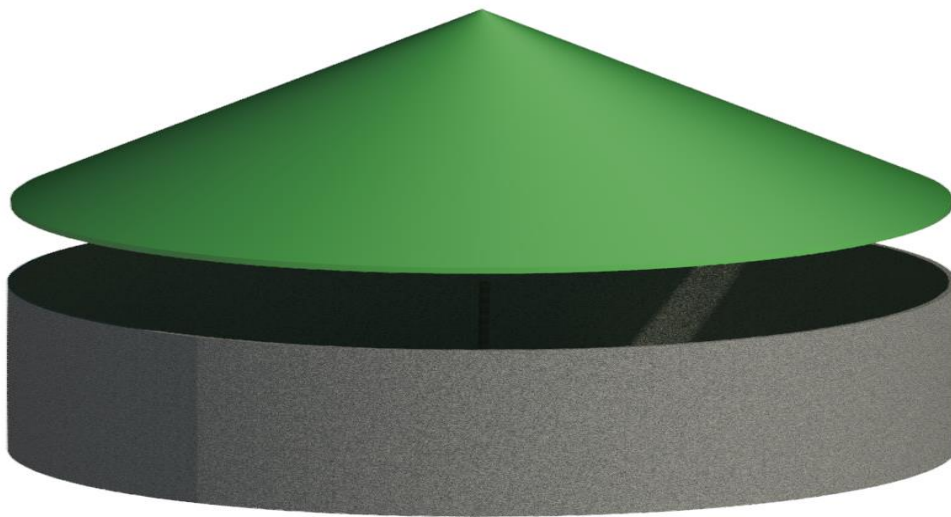


**PARTIE SPÉCIFIQUE (8 points)**

## **Architecture et Construction**

### **Digesteur**

### **Étude préliminaire de l'ouvrage**

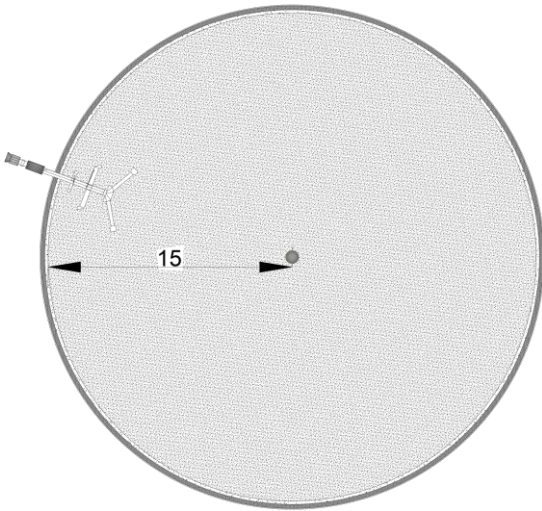


#### **Constitution du sujet :**

- **Dossier sujet et questionnement** ..... Pages 22 à 25
- **Dossier technique**..... Pages 26 à 32
- **Documents réponses (à rendre avec la copie)**..... Pages 33 à 37

## Mise en situation

On vous demande d'étudier une pièce maîtresse d'une unité de méthanisation : son post-digesteur.

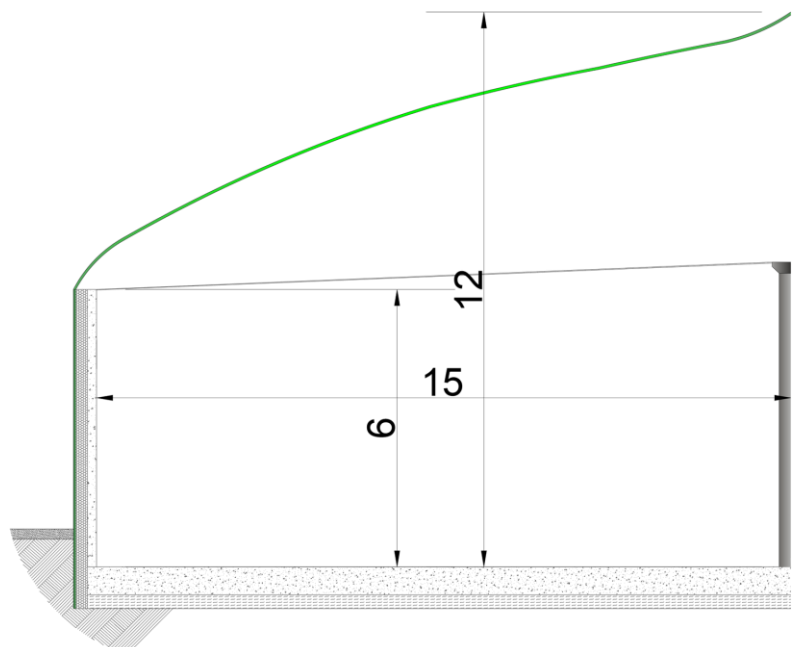


Cette cuve est la plus grande avec 30 m de diamètre intérieur.

La cuve en béton armé est un ouvrage de génie civil qu'il faut étudier avec soin.

En effet, elle est soumise à plusieurs contraintes dues au gaz ou au liquide de digestat : milieu liquide et agressif, pressions, fuites, masses importantes, température à conserver entre 38 et 42 °C...

Une étude préliminaire est menée. Vous avez la charge de la sécurité incendie, du prédimensionnement de l'isolation et enfin de la stabilité du post-digesteur.



## Travail demandé

### Partie A – Étude de la Sécurité Incendie

Le comportement au feu en cas d'incendie est apprécié d'après deux critères : la résistance au feu et la réaction au feu.

La réglementation envers ce type d'ouvrages stipule qu'il faut respecter des normes :

- Matériaux de classe A1, selon la norme NF EN 13501-1 ;
- Murs extérieurs et murs séparatifs REI 120, selon la norme NF EN 13 501- ;
- Planchers REI 120, selon la norme NF EN 13501-2 ;

Commençons par la résistance au feu. Il faut satisfaire l'exigence de REI.

Question A.1 | **Rechercher** les 2 épaisseurs que doivent faire les voiles (élévations) et le  
DTS 3 et 4 | **Associer** également les épaisseurs d'enrobages qui seront nécessaires pour respecter cette exigence.

Question A.2 | **Relever** les 2 épaisseurs prévues sur le plan. **Comparer** : Sont-elles  
DTS 2 | suffisantes pour respecter ce critère de Résistance au feu ?

Intéressons-nous à présent à la réaction au feu des matériaux d'isolation.

Prenons deux matériaux issus du recyclage du verre : produits A laine de verre et produit B verre cellulaire.

Question A.3 | Lequel des deux est le meilleur matériau à privilégier vis-à-vis du critère de  
DTS3, 5, 6 | sécurité Incendie ? **Justifier** votre réponse.

### Partie B – Etude des performances thermiques des parois

Après diverses études connexes :

- Attaques chimiques - Hygrométrie (la chaleur ambiante, l'humidité, la condensation)
- Coût - Débit de fuite de la cuve malgré un cuvela
- Rigidité - Remblais en contact sur la tôle de Polystyrène XPS
- Tassements - Poids de l'ouvrage sur Verre cellulaire

Nous arrivons à l'utilisation de deux isolants différents annotés sur le plan DTS2 :

<b>Isolant 1</b>	<i>Élévations périphériques (dont une partie enterrée)</i>	<b>Polystyrène XPS*</b>
<b>Isolant 2</b>	<i>Partie en sous face : enterrée et comprimée</i>	<b>Verre cellulaire</b>

\* : On veillera tout particulièrement à mettre un vide d'air important entre la tôle ondulée (inflammable) et l'isolant XPS pour pouvoir respecter le critère A1, il faut protéger l'isolant.



L'étude porte à présent sur la prise en compte du critère thermique. Le digestat doit être conservé entre 38 et 42 °C pour dégager le biométhane tout en consommant le moins d'énergie possible. Ainsi pour limiter ces pertes, on souhaite atteindre une résistance thermique R de :

**7 m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup>** à travers les murs (flux horizontal) et  
**5 m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup>** à travers le plancher (flux vertical vers le bas).

Données :

- Conductivité de l'isolant XPS : 0,035 W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>
- Conductivité du bardage d'Aluminium : 185 W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>
- Conductivité du Béton Armé : 1,7 W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>
- Le *R<sub>si</sub>* et le *R<sub>se</sub>* seront négligées.
- Hypothèse : on néglige les épaisseurs de revêtements comme la peinture ou les enduits bitumineux mis en œuvre.

Question B.1 | Pour le Polystyrène XPS, peut-on atteindre la résistance thermique *R<sub>voile</sub>* souhaitée de 7 m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup> avec l'épaisseur retenue sur le plan ? **Calculer**  
DTS1 et DTS2 | et **conclure**.

Question B.2 | Pour atteindre exactement une résistance thermique de 5 m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup>,  
DTS1, 2 et 6 | **calculer** l'épaisseur du Verre cellulaire avec sa conductivité. Les 30 cm prévus sur le plan sont-ils bien choisis ? **Conclure**.

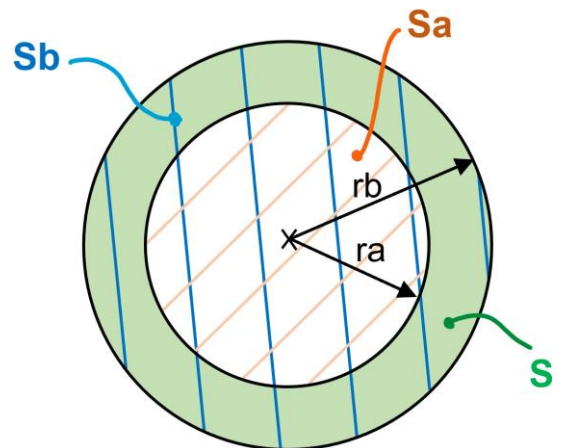
### Partie C – Étude de la stabilité de l'ouvrage

Afin de garantir la stabilité de l'ouvrage nous allons faire une descente de charge et la mettre en relation avec l'Étude de sol et ainsi choisir le système de fondation.

Question C.1 | Sur le DRS1, **calculer** les volumes.  
DTS2 | **Compléter** les schémas et expressions  
DRS1 | littérales.

Notes :

- Pour celui du Digestat, on partira du postulat que la cuve est totalement pleine sur la hauteur de 6 m à cause d'un incident qui obstrue les évacuations.
- On donne l'indice ci-contre.



Question C.2 | Dans le DRS2, **indiquer** la valeur de la masse volumique manquante.  
DTS6 | Puis **calculer** les masses des précédents éléments. Utiliser les valeurs de  
DRS2 | volumes présentes dans ce tableau, quelles que soient les valeurs trouvées à la question C.1.

Donnée : accélération de la pesanteur :  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$

Question C.3 DRS3	<b>Calculer</b> les charges permanentes (G) et d'exploitation de l'ouvrage (Q). A nouveau, utiliser les valeurs présentes dans ce nouveau tableau, quelles que soient les valeurs trouvées à la précédente question.
Question C.4	<b>Calculer</b> la charge totale $P_u$ aux états limites ultimes (ELU) qui s'applique sur le sol (descente de charges) : $P_u = 1,35 \times G + 1,5 \times Q$
Question C.5 DTS7 et DRS4	L'étude géotechnique est donnée sur le DTS7. <b>Annoter</b> les résistances de chaque couche d'horizon de sol sur le DRS4.
Question C.6 DTS1	En considérant la surface de l'ouvrage et pour une valeur de charges aux E.L.U de $P_u = 120 \text{ MN}$ , <b>calculer</b> la contrainte $\sigma_u$ engendrée par l'ouvrage sur le sol.
Question C.7 DTS2 DTS7 et DRS4	D'après le plan DTS2, l'ouvrage repose-t-il sur la terre végétale, les limons, les limons silteux ou le calcaire ? <b>Énoncer</b> dans quelle couche de sol l'ouvrage sera fondé selon cette projection. <b>Justifier</b> .
Question C.8 DTS7 et DRS4	<b>Vérifier</b> par rapport à la reconnaissance géotechnique que le bâtiment ne risque pas de s'enfoncer et reste stable sur cette couche.
Question C.9 DTS7 et DRS4	<b>Proposer</b> une solution à préconiser au Maître d'Ouvrage pour éviter l'enfoncement dans le sol de l'ouvrage. <b>Rédiger</b> une note avec deux propositions.
Question C.10 DTS6	On souhaite à présent vérifier que la couche d'isolant 2 située sous l'ouvrage est capable de résister à la contrainte exercée par l'ouvrage. <b>Donner</b> la résistance à la compression admissible par le verre cellulaire. En prenant une valeur de $\sigma_u = 0,165 \text{ MPa}$ , <b>justifier</b> que l'isolant 2 résistera à la contrainte induite par l'ouvrage.

## **Partie D – Synthèse**

« Une piscine, ou une fosse à digesteur, sont des ouvrages de Génie Civil parmi les plus difficiles à réaliser après une centrale nucléaire, un bunker, un hôpital et un viaduc... »

Question D.1 | Pour conclure sur cette étude, **expliquer** en quelques lignes pourquoi les phases de conception et de réalisation d'un digesteur sont complexes.

- Résistance des matériaux -

• **Contrainte à la compression ou à la traction :** 
$$[\text{Pa}] \quad \sigma = \frac{F}{S}$$
  
[ N ]  
[ m<sup>2</sup> ]

Avec :

- $\sigma$  : Contrainte en [ N · m<sup>-2</sup> ] ou [ Pa ]
- $F$  : Force (poids par exemple) [ N ]
- $S$  : Surface [ m<sup>2</sup> ]

- Thermique -

• **Résistance :** 
$$R = \frac{e}{\lambda}$$
 Avec :

- $R$  : Résistance thermique [ m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup> ]
- $e$  : Epaisseur [ m ]
- $\lambda$  : Conductivité thermique [ W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup> ]

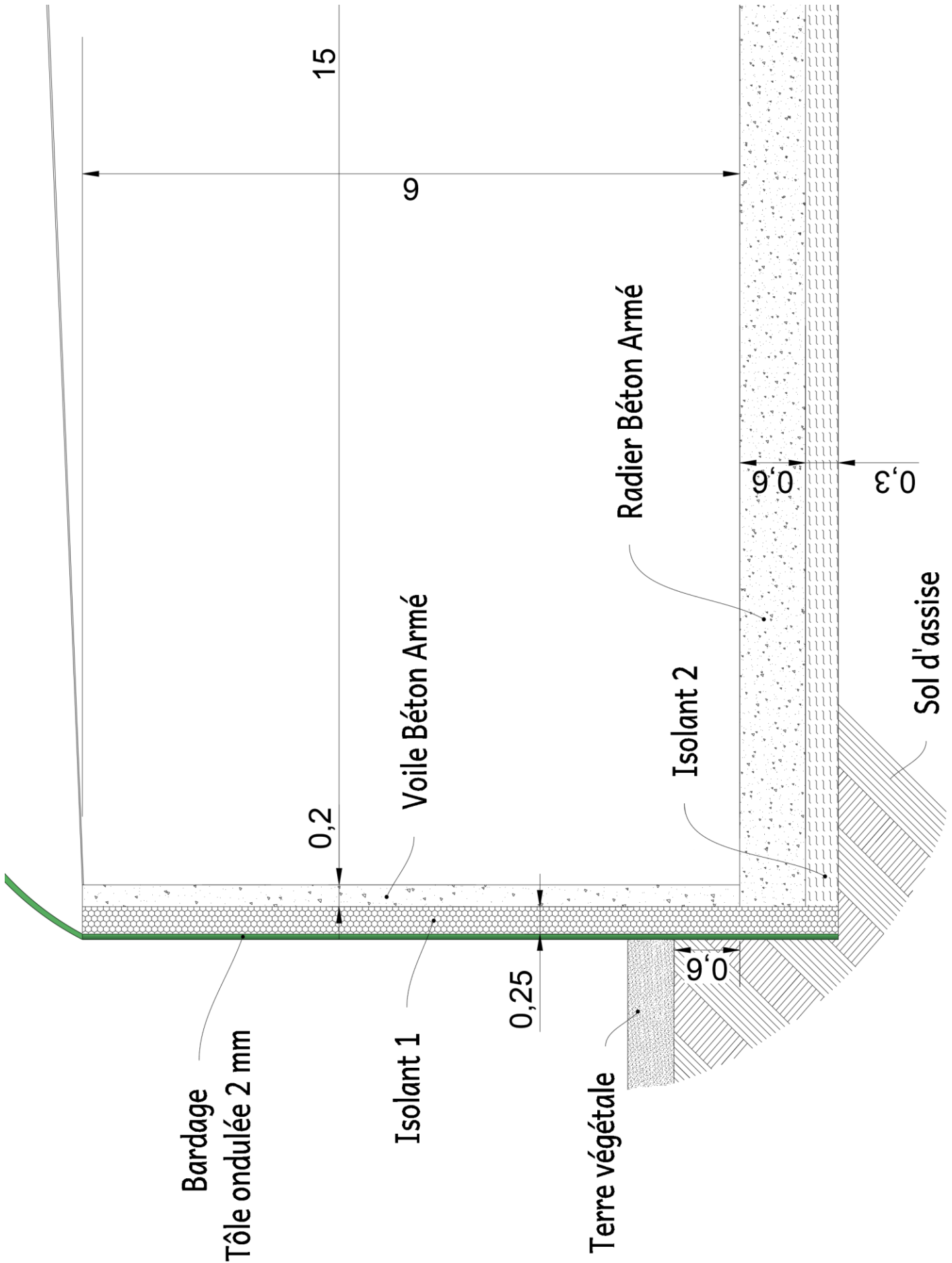
• **Résistance totale d'une paroi :** 
$$R_T = R_{si} + R_{se} + \sum \left( \frac{e}{\lambda} \right) + \sum (R)$$

Avec :

- $R_T$  : Résistance thermique totale de la paroi [ m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup> ]
- $e$  : Epaisseur [ m ]
- $\lambda$  : Conductivité thermique [ W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup> ]
- $R_{si}$  : Résistance thermique superficielle d'échange intérieur [ m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup> ]
- $R_{se}$  : Résistance thermique superficielle d'échange extérieur [ m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup> ]
- $R$  : Résistance thermique d'un élément [ m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup> ]



# DTS2 – Détail de la Coupe Transversale en élévation



# DTS3 – Classification des Matériaux : EUROCLASSES

## - RÉSISTANCE AU FEU -

Exemples : « EI 60 », « REI 120 »

Elle correspond au temps pendant lequel un matériau peut jouer son rôle selon un ou plusieurs critères.

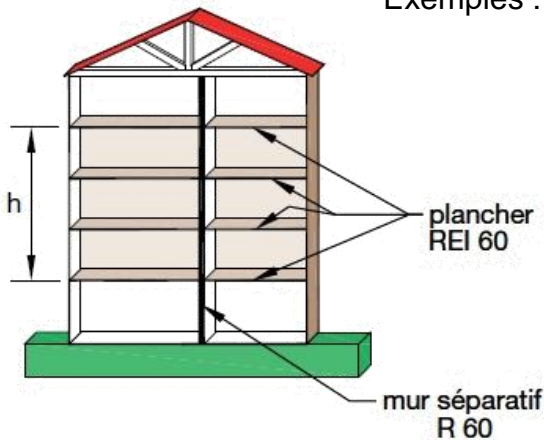
Exemple : REI 30, doit satisfaire pendant 30 minutes les trois critères à la fois : R, E et I



	Définition	Schéma
<b>R</b>	<b>Résistance mécanique</b> (capacité portante)	
<b>E</b>	<b>Étanchéité aux gaz et flammes</b> (aux flammes et absence d'émissions de gaz inflammable du côté de la face non exposée au feu)	
<b>I</b>	<b>Isolation thermique</b> (Élévation de température : Il définit le temps pour atteindre la température de 140°C en moyenne et 180°C ponctuellement sur la face opposée au feu)	 < 140 °C en moyenne < 180 °C en pic
<b>60</b>	Les degrés s'expriment en <b>durée</b> :	15, 20, 30, 45, 60, 90, 120... en minutes

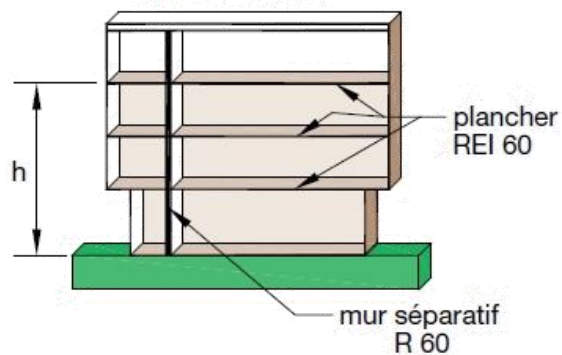
Structure R 60

Exemples :



22-2D2IDACNC1

Structure R 60



## - RÉACTION AU FEU -

Exemples : « A1 », « C , s3, d0 », « E , s2, d1 »

La réaction au feu d'un matériau exprime son aptitude à s'enflammer, à contribuer au démarrage et à la propagation d'un incendie.

Trois critères pour établir le comportement d'un produit :

### ➤ Inflammabilité en 7 classes : de A1, A2, B, C, D, E et F

Produits	
<b>A1</b>	- Incombustible, aucune contribution au feu
<b>A2</b>	- Peu combustibles, aucune contribution au feu
<b>B</b>	- Combustibles dont la contribution au feu et au "flash over" est très limitée
<b>C</b>	- Contributions à l'incendie importante et au flash over limitée
<b>D</b>	- Contributions à l'incendie élevée et flash over significative
<b>E</b>	- Combustibles dont la contribution à l'embrassement généralisé est importante
<b>F</b>	- Combustibles dont la contribution à l'embrassement généralisé est très importante - Produits pour lesquels aucune performance de réaction au feu n'a été déterminée ou revendiquée par le fabricant

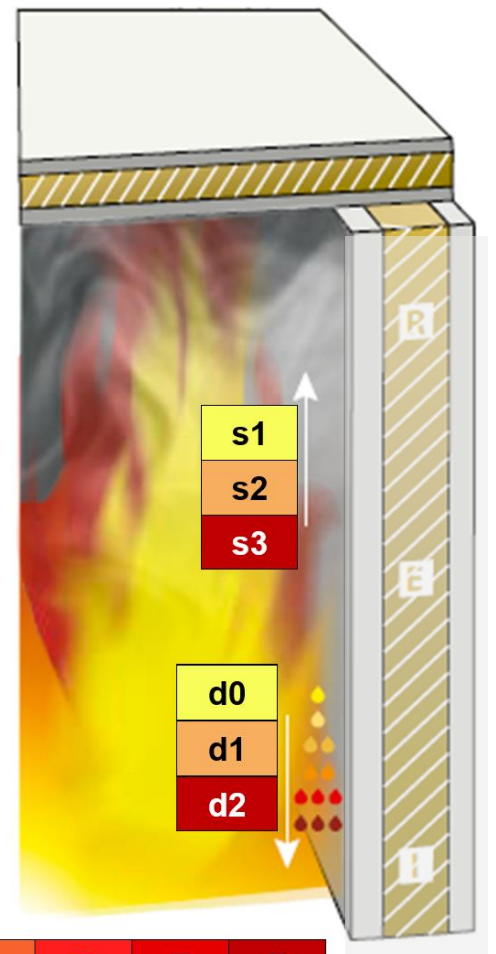
### ➤ Production et opacité de fumée : s (Smoke)

<b>s1</b>	- Faible quantité et vitesse
<b>s2</b>	- Emission de fumées limitées
<b>s3</b>	- Fort dégagement

### ➤ Production de gouttelettes (particules, débris) enflammées : d (Drop)

<b>d0</b>	- Aucune formation de gouttelettes avant 600 s
<b>d1</b>	- Gouttelettes dont l'enflammement persistant pendant plus de 10 secondes avant 600 s
<b>d2</b>	- Les gouttelettes brûlent pendant plus de 10 s

Note : les produits A1 n'ont pas d'indices s ou d en plus car ils sont incombustibles.



## DTS4 – Règle simple concernant les murs porteurs et les dalles

Les parois en béton sont régies par des règles simples. L'épaisseur permet de définir ses performances. Pour d'autres matériaux, comme les plaques de plâtre, les fabricants doivent fournir les procès-verbaux à la Maîtrise d'Ouvrage et au Contrôle Technique de la Construction et aux autorités en cas de sinistre.

### Caractéristiques (en cm) d'un mur en béton armé selon le degré de Résistance au feu exigé

REI [ min ]	30	60	90	120	180	240
Epaisseur du mur [ cm ]	10	11	13	15	20	25
Enrobage des aciers nécessaire [ cm ]	1	2	3	4	6	7

### Caractéristiques (en cm) des dalles en béton armé selon le degré de Résistance au feu exigé

REI [ min ]	30	60	90	120	180	240
Epaisseur de la dalle [ cm ]	6	7	9	11	15	17,5
Enrobage des aciers nécessaire [ cm ]	1	2	2	3	4	4

## DTS5 – Produit A : Laine de Verre





**Caractéristiques du produit en fonction de la norme EN 13167**

Masse volumique (± 15%) (EN 1602)	: 100 kg/m <sup>3</sup>
Epaisseur moyenne (EN 823) ± 2 mm	: de 60 à 300 mm
Longueur (EN 822) ± 2 mm	: 600 mm
Largeur (EN 822) ± 2 mm	: 450 mm
Conductivité thermique (EN ISO 10456)	: $\lambda_D \leq 0.036 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Réaction au feu (EN 13501-1)	: Euroclasse A1
Charge ponctuelle (EN 12430)	: $PL \leq 1.5 \text{ mm}$
Résistance à la compression (EN 826-A)	: $CS \geq 400 \text{ kPa}$
Résistance à la flexion (EN 12089)	: $BS \geq 400 \text{ kPa}$
Résistance à la traction (EN 1607)	: $TR \geq 150 \text{ kPa}$
Fluage (EN 1606)	: CC (1.5/1/50) 225

**Description** : L'isolation FOAMGLAS® est fabriquée à partir de verre recyclé (≥ 60%)\* et de matières premières abondantes dans la nature (sable, dolomite, chaux). FOAMGLAS® est un matériau minéral à 100% et ne contient pas de liant, de gaz ignifugeant ou de gaz nocif pour la couche d'ozone. FOAMGLAS® ne contient pas de COV ou autres substances volatiles.

**Réaction au feu (EN 13501-1)** : Le matériau qui le compose est conforme à Euroclasse A1. Il est incombustible et ne dégage pas de fumées toxiques en cas d'incendie.

**Limites de températures de service** : de -265 °C à +430 °C

**Résistance à la diffusion de vapeur d'eau** :  $\mu = \infty$  (EN ISO 10456)

**Hygroscopicité** : nulle

**Capillarité** : nulle

**Point de fusion** : >1000 °C (DIN 4102-17)

**Coefficient de dilatation thermique** :  $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (EN 13471)

**Chaleur spécifique** : 1000 J/(kg·K) (EN ISO 10456)

**Caractéristiques du FOAMGLAS®**



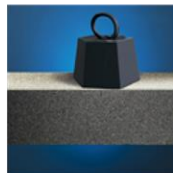
Performance thermique à l'épreuve du temps



Etanche à l'eau



Résistant aux attaques



Résistant à la compression



Facile à découper



Incombustible



Etanche à la vapeur d'eau



Dimensionnellement stable



Résistant aux acides



Ecologique

**- Etude géotechnique -**

Reconnaissance des sols

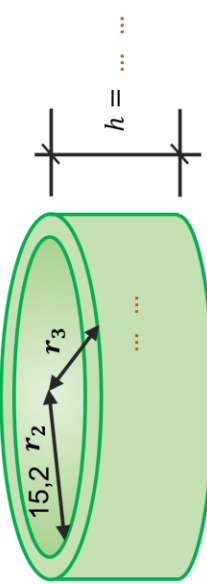

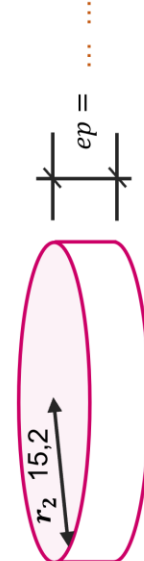
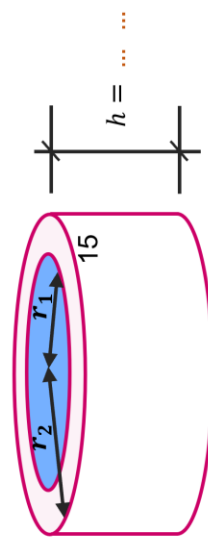
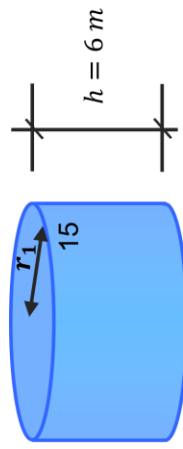
Les sondages exécutés par forage et essai pressiométrique ont permis d'obtenir :

<b>Nature des sols reconnus</b>	<b>Caractéristique mécanique</b>
Terre végétale sur 0,40 m	(Décapé)
Limons sur 2,40 m	0,15 MPa minimum
Limons silteux sur 1 m	0,33 MPa minimum
Calcaire en dessous	1,90 MPa minimum

Hydrologie

Les 8 relevés piézométriques sont restés secs jusqu'à la base. La nappe phréatique est au sein du substratum calcaire et n'intéresse pas ce projet. On estime qu'elle se situe à - 4,50 m de la surface du sol.

**DOCUMENT RÉPONSES DRS1 – Métré : Volumes**

Désignation	Schéma	Détail des calculs	Volume [m³]
① Isolant 1 (périphérique)		$V_{\text{Isolant 1}} = \dots \dots$ $V_{\text{Isolant 1}} = ( \pi \times 15,45^2 - \pi \times 15,2^2 ) \times 6,9$	
② Isolant 2 (en sous face)		$V_{\text{Isolant 2}} = \pi \times r_2^2 \times ep$ $V_{\text{Isolant 2}} = \dots \dots$	
③ Radier		$V_{\text{Radier}} = \pi \times r_2^2 \times ep$ $V_{\text{Radier}} = \pi \times 15,2^2 \times \dots \dots$	
④ Voile		$V_{\text{Voile}} = ( \pi \times r_2^2 - \pi \times r_1^2 ) \times h$ $V_{\text{Voile}} = \dots \dots$	
⑫ Digestat (Matière organique diluée)		$V_{\text{Digestat}} = \dots \dots$ $V_{\text{Digestat}} = \dots \dots$	









**DOCUMENT RÉPONSES DRS2 – Métré : Masses de l'Ouvrage**

	Désignation	Volume [ m <sup>3</sup> ]	Masse volumique [ kg · m <sup>-3</sup> ]	Masse [ kg ]
①	Polystyrène XPS	170	30	
②	Verre cellulaire	220		
③	Radier	440	2500	
④	Voile	120	2500	
⑫	Digestat	4240	1600	

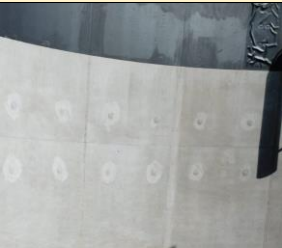




## DOCUMENT RÉPONSES DRS3 – Descente de charges

Charges Permanentes G			
	Désignation	Photos	Masse [ kg ]
①	Polystyrène XPS (périphérique)		5400
②	Verre cellulaire (en sous face)		24 000
③	Radier		1 102 000
④	Voile		300 900
⑤	Bardage aluminium de profil 20/125 de couleur verte avec support		800
⑥	Double-membrane souple		680
⑦	Filet principal et secondaire		78
⑧	Poteau central		500
⑨	Agitateur		890
⑩	Echangeur de chaleur tubulaire radiateur		740



⑪	Autres équipements et réseaux		400
Masse totale =			
Charge totale : G =			

Charges d'Exploitation Q			
	Désignation	Photos	Masse [ kg ]
⑫	Digestat (Matière organique diluée)		6 785 000
⑬	Réparateur et ses équipements		350
⑭	Neige		52834
Masse totale =			
Charge totale : Q=			



**DOCUMENT RÉPONSES DRS4 – Coupe verticale des horizons de sols**

