façade sud. Des stores intérieurs manuels sont prévus pour éviter les risques d'éblouissement.

La double peau agit donc finalement comme un procédé de conversion hautement sélective du rayonnement solaire. Elle le transforme en énergie électrique tout en favorisant et en valorisant la dissipation thermique :

- pour le chauffage du volume tampon en mi-saison et en été – nécessaire aux fonctions de ventilation et de refroidissement ;
- pour le chauffage du volume habitable en hiver – contribuant à la diminution des besoins de chaleur.

Protection thermique

En saison froide la double peau n'est plus ventilée : les ouvrants prévus en partie basse et en partie haute sont en position fermée.

Elle constitue alors un volume tampon présentant une température moyenne supérieure à celle de l'air extérieur grâce aux apports solaires et réduisant d'autant les déperditions.



Par ailleurs elle protège la façade des vents forts de secteur sud-ouest et limite donc :

- les effets convectifs de surface (pouvant typiquement représenter 20% des pertes par transmission dans le cas d'une paroi vitrée exposée) ;
- la pression dynamique (due au vent) sur le mur sud et donc les infiltrations d'air par défaut d'étanchéité.

A titre d'illustration la documentation [Aperam] mentionne une réduction des déperditions de l'ordre de 30% en saison froide (sur la base d'une étude de cas par simulation).

Protection acoustique

La double peau protège efficacement le bâtiment du bruit généré par le boulevard Massena. Elle offre ainsi la possibilité de développer des ouvrants en façade sud pour optimiser la ventilation naturelle. En hiver elle offre l'agrément d'un espace tampon bioclimatique sur lequel les baies peuvent être ouvertes.

Nos choix de principe

Traitement des locaux

Auditorium

L'auditorium est traité par dalle active et ventilation. La dalle active assure l'essentiel des besoins (taux de couverture visé : 70%), la ventilation assure le complément et la régulation de température intérieure.



Le grand intérêt de la dalle active réside dans son inertie.

- Contrairement à un plancher chauffant désolidarisé de la dalle par un isolant, la dalle active intègre au sein même du béton le réseau de circulation.
- Il en résulte une bien meilleure inertie utile pour le local et donc des pics de température amortis et déphasés par rapport aux pics de charges thermiques.
- De plus la constante de temps de ce type de système est de l'ordre de la journée ce qui permet un foisonnement des puissances et donc un gain sur le dimensionnement de la production. Autrement dit le système peut être chargé la nuit uniquement et diffuser passivement en journée où les systèmes d'appoint n'ont plus qu'à traiter les besoins résiduels.
- Avec une diffusion par rayonnement associée à un faible écart de température entre la surface de la dalle et l'ambiance, ce type de système est réputé pour la qualité de l'ambiance thermique créée.

La ventilation est réalisée par une centrale de traitement d'air à recyclage, à débit variable (sur régulation de température) et débit d'air neuf minimal variable (sur régulation de qualité de l'air) avec automatisme de free-cooling.

L'auditorium est raccordé au procédé de ventilation naturelle via une gaine maçonnée cheminant dans le volume chauffé. L'amenée d'air (au nord) et l'extraction (au sud) se font via des registres motorisés à lames isolées offrant en position fermée une très bonne étanchéité à l'air et un coefficient de transmission thermique inférieur à 1 W/m².K. Ils constituent en outre une protection contre l'intrusion et les intempéries et autorisent donc la ventilation nocturne.



L'extraction mécanique est mise hors service dès que l'extraction par la double peau est active et que le recyclage n'est plus nécessaire – soit environ 60% du temps sur une année type.

Le soufflage mécanique est mis hors service dès que l'air extérieur peut être utilisé sans prétraitement – soit environ 40% du temps sur une année type.

Restaurant

Le restaurant fonctionne selon les mêmes principes que ceux mis en œuvre pour l'auditorium : dalle active assurant l'essentiel des besoins, ventilation assurant le complément et la régulation de température intérieure.

Toutefois des ouvrants manuels (type oscillo-battant à panneau opaque isolant) sont prévus pour la gestion de l'amenée d'air et de l'extraction en mode naturel. La ventilation mécanique est mise hors service sur détection de leur ouverture. Des grilles à louveres fixes sont prévus en façade au droit de ces ouvrants, comme dispositif pare-pluie et anti-intrusion. La ventilation nocturne est donc permise.



Chambres d'hôtel

Les chambres d'hôtel sont traitées par des poutres climatiques intégrées en faux plafond qui ne nécessitent pas de ventilateurs terminaux (atout vis-à-vis de l'énergétique, de l'acoustique et de l'entretien/maintenance) et requièrent des débits de ventilation largement inférieurs à ceux d'une ventilation classique par mélange (phénomène d'induction).

Les gaines de soufflage et de reprise sont équipées de registres modulants autorisant trois modes de fonctionnement.

- Arrêt total
 - En cas d'absence ou d'ouverture des baies la ventilation et la circulation d'eau dans les batteries sont mises hors service.
- Ventilation hygiénique
 - En l'absence de demande de chaud ou de froid, le débit de ventilation est abaissé au débit hygiénique.
- Induction
 - Mode de fonctionnement normal en cas de demande de chaud ou de froid

La centrale de traitement d'air alimentant les poutres est de type tout air neuf avec récupérateur de chaleur et régulation de pression au soufflage et à la reprise par variation de vitesse des ventilateurs.

Workshop

Les salles de coworking sont traitées par des poutres climatiques selon les mêmes principes que ceux mis en œuvre pour les chambres d'hôtel.

Les locaux sont raccordés au procédé de ventilation naturelle via des ouvrants manuels (type oscillo-battant à panneau opaque isolant) à l'instar du restaurant. Leur ouverture entraîne la fermeture des registres de soufflage et de reprise ainsi que des vannes terminales des poutres.

Systèmes de production

Le choix de systèmes de production électriques découle logiquement des capacités d'auto-production du bâtiment. Les systèmes d'émission envisagés (dalles actives, poutres climatiques) requièrent en outre des régimes de température modérés, tout à fait favorables à l'utilisation de procédés thermodynamiques.

La production de chaleur et de froid est assurée par une PAC électrique réversible de type air/eau. La PAC alimente un réseau deux tubes fonctionnant en change over sur un seuil de température extérieure.

La production d'eau chaude sanitaire est assurée par un préparateur thermodynamique couplé à la double peau par vecteur eau (type Heliopac) ou air (raccordement de l'évaporateur au volume tampon) selon les conclusions à venir de notre étude de faisabilité.

Options de retrofit

En base la conception ne prévoit pas de contribution de la ventilation mécanique à la reprise des charges thermiques dans les locaux publics dès lors que l'air extérieur est à une température suffisamment élevée pour être introduit directement.

Toutefois si les usages, les exigences de confort ou même le climat évoluent, des solutions de repli sont disponibles du fait des principes fonctionnels adoptés. En effet les batteries des centrales de traitement d'air sont prévues compatibles avec le change-over régissant le fonctionnement de la production. Il suffit donc de reprogrammer les régulateurs associés pour une utilisation directe en mode refroidissement, en exploitant les marges de dimensionnement du système de production.

Optimisation de l'enveloppe

Bâti existant

Les murs de soutènement ainsi que la façade sud (pour maximiser le chargement thermique diurne et prolonger l'effet de tirage) sont traités par une isolation rapportée par l'intérieur. Pour compenser la perte d'inertie, des cloisons lourdes (type carreaux de terre cuite) sont prévues. La même disposition est envisagée pour les cloisons de distribution.

Les autres façades sont traitées par l'extérieur afin de conserver le maximum d'inertie. Le traitement des ponts thermiques à la jonction des parois isolées différemment se fait par retour d'isolant (manchonnage).

Le plancher bas est isolé en sous-face de dalle. Les dalles béton des planchers intermédiaires sont laissées nues en sous-face avec des panneaux acoustiques suspendus disjoints (et verticaux dans l'auditorium).

Les murs existants maçonnés sont revêtus en face intérieure d'un enduit technique d'étanchéité (type MonoAir) en double couche croisée pour le traitement de la perméabilité à l'air.

Les caractéristiques des baies (p.ex. triples vitrages en façade nord) seront précisées en avant-projet.

Extension du bâtiment en socle

Le traitement thermique de la structure béton est identique est celui du bâti existant. Le traitement de l'étanchéité à l'air est réduit aux jonctions avec les menuiseries et aux traversées des fluides.

Extension du bâtiment en surélévation

Une isolation répartie dans les modules d'habillage de la structure métallique est envisagée. L'étanchéité à l'air est prise en charge par le pare-vapeur (à lés jointoyés).

La surface de faux-plafonds dans les chambres d'hôtel est dimensionnée pour les besoins d'intégration des équipements techniques, la surface complémentaire est prévue en dalle nue afin de maximiser l'inertie.

Contrôle strict des charges internes

Compte tenu du procédé de ventilation naturelle envisagé pour le maintien des conditions de confort en saison chaude, une vigilance particulière doit s'exercer sur les puissances d'éclairage et d'équipement installées ainsi que sur les automatismes associés.

Ainsi un objectif de 6 W/m² de puissance d'éclairage nominale est visé dans l'ensemble des locaux publics. L'éclairage scénique de l'auditorium sera réalisé via des projecteurs LED.

Des automatismes d'arrêt de l'éclairage sur détection d'absence (allumage manuel, extinction automatique) et de gradation sur seuil d'éclairement seront mis en œuvre.

L'éclairage naturel sera favorisé par la mise en œuvre de vitrages clairs en façades sud (protection solaire par la double peau) et nord ainsi que par une fraction vitrée optimale dans les parties nouvelles.

Références

Aperam	Présentation du système SolarStyl. Aperam Alloys Imphy, 2013.
Apur	Les Ilots de Chaleur Urbains à Paris. Cahier #1, APUR, 2012.
Ashrae55	Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Standard 55-2013, ASHRAE, 2013.
Iso7730	Ergonomie des ambiances thermiques. NF EN ISO 7730, AFNOR, 2006.
Paris	Plan Climat Energie de Paris – Actualisation 2012. Adopté par le Conseil de Paris du 11 décembre 2012.
Prebat	Etude expérimentale comparative de trois composants photovoltaïques intégrés au bâtiment en configuration double-façade naturellement ventilée. L. Gaillard et al. PREBAT ADEME, 2013.