



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE

EAI STI 1

SESSION 2018

AGREGATION CONCOURS INTERNE ET CAER

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.

**ANALYSE ET EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE
D'UN SYSTÈME PLURITECHNIQUE**

Durée : 4 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

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

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : *La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

Tournez la page S.V.P.

A

COMPOSITION DU SUJET

SUJET :

- Description du procédé d'impression en béton XtreeE page 3
- Partie 1 : Étude du besoin et du contexte page 5
- Partie 2 : Étude d'un ouvrage imprimé par le procédé page 8
- Partie 3 : Étude du procédé d'impression XtreeE page 13
- Partie 4 : Analyse et proposition d'une séquence pédagogique page 23

DOCUMENTS TECHNIQUES (DT1 à DT6) :

- Documents spécifiques et relatifs au support de l'étude page 26

DOCUMENTS PÉDAGOGIQUES (DP1 à DP8) :

- Documents spécifiques à l'exploitation pédagogique page 33

Le sujet comporte 4 parties indépendantes qui peuvent être traitées dans un ordre différent.

Les différentes parties seront traitées sur des copies séparées.

Toutes les réponses devront être détaillées sur la copie et les résultats encadrés ou soulignés. Préciser les unités des résultats. Il est conseillé de composer pendant environ 3 h 30 min pour les parties 1 à 3 et 1 h 30 min pour la partie 4.

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 2 sur 45

Procédé d'impression en béton XtreeE

Contexte

Les architectes souhaitent régulièrement réaliser des ouvrages esthétiques et non courants avec des géométries et des caractéristiques techniques fortement impactées par la réflexion et les choix artistiques.

Les techniques traditionnelles sont contraignantes et parfois limitées en termes de possibilités vis-à-vis de certaines demandes. L'objectif de cette étude décomposée en 3 parties est d'analyser un procédé d'impression 3D en béton et voir s'il peut répondre à une demande précise.

Description des projets de l'architecte

Le procédé XtreeE est testé sur deux projets d'architecte.

Le premier projet est une villa située à Aix-en-Provence comportant à l'extérieur, un auvent supporté par un poteau en béton architectural en treillis tridimensionnel, servant également de puits de lumière (voir figure 1).

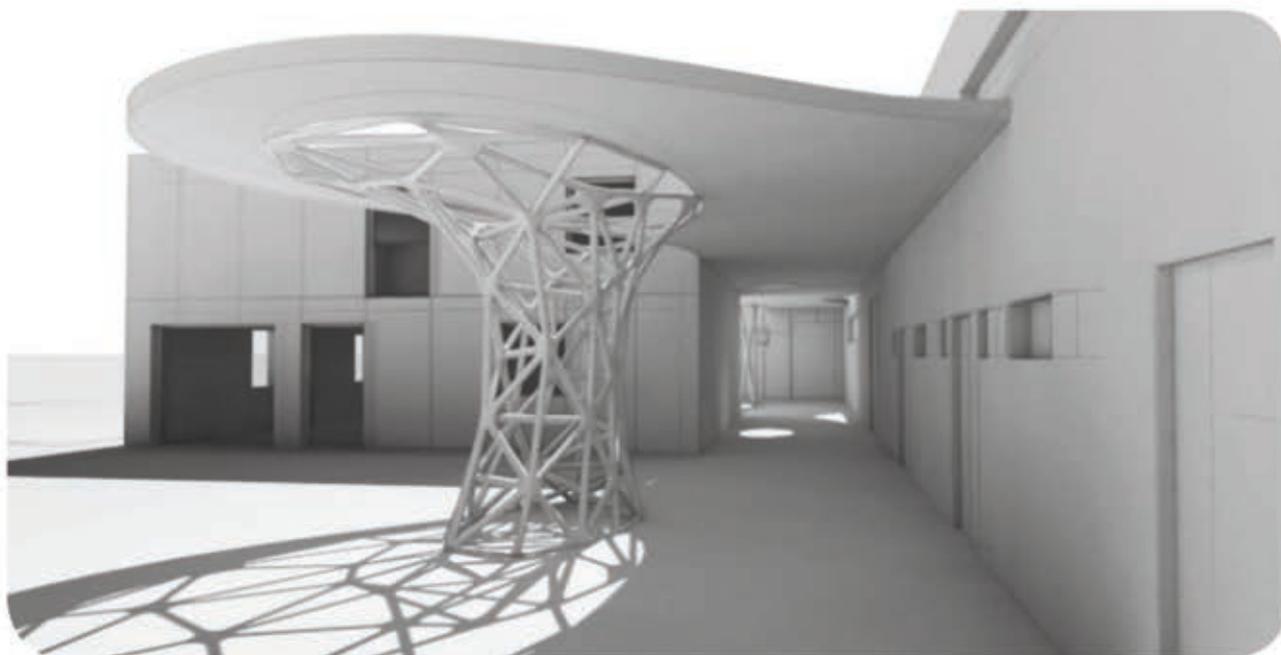


Figure 1 – Poteau de la villa d'Aix-en-Provence

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 3 sur 45

Le second projet est une villa située à Dubaï présentant de nombreuses caractéristiques géométriques non courantes et difficiles à réaliser par les techniques traditionnelles. Les murs porteurs de la villa sont constitués de surfaces non planes présentant des géométries en rubans plissés dans l'espace (voir figure 2 ci-après).



Figure 2 – Aspect intérieur de la Villa de Dubaï

Description du procédé de réalisation XtreeE

Le procédé de réalisation est basé sur une imprimante 3D qui extrude un béton hydraulique spécifique. Cette imprimante est soit portée par un robot multiaxe pour réaliser le poteau de la villa d'Aix-en-Provence (procédé 1, figure 3 ci-dessous), soit par un portique robotisé de grandes dimensions pour les murs de la villa de Dubaï (procédé 2, figure 3 ci-dessous).

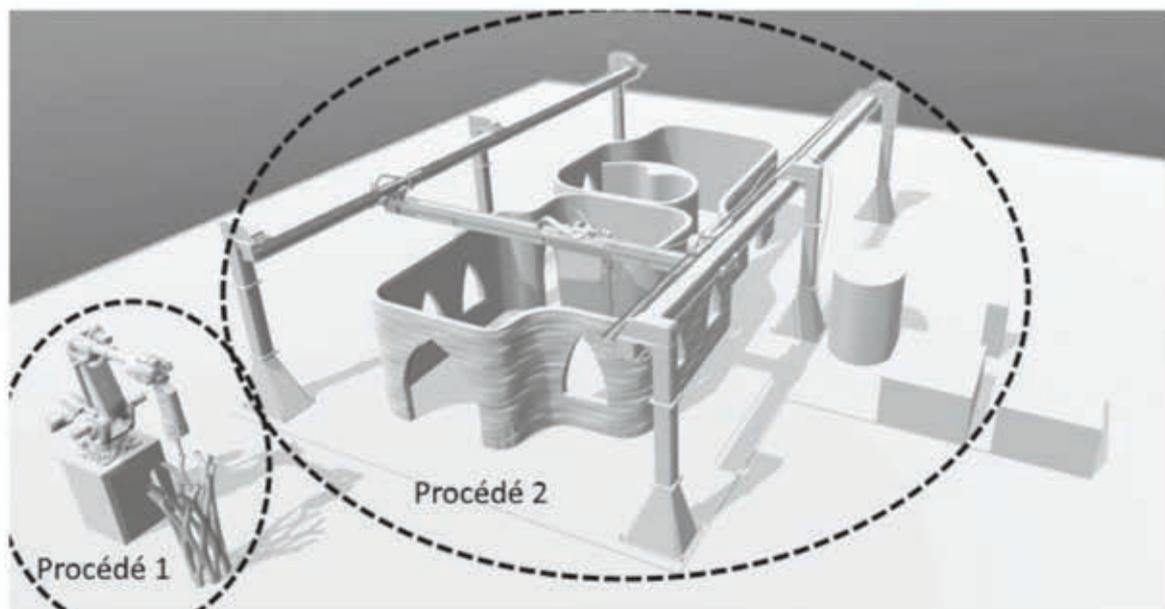


Figure 3 – Principe de procédés d'impression des ouvrages

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 4 sur 45

Partie 1 – Étude du besoin et du contexte

Il s'agit dans cette partie de mettre en évidence les attentes spécifiques de l'architecte, d'identifier les intérêts du procédé d'impression et les particularités techniques induites par le procédé sur le matériau utilisé.

1-1 – Analyse du besoin

Les entreprises de construction sont habituées à répondre à des demandes variées de réalisation issues des projets des architectes. Certaines demandes s'avèrent parfois particulièrement difficiles à réaliser, voire excessivement coûteuses vis-à-vis des solutions plus traditionnelles. La figure 4 ci-dessous présente un poteau en béton hydraulique de géométrie traditionnelle et la géométrie du poteau d'Aix-en-Provence.



Figure 4 – Exemple de réalisation traditionnelle et poteau imprimé en 3D

Question 1 : Décrire le procédé traditionnel permettant de réaliser sur un projet de villa, des poteaux et des murs en béton hydraulique (béton de ciment).

Question 2 : À partir des critères de performance énoncés dans le tableau 1 ci-dessous, proposer un argumentaire permettant de dresser un comparatif entre le procédé traditionnel et le procédé XtreeE. Présenter la réponse dans un tableau respectant le modèle ci-dessous.

Critères de performance	Procédé traditionnel permettant de réaliser des ouvrages en béton hydraulique de type poteaux et murs	Procédé XtreeE permettant de réaliser les ouvrages non courants
Volumes simples et pleins (cylindres, plans ...)		
Volumes complexes		
Volumes creux		
Rapidité d'exécution		
Résistance mécanique de l'ouvrage		
Performance thermique de l'ouvrage		
Coût estimé de l'ouvrage produit		

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 5 sur 45

Tournez la page S.V.P.

Tableau 1 – Comparatif des solutions de réalisation d'ouvrage en béton

1-2 – Analyse du procédé XtreeE

Le procédé de construction est basé sur une chaîne robotisée présentée dans la figure 5 ci-dessous, comportant les constituants suivants :

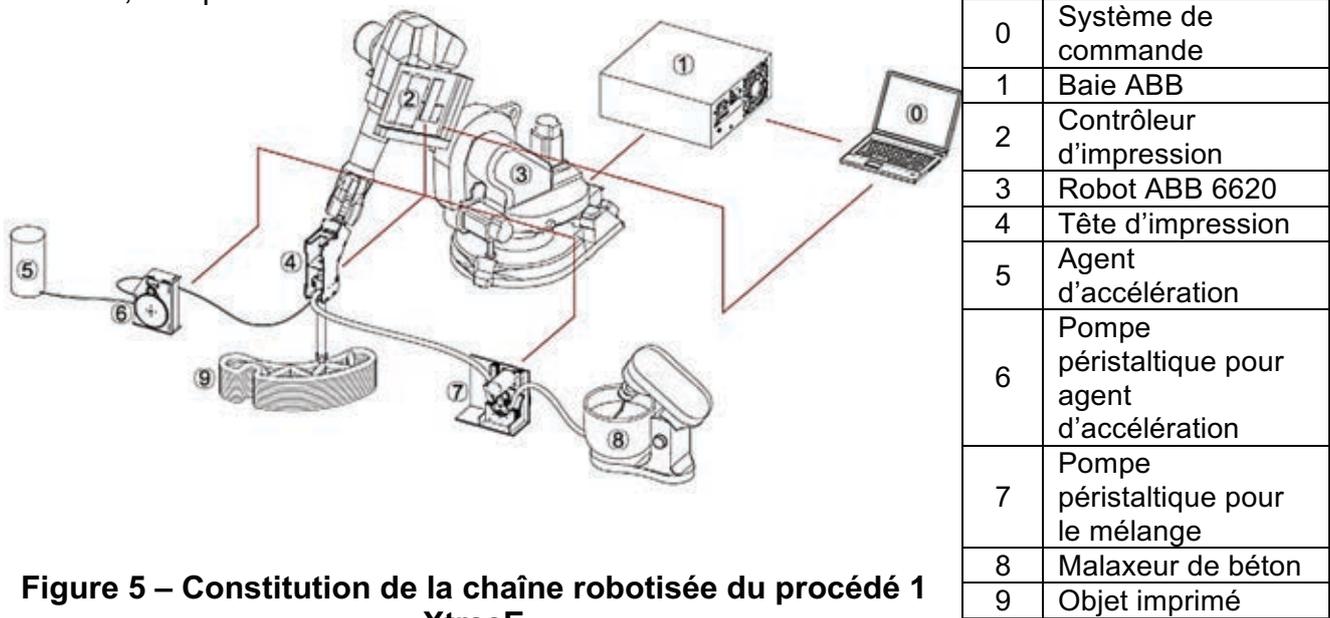


Figure 5 – Constitution de la chaîne robotisée du procédé 1 XtreeE

Question 3 : À partir des informations disponibles sur le diagramme de blocs internes de la figure 30 du DT1, identifier la nature des flux F12, F15, F16 et F17 (flux de matière, d'énergie ou d'information)

1-3 – Exigences portant sur le matériau

Le matériau « béton hydraulique » mis en œuvre dans le procédé d'impression doit vérifier plusieurs exigences de comportement, dont certaines peuvent être contradictoires.

Question 4 : En exploitant le diagramme des exigences du procédé, identifier les exigences liées au comportement mécanique de ce matériau qui semblent contradictoires.

On propose dans les questions suivantes de justifier l'emploi dans le procédé d'un adjuvant accélérateur de prise du béton.

Question 5 : En se référant au document DT2, identifier les conséquences induites par le modèle de comportement de Bingham adopté pour décrire le comportement du béton frais, lors de sa mise en œuvre dans le procédé d'impression par couches successives.

Avant d'étudier l'impression d'une géométrie complexe, on propose tout d'abord de modéliser l'impression d'une paroi verticale plane en béton de largeur w et de hauteur H .

Il s'agit, pour une inclinaison θ par rapport à la verticale de cette paroi, d'exploiter cette modélisation pour déterminer la valeur de la hauteur de béton (épaisseur et nombre de couches successives) au-delà de laquelle la paroi risque de s'effondrer si on ne fait pas varier les paramètres de comportement mécanique du matériau frais.

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 6 sur 45

Pour simplifier, l'étude se limite à un problème plan et utilise le modèle de paramétrage de la figure 6 ci-dessous :

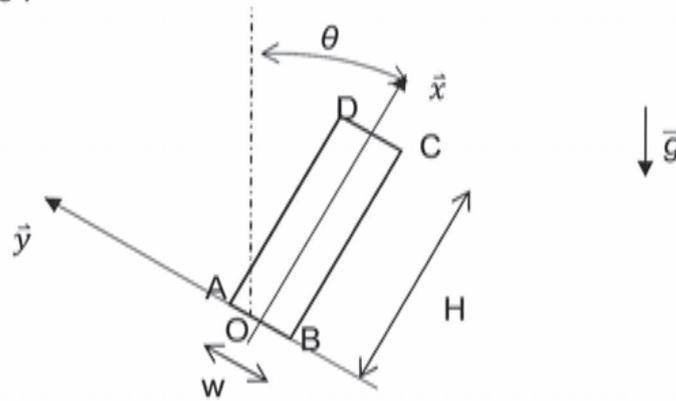


Figure 6 – Modélisation d'une paroi imprimée

Le comportement du béton en cours d'utilisation est étudié par l'analyse de l'état de contrainte mécanique du matériau extrudé autour du point B. La figure 7 présente le paramétrage utilisé par la modélisation.

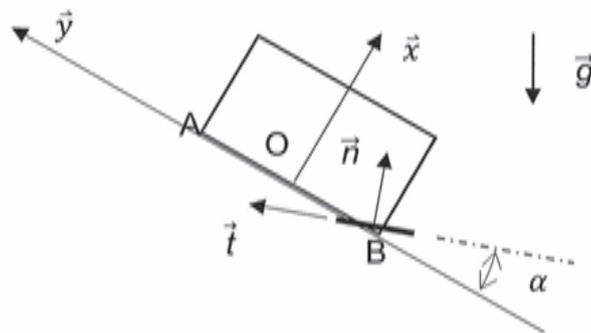


Figure 7 – Paramétrage de la modélisation des contraintes mécaniques en B sur une facette dS

Le vecteur des contraintes appliqué à la paroi de béton au point B, pour une surface élémentaire (ou facette) dS de normale \vec{n} paramétrée par un angle α (voir figure 7) s'exprime dans le repère local (B, \vec{n}, \vec{t}) de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{C(B, \vec{n})} = & -\rho_b \cdot g \cdot H \cdot \cos^2 \alpha \cdot \left(\cos \theta + 6 \cdot \frac{H}{w} \cdot \sin \theta \right) \cdot \vec{n} \\ & + \rho_b \cdot g \cdot H \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \left(\cos \theta + 6 \cdot \frac{H}{w} \cdot \sin \theta \right) \cdot \vec{t} \end{aligned}$$

Question 6 : En exploitant cette modélisation et les informations contenues dans le diagramme d'exigences (figure 28 du DT1), déterminer la valeur de la hauteur maximum H de béton frais que l'on peut imprimer sans effondrement, si l'angle θ est égal à 45° .

Question 7 : Conclure quant à la vérification de l'exigence 1.4.1 (voir figure 28 du DT1) et à la nécessité d'utiliser un accélérateur de prise.

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 7 sur 45

Partie 2 – Étude d'un ouvrage imprimé par le procédé

Il s'agit dans cette partie de mettre en évidence l'intérêt du procédé XtreeE pour la réalisation de géométries complexes, mais également pour optimiser les performances techniques et environnementales de l'ouvrage réalisé.

2-1 – Influence du procédé sur les performances mécaniques

Le premier poteau envisagé pour la villa d'Aix-en-Provence était un poteau cylindrique de diamètre 200 mm et de 3 m de hauteur. Ce poteau traditionnel a été remplacé par le poteau nervuré imprimé de même hauteur et adapté à la capacité portante recherchée. La géométrie de cet ouvrage résulte principalement d'une recherche esthétique de l'architecte, mais nécessite une validation de son comportement mécanique.

La charge verticale estimée à supporter pour ce type de poteau est évaluée sur ce projet à $N = 0,7 \text{ MN}$. Elle sera utilisée pour les deux prochaines questions.

Des simulations par éléments finis ont été réalisées sur le modèle numérique du poteau de la villa d'Aix-en-Provence, afin de contrôler les valeurs acceptables des contraintes exercées, mais également les valeurs acceptables des déformations totales du poteau (raccourcissement sous charge verticale). Le paramétrage et les résultats de la simulation sont fournis ci-après.

☐ Beton B25		☐ Force1	
Density	2.4E-06 kg / mm ³	Type	Force
Young's Modulus	11000 MPa	Magnitude	700000 N
Poisson's Ratio	0.25	X Value	1210 N
Yield Strength	25 MPa	Y Value	-699997 N
Ultimate Tensile Strength	3 MPa	Z Value	1814 N
Thermal Conductivity	0.00349 W / (mm C)	X Angle	0 deg
Thermal Expansion Coefficient	1E-06 / C	Y Angle	0 deg
Specific Heat	790 J / (kg C)	Z Angle	0 deg
		Force Per Entity	No

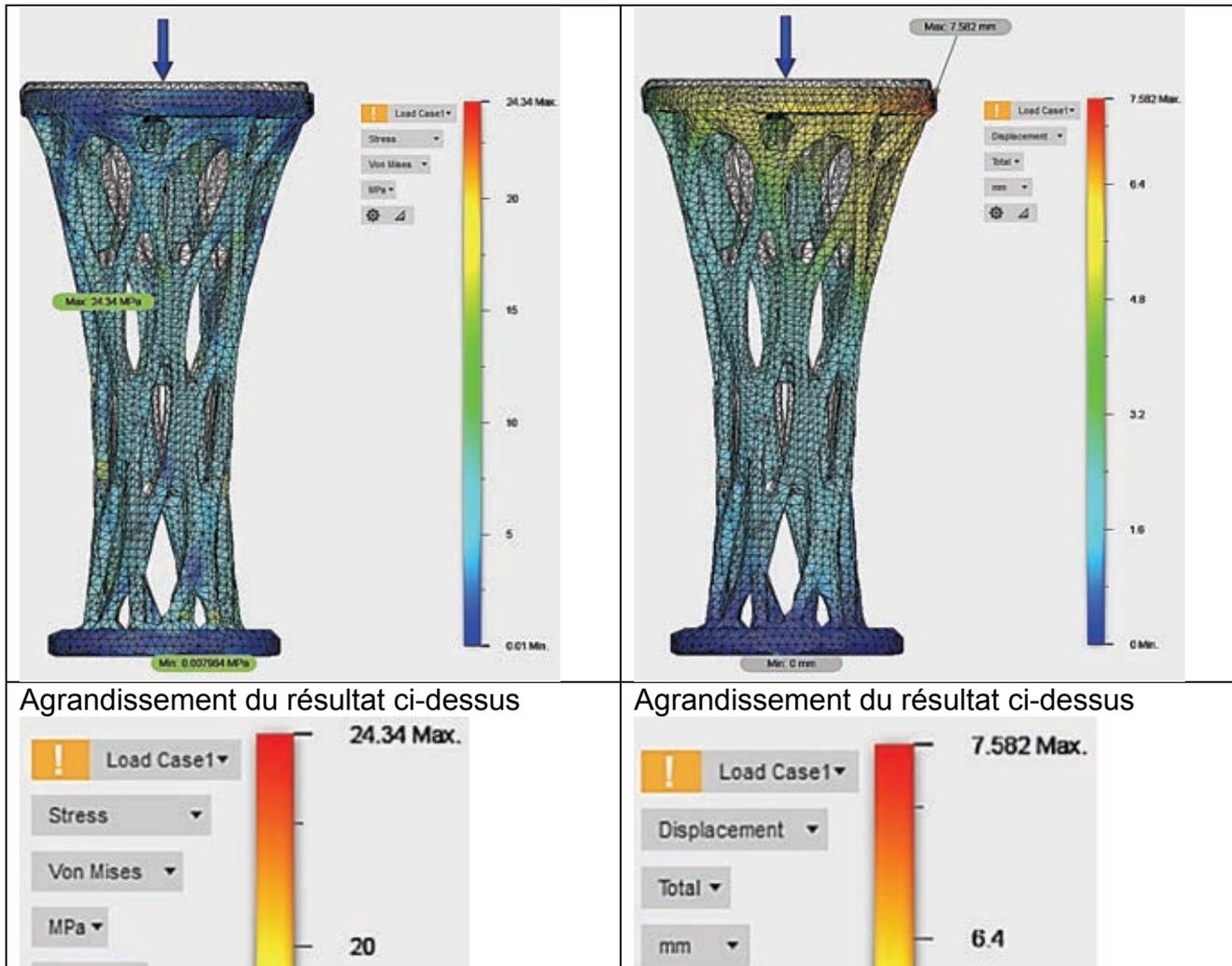


Figure 8 – Résultats de la simulation sur le poteau de la villa d'Aix-en-Provence

Données complémentaires :

La déformation totale du poteau cylindrique en béton armé est la somme de la déformation instantanée sous chargement, et la déformation de retrait et fluage. On prendra ici :

- Résistance caractéristique du béton en compression à 28 jours :
 $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$
- Résistance caractéristique du béton en compression après 60 jours :
 $f_{cj} = 1,1 \times f_{c28}$
- Module élastique de déformation longitudinale instantanée sous chargement :
 $E_{ij} = 11000 \times f_{cj}^{1/3}$
- Module élastique de déformation longitudinale différée due au retrait et au fluage :
 Pour un béton dont $f_{cj} < 60 \text{ MPa}$, on prendra ici $E_{vj} = 3700 \times f_{cj}^{1/3}$

Question 8 : Déterminer à partir des données, la contrainte verticale maximale exercée au sein du poteau cylindrique « de référence » cité précédemment, ainsi que le raccourcissement total attendu pour ce type de poteau courant. Comparer ces résultats avec ceux fournis par la simulation ci-dessus (figure 8) sur le poteau de la villa d'Aix-en-Provence et conclure quant au comportement des deux ouvrages. Argumenter sur le choix des paramètres pour la simulation.

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 9 sur 45

2-2 – Influence du procédé sur les performances thermiques

Par la suite, nous étudierons l'influence de la géométrie utilisée pour réaliser l'âme des murs de la villa de Dubaï sur les performances thermiques de ces murs. Il s'agira notamment de montrer que pour un volume de matière égal, une forme d'âme de type « boîte à œuf » (voir figure 9) ci-dessous permet d'améliorer les performances thermiques du mur imprimé (réduction du flux thermique Φ par réduction de la conduction de chaleur); par rapport à une forme d'âme « traditionnelle » (voir figure 10).

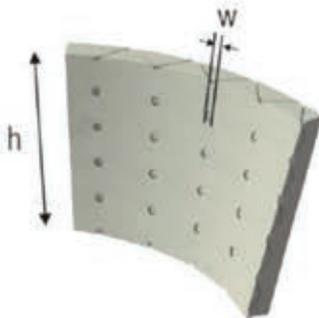
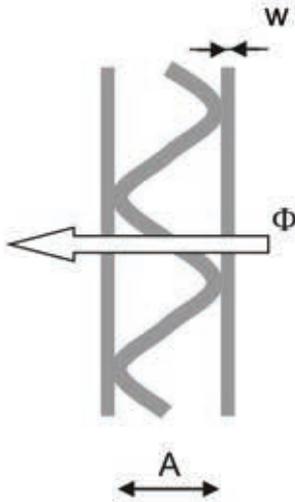


Figure 9 – Mur « boîte à œuf »

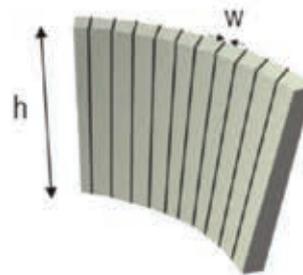
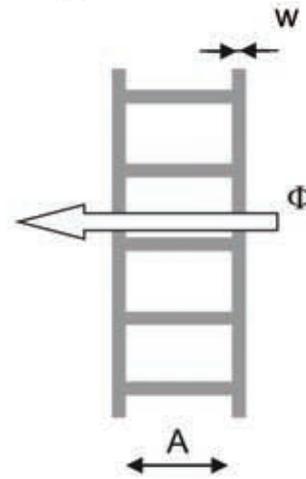


Figure 10 – Mur « traditionnel »

Le modèle mathématique utilisé pour l'impression de l'âme des murs de type « boîte à œuf » est le suivant :

$$z(x,y) = \frac{A}{2} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot y}{L}\right)$$

Où A est l'amplitude, et L la longueur d'onde.



Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 10 sur 45

Figure 11 – Représentation graphique du modèle mathématique utilisé pour l'impression de l'âme du mur

On formule l'hypothèse suivante : il est possible de négliger dans le cadre de cette comparaison les transferts de chaleur par convection et rayonnement ayant lieu au sein du mur étudié.

Question 9 : Justifier que l'on peut se limiter à l'étude d'un dôme de l'âme du mur pour déterminer la résistance thermique de cette âme.

Afin de simplifier le problème, on décide de modéliser la géométrie du « dôme » par un « dôme équivalent » ayant une forme de révolution, et dont l'équation est donnée par :

$$z(x,y) = \frac{A}{2} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{x^2+y^2}}{L}\right)$$

Ou en coordonnées polaires :

$$z(r) = \frac{A}{2} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot r}{L}\right)$$

On paramètre le problème en utilisant les conventions de la figure 12 ci-dessous :

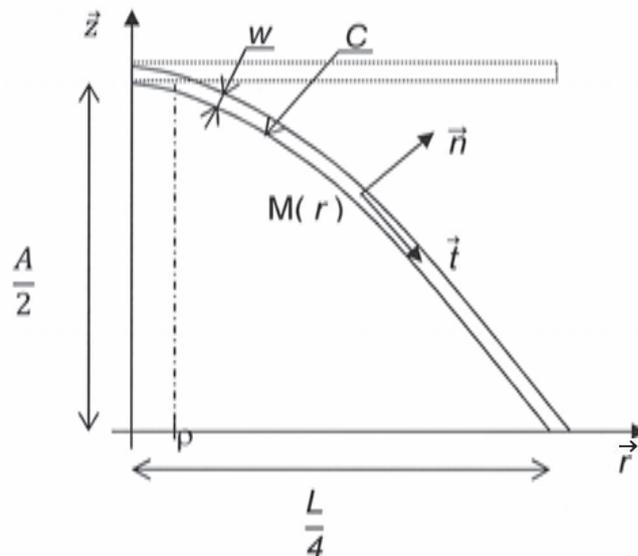


Figure 12 – Représentation graphique du modèle simplifié de dôme équivalent

On fera l'hypothèse par la suite que les isothermes sont perpendiculaires à la courbe enveloppe de l'âme notée C.

Question 10 : Préciser ce que traduit cette hypothèse ?

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 11 sur 45

Question 11 : En appliquant la loi de Fourier $\overline{\varphi(r, \theta)} = -\lambda \cdot \overline{grad(T(r, \theta))}$ rendant compte localement des phénomènes de conduction de la chaleur, démontrer que l'expression du flux de chaleur transmis par le dôme depuis sa partie supérieure peut se mettre sous la forme :

$$\phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot w \cdot \lambda}{\int_{r=\rho}^{r=\frac{L}{4}} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi \cdot A}{L} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot r}{L}\right)\right)^2} \cdot r} \cdot \left(T(r = \rho) - T\left(r = \frac{L}{4}\right)\right)$$

Pour un mur adoptant les valeurs des paramètres dimensionnels et thermiques suivantes :

- $A = 170 \text{ mm}$;
- $L = 272 \text{ mm}$;
- $\rho = 20 \text{ mm}$;
- $w = 20 \text{ mm}$;
- $\lambda = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

On donne :

$$I = \int_{r=\rho}^{r=\frac{L}{4}} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi \cdot A}{L} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot r}{L}\right)\right)^2} \cdot r \cdot dr = 2,21$$

Question 12 : Déterminer en justifiant la démarche, la valeur de la résistance thermique surfacique de l'âme du mur étudié.

Le volume surfacique de béton utilisé pour réaliser l'âme du mur est calculé numériquement, et sa valeur en prenant en compte les paramètres dimensionnels établis précédemment est :

$$V_s = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$$

La résistance thermique surfacique de l'âme d'un mur « traditionnel » mettant en œuvre la même quantité de matériaux a pour valeur :

$$R_{th} = 0,96 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Question 13 : En déduire le gain énergétique apporté par le choix d'une structure alvéolaire dans le cadre des hypothèses énoncées et conclure quant au choix de la forme « boîte à œuf » par rapport à une forme « traditionnelle ».

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 12 sur 45

Partie 3 – Étude du procédé d'impression XtreeE

L'objectif de cette partie est de déterminer les grandeurs caractéristiques des équipements mis en œuvre (vitesse d'avance de la tête d'injection, débit volumique de béton et pression de refoulement de la pompe péristaltique), dans le procédé d'extrusion, afin d'en paramétrer le pilotage.

3-1 – Cohérence des vitesses d'avance et du débit d'extrusion du béton

Afin d'assurer la dépose correcte du béton frais, il est nécessaire de respecter une vitesse de déplacement de la tête d'extrusion. Cette vitesse conditionnera par la suite la vérification des caractéristiques du portique robotisé.

Question 14 : Déterminer la vitesse que la tête d'injection doit pouvoir atteindre pour remplir l'exigence 1.4. énoncée sur le diagramme des exigences (figure 28 – DT1).

Question 15 : En s'appuyant sur les résultats précédents et sur le diagramme des exigences, déterminer le débit volumique maximum de béton qui peut être extrudé par la tête.

3-2 – Pompe péristaltique

Le béton qui sera transporté de la cuve du malaxeur à la tête d'extrusion est acheminé par une conduite souple d'une longueur de 20 m, et d'un diamètre intérieur de 40 mm. Une pompe péristaltique (pompe où le fluide est entraîné par un système pressant un tube) apporte l'énergie nécessaire à ce transport. La pompe prévue pour être utilisée sur le projet Dubaï est capable de refouler le béton avec une pression maximale de 15 bars. On se propose ici de vérifier que les caractéristiques de cette pompe seront suffisantes.

La perte de charge linéique des canalisations rectilignes de section circulaire, traversée par un béton se comportant comme un fluide de Bingham, peut être modélisée par l'expression suivante :

$$Jr = \frac{8 \cdot \mu}{\pi \cdot R^4} \cdot Q_v + \frac{8}{3} \cdot \frac{\tau_0}{R}$$

Avec :

- Jr : perte de charge linéique exprimée en $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$;
- μ : viscosité dynamique du béton exprimée en $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
- R : rayon de la canalisation exprimée en mm ;
- τ_0 : seuil de viscosité exprimée en $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-2}$;
- Q_v : débit volume exprimé en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

La perte de charge d'une conduite souple sera estimée en doublant la perte de charge d'une conduite rectiligne.

Question 16 : Vérifier que la pompe péristaltique choisie est capable d'apporter la pression nécessaire à l'impression d'un cordon de béton de 20 mm de largeur, 5 mm d'épaisseur à une vitesse d'impression de $40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, à 4 mètres au-dessus du refoulement de celle-ci.

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 13 sur 45

3.3 – Étude du lisseur

Certains clients souhaitent obtenir une paroi sans bourrelets (figure 13) pour des raisons esthétiques.

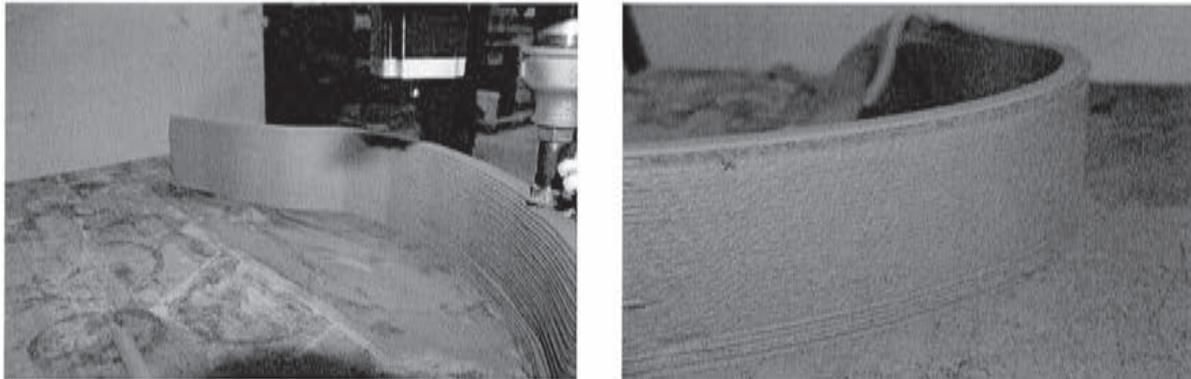


Figure 13 - Photographies de parois avec (gauche) et sans (droite) bourrelets

Pour répondre à ce besoin, la société XtreeE a développé un lisseur permettant de lisser les parois extérieures avec bourrelets. Ce lisseur est monté autour de la tête d'impression via une liaison pivot. Un moteur (objet de cette étude) permet de faire tourner le lisseur autour de la tête d'impression via deux engrenages (figures 13 et 14). L'outil permettant de supprimer les bourrelets est un outil de marque Milwaukee © (non étudié).

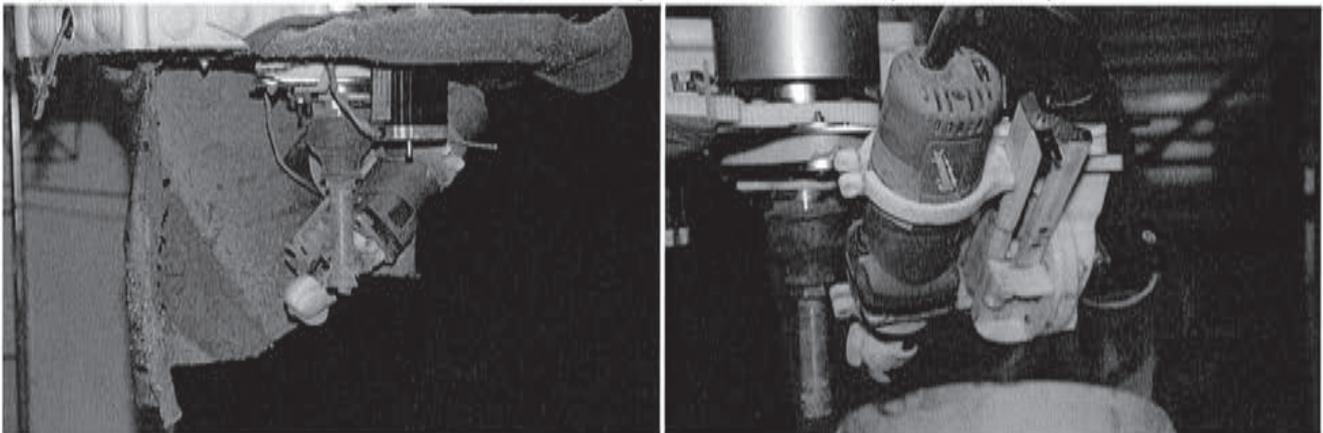


Figure 14 - Photographies du lisseur

Au travers de l'étude du lisseur, il s'agit de proposer une modification d'une conception de guidage en rotation à des fins d'amélioration de l'état de surface des parois extérieures imprimées, de déterminer le nombre de couches réalisables sans interruption et de choisir le moteur d'orientation du lisseur.

3.3.1 – Modélisation et modification de la solution constructive de la liaison pivot du lisseur.

Dans une première version, la liaison pivot entre le lisseur et la tête d'impression est réalisée par un roulement SKF 2211 E-2RS1TN9 (implantation visible sur la figure 15 et caractéristiques détaillées disponibles sur le document technique DT3).

Lors d'essais préliminaires, des défauts en dent de scie apparaissaient lors du lissage.

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 14 sur 45

Question 17 : Réaliser un schéma cinématique d'architecture de la liaison pivot entre le lisseur et la tête d'impression. Expliquer la présence de défauts en dent de scie. Proposer un schéma d'architecture permettant d'éviter les défauts en dent de scie.

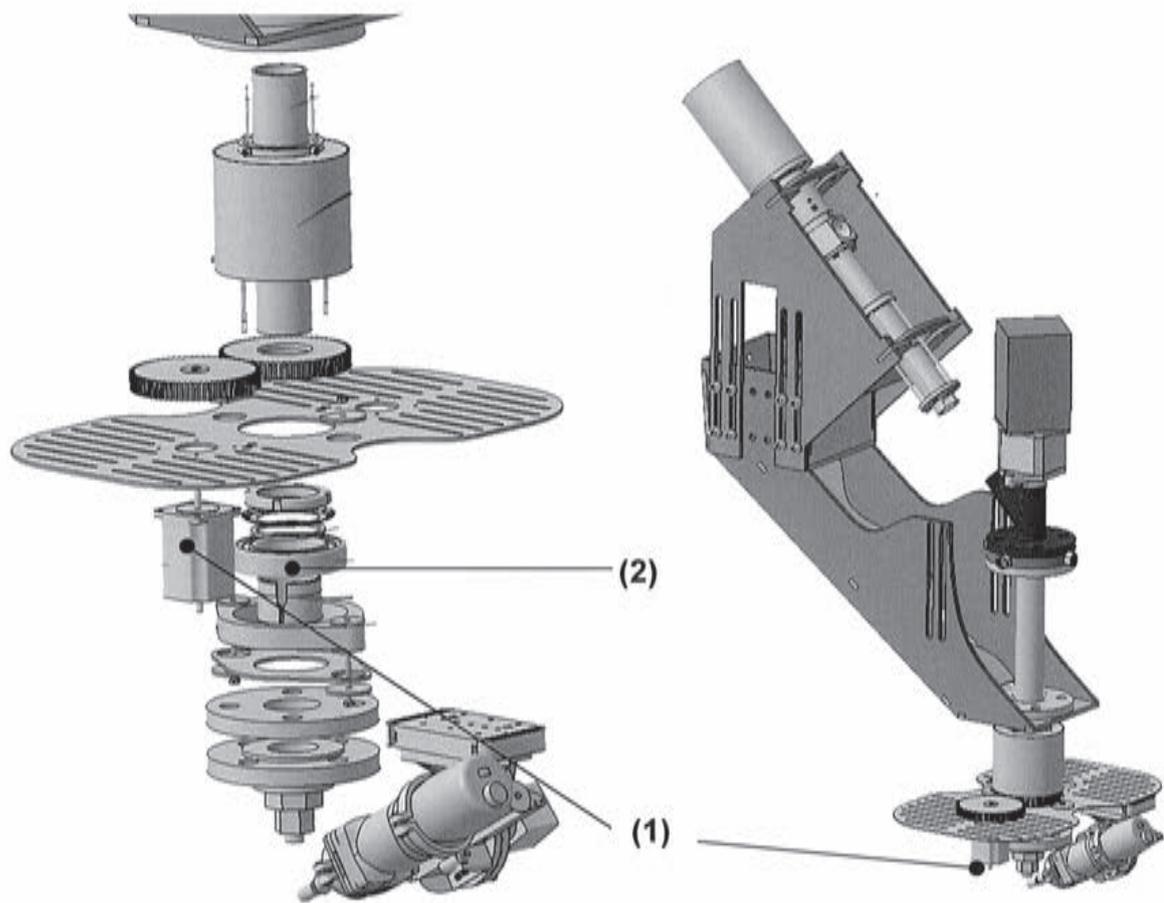


Figure 15 – Modèle numérique du lisseur. Gauche : vue éclatée du lisseur détaillant les différents composants. Droite : vue du lisseur monté sur la tête d'impression (avec quelques éléments cachés). (1) moteur d'orientation du lisseur, (2) roulement SKF.

3.3.2 – Détermination du nombre de couches réalisables sans interruption.

Afin de synchroniser la rotation du lisseur avec la trajectoire, le lisseur est piloté par la baie ABB. Le robot étant constitué de 6 axes, le lisseur est donc considéré comme un 7^e axe.

Lors de l'impression d'une couche le lisseur doit suivre la surface extérieure de la pièce imprimée. Le 7^e axe doit par conséquent faire un tour complet sur lui-même pendant l'impression d'une couche. Au bout de N -couches, l'axe du lisseur a alors tourné d'un angle de $360^\circ \cdot N$.

Question 18 : Dans la baie ABB, le codage de la valeur de l'angle étant codé sur 16 bits et la résolution souhaitée pour l'angle de l'axe du lisseur étant de 1° , déterminer le nombre de couches réalisables N sans devoir remettre la valeur de la variable à 0.

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 15 sur 45

Le logiciel ABB permet de réaliser 10000 *tours* sans avoir besoin de réinitialiser la variable à 0 avec la commande « IndReset ».

Question 19 : Indiquer le critère limitant entre le nombre de bits de codage de la baie de contrôle et le nombre de tours autorisés dans le logiciel ABB.

3.3.3 – Détermination du couple dynamique du moteur d'orientation du lisseur

Sur la figure 16, est représenté le modèle numérique du robot ABB sur lequel est fixée la tête d'impression. Le lisseur, comme explicité précédemment, est en liaison pivot avec la tête d'impression.

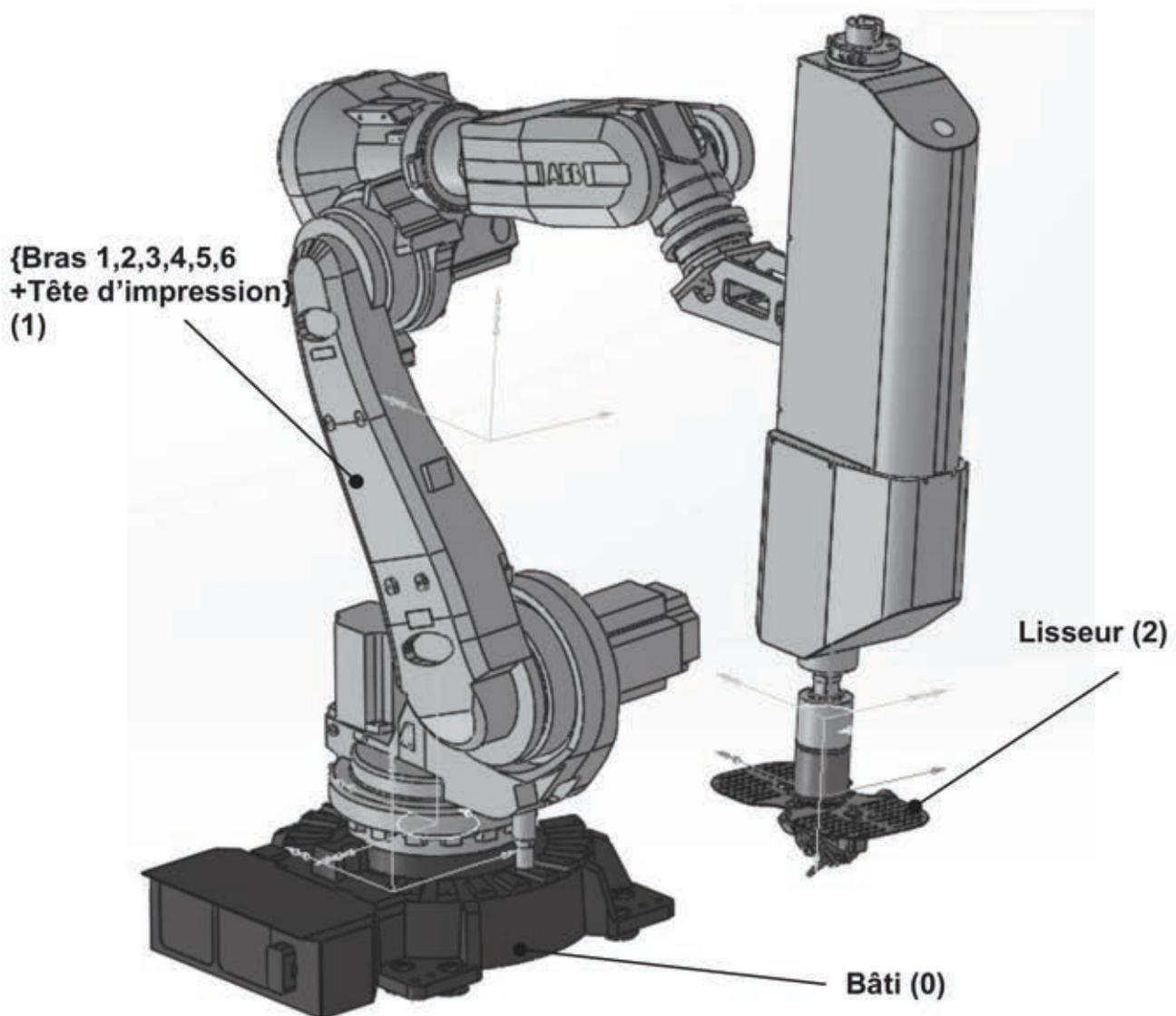


Figure 16 – Modèle numérique du robot ABB + Tête d'impression + Lisseur

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 16 sur 45

Une étude préliminaire a permis d'obtenir les vitesses et accélérations maximales auxquelles est soumis le lisseur piloté comme 7^e axe lors de l'impression d'une pièce. Dans l'étude suivante, nous utilisons une trajectoire simplifiée équivalente :

- les bras 1, 2, 3, 4, 5, 6 et la tête d'impression sont fixés entre eux. Cet ensemble est noté (1) et est en rotation autour de l'axe (O, \vec{z}) . Sa position angulaire est paramétrée par l'angle θ_1 ;
- l'axe de la tête d'impression reste vertical. Le lisseur, noté (2) est en rotation autour de l'axe vertical (A, \vec{z}) La rotation est paramétrée par l'angle θ_2 ;
- les lois cinématiques dans les liaisons pivots sont définies sur le DT4 et le DT5

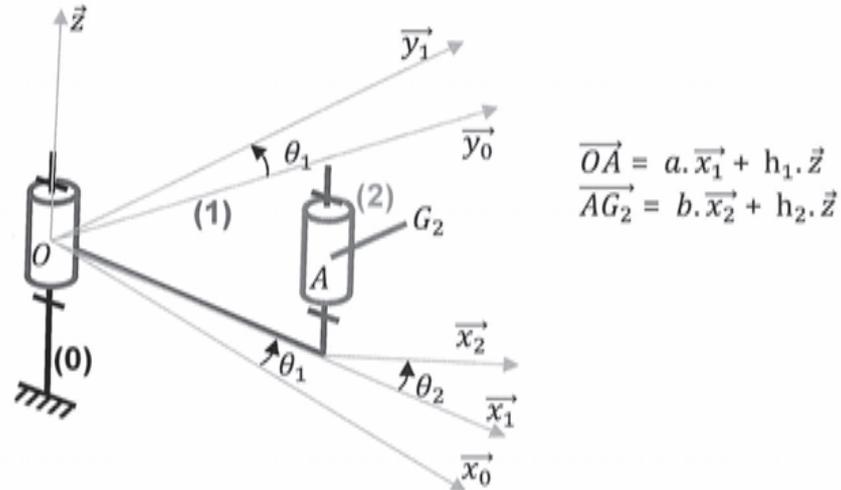


Figure 17 – Paramétrage du mécanisme étudié

Les hypothèses et notations retenues sont les suivantes :

- le référentiel $(R_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z})$ fixé au bâti du robot noté (0) est supposé galiléen ;
- la classe cinématique (1) est supposée symétrique par rapport au plan (O, \vec{x}_1, \vec{z}) ;
- le lisseur (2) est supposé symétrique par rapport au plan $(G_2, \vec{x}_2, \vec{z})$. Le point A est compris dans ce plan de symétrie.

Les matrices d'inertie des ensembles (1) et (2) sont les suivantes :

$$I(O, 1) = \begin{bmatrix} A_1 & -F_1 & -E_1 \\ -F_1 & B_1 & -D_1 \\ -E_1 & -D_1 & C_1 \end{bmatrix}_{B_1} \quad I(A, 2) = \begin{bmatrix} A_2 & -F_2 & -E_2 \\ -F_2 & B_2 & -D_2 \\ -E_2 & -D_2 & C_2 \end{bmatrix}_{B_2}$$

Question 20 : Déterminer la vitesse du point A dans son mouvement par rapport à R_0 notée $\vec{V}_{A,1/0}$ et la vitesse du point G_2 dans son mouvement par rapport à R_0 notée $\vec{V}_{G_2,2/0}$. Déterminer l'accélération du point A dans son mouvement par rapport à R_0 et l'accélération du point G_2 dans son mouvement par rapport à R_0 .

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 17 sur 45

Une roue dentée est fixée sur l'arbre du moteur d'orientation du lisseur. Cette roue dentée, engrène sur une roue dentée fixée sur la tête d'impression. Les deux roues dentées sont identiques. Le rendement de l'engrenage noté η est égal à 0.9. Le moment résistant autour de l'axe (A, \vec{z}) provoqué par les efforts de coupe du béton par l'outil est noté C_r et est fixé dans cette étude à -0.5 N.m .

Question 21 : Déterminer la relation entre le couple moteur C_m du moteur d'orientation du lisseur, le couple C_r et le moment dynamique $\overrightarrow{\delta_{A,2/0}}$.

Question 22 : Calculer la résultante dynamique du lisseur (2) dans son mouvement par rapport à R_0 notée $\overrightarrow{R_{d,2/0}}$. Calculer le moment dynamique du point A dans son mouvement de (2) par rapport à R_0 noté $\overrightarrow{\delta_{A,2/0}}$. Utiliser les notations ci-après.

Notations et formulaire : Torseur cinétique et dynamique en un point P d'un solide S dans son mouvement par rapport à un repère R de masse m, de centre d'inertie G et de matrice d'inertie $I(P, S)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{\sigma_{S/R}} \\ \overrightarrow{\delta_{P,S/R}} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{R_{c,S/R}} = \int_S \overrightarrow{V_{M,S/R}} dm = m \overrightarrow{V_{G,S/R}} \\ \overrightarrow{\sigma_{P,S/R}} = \int_S \overrightarrow{PM} \wedge \overrightarrow{V_{M,S/R}} dm = I(P, S) \overrightarrow{\Omega_{S/R}} + m \overrightarrow{PG} \wedge \overrightarrow{V_{P,S/R}} \end{array} \right\}_P$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{D_{S/R}} \\ \overrightarrow{\delta_{P,S/R}} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{R_{d,S/R_0}} = \int_S \overrightarrow{V_{M,S/R_0}} dm = m \overrightarrow{a_{G,S/R}} \\ \overrightarrow{\delta_{P,S/R}} = \int_S \overrightarrow{PM} \wedge \overrightarrow{a_{M,S/R}} dm = \left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_{P,S/R}}}{dt} \right)_R + \overrightarrow{V_{P/R}} \wedge m \overrightarrow{V_{G,S/R}} \end{array} \right\}_P$$

Question 23 : En déduire le couple moteur C_m du moteur d'orientation du lisseur.

L'utilisation d'un logiciel CAO a permis d'obtenir les caractéristiques inertielles du lisseur (2) au point G_2 :

$$I(G_2, 2) = \begin{bmatrix} 1,23 \cdot 10^8 & -2,11 \cdot 10^8 & 2,43 \cdot 10^9 \\ -2,11 \cdot 10^8 & 6,99 \cdot 10^7 & -6,08 \cdot 10^8 \\ 2,43 \cdot 10^9 & -6,08 \cdot 10^8 & 5,34 \cdot 10^7 \end{bmatrix}_{B_2} \quad [\text{en } g \cdot \text{mm}^2] ; m_2 = 2\,755 \text{ g}$$

$$\overrightarrow{AG_2} = 5,1 \cdot \overrightarrow{x_2} - 0,24 \cdot \overrightarrow{y_2} + 12,8 \cdot \overrightarrow{z} \quad [\text{en mm}]$$

(La distance suivant $\overrightarrow{y_2}$ sera négligée par la suite)

Question 24 : En reprenant les hypothèses énoncées précédemment déterminer l'expression numérique de C_2 . Faire l'application numérique (unités SI).

Question 25 : Relever sur le DT5, les vitesses et accélérations angulaires dans les deux liaisons pivots (correspondant à $\dot{\theta}_1$, $\dot{\theta}_2$, $\ddot{\theta}_1$ et $\ddot{\theta}_2$) pour un temps $t = 0.05 \text{ s}$. Faire l'application numérique de C_m pour des angles θ_1 et θ_2 nuls.

Une simulation pour déterminer le couple dynamique exercé par l'ensemble (1) sur l'ensemble (2), noté C_{12} a été réalisée à l'aide d'une suite logicielle de C.A.O. (DT 6). Cette étude ne prend pas en compte le couple C_r ni le couple moteur C_m .

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 18 sur 45

Question 26 : En exploitant les résultats de la simulation et en prenant en compte le couple C_r et le rendement de l'engrenage η déterminer le couple maximal C_{m-max} que le moteur doit développer. Comparer cette valeur à la valeur obtenue précédemment et justifier l'écart constaté. Proposer un protocole expérimental permettant de mesurer ce couple moteur directement sur le système en fonctionnement.

3.3.4 – Choix du moteur du lisseur

On souhaite dimensionner et choisir le moteur du lisseur. Le moteur est un moteur à courant continu à aimants permanents, il est alimenté en 24V continu. Une simulation du comportement du moteur a été réalisée à l'aide d'un logiciel de simulation multiphysique, pour des variations de couple exercé sur le lisseur. Pendant les essais, la tension reste constante et égale à 24V. La simulation a été faite sur une durée de 10 secondes.

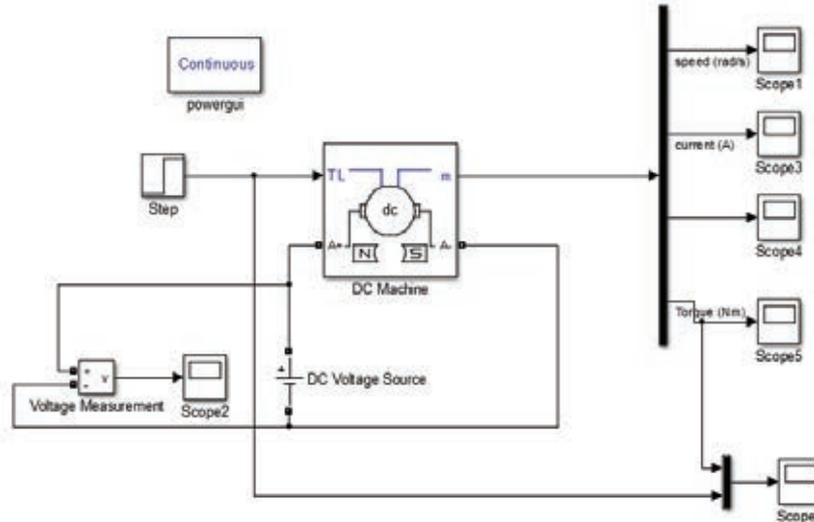


Figure 18 – Modèle multiphysique utilisé

Le résultat des relevés de deux simulations est donné dans les figures 19 et 20 ci-après :

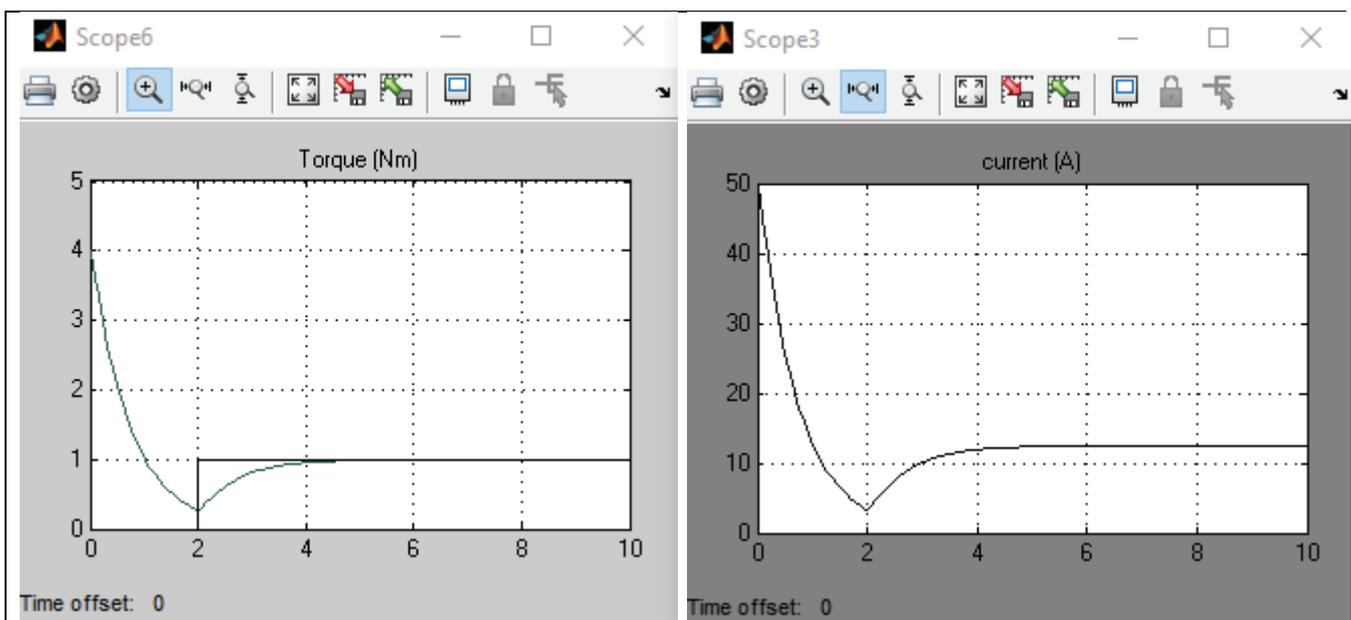


Figure 19 – Résultats des relevés de simulation

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 19 sur 45

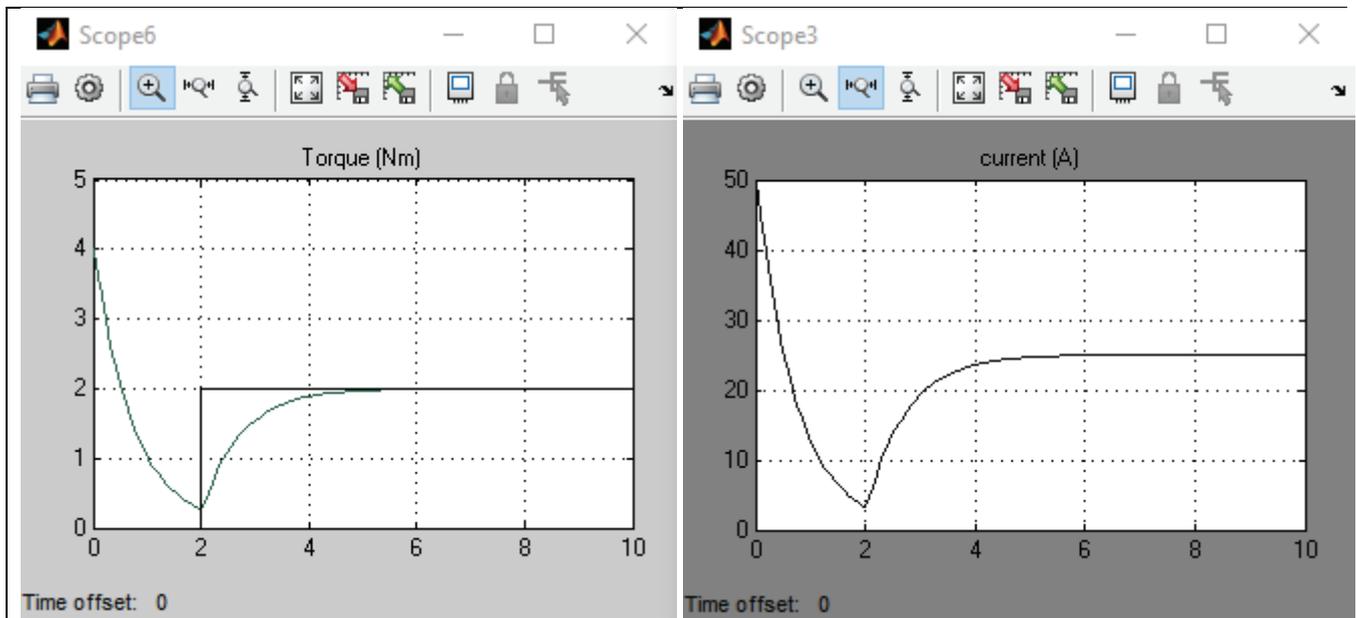


Figure 20 – Résultats des relevés de simulation

Question 27 : D'après ces simulations, le moteur peut-il suivre les variations de couple ?

Question 28 : Le moteur peut être modélisé par le schéma équivalent précisé ci-dessous en figure 21 :

- E est la force électromotrice, elle est proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur ;
- R est la résistance interne du bobinage du moteur ;
- Le couple moteur est donné par la relation suivante $C = k \cdot I$.

En exploitant les résultats des relevés de simulation, déterminer la résistance interne (R) du moteur et la constante de couple (K).

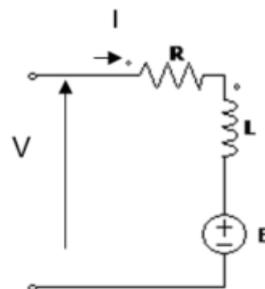


Figure 21 – Modèle de moteur

3.4 – Étude de la compatibilité électrique du système XtreeE avec les caractéristiques des réseaux électriques des pays dans lequel il sera utilisé

Les systèmes d'alimentation en énergie électrique sont différents selon les pays dans lesquels le système XtreeE sera utilisé. Il convient donc de vérifier que le système peut supporter les différentes tensions et fréquences disponibles.

Les caractéristiques des réseaux de plusieurs pays sont précisées ci-dessous :

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 20 sur 45

- France : réseau triphasé 230/400V 50Hz ; réseau triphasé 400/690V 50Hz ;
- USA : réseau triphasé 120/208V 60Hz ; réseau triphasé 277/480V 60Hz ;
- DUBAI : réseau triphasé 220/380V 50Hz ; réseau triphasé 240/415V 50Hz.

Les moteurs asynchrones utilisés sont de marque Sew-Eurodrive et du même type. La plaque du moteur du malaxeur est donnée figure 22 :

SEW-EURODRIVE			
76646 Bruchsal/Germany		E189357 CC056A	
K57 DRE90L4BE2HR/TH/AS7W		Energy Verified	
01.1965335701.0001.14		Inverter duty VPWM	
50 Hz r/min 1430/74		V 220-242Δ/380-420Y	
kW 1.5 S1		A 6.0/3,45	
kW 1.5 S1		A 4,95/2,85	
60 Hz r/min 1745/90		V 254-277Δ/440-480Y	
Th.Kl. 130(B)		S.F. 1.0	
ML03		Design NEMA C	
i 19,34		Nm 194/159	
IMM4AB		Vbr 220-277 AC	
CLP 220 Miner. Öl/2.65 l		Nm 20	
kg 55.174		AMB °C -20..40	
188 572 3DE		Made in Germany	

Figure 22 – Plaque du moteur du malaxeur

Les moteurs du portique sont des moteurs Brushless alimentés par un variateur (servo drive).

Le schéma de principe d'un variateur est donné ci-dessous :

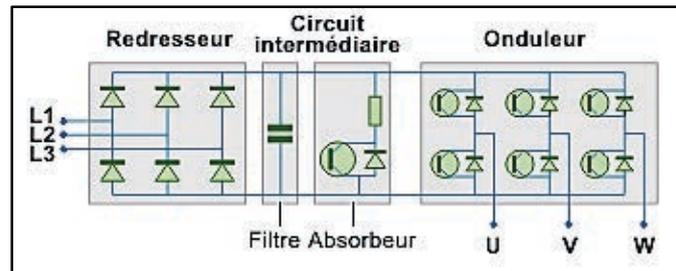


Figure 23 – Schéma de principe du variateur

Une partie des caractéristiques des variateurs est donnée figure 24.

CDHD Servo Drive Performance Data										
Ratings	1D5	003	4D5	006	008	010	012	013	020	024
Input Power Main Circuit 120/240 VAC	1 Phase	1 Phase	1/3 Phase	1/3 Phase	1/3 Phase	1/3 Phase	-	3 Phase	3 Phase	3 Phase
Input Power Main Circuit 400/480 VAC	-	3 Phase	-	3 Phase	-	-	3 Phase	-	-	3 Phase
Continuous Current A rms	1.5	3	4.5	6	8	10	12	13	20	24
Peak Current A rms	4.5	9	18	18	28	28	24	28	48	48
Basic Specifications										
Motors	DC Brushless, DC Brush			Rotary servomotors, Linear servomotors						
Current (Torque) Control	Performance			Update rate 31.25 μs (32 kHz), Output waveform sinusoidal						
	Step Response Time			Actual current reaches command in two cycles- 62.5 μs (up to 3kHz)						
Velocity Control	Control Loop			DQ, PI, Feed-forward						
	Performance			Update rate 125 μs (8 kHz)						
	Selectable Velocity Control Loops			PI, PDFF, Standard pole placement, Advance pole placement, Standard pole placement high frequency, Pole placement with active dumping						
Filters			First order low pass filter, Double first order low pass filter, Notch, High pass filter, Band pass filter, User defined polynomial filter							

Figure 24 – Caractéristiques du variateur

Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur		Session : 2018
Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique	Code :	Page 21 sur 45

Le reste du système est alimenté par des alimentations continues dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

The DPS supplies offer the advantage of a universal input voltage range, of 85V – 265VAC and are supplied as standard with a 24VDC output. 5V, 12V and 48V versions are also available.

Part Number	Description
DPS-1-005-24DC	Power Supply 90-265AC input, 24VDC Output, 5W 0.21A
DPS-1-010-24DC	Power Supply 90-265AC input, 24VDC Output, 10W 0.42A
DPS-1-018-24DC	Power Supply 90-265AC input, 24VDC Output, 18W 0.75A
DPS-1-030-24DC	Power Supply 85-264AC input, 24VDC Output, 30W 1.25A
DPS-1-060-24DC	Power Supply 85-264AC input, 24VDC Output, 60W 2.5A
DPS-1-120-24DC	Power Supply 93-264AC input, 24VDC Output, 120W 5A
DPS-1-240-24DC	Power Supply 93-264AC input, 24VDC Output, 240W 10A
DPS-1-480-24DC	Power Supply 90-264AC input, 24VDC Output, 480W 20A

Figure 25 – Caractéristiques des alimentations

Question 29 : D’après les éléments donnés (figures 22, 23, 24 et 25), contrôler en justifiant vos réponses que le système XtreeE peut être alimenté électriquement sur tous les sites.

Question 30 : Déterminer la puissance et l’intensité nécessaires pour alimenter le système par un réseau 230/400V 50 Hz, en veillant à prendre en compte une marge de 20%.

Rappels et données sur les bilans de puissance :

On rappelle les formules de calcul des puissances en triphasé :

- $P = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$ $Q = \sqrt{3}.U.I.\sin\varphi$ $S = \sqrt{3}.U.I$ $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$;
- les puissances actives P peuvent s’additionner, les puissances réactives Q peuvent s’additionner mais pas les puissances apparentes S.

Les caractéristiques des actionneurs les plus importants sont les suivantes :

- malaxeur : moteur asynchrone triphasé P=3Kw ; 230/400V ; $\eta=85\%$; $\cos\varphi= 0,82$;
- agitateur : moteur asynchrone triphasé P=1,1Kw ; 230/400V ; $\eta=81,6\%$; $\cos\varphi= 0,75$;
- pompe : moteur asynchrone triphasé P=1,5Kw ; 230/400V ; $\eta=82,8\%$; $\cos\varphi= 0,75$;
- tête d’impression : alimentation en triphasé 230/400V P= 6,5Kw avec un facteur de puissance de 0,9 ;
- ensemble des moteurs Brushless : alimentation en triphasé 230/400V I=5A avec un facteur de puissance de 0,9.