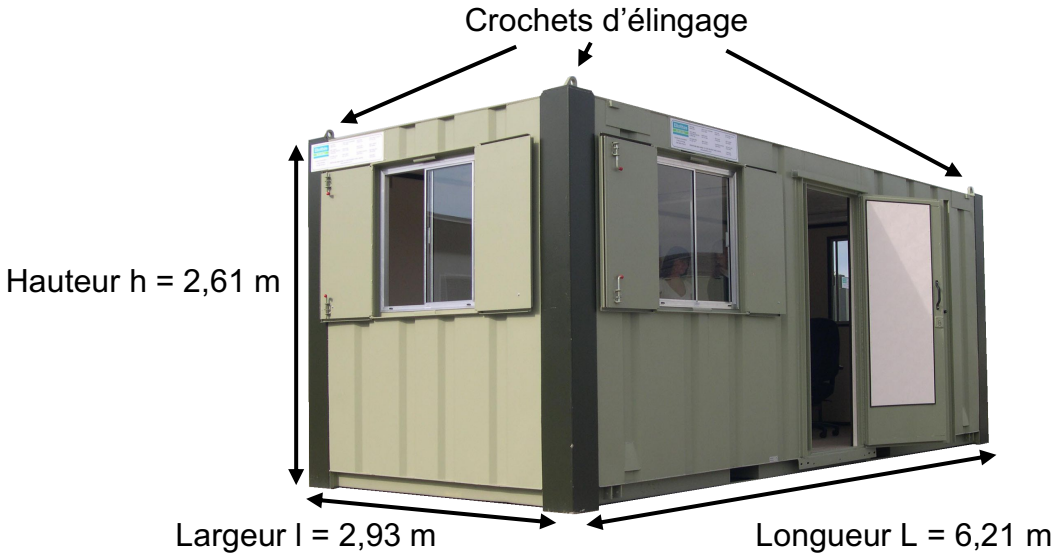
2I2D Enseignement Spécifique

Architecture et construction

Solar Impulse 2
Étude d'un bungalow technique



Constitution du sujet :

- **Dossier sujet et questionnement**.....Pages 26 à 31
- **Dossier technique**.....Pages 32 à 42

Mise en situation

A l'image de la caravane du Tour de France, le Solar Impulse est suivi de près par tout un cortège de techniciens et ingénieurs pour permettre les réparations entre chaque étape.

Pour leur permettre de travailler dans de bonnes conditions, et surtout avec tous les outils nécessaires (ordinateur, logiciels, documents, instruments…), deux bungalows techniques font partie de ce cortège. La dernière étude portera sur les solutions retenues pour permettre un travail optimal de l'équipe, quelles que soient les conditions extérieures.

Travail demandé

Partie A : Étude du bungalow technique

L'étude suivante porte sur la prise en compte du confort de l'équipe technique (2 fois 7 personnes) travaillant dans l'un des deux bungalows techniques très similaires. Seuls les équipements spécialisés varient. Les différentes études ne seront menées que sur l'un d'entre eux.

La première étape porte sur le choix des luminaires. Deux modèles ont été pré-retenus :

- PHILIPS TCS165 4xTL5-14W HFP M1/840 (tubes néon)
- PHILIPS SM120V W20L120 1xLED27S/840 (LED)

Les 3 derniers chiffres indiqués sur le modèle du luminaire correspondent au code normalisé par les fabricants indiquant les caractéristiques vis-à-vis de la réglementation liée au confort visuel.

Question A.1 DT S1	**Commenter** les choix des luminaires des points de vue de l'IRC et de la température de couleur à l'aide du DT S1.
Question A.2 DT S2, DT S3	**Justifier** la conformité réglementaire des deux simulations à partir du DT S2 et du DT S3.
Question A.3 DT S2, DT S3	**Étudier** et **commenter** les deux résultats de simulation et **choisir** la solution la plus adaptée, à partir du DT S2 et du DT S3.

La deuxième étape porte sur les conforts respiratoire et thermique. Le but est de justifier l'intérêt de la climatisation dans le bungalow et d'en déterminer sa puissance de froid. Elle permet de réduire la température et de ne pas dépasser un taux d'humidité de 50 %.

Question A.4 DT S4, DT S5	**Choisir,** à partir des DT S4 et DT S5, parmi les sensations d'inconfort liées au climat ci-après, celles auxquelles l'équipe technique sera soumise durant le tour du monde : • Chaleur ou fraicheur • Humidité ou aridité
Question A.5 DT S6, DT S7	**Expliquer** en quoi cet inconfort peut être nuisible à la santé de l'équipe à partir de la réponse précédente et des DT S6 et DT S7.
Question A.6	**Justifier** l'utilisation de la climatisation dans les bungalows techniques.

La puissance de froid nécessaire peut être déterminée en calculant les apports thermiques du bungalow. En effet, elle doit équilibrer les apports en chaleur qui sont de plusieurs sortes :

- Apports par les parois : $A_{parois} = \Sigma(U \times S \times \Delta T)$ [W] (voir DT S9)
- Apports aérauliques : $A_{aéro}$ = 0,34 x débit de ventilation x ΔT [W]
- Apports par ponts thermiques : A_{PT} = 10 % Aparois [W]
- Apports par les occupants : $A_{occupants}$ = 80 W par personne
- Apports par les installations électriques : $A_{élec}$ = 250 W
- Apports solaires : $A_{solaires}$ = 150 W

Les apports par les parois, ou transfert de chaleur par conduction, ont été déterminés grâce au tableau du DT S9.

Question A.7 DT S8, DT S9	**Commenter** et **expliquer** les pourcentages obtenus des apports de chaque surface par rapport aux apports totaux à partir des documents DT S8 et DT S9. **Proposer** une solution pour réduire ces apports.

Il faut prévoir un renouvellement d'air de 25 $m^3.h^{-1}$ par technicien.

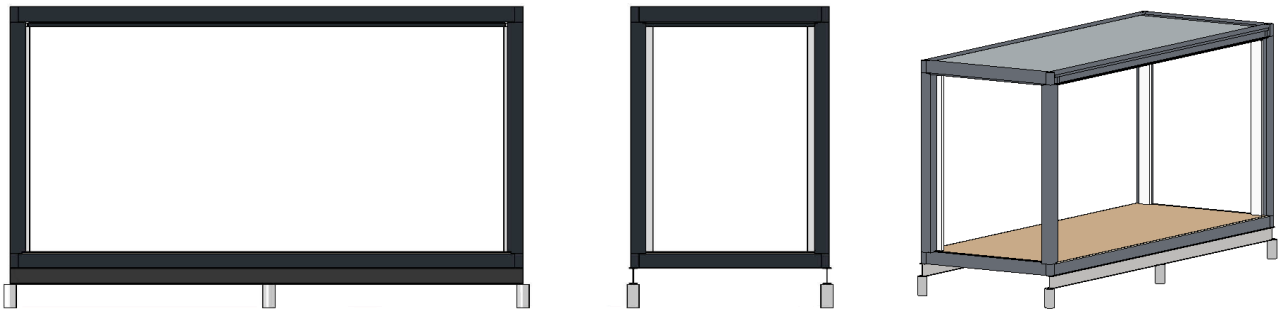
Question A.8	**Calculer** le débit total d'air à renouveler par heure dans un bungalow et les apports aérauliques $A_{aéro}$.
Question A.9	**Déterminer** les apports par ponts thermiques A_{PT} et par occupants $A_{occupants}$.

Question A.10	à l'aide des résultats précédents, **déterminer** la puissance de froid nécessaire au maintien des 22°C dans le bungalow.
Question A.11 DT S10	**Choisir** le climatiseur le plus adéquat parmi la gamme proposée dans le DT S10.

Partie B : Étude des supports des bungalows techniques

Les bungalows techniques sont déchargés de leur moyen de locomotion (généralement le bateau) à l'aide des crochets situés aux quatre coins. Ensuite, ils prennent la route de l'aérodrome où vient d'arriver le Solar Impulse. Là, ils sont posés sur 2 poutres dans le sens longitudinal servant de support. Chaque poutre est supportée par trois plots en béton.

Ces supports sont universels et dimensionnés à partir des valeurs extrêmes de chargement.



Vues d'un bungalow et de son support

Question B.1	**Expliquer** pourquoi il est plus judicieux de supporter les bungalows sur leur longueur plutôt que leur largeur.

On considère les efforts de vent W uniquement en toiture (W = 1,40 kN.m^{-2}), de direction verticale vers le bas afin d'être les plus défavorables possible.

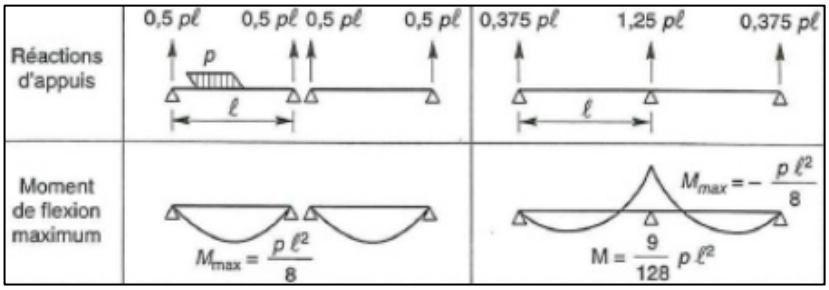
On considère que toutes les charges se répartissent uniformément.

Question B.2 DT S11	**Déterminer,** à l'aide des données du DT S11, sur une des deux poutres support : • Les charges linéiques permanentes G_L • Les charges linéiques d'exploitation Q_L • Les charges linéiques de vent W_L

Question B.3 | **Calculer** le cas de charges aux états limites ultimes (ELU) : P = 1,35 x G + 1,5 x Q + W

Pour la suite de l'étude, on considère un cas de charges sur une poutre P = 10 kN.ml^{-1}.

Deux possibilités s'offrent aux constructeurs : mettre en œuvre une poutre continue sur les trois appuis ou mettre en œuvre deux poutres distinctes. Les réactions d'appuis dans les deux cas sont données dans le tableau ci-dessous :



Question B.4 | **Identifier** la mise en œuvre la moins défavorable pour les appuis. **Expliquer** pourquoi l'autre peut être considérée comme plus « sûre ».

Le choix s'est porté sur une solution avec une poutre continue (dont le poids propre est négligé) pour des facilités de mise en œuvre.

Question B.5 | **Déterminer** le moment fléchissant maximal dans la poutre M_{fmax}

D'après l'Eurocode 3 (NF EN 1993-1-1), les IPE de nuance S235 (limite d'élasticité de 235 MPa) sont de classe 1 lorsqu'ils sont fléchis. Cette classe correspond à la possibilité de déformations plastiques sans remettre en cause la stabilité d'ensemble de la structure. Le moment résistance d'un tel IPE est donné par la formule suivante :

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Avec :

- $M_{pl,Rd}$ = moment résistant plastique [N.m]
- $W_{pl,y}$: module de résistance plastique en flexion [m^3]
- f_y : limite d'élasticité [MPa]

- γ_{M0} : coefficient de sécurité (γ_{M0} = 1 quelle que soit la classe)

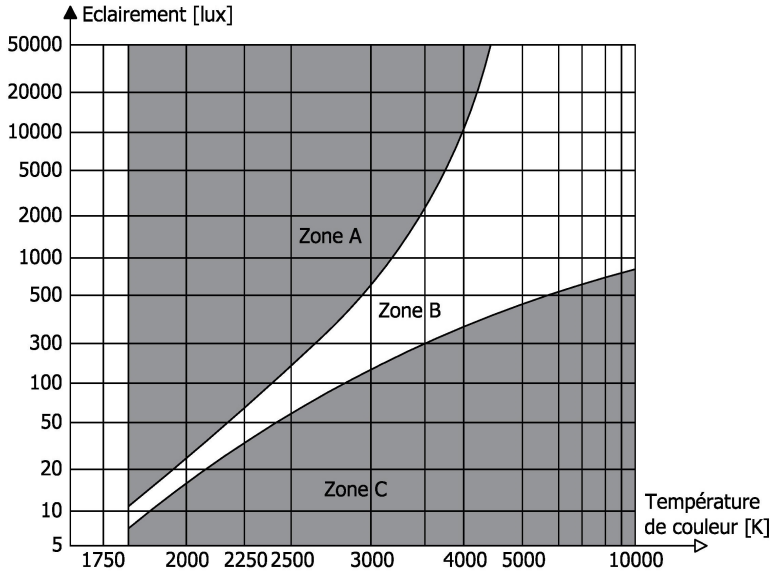
Question B.6	**Déterminer** le module de résistance plastique en flexion nécessaire à la vérification de l'inégalité suivante permettant de dimensionner le profilé : $$M_{fmax} < M_{pl,Rd}$$
Question B.7 DT S12	**Choisir** parmi les profilés du DT S12 celui qui convient pour supporter les charges du bungalow

Courbe de Kruithof :

Elle décrit une zone où niveaux d'éclairement et températures de couleur sont considérés comme confortables. Les ambiances en fonction des zones sont les suivantes :

- A : Ambiance lumineuse trop chaude
- B : Zone de confort
- C : Ambiance lumineuse trop froide

L'entrée dans la courbe se fait par la valeur d'éclairement souhaitée et la zone de confort, on en déduit la plage des températures de couleurs possibles.



Code identifiant le modèle du luminaire :

IRC minimal pour assurer un certain confort : 80. IRC maximal : 100.

Code	IRC Indice couleurs	Température de couleur Teinte de lumière
825	82 à 85	2500K blanc orangé
827	82 à 85	2700K blanc très chaud
830	82 à 85	3000K blanc chaud
840	82 à 85	4000K lumière du jour
930	92 à 98	3000K blanc chaud
940	92 à 98	4000K lumière du jour

Éclairements règlementaires (Emoy) :

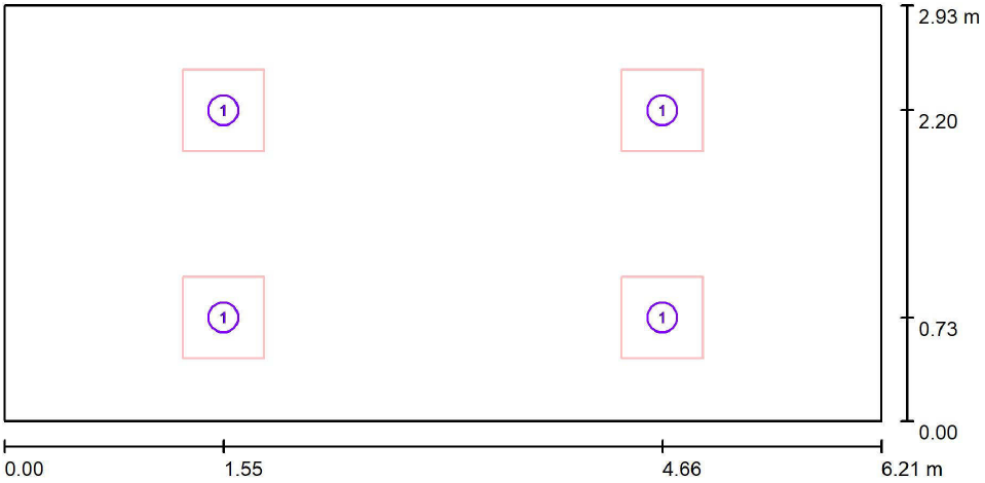
- Circulation, couloirs : 100 Lux
- Bureaux, salles de travail : 500 Lux

DT S2 : Résultats simulation éclairage TCS165

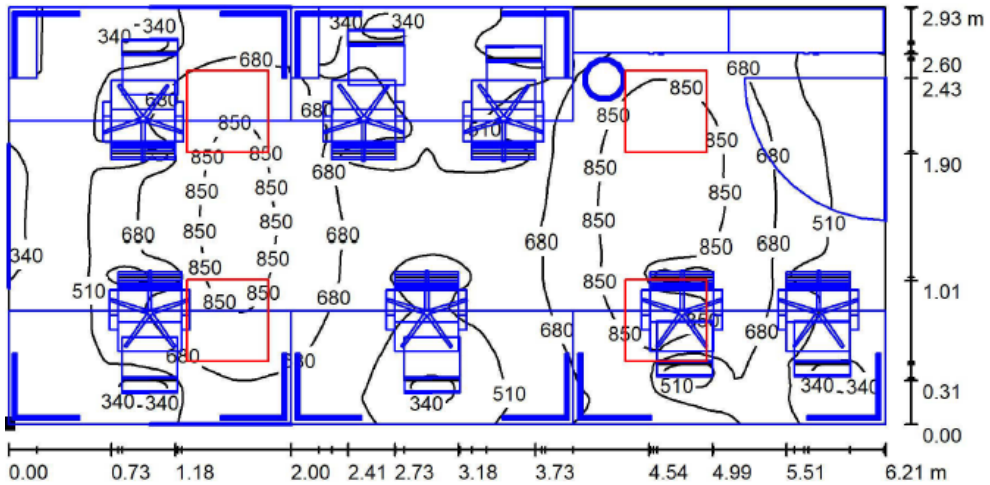
Données :

- PHILIPS TCS165 4xTL5-14W HFP M1_840
- Puissance de chaque tube : 15,75 W
- Nombre de tubes par appliques : 4
- Nombre d'appliques : 4
- Équation photométrique : 0,67 C

Plan d'implantation :



Résultats de la simulation (valeurs en Lux) :



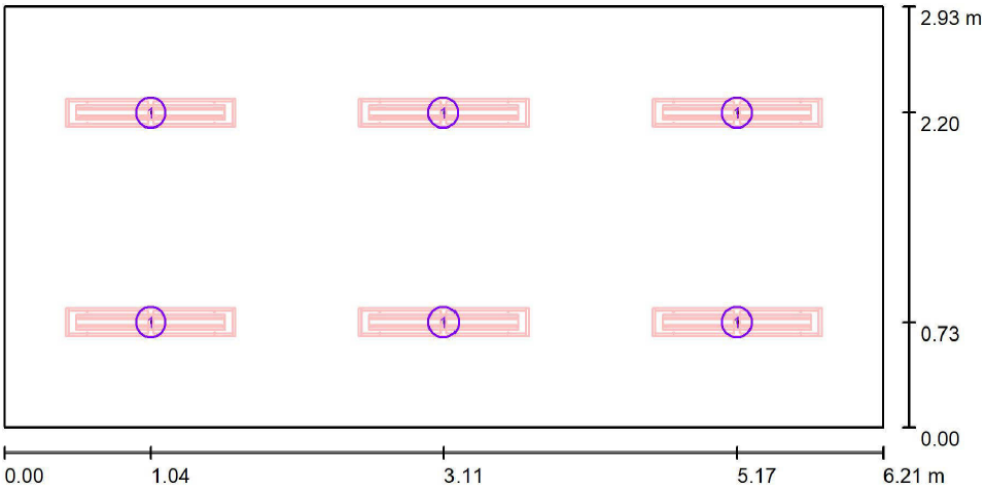
E_{moy} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_{moy}	E_{min} / E_{max}
609	146	963	0.239	0.151

DT S3 : Résultats simulation éclairage SM120V

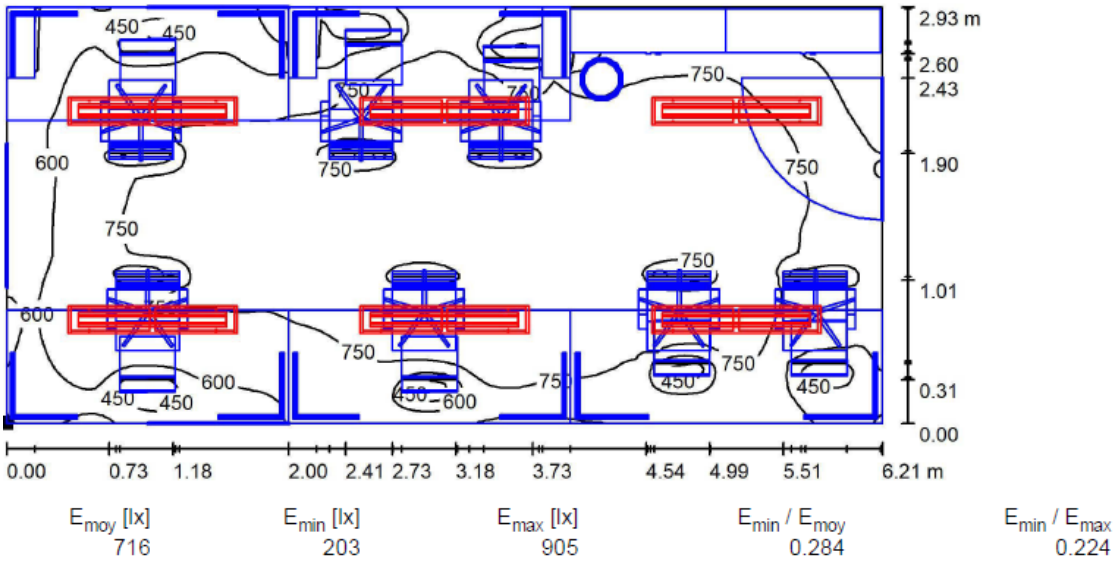
Données :

- PHILIPS SM120V W20L120 1xLED27S/840 PSD
- Puissance de chaque tube : 23,5 W
- Nombre de tube par appliques : 1
- Nombre d'appliques : 6
- Équation photométrique : 1,00 C

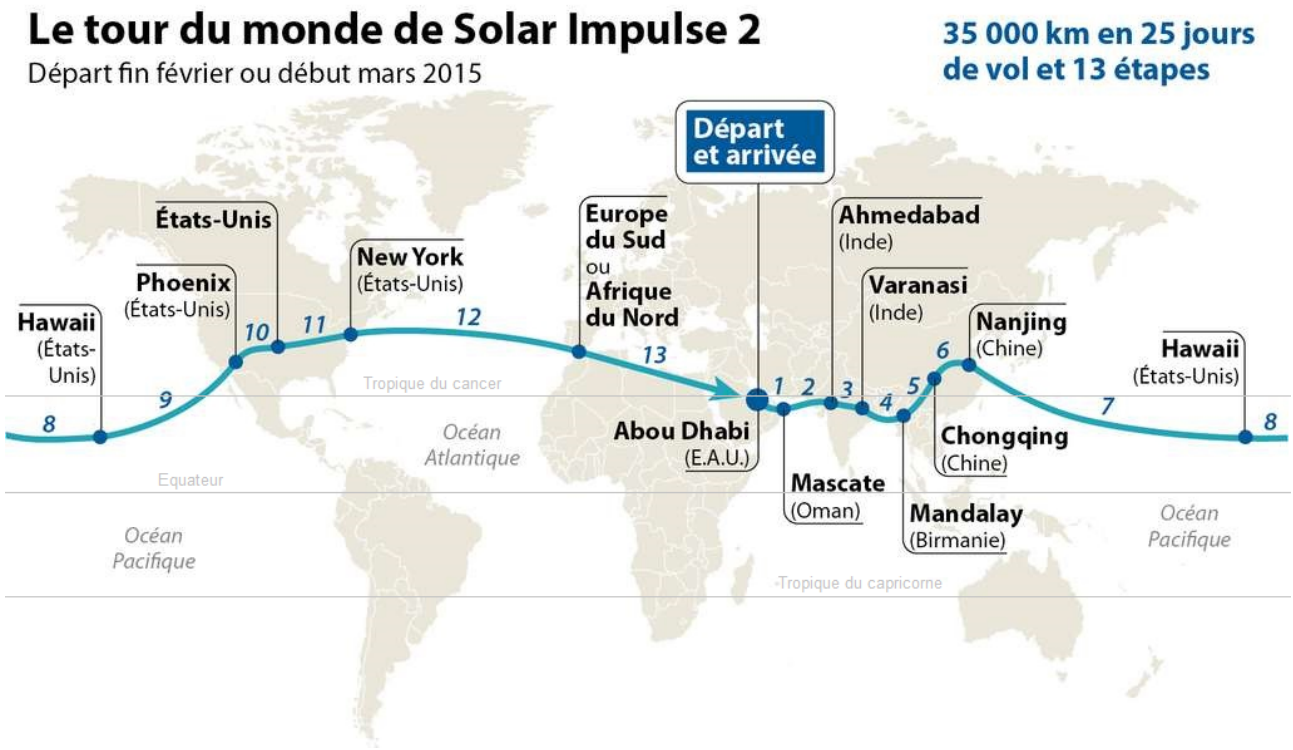
Plan d'implantation :



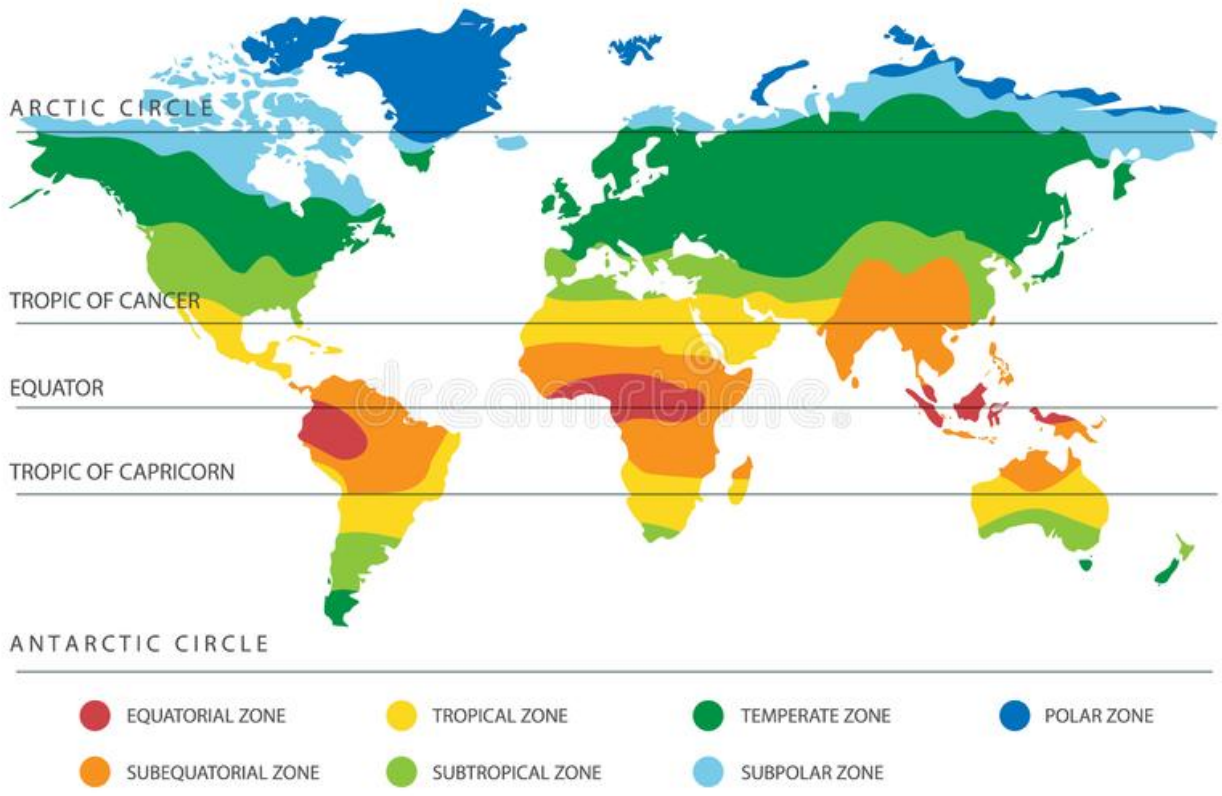
Résultats de la simulation (valeurs en Lux) :



DT S4 : Étapes du Solar Impulse 2



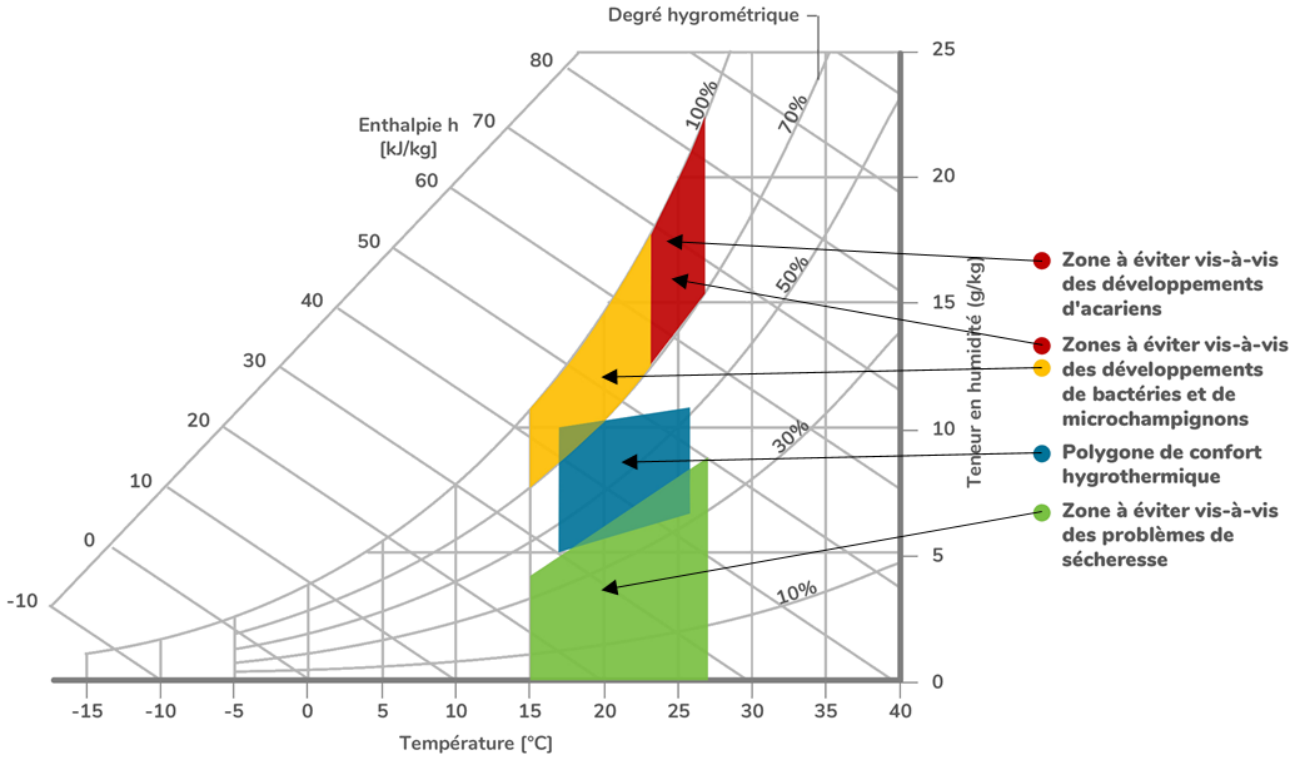
DT S5 : Climats



On peut définir les climats tropicaux et subtropicaux comme des climats non arides où la température moyenne mensuelle ne descend pas en dessous de 18 °C. Il existe une saison sèche (faibles températures, précipitations quasiment nulles) et une saison très humide (hautes températures, très fortes précipitations).

On peut définir les climats équatoriaux et subéquatoriaux comme des climats tropicaux, mais sans saison sèche. Ce climat est donc en permanence humide et peut être très chaud.

DT S6 : Diagramme de l'air humide et zones remarquables



La vapeur d'eau :

Elle est présente en permanence, et dépend de plusieurs éléments comme du corps humain, qui en rejette jusqu'à 3 litres par jour, des appareils de cuisson, des appareils d'entretien, des activités sanitaires (douches, bain, lave-linge…) ou du climat.

Les moisissures (champignons) :

Leur inhalation est dangereuse et peut causer beaucoup de désagréments (asthme, urticaire, maladies plus graves). Elles peuvent apparaître sur le bois, le plâtre, les tissus ou dans les systèmes de ventilation.

Les moisissures peuvent être inactives pendant des années et de nouveau proliférer quand les conditions sont réunies.

Les acariens :

Ils sont inoffensifs, mais leurs excréments sont allergènes. Ils sont présents partout. Ils se concentrent surtout dans les tissus (matelas, draps, vêtements…). Dans 1 g de poussière, il y a jusqu'à 1500 acariens.

Le CO2 :

Il est naturellement émis par les êtres vivants. Dans l'air, le taux de CO2 varie, mais il est en moyenne d'environ 380 ppm soit 0,038 %. La valeur de 0,1 % est celle admise au maximum pour les systèmes de ventilation. On peut parler de seuil de déclenchement. A partir de 4 %, les effets sur la santé peuvent être irréversibles, les bâtiments doivent être évacués. Le CO2 est donc un gaz toxique.

Les COV :

Ce sont les Composés Organiques Volatils, provenant des solvants, de la fermentation, ou des plantes. On en trouve dans les colles, tissus, vernis, peintures, bois. Certains d'entre eux sont nocifs et causent également des troubles.

DT S8 : Formulaire de thermique

Résistance thermique :

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Avec :

- R : résistance thermique [m².K.W^{-1}]
- e : épaisseur [m]
- λ : conductivité thermique [W/m^{-1}.K^{-1}]

Résistance thermique totale :

$$R_T = R_{si} + R_{se} + \sum\left(\frac{e}{\lambda}\right) + \sum(R)$$

	Paroi en contact avec l'extérieur	
Sens du flux	Rsi	Rse
Horizontal	0.13	0.04
Ascendant	0.10	0.04
Descendant	0.17	0.04

Avec :

- RT : résistance thermique totale de la paroi [m².K.W^{-1}]
- Rsi : résistance thermique superficielle d'échange intérieur [m².K.W^{-1}]
- Rse : résistance thermique superficielle d'échange extérieur [m².K.W^{-1}]
- R : résistance thermique d'un élément [m².K.W^{-1}]
- e : épaisseur [m]
- λ : conductivité thermique [W/m^{-1}.K^{-1}]

Coefficient de transmission thermique :

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Avec :

- U : coefficient de transmission thermique [W.m^{-2}.K^{-1}]
- RT : résistance thermique totale de la paroi [m².K.W^{-1}]

Flux de chaleur (A_{parois}) :

$$\phi = U.S.\Delta T$$

Avec :

- Φ : flux de chaleur (A_{parois}) [W]
- U : coefficient de transmission thermique [W.m^{-2}.K^{-1}]
- S : surface de l'échange [m²]
- ΔT : différence de température [K]

$$\Delta T = T_{extérieure} - T_{intérieure}$$

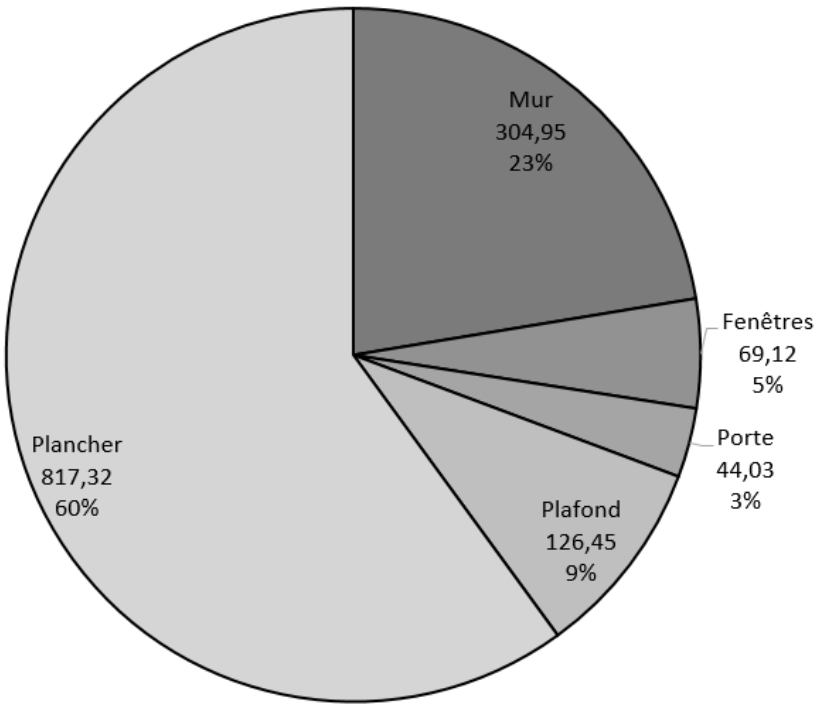
DT S9 : Etude des apports par conduction thermique

Tableau de calcul des apports thermiques par conduction dans les parois A_{parois} :

Eléments		Epaisseur (m)	λ (W/m.K)	R (m².K/W)	Rsi (m².K/W)	Rse (m².K/W)	R total (m².K/W)	U (W/K.m²)	Surface (m²)	T int (°C)	T ext (°C)	ΔT (K)	Φ (W)
Mur	Tôle ext.	0,002	50,000	0,00004	0,13	0,04	2,22	0,45	42,39	22,00	38,00	16,00	304,95
	Isolant	0,076	0,037	2,05405									
	Tôle int.	0,002	50,000	0,00004									
Fenêtres (3 unités)		/	/	/	/	/	/	1,20	3,60				69,12
Porte (1 unité)		/	/	/	/	/	/	1,60	1,72				44,03
Plafond	Tôle ext.	0,002	50,000	0,00004	0,10	0,04	2,30	0,43	18,20				126,45
	Isolant	0,080	0,037	2,16216									
	Tôle int.	0,001	50,000	0,00002									
Plancher	CTBH	0,019	0,130	0,14615	0,17	0,04	0,36	2,81	18,20				817,32
	Tôle ext.	0,002	50,000	0,00004									
												Total :	1361,88

Les formules utilisées dans ce tableau sont celles décrites dans le DT S9.

Répartition des apports par conduction dans les parois :



DT S10 : Modèles de climatiseurs monobloc pour bungalows

Modèle	Unité	ALG2.0	ALG2.5
Alimentation électrique		220-240V, 50Hz, 1 Ph	220-240V, 50Hz, 1 Ph
Classe énergétique		A+	A+
Puissance frigorifique	W	2000	2500
Puissance absorbée	W	667	833
Déshumidification	L/h	0,8	1
Puissance consommée max.	W	1000	1250
Câble d'alimentation		1,5X3/VDE	1,5X3/VDE
Commande		Manuelle + télécommande	Manuelle + télécommande
Gaz		R32 / 400g	R32 / 400g
Niveau sonore (Int. / Ext.)	dB(A)	51,3 / 58,7	51,3 / 58,7
Dimensions (LxHxP)	mm	560 x 400 x 660	560 x 400 x 660
Poids net	kg	43	43

Modèle	Unité	ALG3.5	ALG5.0
Alimentation électrique		220-240V, 50Hz, 1 Ph	220-240V, 50Hz, 1 Ph
Classe énergétique		A+	A
Puissance frigorifique	W	3500	5000
Puissance absorbée	W	1167	1667
Déshumidification	L/h	1,2	2
Puissance consommée max.	W	1750	2500
Câble d'alimentation		1,5X3/VDE	1,5X3/VDE
Commande		Manuelle + télécommande	Manuelle + télécommande
Gaz		R32 / 500g	R32 / 500g
Niveau sonore (Int. / Ext.)	dB(A)	51,3 / 58,7	51,3 / 58,7
Dimensions (LxHxP)	mm	560 x 400 x 660	560 x 400 x 660
Poids net	kg	43	43

Vue extérieure

Vue intérieure

DT S11 : Données sur le bungalow technique

Ossature :

- Poteaux et toiture galvanisés
- Plancher protection antirouille et sous-face en tôle d'acier galvanisé (épaisseur équivalente : 2 mm, λ_{acier} = 50 $W.m^{-1}.K^{-1}$)
- Laquée gris clair RAL 7035

Couverture :

- Bacs nervurés en acier revêtu alu-zinc (épaisseur équivalente : 2 mm)
- Laine de verre de 80 mm d'épaisseur avec pare-vapeur aluminium, Euroclasse A1 (équivalent M0) ($\lambda_{laine\ de\ verre}$ = 0,037 $W.m^{-1}.K^{-1}$)

Plafond :

- Plafond en tôle acier prélaquée RAL 9002 avec feutre isophonique (acoustique) (épaisseur : 1 mm)
- Hauteur sous plafond : 2,50 m

Panneau :

- Épaisseur totale 80 mm
- Remplissage : laine de roche Euroclasse A1 (équivalent M0)
- Finition tôle d'acier galvanisé prélaquée gaufrée RAL 7035, intérieure et extérieure (épaisseurs : 2 mm)

Plancher (18,20 m²) :

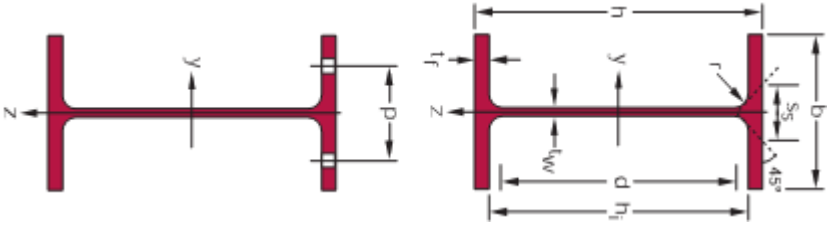
- Revêtement de sol PVC U2SP2 (résistance thermique négligeable) (épaisseur : 3 mm)
- CTBH épaisseur 19 mm (EN312 P5) (λ_{CTB} = 0,13 $W.m^{-1}.K^{-1}$) (les panneaux estampillés CTBH (Centre Technique du Bois, classement Humide) sont des panneaux en aggloméré de particules en bois hydrofugé ayant satisfait à des critères de résistance aux ambiances humides)
- Laine de verre de 160 mm d'épaisseur Euroclasse A1 (équivalent M0) avec tôle de protection en sous-face
- Charge d'exploitation admissible de 250 kg /m²

Fenêtres :

- PVC blanc (en aluminium laqué blanc pour les baies vitrées)
- Dimensions : 1,20 x 1,00 m
- Nombre : 3
- Double vitrage 4-15-4 trempé 2 faces
- Uw = 1,2 $W.m^{-2}.K^{-1}$

Porte :

- PVC blanc
- 2,15 x 0,80 m
- Ud = 1,6 $W.m^{-2}.K^{-1}$

Masse hors éléments d'aménagement : 2300 kg

Désignation Designation Bezeichnung	Dimensions Abmessungen						Dimensions de construction Dimensions for detailing Konstruktionsmaße					Surface Oberfläche		Désignation Designation Bezeichnung	Valeurs statiques / Section properties / Statische Kennwerte											
															axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y					axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z						
	G	h	b	t_w	t_f	r	A	h_i	d	Ø	p_{min}	p_{max}	A_L	A_G	G	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$♦	i_y	A_{vz}	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$♦	i_z	s_s	I_t	I_w
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm^2 x10^2	mm	mm		mm	mm	m^2/m	m^2/t	kg/m	mm^4 x10^4	mm^3 x10^3	mm^3 x10^3	mm x10	mm^2 x10^2	mm^4 x10^4	mm^3 x10^3	mm^3 x10^3	mm x10	mm	mm^4 x10^4	mm^6 x10^9
IPE 80*	6,0	80	46	3,8	5,2	5	7,64	69,6	59,6	-	-	-	0,328	54,64	IPE 80	6,0	80,14	20,03	23,22	3,24	3,58	8,49	3,69	5,82	1,05	20,10	0,70	0,12
IPE 100*	8,1	100	55	4,1	5,7	7	10,3	88,6	74,6	-	-	-	0,400	49,33	IPE 100	8,1	171,0	34,20	39,41	4,07	5,08	15,92	5,79	9,15	1,24	23,70	1,20	0,35
IPE 120	10,4	120	64	4,4	6,3	7	13,2	107,4	93,4	-	-	-	0,475	45,82	IPE 120	10,4	317,8	52,96	60,73	4,90	6,31	27,67	8,65	13,58	1,45	25,20	1,74	0,89
IPE 140	12,9	140	73	4,7	6,9	7	16,4	126,2	112,2	-	-	-	0,551	42,70	IPE 140	12,9	541,2	77,32	88,34	5,74	7,64	44,92	12,31	19,25	1,65	26,70	2,45	1,98
IPE 160	15,8	160	82	5	7,4	9	20,1	145,2	127,2	-	-	-	0,623	39,47	IPE 160	15,8	869,3	108,7	123,9	6,58	9,66	68,31	16,66	26,10	1,84	30,34	3,60	3,96
IPE 180	18,8	180	91	5,3	8	9	23,9	164	146	M 10	48	48	0,698	37,13	IPE 180	18,8	1317	146,3	166,4	7,42	11,25	100,9	22,16	34,60	2,05	31,84	4,79	7,43
IPE 220	26,2	220	110	5,9	9,2	12	33,4	201,6	177,6	M 12	60	62	0,848	32,36	IPE 220	26,2	2772	252,0	285,4	9,11	15,88	204,9	37,25	58,11	2,48	38,36	9,07	22,67
IPE 240	30,7	240	120	6,2	9,8	15	39,1	220,4	190,4	M 12	66	68	0,922	30,02	IPE 240	30,7	3892	324,3	366,6	9,97	19,14	283,6	47,27	73,92	2,69	43,37	12,88	37,39
IPE 270	36,1	270	135	6,6	10,2	15	45,9	249,6	219,6	M 16	72	72	1,041	28,86	IPE 270	36,1	5790	428,9	484,0	11,23	22,14	419,9	62,20	96,95	3,02	44,57	15,94	70,58
IPE 300	42,2	300	150	7,1	10,7	15	53,8	278,6	248,6	M 16	72	86	1,160	27,46	IPE 300	42,2	8356	557,1	628,4	12,46	25,68	603,8	80,50	125,2	3,35	46,07	20,12	125,9
IPE 330	49,1	330	160	7,5	11,5	18	62,6	307	271	M 16	78	96	1,254	25,52	IPE 330	49,1	11770	713,1	804,3	13,71	30,81	788,1	98,52	153,7	3,55	51,59	28,15	199,1
IPE 360	57,1	360	170	8	12,7	18	72,7	334,6	298,6	M 22	88	88	1,353	23,70	IPE 360	57,1	16270	903,6	1019	14,95	35,14	1043	122,8	191,1	3,79	54,49	37,32	313,6
IPE 400	66,3	400	180	8,6	13,5	21	84,5	373	331	M 22	96	98	1,467	22,12	IPE 400	66,3	23130	1156	1307	16,55	42,69	1318	146,4	229,0	3,95	60,20	51,08	490,0
IPE 450	77,6	450	190	9,4	14,6	21	98,8	420,8	378,8	M 24	100	102	1,605	20,69	IPE 450	77,6	33740	1500	1702	18,48	50,85	1676	176,4	276,4	4,12	63,20	66,87	791,0
IPE 500	90,7	500	200	10,2	16	21	116	468	426	M 24	102	112	1,744	19,23	IPE 500	90,7	48200	1928	2194	20,43	59,87	2142	214,2	335,9	4,31	66,80	89,29	1249
IPE 550	106	550	210	11,1	17,2	24	134	515,6	467,6	M 24	110	122	1,877	17,78	IPE 550	106	67120	2441	2787	22,35	72,34	2668	254,1	400,5	4,45	73,62	123,2	1884
IPE 600	122	600	220	12	19	24	156	562	514	M 27	116	118	2,015	16,45	IPE 600	122	92080	3069	3512	24,30	83,78	3387	307,9	485,6	4,66	78,12	165,4	2846