

BACCALAURÉAT TECHNOLOGIQUE

ÉPREUVE D'ENSEIGNEMENT DE SPÉCIALITÉ

SESSION 2021

SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE

Ingénierie, innovation et développement durable

ARCHITECTURE ET CONSTRUCTION

Durée de l'épreuve : **4 heures**

L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.

L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collègue » est autorisé.

Dès que ce sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.

Ce sujet comporte 34 pages numérotées de 1/34 à 34/34.

Constitution du sujet :

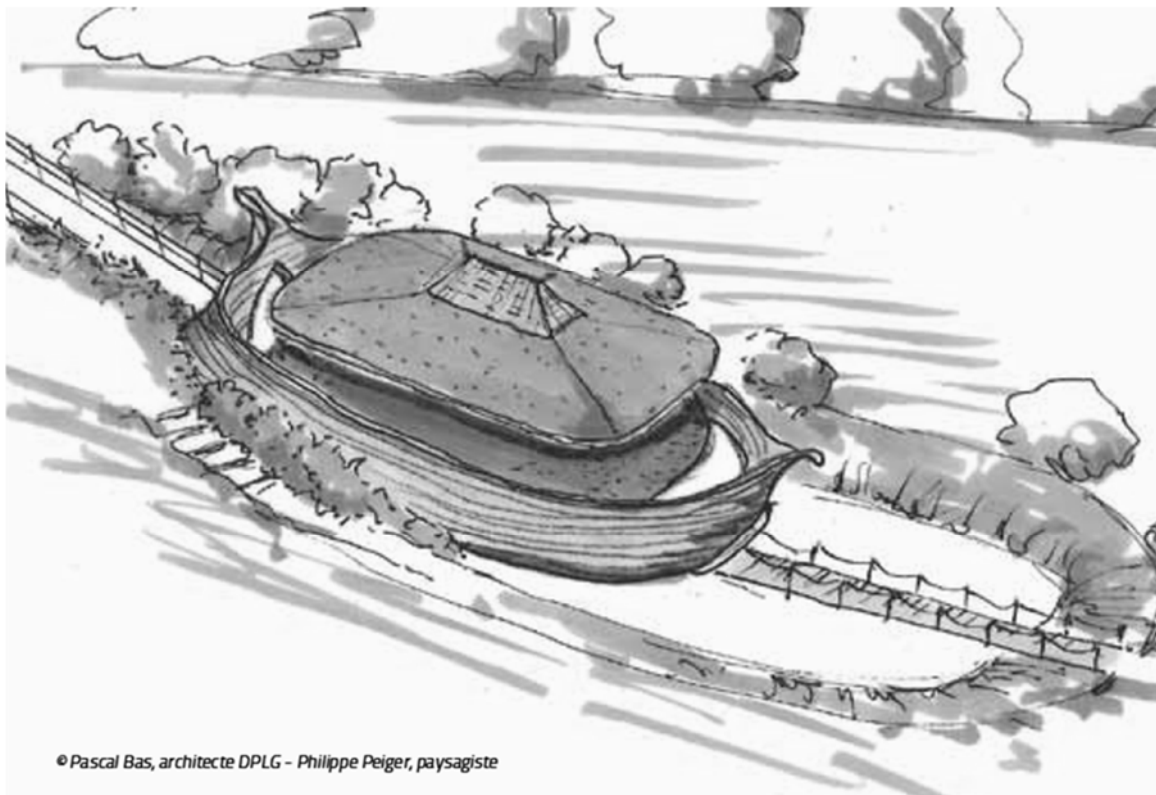
Partie commune (durée indicative 2h30)	12 points
Partie spécifique (durée indicative 1h30)	8 points

Le candidat traite les 2 parties en suivant les consignes contenues dans le sujet. Ces 2 parties sont indépendantes et peuvent être traitées dans un ordre indifférent.

Chacune des parties est traitée sur des copies séparées.

Tous les documents réponses sont à rendre avec la copie.

L'Arche des petites bêtes du zoo de Thoiry



- **Présentation de l'étude et questionnement** pages 3 à 10
- **Documents Techniques** pages 11 à 20
- **Documents Réponses** pages 21 à 22

Mise en situation

Le **Zoo Safari de Thoiry** est un parc zoologique proche de Paris accueillant plus de 1500 animaux sur environ 150 hectares du domaine du château de Thoiry. Ceci en fait le deuxième parc le plus étendu en France et le douzième en nombre de visiteurs avec plus de 400 000 entrées chaque année.

Il se décompose, de façon originale, en 3 sections spécifiques :

- le **château et ses jardins botaniques** (classés et labellisés « jardin remarquable » par le Ministère de la Culture) ;
- le **Safari** ;
- le **zoo** classique abritant 750 animaux pour la plupart appartenant à des espèces protégées.

Le parc organise de nombreuses visites et ateliers pédagogiques, notamment pour les enfants de tous âges, encadrés par des animateurs et des soigneurs. Environ 13 000 élèves de primaire et de collège bénéficient de ces stages visant à la compréhension de la nature et des animaux chaque année.

L'Arche des petites bêtes

Inauguré en 2012 dans la section zoo, ce nouveau bâtiment a été imaginé afin de servir de refuge à des animaux moins impressionnants que ceux de la jungle, mal connus, mais parfois bien plus importants pour la biodiversité mondiale. Les « petites bêtes » ont été sélectionnées parmi une soixantaine d'espèces originales (*grenouille mousse*, *mygale à genoux rouges du Mexique*, *caméléon panthère*, *lézard à casque*, *méduse lune...*).



Vue aérienne de l'entrée de l'Arche des petites bêtes dans son environnement.

L'Arche des petites bêtes a été conçue pour répondre à 3 objectifs.

- Être un centre d'élevage et de conservation pour les espèces d'invertébrés et d'amphibiens menacés

Le bâtiment sert de refuge, de nurserie et de lieu de reproduction pour des animaux rares et en voie d'extinction. Symboliquement, la structure choisie est celle d'un immense vaisseau de bois de 500 m².

- Être une structure pédagogique et ludique permettant de sensibiliser le public à la conservation de la biodiversité et au développement durable

« Le visiteur [...] est invité à suivre un cheminement traversant cinq zones différentes qui le mènent de l'ombre à la lumière, tant physiquement que sur le plan de la réflexion scientifique et philosophique. Durant sa visite, il passe ainsi successivement par une étape de constat (menaces pesant sur la nature), par le temps de la découverte (merveilles de la nature), par le stade de l'obscurantisme (peur de la nature), par une phase d'observation (connaissance de la nature) pour enfin parvenir aux solutions (préservation de la biodiversité). » Extrait du dossier de presse.

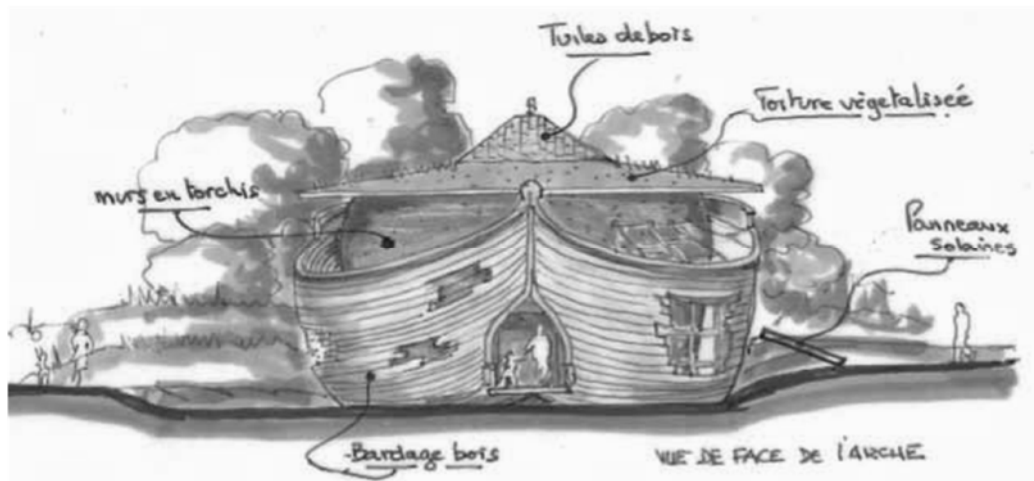
L'ensemble de la structure est, de plus, conçue pour un accès intégral aux personnes à mobilité réduite dans un esprit et un design totalement innovant pouvant attirer un public en grand nombre.

- Être une éco-construction minimisant son impact sur l'environnement

« Edifiée avec des matériaux renouvelables et/ou recyclables, l'infrastructure répond au cahier des charges des bâtiments bioclimatiques : isolation très performante et inertie thermique, orientation et récupération des eaux de pluie, filtration de l'eau... De plus, l'Arche des petites bêtes a été bâtie avec des matériaux locaux. Ceux-ci présentent l'avantage d'avoir nécessité peu ou pas de transport (terre de la toiture), ou d'être d'un faible coût énergétique à la production (bois de la charpente), ou encore d'être en grande partie recyclables (béton de chanvre des murs) [...].

Le toit végétalisé favorise l'intégration paysagère mais rend aussi à la faune et à la flore locales la surface au sol affectée au bâtiment». Extrait du dossier de presse.*

** Ne pas gêner les perspectives depuis le parc classé par un bâtiment trop visible.*



Travail demandé

Problématique générale : Comment l'arche des petites bêtes s'inscrit-elle dans une démarche de développement durable ?

Inscription dans une démarche de développement durable

Question 1.1 | **Identifier**, à partir des textes de présentation et du diagramme des exigences du DT1, pour chacun des 3 piliers du développement durable :

Mise en situation

DT1

- 1 argument inscrivant le projet de l'arche dans une démarche environnementale.
- 1 argument inscrivant l'arche dans une démarche sociétale.
- 1 argument inscrivant l'arche dans une démarche économique.

béton de chanvre poteau porteur

Partie 1 : Comment inscrire les matériaux choisis dans une démarche de développement durable ?

Structure porteuse

La structure porteuse du toit du bâtiment est construite en poteaux de bois lamellé-collé (voir DT2). L'étude porte sur les 12 poteaux de la face externe. Ceux-ci mesurent 5,9 m de haut, ont une largeur à leur base de 0,5 m et à leur sommet de 1 m.

Le DT3 présente une étude éco-environnementale comparative entre la solution finalement choisie (bois et assemblage de provenance locale) et une solution en acier 5 fois plus résistant, permettant l'emploi d'une épaisseur plus fine, mais d'une provenance plus éloignée.



Photo montrant un poteau porteur et les parois en béton de chanvre durant la construction

Question 1.2 | **Estimer**, pour les 2 matériaux envisagés, les valeurs de l'énergie totale dépensée dans le cycle de vie d'un poteau puis de l'équivalent en kg de CO2 total rejeté, à l'aide des données du DT3.

DT3

Question 1.3 | **Calculer** en pourcentage, dans le cas d'un poteau en acier, la part du transport dans l'énergie totale dépensée dans le cycle de vie puis dans l'équivalent en kg de CO2 total rejeté, à partir du DT3.

DT3

La part du transport pour la solution en bois est quasiment nulle.

Justifier l'intérêt de l'emploi de matériaux locaux.

Question 1.4 | **Calculer** le rapport énergie totale acier / énergie totale bois, à partir du
DT3. **Calculer** ensuite le rapport équivalent en kg de CO₂ total acier /
équivalent en kg de CO₂ total bois, toujours à partir du DT3.
Justifier à l'aide de ces rapports le choix de la structure bois issue
d'une production locale.

Matériau isolant sur les parois

Les parois de l'arche ont été conçues afin d'assurer l'isolation thermique maximale du bâtiment, les « petites bêtes » vivant dans des univers spécifiques. Elles doivent également garantir la résistance mécanique, la rigidité et la sécurité des personnes. Le choix s'est porté sur un matériau composite et écologique, le béton de chanvre, obtenu par mélange d'un granulats léger d'origine végétale (le chanvre) et d'un liant minéral (la chaux). Comme tout végétal, le chanvre absorbe et stocke du CO₂ pendant sa phase de croissance.

Le DT4 donne certaines performances du béton de chanvre pertinentes pour notre étude.

Question 1.5 | **Expliquer** pourquoi le béton de chanvre est un bon compromis pour
DT4 | assurer l'isolation thermique et garantir la résistance des parois, en
vous appuyant sur les données du DT4.

Le béton de chanvre n'est pas la solution traditionnellement choisie par les constructeurs pour ce type de parois. Le Document Technique DT5 présente une comparaison entre le béton de chanvre et d'autres solutions d'un point de vue environnemental.

Question 1.6 | **Relever**, sur le DT5, la valeur de CO₂ émis par le béton de chanvre
DT5 | durant son cycle de vie.
Expliquer pourquoi cette valeur est négative.
Conclure quant aux choix de l'architecte vis-à-vis des critères
environnementaux pour la réalisation des parois.

Partie 2 : Comment respecter la réglementation thermique en vigueur ?

La technique du béton projeté utilisée pour la mise en œuvre du béton de chanvre permet d'obtenir la courbure esthétique de la face externe, voulue par l'architecte. L'épaisseur des murs en béton de chanvre n'est donc pas constante.

Question 2.1 | **Relever** les épaisseurs minimale et maximale des murs, données sur les plans du DT6 (coupe AA). **Calculer** l'épaisseur moyenne

DT6

DR1

$$e_{\text{moy}} = (e_{\text{max}} + e_{\text{min}}) / 2.$$

Compléter les cases correspondant à l'épaisseur moyenne e_{moy} du béton de chanvre et de l'enduit de chaux sur le DR1.

Question 2.2 | **Calculer** les résistances thermiques des couches de béton de chanvre et d'enduit de chaux en utilisant le DT7. **Indiquer** ces valeurs sur le DR1.

DT7

DR1

Question 2.3 | **Identifier** les valeurs des résistances superficielles extérieures et intérieures d'une paroi verticale en utilisant le DT8. **Indiquer** ces valeurs sur le DR1.

DT8

DR1

Calculer la résistance thermique totale de la paroi. **Indiquer** cette valeur sur le DR1.

Question 2.4 | **En déduire** le coefficient de transmission thermique U_P de la paroi sur le DR1 et **vérifier** que la réglementation U_{max} est respectée.

DT7

DR1

On donne la longueur totale des murs : **88,77m** et on néglige, pour le calcul, les diverses ouvertures du bâtiment.

Question 2.5 | **Relever** la hauteur des murs en béton de chanvre sur le plan donné dans le DT6.

DT6

En déduire la surface des murs en béton de chanvre.

Pour le confort des visiteurs, on souhaite maintenir une température à l'intérieur de l'Arche de **19°C**. La période de chauffe du bâtiment dure **du 1^{er} octobre au 30 avril**, soit **212 jours**. En raison de la forme arrondie de la paroi, le coefficient de transmission thermique moyen est **$U_P = 0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$** .

Question 2.6 | **Calculer** la température extérieure moyenne durant la période de chauffe à l'aide des informations du DT9.
DT9

En déduire l'écart de température moyen entre l'intérieur et l'extérieur durant cette période.

Calculer le flux thermique moyen qui traverse les parois verticales en béton de chanvre en kW.

Question 2.7 | **Calculer** l'énergie thermique perdue au travers des parois verticales en béton de chanvre en kW·h durant la période de chauffe.
DR2

Compléter le DR2 pour obtenir les déperditions thermiques totales.

L'étude précédente permet d'estimer les déperditions énergétiques à **environ 37000 kW·h**. Un logiciel de simulation numérique a permis d'obtenir un bilan énergétique thermique complet de l'Arche. Ce résultat est présenté sous la forme d'un diagramme de Sankey dans le document DT10.

Question 2.8 | **Comparer** les valeurs des déperditions obtenues par simulation avec celles calculées par l'étude.
DT10

Expliquer cette différence en citant 2 autres sources de déperditions thermiques qui n'ont pas été prises en compte dans les calculs.

Partie 3 : Comment couvrir de manière renouvelable une partie des besoins énergétiques de l'arche ?

Selon le diagramme de Sankey, les besoins thermiques nets sont de 21679 kWh. On estime que ceux-ci représentent environ 70% des besoins énergétiques globaux du bâtiment. Ces besoins sont donc évalués à 30000 kWh par an. Afin de respecter les contraintes environnementales de l'Arche, on souhaite mettre en place des panneaux solaires photovoltaïques pour couvrir une partie des besoins énergétiques.

Question 3.1 | **Indiquer** le pourcentage d'énergie renouvelable à injecter dans le système, à partir du diagramme SysML des exigences.
DT1 | **En déduire** l'énergie que doivent produire les panneaux solaires.

Question 3.2 | **Justifier** le choix d'une inclinaison des panneaux solaires à 45°, à partir de l'irradiation globale présentée sur le document technique DT11.
DT11

Question 3.3 | **Indiquer** la valeur de la quantité d'énergie récupérable sur une année, par m² de panneaux, à partir du DT12 (valeurs irradiation solaire).
DT12

On choisit d'installer des panneaux solaires « Systovi » de puissance 300Wc. Fabriqués en France, ils permettent de réduire l'impact environnemental dû au transport des matériaux.

Question 3.4 | **Relever** les dimensions d'une cellule, d'après le DT13 (fiche technique panneau solaire). **En déduire** la surface totale de cellules composant un panneau.
DT13

Question 3.5 | **Calculer** la quantité d'énergie solaire qu'un panneau peut capter sur une année (en kW·h) s'ils sont inclinés à 45°.

Question 3.6 | **Relever**, sur le DT13, la valeur du rendement du panneau choisi (fiche technique panneau solaire). **En déduire** la quantité d'énergie électrique récupérable sur une année par un panneau solaire.
DT13

L'installateur propose de mettre en place 15 panneaux solaires.

Question 3.7 | **Conclure** en justifiant sur le respect du cahier des charges.

Partie 4 : Comment améliorer la communication envers les publics scolaires ?

Les parcs zoologiques jouent désormais un rôle crucial dans la préservation de la biodiversité, grâce à leur capacité à sensibiliser et à éduquer un nombre croissant de visiteurs.

Afin de les sensibiliser à la préservation des espèces menacées d'extinction, le zoo souhaite mettre en place le prêt de tablettes numériques permettant une visite plus ludique pour les plus jeunes. L'application qui sera installée nécessite une communication entre les tablettes et un accès internet. Le zoo prévoit l'accueil de groupes scolaires de 30 enfants maximum. Deux groupes scolaires pourront effectuer la visite de l'Arche en même temps.

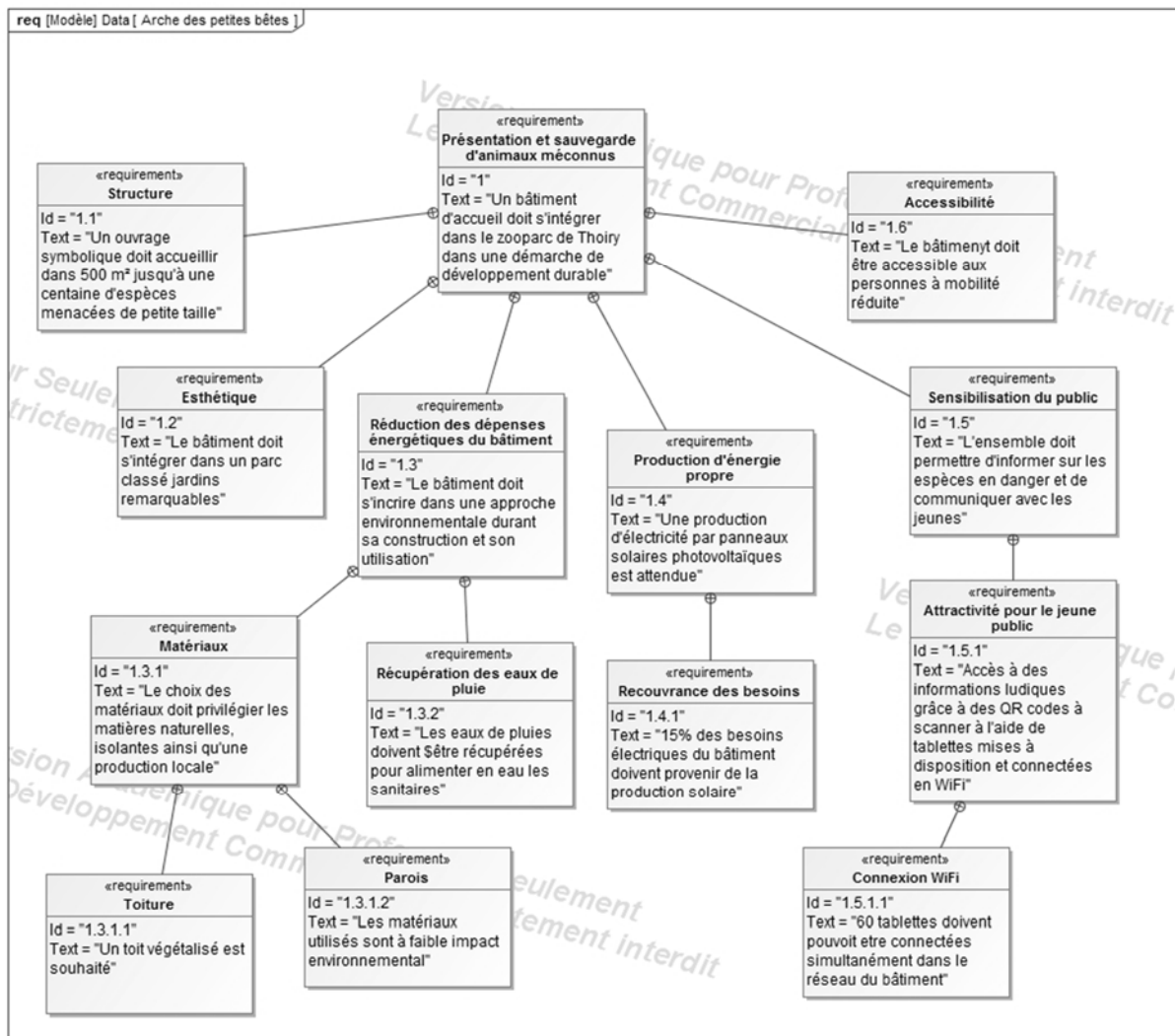
Le plan d'installation du réseau informatique déjà en place est présenté sur le Document Technique DT14.

Question 4.1 DT1	Indiquer la solution retenue pour rendre attractif l'Arche pour les enfants, à partir du diagramme des exigences (DT1).
Question 4.2 DT14	Déterminer le nombre d'équipements déjà adressés sur le réseau interne de l'Arche, à partir du plan d'implantation du réseau informatique de l'Arche (DT14).
Question 4.3 DT14	Indiquer les valeurs décimales de l'adresse IP du réseau en place et de son masque de sous réseau, à partir du plan d'implantation du réseau informatique de l'Arche (DT14).
Question 4.4 DT14	Indiquer les deux plages d'adresses IP disponibles pour raccorder des nouveaux appareils.
Question 4.5 DT14	Déterminer le nombre d'adresses IP restant disponibles.
Question 4.6 DT1	Comparer vos résultats, en termes de capacité de connexion de tablettes, au cahier des charges (DT1). Conclure sur les capacités de l'Arche à accueillir les groupes scolaires dans les conditions souhaitées par les responsables du zoo.

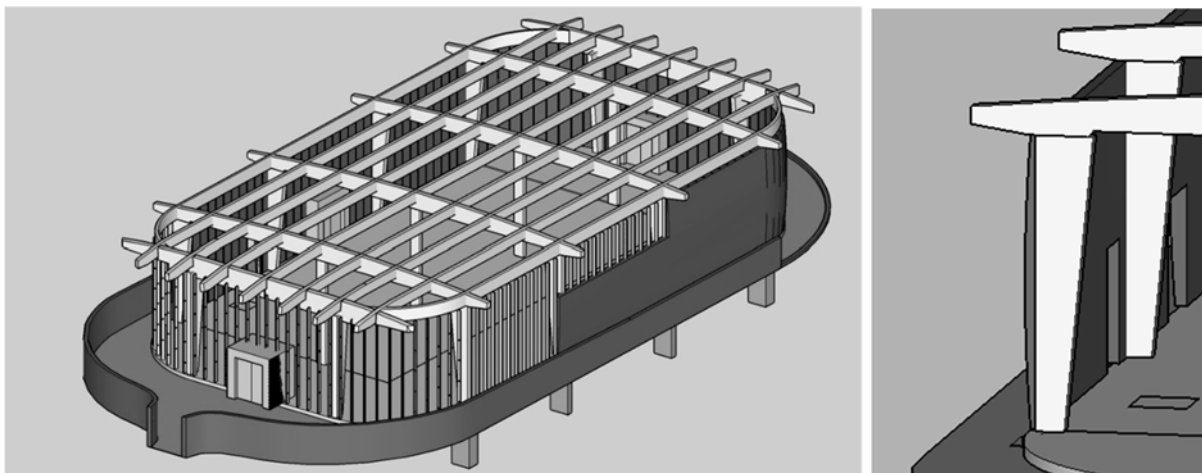
Conclusion générale

Question 4.7	Argumenter sur le bien-fondé des solutions développées, pour chacune des 4 parties étudiées, du point de vue des 3 piliers du développement durable.
--------------	---

DT1 : diagramme des exigences



DT2 : modèle numérique de la structure porteuse de l'arche (toiture enlevée)



DT3 : étude comparative d'éco-conception dans leur cycle de vie d'un poteau porteur par simulations numériques

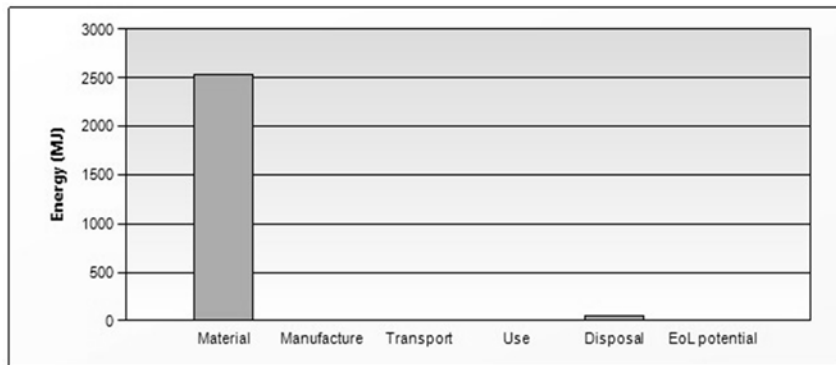
Material : Matériaux - Manufacture : Fabrication - Transport : Transport - Use : Utilisation
 Disposal : Fin de vie - EoL potential : Recyclage potentiel



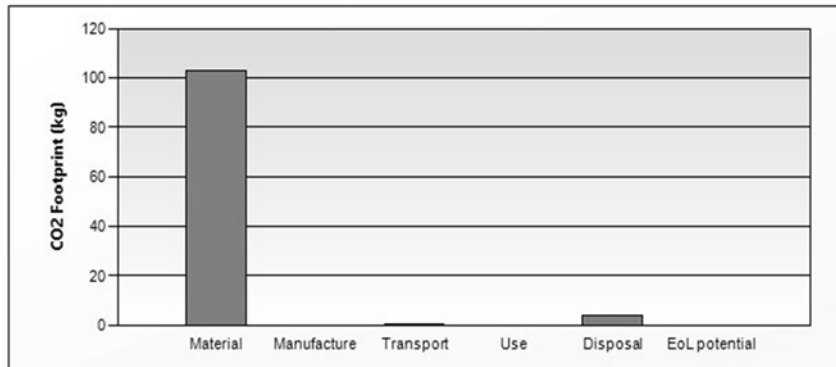
Version installée en bois lamellé-collé

Paramètres de simulation :

- Poteau en bois lamellé-collé épaisseur 250 mm
- Masse de 274 kg.
- Cycle de vie de 50 ans,
- Transport par camion 32 tonnes
- Distance parcourue du lieu de fabrication au chantier de construction : 50 km



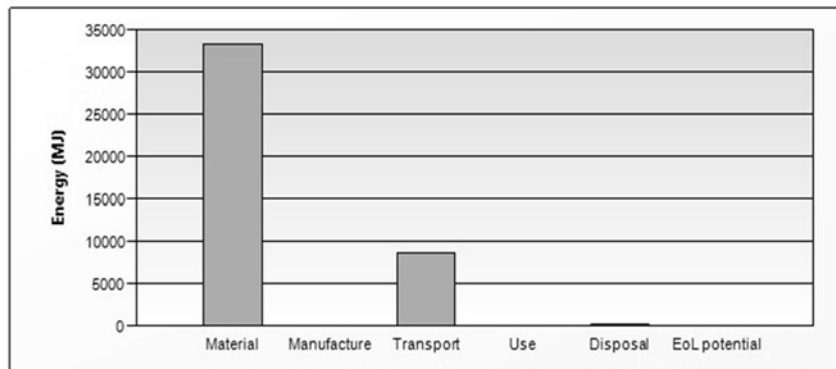
Energy Details...



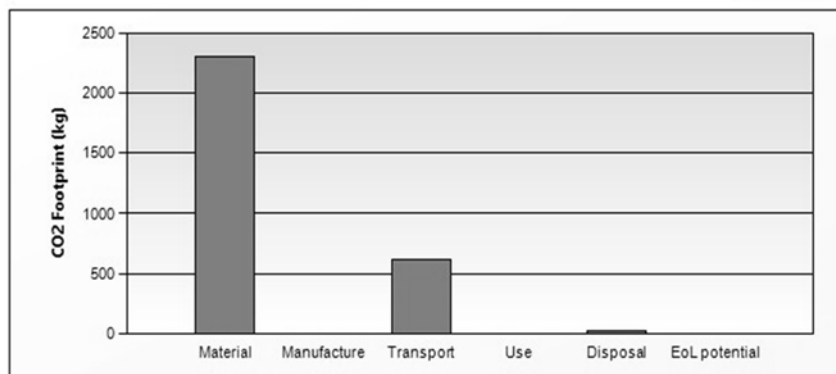
Version comparative en acier

Paramètres de simulation :

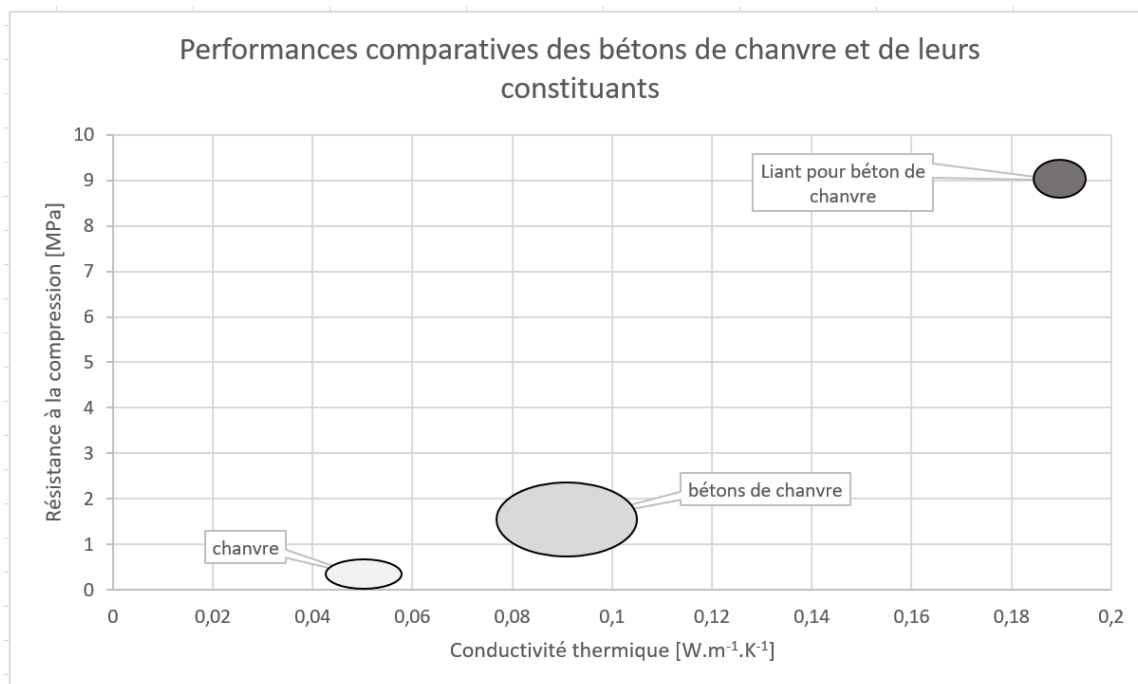
- Poteau en acier épaisseur 50 mm
- Masse de 1270 kg.
- Cycle de vie de 50 ans,
- Transport par camion 32 tonnes
- Distance parcourue du lieu de fabrication au chantier de construction : 1500 km



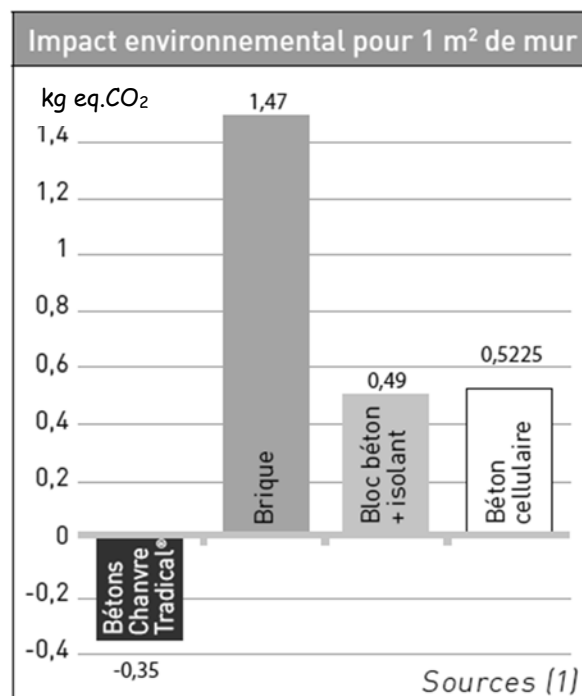
Energy Details...



DT4 : performances des bétons de chanvre suivant trois critères



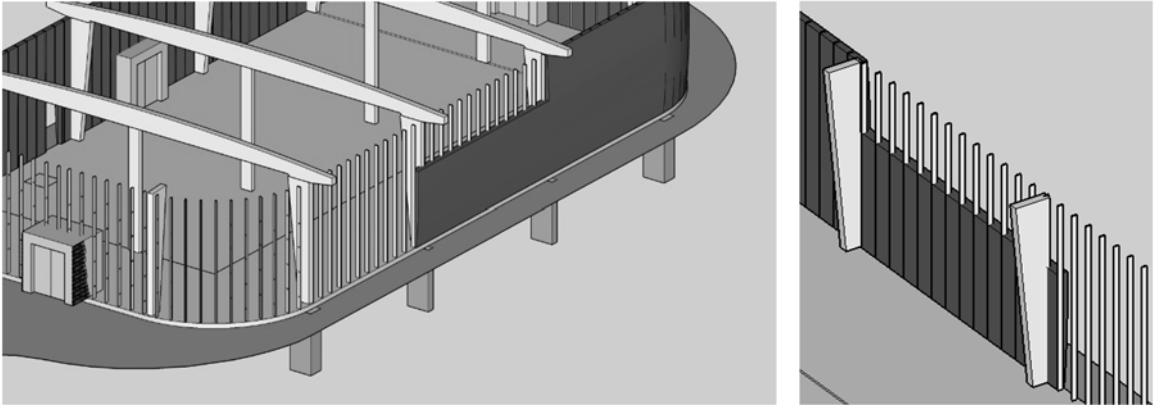
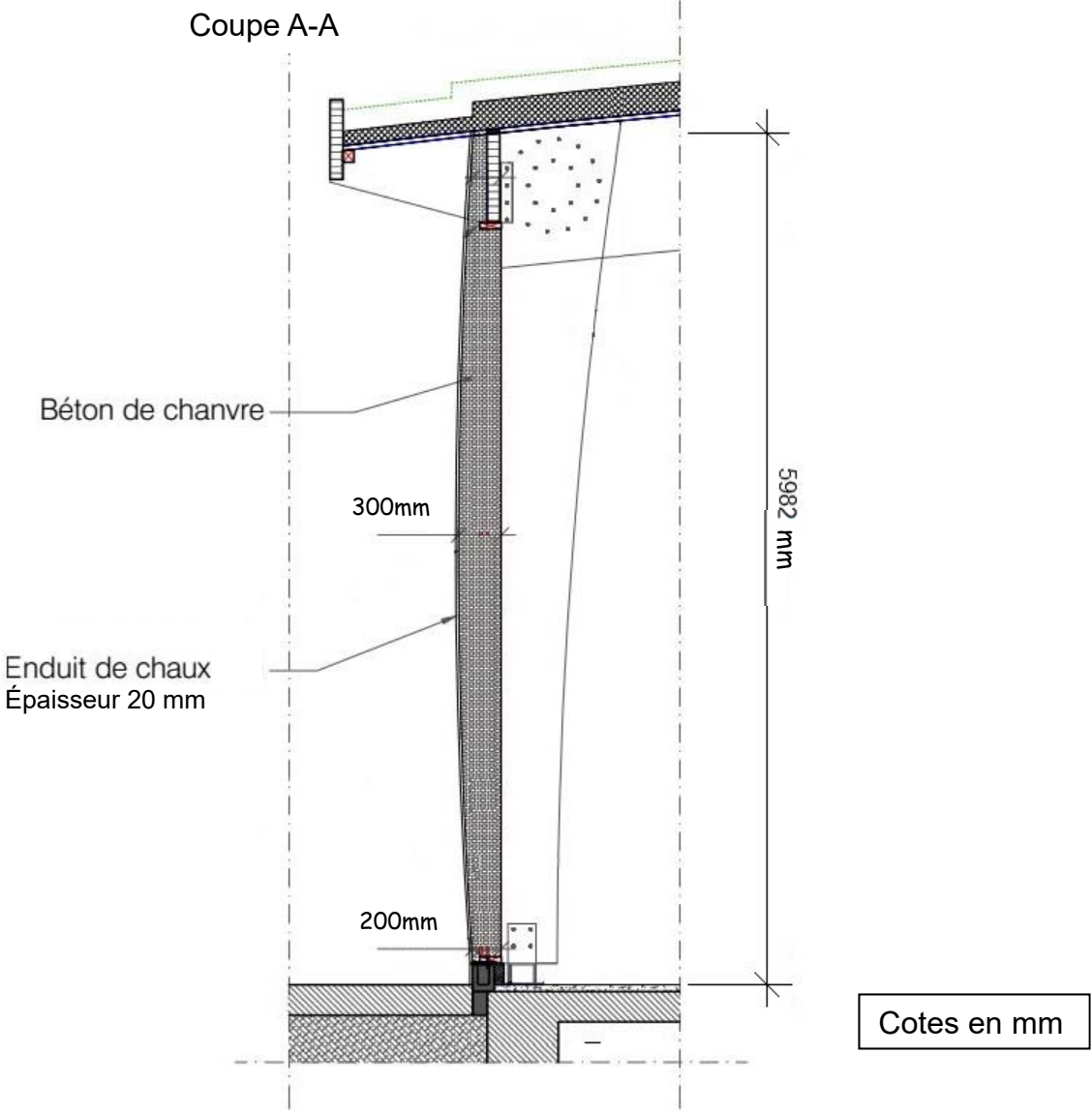
DT5 : émissions des gaz à effet de serre (en kg eq. CO₂) sur l'ensemble du cycle de vie de différents types de parois



(1) Les données proviennent de la base INIES et de l'analyse du cycle de vie d'un mur en béton de chanvre banché sur ossature bois réalisé par l'INRA selon la norme NF 10.010 à la demande et avec le concours du Ministère de l'Agriculture et de l'ADEME.

Les Bétons Chanvre Tradical® ont été choisis pour cette analyse.

DT6 : plan de structure : coupe verticale des murs



Détails de la vue en coupe du modèle 3D

DT7 : caractéristiques des parois

Caractéristiques des parois

Paroi	Composition	Coefficient de transmission thermique U_p ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	Maximum réglementaire U_{max} ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
Plancher bas	Polyuréthane 10cm Béton 20cm	0.30	0,4
Mur extérieur	Béton de chanvre Enduit de chaux 2 cm	A déterminer	0,45
Plancher intermédiaire	Bois	>5	Pas d'exigences
Mur intérieur	SIPOREX ep 15 cm	0,59	Pas d'exigences
Toiture terrasse végétalisée	Terre 8cm Bitume d'étanchéité Polyuréthane 6cm Panneau OSB 2cm	0,41	0,28
Plancher sous comble	Ouate de cellulose 20cm Panneau OSB 2cm	0,2	0,28

Rappels :

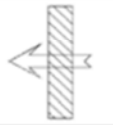


La résistance thermique (R_{th}) d'une couche de matériau de conductivité thermique (λ) et d'épaisseur (e) est :

$$R_{th} = e / \lambda$$

Le coefficient de transmission thermique (U_p) d'une paroi de résistance thermique (R_{th}) est :

$$U_p = 1 / R_{th}$$

DT8 : résistances thermiques superficielles

VALEURS DES RESISTANCES THERMIQUES SUPERFICIELLES (m ² .K/w)					
Croquis	Sens du flux	Paroi en contact avec			
		L'extérieur Un passage ouvert Un local couvert		Un local non chauffé Un comble Un vide sanitaire	
		R _{si}	R _{se}	R _{si}	R _{se}
	Horizontal	0.13	0.04	0.13	0.13
	Ascendant	0.10	0.04	0.10	0.10
	Descendant	0.17	0.04	0.17	0.17

Résistances superficielles des parois

R_{si} : Résistance superficielle intérieure / R_{se}: Résistance superficielle extérieure

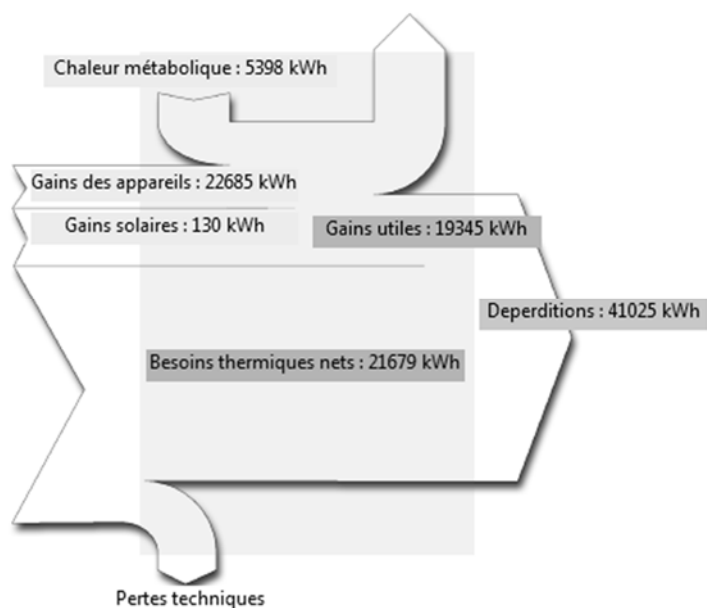
DT9 : données climatiques de Thoiry

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	2.7	3.5	6.7	9.6	12.9	15.8	17.8	17.6	15.3	10.7	6.4	3.6
Température minimale moyenne (°C)	0.1	0.4	2.5	4.8	7.9	10.6	12.5	12.4	10.5	6.8	3.5	1.2
Température maximale (°C)	5.3	6.6	10.9	14.4	17.9	21.1	23.1	22.8	20.1	14.7	9.3	6.1
Précipitations (mm)	57	47	48	45	57	53	54	51	56	58	61	57

Le flux thermique (Φ) traversant une paroi de surface (S), de coefficient de conduction (U) séparant 2 milieux dont les températures ont une différence (ΔT) est :

$$\Phi = U \cdot S \cdot \Delta T \text{ en W}$$

DT10 : diagramme de Sankey des apports internes pour le chauffage

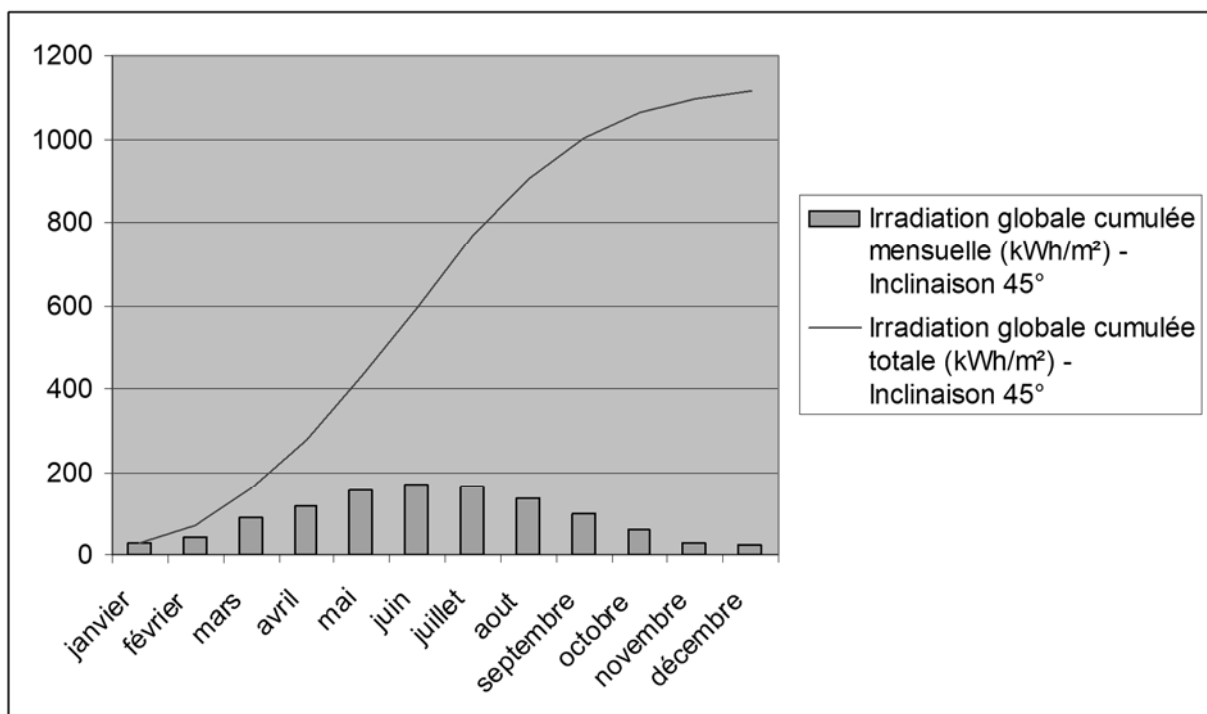


DT11 : irradiation solaire pour la commune de Thoiry pour différents plans inclinés

mois	Irradiation globale journalière (kW·h·m ⁻²) - Inclinaison 0°	Irradiation globale journalière (kW·h·m ⁻²) - Inclinaison 45°	Irradiation globale journalière (kW·h·m ⁻²) - Inclinaison 90°
janvier	0,87	1,3	1,19
février	1,52	2,01	1,72
mars	2,88	3,52	2,74
avril	3,92	4,05	2,71
mai	5,01	4,7	2,82
juin	5,59	5,01	2,85
juillet	5,33	4,86	2,82
aout	4,44	4,39	2,78
septembre	3,38	3,86	2,81
octobre	1,98	2,61	2,18
novembre	0,99	1,4	1,25
décembre	0,72	1,11	1,04
Moyenne	3,0525	3,235	2,2425

DT12 : irradiation solaire pour la commune de Thoiry sur un plan incliné à 45°

mois	Irradiation globale cumulée mensuelle (kW·h·m ⁻²) - Inclinaison 45°
janvier	27
février	43
mars	89
avril	118
mai	155
juin	168
juillet	165
août	138
septembre	101
octobre	61
novembre	30
décembre	22



DT13 : fiche technique panneau solaire Systovi 300Wc

Systovi est une marque de panneaux solaires haut de gamme, fabriqués en France.

Le panneau solaire Systovi 300Wc, en technologie monocristalline, obtient le meilleur rendement au mètre carré des modules à base de silicium.

Les modules full black 60 cellules d'une puissance de 300Wc obtiennent un rendement surfacique de 18,6%. Les cellules noires qui le composent lui donnent un aspect full black particulièrement esthétique qui s'intègre facilement sur toutes les toitures de bâtiments.

Panneau solaire compatible avec les micro-onduleurs APS DUO YC500I, YC600 et APS QUADRI YC1000-3.

Fiche technique

DONNÉES ÉLECTRIQUES STC

Puissance crête-Pmax : 300Wc

Tension à puissance maximale : 33,24V

Intensité à puissance maximale : 8,66A

Tension de circuit ouvert : 39,48V

Intensité de court-circuit : 9,18A

DONNÉES MÉCANIQUES

Cellules solaires : Monocristallines PERC 156 x 156 mm

Disposition des cellules : 60 cellules (6 x 10)

Dimension du module (avec le cadre): 1 648 x 988 x 35 mm

Poids : 17,8 kg

Verre : Verre solaire trempé haute transparence 3.2mm, traitement anti-reflet

Backsheet : Noir

Cadre : Aluminium noir

Boîte de jonction : Tyco Z-Rail IP 67

GARANTIES

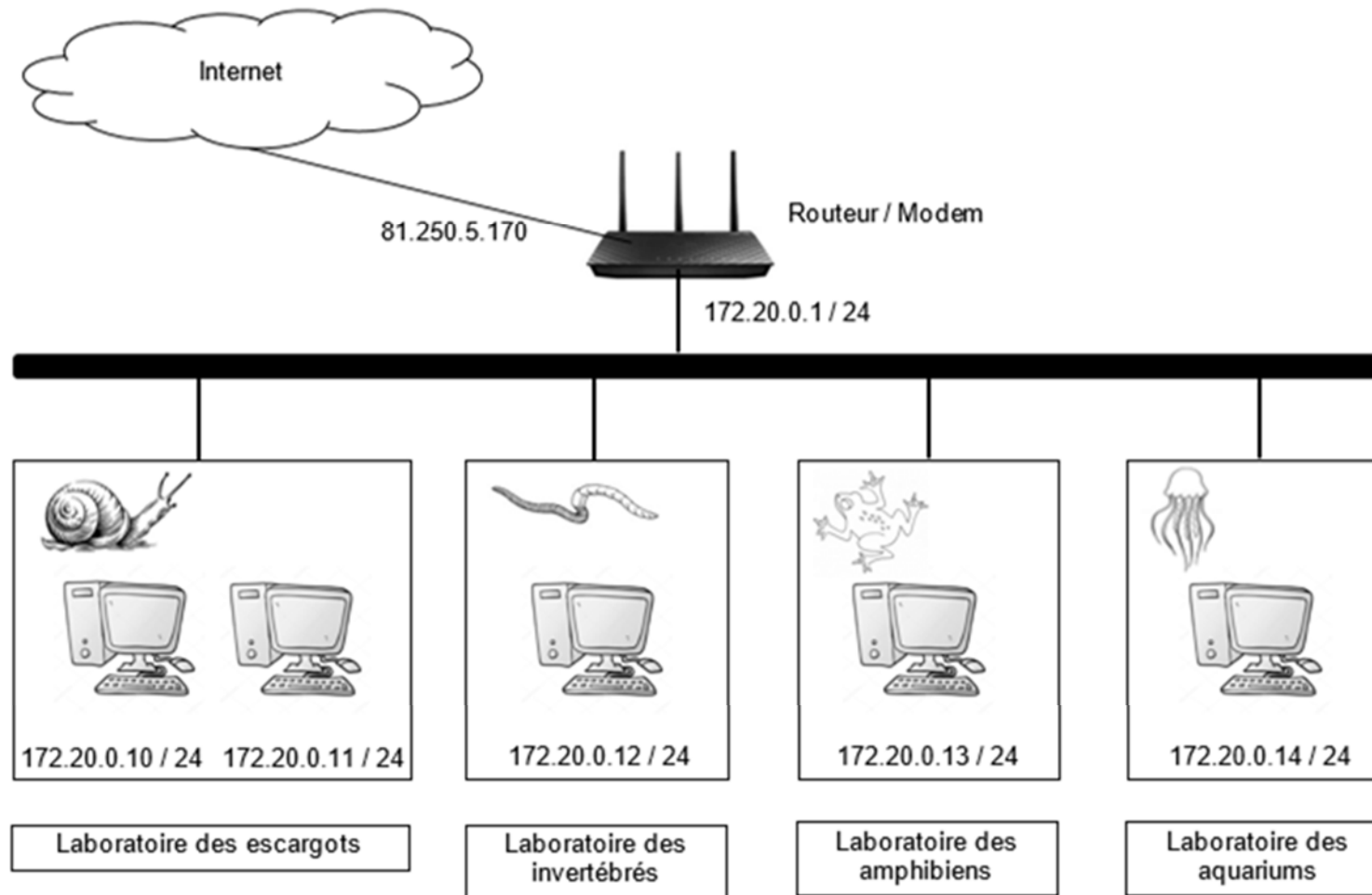
Garantie constructeur: 20 ans

Garantie de production: 80% à 25 ans

Câbles : Résistant UV, câble 4,0 mm² (AWG 11), 1 000 mm

Connecteur : Tyco PV4 compatible MC4

DT14 : plan d'installation du réseau informatique de l'arche



DOCUMENT RÉPONSES DR1

Calcul de la résistance thermique de la paroi en béton de chanvre :

Nom	Épaisseur en m	Conductivité thermique λ en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Résistance thermique R_{th} en $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
Surface extérieure			Q2.3
Enduit de chaux	Q2.1	0,7	Q2.2
Béton de chanvre	Q2.1	0,1	Q2.2
Surface intérieure			Q2.3
		R_{th} totale	Q2.3

Coefficient de transmission thermique (Q2.4):

$U_p =$

DOCUMENT RÉPONSES DR2

Calcul des déperditions thermiques :

Paroi	Pertes en kW·h
Plancher bas	10260
Mur extérieur	
Toiture terrasse végétalisée	11215
Plancher sous comble	1370
TOTAL	

ARCHITECTURE ET CONSTRUCTION

Arche des petites bêtes



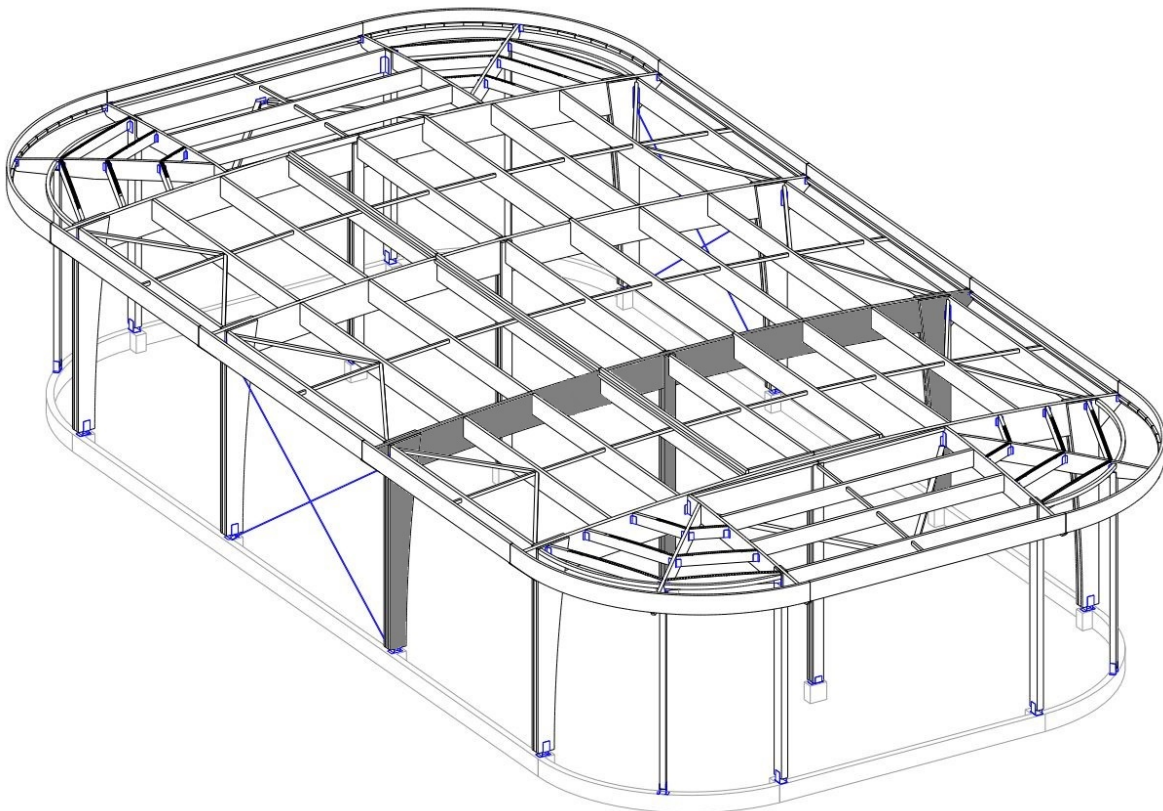
- **Présentation de l'étude page 24**
- **Questions A1 à D5 pages 25 à 27**
- **Documents techniques spécifiques DT S1 à DT S6 pages 28 à 33**
- **Document réponse DR S1 à rendre avec la copie page 34**

**Dans la partie spécifique, vous devez choisir entre traiter la partie A (choix 1)
ou la partie C (choix 2).
Les autres parties sont à traiter obligatoirement.**

Mise en situation

L'Arche des petites bêtes est prévue pour être une construction durable. Outre son aspect extérieur qui lui permet de s'intégrer au mieux dans son environnement, le mode de construction doit lui aussi respecter les trois piliers du développement durable. Pour ce faire, le choix a été fait de réaliser la structure porteuse de l'Arche en bois.

La suite de l'étude porte sur un portique transversal de la charpente, grisé sur la vue en perspective. Ce portique est constitué d'une poutre horizontale, de deux poteaux de rive et d'un poteau central.



Les normes de constructions européennes (Eurocodes) imposent 2 types de vérifications pour les structures :

- les États Limites de Services (ELS) : il s'agit de vérifier que les déformations de la structure restent inférieures à une valeur limite réglementaire.
- les États Limites Ultimes (ELU) : il s'agit de vérifier que les contraintes dans le matériau restent inférieures à une valeur limite réglementaire.

Pour les constructions en bois, ces valeurs limites sont données dans l'Eurocode 5.

Travail demandé

Problématique : Pourquoi avoir choisi d'utiliser du bois lamellé-collé plutôt que du bois massif pour les principaux éléments de la charpente ?

Une première étude d'un portique en bois massif (BM), représenté sur le DT S1b, a été menée ; chaque élément de ce portique (poutre ou poteau) étant d'un seul morceau. Les résultats de cette étude sont présentés sur le document DR S1. Cette solution n'a pas été retenue par l'architecte qui lui a préféré un portique en bois lamellé-collé (BLC), représenté sur le DT S1a. L'objectif de cette partie est de valider le choix de l'architecte après comparaison des deux solutions.

Les calculs, justifications et autres réponses sont à rédiger sur la copie.

Toutes les réponses numériques sont à reporter sur le document réponses DR S1 qui sera rendu avec la copie.

Choix 1

Partie A : Quel est l'impact environnemental des types de bois étudiés ?

Question A.1 | **Expliquer** ce qu'est le bois lamellé-collé, en précisant sa constitution et son mode de fabrication.

Question A.2 | **Déterminer** le volume de la poutre en bois massif, à partir du document DT S1b, définissant la géométrie du portique.

DT S1b

DR S1

Compléter la case correspondante du document comparatif DR S1 (ligne QA.2).

Selon le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), l'énergie grise est l'énergie primaire consommée tout au long du cycle de vie d'un composant d'ouvrage.

Question A.3 | **Identifier** l'énergie grise du bois lamellé-collé (en kWh·m⁻³), à partir du Document Technique DT S2 donnant l'énergie grise par mètre cube des principaux matériaux de construction, puis **calculer** l'énergie grise de la poutre en bois lamellé-collé (en kWh).

DT S2,

DR S1

Question A.4 | **Conclure** sur le type de bois le plus adapté à une construction durable sur la base de ce critère énergétique.

Partie B : Quelles sont les caractéristiques mécaniques des types de bois étudiés ?

Pour mener à bien l'étude en résistance des matériaux, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques mécaniques du bois utilisé.

Question B.1 | **Identifier** l'essence utilisée pour le BLC, ainsi que la classe de résistance d'après les informations données dans le cartouche des plans de la charpente du Document Technique DT S3.

DT S3,

DR S1

Selon la classe de résistance du bois, l'Eurocode 5 fixe les grandeurs caractéristiques à prendre en compte (voir DT S4).

Question B.2 | **Relever** sur les extraits de l'Eurocode 5 du DT S4, le module d'élasticité moyen axial $E_{0,g,mean}$ (en Mpa) et la masse volumique caractéristique ρ_k (en $kg \cdot m^{-3}$) d'un bois lamellé-collé homogène de classe GL24.
DT S4
DR S1

Question B.3 | En prenant $10 m \cdot s^{-2}$ comme valeur pour la pesanteur, **calculer** le poids propre de la poutre en BLC (en daN).
DT S1
DR S1 | **En déduire** la charge linéique correspondante à prendre en compte.

Des simulations numériques des portiques ont permis d'obtenir les diagrammes des efforts de cohésion dans les différents éléments (voir DT S5).

Question B.4 | **Indiquer** les sollicitations auxquelles sont soumis les différents éléments du portique (poutre, poteaux de rive, poteau central) à partir du DT S5.
DT S5 | **Justifier.**

La poutre horizontale est essentiellement soumise à de la flexion, c'est donc cette caractéristique qui sera vérifiée par la suite.

Question B.5 | **Relever**, dans le DT S4, la contrainte de flexion admissible $f_{m,g,k}$ en Mpa pour un bois lamellé-collé homogène de classe GL24.
DT S4
DR S1

Choix 2

Partie C : Les 2 types de bois vérifient-ils les critères des États Limites Ultimes ?

Dans cette étude, la vérification des ELU porte sur les contraintes dans la poutre.

Rappel : La contrainte maximale en flexion est :

$$\sigma_{max} = \frac{M_f}{I_{Gz}} (h/2)$$

où M_f : moment fléchissant dans la section

h : hauteur de la section

I_{Gz} : moment quadratique de la section

pour une section rectangulaire $I_{Gz} = \frac{b \cdot h^3}{12}$ où b et h sont respectivement la largeur et la hauteur de la section.

Question C.1 DT S5 DR S1	Déterminer le moment fléchissant maximal atteint dans la poutre en BLC à partir des diagrammes des moments fléchissants du DT S5.
Question C.2 DT S1 DR S1	Calculer le moment quadratique en m ⁴ de la section de la poutre en BLC, à l'aide du plan du portique du DT S1a.
Question C.3 DT S1 DR S1	Calculer la valeur de la contrainte maximale (en MPa) dans chacune des poutres (BLC et BM) en prenant $M_f = 185 \text{ kN}\cdot\text{m}$.
Question C.4 DT S1 DR S1	Conclure sur le document comparatif DR S1 en précisant si le critère des ELU est vérifié ou non pour les deux types de bois.

Partie D : Les 2 types de bois vérifient-ils les États Limites de Services ?

Dans cette étude, la vérification des ELS porte sur la flèche de la poutre. Selon l'Eurocode 5, pour des éléments structuraux supportant une toiture, on doit toujours vérifier que $f_{max} \leq \frac{l}{250}$ où l est la portée de la poutre.

Question D.1 DT S1 DR S1	Déterminer , à l'aide du plan du portique du DT S1a, la portée à prendre en compte. Calculer la flèche admissible selon l'Eurocode 5 pour le portique en BLC.
--------------------------------	--

Les simulations numériques ont permis d'obtenir les déformées et les flèches en tout point des portiques (voir DT S6)

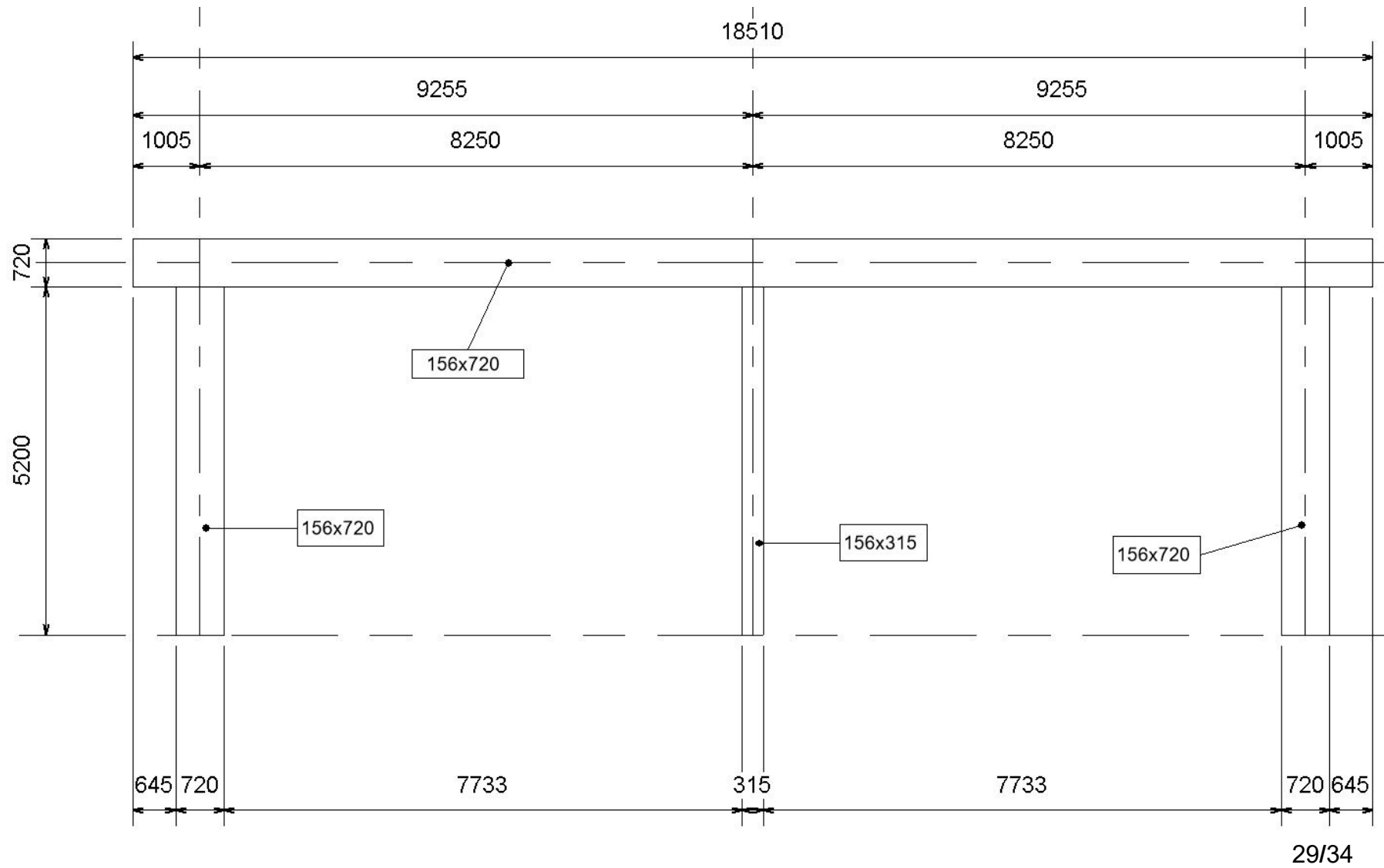
Question D.2 DT S6 DR S1	Déterminer , d'après les résultats du DT S6, la flèche maximale de la poutre en BLC. Conclure sur le document comparatif DR S1 en précisant si le critère des ELS est vérifié ou non pour les deux types de bois.
--------------------------------	--

Question D.3 DR S1	Choisir la solution la plus adaptée pour le portique en prenant en compte les critères environnementaux et réglementaires, en utilisant les résultats obtenus dans le DR S1.
-----------------------	---

Question D.4 DT S7	Argumenter sur la difficulté de réaliser une poutre en bois massif en vous basant sur les résultats donnés dans le DT S7 qui donne des valeurs moyennes de caractéristiques des arbres.
-----------------------	--

Question D.5	Conclure en justifiant sur la pertinence de l'utilisation du bois lamellé-collé pour la poutre du portique.
--------------	--

DT S1b : Vue en élévation du portique en bois massif



DT S2 : Énergie grise des principaux matériaux de construction

Matériaux	c_{EP} énergie grise kWh/ m ³	Densité tonne/m ³
structure, façade		
béton	550	2,4
béton armé	850	2,9
parpaing	650	2,4
béton cellulaire	600	0,6
brique, terres cuites	800	1
bois naturel (charpente, bardages)	500	0,5
bois lamellé-collé	1 250	0,5
panneaux bois reconstitué	2 450	0,7
acier, charpentes métalliques	63 200	7,9
aluminium	135 000	2,7
autres métaux non ferreux (Cuivre, Zinc), alliages	160 000	8
fibrociment	5 400	1,8
isolants		
isolant à base de produits végétaux, cellulose	100	0,06
verre cellulaire	750	0,10
isolant laine de roche	600	0,10
isolant laine de verre	400	0,03
isolant plastique alvéolaire	550	0,02
revêtements sols, murs, plafonds		
sols souples plastiques, moquettes	26 000	1,3
sols souples linoléum	13 000	1,3
sols durs (céramique, pierre reconstituée)	7 600	1,9
parquets	2 100	0,7
résines (de béton, de sol)	20 000	1
peintures	12 000	1
cloisons, faux plafonds	700	0,2
étanchéité membrane EPDM, PVC	22 500	0,9
enrobés, asphalte coulé	2 300	2,3

DT S3 : Cartouche des plans de charpente

ARCHE DES PETITES BETES

PARC ZOOLOGIQUE

THOIRY (78)

hypothèses de calcul

CHARGES et SURCHARGES			
Vegetalisation :	= 175	Kg/m ²	NETGE : .35
Couverture :	= 18	Kg/m ²	ZONE : 14
			ALT : 200
			VENT : 60
Plafonds :	= 15	Kg/m ²	ZONE : 2
Divers :	= 10	Kg/m ²	SITE : Normal

MATERIAUX			
BOIS LAMELLE COLLE (LC) GL24			
Bois : Epicéa	H = 12% +/- 5%	Collage : Polyuréthane - Résorcine	
Traitement : Classe II		Finition : EXO 2000 "Chêne doré"	
BOIS MASSIF (BM) C22			
Bois : Sapin de pays ou Epicéa	H = 12% +/- 5%		
Traitement : Classe II		Finition : EXO 2000 "Chêne doré"	
ACIERS : E24 galvanisation à chaud			BETONS : B25

DT S4 : Valeurs caractéristiques (d'après Eurocode 5)

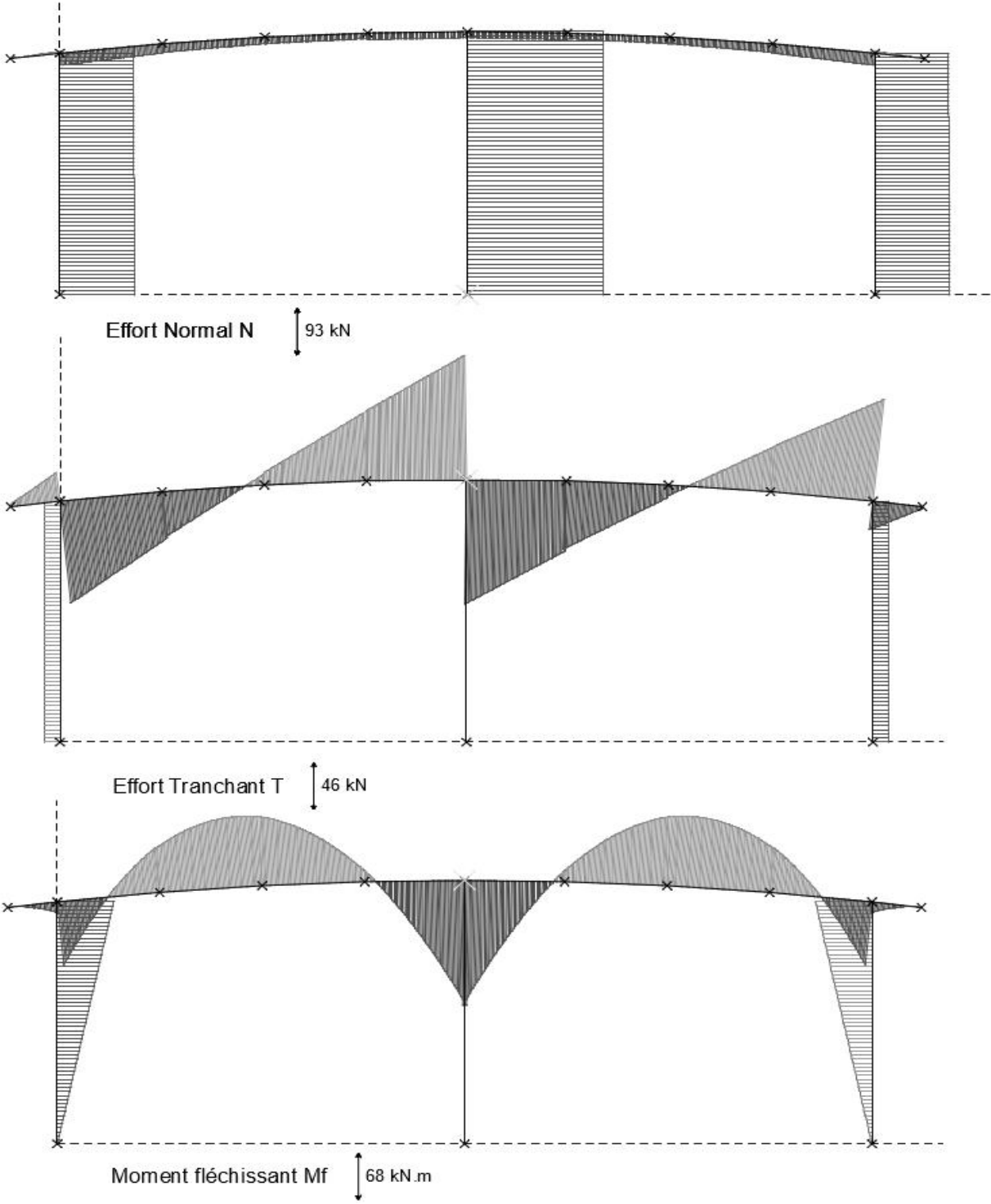
Symbole	Désignation	Unité	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
$f_{m,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	14	16	18	22	24	27	30	35	40
$f_{t,0,k}$	Contrainte de traction axiale	N/mm ²	8	10	11	13	14	16	18	21	24
$f_{t,90,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire	N/mm ²	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
$f_{c,0,k}$	Contrainte de compression axiale	N/mm ²	16	17	18	20	21	22	23	25	26
$f_{c,90,k}$	Contrainte de compression perpendiculaire	N/mm ²	2,0	2,2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
$f_{v,k}$	Contrainte de cisaillement	N/mm ²	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8
$E_{0,mean}$	Module moyen axial	kN/mm ²	7	8	9	10	11	11,5	12	13	14
$E_{0,05}$	Module axial au 5 ^e pourcentile	kN/mm ²	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4
$E_{90,mean}$	Module moyen transversal	kN/mm ²	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47
G_{mean}	Module de cisaillement	kN/mm ²	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88
ρ_k	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	290	310	320	340	350	370	380	400	420
ρ_{mean}	Masse volumique moyenne	kg/m ³	350	370	380	410	420	450	460	480	500

Tableau 1: Valeurs caractéristiques des bois massifs résineux

Symbole	Désignation	Unité	Lamellés-collés homogènes				Lamellés-collés panachés			
			GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
$f_{m,g,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	24	28	32	36	24	28	32	36
$f_{t,0,g,k}$	Contrainte de traction axiale	N/mm ²	16,5	19,5	22,5	26,0	14,0	16,5	19,5	22,5
$f_{t,90,g,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire	N/mm ²	0,40	0,45	0,50	0,60	0,35	0,40	0,45	0,50
$f_{c,0,g,k}$	Contrainte de compression axiale	N/mm ²	24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
$f_{c,90,g,k}$	Contrainte de compression perpendiculaire	N/mm ²	2,7	3,0	3,3	3,6	2,4	2,7	3,0	3,3
$f_{v,g,k}$	Contrainte de cisaillement	N/mm ²	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8
$E_{0,g,mean}$	Module moyen axial	kN/mm ²	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
$E_{0,g,05}$	Module axial au 5 ^e pourcentile	kN/mm ²	9,4	10,2	11,1	11,9	9,4	10,2	11,1	11,9
$E_{90,g,mean}$	Module moyen transversal	kN/mm ²	0,39	0,42	0,46	0,49	0,32	0,39	0,42	0,46
$G_{g,mean}$	Module de cisaillement	kN/mm ²	0,75	0,78	0,85	0,91	0,59	0,72	0,78	0,85
$\rho_{g,k}$	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	380	410	430	450	350	380	410	430

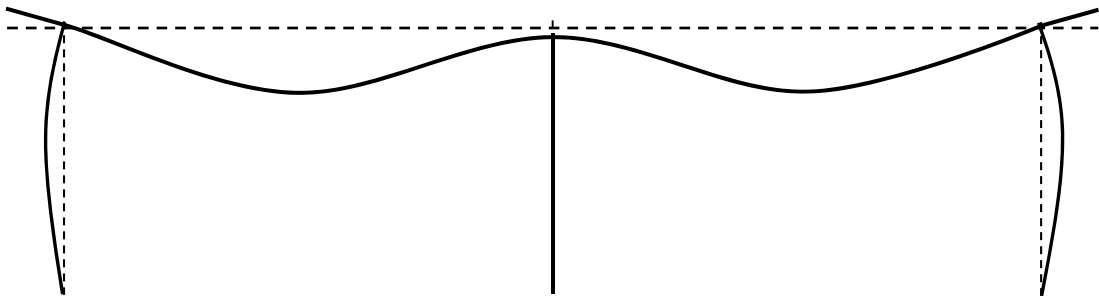
Tableau 2: Valeurs caractéristiques des bois lamellés-collés

DT S5 : Diagrammes d'efforts de cohésion dans le portique en BLC

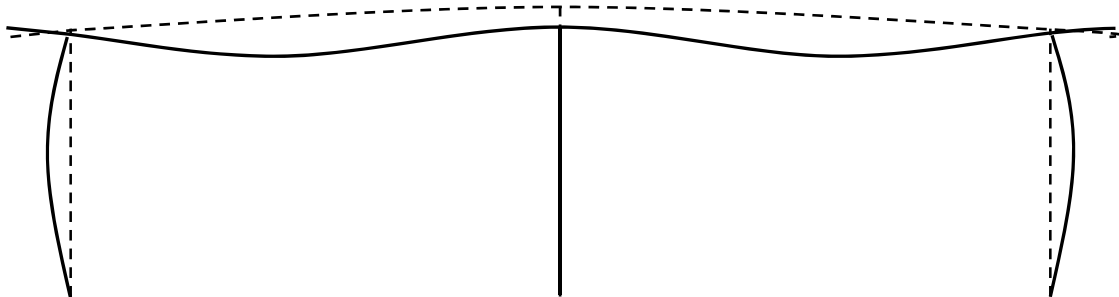


DT S6 : Déformées des portiques

Déformée portique BM



Déformée portique BLC



Les déformations sont accentuées pour faciliter la lecture. (Échelle : \updownarrow 10 mm)

DT S7 : Taille des arbres

Arbres	Port/Houppier	Croissance	Taille à 10/20 ans	Largeur	Durée de vie
Douglas	conique	rapide	5/18 m	3m	600ans
Pin maritime	irrégulier	rapide	6/13 m	5m	600ans
Pin sylvestre	irrégulier	rapide	5/13 m	3m	300ans
Sapin blanc	conique	rapide	-/10 m	-	800ans
Cèdre du Liban	étagé	lente	-/9m	-	300ans
Épicéa	conique	rapide	6/13 m	3m	200ans
Mélèze	conique	rapide	6/15 m	3m	800ans

DOCUMENT RÉPONSE DR S1 Comparatif Bois Lamellé-collé / Bois Massif

	Unités	BLC	BM
QA.2 : volume poutre	m ³	2,265	
QA.3 : énergie grise matériau	kWh·m ⁻³		500
QA.3 : énergie grise poutre	kWh		1039,5
QB.1 : essence utilisée			Sapin ou Épicéa
QB.1 : classe de résistance			C22
QB.2 : module d'élasticité	MPa		10000
QB.2 : masse volumique	kg·m ⁻³		340
QB.3 : poids propre poutre	daN		706,9
QB.3 : charge linéique	daN·m ⁻¹		38,2
QB.5 : contrainte admissible	MPa		22
QC.1 : moment fléchissant maximal	kN·m		190
QC.2 : moment quadratique	m ⁴		4,852.10 ⁻³
QC.3 : contrainte maximale	MPa		
QC.4 : ELU vérifiés ?			
QD.1 : portée	m		8,25
QD.1 : flèche admissible	mm		33
QD.2 : flèche maximale	mm		9,1
QD.2 : ELS vérifiés ?			