

SESSION 2022

AGREGATION CONCOURS EXTERNE

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Options : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique**

ANALYSE ET EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE D'UN SYSTÈME PLURITECHNOLOGIQUE

Durée : 6 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

Option : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1414A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1415A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1416A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1417A	101	7175

Ce sujet comporte :

- le sujet et le travail demandé (pages 1 à 30) ;
- les documents techniques (pages 31 à 35) ;
- les documents réponses DR1, DR2 et DR3.

Impression 3D appliquée à la construction d'une maison - de l'étude à la réalisation

Ce sujet porte sur la construction d'un habitat social dans la ville de Nantes par impression 3D multi-matériaux. Cette impression 3D est réalisée à l'aide d'un dispositif de fabrication additive robotisée conçue et brevetée par la société Batiprint3D^(TM) et par l'Université de Nantes. Cette technologie innovante a été mise en oeuvre pour la première fois lors de la construction d'un prototype de maison nommée «Yhnova^(TM)».



Figure 1 - Maison «Yhnova^(TM) » terminée.

D'une surface de 95 m² et d'un coût de 195 000 euros HT intégrant les coûts de développement spécifiques, la maison Yhnova^(TM) est une maison moderne dotée de multiples capteurs et équipements de domotique. Ces capteurs ont permis d'évaluer et d'analyser le comportement des matériaux ainsi que la qualité thermique et acoustique du bâtiment durant la 1^{ère} année de mise en service. À l'issue de cette période de tests, la maison a été louée à une famille sélectionnée par la Commission d'Attribution de Logement de Nantes Métropole Habitat selon les critères habituels du logement social.

CONTEXTE

L'impression 3D de bâtiments est à l'heure actuelle un domaine en pleine expansion et très concurrentiel. Cette solution technique innovante permet à l'architecte d'individualiser chaque demande, notamment pour des formes courbes et ainsi intégrer les constructions dans des projets novateurs de villes intelligentes. Cette technologie réduit aussi les temps de construction. C'est également une nouvelle vision qui se dessine, une nouvelle façon de travailler, de réfléchir et de construire : davantage de numérique à l'aide de la maquette de l'habitat ou Building Information Model (BIM), plus de travail collaboratif, une construction moins énergivore (meilleures performances énergétiques) avec un impact carbone réduit (matériaux bruts, réduction des déchets et des transports) et faite de façon plus rapide et plus maîtrisée (en temps, ressources et coût).

Pour le bailleur social Nantes Métropole Habitat, le projet, situé dans le quartier de la Bottière à Nantes, devait répondre à un certain nombre d'exigences indiquées sur le document technique DT1.

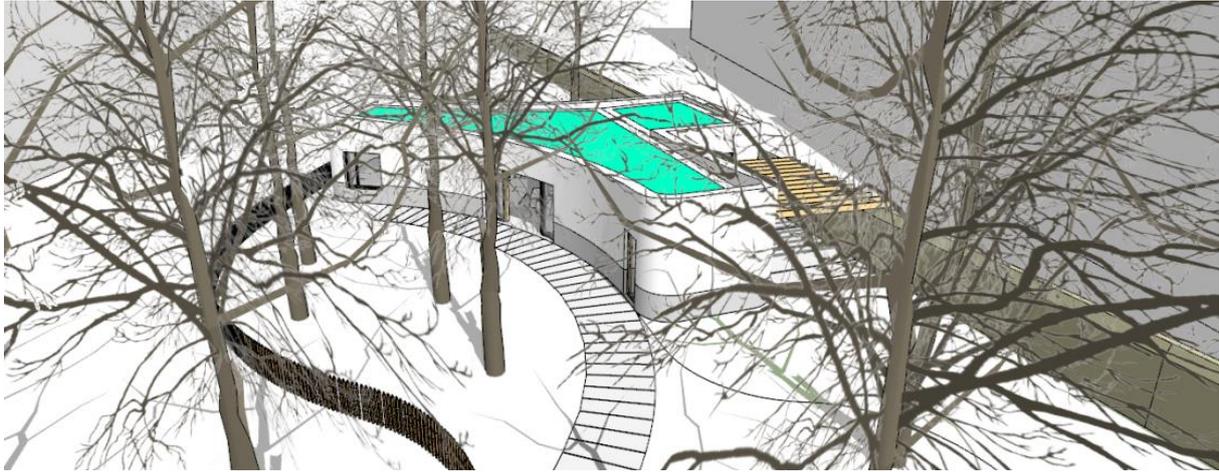


Figure 2 - Vue de la maison Yhnova^(TM) par le cabinet TICA Architecture.

PRINCIPE DE FABRICATION ET IMPRESSION 3D

La fabrication de la maison suit différentes phases (figure 3).

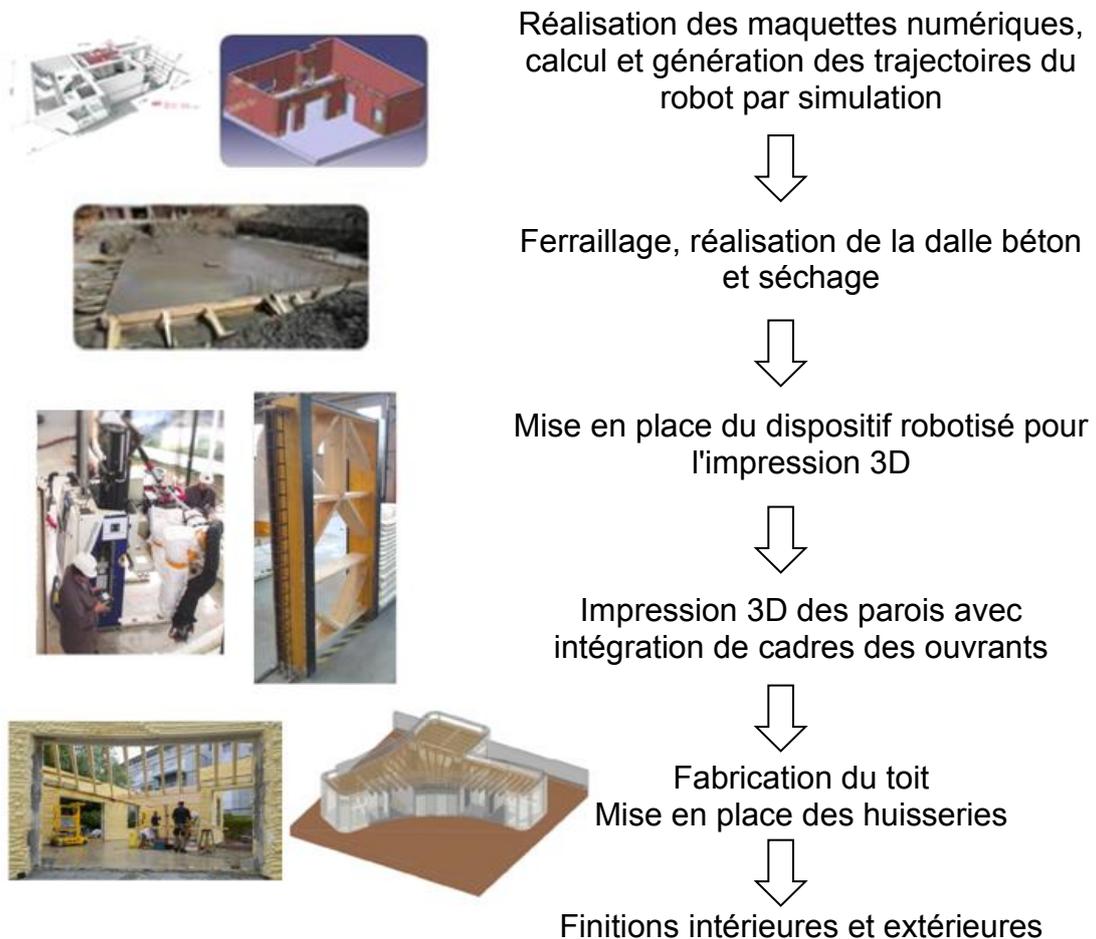


Figure 3 - Principales étapes de fabrication de la maison Yhnova^(TM).

Les fondations et la dalle sont réalisées de façon classique. Après le délai de séchage de la dalle, le dispositif robotisé est mis en place et imprime toutes les élévations de la maison en s'adaptant aux ouvrants prévus.

Lors du processus de fabrication des murs (figure 4), le robot accompagné de ses 2 opérateurs, a imprimé 51 m de murs linéaires de la maison sur une hauteur allant de 3,34 m à 3,72 m, en 54 heures. Après ce temps d'impression, se rajoutent ceux de la construction de la charpente, de la pose de la toiture et des huisseries ainsi que les finitions intérieures et extérieures.



Figure 4 - Robot en phase d'impression du mur.

Le sujet se focalise principalement sur les murs de la maison et le robot d'impression 3D utilisé pour les élévations de ces murs. Les différentes parties indépendantes de ce sujet proposent de vérifier plusieurs des exigences du cahier des charges de la maison (documents techniques DT1 et DT2) puis celles du robot d'impression (document technique DT3)

- 1.20.3.1 « utiliser une technique d'impression multi-matériaux à fonctionnalité évolutive » ;
- 1.20.3.1.1 « élever avec précision les murs » ;
- 100.10 « respecter la réglementation thermique RT2012 » ;
- 100.20 « respecter les caractéristiques dimensionnelles » ;
- 100.30.1 « respecter les caractéristiques d'une strate en mousse » ;
- 100.30.2 « respecter les caractéristiques du béton autoplaçant » ;
- 1.2 « déplacer les buses de dépose de la mousse ou du béton pour suivre une trajectoire définie » ;
- 1.1.1 « se repérer dans l'espace avec précision ».

Bien que les différentes parties soient indépendantes, il est conseillé de traiter ce sujet dans l'ordre.

Une conclusion générale sur ce projet sera enfin demandée.

PARTIE 1 - Mise en évidence de l'intérêt de la technique d'impression 3D et définition de conditions de mise en œuvre sur le chantier

L'objectif de cette partie est d'analyser l'environnement de l'étude et de mettre en évidence l'intérêt d'une technique d'impression à fonctionnalité évolutive sur ce projet de construction afin de valider l'exigence 1.20.3.1.

Le procédé Batiprint3DTM utilisé pour la réalisation des murs de la maison YhnovaTM est un procédé dit « de fabrication additive grande dimension à fonctionnalité évolutive ». Il est basé sur la dépose de deux matières « liquides » durcissantes en trois couches latérales. Les deux couches extérieures sont réalisées en mousse expansive polyuréthane (PU) à prise très rapide. La couche intérieure est obtenue à l'aide d'un béton autoplaçant. La couche intérieure, coulée entre les couches de polyuréthane, sert de structure porteuse pour le bâtiment (figure 5).

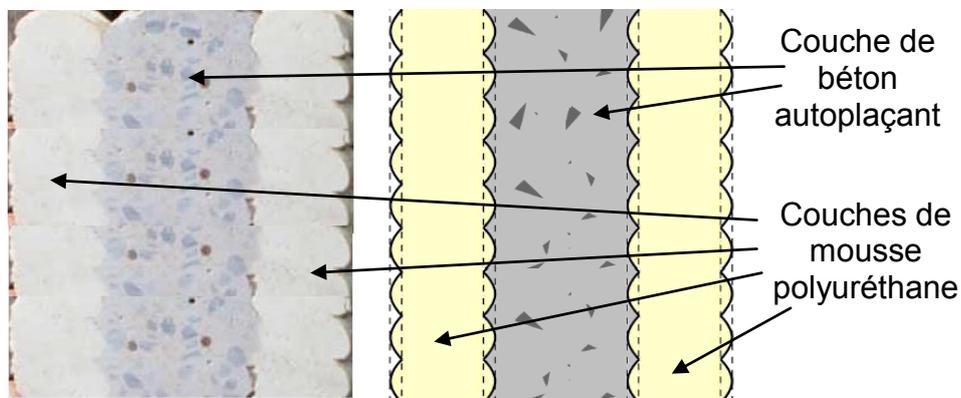


Figure 5 - Coupe transversale du mur (mur réel à gauche et sa schématisation à droite).

Question 1 : Indiquer les deux fonctionnalités de la mousse de polyuréthane au cours du temps. Justifier l'utilisation du terme « impression à fonctionnalité évolutive ».

La réalisation des murs de la maison YhnovaTM est exécutée à l'aide d'un dispositif d'impression robotisé (documents techniques DT3) principalement constitué :

- d'un robot mobile autoguidé (AGV), préprogrammé, géolocalisé sur la dalle de la maison et qui se déplace de façon autonome suivant des trajectoires enregistrées au préalable (pas de guidage humain) ;
- d'un bras poly articulé à 6 axes de rotation porté par l'AGV et équipé des buses de dépôt ;
- d'un système de positionnement par laser (LIDAR), nécessitant l'installation de 14 mires de repérages positionnées par un géomètre sur le pourtour de la dalle ;
- de 2 effecteurs de dépose, changés manuellement par l'opérateur, comprenant les différents tuyaux/buses pour réaliser l'impression des 3 couches de matériaux (polyuréthane / béton / polyuréthane).

La stratégie choisie pour imprimer les 51 m linéaires de mur est de positionner l'ensemble robotique à des lieux réguliers d'impression (stations), par le déplacement de l'AGV, puis d'imprimer de manière précise à partir de ces stations grâce au bras poly articulé. Le nombre de stations et leur position sont déterminés en fonction du rayon d'action du bras poly articulé, d'un calcul d'optimisation des trajectoires permettant de limiter les déplacements de l'AGV coûteux en temps et de l'accessibilité de l'AGV. Ce processus est appliqué à la maison YhnovaTM.

La figure 6 représente les murs de la maison en vue de dessus avec les stations réellement choisies pour l'impression des murs. Les zones encadrées représentent les rayons d'action du bras poly articulé.

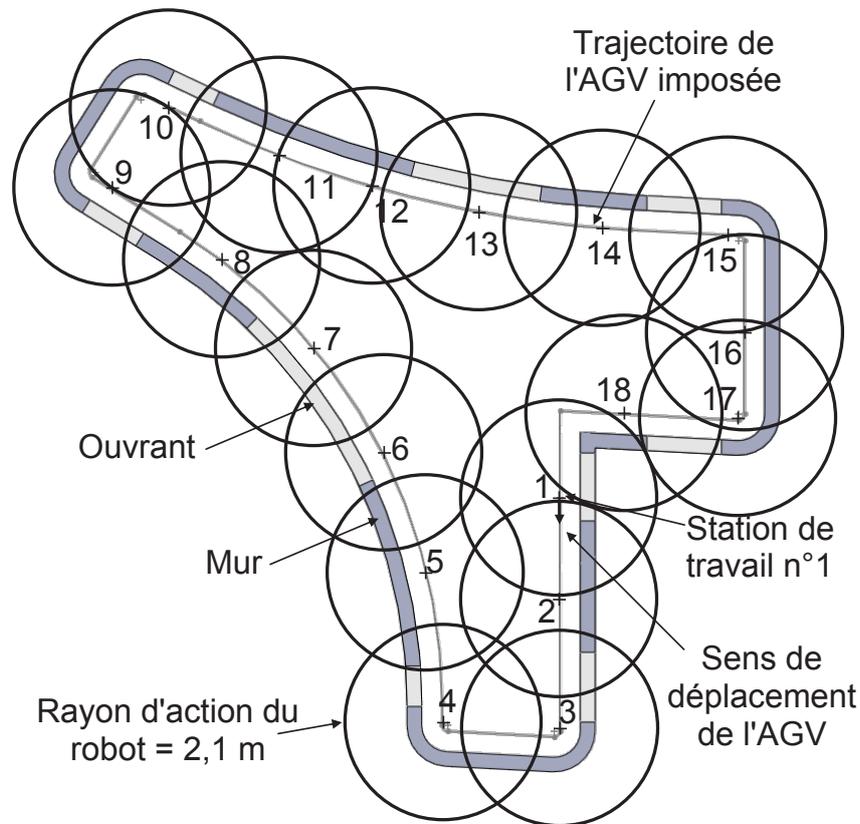


Figure 6 - Murs de la maison en vue de dessus, trajectoire de l'AGV et stations de travail réellement choisies pour l'impression des murs.

Question 2 : Sachant que le robot peut imprimer au maximum 4 m linéaires de mur lorsqu'il est sur une position de travail, déterminer le nombre minimal de stations de travail nécessaire afin de couler les 51 m linéaires de mur. Puis, à l'aide de la figure 6, indiquer le nombre de stations réellement retenues par le fabricant pour l'impression des murs et préciser deux causes justifiant l'intérêt de ce choix par rapport au nombre minimal de stations précédemment calculé.

Question 3 : Pour chacun des trois piliers du développement durable, donner un avantage de la construction par impression 3D vis-à-vis d'une construction classique.

PARTIE 2 - Étude du procédé technique de fabrication additive pour l'élévation des murs de la maison Yhnova^(TM) et définition des conditions de mise en oeuvre sur le chantier pour la station de travail n°2

Les objectifs de cette partie sont :

- de valider le principe de fabrication retenu pour l'élévation des murs (exigences 1.20.3.1.1 « élever avec précision les murs », 100.20 « respecter les caractéristiques dimensionnelles » et 100.20.1 « respecter les caractéristiques liées à la fabrication du mur ») ;
- de définir les conditions de mise en oeuvre à imposer lors des phases opérationnelles sur le chantier (exigences 100.30.2 « respecter les caractéristiques du béton autoplaçant » et 100.30.1 « respecter les caractéristiques d'une strate en mousse PU »).

L'ensemble de l'étude sur cette partie est mené sur la station de travail n°2 de la maison Yhnova^(TM) du circuit de dépôt (figure 6).

Le procédé d'impression Batiprint3D^(TM), expliqué précédemment, dépose en premier lieu deux couches extérieures en polyuréthane, qui sont disposées en n strates afin de réaliser un coffrage (figure 7).

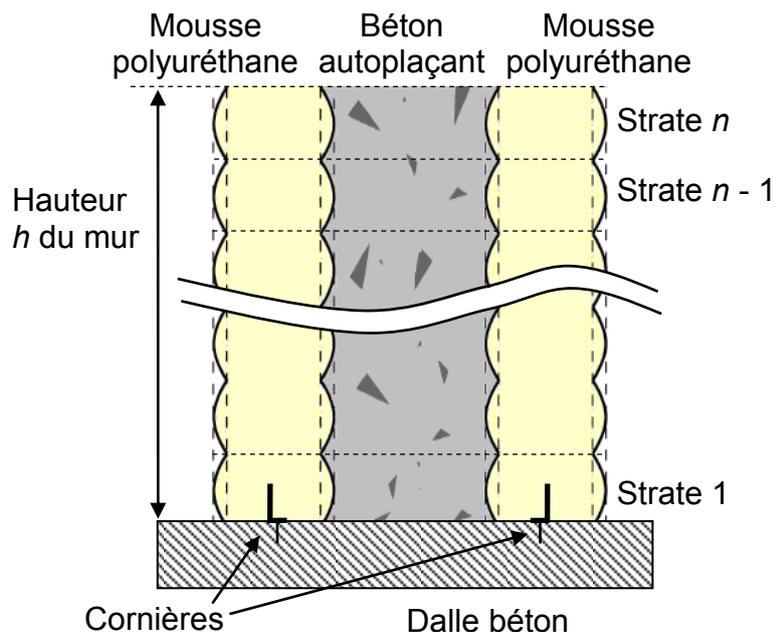


Figure 7 - Coupe transversale schématique de la paroi de mur de la maison Yhnova^(TM).

2.1. Réalisation du coffrage en mousse polyuréthane

La mousse polyuréthane est déposée à l'aide d'une tête de dépose robotisée qui se déplace selon une loi préprogrammée. La première strate de mousse est coulée sur des cornières ajourées. Ces cornières sont espacées de d mm et fixées sur l'axe médian de chaque paroi de coffrage à la dalle béton. Elles permettent d'assurer une bonne cohésion avec la dalle et d'éviter les décollements de la mousse du fait des contraintes de traction qui apparaissent au moment du durcissement (figure 8).

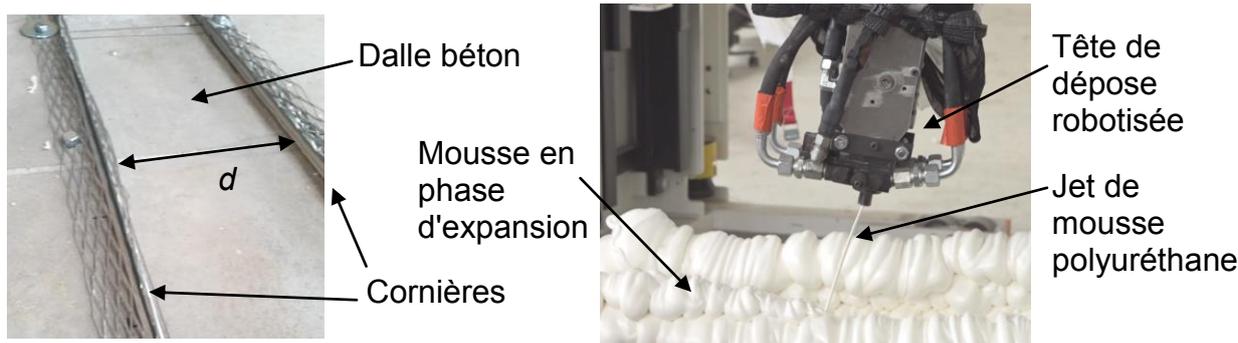


Figure 8 - Cornières utilisées pour la jonction mur dalle béton et tête de dépôt.

L'expansion de la mousse après projection s'effectue en 3 secondes et son durcissement en surface a lieu pendant le déplacement du robot en temps masqué. Une fois durcie, la strate doit avoir une épaisseur e_s de 80 mm, une épaisseur avec bourrelet e_{max} de 110 mm et une hauteur h_s de 54 mm (figure 9).

Les strates de mousse suivantes sont toujours déposées après le durcissement de la couche inférieure. Le coffrage du mur est obtenu au bout de n couches déposées sur une hauteur h . La couche de béton d'épaisseur e_b est coulée entre les deux couches de coffrage. Le mur fini a pour hauteur h et pour épaisseur, hors bourrelets extérieurs, e (figure 9).

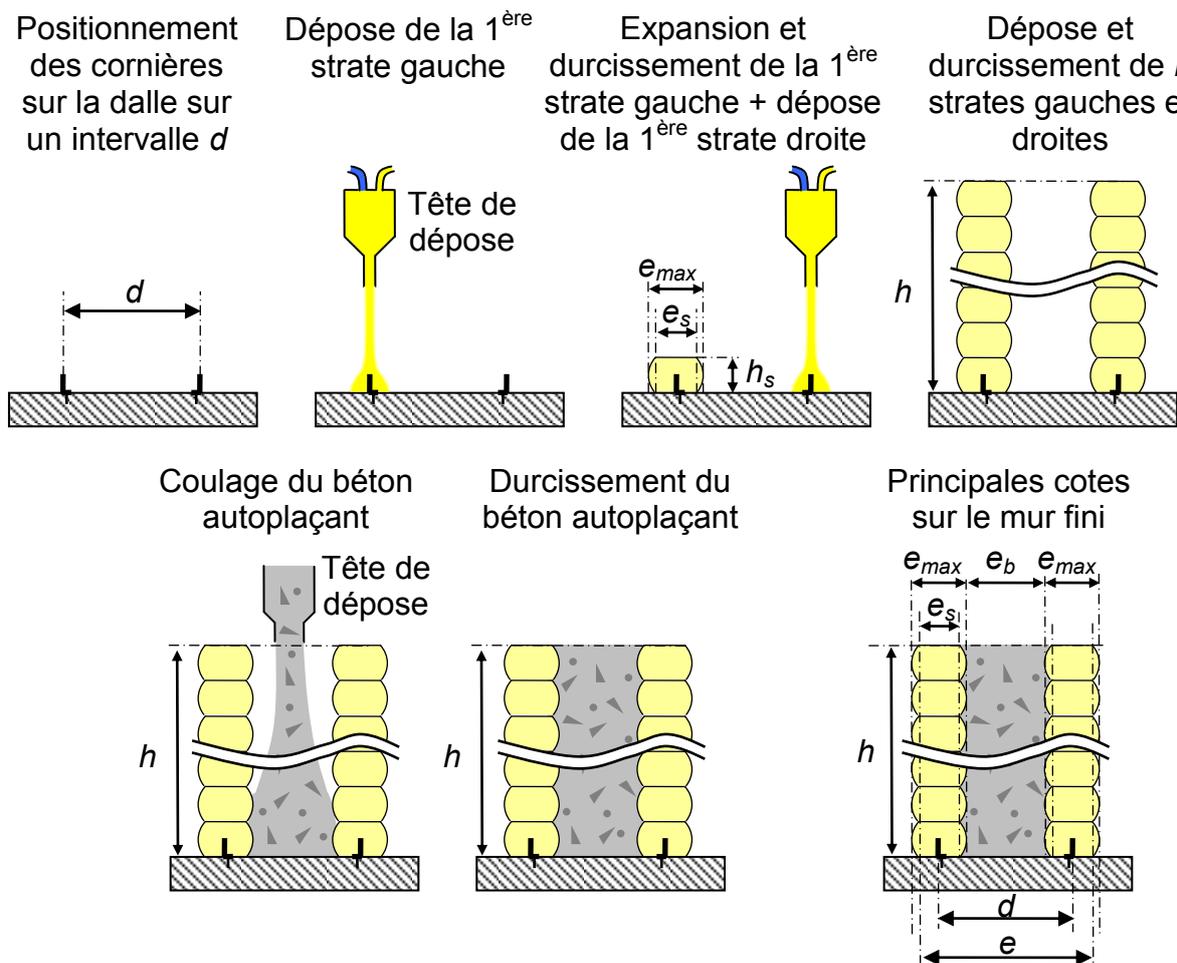


Figure 9 - Vue schématique transversale des principales étapes de réalisation du mur.

Question 4 : Déterminer l'expression de l'épaisseur e_b de la couche de béton autoplaçant en fonction de e , e_{max} et e_s ainsi que celle de l'espacement d en fonction de e et e_s permettant d'obtenir l'épaisseur e de mur spécifiée dans les exigences 100.20 et 100.30.1 du document technique DT2. Réaliser les applications numériques.

Les surfaces des parois de coffrage, une fois réalisées, doivent vérifier des conditions de planéité et d'épaisseurs imposées par le cahier des charges. Les valeurs de ces deux paramètres dépendent principalement de la vitesse d'avance V_a de la tête de dépose robotisée. Plusieurs essais ont été réalisés en laboratoire pour plusieurs valeurs de vitesse d'avance V_a . Chaque paroi obtenue a été scannée à l'aide d'un scanner 3D sur un échantillon d'une dimension de 350 x 350 mm² (figure 10) prélevée sur un mur de plus grande dimension afin d'assurer la représentativité de la mesure. La synthèse des essais est donnée figure 11.

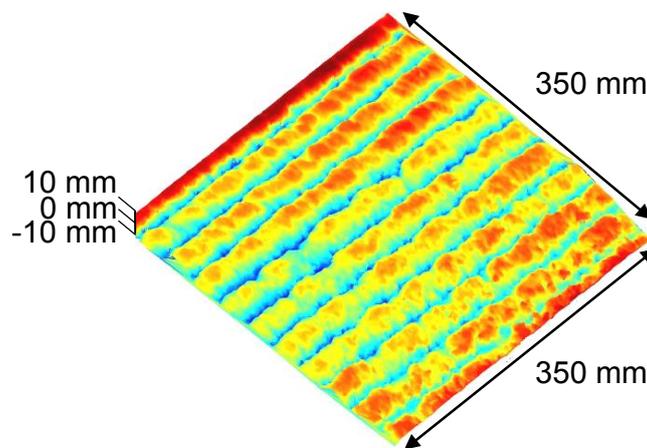


Figure 10 - Exemple d'image de la surface de mousse de polyuréthane obtenue par scanner 3D.

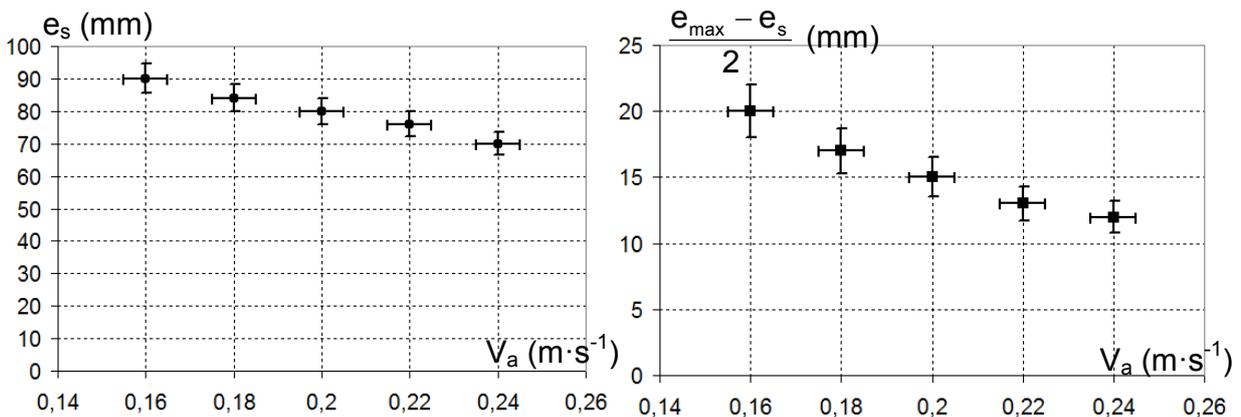


Figure 11 - Epaisseur mesurée de la couche polyuréthane et des bourrelets sur les surfaces scannées en fonction de la vitesse d'avance de la tête de dépose.

Question 5 : Déterminer la vitesse d'avance V_a permettant de garantir en moyenne les épaisseurs e_s et e_{max} du cahier des charges.

Question 6 : Déterminer le nombre de strates de polyuréthane nécessaires afin de réaliser la hauteur h de mur spécifiée dans l'exigence 100.20 pour la station de travail n°2. Estimer la durée nécessaire pour monter la hauteur h du coffrage de polyuréthane sur la longueur L spécifiée dans l'exigence 100.20 pour la station de travail n°2.

2.2. Remplissage du coffrage avec le béton autoplaçant

Le béton utilisé est autoplaçant afin de permettre le remplissage du coffrage avec une surface plane horizontale. Il est pompé de la toupie de livraison jusqu'à l'effecteur de dépôt béton. Il est d'abord acheminé à la sortie de la toupie par une pompe automatisée et contrôlée à distance. Ensuite, le flexible branché au refoulement de cette pompe est relié au robot d'impression dont la buse sera adaptée. Le robot détermine ainsi le lieu précis de dépôt du béton et commande la pompe en fonction des courbes et des menuiseries rencontrées.

L'ouvrabilité se définit comme l'aptitude d'un béton frais à remplir les coffrages ou les moules et à enrober convenablement les armatures. Les paramètres qui impactent l'ouvrabilité sont le ciment (type et dosage), les granulats (propreté, forme, granulométrie), l'emploi d'adjuvants (superplastifiants) et la teneur en eau du béton. Cette dernière influence directement sur le comportement du béton frais. Pour mesurer l'ouvrabilité du béton, un essai par cône d'Abrams est mené afin de vérifier sa consistance.

Les opérateurs doivent toujours vérifier que la classe du béton livré correspond à celle imposée par l'exigence 100.30.2 du cahier des charges avant de le couler dans le coffrage.

Question 7 : Donner deux avantages et deux inconvénients liés au choix de ce type de béton autoplaçant très fluide.

Deux stratégies de remplissage peuvent être envisagées pour couler le béton autoplaçant dans le coffrage : soit le remplissage se fait en continu sur l'ensemble de la hauteur du mur, soit le remplissage se fait en plusieurs fois et en plusieurs couches. Quelle que soit la stratégie retenue, il est nécessaire de vérifier que la poussée exercée par le béton sur le coffrage est conforme aux tolérances de déformation du coffrage imposées par le cahier des charges.

Hypothèses et modélisation :

- Le problème étant symétrique, l'étude ne portera que sur une seule des parois de coffrage ;
- la surface de la paroi de la station de travail n°2 de la maison Yhnova^(TM) est notée S avec $S = L \times h$ où L est la longueur de la paroi ($L = 3,6$ m) et h est la hauteur du mur ($h = 3,34$ m) ;
- le béton coulé remplit intégralement l'espace entre les 2 parois de coffrage ;
- le poids du mur polyuréthane est négligeable devant l'action mécanique du béton sur le mur ;
- le mur, compte tenu de sa longueur, est considéré comme encastré à sa base et libre de déformation ailleurs ;
- l'action mécanique du béton sur la paroi polyuréthane sera modélisée par une poussée de type hydrostatique dépendant de la hauteur de remplissage h_r (figure 12). Dans la réalité, la poussée du béton n'est pas purement hydrostatique car elle dépend normalement des propriétés rhéologiques du béton, cependant, l'action mécanique du béton sur la paroi n'est jamais supérieure à celle obtenue avec un modèle de poussée hydrostatique. Par conséquent le modèle « poussée hydrostatique » est utilisé pour le dimensionnement car il correspond au cas le plus défavorable pour le remplissage.

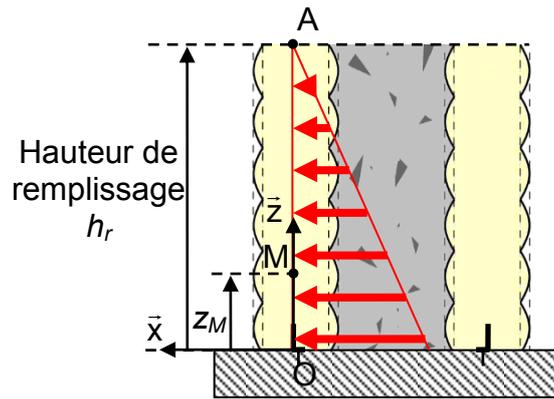


Figure 12 - Modélisation de la pression hydrostatique du béton sur la paroi polyuréthane gauche.

Sur chaque élément de surface $dS = dy \cdot dz$ situé autour d'un point M de la paroi s'exerce un effort élémentaire $d\vec{F}_{\text{béton} \rightarrow \text{paroi}} = p(M) \cdot \vec{x} \cdot dy \cdot dz$. Le point M est tel que $\vec{OM} = y_M \cdot \vec{y} + z_M \cdot \vec{z}$ avec $y_M \in \left[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}\right]$ et $z_M \in [0, h_r]$. Les lois de l'hydrostatique permettent d'écrire $p(M) = \rho_{\text{béton}} \cdot g \cdot (h_r - z_M)$ avec $\rho_{\text{béton}}$ la masse volumique du béton ($\rho_{\text{béton}} = 2\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), g l'accélération de la pesanteur ($g \approx 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) et h_r la hauteur de remplissage du béton en mètres.

La mousse de polyuréthane choisie a pour module d'Young $E = 7 \text{ MPa}$ et est capable de résister mécaniquement à une pression maximale de $50 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$

Question 8 : Déterminer la pression maximale, notée p_{maxi} , appliquée sur le mur si le béton est coulé en une seule fois. Compte tenu de l'exigence pression maximale admissible sur la paroi en pousse polyuréthane, conclure quant à la capacité du mur à résister à la pression hydrostatique si le béton est coulé en une seule fois.

Si le béton est coulé en plusieurs couches de hauteur h_r , la hauteur h_r doit être choisie de telle sorte que les critères de pression maximale admissible sur la paroi en mousse polyuréthane et de déplacement horizontal maximal admissible en tête de mur du cahier des charges soient validés.

Afin de simplifier l'approche analytique, il est choisi de travailler avec un modèle très simplifié mais qui permet d'avoir des ordres de grandeur rapides. Le mur est modélisé par une poutre plutôt qu'avec un modèle plaque et, d'autre part, le chargement est modélisé avec un modèle global de l'action mécanique du béton sur la paroi plutôt qu'une répartition de charge (figure 13).

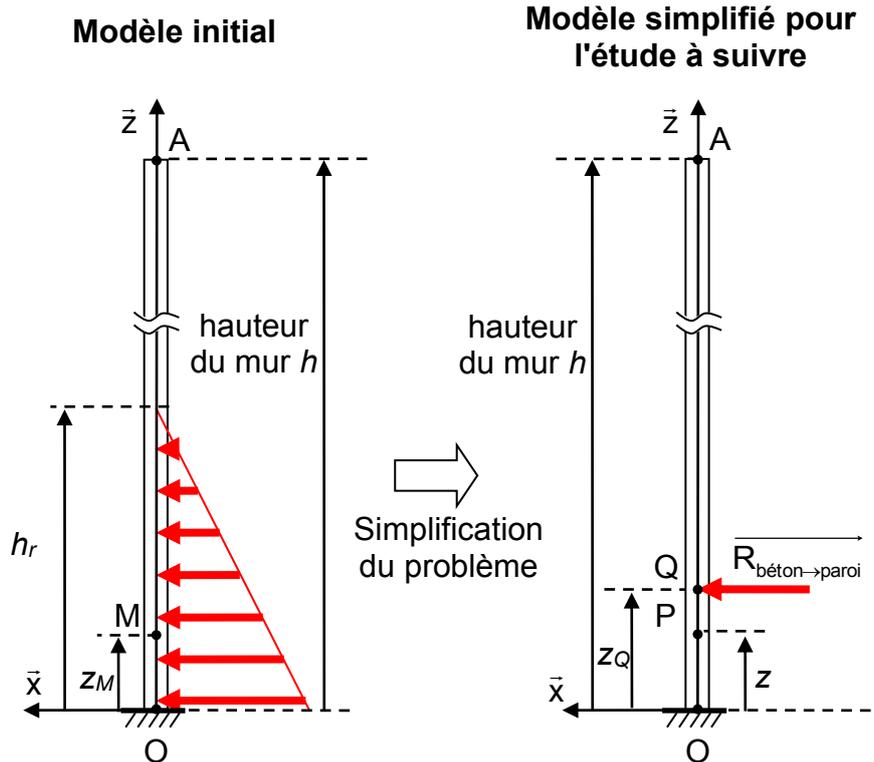


Figure 13 - Simplification du problème et modèle poutre retenu pour l'étude.

Le modèle global de l'action mécanique du béton sur la paroi est de la forme

$$\left\{ \overrightarrow{F}_{\text{béton} \rightarrow \text{paroi}} \right\}_B = \left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{R}_{\text{béton} \rightarrow \text{paroi}} = \int_{(S)} d\overrightarrow{F}_{\text{béton} \rightarrow \text{paroi}} \\ \overrightarrow{M}_{B(\text{béton} \rightarrow \text{paroi})} = \int_{(S)} \overrightarrow{BM} \wedge d\overrightarrow{F}_{\text{béton} \rightarrow \text{paroi}} \end{array} \right\} \text{ où B est un point quelconque.}$$

La poutre a pour moment quadratique suivant l'axe (P, \vec{y}) noté I_Y , avec $I_Y = 0,154 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$.

Question 9 : Déterminer la résultante $\overrightarrow{R}_{\text{béton} \rightarrow \text{paroi}}$ du torseur correspondant au modèle global de l'action mécanique du béton sur la paroi de surface S.

Question 10 : Déterminer la coordonnée z_Q du point noté Q pour lequel le moment résultant du modèle global $\overrightarrow{M}_{Q(\text{béton} \rightarrow \text{paroi})}$ est nul dans le plan (O, \vec{x}, \vec{z}) .

Question 11 : Pour le tronçon 1 défini sur $z \in [0, z_Q]$, déterminer l'expression du torseur de cohésion en P noté $\{\tau_{\text{cohésion}}\}$ et préciser l'expression de l'effort tranchant noté T_x et du moment de flexion noté M_{fy} .

Question 12 : Montrer, pour le tronçon 1, que l'équation de la déformée notée $\lambda_1(z)$ peut s'écrire sous la forme $E \cdot I_Y \cdot \lambda_1 = \frac{R_{\text{béton} \rightarrow \text{paroi}}}{6} \cdot (z_Q - z)^3 + C_1 \cdot z + C_2$.

Les constantes d'intégration dépendant des conditions aux limites sont notées C_1 et C_2 .

L'équation de la déformée pour le tronçon 2 définie sur $z \in [z_Q, h]$ est $E.I_Y \lambda_2(z) = C_3.z + C_4$ où C_3 et C_4 sont des constantes d'intégration dépendant des conditions aux limites.

Question 13 : À partir des conditions limites à préciser, déterminer l'expression des constantes d'intégration C_1, C_2, C_3 et C_4 .

Question 14 : Montrer que l'expression de la flèche en A (figure 13), notée λ_A , peut

s'écrire sous la forme : $E.I_Y \lambda_A = \frac{R_{\text{béton} \rightarrow \text{paroi}} \cdot z_Q^2}{6} \cdot (3.h - z_Q)$.

Question 15 : À partir de l'expression de la flèche en A donnée question précédente, déterminer la valeur z_Q qui permet de respecter l'exigence de déplacement horizontal en tête de mur (exigence 100.20.1). En déduire la hauteur h_r de remplissage correspondante. Vérifier que, pour cette hauteur de remplissage, le mur est capable de résister à la pression hydrostatique.

La hauteur de remplissage qui valide l'exigence de déplacement horizontal en tête de mur conduit à une pression sur la paroi très inférieure à la pression maximale admissible. Il est donc intéressant d'augmenter la hauteur de remplissage h_r . Cependant, afin de ne pas induire non plus une flèche trop importante en bout de mur liée à l'augmentation de cette hauteur de remplissage, les parois en polyuréthane ne sont pas coulées sur toute la hauteur en une seule fois. Ce choix de fabrication permet aussi d'améliorer les temps de fabrication et de séchage des éléments constituant le mur.

2.3. Vérification de la montée en température du béton pendant son hydratation

Comme le béton est coulé dans un coffrage isolant thermiquement, il existe un risque de montée en température trop important du fait de la libération de chaleur par les réactions exothermiques d'hydratation du ciment. Si la température atteinte par le béton durant sa prise est trop importante, des pathologies à plus ou moins long terme peuvent apparaître limitant la durée de vie de l'ouvrage et des enduits qu'il supporte. Afin de vérifier que cette montée en température est inférieure à la valeur imposée par l'exigence 100.30.2, des mesures préliminaires sont réalisées à l'aide d'un thermocouple de type K (chromel-alumel) relié à une centrale d'acquisition (figure 14).

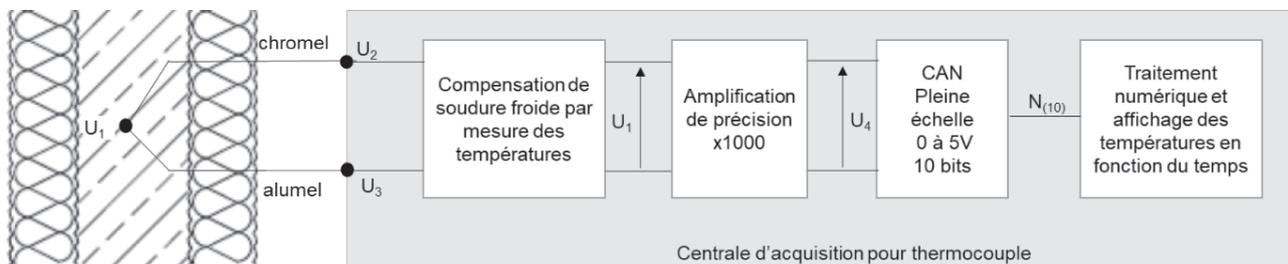


Figure 14 - Schéma du dispositif de mesure de la température du béton utilisé pour la phase de remplissage.

La force électromotrice notée U_1 en mV est considérée proportionnelle à la température T en °C dans la plage de température mesurée (figure 15). Une correction de soudure froide est opérée car la température de la soudure froide est variable. La tension U_1 en sortie de compensation est amplifiée puis codée sur 10 bits pour donner un nombre $N_{(10)}$ décimal.

La figure 16 donne l'évolution du nombre $N_{(10)}$ image de la température mesurée au cours du temps lors du remplissage du mur de la station de travail n°2 de la maison.

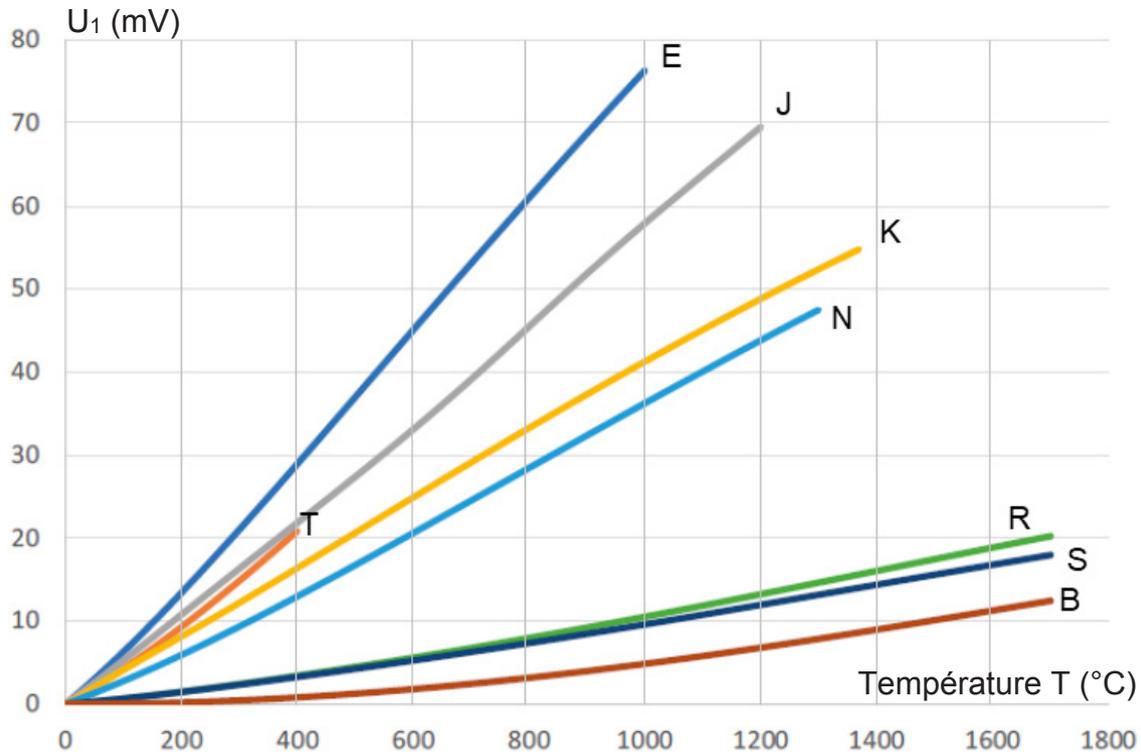


Figure 15 – Courbe U_1 en fonction de la température pour des thermocouples de type E, J, K, N, T, R, S et B.

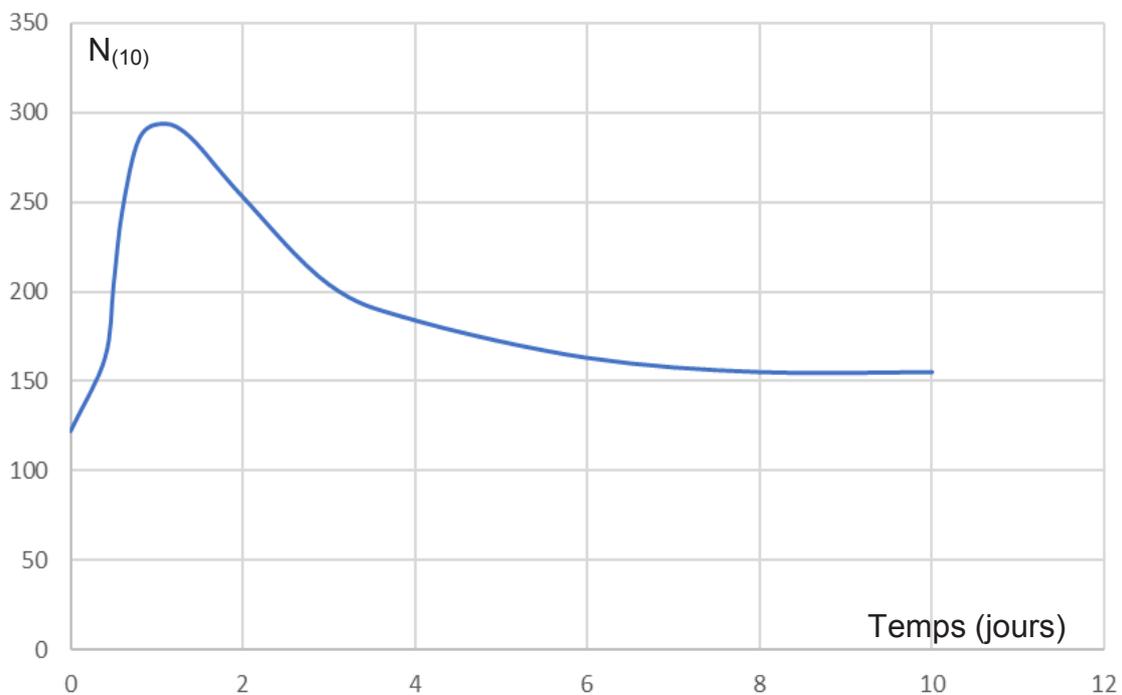


Figure 16 - Évolution du nombre $N_{(10)}$ image de la température mesurée au cours du temps lors du remplissage du mur de la station de travail n°2 de la maison.

Question 16 : Déterminer la sensibilité K_{th} en $mV \cdot ^\circ C^{-1}$ entre la tension U_1 et la température T en $^\circ C$ pour le thermocouple choisi.

Question 17 : Déterminer la température maximale atteinte par le béton lors du remplissage du mur de la station de travail n°2 de la maison. Conclure sur l'exigence 100.30.2 impactant la durée de vie du béton vis-à-vis du problème lié à l'hydratation du ciment.

2.4. Synthèse et définitions des conditions de mise en œuvre à imposer lors des phases opérationnelles sur le chantier

Le protocole de construction des murs est finalement celui-ci :

- le dispositif robotisé part de la première station de travail. Il dépose la première couche de polyuréthane du mur intérieur sur toute la longueur du poste de travail puis la première couche de polyuréthane du mur extérieur sur toute la longueur du poste de travail. 6 couches de polyuréthane sont déposées sur les 2 murs de cette façon sur la station de travail ;
- des entretoises sont ajoutées par un ouvrier entre les 2 parois toutes les 6 strates de polyuréthane (figure 17) ;
- le dispositif robotisé fait le tour complet de la maison et réalise la dépose des 6 strates pour chaque poste de travail ;
- une fois que le premier niveau des murs polyuréthane est réalisé sur tout le tour de la maison, le béton est coulé à chaque station de travail pour une hauteur de remplissage h_r qui vaut $6 \times h_s - 1$ cm de marge pour ne pas se retrouver à ras de la dernière strate de polyuréthane (figure 9) ;
- les 4 étapes précédentes sont répétées jusqu'à ce que tous les murs soient fabriqués jusqu'à la hauteur h désirée. Des mannequins en bois aux emplacements des cadres des ouvrants (portes et fenêtres) sont bien évidemment mis en place lors du processus d'impression et contournés par le dispositif robotisé.

Entretoises positionnées après chaque 6 strates de polyuréthane

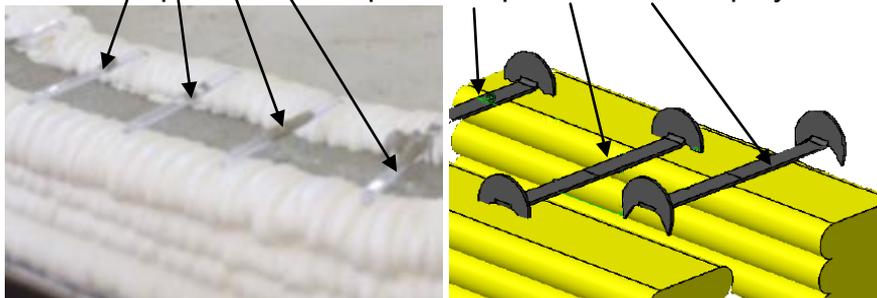


Figure 17 - Vue des entretoises de rigidification après la dépose des 6 couches de polyuréthane.

Question 18 : Sur le document réponse DR1, correspondant à la synthèse du processus de fabrication retenu pour la construction du mur d'un point de vue commande du robot, compléter les états E23, E24, E25 et E27 du super état E2 « élévation de mur ». Déterminer les conditions 1 et 2 qu'il faut imposer pour passer de l'état E24 à E25 et de l'état E24 à E23. Compléter l'action associée à l'activation de l'état E24.

PARTIE 3 - Étude du dispositif robotisé permettant la fabrication des murs de la maison YhnovaTM et validation des conditions de mise en œuvre sur le chantier pour la station de travail n°2

Les objectifs de cette partie sont, pour la station de travail n°2 :

- de vérifier que le système robotisé permet d'assurer les performances géométriques et cinématiques attendues lors de la dépose du matériau (exigence 1.2.1) ;
- de vérifier que la motorisation du système robotisé choisi est capable de supporter le surplus de masse amené par la tête de dépose placée en bout de bras afin de valider l'exigence 1.2.2 ;
- de vérifier que le robot peut se repérer dans l'espace (exigence 1.1.1).

La réalisation des murs de la maison YhnovaTM est réalisée à l'aide d'un dispositif robotisé qui permet l'automatisation du processus de dépose des matières « liquides » durcissantes composant le mur (figure 18 et document technique DT3). Celui-ci est constitué :

- d'un robot mobile de type Automatic Guided Vehicle (AGV). Ce robot est préprogrammé, géolocalisé sur la dalle de la maison et il se déplace de façon autonome suivant des trajectoires enregistrées au préalable (pas de guidage humain) ;
- d'un bras polyarticulé à 6 axes de rotation porté par l'AGV et équipé des buses de dépôt ;
- d'un système de positionnement par laser (Lidar), nécessitant l'installation de 14 mire de repérages positionnées par un géomètre sur le pourtour de la dalle ;
- de 2 effecteurs de dépose comprenant les différentes buses et tuyaux pour réaliser l'impression des 3 couches de matériaux (polyuréthane / béton / polyuréthane).

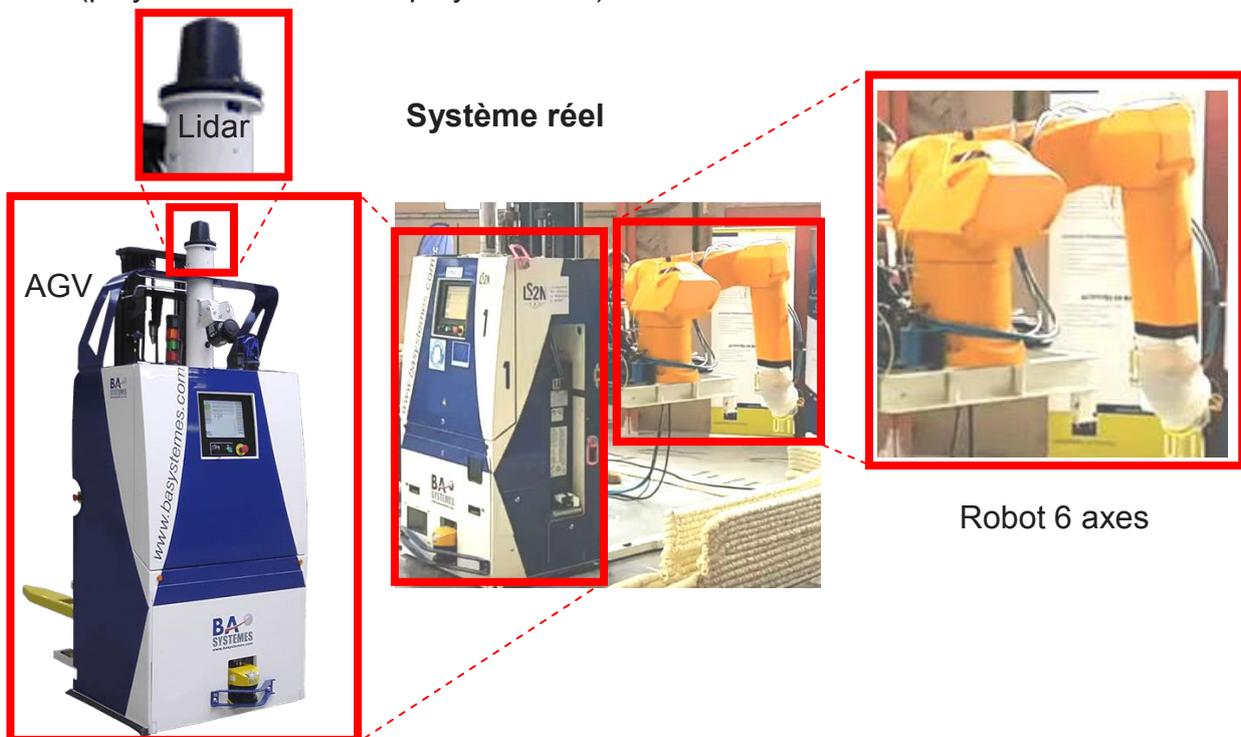


Figure 18 - Dispositif robotisé de dépose.

La figure 19 donne le modèle du bras polyarticulé lorsque le dispositif robotisé est positionné à la station de travail n°2 pour le dépôt du premier cordon de polyuréthane au sol.

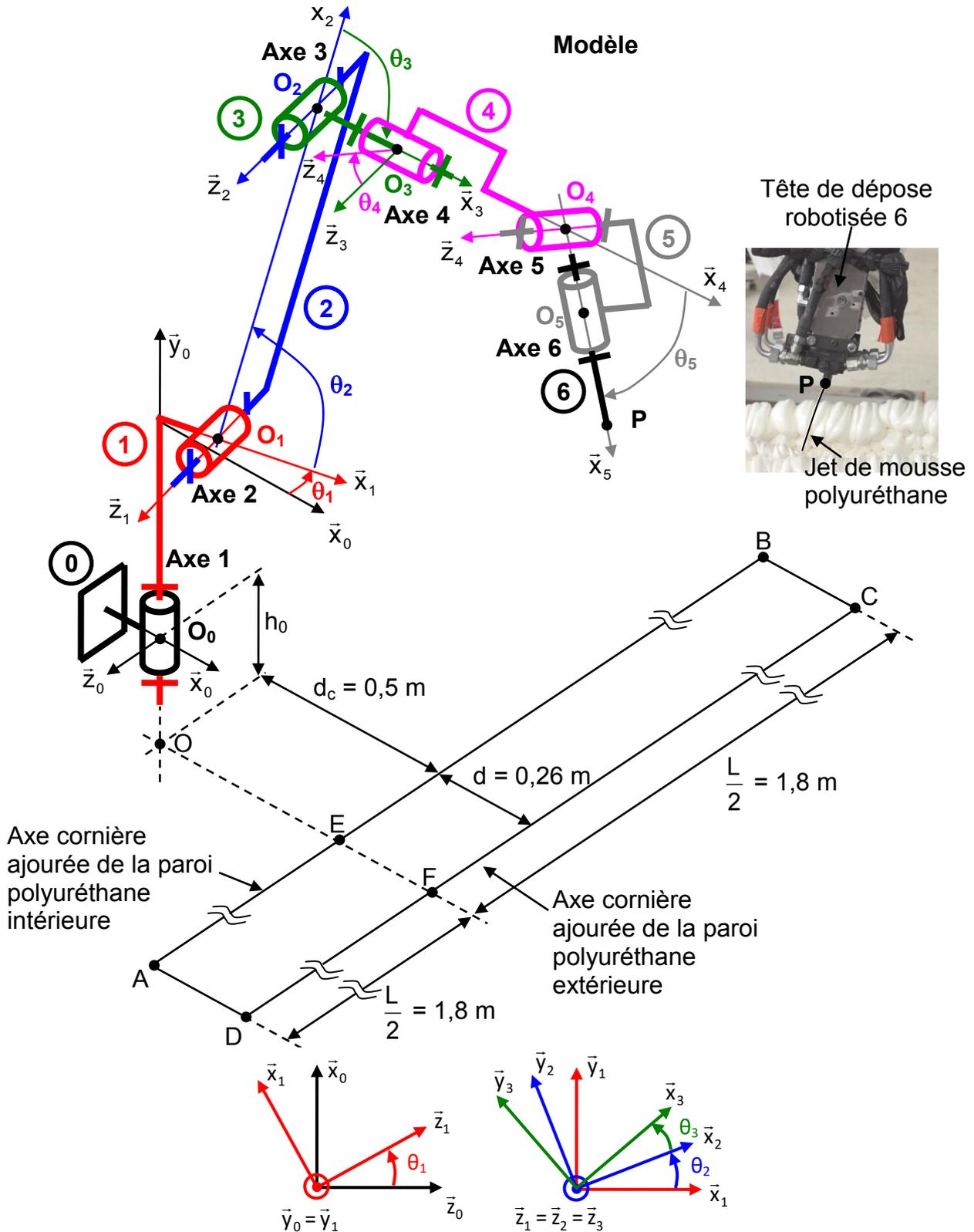


Figure 19 - Modélisation cinématique du robot 6 axes.

Hypothèses et modélisation :

- la dalle de béton au sol a toujours pour normale \vec{y}_0 ;
- le corps du robot est repéré 0 et a pour repère $R_0(O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$. Le point O_0 est à la hauteur h_0 du sol, c'est l'AGV qui permet de régler cette hauteur h_0 . L'AGV a une course qui permet de faire varier h_0 de 0 m à 4 m ;
- la liaison entre le solide 1 et le corps du robot solidaire de l'AGV est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe (O_0, \vec{y}_0) . Le repère $R_1(O_0, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ est attaché au solide 1, $\vec{O_0O_1} = a_1 \cdot \vec{x}_1 + b_1 \cdot \vec{y}_1$, avec $\theta_1 = (\vec{x}_0, \vec{x}_1)$ dans l'intervalle $-160^\circ \leq \theta_1 \leq 160^\circ$ et $\dot{\theta}_{1\text{maxi}} = 200 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$;
- la liaison entre le bras 2 et le solide 1 est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe (O_1, \vec{z}_1) . Le repère $R_2(O_1, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$ est attaché au solide 2, $\vec{O_1O_2} = a_2 \cdot \vec{x}_2$, $\theta_2 = (\vec{x}_1, \vec{x}_2)$ avec $-137,5^\circ \leq \theta_2 \leq 137,5^\circ$ et $\dot{\theta}_{2\text{maxi}} = 200 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$;
- la liaison entre l'avant-bras 3 et le bras 2 est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe (O_2, \vec{z}_2) . Le repère $R_3(O_2, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$ est attaché au solide 3, $\vec{O_2O_3} = a_3 \cdot \vec{x}_3$, $\theta_3 = (\vec{x}_2, \vec{x}_3)$ avec $-150^\circ \leq \theta_3 \leq 150^\circ$ et $\dot{\theta}_{3\text{maxi}} = 255 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$;
- la liaison entre le solide 4 et l'avant bras 3 est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe (O_3, \vec{x}_3) . Le repère $R_4(O_3, \vec{x}_4, \vec{y}_4, \vec{z}_4)$ est attaché au solide 4, $\vec{O_3O_4} = a_4 \cdot \vec{x}_4$, $\theta_4 = (\vec{z}_3, \vec{z}_4)$ avec $-270^\circ \leq \theta_4 \leq 270^\circ$ et $\dot{\theta}_{4\text{maxi}} = 315 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$;
- la liaison entre le solide 5 et le solide 4 est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe (O_4, \vec{z}_4) . Le repère $R_5(O_4, \vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$ est attaché au solide 5, $\vec{O_4O_5} = a_5 \cdot \vec{x}_5$, $\theta_5 = (\vec{x}_4, \vec{x}_5)$ avec $-105^\circ \leq \theta_5 \leq 120^\circ$ et $\dot{\theta}_{5\text{maxi}} = 360 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$;
- la liaison entre le solide 6 (sur lequel se trouve l'effecteur de dépose) et le solide 5 est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe (O_5, \vec{x}_5) . Le repère $R_6(O_5, \vec{x}_6, \vec{y}_6, \vec{z}_6)$ est attaché au solide 6. Le point P représente la buse de dépose en extrémité du bras de robot, $\vec{O_5P} = a_6 \cdot \vec{x}_6$, $\theta_6 = (\vec{y}_5, \vec{y}_6)$ avec $-270^\circ \leq \theta_6 \leq 270^\circ$ et $\dot{\theta}_{6\text{maxi}} = 870 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$.

Données dimensionnelles

$a_1 = 0,15 \text{ m}$; $b_1 = 0,55 \text{ m}$; $a_2 = 0,825 \text{ m}$; $a_3 = 0,2 \text{ m}$; $a_4 = 0,425 \text{ m}$; $a_5 = 0,11 \text{ m}$; $a_6 = 0,39 \text{ m}$.

Données massiques

Tous les solides constituant le robot sont supposés homogènes.

Solide 1	$m_1 = 90 \text{ kg}$	G_1 centre d'inertie avec $\vec{O_0G_1} = \frac{a_1}{2} \cdot \vec{x}_1 + b_1 \cdot \vec{y}_1$
Solide 2	$m_2 = 70 \text{ kg}$	G_2 centre d'inertie avec $\vec{O_1G_2} = \frac{a_2}{2} \cdot \vec{x}_2$
Solide 3	$m_3 = 20 \text{ kg}$	G_3 centre d'inertie avec $\vec{O_2G_3} = \frac{a_3}{2} \cdot \vec{x}_3$

Solide 4	$m_4 = 30 \text{ kg}$	G_4 centre d'inertie avec $\overrightarrow{O_3 G_4} = \frac{a_4}{2} \cdot \vec{x}_4$
Solide 5	$m_5 = 10 \text{ kg}$	G_5 centre d'inertie avec $\overrightarrow{O_4 G_5} = \frac{a_5}{2} \cdot \vec{x}_5$
Solide 6 (avec tête de dépose)	$m_6 = 50 \text{ kg}$	G_6 centre d'inertie avec $\overrightarrow{O_5 G_6} = \frac{a_6}{2} \cdot \vec{x}_6$

La longueur de chaque mur polyuréthane à imprimer est $L = 3,6 \text{ m}$. Les segments [AB] et [CD] représentent les cornières où le polyuréthane doit être déposé. L'écartement entre les deux cornières est $d = 0,26 \text{ m}$.

Lorsque l'AGV arrive au poste de travail n°2, il se positionne à une distance $d_c = 0,5 \text{ m}$ de l'axe de la cornière ajourée de la paroi intérieure en polyuréthane et de telle sorte que le point O soit localisé à égale distance des points A et B.

Le robot est ensuite élevé à une hauteur h_0 par l'AGV puis le robot se met en position initiale $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$, $\theta_3 = -132,2^\circ$, $\theta_4 = 0^\circ$, $\theta_5 = 0^\circ$ et $\theta_6 = 0^\circ$ ce qui permet d'aligner verticalement les points P et E. L'élévation de hauteur h_0 permet de positionner le point P à une hauteur de 0,2 m par rapport au sol. Cette hauteur de 0,2 m correspond à la distance qu'il convient de toujours respecter entre la buse de dépose et le cordon sur lequel la matière est déposée. La hauteur h_0 reste ensuite toujours constante durant la phase d'impression des 6 couches de polyuréthane d'un niveau d'une station de travail.

3.1. Validation des performances géométriques du bras polyarticulé lors de la dépose du premier cordon de polyuréthane à la station de travail n°2

L'objectif est dans un premier temps de vérifier que le système robotisé permet d'assurer les performances géométriques et cinématiques attendues lors de la dépose du matériau,

Question 19 : Sur le document réponse DR2, compléter le schéma cinématique dans le plan $(O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$ du robot lorsque ce dernier est dans sa position initiale.

Question 20 : Déterminer et calculer la hauteur h_0 permettant de garantir la distance EP verticale de 0,2 m.

Lors du dépôt du premier cordon de polyuréthane de la paroi intérieure du mur, le robot se déplace de telle sorte que le point P soit 20 mm au-dessus de la trajectoire allant du point A au point B à une vitesse constante $V_a = 0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Lors de ce mouvement, seuls les axes 1, 2 et 3 sont sollicités et les axes 4, 5 et 6 restent fixes avec $\theta_4 = 0^\circ$, $\theta_5 = 0^\circ$ et $\theta_6 = 0^\circ$.

Question 21 : Montrer que le modèle géométrique direct du robot s'écrit

$$\begin{cases} a_2 \cdot \cos \theta_2 + (a_3 + a_4 + a_5 + a_6) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) = \frac{d_c}{\cos \theta_1} - a_1 \\ a_2 \cdot \sin \theta_2 + (a_3 + a_4 + a_5 + a_6) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) = 0,2 - h_0 - b_1 \\ a_2 \cdot \cos \theta_2 + (a_3 + a_4 + a_5 + a_6) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) = \frac{d_c}{\cos \theta_1} - a_1 \end{cases}$$

Question 22 : Montrer que, lorsque le robot est en position d'impression de la première couche du polyuréthane au point A, le modèle géométrique direct conduit au système

$$\text{suivant : } \begin{cases} 0,825 \cdot \cos \theta_2 + 1,125 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) = 1,72 \\ 0,825 \cdot \sin \theta_2 + 1,125 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) = -0,76 \end{cases}$$

La résolution du système précédent permet de trouver les valeurs des angles θ_2 et θ_3 qu'il convient d'imposer pour positionner le robot au-dessus du point avant impression du premier cordon de polyuréthane. Le robot va alors déplacer le point P à vitesse d'avance constante $V_A = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ d'un point situé à une hauteur h_0 du point A jusqu'à un point situé à une hauteur h_0 du point B.

3.2. Validation des performances cinématiques du bras polyarticulé lors de la dépose du premier cordon de polyuréthane à la station de travail n°2

Question 23 : Déterminer le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_{P,6/0}}$ en considérant $\theta_4 = \text{cte} = 0^\circ$, $\theta_5 = \text{cte} = 0^\circ$ et $\theta_6 = \text{cte} = 0^\circ$.

Question 24 : Établir l'expression de la vitesse d'avance du point P notée V_A telle que $V_A = \overrightarrow{V_{P,6/0}} \cdot (-\vec{z}_0)$.

L'application numérique des expressions précédentes conduit à une valeur de la vitesse angulaire de rotation $\dot{\theta}_1$ de l'axe 1 de l'ordre de $10^\circ \cdot \text{s}^{-1}$. Cette vitesse est obtenue lors du mouvement de dépose du premier cordon de polyuréthane.

Question 25 : Conclure quant à la capacité du robot à assurer cinématiquement la dépose des cordons de polyuréthane.

3.3. Validation des performances de la motorisation du bras poly articulé lors de la dépose du premier cordon de polyuréthane à la station de travail n°2

Il convient de vérifier dans un second temps que la masse de la tête de dépose installée en bout de bras est compatible avec la motorisation du bras poly articulé. L'étude porte sur le motoréducteur, de rapport de réduction $r = \frac{1}{100}$, qui actionne l'axe 2 du robot (bras 2 par rapport au solide 1). On suppose par ailleurs qu'il n'y a aucun aspect dissipatif dans cette portion de chaîne mécanique.

Question 26 : Proposer la configuration la plus défavorable pour le dimensionnement du motoréducteur de l'axe 2 du point de vue couple nécessaire pour maintenir une position statique. Déterminer l'expression du couple C_{12} au niveau de l'axe (O_1, \vec{z}_1) en sortie de motoréducteur puis le couple C_m en sortie de moteur.

Le moteur de l'axe 2 est équipé d'un codeur optique absolu permettant d'obtenir une information de position codée sur 10 bits.

Question 27 : Déterminer la précision angulaire de rotation de l'axe 2 et calculer la précision de déplacement correspondante au bout du bras au niveau de la buse. Conclure vis-à-vis de l'exigence 1.2.1 de précision du cahier des charges.

Le motoréducteur de l'axe 2 est composé d'une machine synchrone et du réducteur de rapport r . Le contrôleur de puissance permet le contrôle des machines avec des onduleurs de tension triphasés commandés en modulation de largeur d'impulsions (fréquence de 22 kHz) afin d'obtenir un courant sinusoïdal dans les enroulements. Le couple de pertes de la machine synchrone est négligé. Les caractéristiques du moteur avec une alimentation de 240 VDC (valeur obtenue après redressement et filtrage de la tension réseau en entrée de l'onduleur) sont données dans le tableau figure 20.

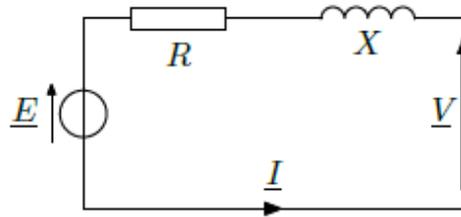
Grandeur	Unité	Valeur
Vitesse maximale sous 240VDC	tr·min ⁻¹	3 500
Couple permanent rotor à l'arrêt	N·m	35
Courant permanent rotor à l'arrêt	A	14,6
Couple nominal à 3500 tr/min	N·m	30
Couple maximal instantané	N·m	100
Constante de force électromotrice (fem) K_E	V·s·rad ⁻¹	0,8
Constante de couple K_T	N·m·A ⁻¹	2,4
Résistance d'un enroulement R	Ω	0,25
Inductance cyclique d'un enroulement L_c	mH	1,15
Nombre de pôles		8

Figure 20 : Caractéristiques nominales du moteur utilisé.

La formule permettant d'exprimer la vitesse de rotation du rotor N_m en tr·min⁻¹ de ce type de moteur à partir du nombre de paires de pôles p et de la fréquence f des courants statoriques est $N_m = \frac{f \cdot 60}{p}$. Le couple moteur C_m est lié à la constante de couple K_T par la relation $C_m = K_T \cdot I$ où I correspond à la valeur efficace des courants d'alimentation de la machine synchrone. La vitesse angulaire ω_m en rad·s⁻¹ est liée à la constante de force électromotrice K_E par la relation $E = K_E \cdot \omega_m$.

Question 28 : En déduire la relation entre ω_m , vitesse de rotation du moteur en rad·s⁻¹ et ω pulsation des courants statoriques en rad·s⁻¹. Calculer la fréquence maximale f_{\max} d'alimentation des enroulements du moteur permettant d'atteindre la vitesse maximale annoncée du bras 2.

Le couple électromagnétique C_{em} peut être exprimé à partir du modèle de Behn-Eschenburg représentant un des enroulements du moteur (figure 21).



\underline{E} force électromotrice de valeur efficace E (V)

R résistance d'un enroulement (Ω)

X réactance cyclique d'un enroulement (Ω) avec $X=L_c.\omega$

\underline{V} tension de valeur efficace V aux bornes d'un enroulement (V)

\underline{I} courant de valeur efficace I dans un enroulement (A)

Figure 21 - Modèle de Behn-Eschenburg représentant un des enroulements du moteur.

À partir de la loi des mailles, il est possible de déterminer l'expression de la tension \underline{V} en notation complexe qui conduit, par l'expression de la puissance électromagnétique, au couple électromagnétique $C_{em} = \frac{3.E.I.\cos\psi}{\omega_m} = 3.K_E.I.\cos\psi$ où ω_m représente la vitesse de rotation en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ et ψ l'angle orienté entre \underline{I} et \underline{E} .

Question 29 : Écrire la loi des mailles, puis dessiner le diagramme de Fresnel correspondant pour un réglage de l'angle $\psi = 0$. Exprimer la valeur efficace V en fonction des grandeurs R , X , E et I puis expliquer l'intérêt de ce réglage de l'angle ψ nul.

Question 30 : À partir des caractéristiques de la machine, déterminer les valeurs efficaces du courant I et de la tension V en régime établi pour une rotation du bras 2 de $1^\circ\cdot\text{s}^{-1}$ avec un couple résistant ramené sur l'axe moteur de $20 \text{ N}\cdot\text{m}$. Dessiner l'allure de $i(t)$ en précisant sa valeur maximale et sa période.

Question 31 : Conclure quant à la capacité de moteur à assurer le surplus de masse amené par la tête de dépose placée en bout de bras.

3.4. Validation du repérage de l'AGV dans la maison pour éviter les erreurs d'impression

Afin de positionner parfaitement le robot et éviter des erreurs d'impression des murs, le véhicule autoguidé est équipé d'un LIDAR à son sommet (diagramme de définition des blocs du DT3) et 14 mires réfléchissantes ont été mises en place à la bonne hauteur par un géomètre expert au début du chantier.

La position exacte du robot d'impression étant alors connue, le programme de commande des mouvements du bras articulé effectue alors les éventuelles corrections nécessaires.

L'objectif de cette partie est de comprendre comment le Lidar renvoie l'angle et la distance des mires mises en place par le géomètre afin de localiser avec précision le robot d'impression et valider l'exigence 1.1.1.

Le Lidar (figure 22) est constitué d'un émetteur qui envoie un signal laser pulsé, et lorsque ce dernier rencontre un obstacle, il revient « à l'envoyeur » (en réalité à un récepteur

optique positionné juste à côté de l'émetteur). On peut alors déterminer la distance d séparant l'obstacle du Lidar en mesurant la durée Δt que le signal met à faire l'aller-retour.

Par ailleurs, le bloc (émetteur + récepteur) est entraîné par un moteur qui effectue un balayage sur 360° . Tout l'intérêt consiste alors à faire effectuer au Lidar un « SCAN », c'est-à-dire une rotation de 360° , et de mesurer, pour chaque position angulaire θ , la distance d mesurée entre le Lidar et la mire. Le lidar donne 2000 mesures par seconde. On s'intéresse dans notre cas à une première mire placée à 5,83 m du lidar.

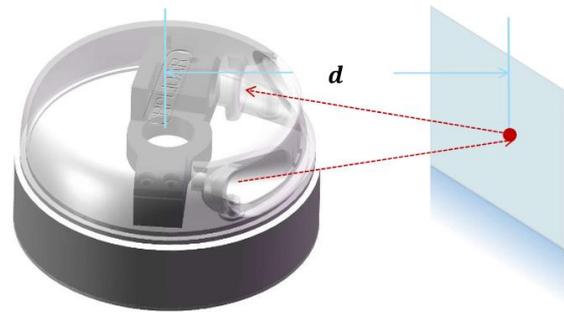


Figure 22 – Principe du Lidar.

Question 32 : D'après la figure 22, expliquer dans quel sens tourne le Lidar (horaire ou anti-horaire en vue de dessus) et déterminer la relation entre la distance d mesurée et la durée Δt . Calculer cette durée pour la distance annoncée de 5,83 m.

Après avoir reçu une commande Start Scan (2 octets), le Lidar renvoie dans un premier temps une réponse sur 7 octets. Dès lors le Lidar transmet continuellement par une liaison série asynchrone sur 5 octets les couples de grandeurs (d, θ) successivement mesurées (voir figure 23), en transmettant une nouvelle mesure toutes les $500 \mu s$, jusqu'à la réception d'une commande de STOP, auquel cas le Lidar met un terme au SCAN.

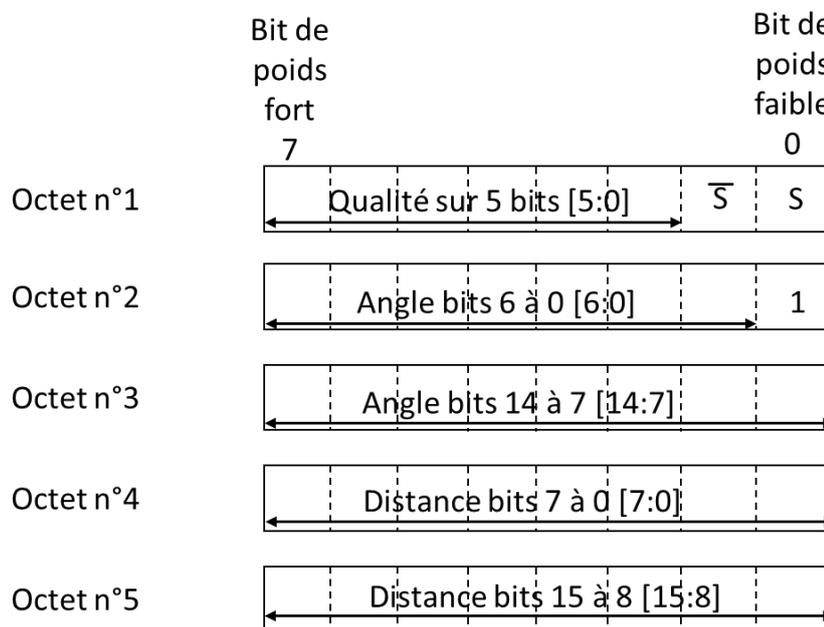


Figure 23 – Contenu des 5 octets transmis par le Lidar.

Les valeurs d'angle, codé sur 15 bits, et de distance, codée sur 16 bits, sont alors calculées comme suit :

- $\theta = \text{Angle}/64$ (en $^\circ$) ;
- $d = \text{Distance}/4$ (en mm).

Un relevé de mesures transmises par le Lidar à proximité d'une mire a été effectué avec les deux chronogrammes ainsi que le décodage de la trame en bas d'écran (figure 24). Le premier octet de la mesure n°1 est par exemple codé 22 en hexadécimal. Le principe de la transmission série est donné dans le document DT4.

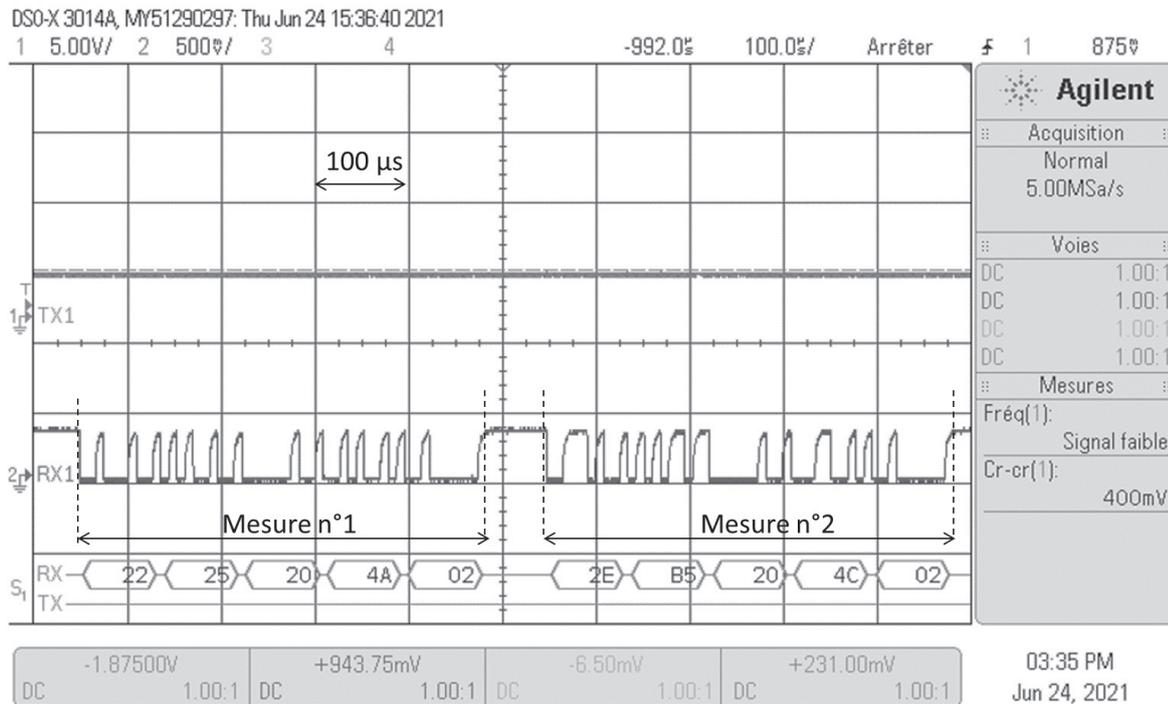


Figure 24 – Relevé de 2 mesures successives à l'oscilloscope avec décodage de la trame.

Question 33 : Déterminer le débit de transmission à partir du relevé en n'omettant pas les bits de Start et de Stop, puis valider le calcul en le choisissant parmi les débits normalisés possibles donnés dans le DT4.

Question 34 : Sur la première mesure, retrouver la valeur binaire sur 15 bits de l'angle et celle sur 16 bits de la distance puis en déduire les valeurs en degrés et en mm.

Question 35 : Déterminer la variation angulaire entre deux mesures et en déduire la vitesse de rotation du moteur du Lidar. Conclure sur l'intérêt de l'utilisation de ce Lidar.

PARTIE 4 - Vérification des performances thermiques de la maison vis-à-vis de la Réglementation Thermique 2012 (RT2012)

Les objectifs de cette partie sont :

- de mettre en place les modèles permettant d'évaluer les pertes thermiques sur les murs ;
- de valider le choix d'isolation et le principe de fabrication innovant des murs ;
- de valider finalement les performances thermiques globales de la maison vis-à-vis de la Réglementation Thermique 2012 (exigence 100.10)

Une des priorités pour le constructeur de la maison Yhnova^(TM) est d'obtenir un ouvrage conforme aux différentes exigences issues des réglementations et plus particulièrement vis-à-vis de la réglementation thermique RT2012. La réglementation thermique RT2012 comporte 3 exigences de résultats qui portent sur les besoins bioclimatiques du bâti quantifiés par le coefficient B_{bio} , sur la consommation d'énergie primaire quantifiée par le coefficient C_{ep} et sur le confort en été quantifié par le coefficient T_{ic} (figure 25).

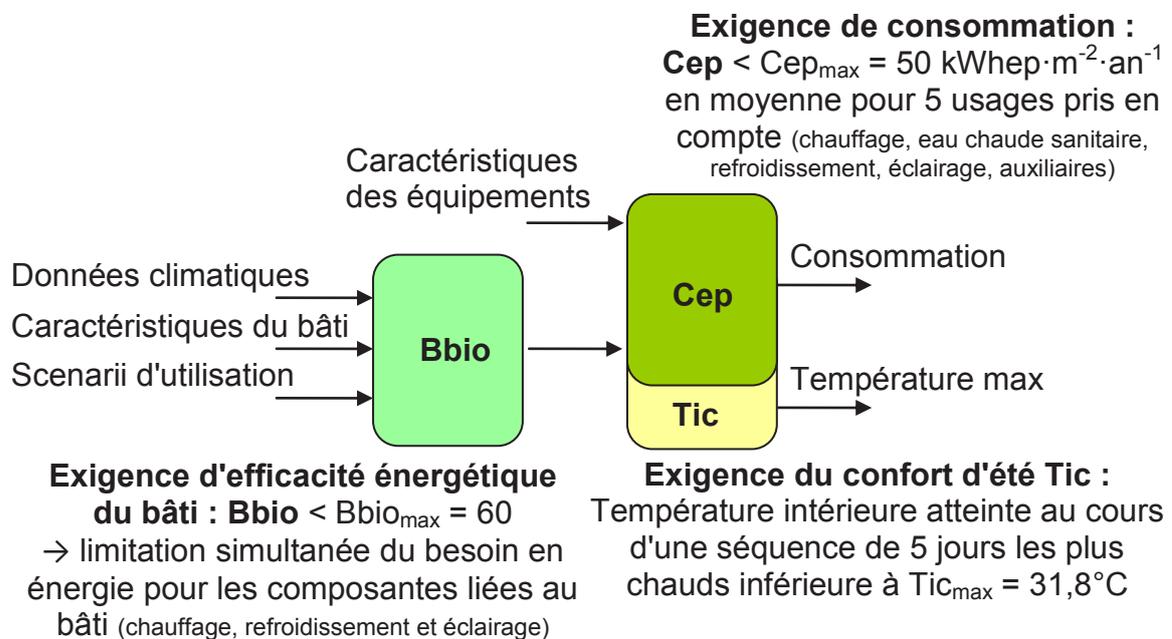


Figure 25 - Synthèse des 3 coefficients de la réglementation RT2012.

L'isolation de la maison est prise en compte dans les caractéristiques du bâti pour le calcul du coefficient B_{bio} (figure 25). Toutes les solutions constructives pour l'isolation sont classiques sur la maison Yhnova^(TM) sauf pour le mur. En effet, l'isolation est intégrée dès la fabrication des murs et aucune isolation supplémentaire n'est ajoutée. Le travail dans cette partie se focalise par conséquent exclusivement sur les performances thermiques du mur.

4.1. Modélisation des pertes par les murs à l'aide de l'équation de la chaleur

Pour évaluer les pertes thermiques sur les murs, il est nécessaire de mettre en place un modèle de conduction thermique (figure 26) et d'exploiter l'équation de la conduction thermique appelée aussi équation de la chaleur. La résolution de cette équation permet

d'obtenir l'évolution du champ de température dans le mur en fonction du temps et d'évaluer le flux thermique le traversant.

L'équation de la chaleur s'écrit $\text{div}(\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T(x,t))) + \omega = \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}$ avec :

$T(x,t)$, la température dans le solide (K) à l'abscisse x et l'instant t ;

λ , le coefficient de conductivité thermique du solide ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ;

ω , le terme source ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$) ;

ρ , la masse volumique du solide ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ;

C , la chaleur spécifique ou capacité thermique massique du solide ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Hypothèses et modélisation :

- il n'y a pas de source de chaleur à l'intérieur du mur ($\omega = 0$) ;
- la conductivité thermique λ est supposée indépendante de la température ;
- les bourrelets de mousse polyuréthane sont négligés et les solides sont homogènes ;
- la surface de la paroi intérieure de la maison pour la station de travail n°2 de la maison Yhnova^(TM), une fois les plafonds construits, est notée S_{mur} avec $S_{\text{mur}} = L \times h_p$ où L est la longueur de la paroi ($L = 3,6 \text{ m}$) et h_p est la hauteur sous plafond du mur ($h_p = 2,5 \text{ m}$) ;
- compte tenu de leurs épaisseurs et de leurs coefficients de conductivité thermique, les deux couches de finition (enduit sur le mur extérieur et plaque de plâtre coté mur intérieur) sont négligées ;
- le mur béton (figure 26) a pour épaisseur $e_b = 150 \text{ mm}$, une capacité thermique massique $C_{\text{béton}} = 880 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, une masse volumique $\rho_{\text{béton}} = 2\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et un coefficient de conductivité thermique $\lambda_{\text{béton}} = 1,65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- chaque couche de mousse polyuréthane a une épaisseur $e_s = 80 \text{ mm}$, une capacité thermique massique $C_{\text{pu}} = 1\,760 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, une masse volumique $\rho_{\text{pu}} = 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et un coefficient de conductivité thermique $\lambda_{\text{pu}} = 0,025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

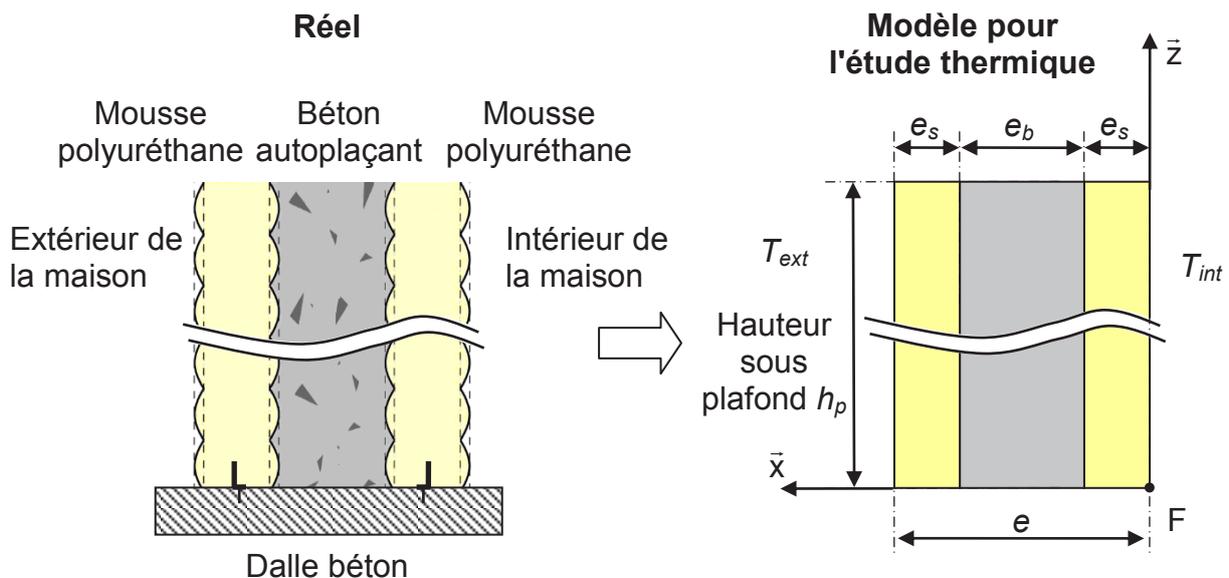


Figure 26 - Modèle pour l'étude thermique.

4.2. Évaluation des pertes par les murs en régime stationnaire

Afin d'évaluer les besoins bioclimatiques de la maison Yhnova^(TM) (quantifiés par le coefficient $B_{bio_{ref}}$) et de déterminer la consommation d'énergie primaire (quantifiée par le coefficient $C_{ep_{ref}}$), il est notamment nécessaire d'estimer les pertes par les murs en régime stationnaire.

Pour cette partie, les hypothèses suivantes s'ajoutent en complément des hypothèses formulées partie 4.1 :

- la température extérieure T_{ext} vaut 0 °C soit 273,15 K et la température intérieure T_{int} vaut 20 °C soit 293,15 K ;
- la température dans le mur $T(x,t)$ est supposée uniquement dépendante de la coordonnée x , $T(x,t) = T(x)$.

Question 36 : Donner la justification permettant de considérer que la température ne dépend pas des coordonnées y et z .

La résistance thermique quantifie l'opposition à un flux thermique entre deux isothermes et entre lesquelles s'effectue un transfert thermique. La résistance thermique vaut par exemple pour le mur béton $R_{béton} = \frac{e_b}{\lambda_{béton} \cdot S_{mur}}$ en $K \cdot W^{-1}$. Lorsqu'un mur est constitué de plusieurs couches de matériaux différents, il est nécessaire de déterminer la résistance thermique de l'ensemble du mur, chaque couche possédant sa propre résistance thermique.

Question 37 : En exploitant l'analogie électrique des résistances en série, proposer un schéma thermique équivalent du mur puis déterminer la résistance équivalente du mur R_{mur} en fonction de e_b , e_s , $\lambda_{béton}$, λ_{PU} et S_{mur} . En déduire le coefficient de conductivité thermique de l'ensemble du mur noté λ_{mur} en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Faire les applications numériques.

Question 38 : Établir l'équation du champ de température en régime stationnaire.

Le flux thermique exprimé en W a pour définition : $\phi = \int_S -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot dS \cdot \vec{x}$.

Question 39 : Déterminer le flux thermique ϕ traversant le mur en régime stationnaire en fonction de λ_{mur} , S_{mur} , e , T_{int} et T_{ext} . Faire l'application numérique et conclure vis-à-vis de l'exigence du cahier des charges.

Un modèle thermique multiphysique a été construit en parallèle et a permis de simuler l'échange thermique en régime stationnaire à travers le mur de la station de travail n°2 (figure 27).

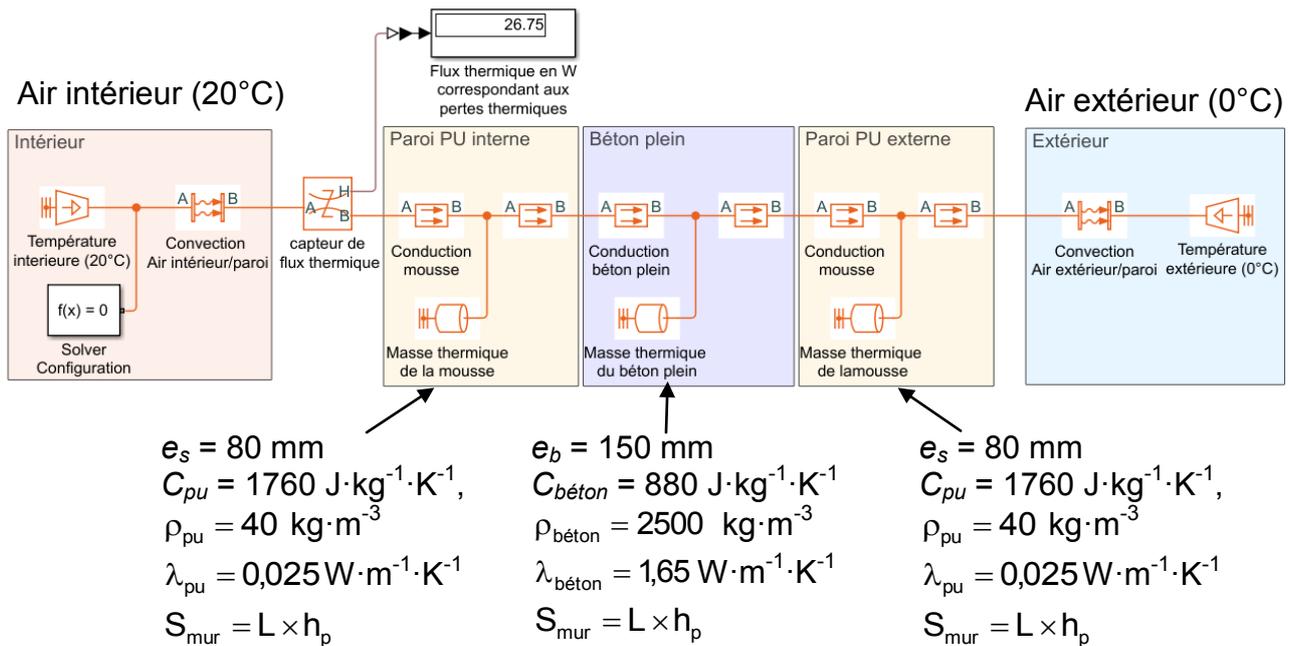


Figure 27 - Modèle thermique multiphysique simulant l'échange thermique à travers le mur de la station de travail numéro 2.

Question 40 : Lire la valeur du flux thermique obtenu par simulation sur la figure 27. Expliquer l'origine de l'écart entre le résultat obtenu par simulation et le résultat obtenu question précédente.

Question 41 : En considérant que les 51 m linéaires du mur de la maison ont le même comportement que les murs de la station de travail n°2, évaluer la puissance de chauffe nécessaire pour pouvoir réguler à 20°C la température de la maison Yhnova et compenser les déperditions dans les murs quand la température extérieure est de 0°C. Expliquer la limite de cette estimation et indiquer, dans le cas réel de la maison dans son ensemble, où vont avoir lieu les déperditions les plus importantes.

Les résultats obtenus ici sont utilisés par la suite pour l'évaluation des besoins bioclimatiques de la maison Yhnova^(TM) (quantifiés par le coefficient $B_{bio_{ref}}$) et pour sa consommation d'énergie primaire (quantifiée par le coefficient $C_{ep_{ref}}$).

4.3. Évaluation du confort d'été et résolution de l'équation de la chaleur en régime non stationnaire à l'aide des différences finies

Le critère confort d'été, caractérisé par le coefficient T_{ic} , impose que la température intérieure atteinte dans la maison soit inférieure à une température maximale $T_{ic_{max}}$ au cours des 5 jours les plus chauds de l'année. Dans le calcul de ce coefficient, il est nécessaire de faire le bilan de toutes les sources de chaleur susceptibles de chauffer l'air intérieur de la maison et de les quantifier au cours du temps. Le flux conducto-convectif venant de la paroi intérieure du mur fait partie de ce bilan. La prise en compte du temps sur ce problème implique par ailleurs de travailler avec l'équation de la chaleur en régime non stationnaire. Elle s'écrit alors comme une équation aux dérivées partielles qu'il faut résoudre numériquement.

Pour cette partie (figure 28), les hypothèses suivantes s'ajoutent en complément des hypothèses formulées partie 4.1 :

- la température extérieure est notée T_{ext} et la température intérieure est notée T_{int} ;
- la température dans le mur T ne dépend que du temps t et de la coordonnée x .

Compte tenu des hypothèses formulées pour ce problème, l'équation de la chaleur s'écrit

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}$$

à laquelle sont associées les conditions suivantes :

- $T(0,t) = T_{int}$ pour tout $t > 0$ et $T(e,t) = T_{ext}$ pour tout $t > 0$ (conditions limites) ;
- $T(x,0) = T_{int}$ pour tout $x \in [0,e[$ (condition initiale).

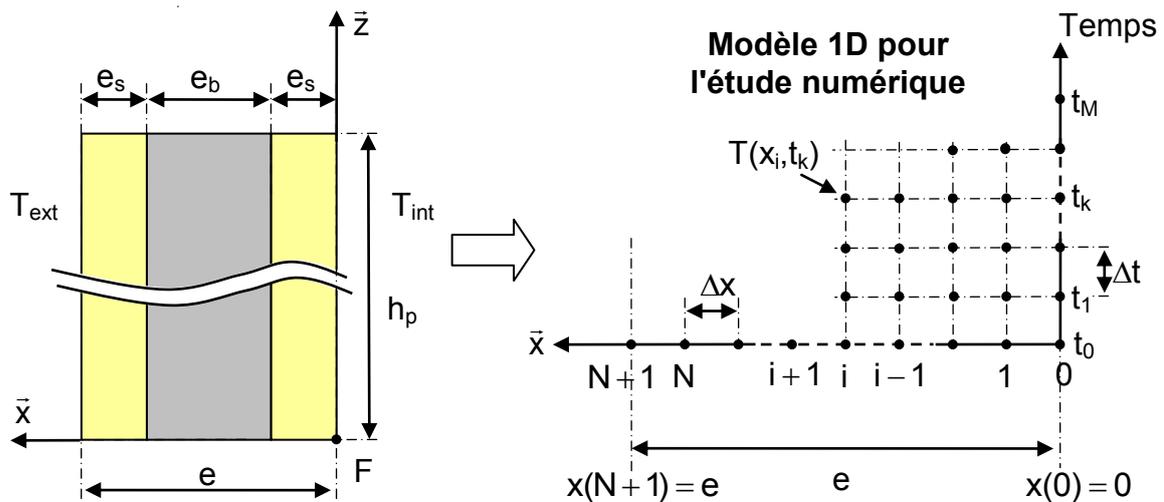


Figure 28 - Modèle 1D pour l'étude numérique.

Le mur d'épaisseur e et d'intervalle $[0,e]$ est discrétisé en $N+2$ points numérotés de 0 à $N+1$, régulièrement espacés d'une distance Δx appelée « pas d'espace ». À l'intérieur du mur (frontières intérieure et extérieure exclues) se trouvent donc N points.

Question 42 : Donner l'expression de Δx en fonction de N et de l'épaisseur du mur e ainsi que l'expression de l'abscisse $x(i)$ du $i^{\text{ème}}$ point sachant que $x(0) = 0$ et $x(N+1) = e$. Déterminer la valeur de Δx qui permet de discrétiser une couche de polyuréthane en 8 « pas d'espace ».

Le temps est discrétisé en M intervalles de temps de durée Δt appelés « pas de temps ». La température est calculée uniquement aux instants particuliers $t_k = k \cdot \Delta t$. Pour résoudre numériquement l'équation de la chaleur, deux méthodes numériques sont possibles : une méthode utilisant un schéma explicite, une méthode utilisant un schéma implicite. La méthode explicite est choisie ici. Il faut donc déterminer l'expression discrétisée de l'équation de la chaleur et établir le schéma numérique explicite pour la résolution.

La température pour la position x_i et pour le temps t_k est notée $T(x_i, t_k) = T_i^k$. De même la températures $T(x_i + \Delta x, t_k)$ et $T(x_i - \Delta x, t_k)$ sont respectivement notées T_{i+1}^k et T_{i-1}^k .

La température pour la position x_i et pour le temps $t_k + \Delta t$ est notée $T(x_i, t_k + \Delta t) = T_i^{k+1}$.

L'équation de la chaleur discrétisée s'écrit :
$$\frac{T_{i+1}^k + T_{i-1}^k - 2.T_i^k}{(\Delta x)^2} = \frac{\rho.C}{\lambda} \cdot \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t}$$

Question 43 : À partir de l'équation de la chaleur discrétisée, montrer que la température T_i^{k+1} peut être déterminée à l'aide de l'expression $T_i^{k+1} = r.T_{i-1}^k + (1-2r).T_i^k + r.T_{i+1}^k$ où r est une constante à déterminer. Indiquer si cette expression est valable pour toute valeur de i ($0 \leq i \leq N+1$). Donner les valeurs de T_0^k et T_{N+1}^k .

Ce schéma numérique correspond au schéma d'Euler explicite. Si la température est connue en tout point x_i à l'instant t_k alors il est possible de calculer la température à l'instant $t_k + \Delta t$ (figure 29). Il est ainsi possible de déterminer la température pour les N points sur les M pas de temps et ce schéma numérique converge si $r \leq \frac{1}{2}$.

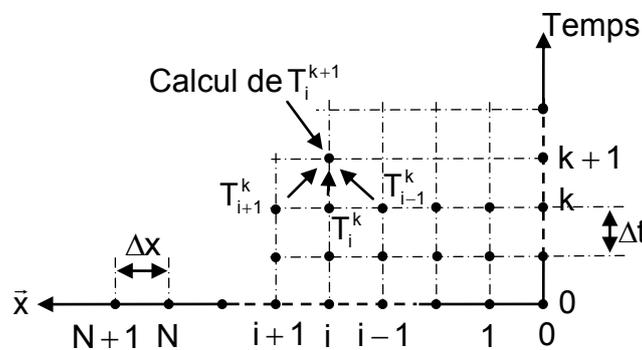


Figure 29 - Illustration du principe de calcul du schéma explicite.

Question 44 : Déterminer le pas de temps Δt maximal en seconde qui garantit la convergence du schéma numérique. Conclure quant à la convergence du schéma numérique si le temps simulé de 5 jours est discrétisé en $M = 14\,400$ pas de temps.

Le système d'équations obtenu à partir de l'expression $T_i^{k+1} = r.T_{i-1}^k + (1-2r).T_i^k + r.T_{i+1}^k$ pour

$$i \in [1, N] \text{ est : } \begin{cases} T_1^{k+1} = r.T_0^k + (1-2r).T_1^k + r.T_2^k \\ \dots \\ T_N^{k+1} = r.T_{N-1}^k + (1-2r).T_N^k + r.T_{N+1}^k \end{cases}$$

Un extrait de programme Python est donné document réponse DR3. Dans ce programme le mur est pour le moment considéré composé d'une seule couche de polyuréthane d'épaisseur e_s .

Question 45 : À partir de l'extrait de programme Python donné document réponse DR3, compléter les lignes 31, 33 et 34 qui correspondent aux conditions initiales et aux conditions limites en température.

Question 46 : Compléter la ligne 39 du programme Python donné document réponse DR3 correspondant à l'implémentation du schéma numérique d'Euler explicite.

Après ajout des deux couches de matériaux supplémentaires et en définissant la continuité du flux de conduction entre ces couches, le programme permet, en ajustant la condition limite de température T_{ext} , de quantifier le flux conducto-convectif venant de la paroi intérieure du mur lors des 5 jours les plus chauds. Ces résultats sont utilisés par la suite pour l'évaluation du confort en été de la maison quantifié par le coefficient Tic.

4.4. Validation des performances de la maison vis-à-vis de la réglementation RT2012

Les performances réelles de la maison sur les 3 exigences de la réglementation RT2012 sont données dans le tableau figure 30. Elles sont comparées à des résultats issus d'une maison identique en tous points à la maison Yhnova^(TM) sauf pour le choix d'isolation des murs et aux coefficients maximum admissibles de la réglementation thermique RT 2012.

	Maison Yhnova ^(TM)	Maison murs différents	RT2012
Bbio ([1])	34,3	36,6	60
Cep (kWhep·m ² ·an ⁻¹)	33	35,3	50
Tic (°C)	29	31	31,8

Figure 30 - Performances RT2012 de la maison Yhnova^(TM).

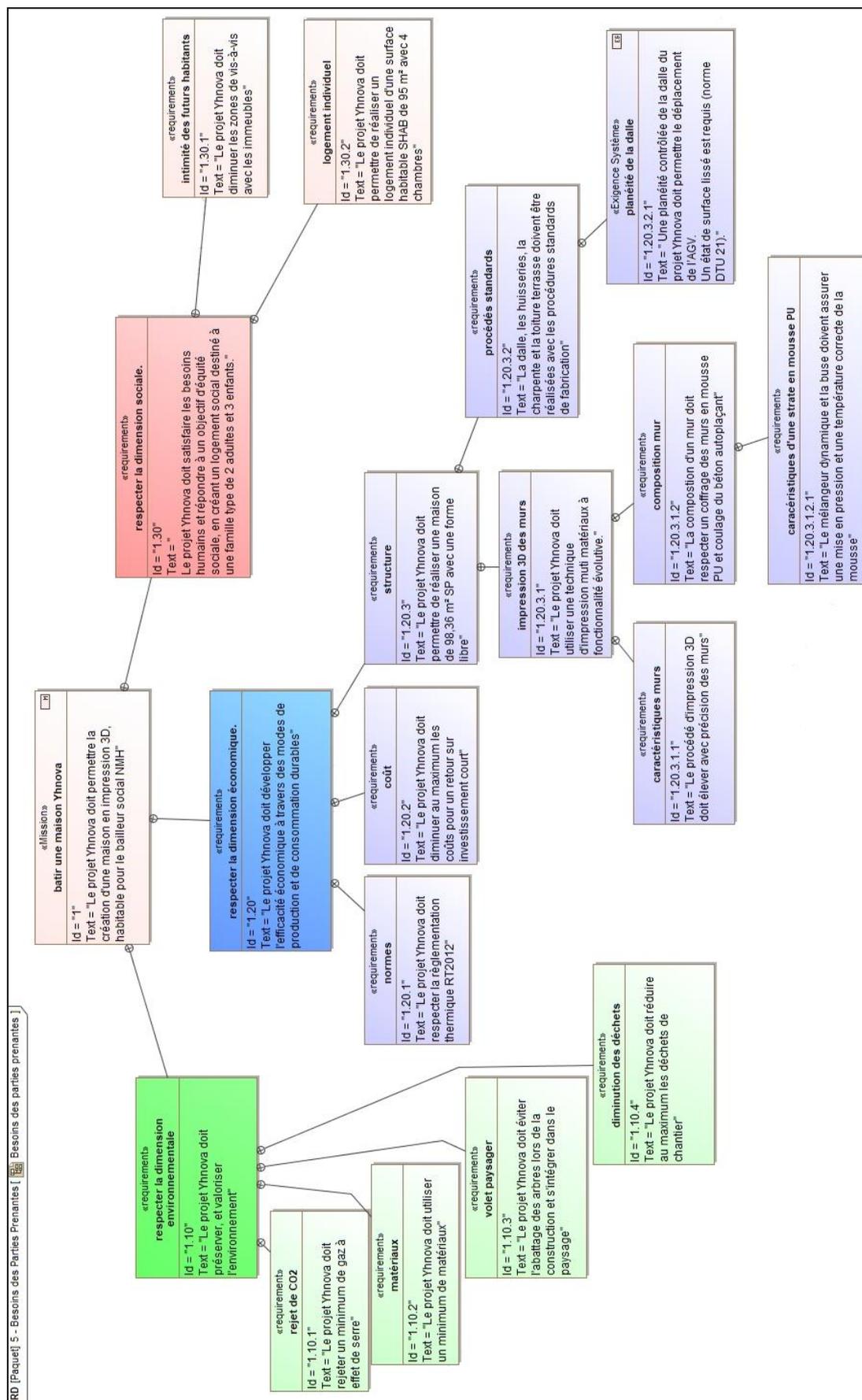
Question 47 : Quantifier, par rapport à la maison traditionnelle, le gain apporté par la maison Yhnova^(TM). Valider le choix d'isolation et le principe de fabrication innovant des murs et conclure quant aux performances de la maison Yhnova^(TM) vis-à-vis de la RT2012.

PARTIE 5 – Synthèse finale et conclusions

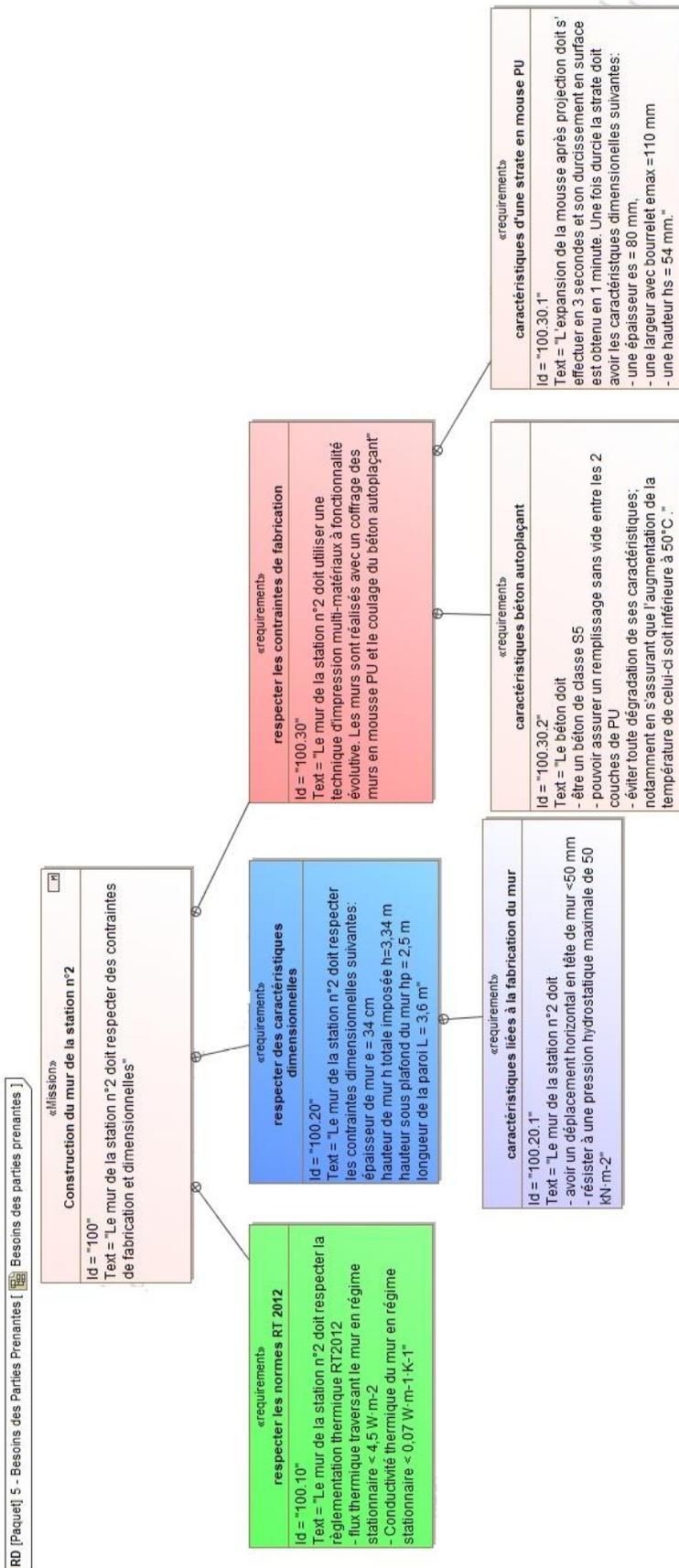
Question 48 : Conclure sur le respect des exigences du robot d'impression ainsi que sur ses limites sur les deux points suivants : hauteur de fabrication ; temps de changement de la tête de dépose. Proposer pour ces deux points des pistes d'amélioration.

Question 49 : Expliquer, à l'aide de l'ensemble de l'étude et du DT1, en quoi ce projet d'impression 3D peut permettre de respecter l'ensemble des exigences du bailleur social en donnant trois critères au minimum.

Document technique DT1 : Besoins des parties prenantes



Document technique DT2 : Besoins des parties prenantes sur la construction du mur de la station n°2



Document technique DT3 : Extrait de cahier des charges du robot d'impression.

Diagramme de contexte du dispositif robotisé d'impression.

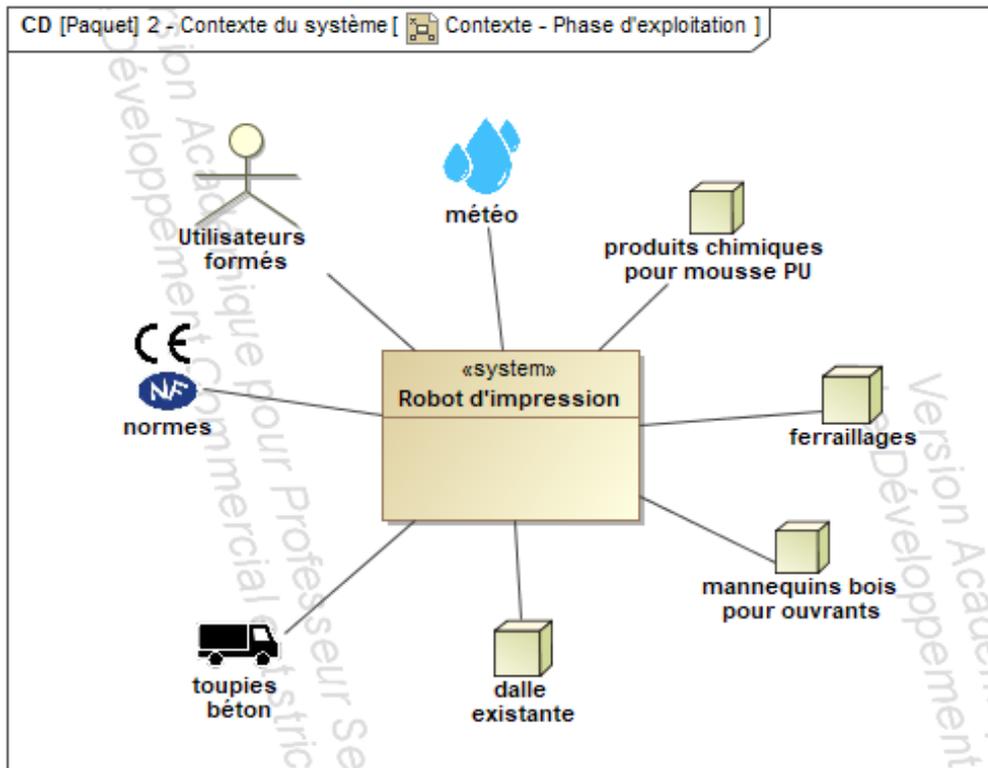
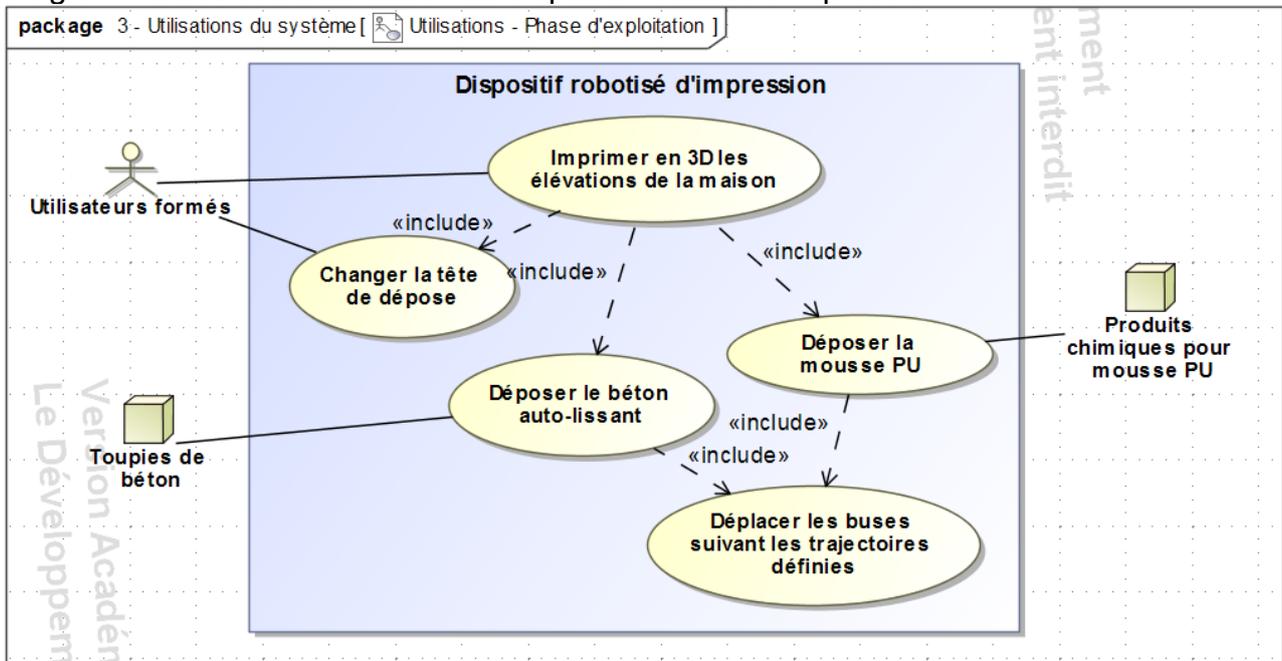


Diagramme des cas d'utilisation du dispositif robotisé d'impression.



Suite du DT3 page suivante

Diagramme des exigences du dispositif robotisé d'impression.

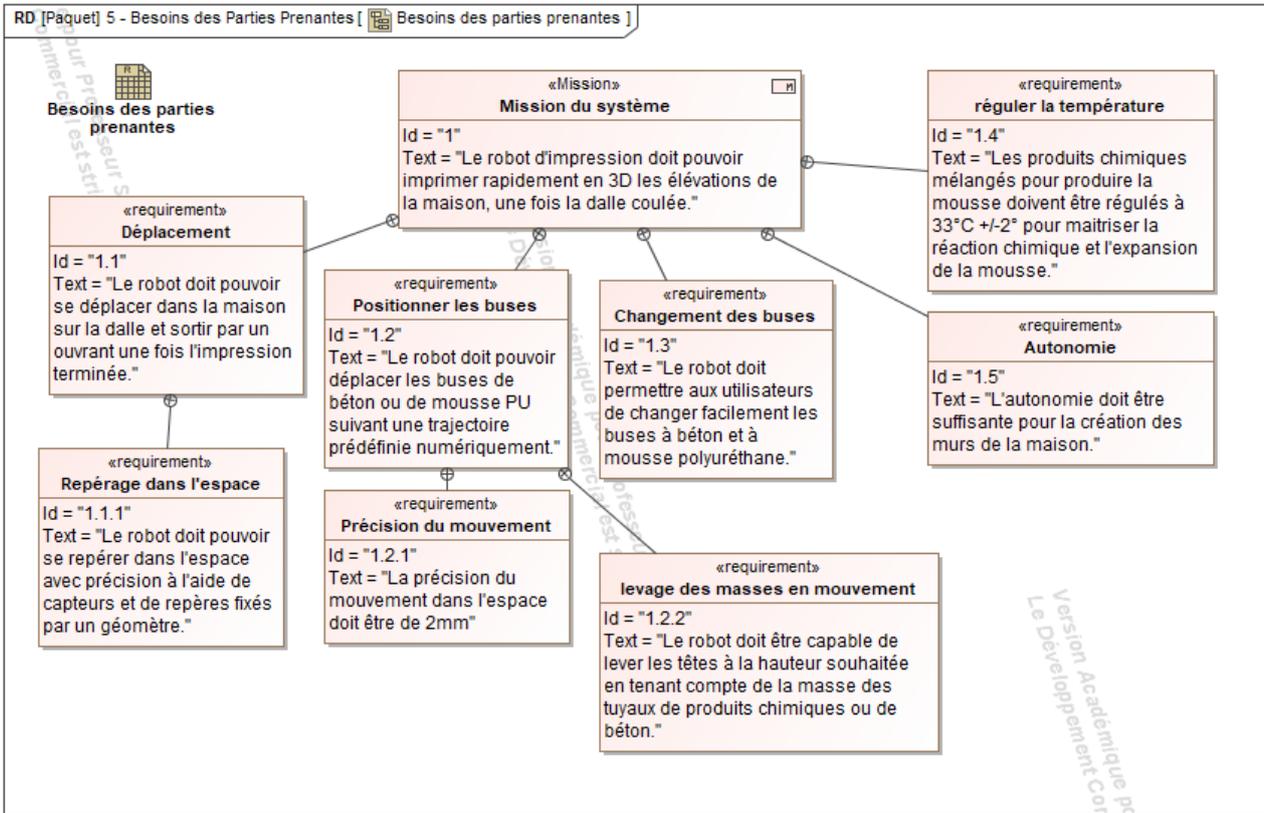
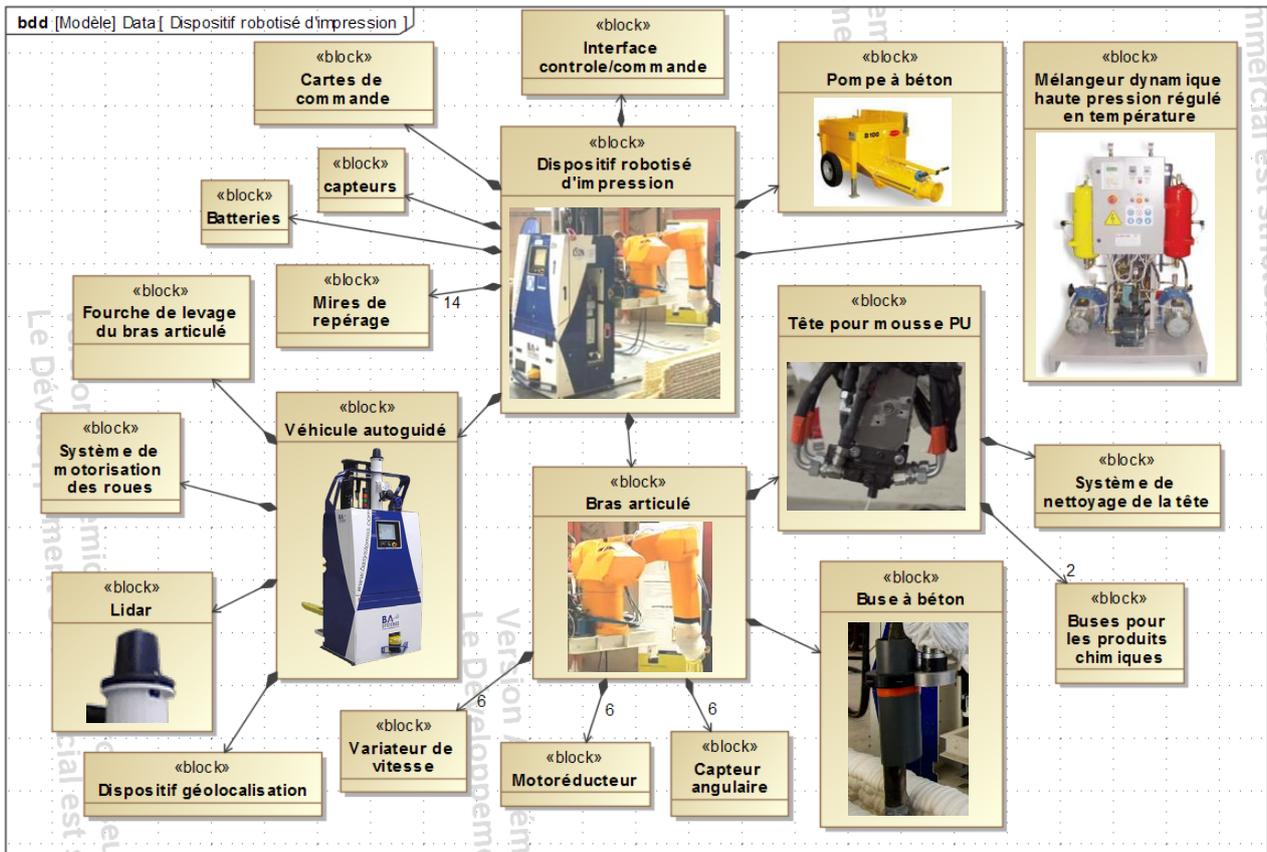


Diagramme de définition de blocs du dispositif robotisé d'impression.

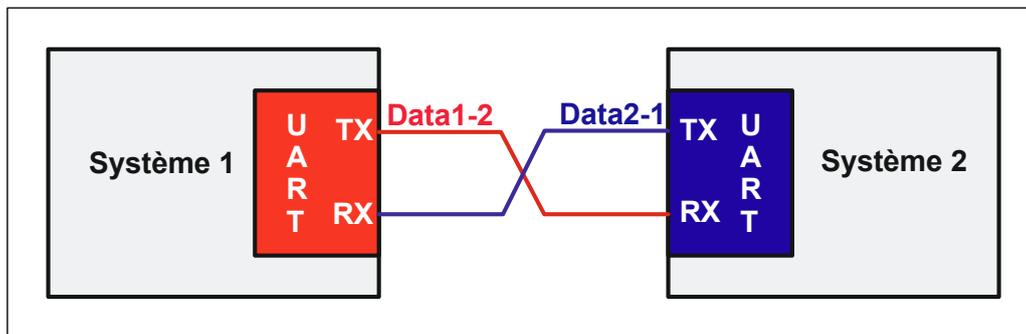


Document technique DT4 : Principe de l'interface série asynchrone

Une interface série asynchrone ou **UART** (**U**niversal **A**synchronous **R**eceiver **T**ransmitter) permet une transmission/réception de données sous forme sérielle (bit après bit).

Dans l'exemple qui suit, 2 dispositifs électroniques (Systèmes 1 et 2) équipés d'une UART s'échangent des données via 2 broches distinctes :

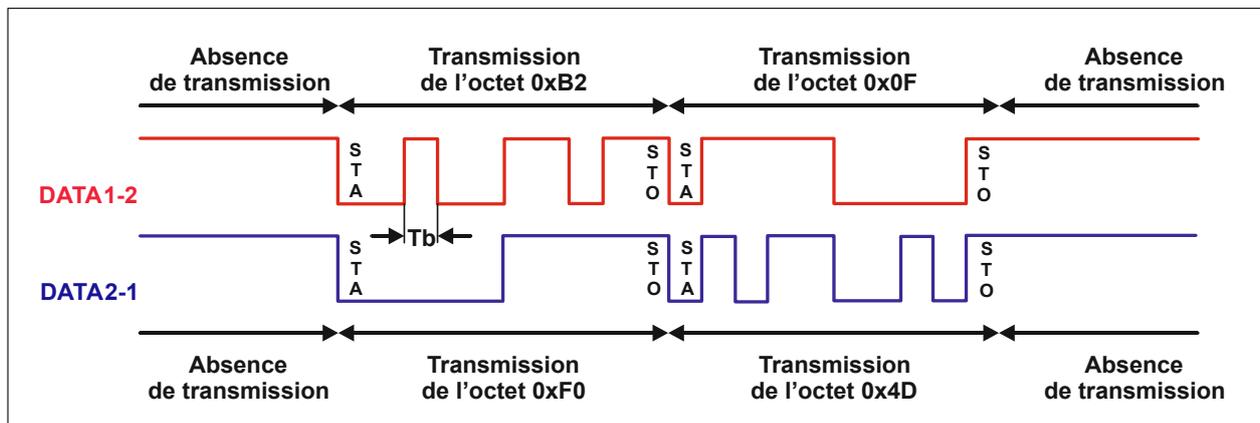
- **TX** (Transmission) : broche de sortie permettant de transmettre des données série ;
- **RX** (Réception) : broche d'entrée permettant de lire des données transmises en série.



On note Data1-2 les données série transmises par le système 1 à destination du système 2, et inversement Data2-1 les données transmises par le système 2 à destination du système 1.

Dans l'exemple ci-après, le système 1 transmet au système 2 les octets successifs codés en hexadécimal B2 puis 0F, alors que dans le même temps, le système 2 transmet au système 1 les octets codés en hexadécimal F0 puis 4D.

On rappelle que B2 correspond en binaire à 1011 0010 et on ajoute les bits de Start et de Stop pour chaque octet. On note souvent 0xB2 l'octet pour spécifier qu'il est en hexadécimal.



On note que :

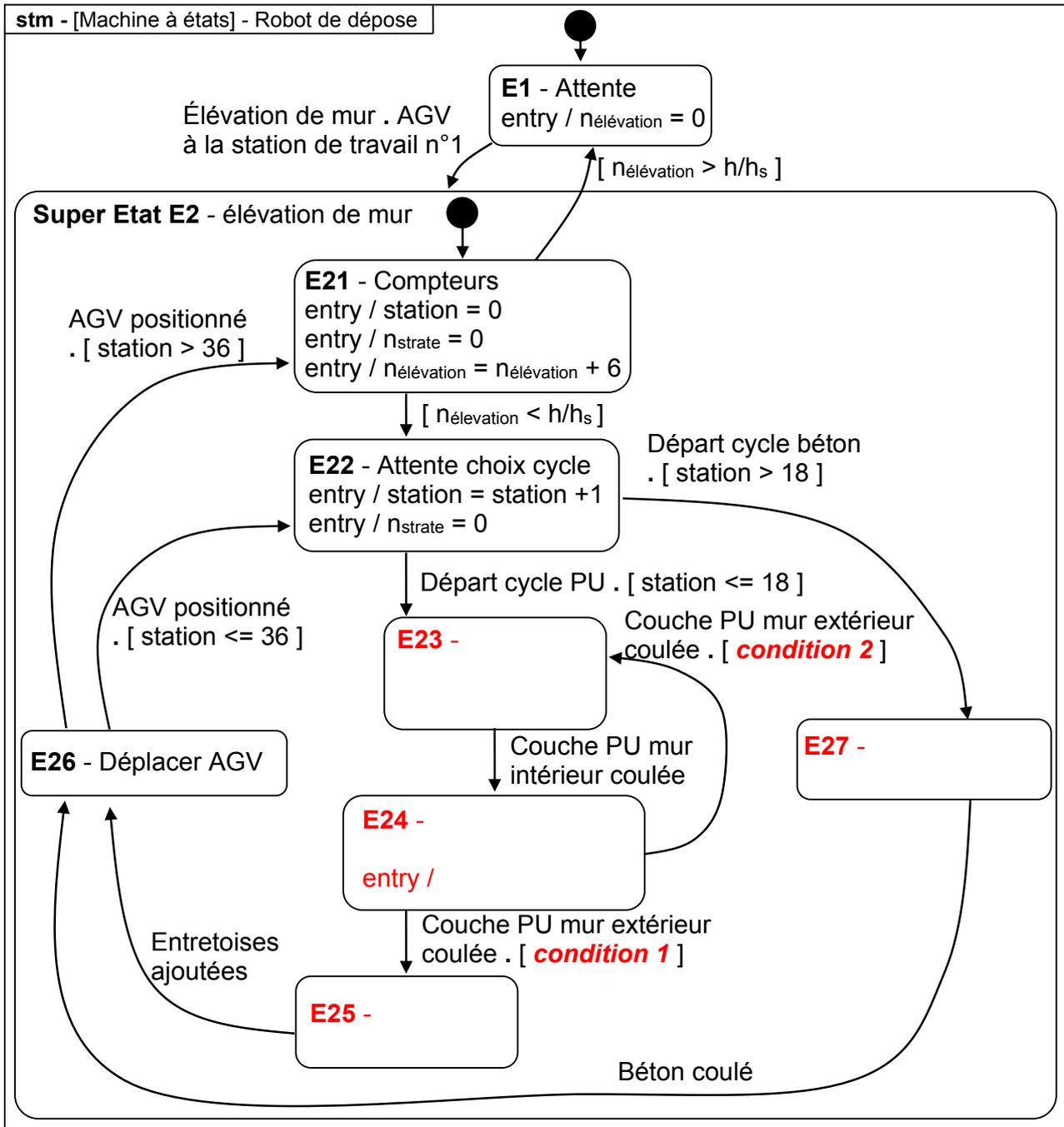
- les octets sont transmis bit de poids faible en 1^{ère} position ;
- les octets sont toujours précédés d'un bit de Start au niveau bas et suivis d'un bit de Stop au niveau haut ;
- en l'absence de communication, les signaux Data1-2 et Data2-1 sont au niveau haut.

La durée de transmission d'un bit, appelée période bit, est notée Tb.

Les vitesses de transmission sont normalisées et sont de 2 400, 4 800, 9 600, 19 200, 38 400, 57 600, 115 200 ou 230 400 bit/s.

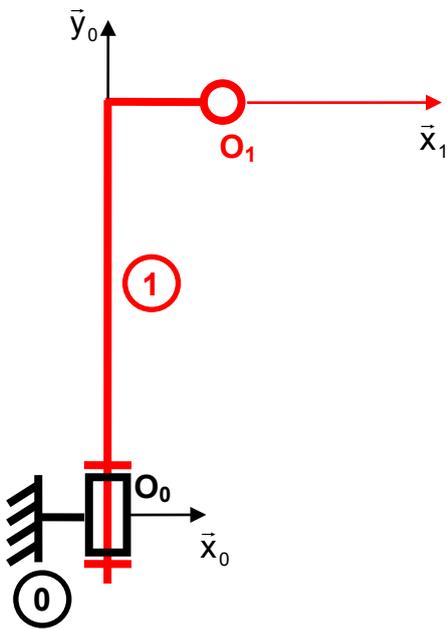
NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Document réponse DR1 (question 18)



Document réponse DR2 (question 19)

Échelle à respecter.



Document réponse DR3 (questions 45 et 46)

Extrait de programme dans lequel le mur est simplifié et considéré composé d'une seule couche de polyuréthane d'épaisseur e_s .

```
1  from numpy import meshgrid, zeros, linspace
2  import matplotlib.pyplot as plt
3  from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
4  import numpy as np
5
6  plt.close('all')
7
8  # Définition des paramètres
9  es=0.08 # m
10 tfin=3600*24*5 # s
11 lambdaPU=0.025 # W.m-1.K-1
12 rhoPU=40 # kg.m-3
13 CPU=1760 # J.kg-1.K-1
14 Nd=8 # nb de discrétisation sur x
15 M=360*24*5 # nb de discrétisation sur t
16 # pas de discrétisation
17 deltax=es/Nd # spatial
18 deltaT=tfin/M # temporel
19
20 r=lambdaPU*deltaT/(rhoPU*CPU*deltax*deltax)
21
22 # Conditions initiales et aux limites
23 Tint=293.15 # température intérieure
24 Text=308.15 # température extérieure
25
26 def schema_explicite(Nd,M,Tint,Text,r):
27     # Initialisation du tableau T
28     T=zeros((Nd,M))
29     # Conditions initiales et limites
30     for x in range(0,Nd):
31
32         for t in range(0,M):
33
34
35
36         # Schéma numérique explicite
37         for k in range(0,M-1): # boucle discrétisation temporelle
38             for i in range(1,Nd-1): # boucle discrétisation spatiale
39
40                 return T
41
42 Temperature=schema_explicite(Nd,M,Tint,Text,r)
43 print('Température',Temperature)
44
...
```