

## Annexes

### Annexe 1. Extraits du carnet de détails de l'école Steiner Waldorf

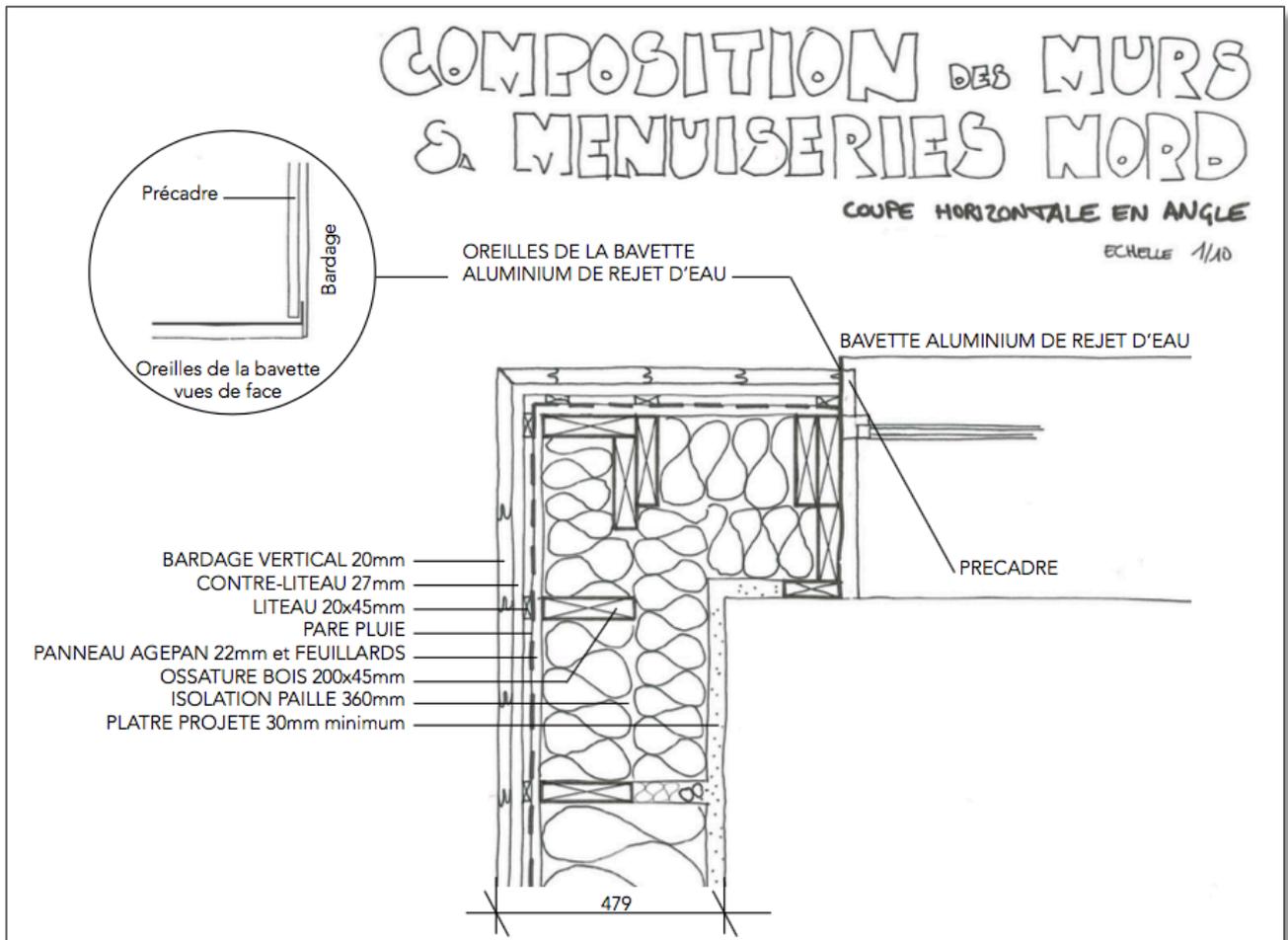


Figure 27 - détail de la façade nord de la classe 1 de l'école Steiner Waldorf, source D. Farhi et S. Guémené

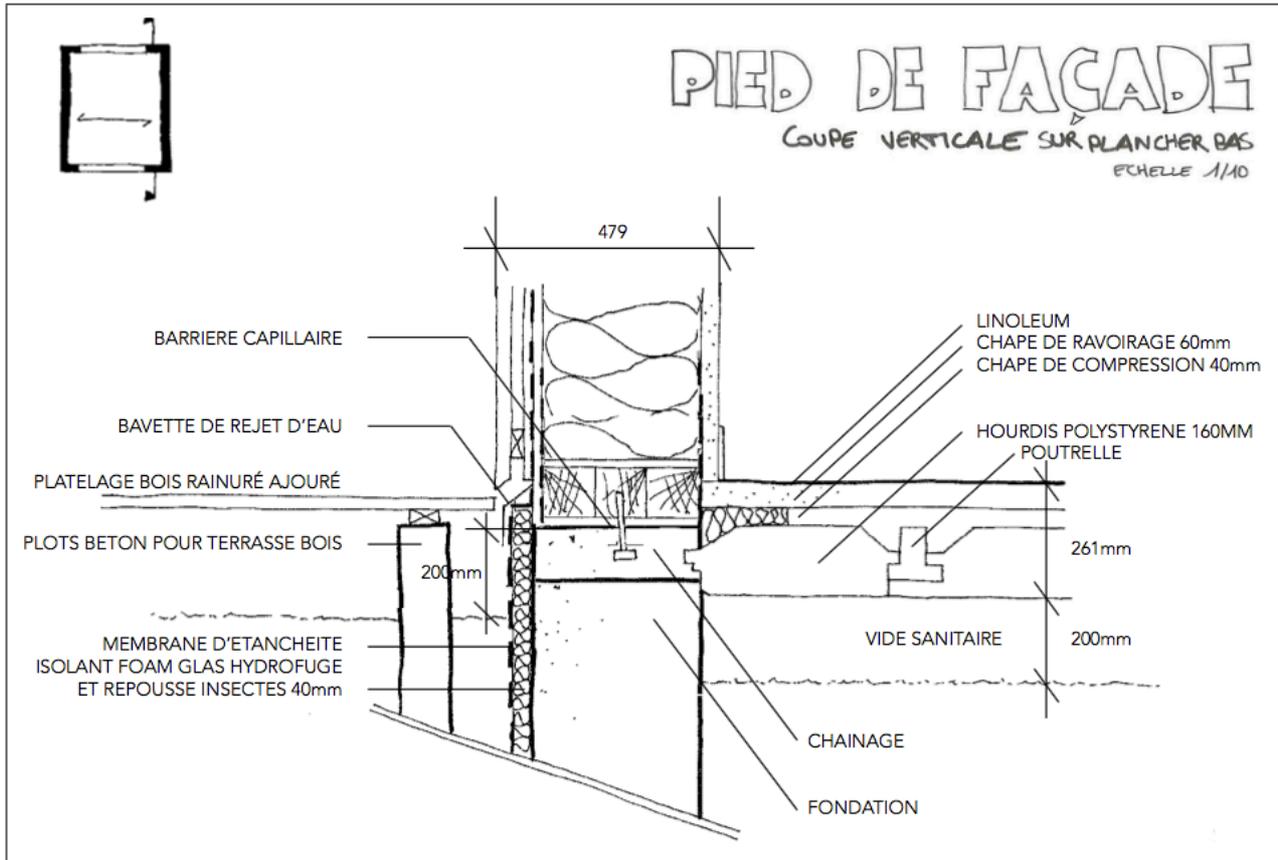


Figure 28 - détail du pied de façade de la classe 1 de l'école Steiner Waldorf, source D. Farhi et S. Guémené

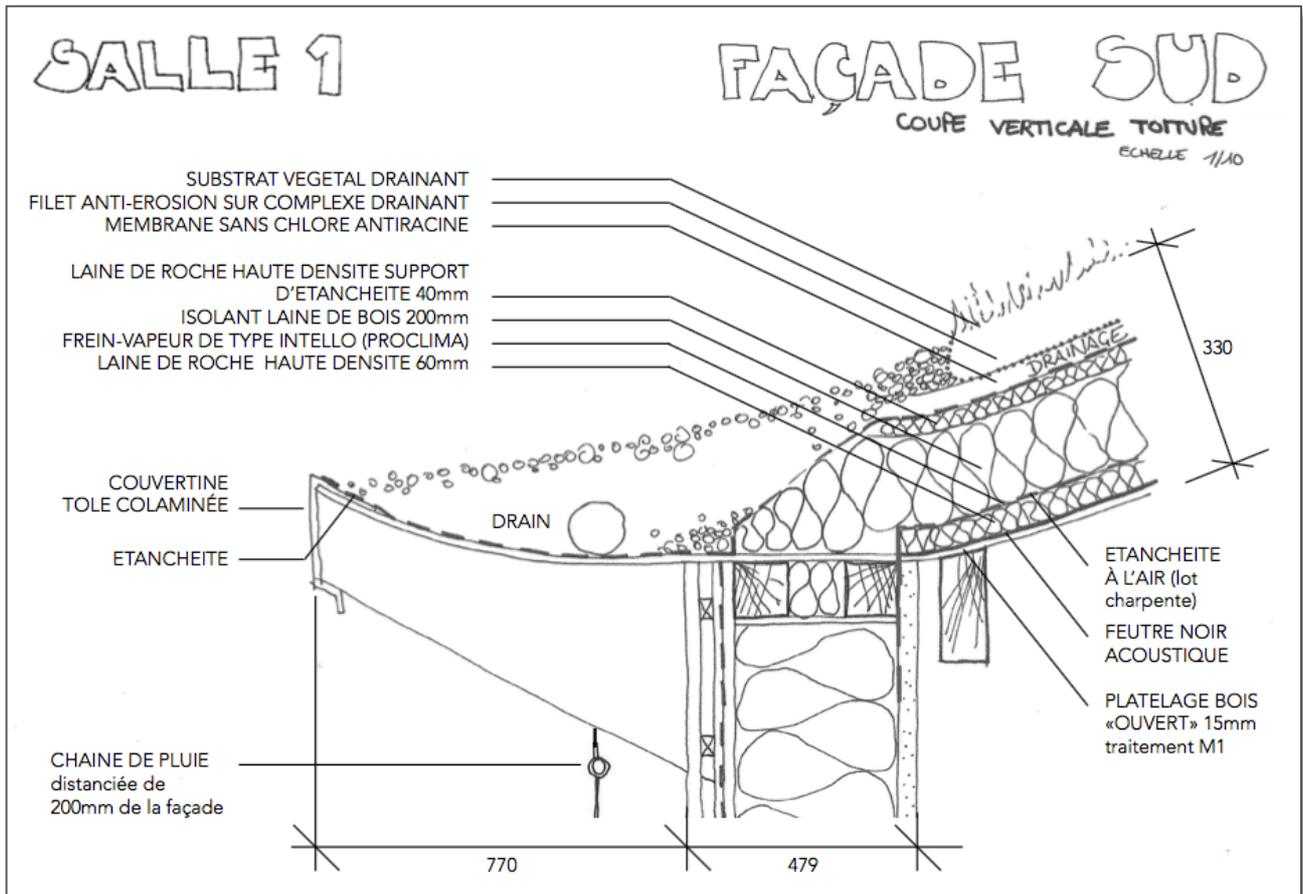


Figure 29 - détail de la toiture de la classe 1 de l'école Steiner Waldorf, source D. Farhi et S. Guémené

## Annexe 2. Modes constructifs de base

### Types constructifs :

#### Murs :

<b>Mur ossature bois + paille</b>						<b><math>U=0,191 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)	
<i>Bardage bois</i>	20	0,14	0,1429	500	2500	
<i>Lame d'air</i>	47	-	0,18	-	-	
<i>Agepan (contreventement)</i>	22	0,09	0,244	570	1500	
<i>Ossature bois + paille</i>	360	0,0805	4,472	120	1740	
<i>Plâtre projeté</i>	30	0,16	0,1875	1000	1000	
<b>Total</b>	<b>479</b>	-	<b>5,2269</b>	-	-	

<b>Mur béton + ITE</b>						<b><math>U=0,191 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)	
<i>Bardage bois</i>	25	0,14	0,1786	500	2500	
<i>Lame d'air</i>	75	-	0,18	-	-	
<i>Laine de bois</i>	170	0,038	4,4737	110	2100	
<i>Béton</i>	200	1,4	0,1429	2100	840	
<i>Plâtre projeté</i>	40	0,16	0,25	1000	1000	
<b>Total</b>	<b>510</b>	-	<b>5,2251</b>	-	-	

<b>Mur « 2226 » (double brique monomur)</b>					<b><math>U=0,114 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Enduit chaux hydraulique</i>	8	0,42	0,019	1200	837
<i>brique monomur 380 H.i maçonnée enduite 2 faces</i>	401	0,0842	4,7625	890	1000
<i>brique monomur 380 maçonnée enduite 2 faces</i>	401	0,1003	3,998	890	1000
<i>Enduit chaux aérienne</i>	5	0,42	0,0119	1200	837
<b>Total</b>	<b>815</b>	-	<b>8,7914</b>	-	-

<b>Mur moellon + ITI (vernaculaire)</b>					<b><math>U=0,848 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Enduit chaux hydraulique</i>	50	0,42	0,119	1200	837
<i>Moellon+mortier de chaux</i>	500	1,5	0,333	1800	720
<i>Enduit chaux/chanvre</i>	80	0,11	0,7273	800	1500
<b>Total</b>	<b>630</b>	-	<b>1,1796</b>	-	-

### Toitures :

<b>Toiture végétalisée</b>					<b><math>U=0,121 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Membrane d'étanchéité</i>	5	0,5	0,01	1700	1000
<i>Laine de roche HD</i>	60	0,04	1,5	135	1000
<i>Laine de bois</i>	250	0,038	6,5789	110	1200
<i>Platelage bois</i>	25	0,14	0,1786	500	2500
<b>Total</b>	<b>340</b>	-	<b>8,2675</b>	-	-

<b>Toiture végétalisée « 2226 »</b>					<b><math>U=0,082 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance (m <sup>2</sup> .K/W)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Membrane d'étanchéité</i>	5	0,5	0,01	1700	1000
<i>Laine de roche HD</i>	60	0,04	1,5	135	1000
<i>Laine de bois</i>	400	0,038	10,5263	110	1200
<i>Platelage bois</i>	25	0,14	0,1786	500	2500
<b>Total</b>	<b>490</b>	-	<b>12,2149</b>	-	-

<b>Toiture tuile</b>					<b><math>U=1,973 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance (m <sup>2</sup> .K/W)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Tuiles en terre cuite</i>	18	0,64	0,0281	1570	800
<i>Mortier de chaux</i>	30	0,87	0,0345	1800	840
<i>Voligeage</i>	12	0,14	0,0857	500	2500
<i>Lame d'air</i>	12	-	0,18	-	-
<i>Platelage bois</i>	25	0,14	0,1786	500	2500
<b>Total</b>	<b>97</b>	-	<b>0,5069</b>	-	-

### **Planchers bas :**

<b>Plancher linoléum - poutrelle hourdis</b>					<b><math>U=0,254 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance (m <sup>2</sup> .K/W)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Poutrelles béton + hourdis polystyrène</i>	160	0,0513	3,1189	163	1363
<i>Chape de compression</i>	40	0,16	0,25	500	840
<i>Chape de ravaillage</i>	60	0,16	0,375	500	840
<i>Linoléum</i>	10	0,1	0,1	400	1360
<b>Total</b>	<b>270</b>	-	<b>3,9439</b>	-	-

<b>Plancher linoléum - poutrelle hourdis « 2226 »</b>					<b><math>U=0,168 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Laine de bois</i>	80	0,038	2,1053	110	1200
<i>Poutrelles béton + hourdis polystyrène</i>	160	0,0513	3,1189	163	1363
<i>Chape de compression</i>	40	0,16	0,25	500	840
<i>Chape de ravaillage</i>	60	0,16	0,375	500	840
<i>Linoléum</i>	10	0,1	0,1	400	1360
<b>Total</b>	<b>350</b>	-	<b>5,9492</b>	-	-

<b>Plancher terre cuite sur mortier</b>					<b><math>U=1,972 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Gravier</i>	150	0,36	0,4167	1840	840
<i>Mortier de chaux</i>	50	0,87	0,0575	1800	840
<i>Carreaux de terre cuite</i>	23	0,7	0,0329	2100	650
<b>Total</b>	<b>223</b>	-	<b>0,5071</b>	-	-

### **Menuiseries :**

Type	Détails	$U_w$ ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ )	Facteur solaire	Transmission lumineuse
<i>Double vitrage</i>	Fenêtres double vitrage à basse émissivité et lame d'argon avec 10% de cadre	1,3	40%	76%
<i>Triple vitrage</i>	Fenêtres triple vitrage à basse émissivité et lame d'argon avec 10% de cadre	1,1	37%	76%
<i>Simple vitrage</i>	Fenêtres simple vitrage avec 10% de cadre	5,4	82%	76%

## Modes constructifs :

<i>Construction</i>	<i>Murs</i>	<i>Toiture</i>	<i>Plancher bas</i>	<i>Menuiseries</i>
<b><i>Bois-paille</i></b>	Ossature bois + paille	Toiture végétalisée	Plancher linoléum - poutrelles hourdis	Double vitrage
<b><i>Béton-ITE</i></b>	Béton + ITE			
<b><i>Frugal « 2226 »</i></b>	« 2226 »	Toiture végétalisée « 2226 »	Plancher linoléum - poutrelles hourdis « 2226 »	Triple vitrage
<b><i>Vernaculaire provençal</i></b>	Moellon + ITI	Toiture tuile	Plancher terre cuite sur mortier	Simple vitrage

## Annexe 3. Modes constructifs des variantes

### Types constructifs :

#### Murs :

<b>Mur ossature bois + paille à isolation renforcée</b>					<b><math>U=0,112 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Bardage bois</i>	20	0,14	0,1429	500	2500
<i>Lame d'air</i>	47	-	0,18	-	-
<i>Laine de bois</i>	140	0,038	3,6842	110	2100
<i>Agepan (contreventement)</i>	22	0,09	0,244	570	1500
<i>Ossature bois + paille</i>	360	0,0805	4,472	120	1740
<i>Plâtre projeté</i>	30	0,16	0,1875	1000	1000
<b>Total</b>	<b>619</b>	-	<b>8,9111</b>	-	-

<b>Mur moellon + ITE laine de bois (vernaculaire)</b>					<b><math>U=0,232 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Enduit chaux hydraulique</i>	50	0,42	0,119	1200	837
<i>Laine de bois</i>	140	0,038	3,6842	110	2100
<i>Moellon+mortier de chaux</i>	400	1,5	0,2667	1800	720
<i>Plâtre</i>	40	0,16	0,25	1000	1000
<b>Total</b>	<b>630</b>	-	<b>4,3199</b>	-	-

**Toitures :**

<b>Toiture tuile + laine de bois</b>					<b><math>U=0,173 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Tuiles en terre cuite</i>	18	0,64	0,0281	1570	800
<i>Mortier de chaux</i>	30	0,87	0,0345	1800	840
<i>Voligeage</i>	12	0,14	0,0857	500	2500
<i>Laine de bois</i>	200	0,038	3,5,2632	110	2100
<i>Lame d'air</i>	12	-	0,18	-	-
<i>Platelage bois</i>	25	0,14	0,1786	500	2500
<b>Total</b>	<b>297</b>	-	<b>5,7701</b>	-	-

**Modes constructifs :**

<i>Construction</i>	<i>Murs</i>	<i>Toiture</i>	<i>Plancher bas</i>	<i>Menuiseries</i>
<b><i>Bois-paille à isolation renforcée</i></b>	Ossature bois + paille à isolation renforcée	Toiture végétalisée « 2226 »	Plancher linoléum - poutrelles hourdis « 2226 »	Triple vitrage
<b><i>Vernaculaire provençal à isolation renforcée</i></b>	Moellon + ITE laine de bois	Toiture tuile + laine de bois	Plancher terre cuite sur mortier	Double vitrage

## Annexe 4. Répartition des températures

### Températures les plus basses :

Année	<	-5°C	-4°C	-3°C	-2°C	-1°C	0°C	1°C	2°C	3°C	4°C	5°C	6°C	7°C	8°C	9°C	10°C
2015	h	0	0	0	7	19	86	195	402	610	818	1098	1353	1678	2027	2425	2811
	%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	1,0%	2,2%	4,6%	7,0%	9,3%	12,5%	15,4%	19,2%	23,1%	27,7%	32,1%
2050	h	0	0	0	7	29	99	221	416	614	827	1096	1383	1664	2006	2364	2745
	%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	1,1%	2,5%	4,7%	7,0%	9,4%	12,5%	15,8%	19,0%	22,9%	27,0%	31,3%
2100	h	0	0	0	0	7	28	95	217	418	615	837	1103	1387	1677	2021	2390
	%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	1,1%	2,5%	4,8%	7,0%	9,6%	12,6%	15,8%	19,1%	23,1%	27,3%

Tableau 15 - répartition des températures extérieures les plus basses en 2015, 2050 et 2100

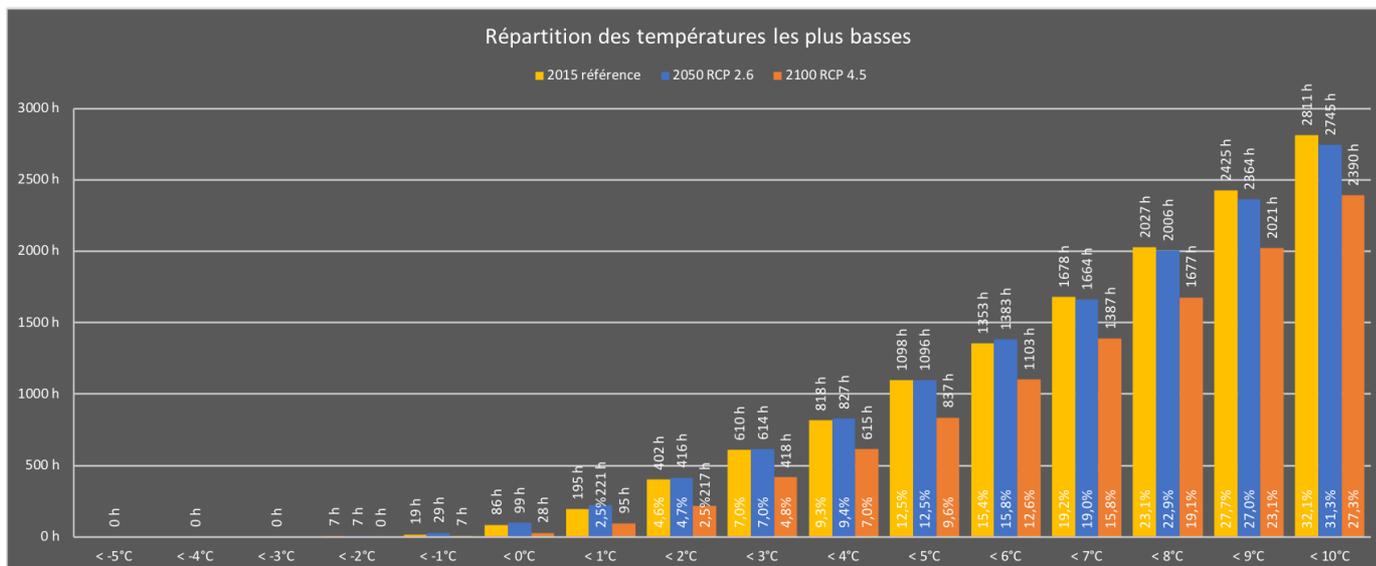


Figure 30 - histogramme de répartition des températures extérieures les plus basses en 2015, 2050 et 2100

## Températures les plus hautes :

Année >	25°C	26°C	27°C	28°C	29°C	30°C	31°C	32°C	33°C	34°C	35°C	36°C	37°C	38°C	39°C	40°C
<b>2015</b> h	959	815	691	570	474	381	292	204	123	59	20	5	0	0	0	0
%	10,9%	9,3%	7,9%	6,5%	5,4%	4,3%	3,3%	2,3%	1,4%	0,7%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>2050</b> h	1068	898	784	668	546	453	359	270	193	113	56	16	5	0	0	0
%	12,2%	10,3%	8,9%	7,6%	6,2%	5,2%	4,1%	3,1%	2,2%	1,3%	0,6%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>2100</b> h	1273	1072	901	789	676	557	460	367	286	201	122	59	20	5	0	0
%	14,5%	12,2%	10,3%	9,0%	7,7%	6,4%	5,3%	4,2%	3,3%	2,3%	1,4%	0,7%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%

Tableau 16 - répartition des températures extérieures les plus hautes en 2015, 2050 et 2100

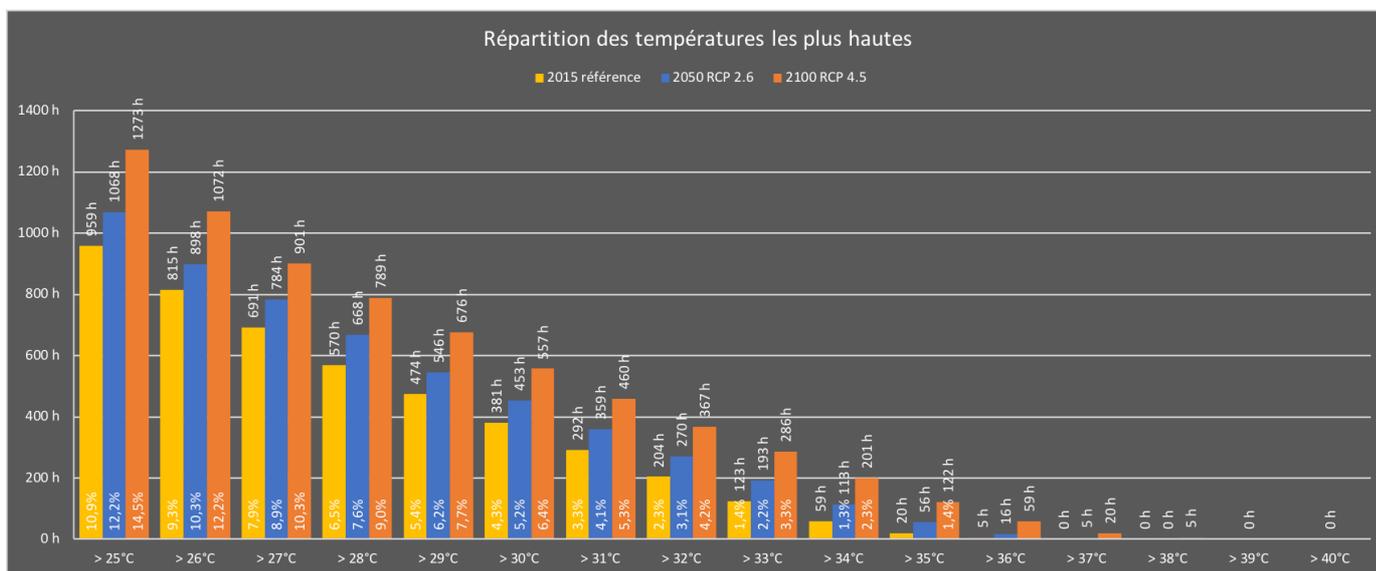


Figure 31 - histogramme de répartition des températures extérieures les plus hautes en 2015, 2050 et 2100

## Annexe 5. Analyses comparatives des variantes constructives

### Courbes de température intérieure :

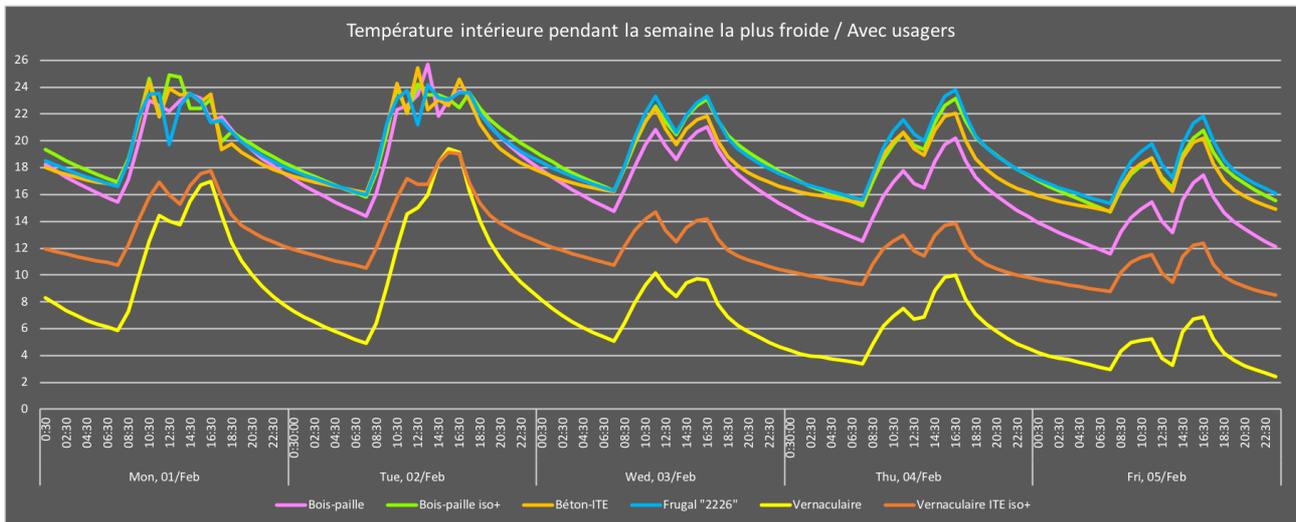


Figure 32 - courbes de température intérieure pendant la semaine la plus froide en 2100 avec variantes

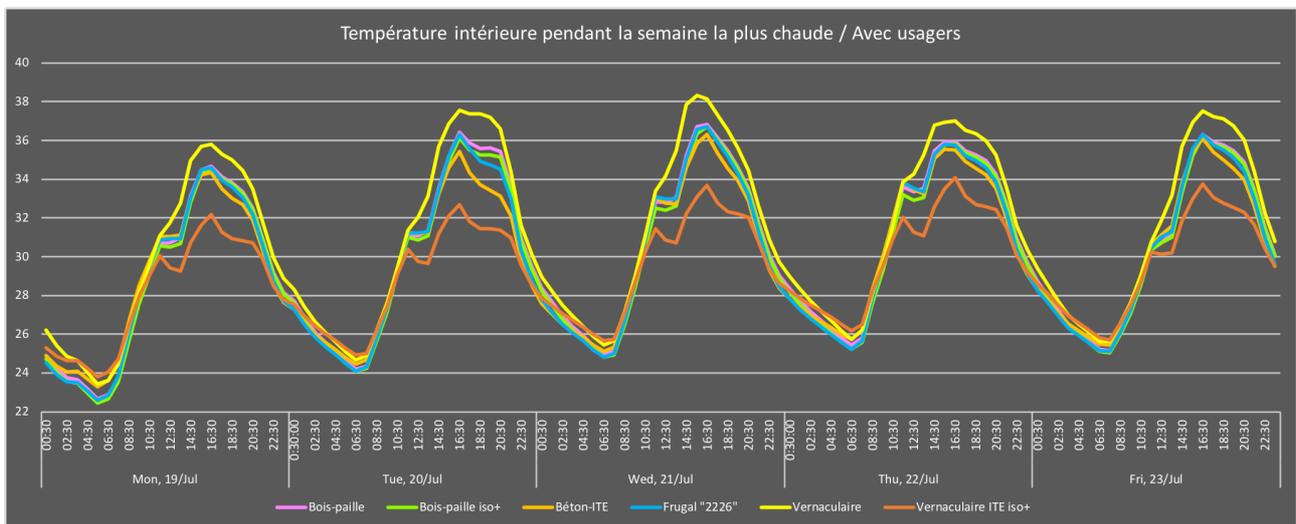


Figure 33 - courbes de température intérieure pendant la semaine la plus chaude en 2100 avec variantes

## Courbes de répartition des températures :

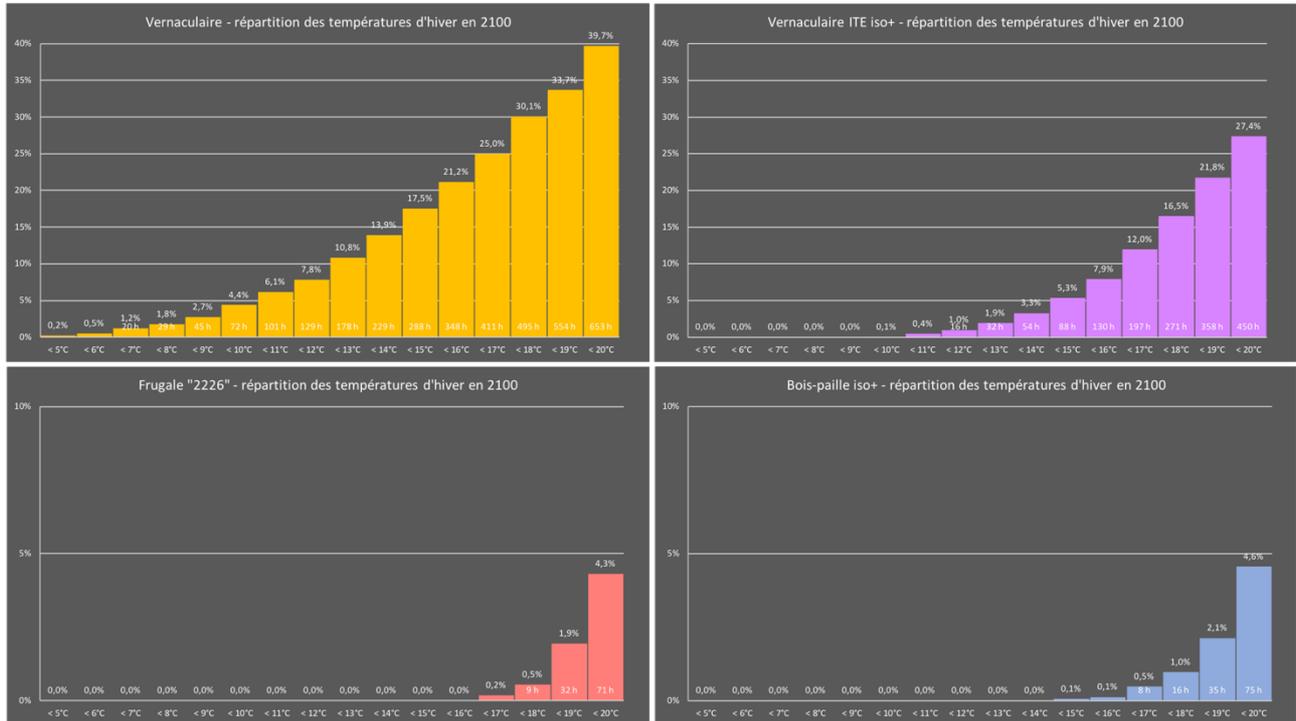


Figure 34 - répartition des températures des variantes (à droite) en hiver en 2100

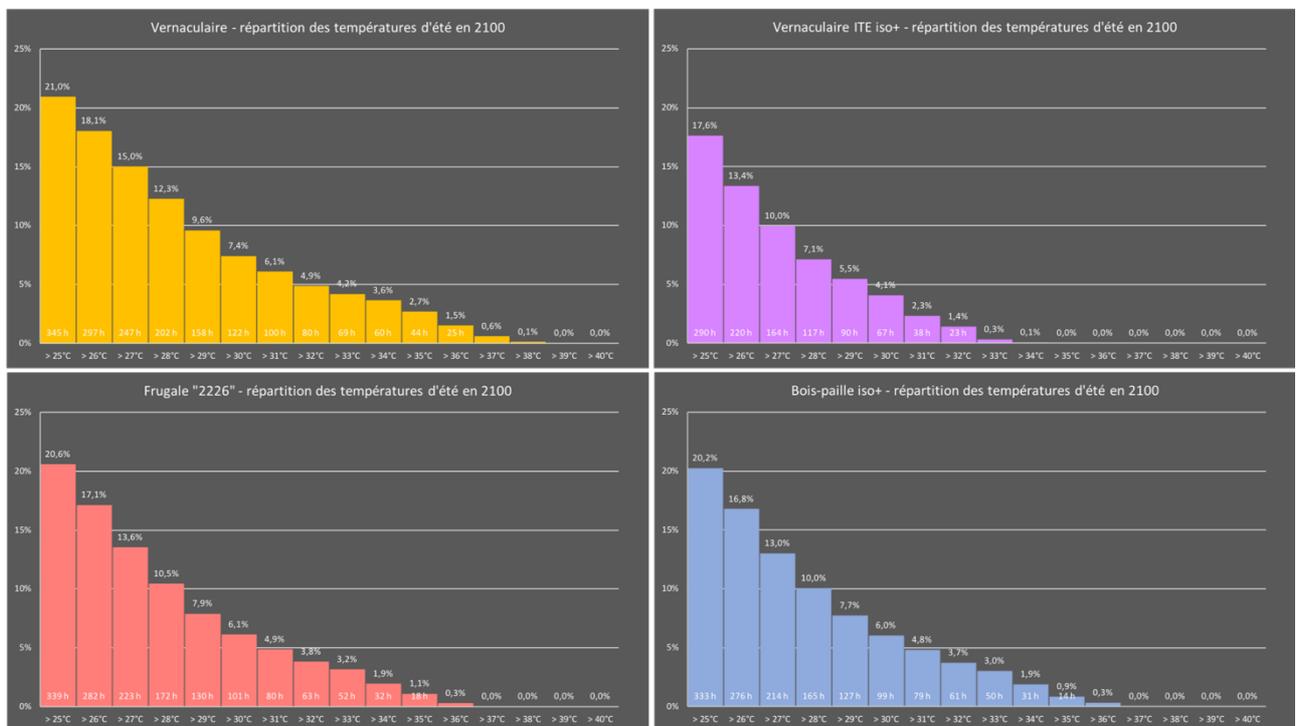


Figure 35 - répartition des températures des variantes (à droite) en été en 2100

## Annexe 6. Modes constructifs du plancher des combles

### Planchers bas :

<b>Plancher combles ITE</b>					<b><math>U=0,157 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Voligeage</i>	20	0,14	0,1429	500	2500
<i>Laine de bois</i>	220	0,038	5,7895	110	2100
<i>Béton</i>	100	1,4	0,0714	2100	840
<i>Lame d'air</i>	50	-	0,21	-	-
<i>Platelage bois</i>	20	0,14	0,1429	500	2500
<b>Total</b>	<b>410</b>	-	<b>6,3566</b>	-	-

<b>Plancher combles ITI</b>					<b><math>U=0,157 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})</math></b>
<i>Extérieur vers intérieur</i>	Épaisseur (mm)	Conductivité (W/m/K)	Résistance ( $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ )	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Chaleur spécifique (J/kg/K)
<i>Ragréage</i>	50	0,41	0,122	1200	840
<i>Béton</i>	100	1,4	0,0714	2100	840
<i>Laine de bois</i>	220	0,038	5,7895	110	2100
<i>Lame d'air</i>	50	-	0,21	-	-
<i>Platelage bois</i>	20	0,14	0,1429	500	2500
<b>Total</b>	<b>440</b>	-	<b>6,3557</b>	-	-

## Annexe 7. Résultats de l'étude de la variante comble sous toiture 2 pentes

### Courbes de température intérieure :

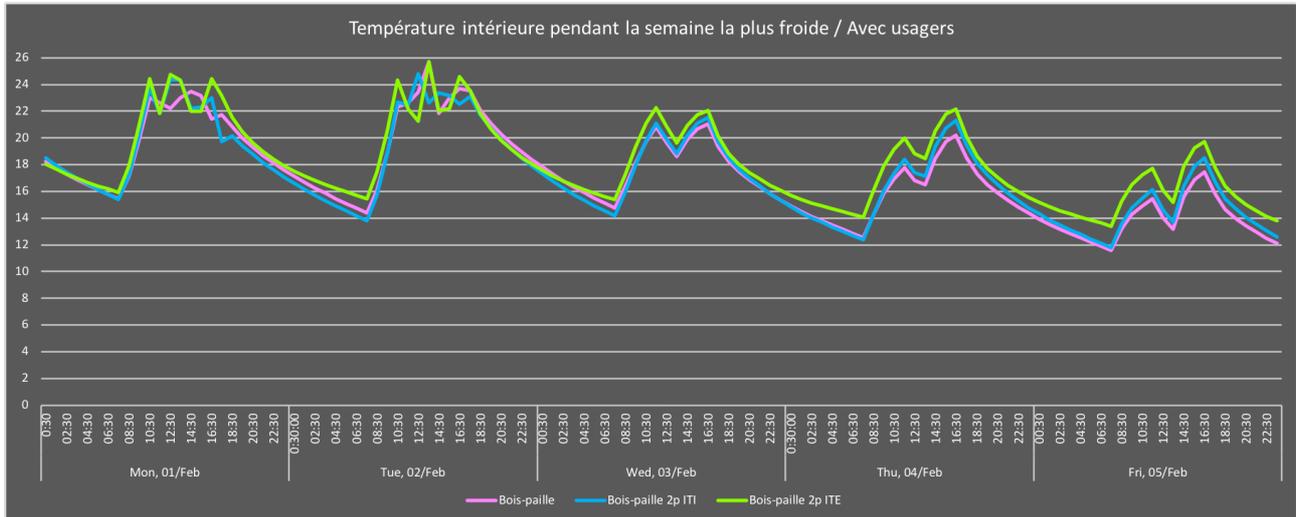


Figure 36 - courbe de température intérieure pendant la semaine la plus froide en 2100 pour la variante bois-paille 2 pentes

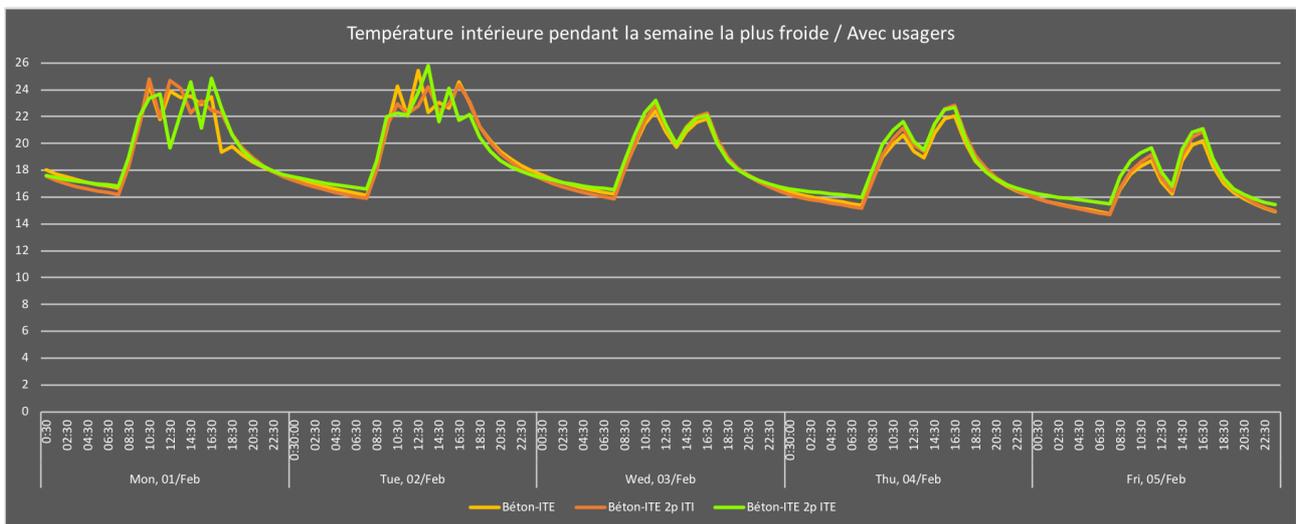


Figure 37 - courbe de température intérieure pendant la semaine la plus froide en 2100 pour la variante béton-ITE 2 pentes

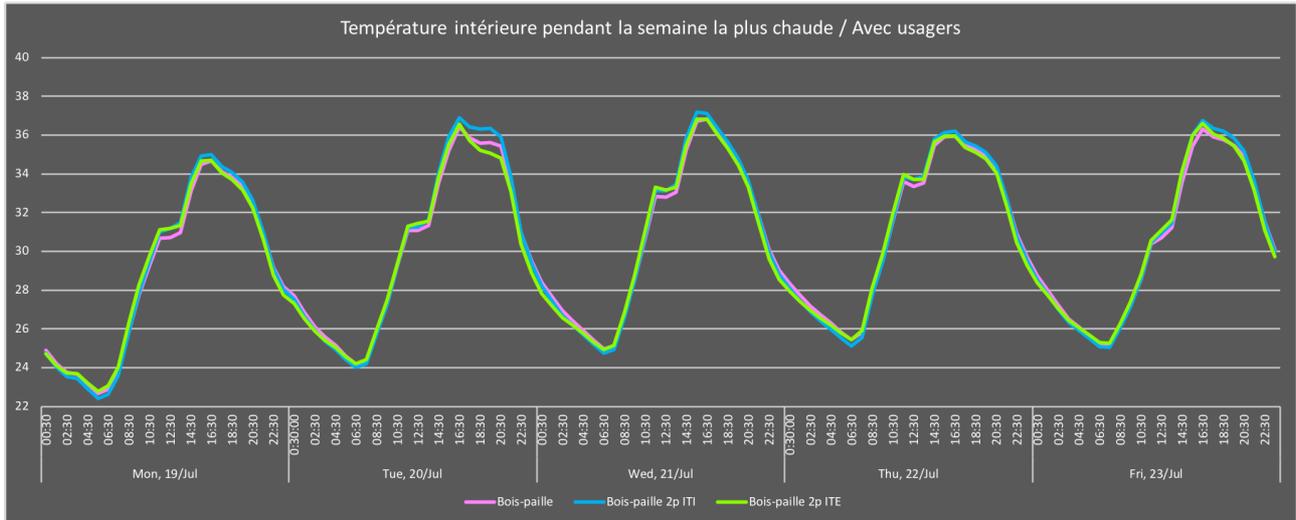


Figure 38 - courbe de température intérieure pendant la semaine la plus chaude en 2100 pour la variante bois-paille 2 pentes

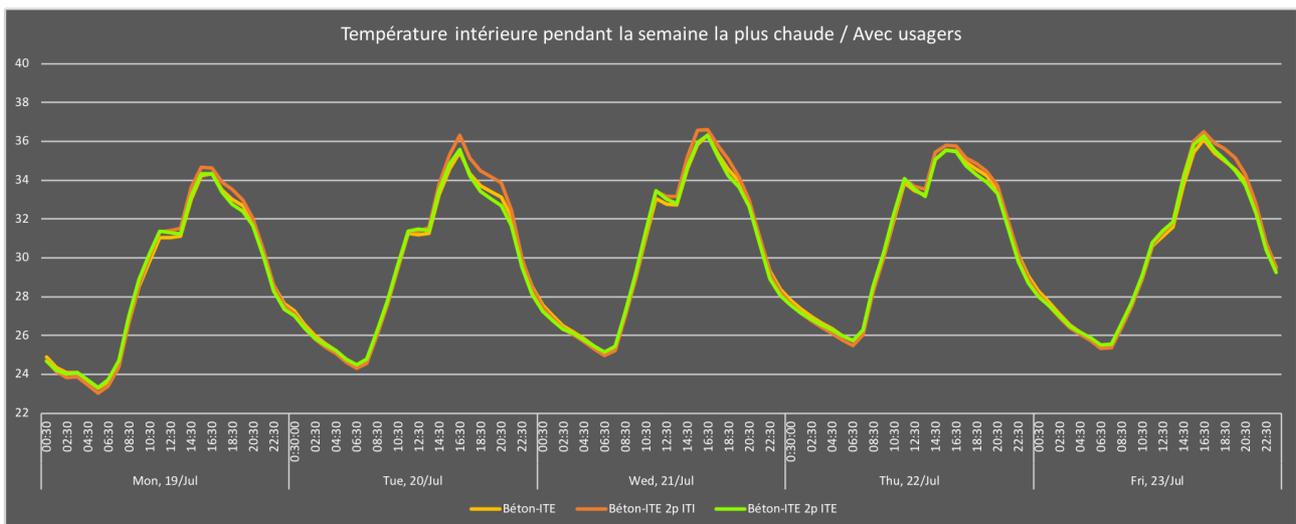


Figure 39 - courbe de température intérieure pendant la semaine la plus chaude en 2100 pour la variante béton-ITE 2 pentes

## Tableaux de besoin :

Mode constructif	2100	Écart
Bois-paille	15,0	
Bois-paille 2p ITE	12,8	-14,7%
Bois-paille 2p ITI	14,9	-0,5%

Mode constructif	2100	Écart
Béton ITE	11,0	
Béton ITE 2p ITE	9,0	-18,0%
Béton ITE 2p ITI	11,3	+3,0%

Tableau 17 - besoin de chauffage des variantes 2 pentes en 2100, en  $kWh_{eu}/m^2/an$

Mode constructif	2100	Écart
Bois-paille	8,79	
Bois-paille 2p ITE	8,84	+0,5%
Bois-paille 2p ITI	10,11	+15,0%

Mode constructif	2100	Écart
Béton ITE	6,99	
Béton ITE 2p ITE	7,00	+0,1%
Béton ITE 2p ITI	8,17	+17,0%

Tableau 18 - besoin de climatisation des variantes 2 pentes en 2100, en  $kWh_{eu}/m^2/an$

Mode constructif	2100	Écart
Bois-paille	23,8	
Bois-paille 2p ITE	21,6	-9,1%
Bois-paille 2p ITI	25,0	+5,2%

Mode constructif	2100	Écart
Béton ITE	18,0	
Béton ITE 2p ITE	16,0	-11,0%
Béton ITE 2p ITI	19,5	+8,4%

Tableau 19 - besoin total des variantes 2 pentes en 2100, en  $kWh_{eu}/m^2/an$