

Audit énergétique

Rapport de synthèse



Audit énergétique des bâtiments

Musée de l'Air et de l'Espace

MAÎTRE D'OUVRAGE

Musée de l'air et de l'Espace

Aéroport de Paris - Le Bourget
CS 90005 - 93352 Le Bourget cedex

MUSÉE
AIR +
ESPACE
AÉROPORT PARIS – LE BOURGET

EVOLUTION DU DOCUMENT

Document

N/Réf.	Ind.	Date	Rédacteur	Action
PAS.IN.AU039	A	19/09/2023	HAL	Rédaction
		07/11/2023	CDR	Relecture

Sommaire

1. PREAMBULE	4
1.1. Contexte	4
1.2. Interlocuteurs	5
1.3. Visites de site	5
1.4. Identification du site	5
1.5. Plan masse	6
1.6. Energies et usages	7
2. REFERENTIEL	8
2.1. Performance globale	8
2.1.1. RT « globale »	8
2.1.2. Niveau de labélisation	8
2.1.3. Objectifs décret tertiaire	8
2.2. Performance élément par élément	9
2.2.1. RT « élément par élément »	9
2.2.2. Niveau CEE	9
3. ETAT DES LIEUX	10
3.1. Enveloppes des bâtiments	10
3.2. Equipements techniques	11
3.2.1. Chauffage	11
3.2.2. Refroidissement	12
3.2.3. Traitement d'air	12
3.2.4. Eclairage	14
4. CONSOMMATION DE REFERENCE	16
4.1. Consommations d'électricité	16
4.1.1. Compteur MAE(159-167-49)bis	16
4.1.2. Compteur Hall Concorde	16
4.1.3. Compteur site Dugny	17
4.2. Consommations de RCU	18
4.2.1. Sous-stations 49S et 49N	18
4.2.2. Sous-stations S6/7	19
4.2.3. Sous-stations S8/9	19
4.3. Consommations de gaz naturel	20
5. MODELISATION ENERGETIQUE	21
5.1. Bilan des consommations annuel par type d'énergie	21
5.2. Bilan des consommations annuel par usage	21
5.3. Comparaison des consommations théoriques aux consommations réelles	22
6. PROGRAMMATION ENERGETIQUE	23
6.1. Programmes de travaux par bâtiment	23
7. PRECONISATION A L'ECHELLE DU SITE	24

7.1. Mise en place des panneaux photovoltaïques.....	24
7.2. Mise en place d'une pompe à chaleur sur géothermie	29
8. SCENARIO DE TRAVAUX A L'ECHELLE DU SITE.....	32

1. PREAMBULE

1.1. Contexte

Le présent rapport concerne les audits énergétiques et des études sur les systèmes de chauffage – ventilation. Il a pour objet d'une récapitulation globale des résultats présentés dans les rapports audits détaillés de chaque bâtiment.

Les audits énergétiques seront conformes à la norme 16247 et viseront les objectifs du décret tertiaire à l'horizon 2030 (-40%) à l'échelle du site, et si possible par bâtiment.

La liste des bâtiments audités est la suivante :

	Surface	Usage	Type de chauffage / ventilation à l'existant
HM2	3 401	Ateliers, bureaux et logements	Chauffage panneaux rayonnants, radiateurs et aérothermes sur chaufferie gaz Chauffage logements par radiateurs électriques
Hall F	3 121	Musée	Chauffage par air sur RCU
Hall E	2 902	Musée	Chauffage par air sur RCU
Hall Ebis	1 251	Musée	Chauffage par aérothermes sur RCU
Hall C/D	5 489	Musée	Chauffage par air sur RCU
Béchat	3 000	Hall de stockage conditionné	Chauffage/Climatisation par air sur PAC
Bermuda	1 885	Ateliers	Chauffage par rampes radiantes gaz et aérothermes à gaz
Aérogare	19 005	Musée et restauration	Chauffage par air et émetteurs d'eau chaude sur RCU
Plané NN	262	Musée	Chauffage par air sur batterie chaude de CTA
Concorde	3 507	Musée / salle de réception	Non-chauffé hors événements (chauffage externe)

1.2. Interlocuteurs

MUSEE DE L'AIR ET DE L'ESPACE		
Christel MEYRE Responsable de pôle BMI	06 75 04 25 43	christel.meyre@museeairespace.fr
Guido BOROLI Chargé de projet bâtiment Pôle bâtiment, maintenance et infrastructure	01 49 92 70 80	guido.boroli@museeairespace.fr
NEPSSEN		
Christophe DELFOUR Responsable projet	06 08 42 88 43	christophe.delfour@nepsen.fr
Khoa Huu Anh LE Ingénieur étude	01 60 15 01 35	huu-anh-khoa.le@nepsen.fr

1.3. Visites de site

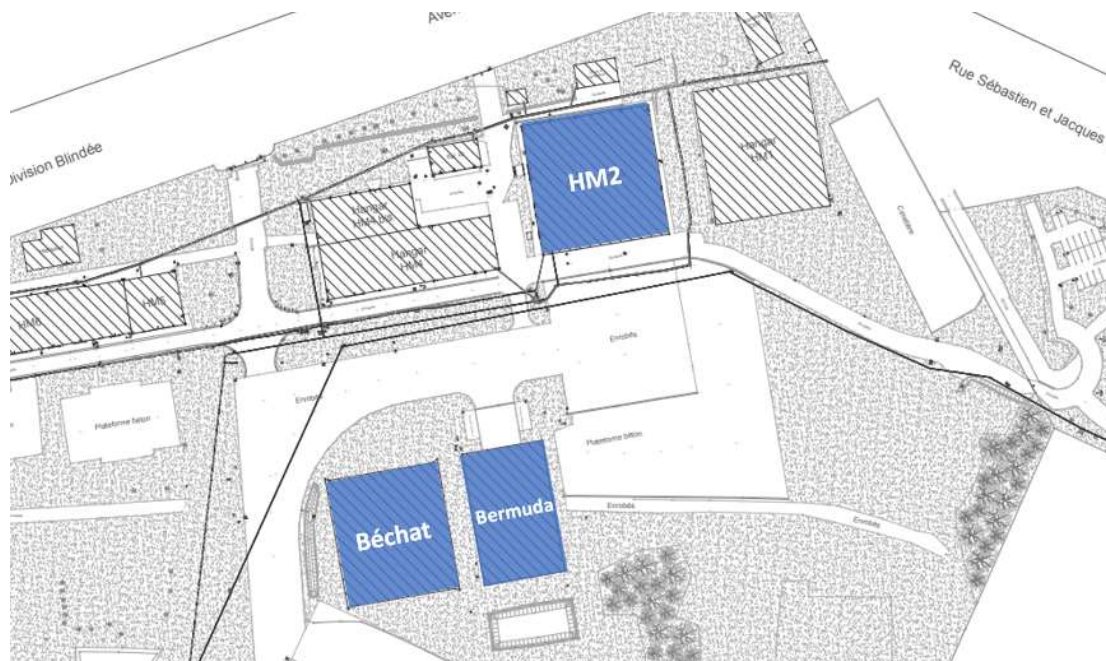
DATE	OBJET	COMMENTAIRE
10/05/2023	Visite technique	Visite générale de site - hors Dugny
05/07/2023	Visite technique complémentaire	Visite spécifique sur bâtiment 26, HM2 et chaufferie gaz centrale
17/08/2023	Visite technique complémentaire	Visite spécifique sur bâtiments Béchat, Bermuda et locaux techniques CTA halls

1.4. Identification du site

RENSEIGNEMENTS SUR LE SITE	
Site BOURGET	
Adresse	Aéroport de Paris – Le Bourget, 93352 Le Bourget
Bâtiments concernés	Aérogare, hall E, hall F, hall Ebis, hall C/D, hall Concorde
Horaires d'occupation	Selon l'ouverture de musée Mardi au Dimanche, 10h au 18h
Energies utilisées	Electricité, Réseau de chaleur
Site DUGNY	
Adresse	Aéroport de Paris – Site Dugny 1 Av. de la 2ème Division Blindée, 93440 Dugny
Bâtiments concernés	Béchat, Bermuda, hall HM2
Horaires d'occupation	Lundi au Vendredi, 8h au 18h
Energies utilisées	Electricité, Gaz

1.5. Plan masse

Plan masse du site Bourget



Plan masse du site Dugny

1.6. Energies et usages

Le tableau ci-dessous représente les énergies intervenantes et les usages énergétiques associés :

	Réseau de chaleur		Gaz		Electricité	
	Usage	Compteur	Usage	Compteur	Usage	Compteur
Hall F	Chauffage	S 6/7	-	-	Auxiliaires CTA, Eclairage	MAE (159-167-49)bis
Hall E	Chauffage		-	-	Auxiliaires CTA, Eclairage	
Hall Ebis	Chauffage		-	-	Auxiliaires CTA, Eclairage	
Hall C/D	Chauffage	S 8/9	-	-	Auxiliaires CTA, Eclairage	
Aérogare	Chauffage	49N et 49S	-	-	Climatisation, Auxiliaires CTA, Eclairage, Bureautique	
Plané NN	-	-	-	-	Chauffage, Auxiliaires CTA, Eclairage	Hall Concorde
Concorde	-	-	-	-	Eclairage	
Béchat			-	-	Chauffage, Climatisation, Auxiliaires CTA, Eclairage	Site Dugny
HM2			Chauffage	Gaz Dugny	Chauffage, Auxiliaires ventilation, Eclairage, Spécifique	
Bermuda			Chauffage		Chauffage, Auxiliaires CTA, Eclairage, Spécifiques	

2. REFERENTIEL

2.1. Performance globale

2.1.1. RT « globale »

La réglementation thermique pour les bâtiments existants dite « globale » (RT Ex Globale) (décret du 29 décembre 2011 modifiant l'arrêté du 13 juin 2008) s'applique aux bâtiments existants qui respectent les critères suivants :

- Achèvement de la construction après 1948,
- Surface de plancher est supérieur à 1 000 m²,
- Coûts des travaux énergétiques de réhabilitation sont supérieurs à 25% de la valeur conventionnelle de l'immeuble.

Cette réglementation impose des exigences de résultats et de moyens tels que définis dans l'arrêté du 13 juin 2008 mentionné précédemment, justifiés par une étude thermique dite conventionnelle selon la méthode de calcul THCE-Ex non réalisée dans le cadre cette étude.

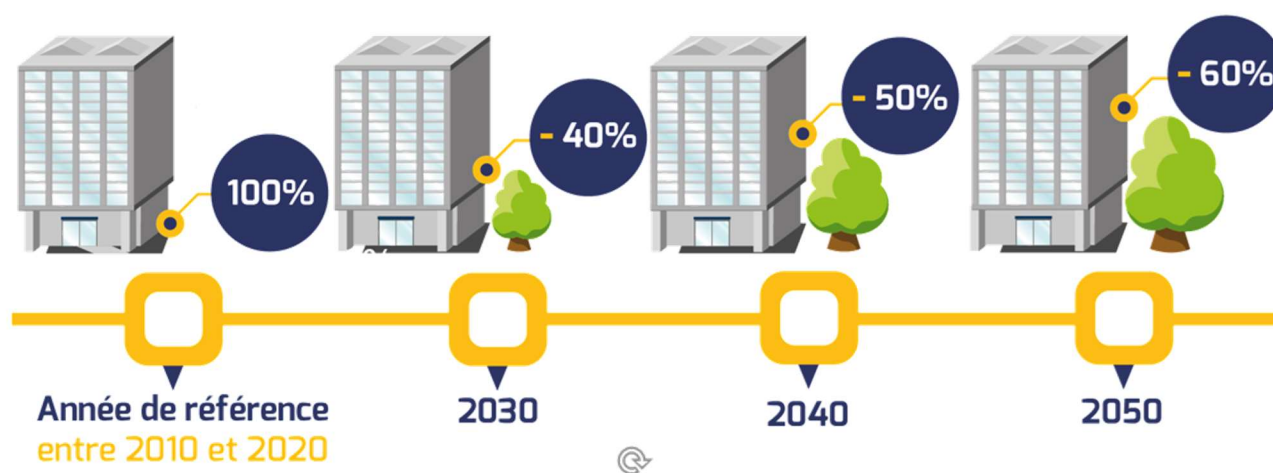
2.1.2. Niveau de labélisation

Le calcul conventionnel THCE-Ex permet également de niveaux de performances des labels d'état comme HPE-Rénovation ou BBC-Rénovation.

2.1.3. Objectifs décret tertiaire

La loi ÉLAN impose une **réduction de la consommation énergétique du parc tertiaire français**, en introduisant l'article L111-10 dans le Code de la Construction et de l'Habitation : « **Tout bâtiment, partie de bâtiment ou ensemble de bâtiments** soumis à l'obligation doit atteindre, pour chacune des années 2030, 2040 et 2050, un des objectifs suivants :

1° Soit un niveau de consommation d'énergie finale réduit, respectivement, **de 40 %, 50 % et 60 % par rapport à une consommation énergétique de référence qui ne peut être antérieure à 2010** ;



2° Soit un niveau de consommation d'énergie finale **fixé en valeur absolue**, en fonction de la consommation énergétique des bâtiments nouveaux de leur catégorie. »

Les textes d'application déjà connus sont :

- Le décret n°2019-771 du 23 juillet 2019 = « *Décret Tertiaire* »
- L'arrêté du 10 avril 2020 = « *Arrêté Méthode* »
- L'arrêté du 24 novembre 2020 modifiant l'arrêté du 10 avril 2020 = « *Valeurs Absolues I* »
- L'arrêté du 13 avril 2022 modifiant l'arrêté du 10 avril 2020 = « *Valeurs Absolues II* »

Les textes d'application à venir sont :

- Un troisième arrêté modifiant l'arrêté du 10 avril 2020 = « *Valeurs Absolues III* » attendu pour le courant du second semestre 2022

Cabs = CVC + USE

- **USE** : Consommation énergétique relative aux usages spécifiques, propre à l'activité et aux usages immobiliers
- **CVC** : Consommation énergétique liée rythme d'utilisation de référence, fonction de la zone climatique et de l'altitude

2.2. Performance élément par élément

2.2.1. RT « élément par élément »

La réglementation thermique pour les bâtiments existants dite « élément par élément » (arrêté du 22 mars 2017 modifiant l'arrêté du 3 mai 2007) impose, dans le cadre d'une intervention sur un élément du clos et couvert, le minimum de performances suivantes pour la zone climatique de l'immeuble étudié (valeurs en vigueur au 01/01/2023) :

- Mur sur extérieur : résistance thermique totale $R \geq 3,2 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Mur en contact avec un volume non chauffé : résistance thermique totale $R \geq 2,5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Toiture-terrasse : résistance thermique totale $R \geq 4,5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Plancher de combles perdus : résistance thermique totale $R \geq 5,2 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Rampants de toiture : résistance thermique totale $R \geq 5,2 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Plancher bas : résistance thermique totale $R \geq 3 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Menuiserie extérieure : conductivité thermique $U_w \leq 1,9 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$.

Note : la conductivité thermique U (en $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$) est l'inverse de la résistance thermique : $U = 1/R$.

2.2.2. Niveau CEE

Dans le cadre de la recherche d'un niveau de performance globale, et la mobilisation éventuelle de CEE pour le secteur « tertiaire », les niveaux performants suivants sont visés :

- Mur sur extérieur : résistance thermique totale $R \geq 3,7 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Mur en contact avec un volume non chauffé : résistance thermique totale $R \geq 2,5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Toiture-terrasse : résistance thermique totale $R \geq 4,5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Plancher de combles perdus : résistance thermique totale $R \geq 6 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Rampants de toiture : résistance thermique totale $R \geq 6 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Plancher bas : résistance thermique totale $R \geq 3 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$;
- Menuiserie extérieure : conductivité thermique $U_w \leq 1,5 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$ et facteur solaire $Sw \leq 0,15$ pour les fenêtres de toiture ; conductivité thermique $U_w \leq 1,3 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$ et facteur solaire $Sw \leq 0,35$ pour les autres fenêtres ou portes-fenêtres.

Note : la conductivité thermique U (en W/(m².K)) est l'inverse de la résistance thermique : $U = 1/R$.

3. ETAT DES LIEUX

Cette partie est pour objet de la présentation globale des bâtiments et les équipements dans le périphérique de l'étude.

3.1. Enveloppes des bâtiments

ETAT DE LIEU DES ENVELOPPES		
Bâtiment	Descriptif	Performance
Hall F	Hangar d'exposition à ossature métallique Absence d'isolant thermique en général Menuiseries aluminium double-vitrage 4/6/4 Les polycarbonates de toiture en état dégradée	Bâtiment énergivore
		Evaluation : 
Hall E	Hangar d'exposition à ossature métallique Absence d'isolant thermique en général Menuiseries aluminium double-vitrage 4/6/4 Les polycarbonates de toiture en état dégradée	Bâtiment énergivore
		Evaluation : 
Hall Ebis	Hangar d'exposition à ossature métallique Le hall est une extension créée en 2006-2007 Les éléments de l'enveloppe sont supposés faiblement isolés	Performance moyenne
		Evaluation : 
Hall C/D	Hangar d'exposition en béton armé avec charpente métallique Absence d'isolant thermique en général Menuiseries aluminium double-vitrage 4/6/4 Les polycarbonates de toiture en état dégradée	Bâtiment énergivore
		Evaluation : 
Aérogare	L'ensemble façade Ouest et tour de contrôle est rénové selon l'étude antérieure, présence de 4-20cm laine de verre sur les murs extérieurs et environ 6cm polyuréthane sous chape des toiture terrasse La Grande Galerie est non-isolée en général, sauf la salle 8 colonnes a été restaurée entre 2015-2019	Etat différente selon
		Evaluation : 
Plané NN	Bâtiment rénové en 2014-2015 Les éléments de l'enveloppe sont supposés isolé correctement (Murs extérieurs isolés par 10cm laine de verre, Toiture terrasse isolé par 10cm polyuréthane)	Etat correcte
		Evaluation : 
HM2	Bâtiment à ossature métallique Couverture en bardage métallique supposée faiblement isolée Les polycarbonates sont à mauvaise état	Etat correcte
		Evaluation : 
Béchat	Bâtiment à ossature métallique construit en 2017 desservi un hall de stockage conditionné 24/24h Les éléments de l'enveloppe répondent correctement aux réglementations thermiques en vigueur	Bonne performance
		Evaluation : 
Bermuda	Bâtiment à ossature métallique construit en 2007-2008 Couverture en bardage métallique double-peau, supposée faiblement isolé Menuiseries aluminium double-vitrage Polycarbonates de toiture en état moyenne	Performance moyenne
		Evaluation : 

3.2. Equipements techniques

3.2.1. Chauffage

TYPE DE CHAUFFAGE			
Bâtiment	Descriptif	Régulation	Performance
Hall F	Chauffage par air sur Réseau de Chauffage Urbain Sous-station : S6/7 Echangeur calorifugé	Période de chauffage : M au D, de 10h à 18h	Echangeur calorifugé Etat ancienne
			Evaluation : 
Hall E	Chauffage par air sur Réseau de Chauffage Urbain Sous-station : S6/7 Echangeur calorifugé	Période de chauffage : M au D, de 10h à 18h	Echangeur calorifugé Etat ancienne
			Evaluation : 
Hall Ebis	4 aérothermes eau chaude sur Réseau de Chauffage Urbain Sous-station : S6/7 Echangeur calorifugé	Période de chauffage : M au D, de 10h à 18h	Etat correcte
			Evaluation : 
Hall C/D	Chauffage par air sur Réseau de Chauffage Urbain Sous-station : S8/9 Echangeur calorifugé	Période de chauffage : M au D, de 10h à 18h	Echangeur calorifugé Etat ancienne
			Evaluation : 
Aérogare	Sous-station SUD (49S) de Réseau de Chauffage Urbain aliment réseaux de radiateurs, CTA Sud et CTA Centrale Puissance inscrite : 1000kW	Température de l'eau envoyée dans le réseau secondaire est programmée	Etat correcte
	Sous-station NORD (49N) sur Réseau de Chauffage Urbain aliment réseaux de radiateurs, CTA Nord et CTA Planète Pilote Puissance inscrite : 826kW	Température de l'eau envoyée dans le réseau secondaire est programmée	Etat correcte
Plané NN	Préchauffage d'air neuf par la batterie électrique de CTA Puissance électrique : 13,5 kW (3x4,5) Certains émetteurs électriques dans local	Période de chauffage : M au D, de 10h à 18h	Etat correct
			Evaluation : 
Hall Concorde	Non-chauffée en général Certains ventilos électriques fonctionnent en intermittent	-	-
HM2	3 chaudières murales gaz à condensation de marque ATLANTIC, modèle VARFREE 120, installées en 2021 P nominale 80/60°C : 119,5 kW P à 30% de charge 40,1 kW	Régulation embarquée Période de chauffage : Hangar et atelier : M au V, de 8h à 18h Logements : 20h à 7h	Bonne état
			Evaluation : 
Béchat	Pompe à chaleur scroll air/eau CARRIER 30RQP-0240 Puissance frigorifique : 235,1 kW EER : 3,09 ; ESEER : 4,10 Puissance chauffage : 118,7 kW ; COP : 1,52	Fonctionnement 24/24h Température de consigne : 16-18°C	Installé en 2017 Bonne état
			Evaluation : 

Bermuda	4 rampes raidantes gaz de marque Applimo 2 aérothermes à gaz de marque Climair La partie bureau est chauffée par émetteurs électriques et une CTA avec batterie électrique	Période de chauffage : selon l'année scolaire M au J, de 8h à 18h V de 8h à 13h	Etat correct
			Evaluation : 

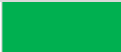
3.2.2. Refroidissement

EQUIPEMENTS DE REFROIDISSEMENT			
Bâtiment	Descriptif	Régulation	Performance
Aérogare	CTA Planète Pilot groupe frigo CIATCOOLER LJA 350-80kW R407C 9,2+8kg Puissance absorbée : 40,9kW Hypothèse : EER 2.5	Régulation motorisée	Etat correcte
			Evaluation : 
Béchat	Pompe à chaleur scroll air/eau CARRIER 30RQP-0240 Puissance frigorifique : 235,1 kW EER : 3,09 ; ESEER : 4,10 Puissance chauffage : 118,7 kW ; COP : 1,52	Fonctionnement 24/24h Température de consigne : 16-18°C	Installé en 2017 Bonne performance
			Evaluation : 

3.2.3. Traitement d'air

TRAITEMENT D'AIR			
Bâtiment	Descriptif	Régulation	Performance
Hall F	Equipement en tout recyclage avec possibilité d'apport d'air neuf (volet fermé) mettant en surpression le bâtiment Equipement dimensionné sur le débit important d'air fixe permettant d'assurer seul les besoins de chauffage par conditions extérieures défavorables. Hypothèse : 68 000 m3/h	Fonctionnement intermittent contrôlé manuellement par l'exploitant compte tenu du surdimensionnement du débit la très grande majorité du temps.	Pas conforme au règlement sanitaire départemental
			Evaluation : 
Hall E	Equipement en tout recyclage avec possibilité d'apport d'air neuf (volet fermé) mettant en surpression le bâtiment Equipement dimensionné sur le débit important d'air fixe permettant d'assurer seul les besoins de chauffage par conditions extérieures défavorables. Hypothèse : 84 000 m3/h	Fonctionnement intermittent contrôlé manuellement par l'exploitant compte tenu du surdimensionnement du débit la très grande majorité du temps.	Pas conforme au règlement sanitaire départemental
			Evaluation : 
Hall E	Pas de système de ventilation mécanique dans la salle d'exposition Renouvellement d'air par l'infiltration	-	-
			Evaluation : -

Hall C/D	2 caissons de traitement d'air marque CIAT, serie Climat 16 Débit d'air soufflage : 55 000 m ³ /h/caisson Débit d'air sec : 13 000 m ³ /h Echangeur ancien, efficacité supposée : 65%	Fonctionnement intermittent contrôlé manuellement par l'exploitant compte tenu du surdimensionnement du débit la très grande majorité du temps.	Etat ancienne
			Evaluation : 
Hall C/D	2 caissons de traitement d'air marque CIAT, serie Climat 16 Débit d'air soufflage : 55 000 m ³ /h/caisson Débit d'air sec : 13 000 m ³ /h Echangeur ancien, efficacité supposée : 65%	Fonctionnement intermittent contrôlé manuellement par l'exploitant compte tenu du surdimensionnement du débit la très grande majorité du temps.	Etat ancienne
			Evaluation : 
Aérogare	CTA SUD de référence CARRIER 39SL85 installée en 2017 Débit soufflage : 8190m ³ /h Récupérateur rotatif : 74,98% Puissance calorifique : 71,52kW	Régulation motorisée	Bonne état en général
	CTA NORD de référence CARRIER 39SL120 installée en 2017 Débit soufflage : 11100 m ³ /h Récupérateur rotatif : 77,41% Puissance calorifique : 96,93kW	Régulation motorisée	Evaluation : 
			Bonne état en général
			Evaluation : 
			Bonne état en général
	CTA CENTRALE référence CARRIER 39SL65 installée en 2017 Débit soufflage : 6040 m ³ /h Récupérateur rotatif : 77,41% Puissance calorifique : 52,75 kW	Régulation motorisée	Evaluation : 
Plané NN	La ventilation double-flux est assurée par 2 caissons double peau Marque France Air, gamme Novatys 7/7 Hypothèse : 1500 m ³ /h (réduit 1000m ³ /h) Puissance moteur électrique : 0,75kW	Période d'occupation : M au D, 10h à 18h	Etat correcte
			Evaluation : 
HM2	La ventilation double-flux est assurée par 2 caissons double peau Marque France Air, gamme Novatys 7/7 Hypothèse : 1500 m ³ /h (réduit 1000m ³ /h) Puissance moteur électrique : 0,75kW	Période d'occupation : M au D, 10h à 18h	Performance correcte Absence de récupérateur de chaleur
	Extracteurs de l'air vicié dans les ateliers Débit total estimé : 10 500 m ³ /h	Environ 8h/semaine	Evaluation : 
Béchat	Ventilation spécifique pour la cabine peinture : soufflante à pression élevée de l'air préchauffé à 60°C par brûleur gaz Débit estimé : 25 000 m ³ /h	Environ 8h/semaine Supposé faible utilisation pendant période estivale (mai à septembre)	Etat correct
	CTA 01 de marque CARRIER, modèle 39HA18,14 Débit : 60 000/30 000 m ³ /h Puissance nominale : 28,94 kW Pf : 120 kW ; Pc : 130 kW Batterie électrique : 45 kW (15+15+15)	Fonctionnement en continue	Evaluation : 
HM2	Extracteurs de l'air vicié dans les ateliers Débit total estimé : 10 500 m ³ /h	Environ 8h/semaine Supposé faible utilisation pendant période estivale (mai à septembre)	Système énergivore Pas de récupérateur de chaleur
			Evaluation : 
Béchat	CTA 01 de marque CARRIER, modèle 39HA18,14 Débit : 60 000/30 000 m ³ /h Puissance nominale : 28,94 kW Pf : 120 kW ; Pc : 130 kW Batterie électrique : 45 kW (15+15+15)	Fonctionnement en continue	Bonne état
			Evaluation : 

	CTA 02 de marque CARRIER, modèle 39SL125 Débit : 9000 m ³ /h (100% air neuf en fonc. normale) Puissance nominale : 2,795 kW Pf: 111 kW; Pc: 92 kW	Fonctionnement en continue	Bonne état Evaluation : 
Bermuda	Atelier : ventilé par ouverture de fenêtres Bureaux : centrale double flux avec récupérateur d'énergie (efficacité supposée de 70%) de marque Caladair Modèle CDFI 146 (taille 4), Débit estimé : 750m ³ /h	selon l'année scolaire M au J, de 8h à 18h V de 8h à 13h	Bon état Evaluation : 

3.2.4. Eclairage

EQUIPEMENTS D'ECLAIRAGE			
Bâtiment	Descriptif	Régulation	Performance
Hall F	Luminaire technique LED Puissance estimée : 8500W	Temps de fonctionnement : M au D, de 10h à 18h	Bon état Evaluation : 
Hall E	Luminaire technique LED Puissance estimée : 8250W	Temps de fonctionnement : M au D, de 10h à 18h	Bon état Evaluation : 
Hall Ebis	Luminaire technique LED Puissance estimée : 500W	Temps de fonctionnement : M au D, de 10h à 18h	Bon état Evaluation : 
Hall C/D	Luminaire technique LED Puissance estimée : 4500W	Temps de fonctionnement : M au D, de 10h à 18h	Bon état Evaluation : 
Aérogare	Luminaire technique LED Puissance estimée : 55 00W	Temps de fonctionnement : M au D, de 10h à 18h pour zones d'exposition L au V, de 9h à 18h pour zones de bureaux	Bon état En général Evaluation : 
Plané NN	Luminaire technique LED Faible luminosité selon le thème d'exposition Puissance estimée : 1 000W	Période d'occupation : M au D, 10h à 18h	Bon état Evaluation : 
Hall Concorde	Système de luminaire en projecteurs LED pour l'ensemble du hall Réglette et pot LED dans les sens de visite	Période d'occupation : M au D, 10h à 18h	Etat correct Evaluation : 

HM2	Bureaux et ateliers : réglette étanche LED 2x58W Bureaux d'étage : pavé LED 4*18W Puissance totale estimée : 9000W	Période d'occupation : M au D, 10h à 18h	Etat correct en général
			Evaluation :
Béchat	Luminaire technique LED Puissance estimée : 3500W	Utilisation ponctuelle	Bonne état
			Evaluation :
Bermuda	Bonne luminosité naturelle Luminaires en tubes fluos dans l'atelier Panneaux LED dans les bureaux Puissance estimée : 4400W	M au J de 8 à 18h V de 8 à 13h selon l'année scolaire et niveau d'éclairage naturelle	Etat correcte
			Evaluation :

4. CONSOMMATION DE REFERENCE

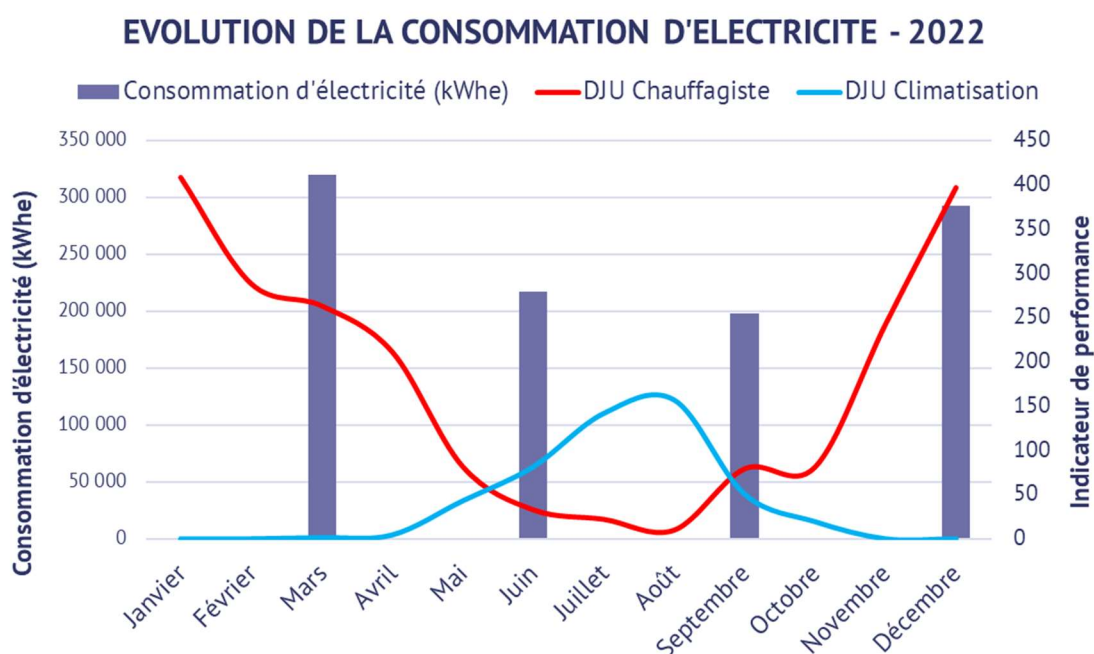
4.1. Consommations d'électricité

4.1.1. Compteur MAE(159-167-49)bis

Le compteur MAE (159-167-49)bis correspond à la consommation d'électricité de la plupart des bâtiments du site Bourget, y compris : Aérogare, les halls E, F, Ebis et C/D.

La puissance souscrite de ce compteur est 1200 kVA.

Le graphique ci-dessous présente les consommations annuelles d'électricité en kWh pour l'année de référence utilisée, à savoir 2022.



Consommation d'électricité relevé du compteur MAE (159-167-49)bis – Année 2022

Les relevés de consommations communiqués sont trimestriels. En 2022, 1 071 993 kWh a été consommé avec un prix moyen de 0.163 €HT/kWh.

4.1.2. Compteur Hall Concorde

Le compteur Hall Concorde correspond à la consommation d'électricité des bâtiment Hall Concorde et Hall 1939/1945.

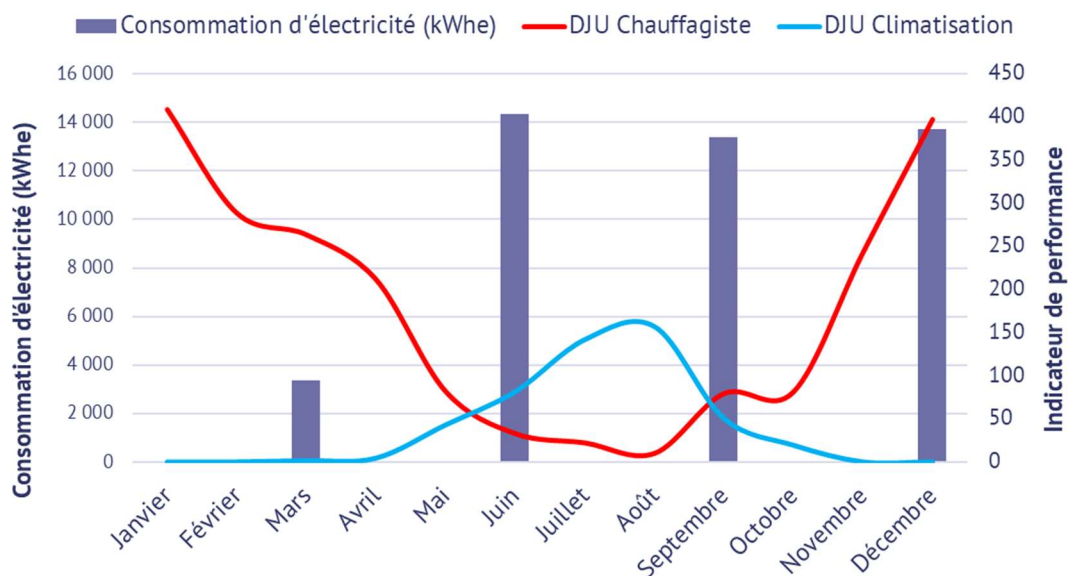
La puissance souscrite de ce compteur est 150 kVA.

Les relevés de consommations communiqués sont trimestriels. Entre 01/03/2022 et 31/12/2022, 44 850 kWh a été consommé avec un prix moyen de 0.163 €HT/kWh.

La consommation d'électricité relevé par ce compteur concerne principalement l'éclairage de ces deux halls. Le fonctionnement du système d'éclairage est en général identique avec l'ouverture au public du musée.

Le graphique ci-dessous présente les consommations facturées d'électricité en kWh pour la période de référence du 01/03/2022 au 31/12/2022.

EVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ELECTRICITE - 2022



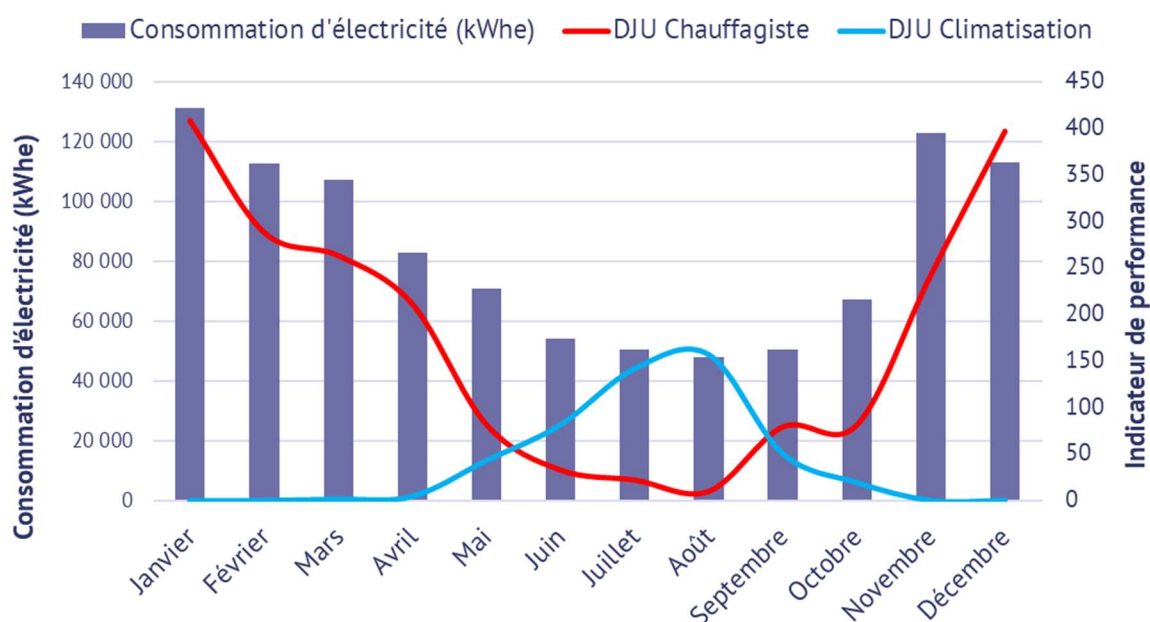
Consommation d'électricité relevé du compteur « Hall Concorde » – 03-12/2022

4.1.3. Compteur site Dugny

Les consommations d'électricité de l'ensemble des bâtiments du site Dugny sont relevées par le compteur d'électricité général du site Dugny. Le Contrat Electricité Structuré du site a de référence 1-EFB0SYH avec les prix non-réglementés

Le graphique ci-dessous présente les consommations annuelles d'électricité en kWh pour l'année de référence utilisée, à savoir 2021.

EVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ELECTRICITE - 2021



Consommation d'électricité du site Dugny – Année 2021

Au global, 1 011 976 kWh a été consommé en l'année 2021 par le site Dugny avec un prix moyen de 0.104 €HT/kWh.

Compte tenu des usages, les consommations sont principalement liées au chauffage et donc sont fortement liées à la rigueur climatique hivernale (+100% par rapport à la période estivale).

4.2. Consommations de RCU

Il y a 4 sous-stations du réseau de chaleur sur l'ensemble du site Bourget, y comprise, les sous-station 49S et 49N alimentent l'aérogare, le sous-station S6/7 aliment les halls E, F et Ebis et le sous-station S8/9 aliment le hall C/D.

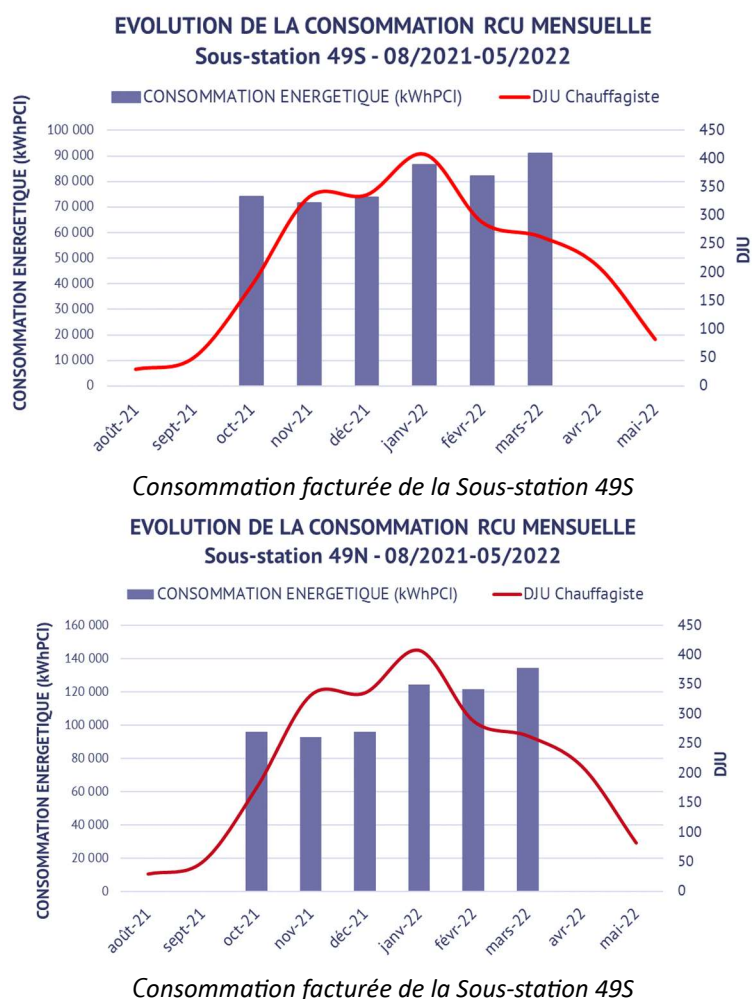
4.2.1. Sous-stations 49S et 49N

La production de chaleur générale de l'Aérogare est assurée par deux sous-station Sud (49S) et Nord (49N).

Les puissances souscrites en régime haute température sont de 1000kW pour la sous-station 49N et 826kW pour la sous-station 49S, soit une puissance souscrite totale de 1826kW.

Les travaux de réhabilitation énergétique permettraient, outre le fait de diminuer les consommations, de minimiser la puissance appelée, voir le régime de température et donc de diminuer le coût de l'abonnement.

L'analyse des factures nous permet d'indiquer les consommations de RCU pendant la saison de chauffe de 10/2021 à 03/2022 comme dans les graphiques ci-dessous :



Dans la période de facturation (10/2021-03/2022), 1 145 090 kWhPCI a été consommé avec le prix moyen de 0.160 €HT/kWhPCI.

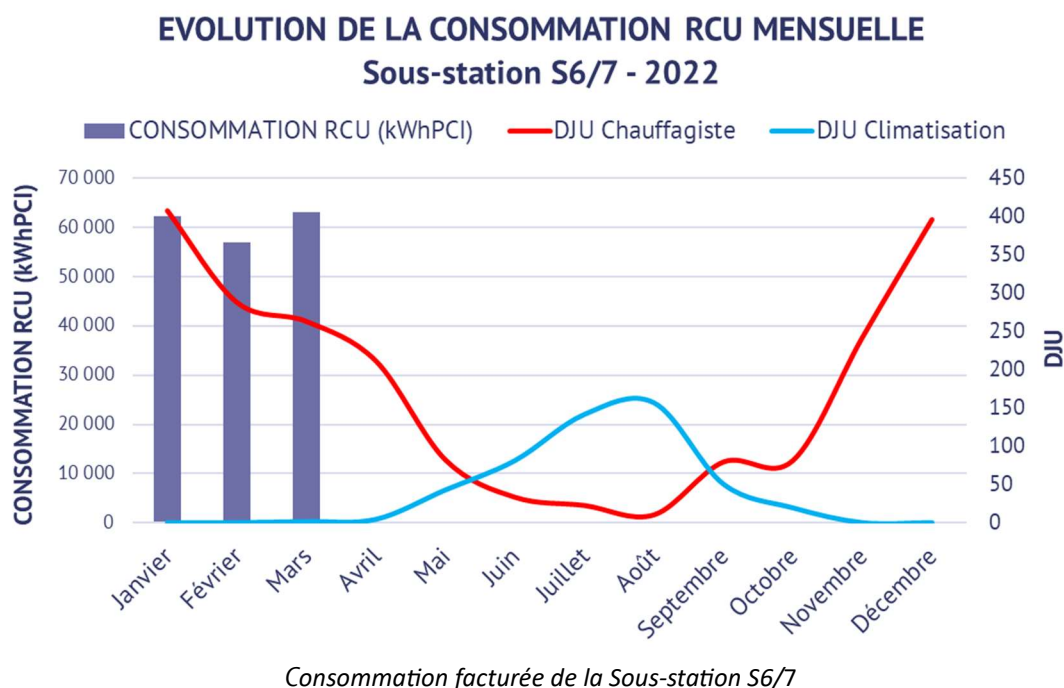
4.2.2. Sous-stations S6/7

La sous-station S6/7 alimente le réseau chauffage des Halls F, E et Ebis.

La puissance souscrite est de 733kW en régime haute température.

Les travaux de réhabilitation énergétique permettraient, outre le fait de diminuer les consommations, de minimiser la puissance appelée, voir le régime de température et donc de diminuer le cout de l'abonnement.

Les halls des expositions ont été réouvert au public à partir le janvier 2022. La consommation RCU du premier semestre de 2022 est présenté dans le graphique ci-dessous :



Dans la période de facturation (01-03/2022), 182 376 kWhPCI a été consommé avec le prix moyen de 0.150 €HT/kWhPCI

4.2.3. Sous-stations S8/9

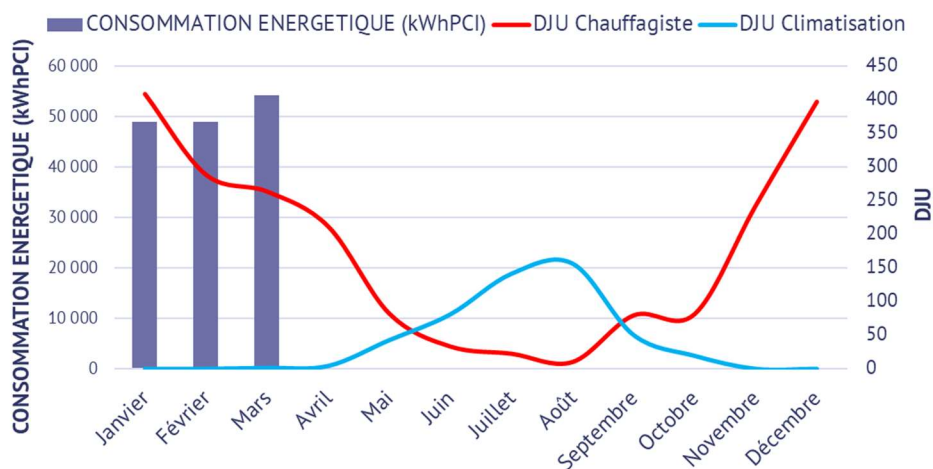
Le réseau chauffage du hall C/D est alimenté par la sous-station S8/9.

La puissance souscrite est de 692kW en régime haute température.

Les travaux de réhabilitation énergétique permettraient, outre le fait de diminuer les consommations, de minimiser la puissance appelée, voir le régime de température et donc de diminuer le cout de l'abonnement.

Les halls des expositions ont été réouvert au public à partir le janvier 2022. La consommation RCU du premier semestre de 2022 est présenté dans le graphique ci-dessous :

EVOLUTION DE LA CONSOMMATION RCU MENSUELLE Sous-station S8/9 - 2022



Consommation facturée de la Sous-station S8/9

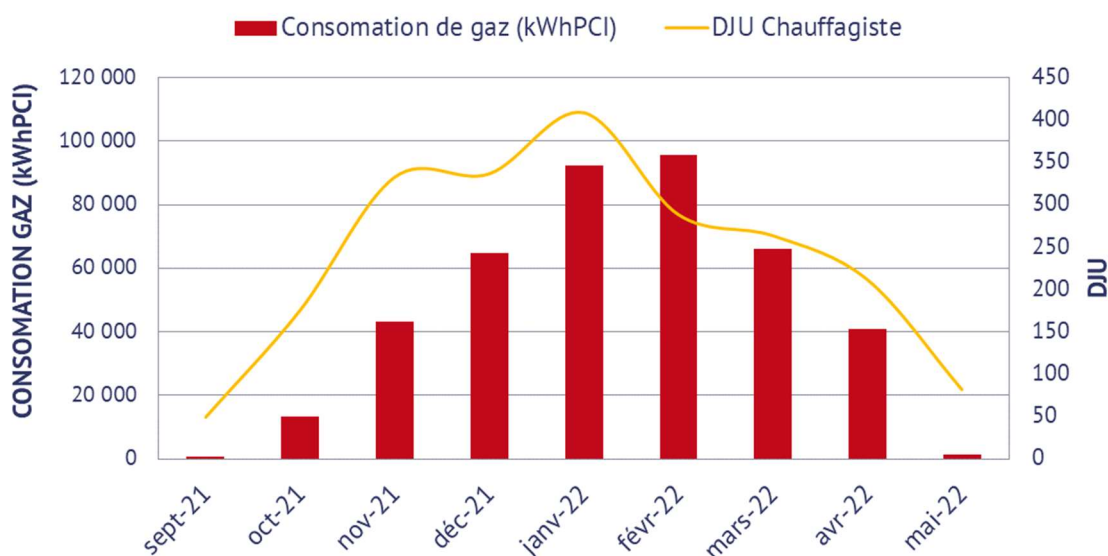
Dans la période de facturation (01-03/2022), 152 031 kWhPCI a été consommé avec un prix moyen de 0.15€HT/kWhPCI.

4.3. Consommations de gaz naturel

La consommation de gaz du site correspond aux besoins de chauffage des bâtiments HM2 et Bermuda. Le numéro de compteur est 0415230100566. Le tarif d'acheminement T3 est appliqué pour cet abonnement.

La consommation gaz du site Dugny est présentée dans le graphique ci-dessous. A savoir, la période de référence pour la comparaison de la consommation est la saison de chauffe 2021/2022 ;

EVOLUTION MENSUELLE DE LA CONMMATION DE GAZ PENDANT LA SAISON DE CHAUFFE 2021/2022



Consommation gaz naturel du site Dugny

Pendant la saison de chauffe 10/2021-04/2022, 419 142 kWhPCI a été consommé avec un prix moyen de 0,080 €HT/kWhPCI. Les consommations sont liées au chauffage et donc sont fortement liées à la rigueur climatique hivernale.

5. MODELISATION ENERGETIQUE

5.1. Bilan des consommations annuel par type d'énergie

CONSOMMATION THEORIQUES PAR TYPE D'ENERGIE				
Bâtiment	Electricité (kWhEF/an)	Réseau de chaleur (kWhEF/an)	Gaz naturel (kWhEF/an)	Total (kWhEF/an)
Hall F	70 234	196 423	-	266 657
Hall E	81 129	210 293	-	291 422
Hall Ebis	1 827	46 807	-	48 634
Hall C/D	99 823	372 502	-	472 325
Aérogare	272 284	1 464 618	-	1 736 902
Plané NN	81 401	-	-	81 401
Hall Concorde	28 681	-	-	28 681
Autres Bourget	420 000	-	-	420 000
Total Bourget	1 055 379	2 290 643	0	3 346 022
HM2	27 875	-	396 255	424 130
Bermuda	10 528	-	73 252	83 780
Béchat	661 368	-	-	661 368
Autres Dugny	290 000	-	-	290 000
Total Bourget	989 771	0	469 507	1 459 278
Total	2 045 150	2 290 643	469 507	4 805 300

5.2. Bilan des consommations annuel par usage

CONSOMMATION THERIQUES PAR USAGE						
Bâtiment	Chauffage (kWhEF/an)	Climatisation (kWhEF/an)	Auxiliaires/Ventilation (kWhEF/an)	Eclairage (kWhEF/an)	Autres (kWhEF/an)	Total (kWhEF/an)
Hall F	196 423	-	48 960	21 274	-	266 657
Hall E	210 293	-	60 480	20 649	-	291 422
Hall Ebis	46 807	-	576	1 251	-	48 634
Hall C/D	372 502	-	88 560	11 263	-	472 325
Aérogare	1 464 618	28 364	72 726	91 322	79 872	1 736 902
Plané NN	72 908	-	5 990	2 503	-	81 401
Hall Concorde	-	-	-	28 681	-	28 681
Autres Bourget	-	-	-	-	420 000	420 000
Total Bourget	2 363 551	28 364	277 292	176 943	499 872	3 346 022
HM2	400 425	-	7 280	16 425	-	424 130
Bermuda	77 883	-	3 600	2 297	-	83 780
Béchat	314 618	74 185	271 291	1 278	-	661 372
Autres Dugny	-	-	-	-	290 000	290 000
Total Bourget	792 926	74 185	282 171	20 000	290 000	1 459 282
Total	3 156 477	102 549	559 463	196 943	789 872	4 805 304

5.3. Comparaison des consommations théoriques aux consommations réelles

La comparaison a été réalisée afin de vérifier la cohérence entre les consommations théoriques de nos modèles et les consommations réelles. Vis-à-vis la fermeture temporaire du musée en 2021 à cause de la pandémie de Covid-19, les données des énergies consommées pendant les trois années précédentes sont incomplètes. Pour cette raison, les consommations théoriques ont été recalculées selon les périodes de facturations et les données climatiques de chaque période.

Les détails de la comparaison sont présentés dans le tableau ci-dessous :

ECART ENTRE LES CONSOMMATIONS REELLES ET LES CONSOMMATIONS THEORIQUES								
Bâtiment	Electricité							
	HT/BT	Période de facturation	DJU de la période	Consommations théoriques (kWhEF)	Total (kWhEF)	Consommations réelles (kWhEF)	Ecart en kWhEF	% d'Ecart
Hall F	MAE	01/01/2022 - 01/01/2023	2 119	70 234	1 026 698	1 027 143	-445	0%
Hall E				81 129				
Hall Ebis				1 827				
Hall C/D				99 823				
Aérogare				272 284				
Plané NN				81 401				
Autres				420 000				
Hall Concorde	Concorde	01/03/2022 - 01/01/2023	1 422	23 900	44 549	44 850	-301	-1%
Hall 1939/1945				20 649				
HM2	Dugny	01/2021 - 12/2021	2 452	27 875	1 006 085	1 011 976	-5 891	-1%
Bermuda				19 172				
Béchat				669 038				
Autres				290 000				
Bâtiment	Réseau de chaleur							
	Sous-station	Période	DJU de la période	Consommations théoriques (kWhEF)	Total (kWhEF)	Consommations réelles (kWhEF)	Ecart en kWhEF	% d'Ecart
Hall F	S6/7	01/2022 - 03/2022	960	78 750	181 822	182 376	554	0%
Hall E				84 310				
Hall Ebis				18 762				
Hall C/D	S8/9	01/2022 - 03/2022	960	149 340	149 340	152 031	-2 691	-2%
Aérogare	49S & 49N	10/2021 - 03/2022	1 804	1 108 741	1 108 741	1 145 090	-36 349	-3%
Bâtiment	Gaz naturel							
	Sous-station	Période	DJU de la période	Consommations théoriques (kWhEF)	Total (kWhEF)	Consommations réelles (kWhEF)	Ecart en kWhEF	% d'Ecart
HM2	Gaz Dugny	10/2021 - 4/2022	2 016	342 750	404 427	419 142	-14 715	-4%
Bermuda				61 677				

6. PROGRAMMATION ENERGETIQUE

6.1. Programmes de travaux par bâtiment

La présente partie est un récapitulatif des préconisations et programmes de travaux proposés dans les audits particuliers des bâtiments concernés. En général, les préconisations définies pour chaque bâtiment sont pour objet de l'amélioration de la performance énergétique de l'enveloppe et l'optimisation de la performance des utilités.

7. PRECONISATION A L'ECHELLE DU SITE

7.1. Mise en place des panneaux photovoltaïques

A l'échelle du site, nous proposons l'installation des panneaux photovoltaïque afin d'être autonome partiellement ou totalement en matière de production d'électricité. D'une part, elle permet de réduire fortement l'émission CO₂ du site. Les surfaces disponibles se situent en toiture ou en parking avec la mise en place d'ombrières.

Les estimations du potentiel du site pour l'installation des panneaux photovoltaïque sont présentées dans la partie suivante. L'autoconsommation de photovoltaïque sera à préciser par une étude de faisabilité en prenant en compte les contraintes techniques, structurelles et architecturales.

Les hypothèses prises en compte dans nos calculs sont :

- Station météo : Paris-Le Bourget
- Ratio puissance crête/surface nette : 0.155kWc/m²
- Prix moyen d'une sur d'une installation en surimposition en toiture : 1.1 €HT/Wc
- Prix moyen d'une sur d'une installation en ombrière de parking : 1.4 €HT/Wc
- Tarif rachat d'électricité en vente le 2^{ème} trimestre 2023 : 0.13€HT/kWhe
- Taux d'inflation optimiste : 3%



Surface toiture disponible pour PV



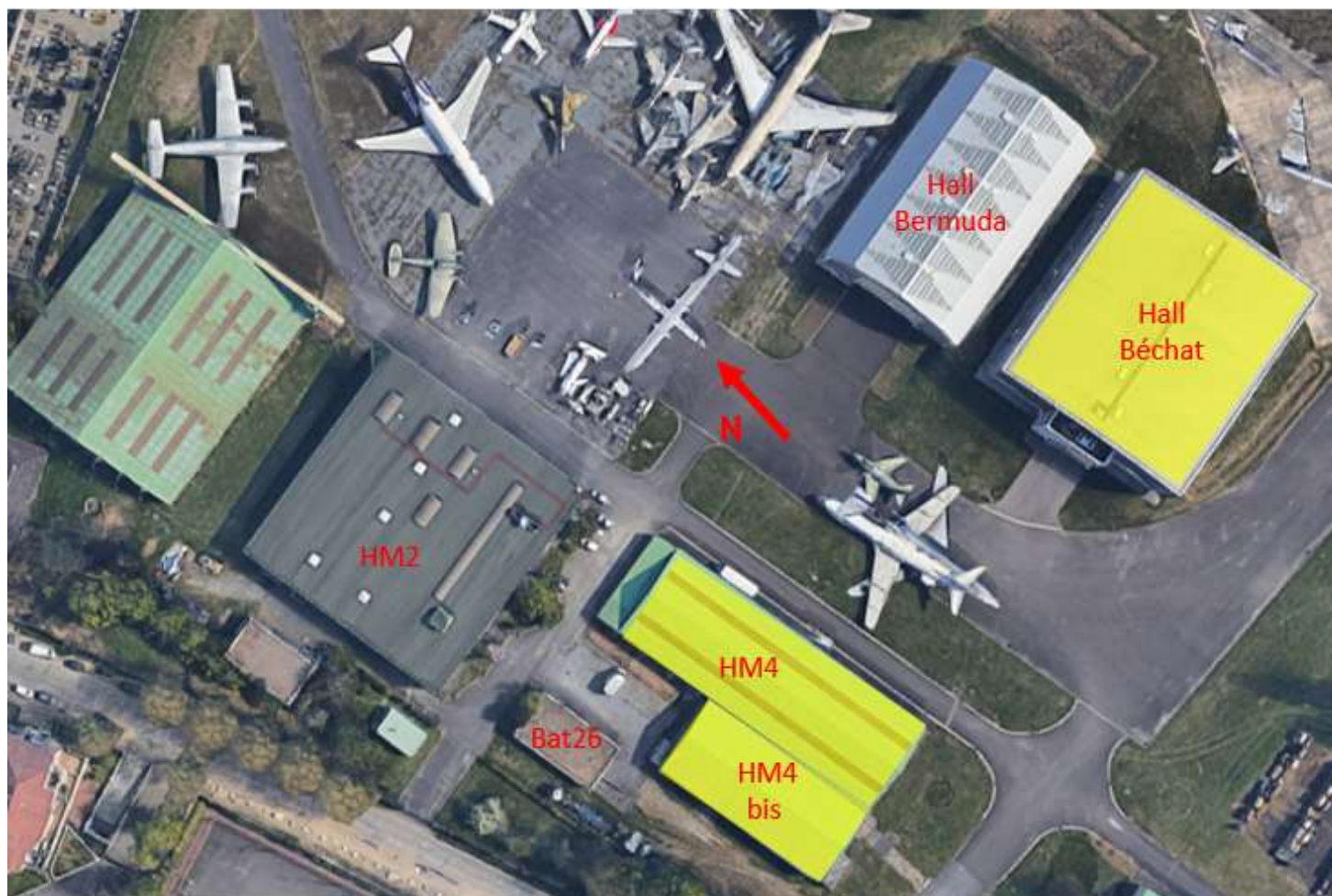
PV sur ombrières des parkings

Les surfaces disponibles pour l'installation des panneaux photovoltaïque (site Bourget)



Surface toiture disponible pour PV

Les surfaces possibles pour l'installation des panneaux photovoltaïques (site Bourget)



 Surface toiture possible pour PV

Les surfaces possibles pour l'installation des panneaux photovoltaïque (site Dugny)

Estimation des productions d'électricité par les panneaux photovoltaïques :

Bâtiment	Surface disponible (m2)	Taux de couverture (%)	Surface utile (m2)	Puissance crête (kWc)	Electricité produite totale (kWh/an)	Total CO2 évité (kg/an)	Productivité (kWh/kWc.an)	Consommation d'électricité facturé (kWh)	Couverture (%)	Investissement €HT	Temps de retour brut	Temps de retour actualisé
Site Bourget												
Aérogare	2 643	80%	2 108	327,6	283 698	102 131	866	1 071 993	26%	361 000	9,8	8,7
Parking	3 532	75%	2 649	411,5	356 423	128 312	866		33%	577 000	12,5	10,7
Hall Ebis	785	80%	628	97,5	89 022	32 048	913		8%	108 000	9,4	8,4
Hall CD	382	70%	268	41,6	37 985	13 675	913		4%	46 000	9,4	8,4
Hall 1939/1945	2 186	70%	1 531	237,9	206 019	74 167	866		19%	262 000	9,8	8,7
ACS	3 888	75%	2 917	453,1	392 448	141 281	866		37%	499 000	9,8	8,7
Total	13 416	75%	10 101	1 569	1 365 595	491 614	870		127%	1 853 000	10,5	9,2
Site Dugny												
Béchat	1 976	75%	1483	230,4	204 259	73 533	887	1 011 976	20%	254 000	9,6	8,6
HM4	2 060	75%	1546	240,2	216 865	78 071	903		21%	265 000	9,4	8,4
Total	4 036	75%	3 029	471	421 124	151 604	1 790		42%	519 000	9,5	8,5

7.2. Mise en place d'une pompe à chaleur sur géothermie

Vue du potentiel pour l'installation de sites géothermiques sur la région parisiennes et les surfaces disponibles du site, nous proposons également la mise en place d'une pompe à chaleur sur géothermie. Des sondes constituées de tubes en PEHD sont installées à la verticale dans un ensemble de forages profonds et sont prises dans un ciment thermique. Elles sont ensuite reliées entre elles par un réseau de canalisations installé en circuit fermé. Un liquide caloporteur est mis en circulation, et échange lors de son passage dans les sondes de l'énergie avec le sous-sol par conduction thermique. Le champ de sonde est relié à une nourrice comprenant vannes d'isolement et d'équilibrage.

Le circuit fermé sur champs de sondes verticales serait raccordé à l'évaporateur de la Pompe à chaleur comme présenté dans le schéma de principe ci-dessous.

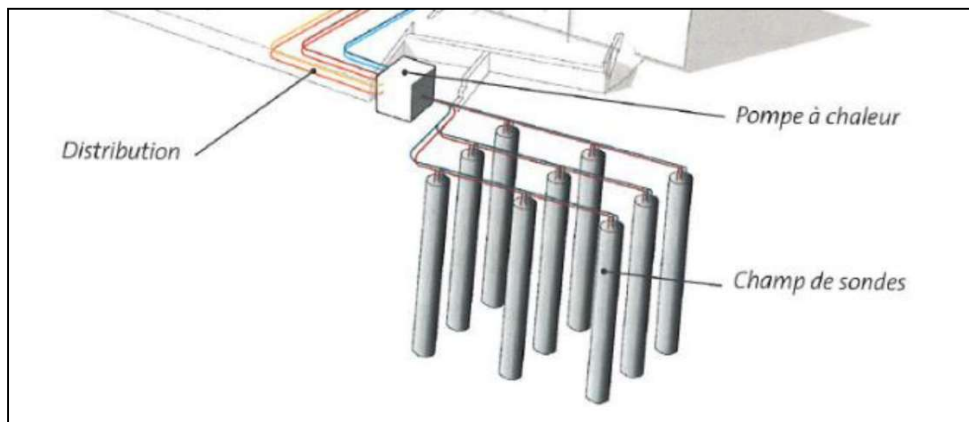


Schéma de principe d'une installation de géothermie sur sondes verticales (BRGM)

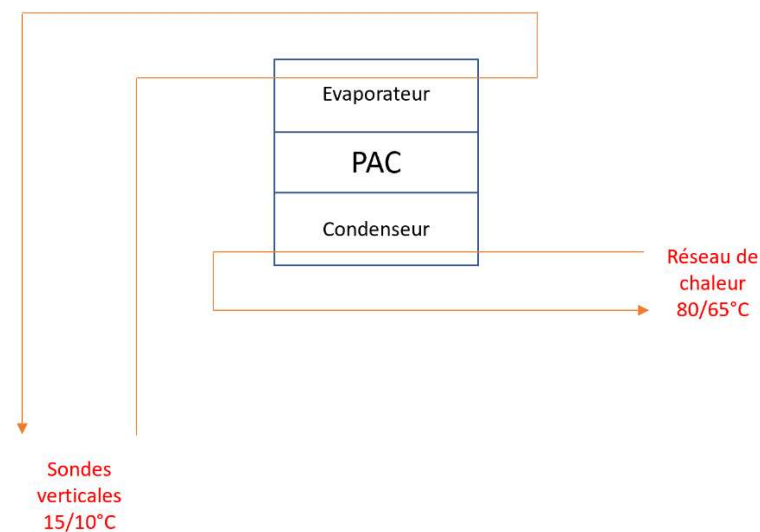


Schéma de principe d'une installation géothermique sur champ de sondes raccordé à l'évaporateur de la PAC

Une pré-dimensionnement du champ de sonde peut être réalisé en exploitant la surface disponible avec les contraintes dimensionnelles ci-après :

- Entre sondes : 10m
- Limites de propriété et bâtiment : 3 à 5 m



Exemple de repérage d'une zone exploitable pour le champ de sondes

Scénario sondes géothermiques		
Profondeur des sondes	200	m
Puissance extraite pré-dimensionnée	40	W/ml
Nombre de sondes	20	-
Puissance disponible source chaude	160	kW
Coefficient de performance moyen	4	-
Puissance produite PAC	213	kW
Besoins annuels couverts	950	MWh
Part des besoins de chauffage annuels couverts	41.4%	-

Le prédimensionnement devrait être validé par la phase de reconnaissance qui consiste à réaliser une sonde géothermique pilote dimensionnée comme une sonde définitive puis un Test de Réponse Thermique afin de déterminer les caractéristiques thermiques du sous-sol telles que la conductivité thermique, la capacité thermique et la température. Cette phase permet de valider définitivement les hypothèses de calculs et de vérifier la capacité du sous-sol à supporter la pression énergétique.

Compte tenu des résultats en première approche, la solution géothermique sur champ de sonde paraît être une solution adaptée au projet, avec une couverture supérieure à 40% de besoins chauffage actuels des bâtiments audités au site Bourget.

L'estimation économique de la solution est présentée dans le tableau ci-dessous :

Scénario	Coûts		Gain énergétique		Gain financier			Gain environnementaux	
	Investissements €HT	Subvention €HT	Gain énergétique kWhEF/an	Gains par rapport aux consommations théoriques du site	Gain financier €HT/an	Temps de retour brut année	Temps de retour actualisé	Emissions CO2 kgéqCO2/an	Déchets nucléaires g/an
Mise en place d'une pompe à chaleur sur géothermie	400 000	80 000	712 500	15%	103 788	3,1	3,0	202 350	-2 921

8. SCENARIO DE TRAVAUX A L'ECHELLE DU SITE

Scénarios		Coûts	Consommations d'énergies		Gain énergétique		Gain financier				Gain environnementaux	
Scénario No.	Hypothèse	Investissements €HT	Total kWhEF/an	Total kWhEP/an	Gain énergétique kWhEF/an	Gains par rapport aux énergies théoriques du site	Gain financier €HT/an	Economies par rapport à l'année de référence	Temps de retour brut année	Temps de retour actualisé	Emissions CO2 kgéqCO2/an	Déchets nucléaires g/an
0	Etat existant	-	4 805 300	8 088 804	-	-	-	-	-	-	-	-
1	Amélioration des performance des enveloppes + optimisation des systèmes chauffage-ventilation (en restant sur RCU)	2 990 000	3 703 386	6 643 192	1 101 914	23%	143 412	20%	20,8	16,4	228 806	2 381
2	Amélioration des performance des enveloppes & optimisation des système chauffage-ventilation & production de chaleur par pompes à chaleur & alimentation des réseaux hydrauliques de l'Aérogare par pompes à chaleur sur géothermie	4 190 000	2 417 125	6 046 178	2 388 175	50%	331 989	47%	12,6	10,9	595 226	-2 984
3	Scénario 1 & installation des PV	5 370 000	1 916 667	2 033 457	2 888 633	60%	429 287	61%	12,5	10,8	378 891	24 358
4	Scénario 2 & installation des PV	6 570 000	630 406	1 436 443	4 174 894	87%	617 864	87%	10,6	9,4	745 311	18 992