

N° affaire : 21-029

Date : 16 septembre 2021

Réf. : DEB/RE2B-2021-122-KZ/NZ

N° SAP 70078683

# Étude d'évaluation des écarts max de température atteintes dans le procédé MASTROSISTEMA avec la pierre reconstituée GEOPIETRA

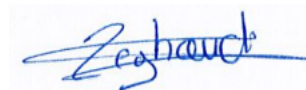
Version 1

## Demandeur de l'étude :

**GEOPIETRA**

VIA DELLA FERROVIA 74 / E  
IT – 25080 GAVARDO (BS), ITALIE

Auteur <sup>1</sup>	Approbateur	Vérificateur(s)
K. ZIBOUCHE	F. LEGUILLON	N. ZEGHOUDI



1. Tél. : 01.64.68.89.68

La reproduction de ce rapport d'étude n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral, sauf accord particulier du CSTB.

Ce rapport d'étude comporte **27** pages dont **13** pages d'annexes.

Contenu

1. OBJECTIF DE L'ETUDE.....	3
2. DESCRIPTION SUCCINCTE .....	3
3. METHODOLOGIE.....	4
3.1. Principe .....	4
3.2. Règles de calcul.....	4
3.3. Hypothèses .....	4
3.3.1. Géométrie .....	4
3.3.2. Propriétés thermiques et mécaniques des matériaux .....	5
3.3.3. Sollicitations thermiques .....	6
3.3.4. Sollicitations mécaniques.....	7
3.4. Présentation des cas simulés .....	7
4. RESULTATS .....	8
4.1. Températures maximales $T_{max}$ et écarts maximaux $\Delta T_{max}$ .....	8
4.2. Contraintes mécaniques .....	12
Annexe 1 : Courbes d'évolution des températures.....	15

## 1. OBJECTIF DE L'ETUDE

Le CPT 3035- V2 relatif aux systèmes d'isolation thermique extérieure par enduit sur polystyrène expansé ne vise pas l'utilisation de certains revêtements de teinte foncée. La limite est définie en termes de coefficient d'absorption solaire des revêtements. Ceux-ci ne doivent pas excéder 0,7 pour les parois pouvant être exposées au rayonnement solaire direct. Cette limite est abaissée à 0,5 pour les parois situées à une altitude supérieure à 1300 mètres. Ces limites ont notamment pour but de limiter l'échauffement dans les revêtements et éviter les risques de désordres liés à la déformation des revêtements.

Dans cette étude on s'intéresse aux revêtements en pierre reconstituée GEOPIETRA collés sur un isolant en PSE pour lesquels on cherche à déterminer les températures maximales atteintes, les écarts maximaux de températures ainsi que les contraintes mécaniques engendrés par ces derniers. En effet, dans ce type de systèmes, les mortiers-colles qui maintiennent les revêtements sont soumis à plusieurs forces d'origine thermique engendrée par la dilatation thermique des plaquettes dans le plan de collage et par la déformation différentielle (effet bilame) entre la face avant et la face arrière des plaquettes liées à une différence de température entre la face avant et la face arrière des plaquettes.

Les éléments techniques servant de base pour l'étude ont été fournis par la société GEOPIETRA.

Cette étude ne traite que des aspects liés aux sollicitations thermiques du procédé et ne préjuge en rien de son aptitude à l'emploi.

## 2. DESCRIPTION SUCCINCTE

Le procédé est un système d'isolation thermique avec un revêtement en pierre reconstituée GEOPIETRA destiné à être appliqué sur l'extérieur de murs en maçonnerie et en béton. La figure suivante synthétise les différents composants de la paroi.

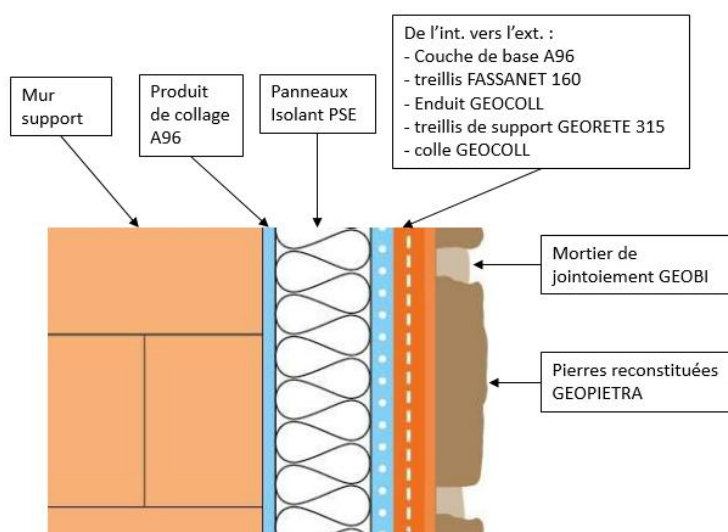


Figure 1- Schéma de principe de mise en œuvre du procédé

### 3. METHODOLOGIE

#### 3.1. Principe

L'approche utilisée est une approche numérique reposant sur des :

- > modélisations thermiques monodimensionnelles en régime variable permettant le calcul des températures maximales atteintes  $T_{max}$  ainsi que les écarts maximaux  $\Delta T_{max}$  sous l'effet de sollicitations climatiques extérieures réputées défavorables (conditions de température et de rayonnement solaire). Les simulations seront menées pour deux scénarii de sollicitations climatiques et plusieurs variantes en termes d'altitude et de de teintes du revêtement extérieur.
- > modélisations thermomécaniques tridimensionnelles sur des cas choisis après analyse des résultats des modélisations thermiques.

Le calcul thermique en régime variable pour évaluer les températures maximales atteintes est réalisé en utilisant le logiciel de calcul numérique aux éléments finis VOLTRA 7.w de PHYSIBEL. Il permet la prise en compte de l'effet dynamique de la réponse en température des constituants. Ce logiciel permet la réalisation de calcul en 3D, néanmoins pour les besoins de l'étude seule une modélisation en 1D a été suffisante.

Le calcul couplé thermomécanique a été réalisé à l'aide du Logiciel de calcul numérique aux éléments finis Code\_Aster qui permet de prendre en compte les déformations engendrées par la dilatation thermique des différents matériaux.

#### 3.2. Règles de calcul

Les sollicitations climatiques extérieures sont principalement issues du Cahier du CSTB n°3242 (Juillet – Août 2000).

#### 3.3. Hypothèses

##### 3.3.1. Géométrie

Pour la simulation thermique un modèle 1D constitué de couche homogène a été construit avec les épaisseurs suivantes:

Couche	épaisseur en mm
Mur support en maçonnerie	200 mm
Couche de collage du panneau PSE (A96)	5 mm
Panneau PSE	150 mm
Mortier colle GEOCOLL	10 mm
Pierre reconstituée GEOPETRA	50 mm

Pour la simulation thermomécanique en 3D, le modèle construit se base sur les épaisseurs données dans le tableau ci-avant. Les autres dimensions sont :

- > panneau PSE de dimensions 1200 x 600 mm ;
- > éléments de revêtement GEOPIETRA de dimensions 300 x 100 mm ;
- > joint GEOBI entre les pierres, de largeur 20 mm.

RAPPORT D'EXPERTISE

- > Les différentes trames d'armature ainsi que les chevilles de fixation ne sont pas modélisées ce qui rend ce modèle numérique défavorable.
- > On considère que tous les éléments du revêtement ont la même teinte.

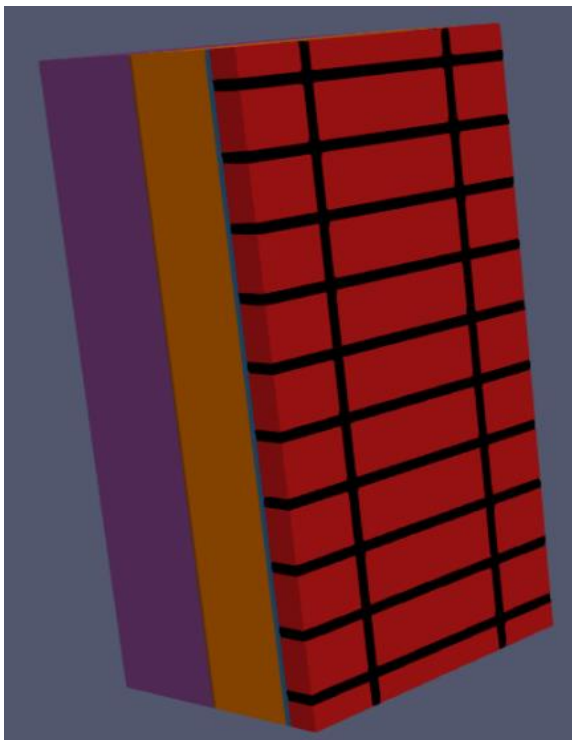


Figure 2- Géométrie du modèle de calcul 3D

3.3.2. Propriétés thermiques et mécaniques des matériaux

Dans le tableau ci-dessous sont indiquées les valeurs des propriétés physiques utilisées pour dans les calculs.

	Masse volumique	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Coefficient de dilatation thermique	Module d'élasticité de Young	Coefficient de Poisson
	$\rho$	$C_p$	$\lambda$	$\alpha$	$E$	$\nu$
	kg/m <sup>3</sup>	J/(kg.K)	W/(m.K)	1/K	MPa	-
Brique alvéolée	600	850	0,12	7e-6	15000	0.25
PSE gris	15	1500	0,031	7e-5	4	0.01
Pierre reconstitué GEOPIETRA	1200	850	0,19	1e-5	10000	0.25
Enduit colle A96	1610	850	0,75	1e-5	7500	0.25
GEOLL	1565	850	0,7	1e-5	9000	0.25
GOBI	1520	850	0,71	1e-5	9000	0.25

	Fiche technique fournie par le fabricant
	Valeur générique choisie en l'absence d'information complémentaire

Tableau 1 : Propriétés thermiques et mécaniques des matériaux

RAPPORT D'EXPERTISE

3.3.3. Sollicitations thermiques

Les conditions aux limites ci-dessous ont été adoptées de manière à être défavorables pour deux cas de figure.

- > **Scénario 1** : Paroi orientée ouest, pour une journée d'été ensoleillée. Ce scénario conduit à la température maximale atteinte dans le revêtement GEOPIETRA
- > **Scénario 2** : Paroi orientée ouest, éclairée par le rayonnement solaire maximal de 17h00 à 19h00 (obstacle ou journée nuageuse avec éclaircie). Ce scénario conduit à l'écart de température maximal atteint entre les deux faces du revêtement GEOPIERA.

3.3.3.1. Température et coefficient d'échange superficiel

	Température en °C	Coefficient d'échange superficiel en W/(m².K)
<b>Intérieure</b>	25	Hi = 9
<b>Extérieure</b>	Variation sinusoïdale avec Tmax (*) à 15h et amplitude jour/nuit 15°C	He = 13

(\*) Tmax est donnée en fonction de l'altitude  
200 m : 42 °C ; 1300 m : 36,5 °C ; 1800 m : 34 °C ; 2000 m : 33 °C

Tableau 2- Température et coefficient d'échange intérieur et extérieur

3.3.3.2. Flux solaire incident

d'application	Évolution du rayonnement solaire global incident en W/m² (*)
<b>Scénario 1 : Paroi verticale orientée à l'ouest en été.</b>	
<b>Scénario 2 : Paroi verticale sollicitée brutalement par un rayonnement solaire max entre 17h et 19h</b>	

(\*) Le flux maximal dans les deux scénarii est donné en fonction de l'altitude :  
200 m : 800 W/m² ; 1300 m : 864 W/m² °C ; 1800 m : 904 W/m² ; 2000 m : 920 W/m²

Tableau 3- Évolution sur une journée d'été du rayonnement solaire global incident

## RAPPORT D'EXPERTISE

### 3.3.4. Sollicitations mécaniques

Aucun chargement mécanique n'est appliqué sur la paroi, seules les déformations engendrées par les variations de températures sont prises en compte. Dans ce cas la température de référence (température pour laquelle la déformation est nulle) de tous les matériaux est considérée à 25 °C.

Les effet de la gravité (poids propre) sont négligées.

Concernant les conditions aux limites de blocage (déplacement nul), on considère :

- > des déplacements nuls des nœuds du mur support ;
- > Des conditions de symétrie (périodicité) sur les bords (latéraux, haut et bas) des différentes couches constituant la paroi sauf pour ceux du panneau PSE ;
- > on considère les bords (latéraux, haut et bas) du panneau PSE comme étant libres de déplacements. Cela revient à considérer que les panneaux ne sont pas solidaires entre eux, à condition que les déplacements latéraux de ces bords restent faibles.

### 3.4. Présentation des cas simulés

Le tableau ci-dessous résume les différents cas simulés.

Altitude	Coefficient d'absorption solaire $\alpha$	Nom du cas
200 m	0,7	<b>A1-réf</b>
	0,8	A2
	0,9	A3
1300 m	0,7	<b>B1-réf</b>
	0,8	B2
	0,9	B3
1800 m	0,7	C1
	0,8	C2
	0,9	C3
2000 m	0,7	D1
	0,8	D2
	0,9	D3

Tableau 4- Synthèse des cas simulés

Pour chaque cas de figure présenté, les deux scénarii (décrit en paragraphe § 3.3.3.2) sont simulés.

Les cas A1-réf et B1-réf sont des cas de référence réputés comme étant acceptés selon les exigences du CPT 3035- V2. Ils serviront de base pour la comparaison des autres cas envisagés.

## 4. RESULTATS

Les résultats ci-dessous ont été obtenus à partir des hypothèses du paragraphe §3.3 et ils ne sont valables que pour ces hypothèses.

### 4.1. Températures maximales $T_{max}$ et écarts maximaux $\Delta T_{max}$

Cas D3 : 2000m -  $\alpha=0.9$

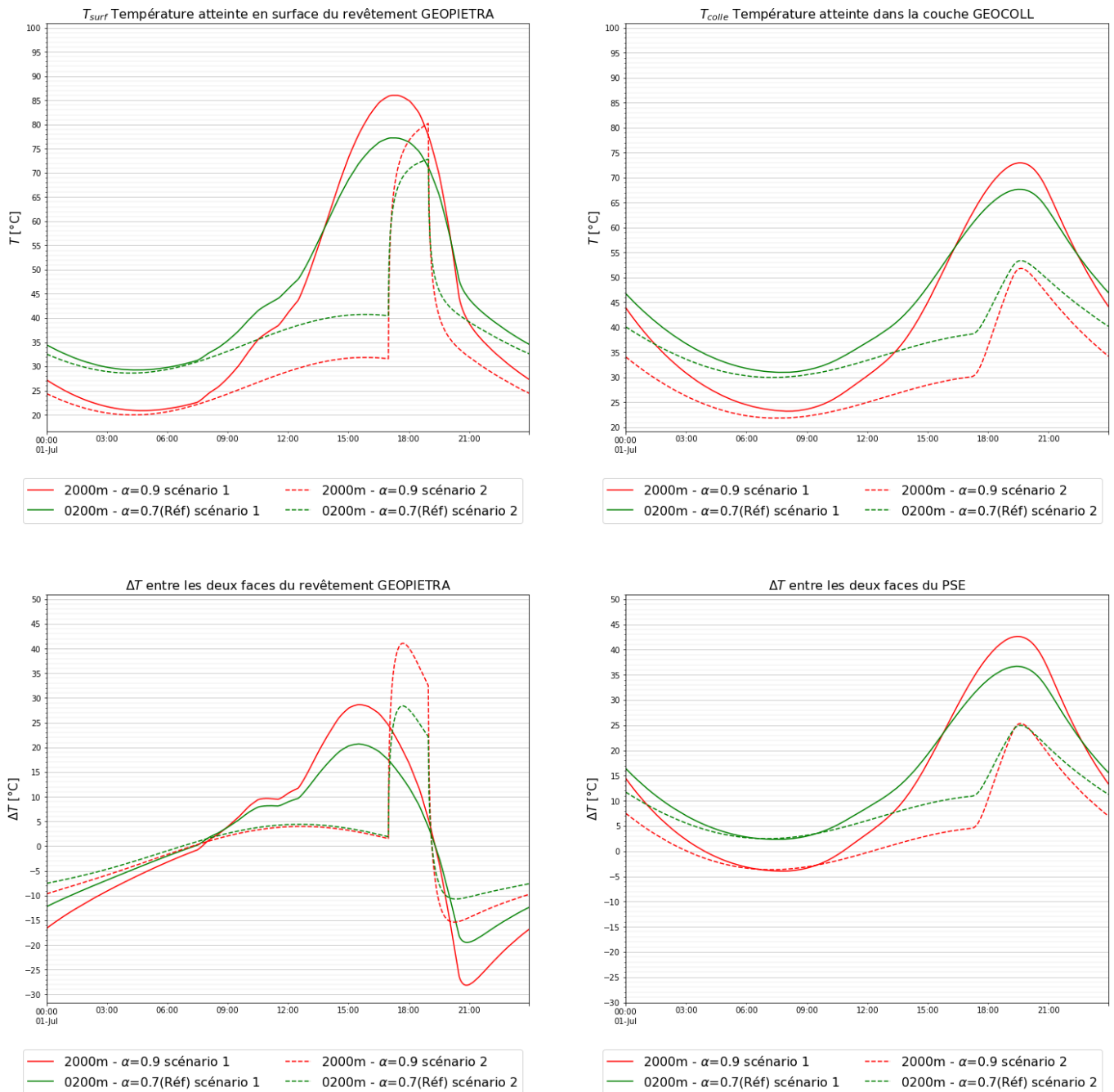


Figure 3- Évolution temporelle des températures  $T$  et des écarts  $\Delta T$  pour le cas D3



RAPPORT D'EXPERTISE

La figures ci-avant compare le cas le plus défavorable D3 (2000 m et  $\alpha = 0.9$ ) au cas de référence A1 (200 m et  $\alpha = 0.7$ ). Les différents graphiques de la figure représentent les courbes d'évolution de la température et des écarts de température en plusieurs point de la paroi.

On note que les températures maximales en surface extérieure du revêtement et dans la colle sont atteintes dans le scénario 1. On note aussi que ce scénario conduit aussi à l'écart maximal de température entre les deux face du PSE. Les scénario 2 quand à lui donne l'écart maximal de température entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA.

Les courbes détaillées de tous les autres cas sont données en annexe de ce rapport.

Les tableau suivant résumes les valeurs maximales atteintes.

	Absorption solaire $\alpha$	$T_{max}$ en surface extérieure [°C]			$T_{max}$ dans la colle [°C]			$\Delta T_{max}$ entre les deux faces du revêtement [°C]			$\Delta T_{max}$ entre les deux faces du PSE [°C]		
		0.7	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9
Scénario1	200 m	77	83	88	68	72	76	21	23	26	37	40	44
	1300 m	75	80	86	65	69	74	22	25	27	35	39	43
	1800 m	74	80	86	64	69	73	23	25	28	34	39	43
	2000 m	74	79	86	63	68	73	23	25	29	34	38	43
Scénario2	200 m	73	78	83	53	55	58	28	32	36	25	27	29
	1300 m	70	75	81	49	52	54	30	35	39	22	24	27
	1800 m	69	75	80	48	50	52	32	36	40	21	23	26
	2000 m	69	75	80	47	49	52	32	37	41	21	23	25

Les cases grisées représentent les cas de référence

Tableau 5- Températures  $T_{max}$  et écarts  $\Delta T_{max}$

RAPPORT D'EXPERTISE

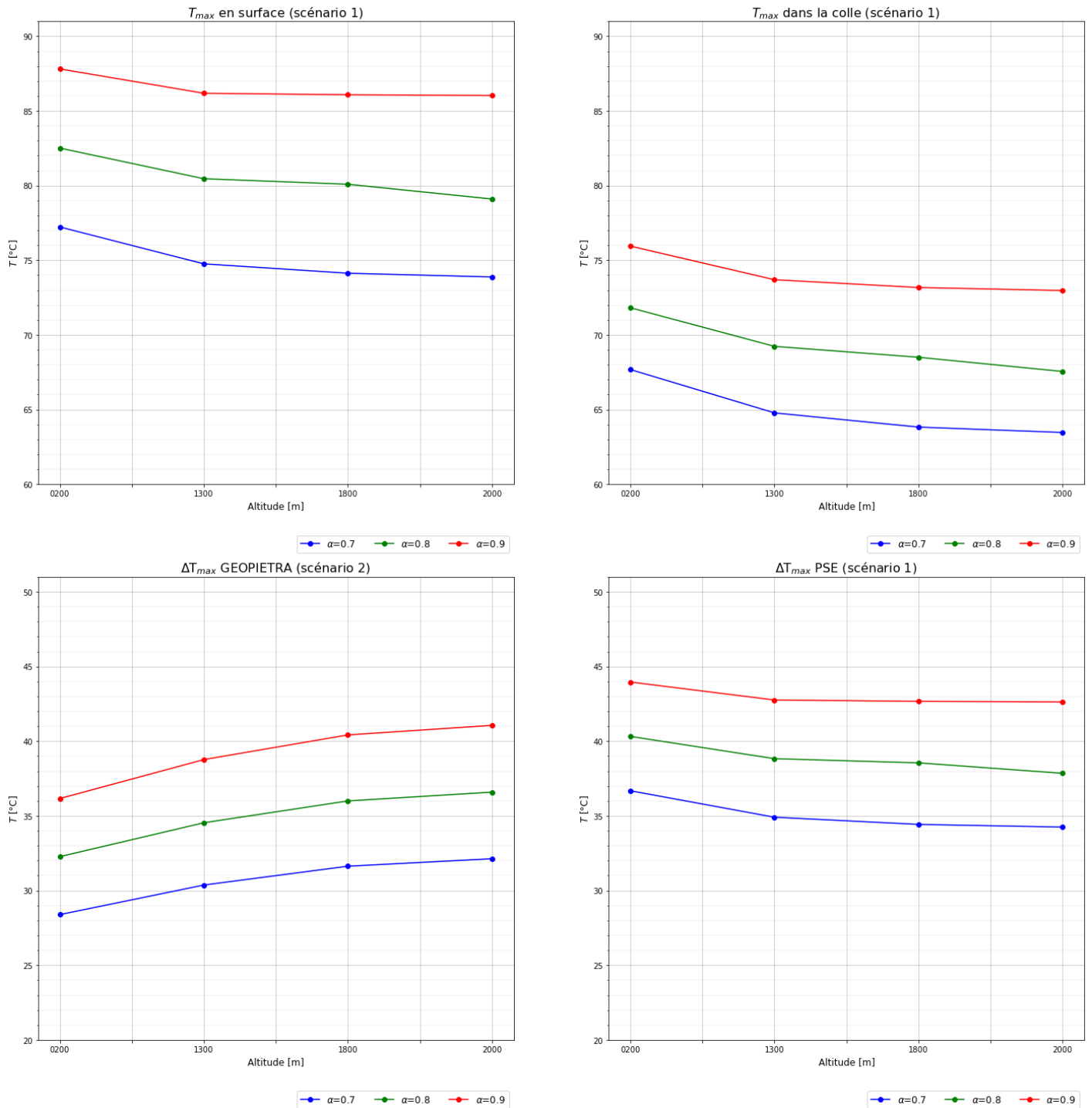


Figure 4- Évolution des températures maximale  $T_{max}$  et écarts maximaux  $\Delta T_{max}$  en fonction de l'altitude, pour différentes absorption solaire  $\alpha$

Le tableau suivant représente les variations de  $T_{max}$  et de  $\Delta T_{max}$  des différentes variantes par rapport aux deux cas de référence.

RAPPORT D'EXPERTISE

Absorption solaire $\alpha$	$T_{max}$ en surface extérieure (scénario 1)			$T_{max}$ dans la colle (scénario 1)			$\Delta T_{max}$ entre les deux faces du revêtement (scénario 2)			$\Delta T_{max}$ entre les deux faces du PSE (scénario 1)		
	0.7	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9
200 m		7%	14%		6%	12%		6%	19%		10%	20%
1300 m		4%	12%		2%	9%		14%	28%		6%	17%
1800 m	-4%	4%	11%	-6%	1%	8%	4%	19%	33%	-6%	5%	16%
2000 m	-4%	2%	11%	-6%	0%	8%	6%	20%	35%	-7%	3%	16%

Les cases grisées représentent les cas de référence  
 Les cases vertes représentent une baisse ou une augmentation inférieure à 15%  
 Les cases orangées représentent une augmentation supérieure à 15%

Tableau 6- Variations de  $T_{max}$  et écarts  $\Delta T_{max}$  par rapport aux cas de référence

À partir des résultats, on fait l'analyse suivante :

- > Pour une même teinte du revêtement GEOPIETRA, l'élévation en altitude ne cause pas d'augmentation de la température maximale atteinte  $T_{max}$  dans le revêtement et la colle ni de l'écart  $\Delta T_{max}$  entre les deux faces du PSE. L'impact sur l'écart de la température  $\Delta T_{max}$  entre les deux faces de la pierre reste limité. Par exemple, pour  $\alpha = 0.7$   $\Delta T_{max}$  entre les deux faces de la pierre augmente de 1,5°C à 1800 m et 2 °C à 2000 m (+6% par rapport au cas de référence).
- > L'augmentation du coefficient d'absorption solaire provoque une hausse de  $T_{max}$  et  $\Delta T_{max}$  par rapport aux cas de référence .
- > Pour une teinte avec  $\alpha = 0.8$  :
  - les hausses de  $T_{max}$  en surface du revêtement et dans la colle sont limités à +6 °C (+7%) jusqu'à l'altitude 2000 m.
  - la hausse de  $\Delta T_{max}$  entre les deux face du PSE reste inférieure à +15% jusqu'à l'altitude 2000 m
  - la hausse de  $\Delta T_{max}$  entre les deux face du revêtement reste inférieur à +15% jusqu'à l'altitude 1300 m. Au-delà de cette altitude elle augmente atteignant +20% à 2000 m.
- > Pour une teinte avec  $\alpha = 0.9$  :
  - les variations de  $T_{max}$  en surface du revêtement et dans la colle sont limités à +15 % jusqu'à 2000 m d'altitude.
  - la hausse de  $\Delta T_{max}$  entre les deux faces du PSE est supérieure à +15% pour toutes les altitudes.
  - la hausse de  $\Delta T_{max}$  entre les deux faces du revêtement est supérieur à +15% pour toutes les altitudes atteignant +35% à 2000 m.

Dans le paragraphe suivant on présente les résultats des simulations couplées thermomécaniques pour connaître l'impact des augmentations de  $T_{max}$  et  $\Delta T_{max}$  sur les contraintes thermiques générées dans l'ETICS.

## 4.2. Contraintes mécaniques

Les résultats donnés ci-dessous le sont dans un but d'étudier la tendance des variations des contraintes thermiques en fonction de l'absorption solaire et l'altitude. Pour cela quatre cas ont été simulés

- > A1-réf : 200 m avec  $\alpha = 0.7$
- > A3 : 200 m avec  $\alpha = 0.9$
- > D1 : 2000 m avec  $\alpha = 0.7$
- > D3 : 2000 m avec  $\alpha = 0.9$

Dans les tableaux de résultats donnés ci-dessous sont indiqués les résistances mécaniques issues de mesures réalisées au CSTB (rapport n° R2EM/EM 16-125). Il faut rester prudent quant à l'interprétation des comparaisons entre calculs et essais pour les raisons suivantes:

- > le seuil acceptable dépend du coefficient de sécurité appliqué.
- > une partie des données d'entrée qui ont un impact important, tel que le coefficient de dilatation thermique, sont basées sur des valeurs génériques.

Il est à rappeler que les chevilles de fixation ainsi que les trames d'armature n'ont pas été prises en compte dans la modélisation ce qui la rend plus défavorable.

L'analyse des contraintes principales dans le revêtement GEOPIETRA et dans la colle a montré les points suivants:

- Les contraintes principales I et II travaillent en compression dans le plan de la paroi avec des valeurs maximales entre 3 et 7,6 MPa.
- La contrainte principale III, plus faible, est perpendiculaire au plan de la paroi et travaille en traction et compression avec des valeurs maximales entre 0,02 et 0,055 MPa.

Les tableaux ci-après résument les valeurs maximales atteintes pour les différents cas simulés.

RAPPORT D'EXPERTISE

Essai de résistance en compression		Contrainte maximale en compression [MPa]			
		Revêtement GEOPIETRA		GEOCOLL	
Calcul numérique		15,2		11,5	
		$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.9$
Scénario1	200 m	6,1	7,6	5,7	6,8
	2000 m	5,9	7,4	5,2	6,5
Scénario2	200 m	5,7	6,9	4,3	5
	2000 m	5,2	6,6	3,6	4,4

Les cases grisées représentent les cas de référence

Tableau 7- Contraintes maximales en compression

Essai de résistance en flexion		Contrainte maximale en traction [MPa]			
		Revêtement GEOPIETRA		GEOCOLL	
Calcul numérique		4		4,9	
		$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.9$
Scénario1	200 m	0,04	0,048	0,020	0,025
	2000 m	0,044	0,055	0,022	0,027
Scénario2	200 m	0,03	0,041	0,031	0,04
	2000 m	0,037	0,047	0,036	0,046

Les cases grisées représentent les cas de référence

Tableau 8- Contraintes maximales en traction

Essai de résistance d'adhérence		Contrainte maximale d'adhérence en traction perpendiculaire et cisaillement [MPa]			
		Traction perpendiculaire		Cisaillement	
Calcul numérique		0,6		0,6	
		$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.9$
Scénario1	200 m	0,020	0,024	0,029	0,036
	2000 m	0,022	0,027	0,032	0,041
Scénario2	200 m	0,028	0,039	0,036	0,046
	2000 m	0,035	0,044	0,041	0,053

Les cases grisées représentent les cas de référence

Tableau 9- Contraintes maximales pour d'adhérence en traction perpendiculaire et cisaillement

On note que dans le scénario 1, pour lequel  $T_{max}$  est plus élevée que dans le scénario 2, les contraintes en compression dans le revêtement et dans la colle sont les plus importantes. Dans le scénario 2, pour lequel  $\Delta T_{max}$  est plus élevé par rapport au scénario 1, les contraintes de traction perpendiculaires et de cisaillement dans la colle sont plus importantes.

## RAPPORT D'EXPERTISE

On constate que pour une même teinte du revêtement GEOPIETRA, l'élévation en altitude ne cause pas d'augmentation des contraintes dans le plan du mur. Les contraintes de traction perpendiculaire et de cisaillement dans la colle quand a elles augmentent +15% à 2000 m.

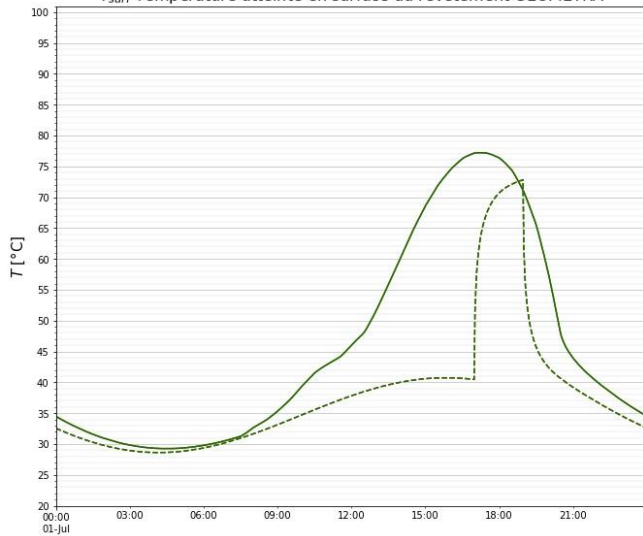
L'augmentation du coefficient d'absorption solaire de 0,7 à 0,9 conduit à une augmentation des efforts de compression dans le revêtement et dans la colle de l'ordre de 20% à 25%. Les contraintes en traction perpendiculaire et cisaillement dans la colle quant à elles augmentent fortement entre 30% et 50%. Ce dernier point est à nuancer par les valeurs absolues atteintes qui restent 10 fois plus faibles que les résistances obtenues par les essais d'adhérence.

## ANNEXE 1 : COURBES D'EVOLUTION DES TEMPERATURES

RAPPORT D'EXPERTISE

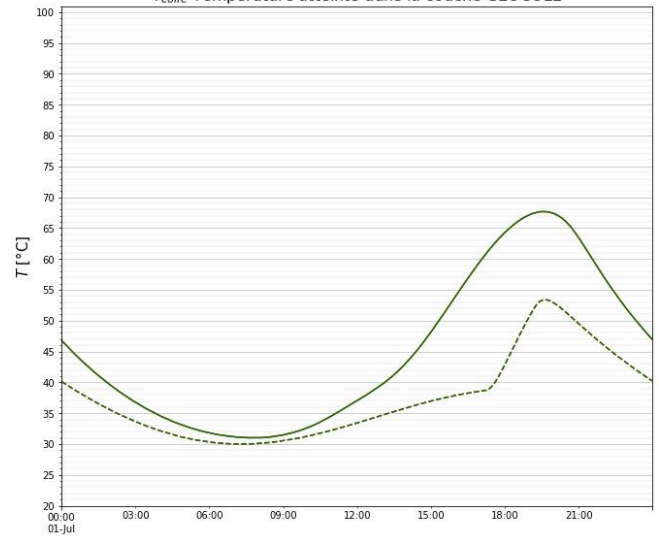
Cas A1 : 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf)

$T_{surr}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



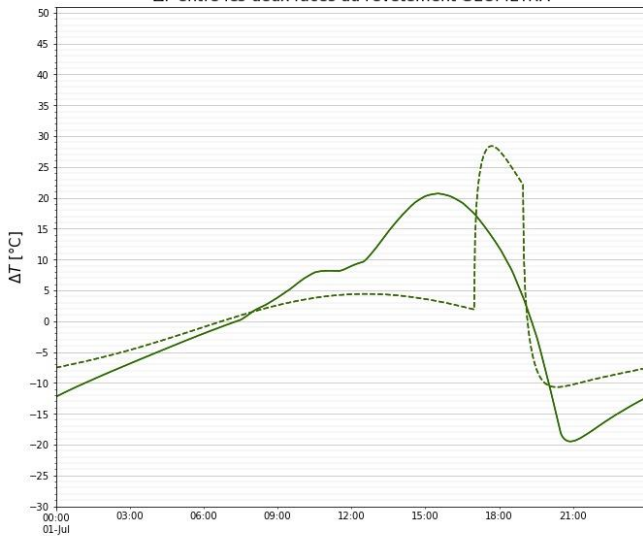
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



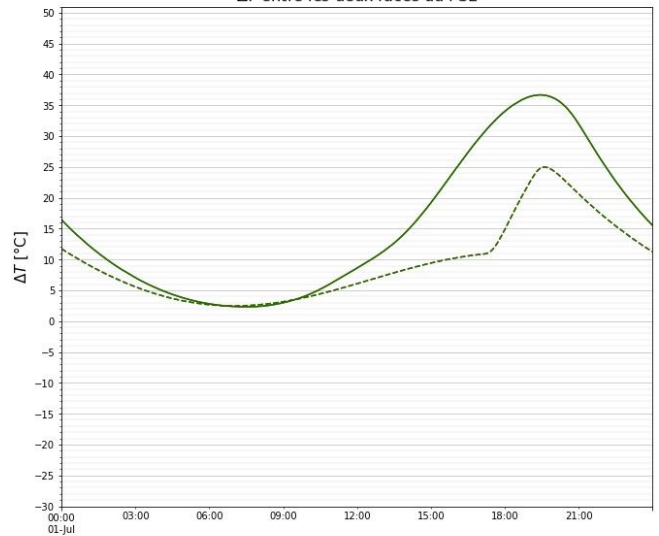
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE



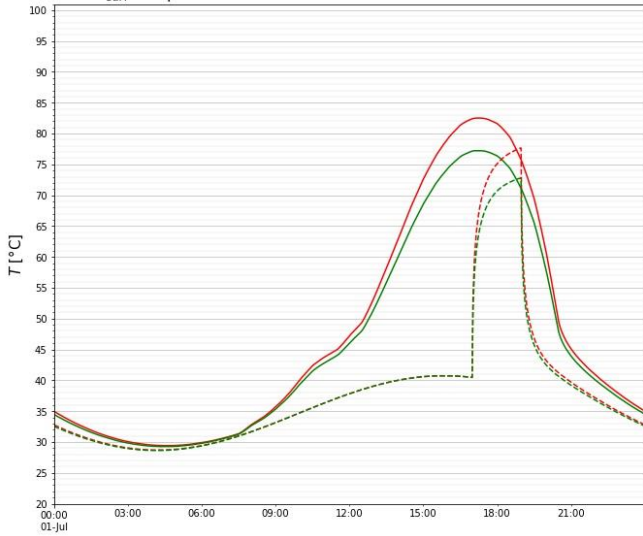
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2



RAPPORT D'EXPERTISE

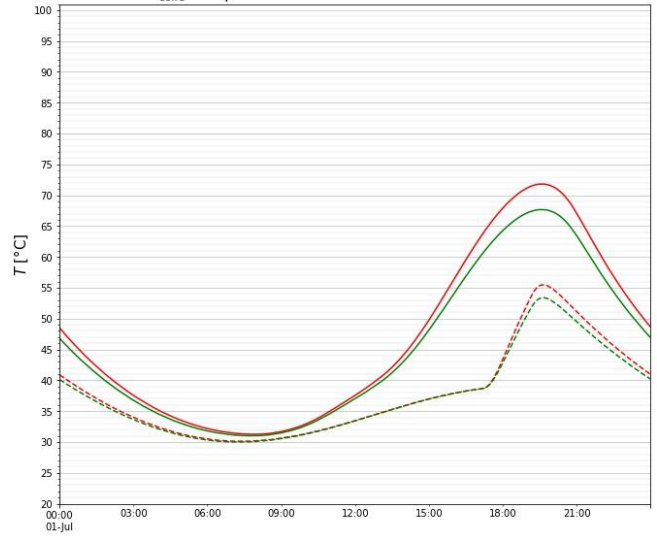
Cas A2 : 0200m -  $\alpha=0.8$

$T_{surr}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



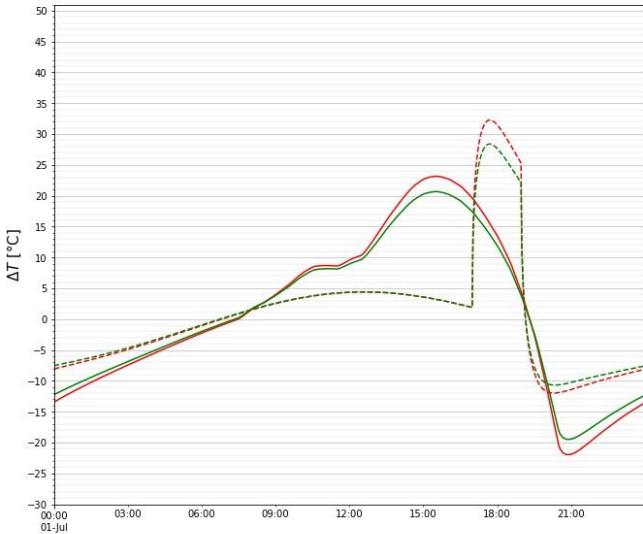
— 0200m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



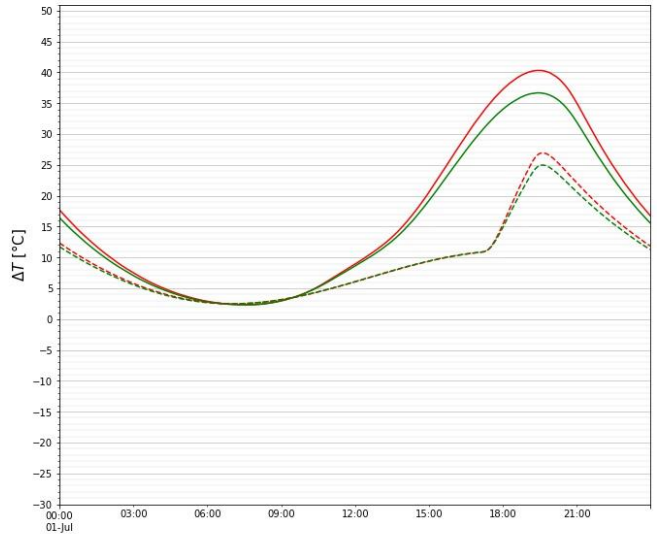
— 0200m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 0200m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE

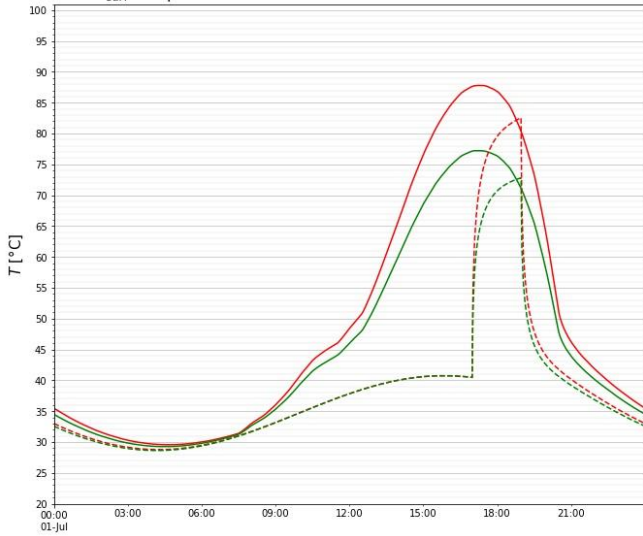


— 0200m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

RAPPORT D'EXPERTISE

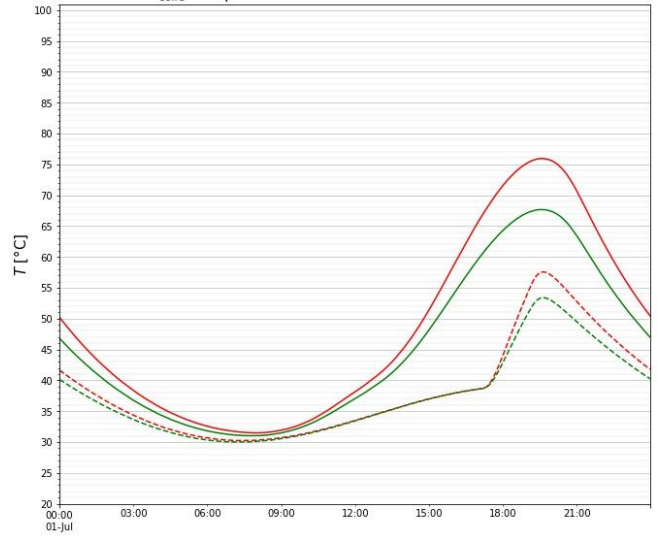
Cas A3 : 0200m -  $\alpha=0.9$

$T_{surr}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



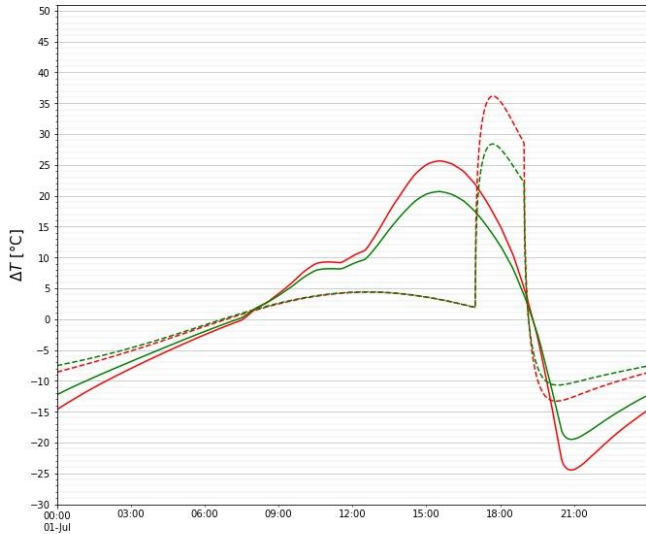
— 0200m -  $\alpha=0.9$  scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



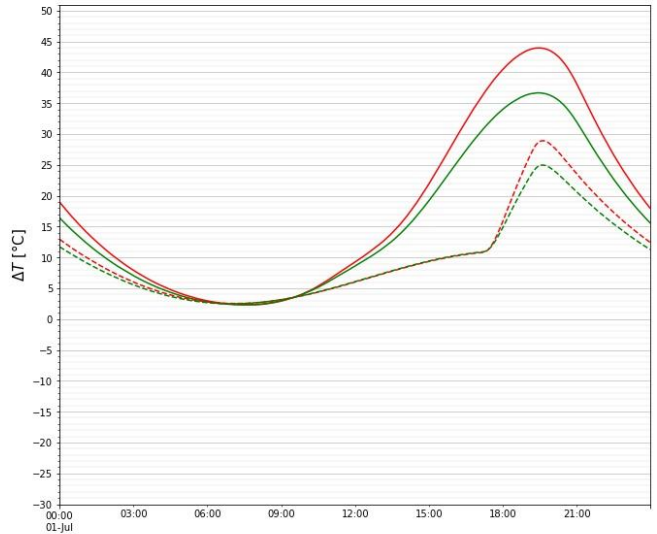
— 0200m -  $\alpha=0.9$  scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 0200m -  $\alpha=0.9$  scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE

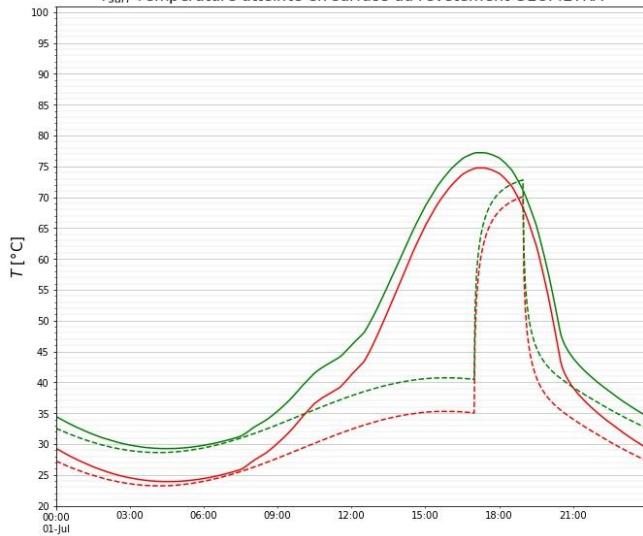


— 0200m -  $\alpha=0.9$  scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

RAPPORT D'EXPERTISE

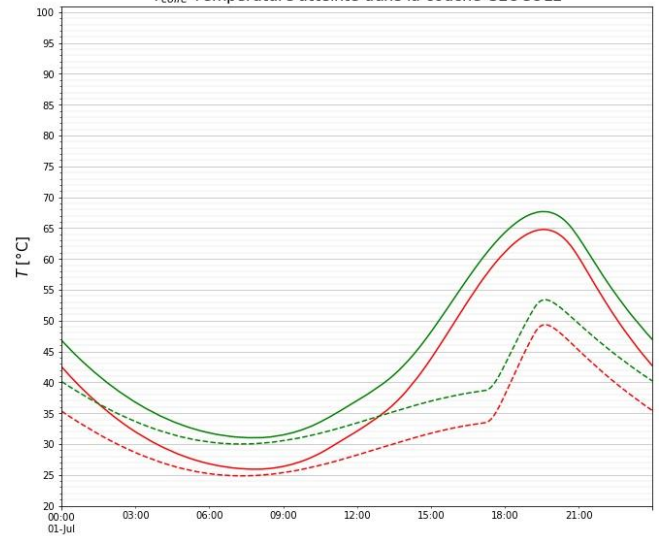
Cas B1 : 1300m -  $\alpha=0.7$ (Réf)

$T_{surr}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



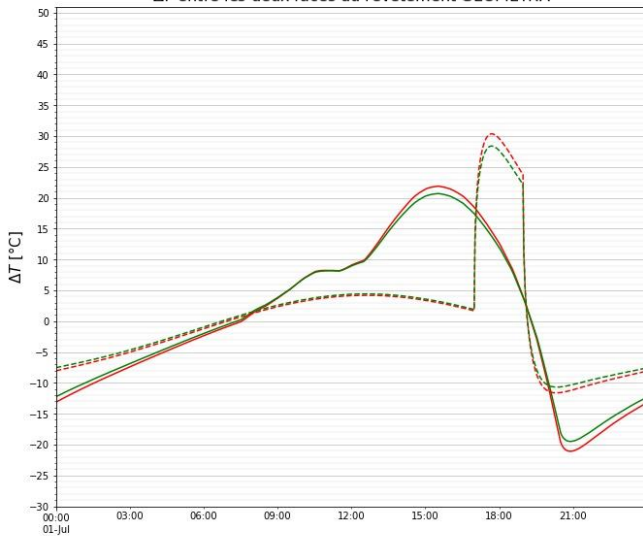
— 1300m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 1300m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



— 1300m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 1300m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 1300m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 1300m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE

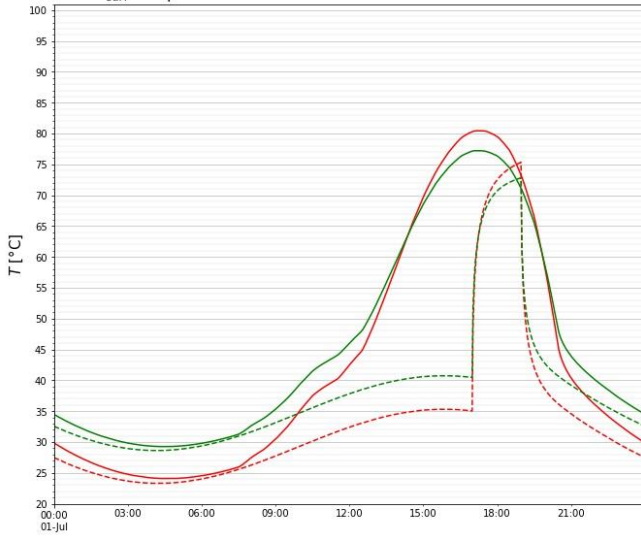


— 1300m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 1300m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

RAPPORT D'EXPERTISE

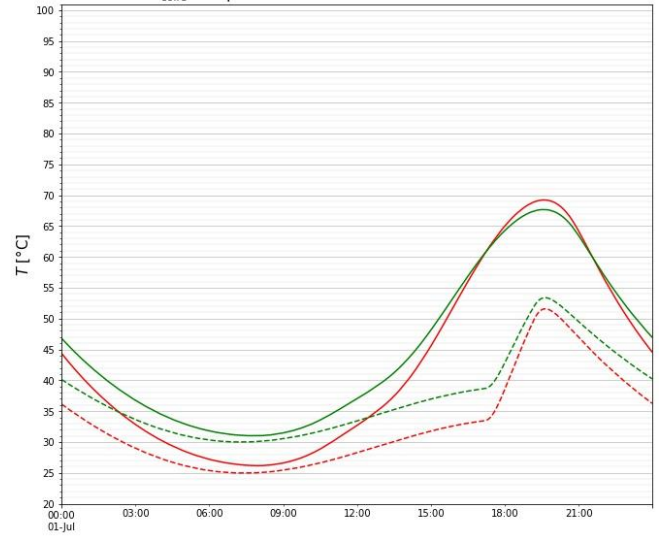
Cas B2 : 1300m -  $\alpha=0.8$

$T_{surr}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



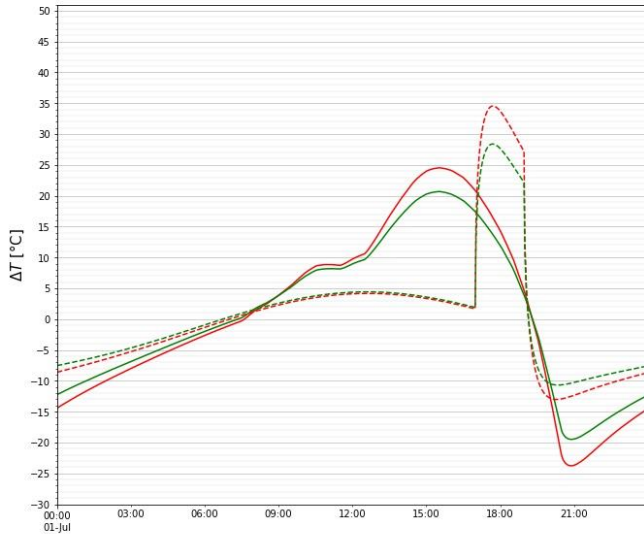
— 1300m -  $\alpha=0.8$  scénario 1      - - - 1300m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



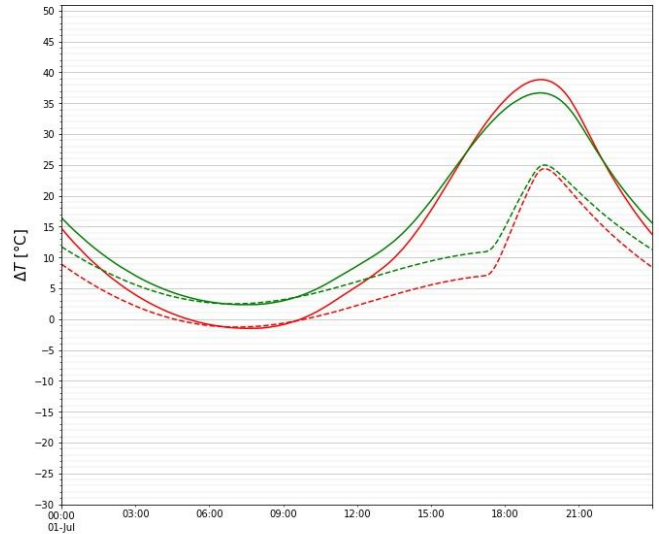
— 1300m -  $\alpha=0.8$  scénario 1      - - - 1300m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 1300m -  $\alpha=0.8$  scénario 1      - - - 1300m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE

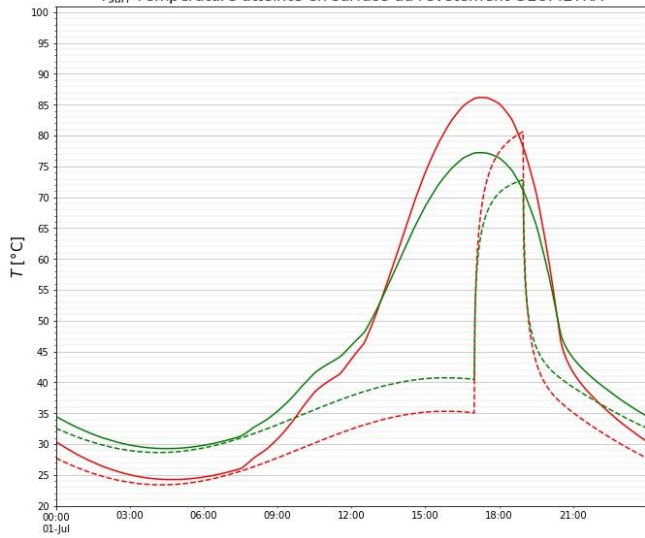


— 1300m -  $\alpha=0.8$  scénario 1      - - - 1300m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

RAPPORT D'EXPERTISE

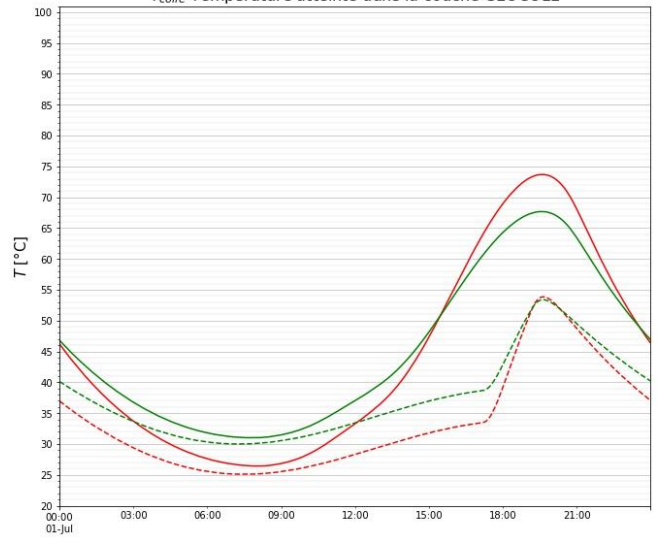
Cas B3 : 1300m -  $\alpha=0.9$

$T_{surr}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



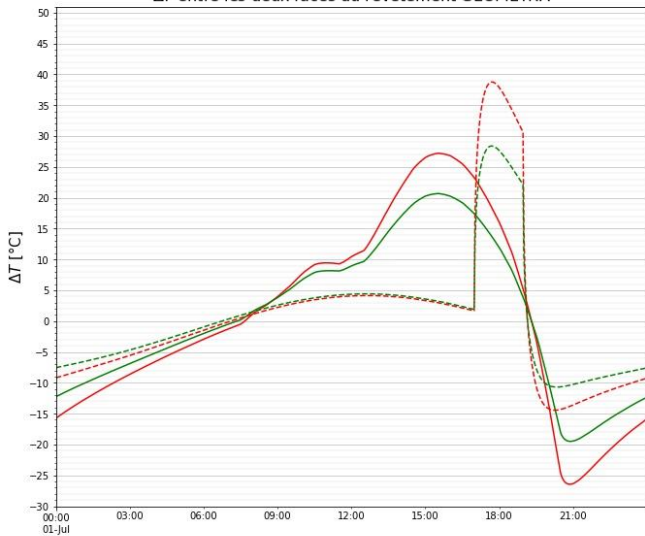
— 1300m -  $\alpha=0.9$  scénario 1      - - - 1300m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



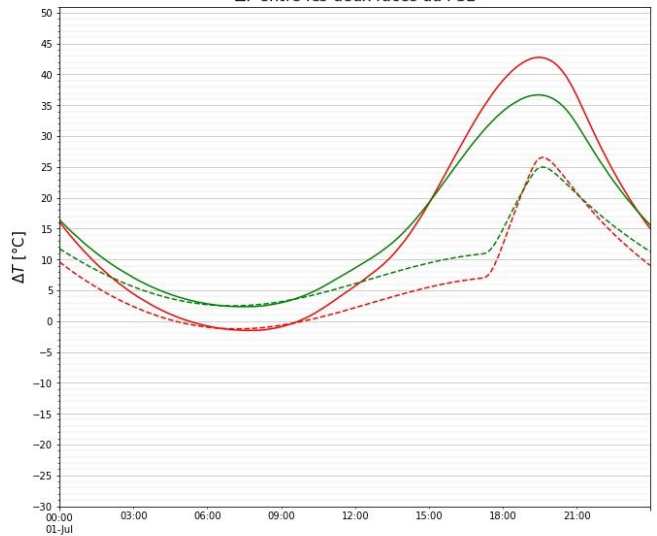
— 1300m -  $\alpha=0.9$  scénario 1      - - - 1300m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 1300m -  $\alpha=0.9$  scénario 1      - - - 1300m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE

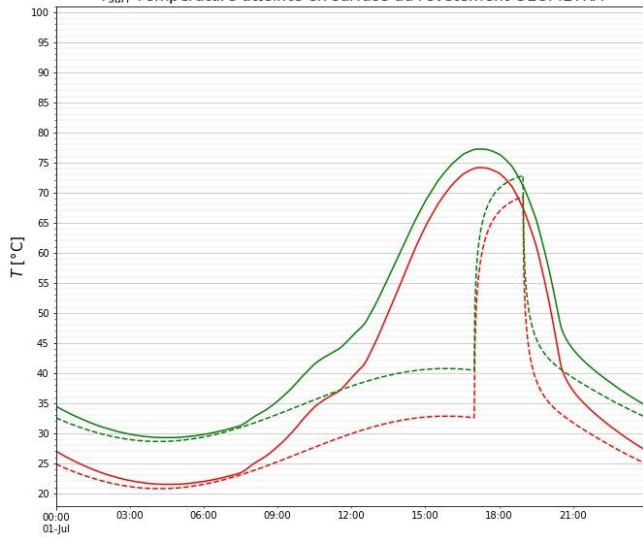


— 1300m -  $\alpha=0.9$  scénario 1      - - - 1300m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

RAPPORT D'EXPERTISE

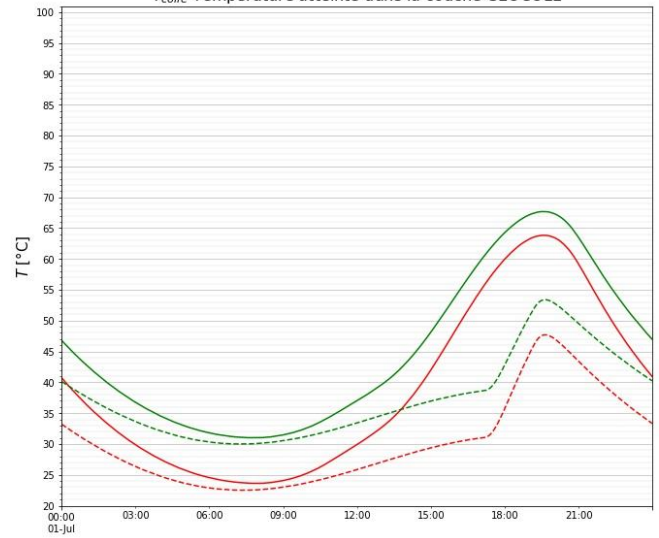
Cas C1 : 1800m -  $\alpha=0.7$

$T_{surr}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



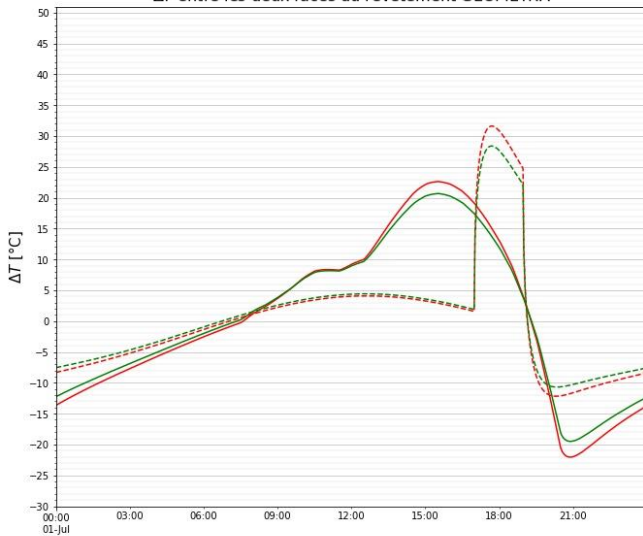
— 1800m -  $\alpha=0.7$  scénario 1      - - - 1800m -  $\alpha=0.7$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



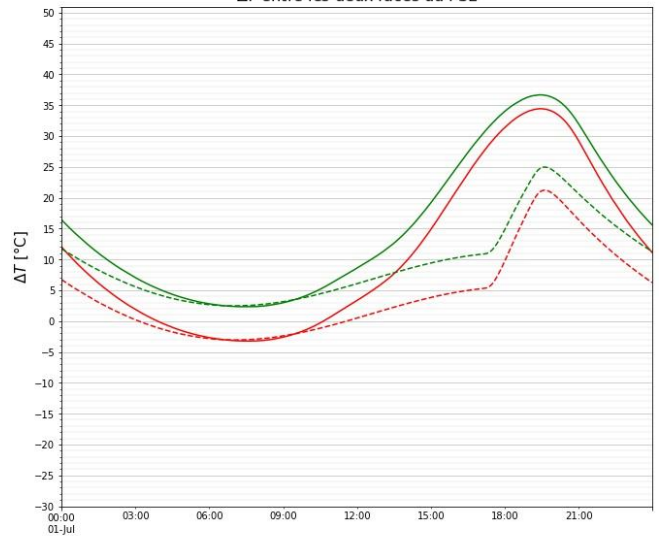
— 1800m -  $\alpha=0.7$  scénario 1      - - - 1800m -  $\alpha=0.7$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 1800m -  $\alpha=0.7$  scénario 1      - - - 1800m -  $\alpha=0.7$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE

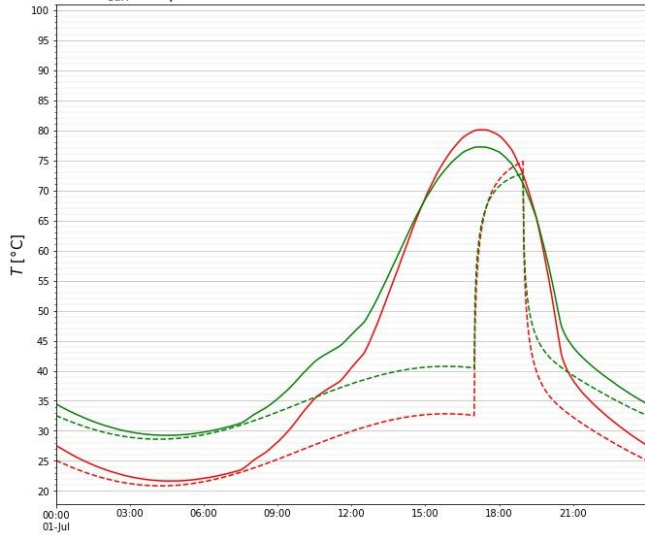


— 1800m -  $\alpha=0.7$  scénario 1      - - - 1800m -  $\alpha=0.7$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

RAPPORT D'EXPERTISE

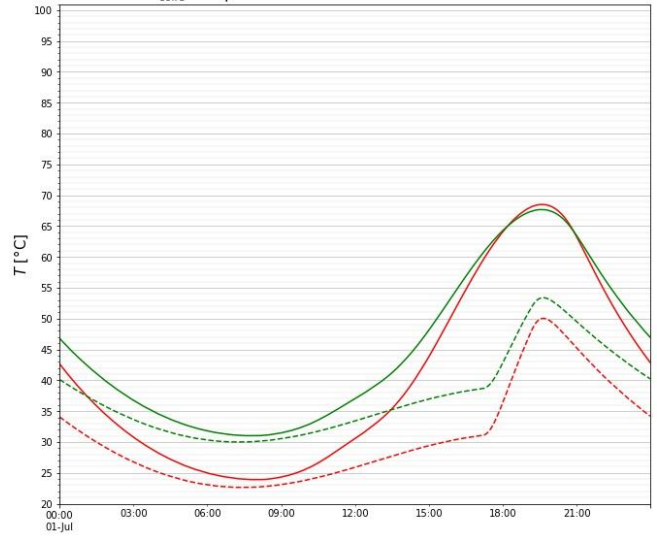
Cas C2 : 1800m -  $\alpha=0.8$

$T_{surf}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



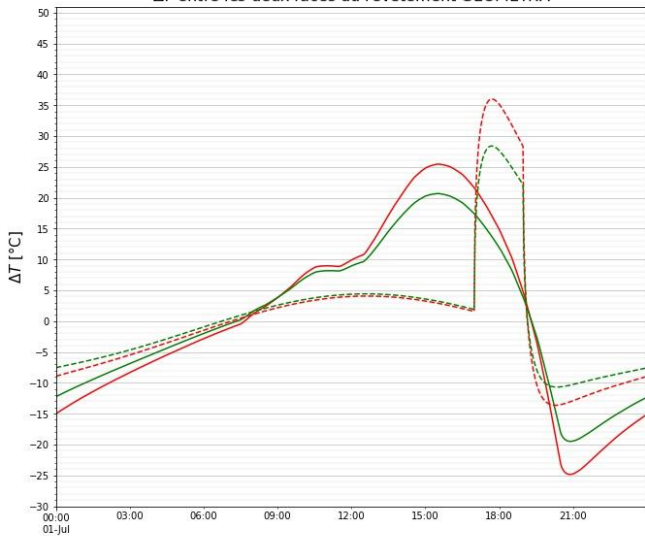
— 1800m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 1800m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



— 1800m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 1800m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 1800m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 1800m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE

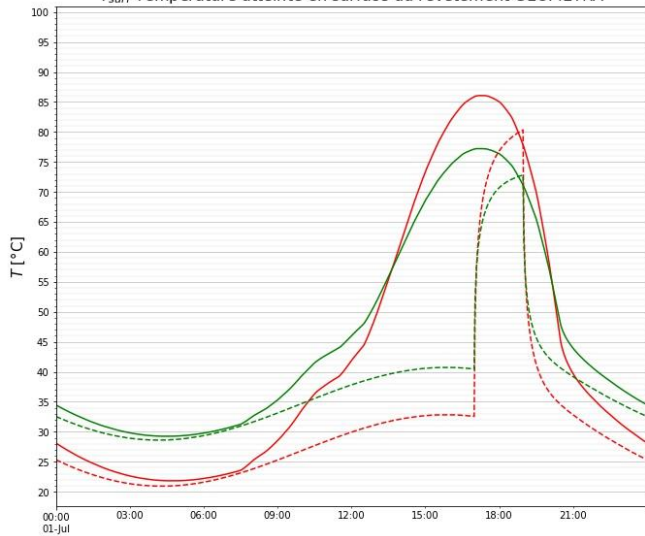


— 1800m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 1800m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

RAPPORT D'EXPERTISE

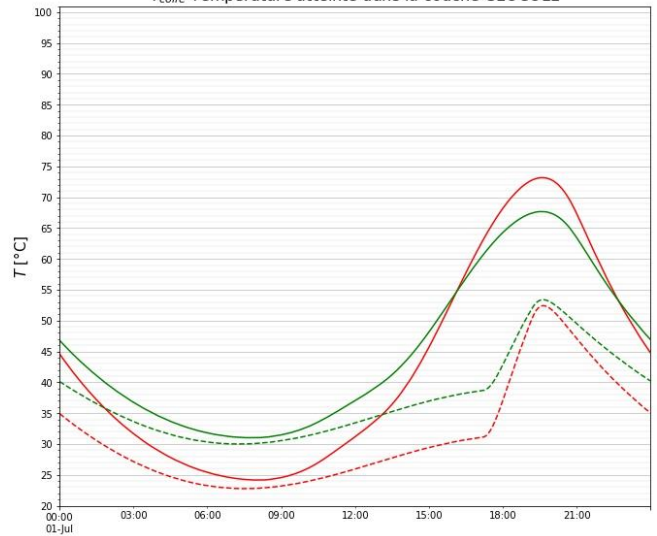
Cas C3 : 1800m -  $\alpha=0.9$

$T_{surf}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



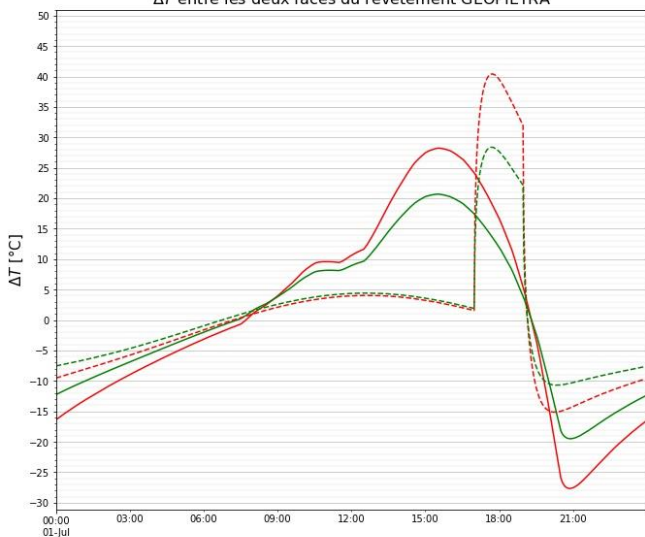
— 1800m -  $\alpha=0.9$  scénario 1    - - - 1800m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



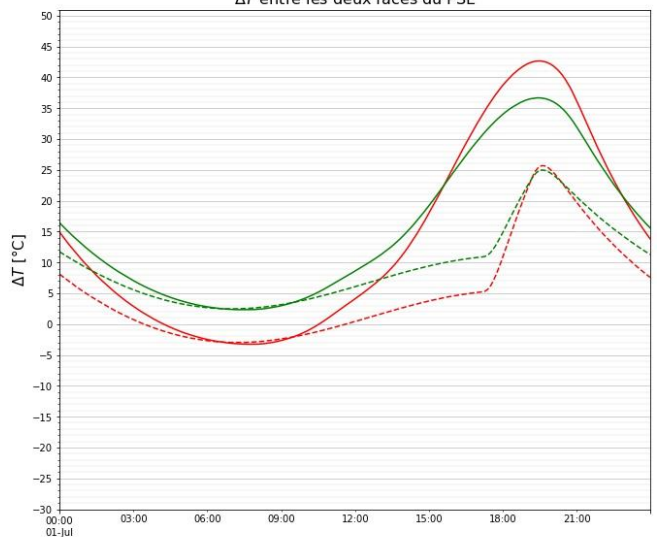
— 1800m -  $\alpha=0.9$  scénario 1    - - - 1800m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 1800m -  $\alpha=0.9$  scénario 1    - - - 1800m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE



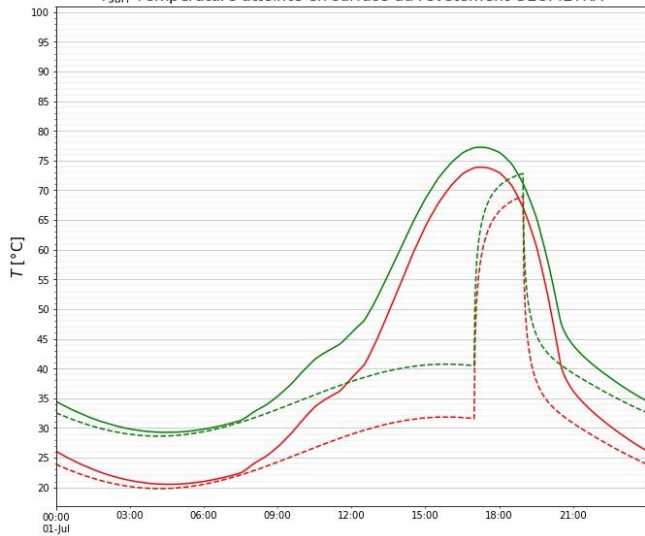
— 1800m -  $\alpha=0.9$  scénario 1    - - - 1800m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2



RAPPORT D'EXPERTISE

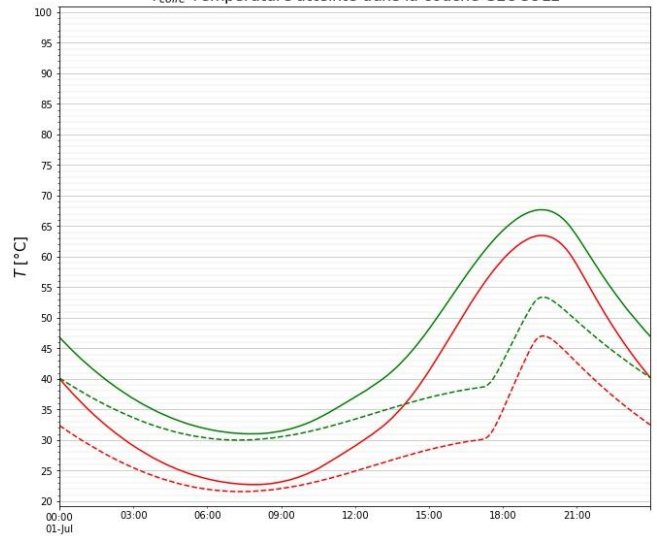
Cas D1 : 2000m -  $\alpha=0.7$

$T_{surf}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



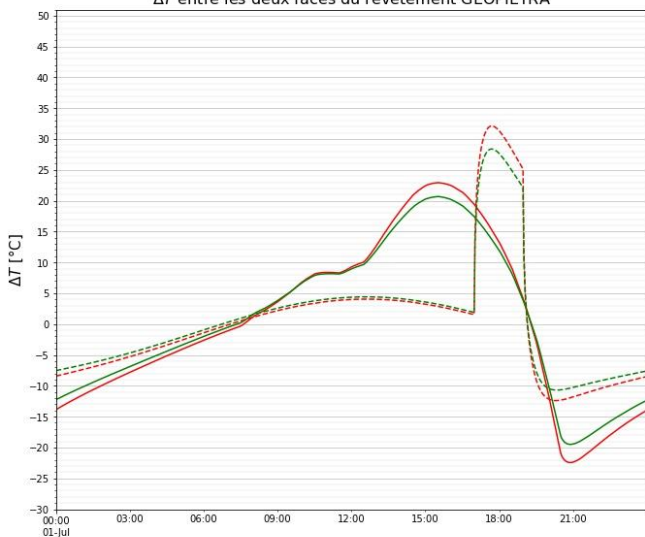
— 2000m -  $\alpha=0.7$  scénario 1      - - - 2000m -  $\alpha=0.7$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



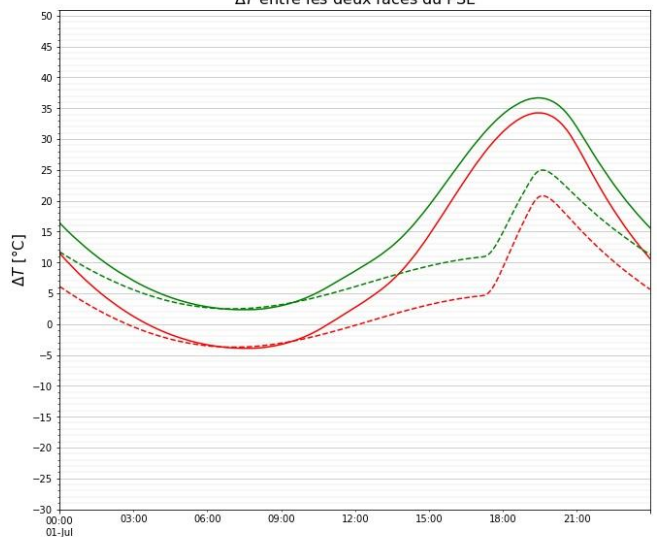
— 2000m -  $\alpha=0.7$  scénario 1      - - - 2000m -  $\alpha=0.7$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 2000m -  $\alpha=0.7$  scénario 1      - - - 2000m -  $\alpha=0.7$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE

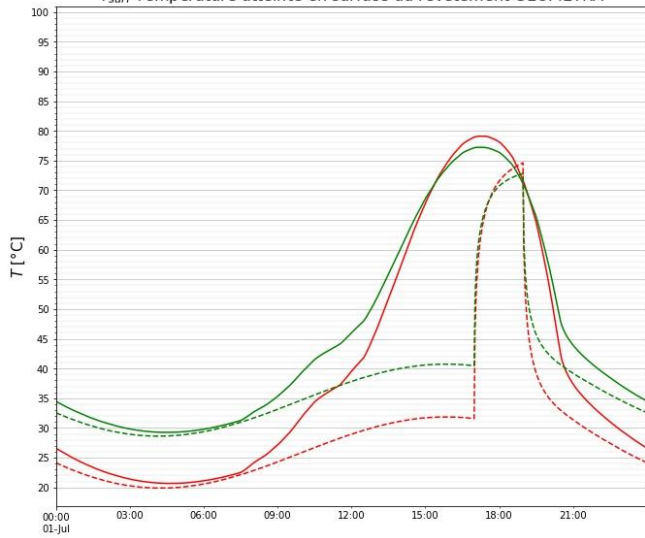


— 2000m -  $\alpha=0.7$  scénario 1      - - - 2000m -  $\alpha=0.7$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1      - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

RAPPORT D'EXPERTISE

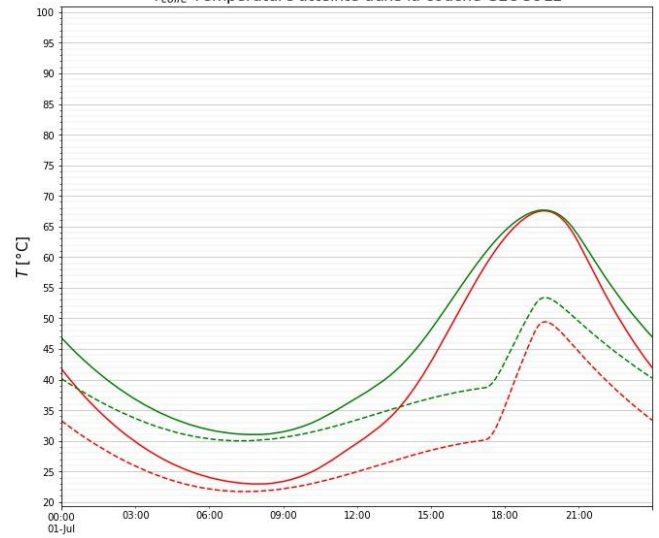
Cas D2 : 2000m -  $\alpha=0.8$

$T_{surf}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



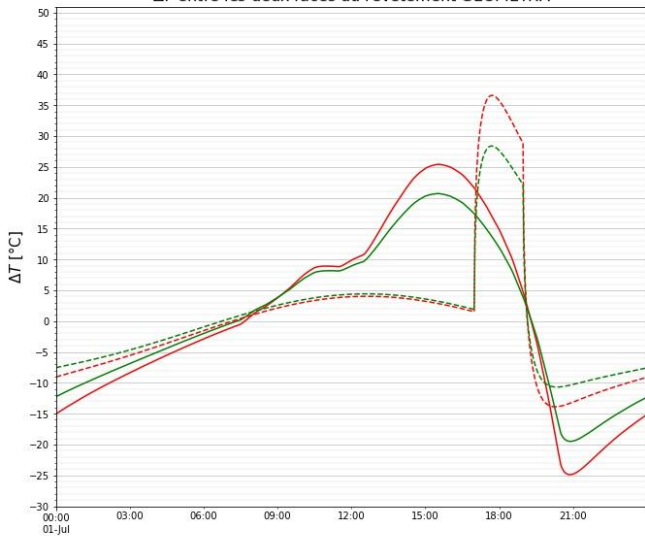
— 2000m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 2000m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



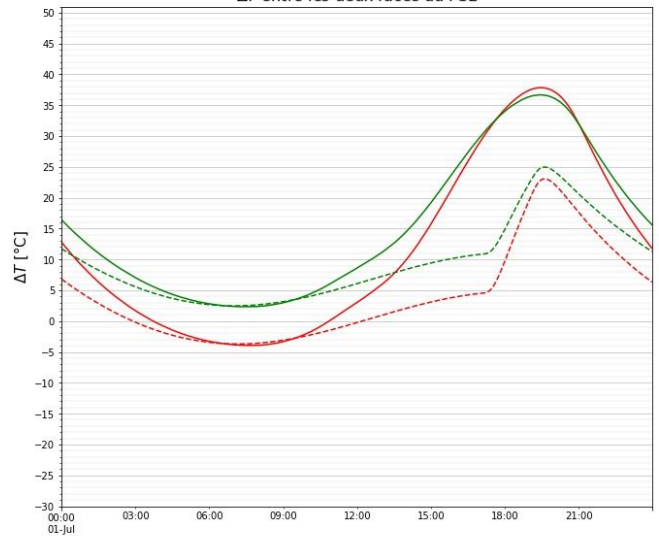
— 2000m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 2000m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 2000m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 2000m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE

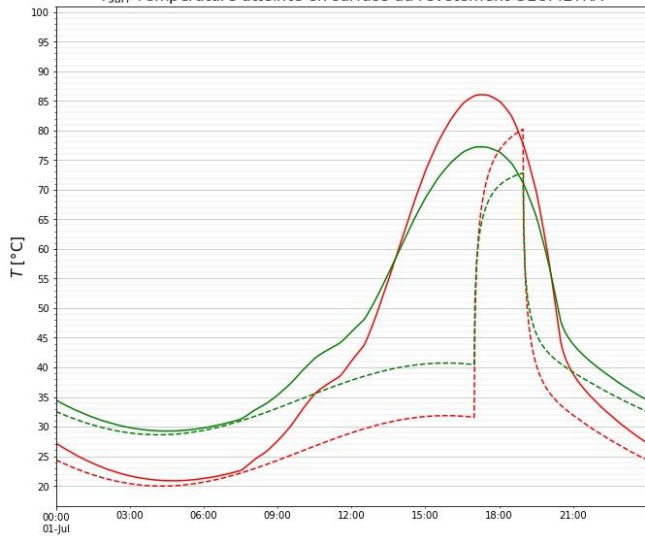


— 2000m -  $\alpha=0.8$  scénario 1    - - - 2000m -  $\alpha=0.8$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

RAPPORT D'EXPERTISE

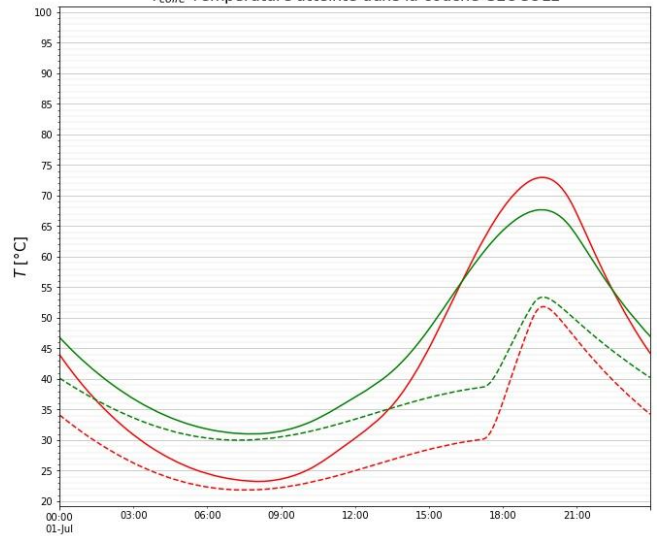
Cas D3 : 2000m -  $\alpha=0.9$

$T_{surf}$  Température atteinte en surface du revêtement GEOPIETRA



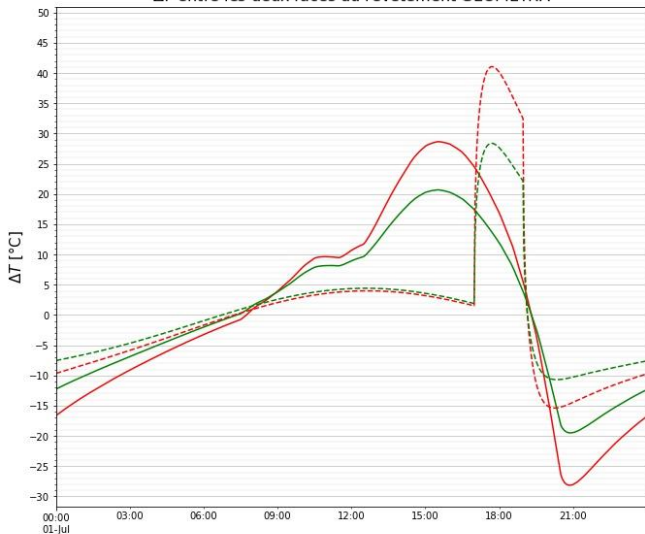
— 2000m -  $\alpha=0.9$  scénario 1    - - - 2000m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$T_{colle}$  Température atteinte dans la couche GEOCOLL



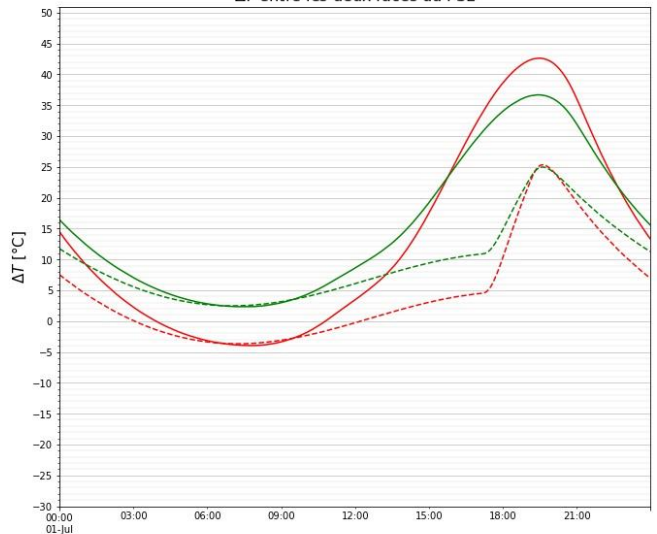
— 2000m -  $\alpha=0.9$  scénario 1    - - - 2000m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du revêtement GEOPIETRA



— 2000m -  $\alpha=0.9$  scénario 1    - - - 2000m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2

$\Delta T$  entre les deux faces du PSE



— 2000m -  $\alpha=0.9$  scénario 1    - - - 2000m -  $\alpha=0.9$  scénario 2  
— 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 1    - - - 0200m -  $\alpha=0.7$ (Réf) scénario 2