



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

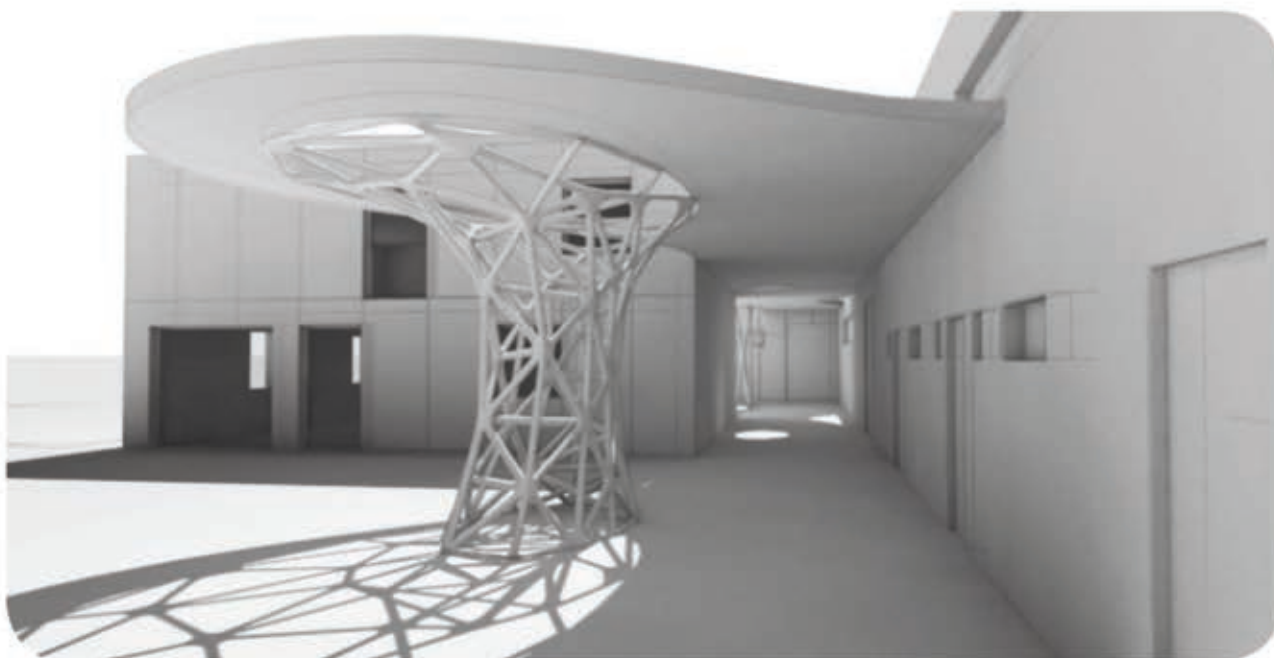
Les architectes souhaitent régulièrement réaliser des ouvrages esthétiques et non courants avec des géométries et des caractéristiques techniques fortement impactées par la réflexion et les choix artistiques.

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 architectonique 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  |

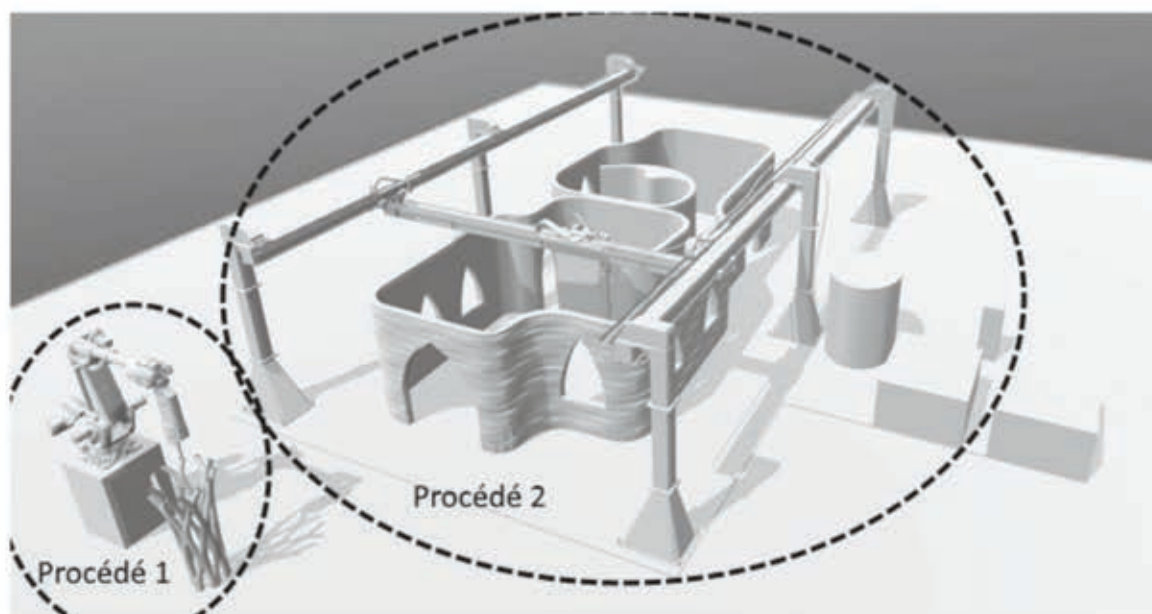
Le second projet est une villa située à Dubaï présentant de nombreuses caractéristiques géométriques non courantes et difficiles à réaliser par les techniques traditionnelles. Les murs porteurs de la villa sont constitués de surfaces non planes présentant des géométries en rubans plissés dans l'espace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

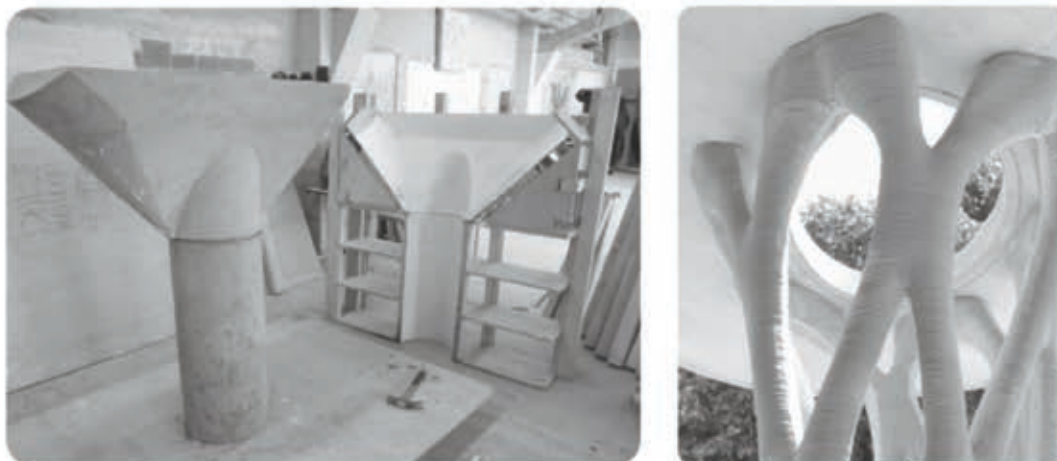
|                                                                 |        |                |
|-----------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur             |        | Session : 2018 |
| Analyse et exploitation 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                 |                                                                                                       |                                                                 |

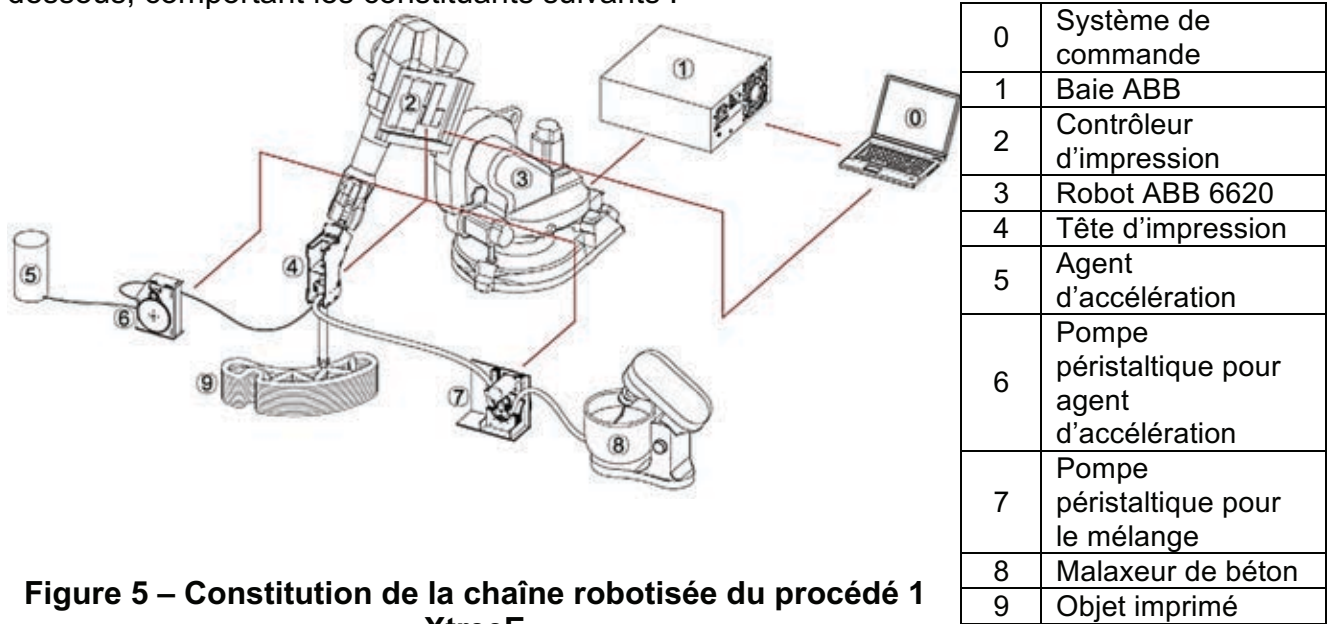
|                                                                 |        |                |
|-----------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur             |        | Session : 2018 |
| Analyse et exploitation 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  $\theta$  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.

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

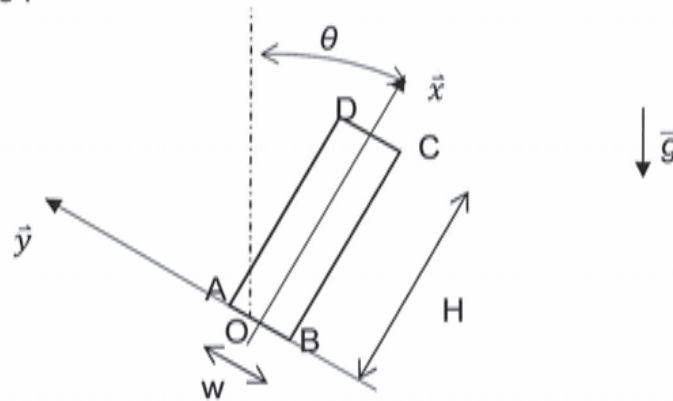


Figure 6 – Modélisation d'une paroi imprimée

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.

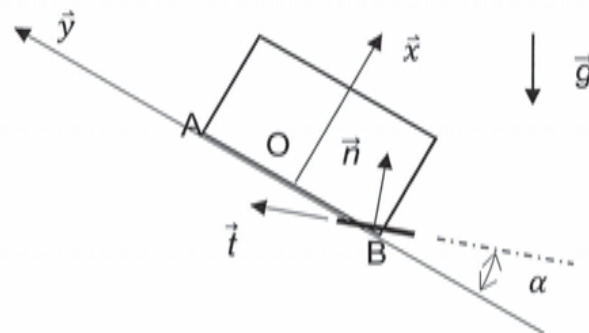


Figure 7 – Paramétrage de la modélisation des contraintes mécaniques en B sur une facette dS

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  $\alpha$  (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  $\theta$  est égal à  $45^\circ$ .

**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.

| Béton B25                     |                              | Force1           |           |
|-------------------------------|------------------------------|------------------|-----------|
| Density                       | 2.4E-06 kg / mm <sup>3</sup> | 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        |

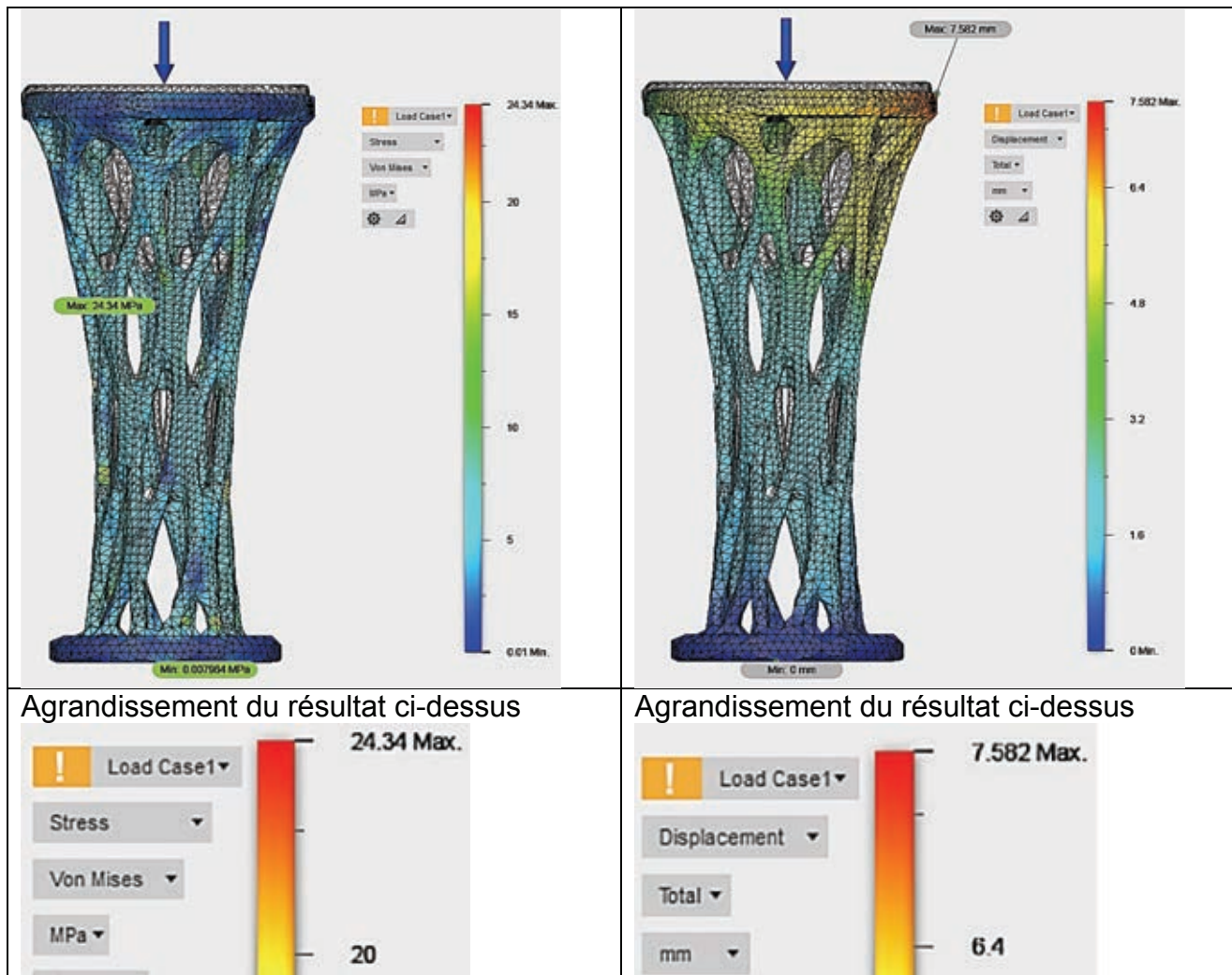


Figure 8 – Résultats de la simulation sur le poteau de la villa d'Aix-en-Provence

#### 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  $\Phi$  par réduction de la conduction de chaleur); par rapport à une forme d'âme « traditionnelle » (voir figure 10).

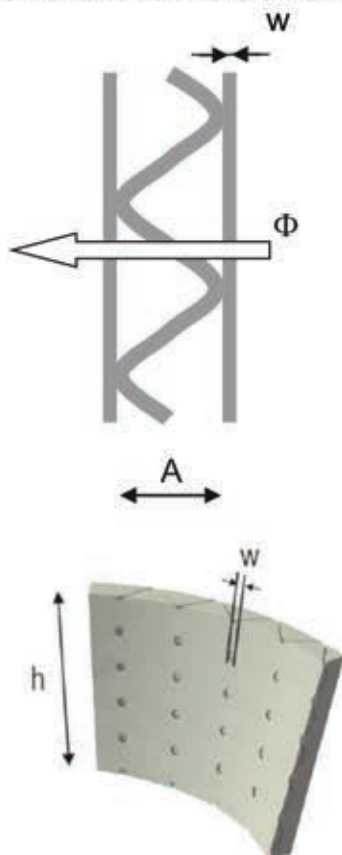


Figure 9 – Mur « boîte à œuf »

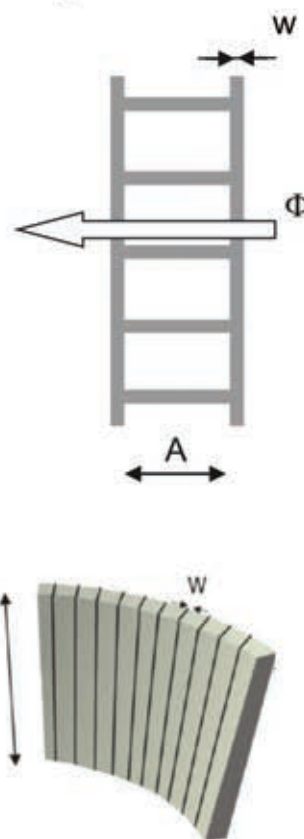
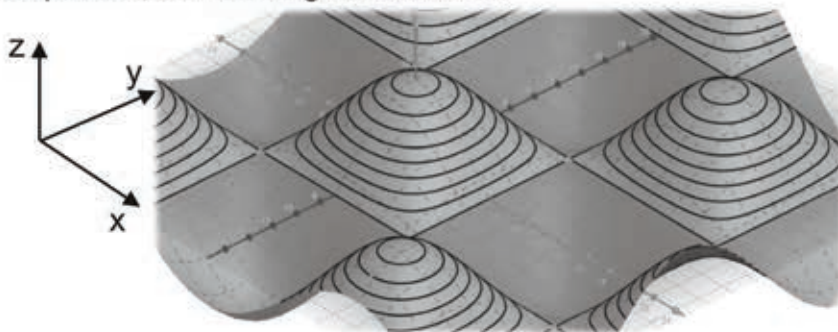


Figure 10 – Mur « traditionnel »

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.



**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.

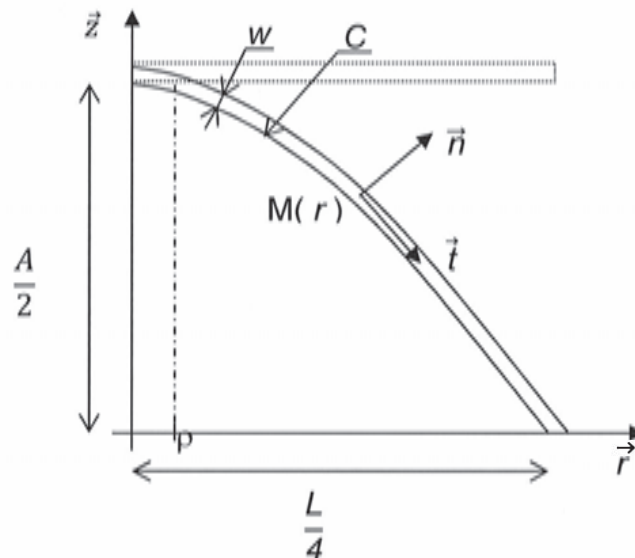
Afin de simplifier le problème, on décide de modéliser la géométrie du « dôme » par un « dôme équivalent » ayant une forme de révolution, et dont l'équation est donnée par :

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

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 :

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

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 :

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

Avec :

- $J_r$  : perte de charge linéique exprimée en  $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$  ;
- $\mu$  : viscosité dynamique du béton exprimée en  $\text{Pa} \cdot \text{s}$  ;
- $R$  : rayon de la canalisation exprimée en mm ;
- $\tau_0$  : seuil de viscosité exprimée en  $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-2}$  ;
- $Q_v$  : débit volume exprimé en  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

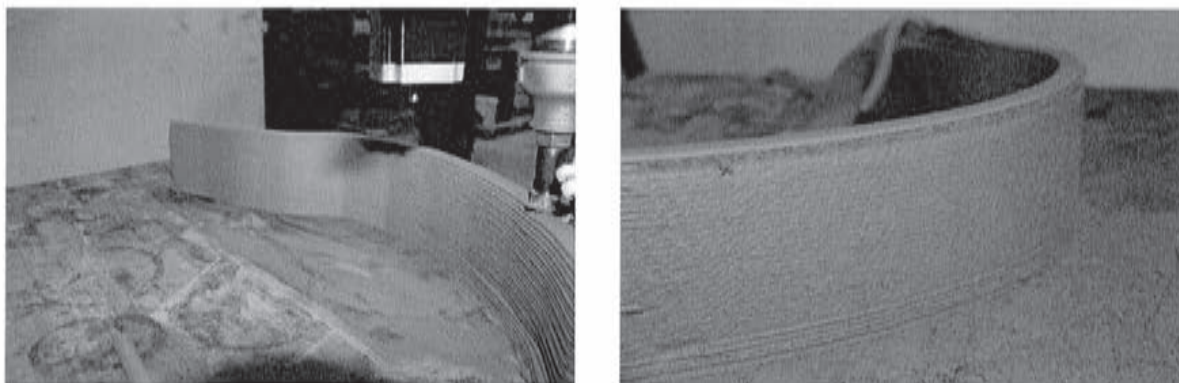
La perte de charge d'une conduite souple sera estimée en doublant la perte de charge d'une conduite rectiligne.

**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.*

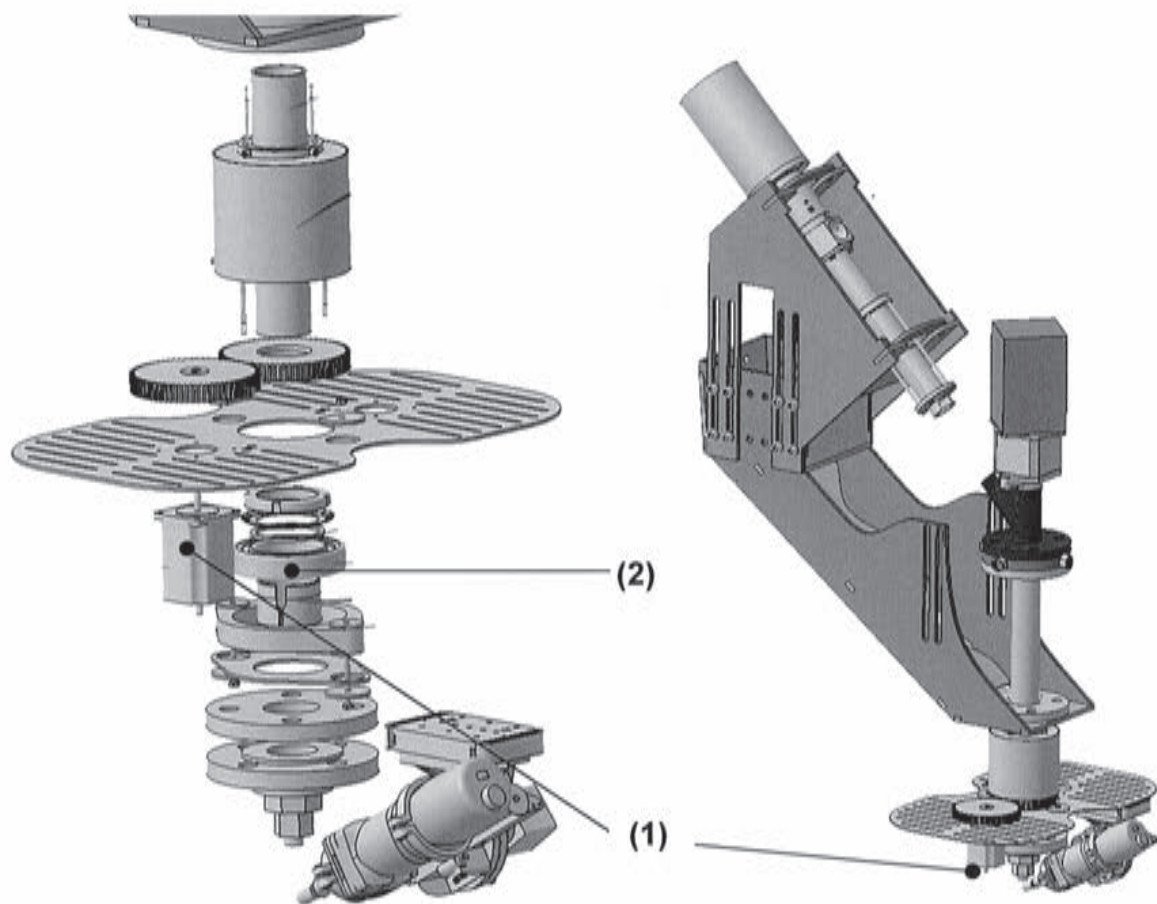
#### 3.3.1 – Modélisation et modification de la solution constructive de la liaison pivot du lisseur.

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<sup>e</sup> axe. Lors de l'impression d'une couche le lisseur doit suivre la surface extérieure de la pièce imprimée. Le 7<sup>e</sup> 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  $1^\circ$ , 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 |

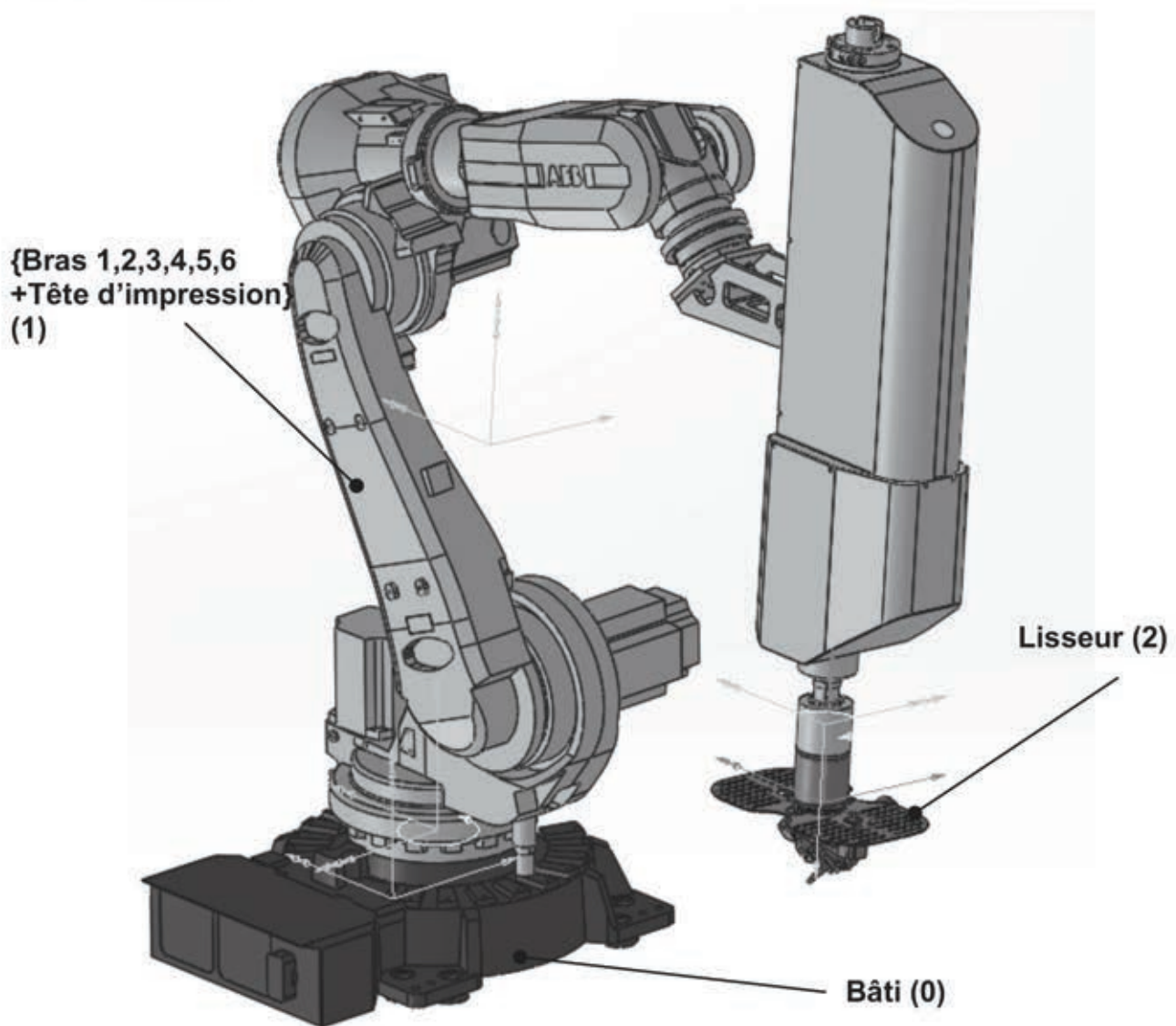
Tournez la page S.V.P.

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.

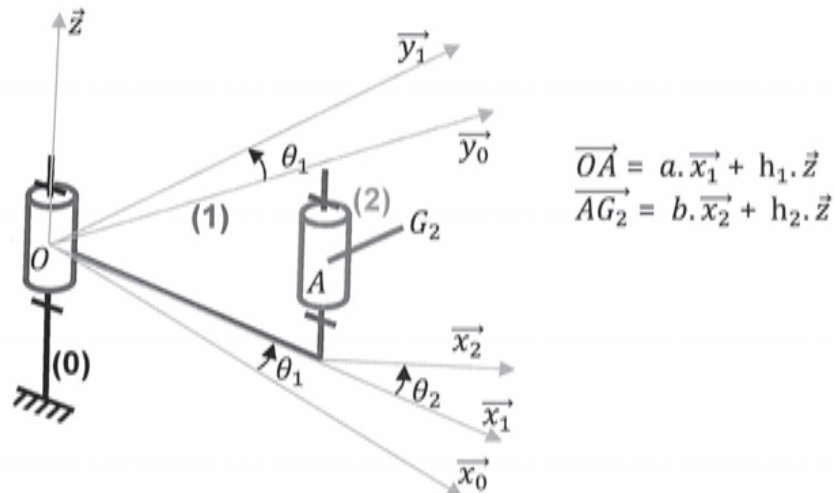


**Figure 16 – Modèle numérique du robot ABB + Tête d'impression + Lisseur**

|                                                                 |        |                |
|-----------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| 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<sup>e</sup> 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  $\theta_1$  ;
- l'axe de la tête d'impression reste vertical. Le lisseur, noté (3) est en rotation autour de l'axe vertical  $(A, \vec{z})$  La rotation est paramétrée par l'angle  $\theta_2$  ;
- 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  $R_0$ .

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  $\eta$  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  $-0.5 \text{ N.m}$ .

**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  $I(P, S)$  :

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

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

**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  $G_2$  :

$$I(G_2, 2) = \begin{bmatrix} 1,23.10^8 & -2,11.10^8 & 2,43.10^9 \\ -2,11.10^8 & 6,99.10^7 & -6,08.10^8 \\ 2,43.10^9 & -6,08.10^8 & 5,34.10^7 \end{bmatrix}_{B_2} \quad [en \text{ g.mm}^2] ; m_2 = 2\,755 \text{ g}$$

$$\overrightarrow{AG_2} = 5,1.\vec{x}_2 - 0,24.\vec{y}_2 + 12,8.\vec{z} \quad [en \text{ mm}]$$

(La distance suivant  $\vec{y}_2$  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  $t = 0.05s$ . Faire l'application numérique de  $C_m$  pour des angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$  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  $\eta$  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.

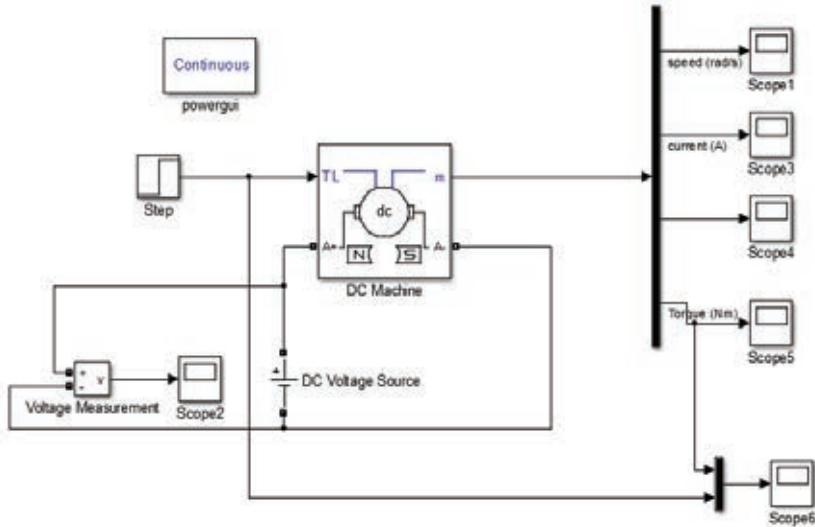


Figure 18 – Modèle multiphysique utilisé

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

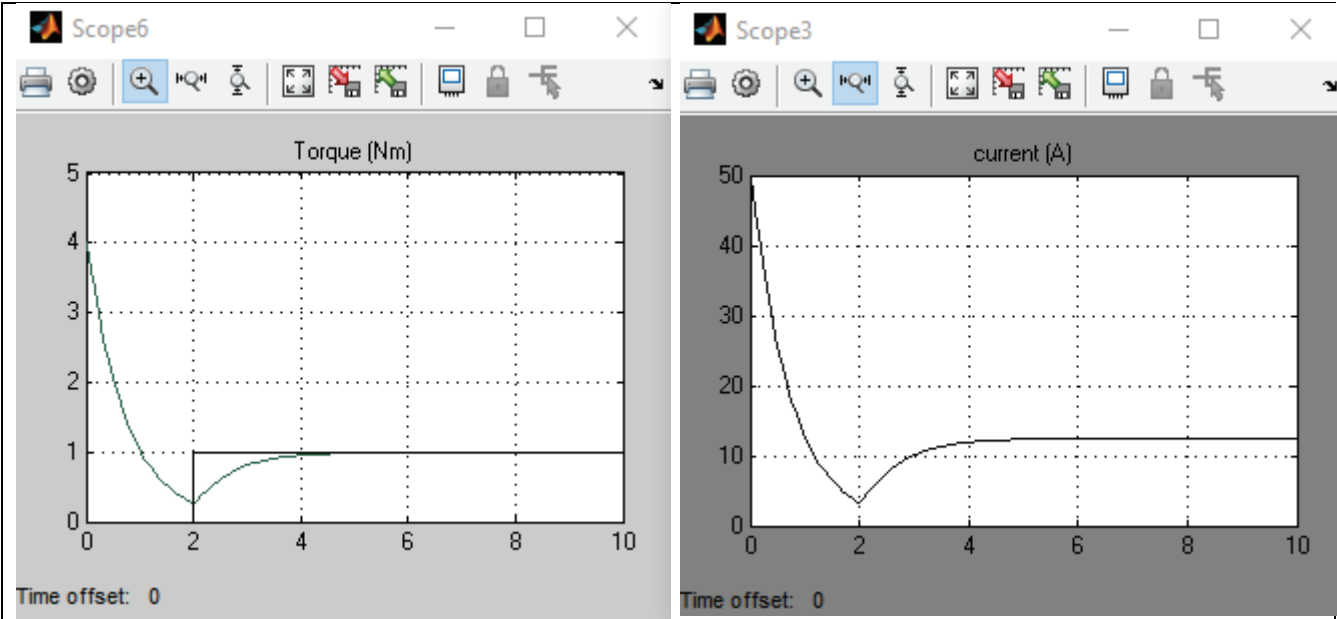
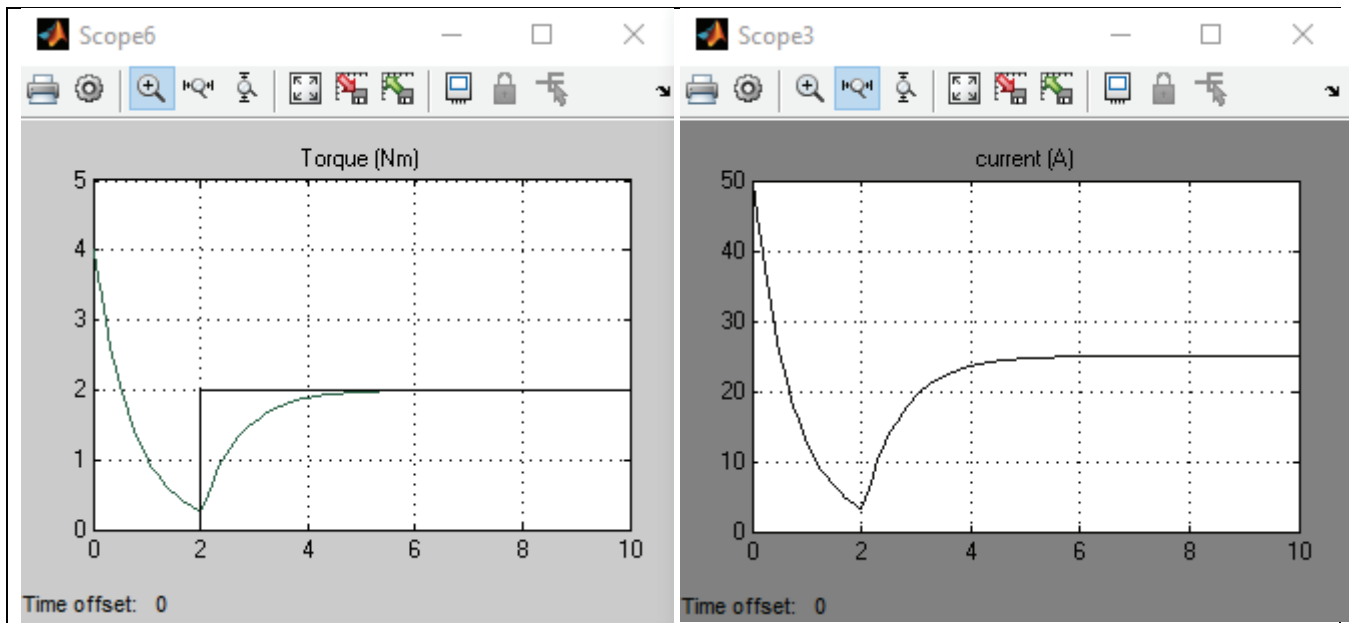


Figure 19 – Résultats des relevés de simulation

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



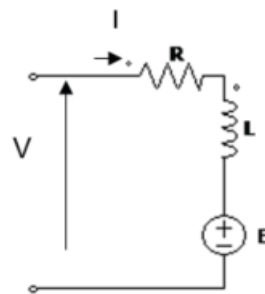
**Figure 20 – Résultats des relevés de simulation**

**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.

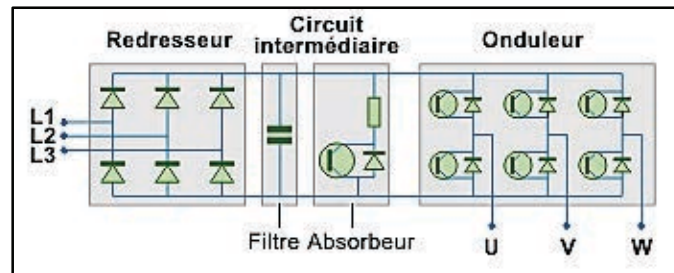
Les moteurs asynchrones utilisés sont de marque Sew-Eurodrive et du même type. La plaque du moteur du malaxeur est donnée figure 22 :

|                                                                                   |  |                                                                                                           |  |                                                                                   |  |                                                                                    |  |                                                                                     |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>SEW-EURODRIVE</b>                                                              |  |                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
| 76646 Bruchsal/Germany                                                            |  |                                                                                                           |  | E189357 CC056A                                                                    |  | MCT70602                                                                           |  | Energy Verified                                                                     |  |
| <b>K57 DRE90L4BE2HR/TH/AS7W</b>                                                   |  |                                                                                                           |  | Inverter duty VPWM                                                                |  | 3ph.IEC60034                                                                       |  |                                                                                     |  |
| 01.1965335701.0001.14                                                             |  |                                                                                                           |  |                                                                                   |  |                                                                                    |  |                                                                                     |  |
| 50 Hz                                                                             |  | r/min 1430/74                                                                                             |  | V 220-242Δ/380-420Y                                                               |  | IP 54                                                                              |  | TEFC                                                                                |  |
| kW 1.5 S1                                                                         |  | A 6.0/3,45                                                                                                |  | P.F. 0,77                                                                         |  | eff% 84,0 IE2                                                                      |  |                                                                                     |  |
| kW 1.5 S1                                                                         |  | A 4,95/2,85                                                                                               |  | P.F. 0.76                                                                         |  | eff% 85,5 IE2                                                                      |  |                                                                                     |  |
| 60 Hz                                                                             |  | r/min 1745/90                                                                                             |  | V 254-277Δ/440-480Y                                                               |  | K.V.A-Code L                                                                       |  |                                                                                     |  |
| Th.Kl. 130(B)                                                                     |  | S.F. 1.0                                                                                                  |  | ML03                                                                              |  | Design NEMA C                                                                      |  |                                                                                     |  |
|                                                                                   |  |                                                                                                           |  |                                                                                   |  | Vbr 220-277 AC                                                                     |  |                                                                                     |  |
| i 19,34                                                                           |  | Nm 194/159                                                                                                |  | IM M4AB                                                                           |  | Nm 20                                                                              |  |                                                                                     |  |
|  |  |  CLP 220 Miner.Öl/2.65 l |  |                                                                                   |  | BG1.5                                                                              |  |                                                                                     |  |
| 84.0                                                                              |  | 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)                                                                         |           |           |         |         |         |         |
|                                      | Control Loop                      |         |           | DQ, PI, Feed-forward                                                                                                                       |           |           |         |         |         |         |
| Velocity Control                     | 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 :

- $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$      $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$      $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$      $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  ;
- 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.

## Partie 4 – Analyse et proposition d'une séquence pédagogique

*Cette partie traite de l'élaboration d'une organisation de séquence pédagogique relative aux enseignements technologiques du cycle terminal « sciences et technologies de l'industrie et du développement durable » Cette séquence devra répondre à plusieurs attendus précisés ci-dessous et sera préparée pour un groupe de 30 élèves de première STI2D qui n'ont pas encore choisi leur spécialité.*

|                    |                                                                                                                                                                                       |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Attendu N°1</b> | La séquence sera à placer en tout début de classe de 1 <sup>re</sup> , dans le cadre de l'expérimentation de la période de détermination du premier trimestre STI2D (voir figure 26). |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

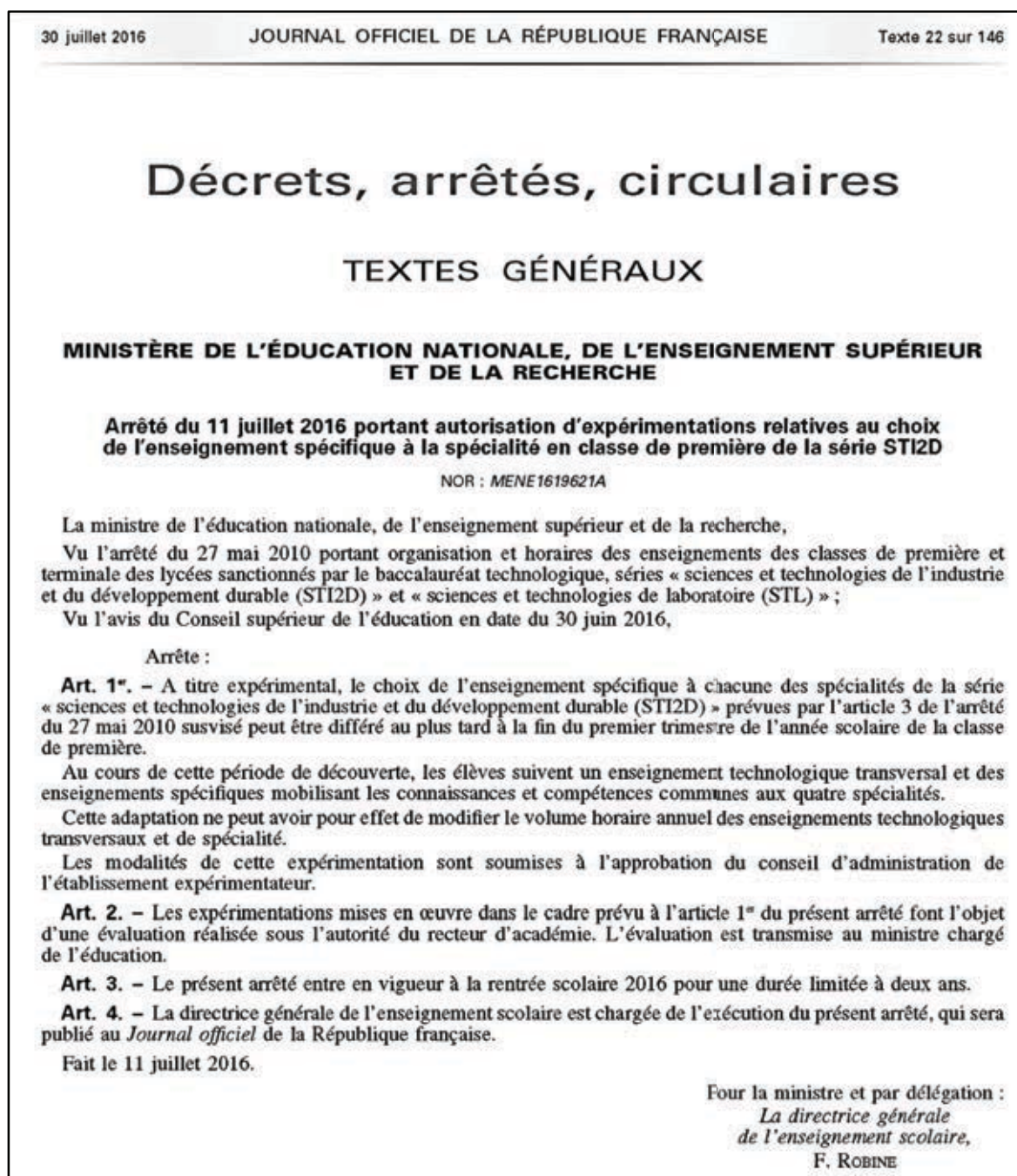


Figure 26 – Arrêté du 11 juillet 2016

|                                                                 |        |                |
|-----------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur             |        | Session : 2018 |
| Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique | Code : | Page 23 sur 45 |

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Attendu N°2</b> | La séquence veillera à présenter les modalités de formation du baccalauréat technologique STI2D, et particulièrement l'articulation entre l'enseignement transversal et les enseignements de spécialité.                                                                                                                                      |
| <b>Attendu N°3</b> | La séquence veillera à présenter et mettre en valeur de manière équilibrée chacune des quatre spécialités.                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Attendu N°4</b> | La séquence veillera à placer les élèves dans des démarches actives et réflexives.                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Attendu N°5</b> | La séquence, située en début de formation, veillera à présenter aux élèves les principales innovations et évolutions technologiques qui traversent l'industrie                                                                                                                                                                                |
| <b>Attendu N°6</b> | La séquence pédagogique veillera à exploiter les ressources fournies dans le sujet (procédé XtreeE) et les documents DP 1 à DP 8. L'organisation de la séquence inclura au moins une séance de 2h en classe entière en enseignements technologiques transversaux permettant d'apporter aux élèves l'état de l'art de la fabrication additive. |

**Question 31 :** Détailler les repères de progressivité à définir par le professeur pour contribuer, dans cette séquence, à atteindre partiellement les objectifs O1 et O4 fixés dans le programme de formation. Utiliser le modèle de tableau ci-dessous.

| Objectif défini au référentiel                                                                         | Repère de progressivité | Justification |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------|
| O1 : caractériser des systèmes privilégiant un usage raisonné du point de vue du développement durable |                         |               |
| O4 : Décoder l'organisation fonctionnelle, structurelle et logicielle d'un système                     |                         |               |

**Question 32 :** Identifier en lien avec les objectifs précédents, les indicateurs de réussite (observables par le professeur) de la séquence. Utiliser le modèle de tableau ci-dessous.

| Objectif visé | Indicateur de réussite | Justification |
|---------------|------------------------|---------------|
|               |                        |               |
|               |                        |               |

**Question 33 :** Définir de manière précise l'organisation d'une séance de 2h en classe entière en enseignements technologiques transversaux incluse dans la séquence et qui porterait plus spécifiquement sur l'objectif O3 et l'état de l'art de la fabrication additive. Préciser notamment :

- les activités des élèves ;
- les activités du professeur ;
- les ressources pédagogiques nécessaires ;
- le phasage et déroulement de la séance ;
- toutes autres précisions utiles à la compréhension de la séance.

**Question 34 :** Préciser les liens à prévoir entre cette séquence et les enseignements dispensés dans les spécialités.

|                                                                 |        |                              |
|-----------------------------------------------------------------|--------|------------------------------|
| Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur             |        | Session : 2018               |
| Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique | Code : | Page <b>24</b> sur <b>45</b> |

**Question 35 :** Définir le nombre de séances et les thèmes des séances composant la séquence.

**Question 36 :** Définir la position et la durée de la séquence dans la période d'expérimentation. Justifier les choix réalisés.

**Question 37 :** Définir de manière précise le contenu du document de structuration des connaissances à élaborer pour la séquence ainsi développée.

**Question 38 :** Définir les modalités du suivi des progrès des élèves pendant cette séquence. Préciser les outils d'évaluation à mobiliser et leurs impacts sur les stratégies pédagogiques à déployer dans les séquences pédagogiques suivantes.

## DOCUMENTS TECHNIQUES

DT 1 – Diagrammes SYSML du système

DT 2 – Caractéristiques du matériau béton du procédé XtreeE

DT 3 – Extrait de documentation SKF

DT 4 – Paramétrages de la simulation mécanique

DT 5 – Lois cinématiques utilisées pour la simulation mécanique

DT 6 – Couple moteur inconnu calculé dans la liaison Pivot 2

|                                                                 |        |                              |
|-----------------------------------------------------------------|--------|------------------------------|
| Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur             |        | Session : 2018               |
| Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique | Code : | Page <b>26</b> sur <b>45</b> |

## DT 1 – Diagrammes SYSML du système

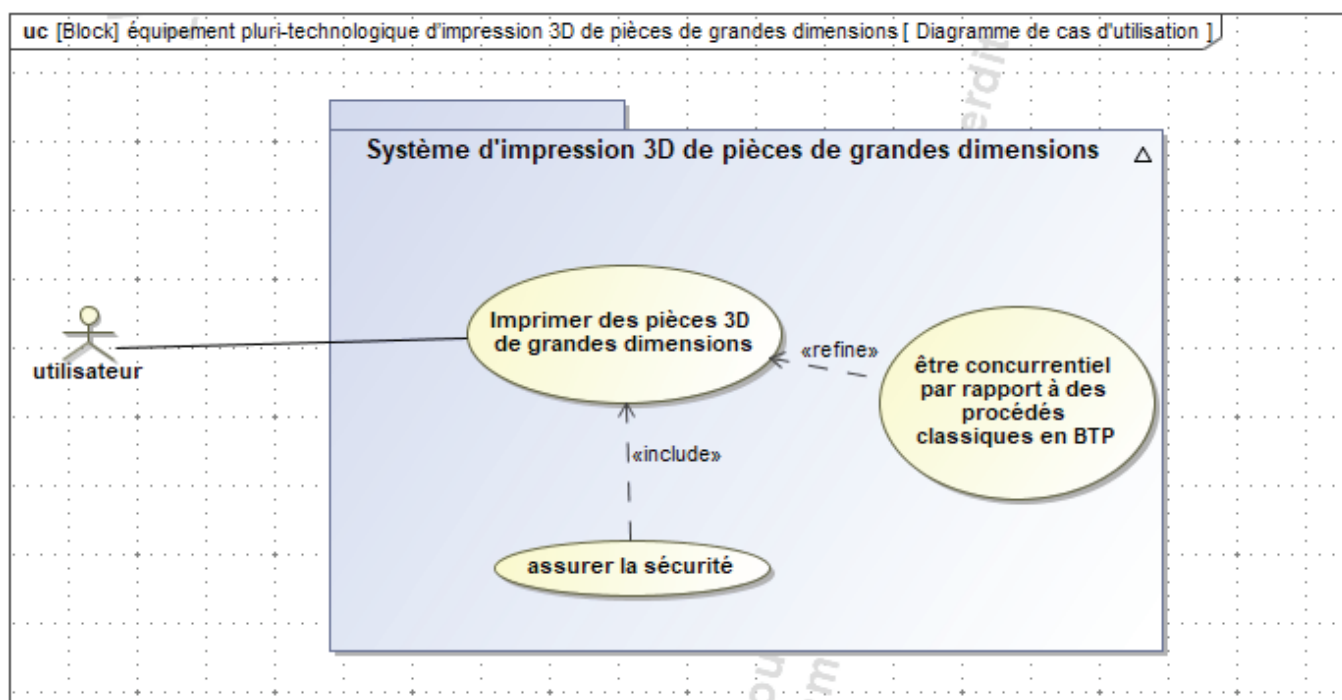


Figure 27 – Diagramme de cas d'utilisation

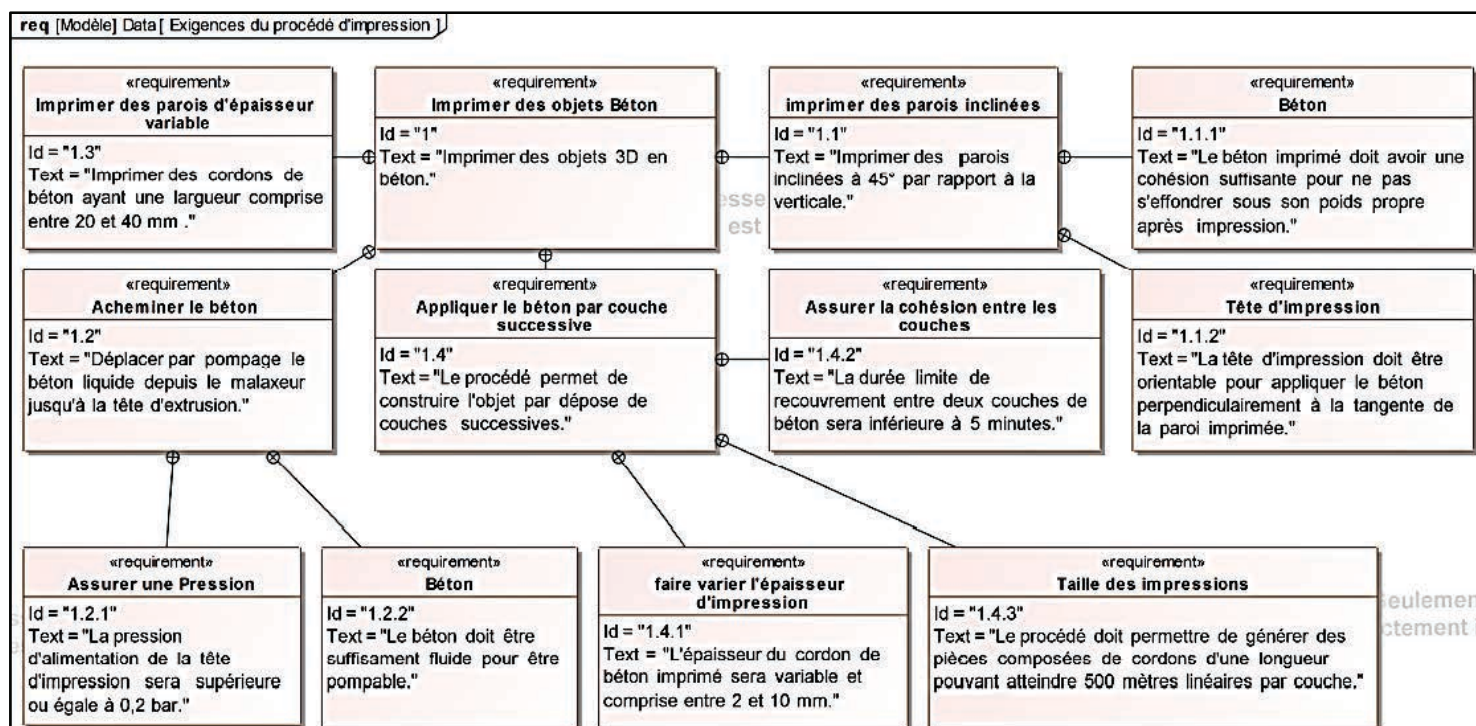
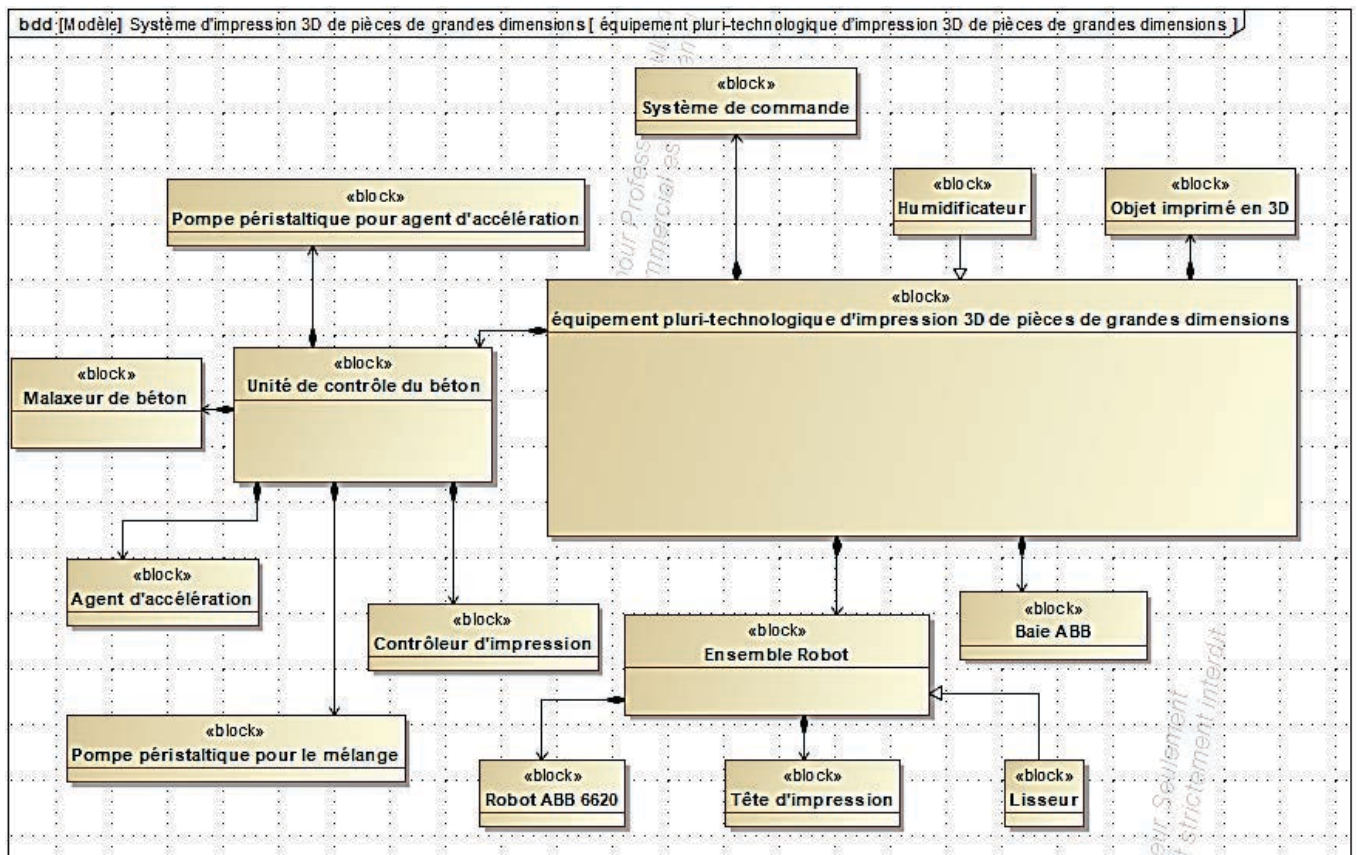


Figure 28 – Diagramme d'exigences

## DT 1 – Diagrammes SYSML du système



**Figure 29 – Diagramme de définition de blocs**

## DT 1 – Diagrammes SYSML du système

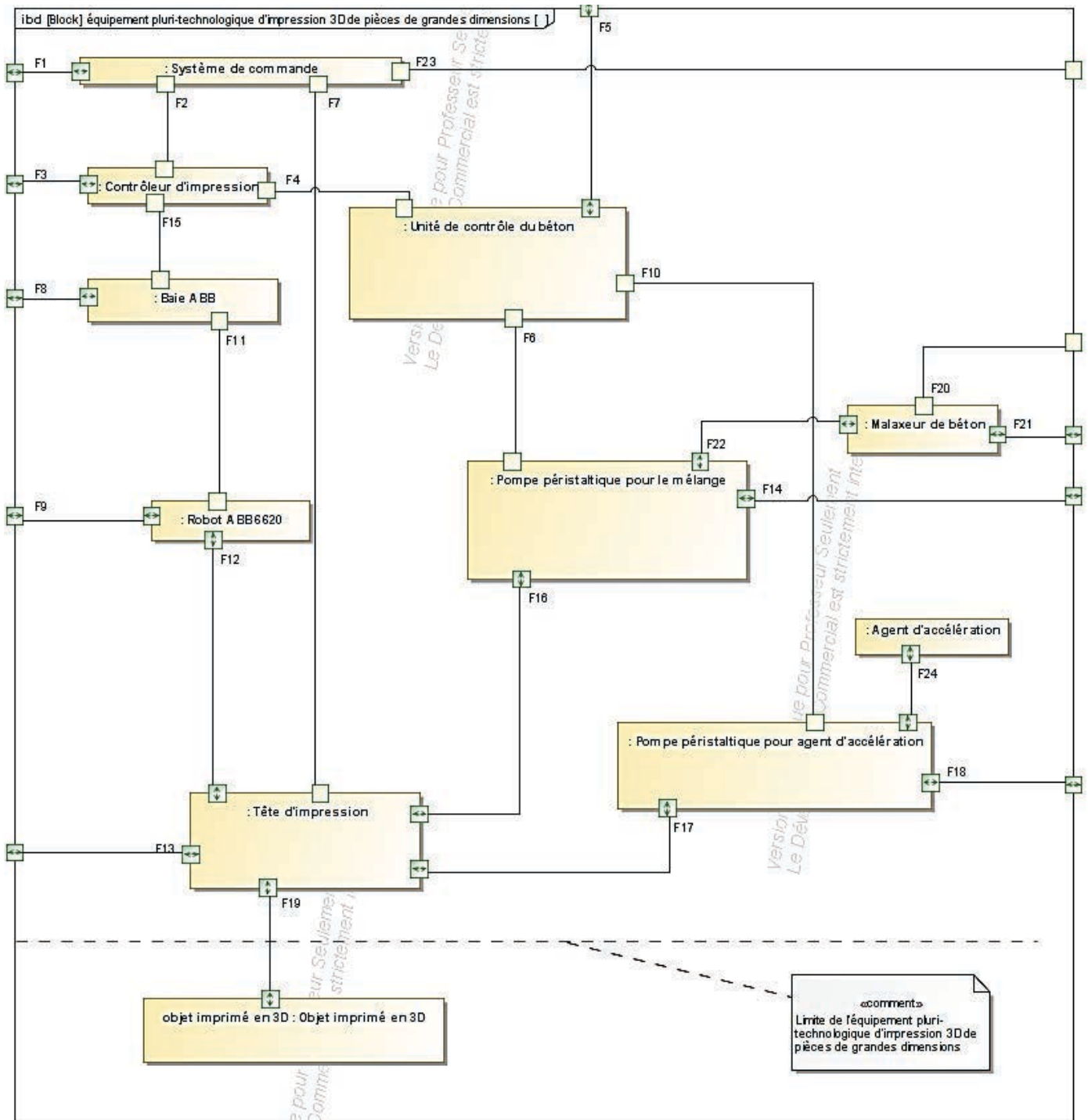


Figure 30 – Diagramme de bloc interne

## DT 2 – Caractéristiques du matériau béton du procédé XtreeE

### Composition en masse :

Ciment type CEM I : 35%  
Sable : 45 %  
Filler calcaire : 10 %  
Cendres volantes : 10 %  
Eau : 8 % de la masse de poudre

### Béton frais :

Masse volumique :  $\rho_b = 2310 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Le comportement rhéologique\* du béton frais étudié est modélisé par le modèle de Bingham, caractérisé par la relation suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Avec :

- la contrainte de cisaillement :  $\tau$
- le seuil de viscosité :  $\tau_0 = 160 \text{ Pa}$
- la viscosité dynamique :  $\mu = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- la vitesse de cisaillement :  $\dot{\gamma}$

\* Rhéologie : étude de la déformation et de l'écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte appliquée.

### Béton sec après 90 jours :

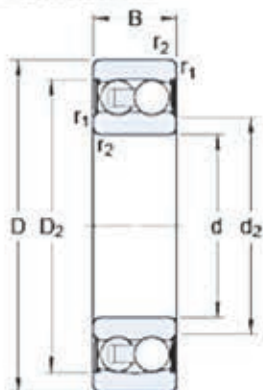
Masse volumique :  $\rho_b = 2250 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Résistance mécanique à la compression :  $\sigma > 120 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

## DT 3 – Extrait de documentation SKF

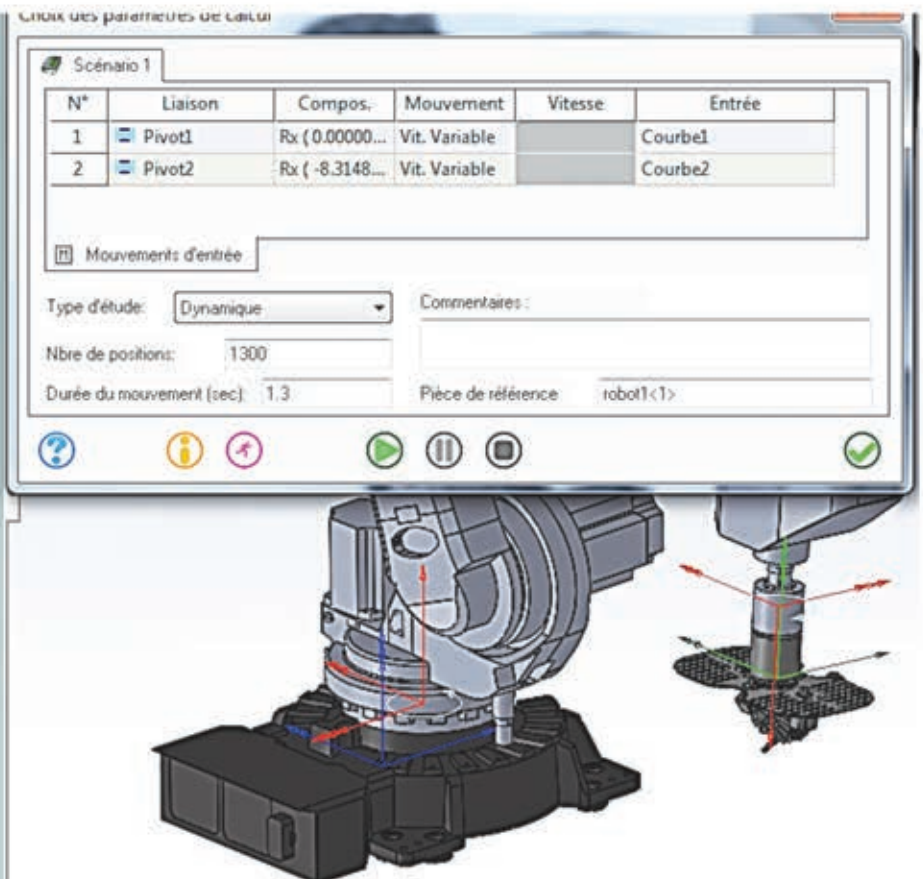
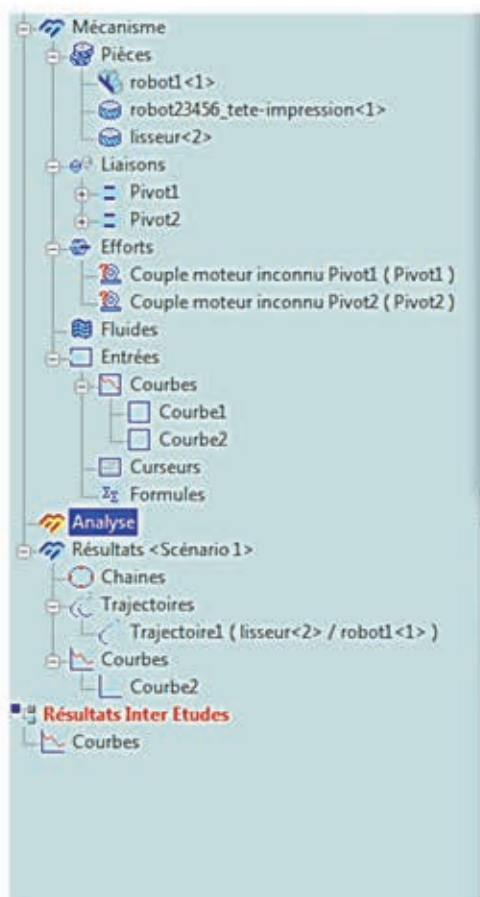
### 2211 E-2RS1TN9

#### Dimensions

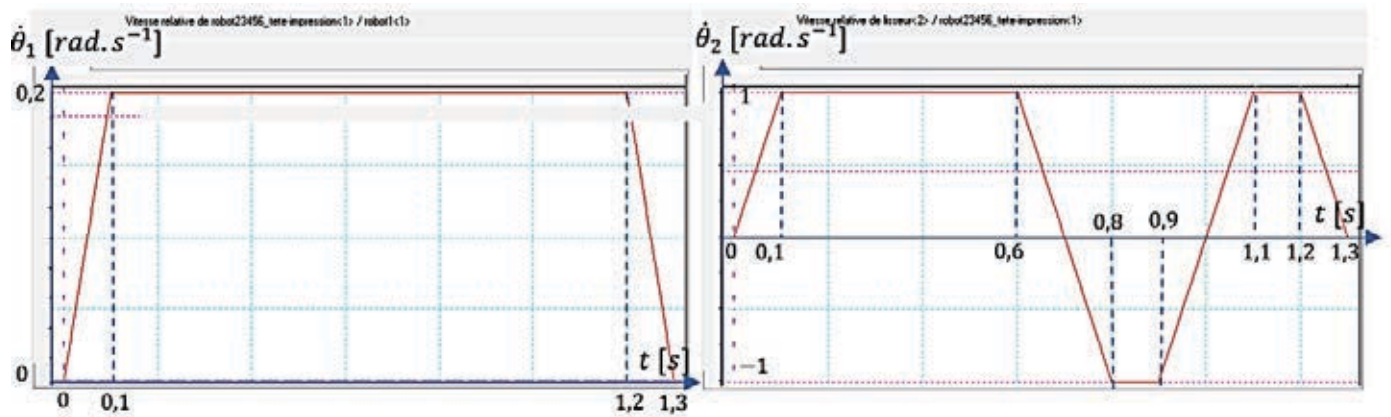


|                  |          |    |
|------------------|----------|----|
| d                | 55       | mm |
| D                | 100      | mm |
| B                | 25       | mm |
| d <sub>2</sub>   | ≈ 65.9   | mm |
| D <sub>2</sub>   | ≈ 88.5   | mm |
| r <sub>1,2</sub> | min. 1.5 | mm |

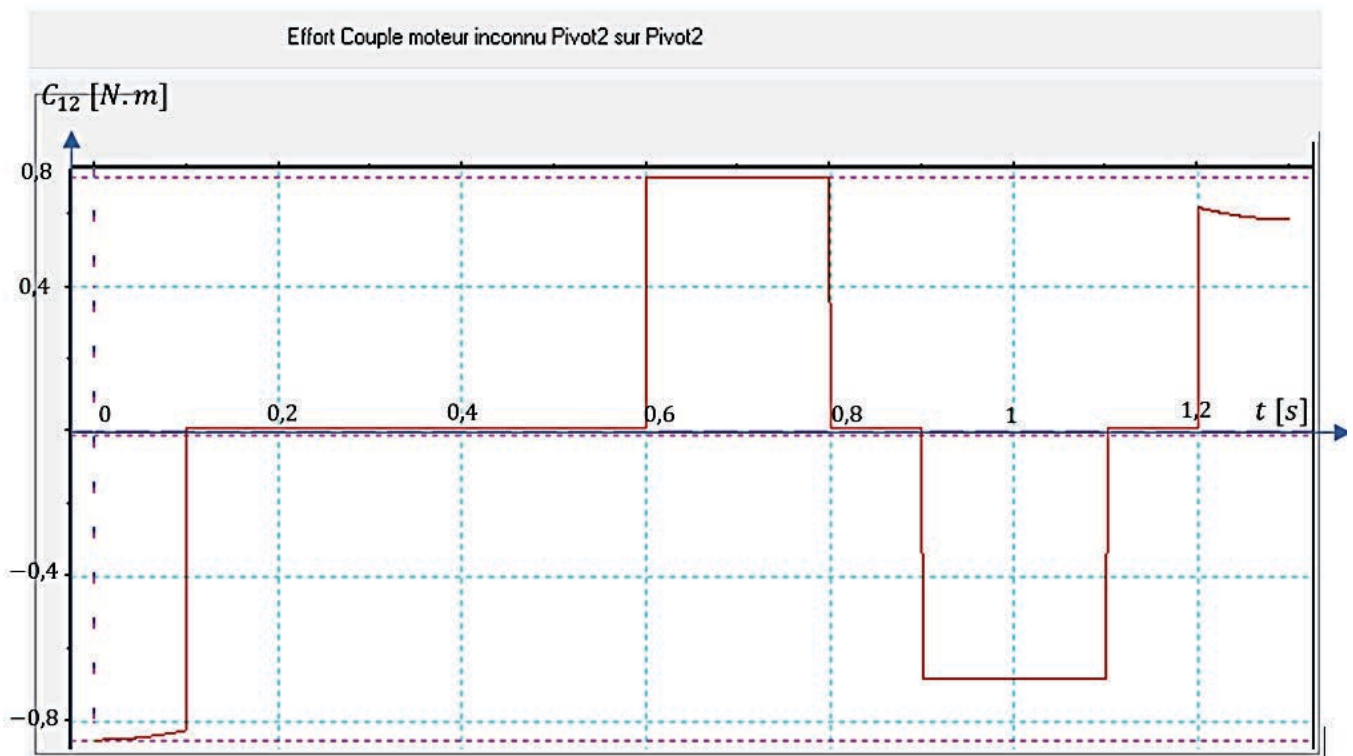
## DT 4 – Paramétrages de la simulation mécanique



## DT 5 – Lois cinématiques utilisées pour la simulation mécanique



## DT 6 – Couple moteur inconnu calculé dans la liaison Pivot 2



## DOCUMENTS PÉDAGOGIQUES

DP 1 – Enseignements technologiques communs STI2D

DP 2 – Savoirs de l'enseignement transversal STI2D

DP 3 – Spécialités - Enseignements de spécialité STI2D AC

DP 4 – Enseignements de spécialité STI2D EE

DP 5 – Enseignements de spécialités STI2D ITEC

DP 6 – Enseignements de spécialité STI2D SIN

DP 7 – Liste des savoirs des quatre spécialités du bac STI2D

DP 8 – Ressources pour la séquence pédagogique

|                                                                 |        |                              |
|-----------------------------------------------------------------|--------|------------------------------|
| Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur             |        | Session : 2018               |
| Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique | Code : | Page <b>33</b> sur <b>45</b> |

# DP 1 – Enseignements technologiques communs STI2D

**B.O.**

Bulletin officiel spécial n° 3 du 17 mars 2011

## Les enseignements technologiques communs

A - Objectifs et compétences des enseignements technologiques communs du baccalauréat STI2D

| Objectifs de formation           |                                                                                                                       | Compétences attendues                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Société et développement durable | O1 - Caractériser des systèmes privilégiant un usage raisonné du point de vue développement durable                   | CO1.1. Justifier les choix des matériaux, des structures d'un système et les énergies mises en œuvre dans une approche de développement durable<br>CO1.2. Justifier le choix d'une solution selon des contraintes d'ergonomie et d'effets sur la santé de l'homme et du vivant                                                                                                                                                                                                 |
|                                  | O2 - Identifier les éléments permettant la limitation de l'impact environnemental d'un système et de ses constituants | CO2.1. Identifier les flux et la forme de l'énergie, caractériser ses transformations et/ou modulations et estimer l'efficacité énergétique globale d'un système<br>CO2.2. Justifier les solutions constructives d'un système au regard des impacts environnementaux et économiques engendrés tout au long de son cycle de vie                                                                                                                                                 |
| Technologie                      | O3 - Identifier les éléments influents du développement d'un système                                                  | CO3.1. Décoder le cahier des charges fonctionnel d'un système<br>CO3.2. Évaluer la compétitivité d'un système d'un point de vue technique et économique                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                  | O4 - Décoder l'organisation fonctionnelle, structurelle et logicielle d'un système                                    | CO4.1. Identifier et caractériser les fonctions et les constituants d'un système ainsi que ses entrées/sorties<br>CO4.2. Identifier et caractériser l'agencement matériel et/ou logiciel d'un système<br>CO4.3. Identifier et caractériser le fonctionnement temporel d'un système<br>CO4.4. Identifier et caractériser des solutions techniques relatives aux matériaux, à la structure, à l'énergie et aux informations (acquisition, traitement, transmission) d'un système |
|                                  | O5 - Utiliser un modèle de comportement pour prédire un fonctionnement ou valider une performance                     | CO5.1. Expliquer des éléments d'une modélisation proposée relative au comportement de tout ou partie d'un système<br>CO5.2. Identifier des variables internes et externes utiles à une modélisation, simuler et valider le comportement du modèle<br>CO5.3. Évaluer un écart entre le comportement du réel et le comportement du modèle en fonction des paramètres proposés                                                                                                    |
| Communication                    | O6 - Communiquer une idée, un principe ou une solution technique, un projet, y compris en langue étrangère            | CO6.1. Décrire une idée, un principe, une solution, un projet en utilisant des outils de représentation adaptés<br>CO6.2. Décrire le fonctionnement et/ou l'exploitation d'un système en utilisant l'outil de description le plus pertinent<br>CO6.3. Présenter et argumenter des démarches, des résultats, y compris dans une langue étrangère                                                                                                                                |

## B - Programme des enseignements technologiques communs du baccalauréat STI2D

Le programme des enseignements technologiques communs détaillé ci-après est constitué de trois parties décrivant les connaissances visées. La structure et l'ordre proposés des connaissances n'induit pas l'organisation concrète des apprentissages. En particulier, les contenus du chapitre 3, traitant des solutions technologiques, auront tout avantage à être répartis et intégrés aux phases d'apprentissages associées aux deux chapitres précédents. Une étoile dans la colonne « Ph. » met en évidence les liens et relations avec le programme de physique nécessitant une étroite coordination entre les progressions pédagogiques des deux enseignements. Un « M » dans la colonne « Ph. » indique le lien en relation avec le programme de mathématiques.

|                                                                 |        |                |
|-----------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur             |        | Session : 2018 |
| Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique | Code : | Page 34 sur 45 |

## DP 2 – Savoirs de l'enseignement transversal STI2D

- 1 Principes de conception des systèmes de développement durable
  - 1.1 Compétitivité et créativité
    - 1.1.2 Cycle de vie d'un produit et choix techniques, économiques et environnementaux
    - 1.1.3 Compromis complexité – efficacité – coût
  - 1.2 Éco conception
    - 1.2.1 Étapes de la démarche de conception
    - 1.2.2 Mise à disposition des ressources
    - 1.2.3 Utilisation raisonnée des ressources
- 2 Outils et méthodes d'analyse et de description des systèmes
  - 2.1 Approche fonctionnelle des systèmes
  - 2.2 Outils de représentation
    - 2.2.1 Représentation du réel
    - 2.2.2 Représentations symboliques
  - 2.3 Approche comportementale
    - 2.3.1 Modèles de comportement
    - 2.3.2 Comportement des matériaux
    - 2.3.3 Comportement mécanique des systèmes
    - 2.3.4 Structures porteuses
    - 2.3.5 Comportement énergétique des systèmes
    - 2.3.6 Comportements informationnels des systèmes
- 3 Solutions technologiques
  - 3.1 Structures matérielles et/ou logicielles
    - 3.1.1 Choix des matériaux
    - 3.1.2 Typologie des solutions constructives des liaisons entre solides
    - 3.1.3 Typologie des solutions constructives de l'énergie
    - 3.1.4 Traitement de l'information
  - 3.2 Constituants d'un système
    - 3.2.1 Transformateurs et Modulateurs d'énergie associés
    - 3.2.2 Stockage d'énergie
    - 3.2.3 Acquisition et codage de l'information
    - 3.2.4 Transmission de l'information, réseaux et internet

## DP 3 – Spécialités - Enseignements de spécialité STI2D AC

**B.O.**

Bulletin officiel spécial n° 3 du 17 mars 2011

### Les spécialités

Les activités liées aux spécialités doivent se situer dans un contexte pluritechnologique qui permet de :

- présenter et justifier le problème technique de spécialité à résoudre ;
- valider et justifier la solution technique de spécialité proposée ;
- étudier les conséquences d'intégrations technologiques justifiant la transition d'une spécialité dans une autre, simplifier des solutions, augmenter les performances, diminuer les coûts dans un contexte de réduction des empreintes environnementales.

La démarche globale menée dans l'enseignement technologique transversal fait place à une approche plus centrée sur un domaine **sans négliger les influences réciproques des autres domaines**. L'enseignement de spécialité permet d'impliquer les élèves par des mises en situation concrètes allant vers la création, la conception, le « réel créé ».

Il s'agit de proposer aux élèves de vivre les différentes étapes d'un projet dans un contexte simple et limité, fédérateur de connaissances et facilitateur d'apprentissages par l'action. Les jeunes déjà intéressés dès le lycée par un domaine technique pourront le découvrir et s'y épanouir.

Certaines connaissances abordées lors des enseignements technologiques transversaux participent également à l'acquisition de compétences nouvelles dans des spécialités. Elles sont alors reprises et traitées à un niveau taxonomique plus élevé.

Le projet, déjà évoqué dans le préambule, est fondamental comme modalité de formation ; il constitue donc un moment privilégié permettant l'évaluation des compétences. Il peut être utilement complété par des microprojets répartis sur les deux années du cycle de formation à l'initiative des équipes pédagogiques.

Les pages qui suivent présentent les quatre programmes de spécialités dans la même logique que celle des enseignements technologiques communs, la colonne ETC indique la présence d'un lien avec eux :

- Architecture et construction ;
- Énergies et environnement ;
- Innovation technologique et éco-conception ;
- Systèmes d'information et numérique.

### Spécialité architecture et construction

A - Objectifs et compétences de la spécialité architecture et construction du baccalauréat STI2D

| Objectifs de formation                                  | Compétences attendues                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>O7 - Imaginer une solution, répondre à un besoin</b> | CO7.ac1. Participer à une étude architecturale, dans une démarche de développement durable<br>CO7.ac2. Proposer/choisir des solutions techniques répondant aux contraintes et attentes d'une construction<br>CO7.ac3. Concevoir une organisation de réalisation                                                |
| <b>O8 - Valider des solutions techniques</b>            | CO8.ac1. Simuler un comportement structurel, thermique et acoustique de tout ou partie d'une construction<br>CO8.ac2. Analyser les résultats issus de simulations ou d'essais de laboratoire<br>CO8.ac3. Analyser/valider les choix structurels et de confort                                                  |
| <b>O9 - Gérer la vie du produit</b>                     | CO9.ac1. Améliorer les performances d'une construction du point de vue énergétique, domotique et informationnel<br>CO9.ac2. Identifier et décrire les causes de désordre dans une construction<br>CO9.ac3. Valoriser la fin de vie du produit : déconstruction, gestion des déchets, valorisation des produits |

## DP 4 – Enseignements de spécialité STI2D EE

**B.O.**

Bulletin officiel spécial n° 3 du 17 mars 2011

### Spécialité énergies et environnement

#### A - Objectifs et compétences de la spécialité-énergies et environnement

| Objectifs de formation                           | Compétences attendues                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| O7 - Imaginer une solution, répondre à un besoin | <p>CO7.ee1. Participer à une démarche de conception dans le but de proposer plusieurs solutions possibles à un problème technique identifié en lien avec un enjeu énergétique</p> <p>CO7.ee2. Justifier une solution retenue en intégrant les conséquences des choix sur le triptyque matériau-énergie-information</p> <p>CO7.ee3. Définir la structure, la constitution d'un système en fonction des caractéristiques technico-économiques et environnementales attendues</p> <p>CO7.ee4. Définir les modifications de la structure, les choix de constituants et du type de système de gestion d'une chaîne d'énergie afin de répondre à une évolution d'un cahier des charges</p> |
| O8 - Valider des solutions techniques            | <p>CO8.ee1. Renseigner un logiciel de simulation du comportement énergétique avec les caractéristiques du système et les paramètres externes pour un point de fonctionnement donné</p> <p>CO8.ee2. Interpréter les résultats d'une simulation afin de valider une solution ou l'optimiser</p> <p>CO8.ee3. Comparer et interpréter le résultat d'une simulation d'un comportement d'un système avec un comportement réel</p> <p>CO8.ee4. Mettre en œuvre un protocole d'essais et de mesures sur le prototype d'une chaîne d'énergie, interpréter les résultats</p>                                                                                                                   |
| O9 - Gérer la vie d'un système                   | <p>CO9.ee1. Expérimenter des procédés de stockage, de production, de transport, de transformation, d'énergie pour aider à la conception d'une chaîne d'énergie</p> <p>CO9.ee2. Réaliser et valider un prototype obtenu en réponse à tout ou partie du cahier des charges initial</p> <p>CO9.ee3. Intégrer un prototype dans un système à modifier pour valider son comportement et ses performances</p>                                                                                                                                                                                                                                                                              |

## DP 5 – Enseignements de spécialités STI2D ITEC

**B.O.**

Bulletin officiel spécial n° 3 du 17 mars 2011

### Spécialité innovation technologique et éco-conception

A - Objectifs et compétences de la spécialité innovation technologique et éco-conception du baccalauréat STI2D

| Objectifs de formation                                  | Compétences attendues                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>O7 - Imaginer une solution, répondre à un besoin</b> | CO7.itec1. Identifier et justifier un problème technique à partir de l'analyse globale d'un système (approche matière-énergie-information)<br>CO7.itec2. Proposer des solutions à un problème technique identifié en participant à des démarches de créativité, choisir et justifier la solution retenue<br>CO7.itec3. Définir, à l'aide d'un modèleur numérique, les formes et dimensions d'une pièce d'un mécanisme à partir des contraintes fonctionnelles, de son principe de réalisation et de son matériau<br>CO7.itec4. Définir, à l'aide d'un modèleur numérique, les modifications d'un mécanisme à partir des contraintes fonctionnelles |
| <b>O8 - Valider des solutions techniques</b>            | CO8.itec1. Paramétrer un logiciel de simulation mécanique pour obtenir les caractéristiques d'une loi d'entrée/sortie d'un mécanisme simple<br>CO8.itec2. Interpréter les résultats d'une simulation mécanique pour valider une solution ou modifier une pièce ou un mécanisme<br>CO8.itec3. Mettre en œuvre un protocole d'essais et de mesures, interpréter les résultats<br>CO8.itec4. Comparer et interpréter le résultat d'une simulation d'un comportement mécanique avec un comportement réel                                                                                                                                               |
| <b>O9 - Gérer la vie du produit</b>                     | CO9.itec1. Expérimenter des procédés pour caractériser les paramètres de transformation de la matière et leurs conséquences sur la définition et l'obtention de pièces<br>CO9.itec2. Réaliser et valider un prototype obtenu par rapport à tout ou partie du cahier des charges initial<br>CO9.itec3. Intégrer les pièces prototypes dans le système à modifier pour valider son comportement et ses performances                                                                                                                                                                                                                                  |

## DP 6 – Enseignements de spécialité STI2D SIN

### Spécialité systèmes d'information et numérique

A - Objectifs et compétences de la spécialité systèmes d'information et numérique du baccalauréat STI2D

| Objectifs de formation                                  | Compétences attendues                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>O7 - Imaginer une solution, répondre à un besoin</b> | <p>CO7.sin1. Décoder la notice technique d'un système, vérifier la conformité du fonctionnement</p> <p>CO7.sin2. Décoder le cahier des charges fonctionnel décrivant le besoin exprimé, identifier la fonction définie par un besoin exprimé, faire des mesures pour caractériser cette fonction et conclure sur sa conformité</p> <p>CO7.sin3. Exprimer le principe de fonctionnement d'un système à partir des diagrammes SysML pertinents<br/>Repérer les constituants de la chaîne d'énergie et d'information</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>O8 - Valider des solutions techniques</b>            | <p>CO8.sin1. Rechercher et choisir une solution logicielle ou matérielle au regard de la définition d'un système</p> <p>CO8.sin2. Établir pour une fonction précédemment identifiée un modèle de comportement à partir de mesures faites sur le système</p> <p>CO8.sin3. Traduire sous forme graphique l'architecture de la chaîne d'information identifiée pour un système et définir les paramètres d'utilisation du simulateur</p> <p>CO8.sin4. Identifier les variables simulées et mesurées sur un système pour valider le choix d'une solution</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>O9 - Gérer la vie d'un système</b>                   | <p>CO9.sin1. Utiliser les outils adaptés pour planifier un projet (diagramme de Gantt, chemin critique, données économiques, réunions de projet)</p> <p>CO9.sin2. Installer, configurer et instrumenter un système réel<br/>Mettre en œuvre la chaîne d'acquisition puis acquérir, traiter, transmettre et restituer l'information</p> <p>CO9.sin3. Rechercher des évolutions de constituants dans le cadre d'une démarche de veille technologique, analyser la structure d'un système pour intervenir sur les constituants dans le cadre d'une opération de maintenance</p> <p>CO9.sin4. Rechercher et choisir de nouveaux constituants d'un système (ou d'un projet finalisé) au regard d'évolutions technologiques, socio-économiques spécifiées dans un cahier des charges. Organiser le projet permettant de « maquettiser » la solution choisie</p> |

## DP 7 – Liste des savoirs des quatre spécialités du bac STI2D

|                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Savoirs</b><br><br><b>AC</b>   | <b>1</b> <b>Projet technologique</b><br>1.1    La démarche de projet<br>1.2    Projet architectural<br>1.3    Établir une organisation de réalisation<br><b>2</b> <b>Conception d'un ouvrage</b><br>2.1    Paramètres influant la conception<br>2.2    Solutions technologiques<br>2.3    Modélisations, essais et simulations<br><b>3</b> <b>Vie de la construction</b><br>3.1    Améliorer les performances de la construction<br>3.2    Gestion de la vie d'une construction                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Savoirs</b><br><br><b>EE</b>   | <b>1</b> <b>Projet technologique</b><br>1.1    La démarche de projet<br>1.2    Paramètres de la compétitivité<br>1.3    Vérification des performances<br>1.4    Communication technique<br><b>2</b> <b>Conception d'un système</b><br>2.1    Approche fonctionnelle d'une chaîne d'énergie<br>2.2    Approche fonctionnelle du système de gestion de la chaîne d'énergie<br>2.3    Paramètres influant la conception<br>2.4    Approche comportementale<br>2.5    Critères de choix de solutions<br><b>3</b> <b>Transports et distribution d'énergie, études de dossiers technologiques</b><br>3.1    Production et transport d'énergie<br><b>4</b> <b>Réalisation et qualification d'un prototype</b><br>4.1    Réalisation d'un prototype<br>4.2    Sécurité<br>4.3    Essais et réglages en vue d'assurer le fonctionnement et d'améliorer les performances |
| <b>Savoirs</b><br><br><b>ITEC</b> | <b>1</b> <b>Projet technologique</b><br>1.1    La démarche de projet<br>1.2    Créativité et innovation technologique<br>1.3    Description et représentation<br><b>2</b> <b>Conception mécanique des systèmes</b><br>2.1    Conception des mécanismes<br>2.2    Comportement d'un mécanisme et/ou d'une pièce<br><b>3</b> <b>Prototypage de pièces</b><br>3.1    Procédés de transformation de la matière<br>3.2    Essais, mesures et validation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Savoirs</b><br><br><b>SIN</b>  | <b>1</b> <b>Projet technologique</b><br>1.1    La démarche de projet<br>1.2    Mise en œuvre d'un système<br>1.3    Description et représentation<br><b>2</b> <b>Maquettage des solutions constructives</b><br>2.1    Conception fonctionnelle d'un système local<br>2.2    Architecture fonctionnelle d'un système communicant<br>2.3    Modélisations et simulations<br><b>3</b> <b>Réalisation et qualification d'un prototype</b><br>3.1    Réalisation d'un prototype<br>3.2    Gestion de la vie d'un système                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

## DP 8 – Ressources pour la séquence pédagogique

Le **BIOMIMÉTISME** (source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Biomim%C3%A9tisme>)

« Le biomimétisme désigne un processus d'innovation et une ingénierie. Il s'inspire des formes, matières, propriétés, processus et fonctions du vivant. Il peut concerner des échelles nanométriques et biomoléculaires avec par exemple l'ADN et l'ARN, et jusqu'à des échelles macroscopiques et écosystémiques, incluant donc les services écosystémiques. Il cherche ainsi des solutions soutenables produites par la nature, sélectionnées par de nombreuses espèces, éprouvées par l'évolution au sein de la biosphère<sup>1</sup>.

C'est un domaine encore émergent de la recherche et des domaines techniques, médicaux, industriels et de la bioéconomie, incluant des sous-domaines tels que la bionique, la bioassistance et l'architecture biomimétique. Certains auteurs y voient une voie nouvelle de développement soutenable et intégré dans la biosphère<sup>3</sup> »



L'« avion-chauvesouris » de Clément Ader est un exemple d'engin bioinspiré.

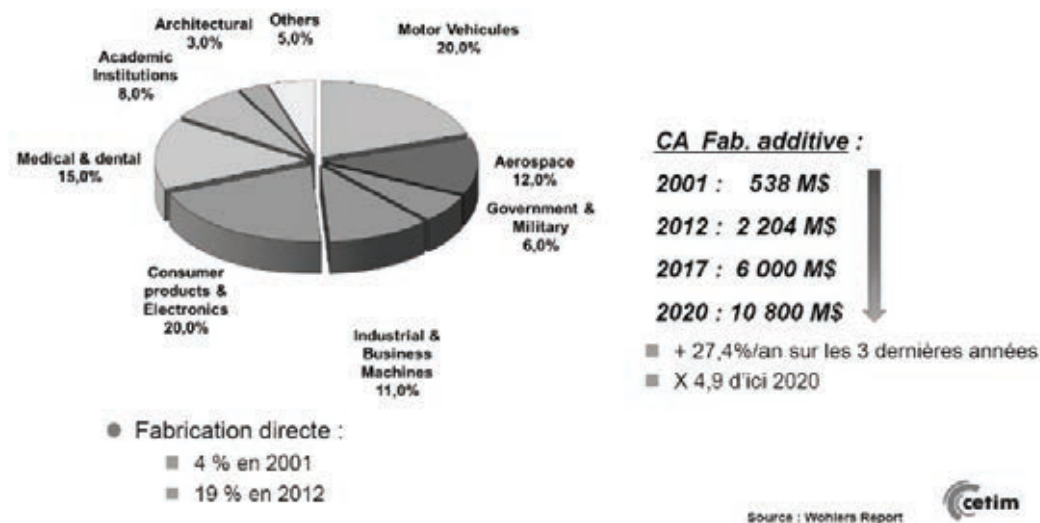
**L'INDUSTRIE DU FUTUR** (source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Industrie\\_4.0](https://fr.wikipedia.org/wiki/Industrie_4.0))

« Le concept d'industrie du futur correspond à une nouvelle façon d'organiser les moyens de production : l'objectif est la mise en place d'usines dites « intelligentes » (« smart factories ») capables d'une plus grande adaptabilité dans la production et d'une allocation plus efficace des ressources, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle révolution industrielle. Ses bases technologiques sont l'Internet des objets et les systèmes cyber physiques. Le concept exprime l'idée que le monde se trouve aux prémices d'une quatrième révolution industrielle. Après le développement de la machine à vapeur et de la mécanisation à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle, puis de l'électricité à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et l'automatisation au XX<sup>e</sup> siècle, la nouvelle révolution serait fondée sur l'usine intelligente, caractérisée par une interconnexion des machines et des systèmes au sein des sites de production mais aussi entre eux et l'extérieur (clients, partenaires, autres sites de productions). Le concept a été mis en évidence pour la première fois lors la foire de Hanovre (Salon de la technologie industrielle) de 2011. [...] »

|                                                                 |        |                |
|-----------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur             |        | Session : 2018 |
| Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique | Code : | Page 41 sur 45 |

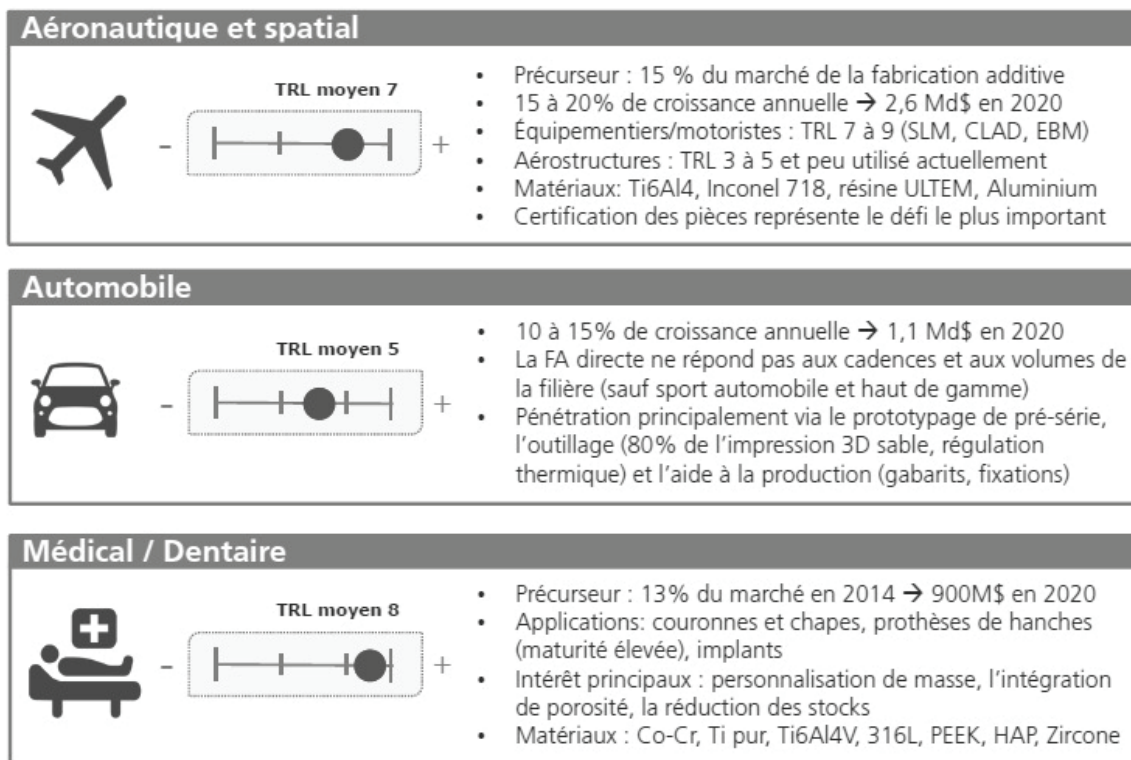
## DP 8 – Ressources pour la séquence pédagogique

Parts de marché de la fabrication additive : évolutions et perspectives, étude CETIM



Extrait de l'étude prospective « Futur de la fabrication additive », restitution de l'étude – Benoît RIVOLLET – Tech2Market, Les Rendez-vous du Pipame – 26 Janvier 2017

### Applications industrielles et maturité (1/3)



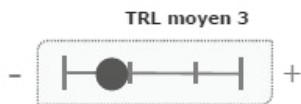
Les TRL forment une échelle d'évaluation du degré de maturité atteint par une technologie. Cette échelle comporte 9 niveaux.

|                                                                 |        |                |
|-----------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur             |        | Session : 2018 |
| Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique | Code : | Page 42 sur 45 |

## DP 8 – Ressources pour la séquence pédagogique

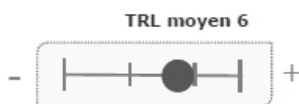
### Applications industrielles et maturité (2/3)

#### Construction et architecture



- Un segment secondaire : 3,2% du marché mondial
- Estimation de la pénétration de la fabrication additive
  - CT: Moules et peaux de coffrages en résine
  - MT: Eléments béton préfabriqués en usine (corniches)
  - LT: Construction d'habitat sur site
- Maîtriser la paramétrie de production et livraison du béton

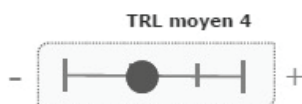
#### Energie



- Energies renouvelables (éolien, PV): pièces souvent trop volumineuses (plusieurs mètres à dizaines de mètres)
- Nucléaire: besoin d'atteindre un niveau de qualification et de certification pour envisager la FA en application critique
- Gaz et pétrole: 3,9% du marché (systèmes fluidiques complexes : pompes, filtres...)
- Facteurs d'acceptation : formes complexes, économie de matériaux difficile à usiner, réparation, intégration de fonction
- Freins : manque de directives en matière de certification, faible recul sur la ductilité et comportement en fatigue, pièces de trop grandes dimensions pour la fabrication additive directe

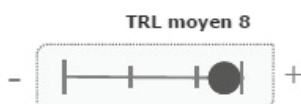
### Applications industrielles et maturité (3/3)

#### Emballage



- Un segment jugé secondaire et au prototypage rapide (accélération des cycles de développement et de validation) et aux acteurs du luxe.
- Applications naissantes à l'image du procédé Pack&Strat® (fabrication directe et rapide d'emballage en mousse polymère ou en carton par découpe successive de plaques).
- Emballage alimentaire (bouteille, flacons) : fabrication additive directe en série peu adaptée, préférence nette pour le prototypage ou la production de moule en cire/résine pour résister aux cadences de production de bouteilles.

#### Fonderie – Moules – Outillage - Forge



- La fabrication additive est particulière adaptée pour la réalisation d'outillage → un des marchés les plus matures.
- Fonderie: fonderie cire perdue (projection de matière), fonderie sable (frittage laser récent, projection de liant), fonderie par gravité (stratoconception très utilisée, EBM, SLM et DED en cours de développement).
- Plasturgie : thermoformage (peu exploité actuellement), injection soufflage (optimisation du refroidissement dans les moules aluminium), injection .
- Intérêt : régulation thermique, début des outillages polymères.

Les TRL forment une échelle d'évaluation du degré de maturité atteint par une technologie.  
Cette échelle comporte 9 niveaux.

|                                                                 |        |                |
|-----------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur             |        | Session : 2018 |
| Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique | Code : | Page 43 sur 45 |

## DP 8 – Ressources pour la séquence pédagogique

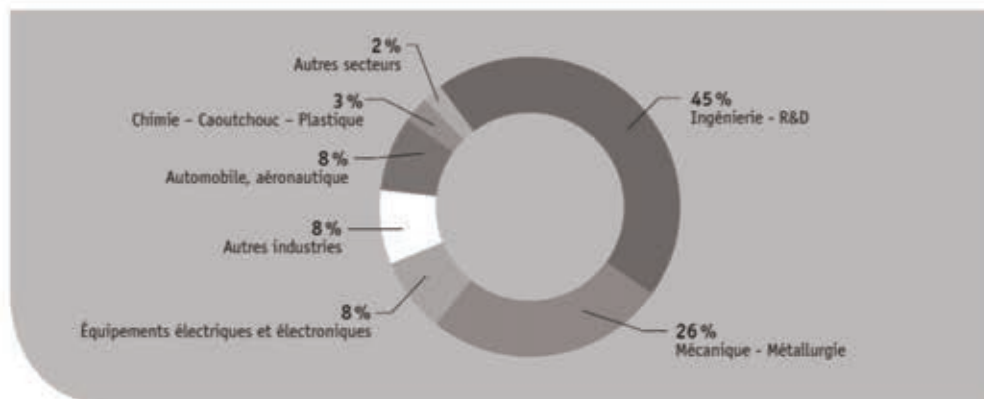
### Extraits de l'étude de l'APEC, La fabrication additive, tendances métiers

Les 4 principales fonctionnalités de la fabrication additive



Source : Apec, 2017.

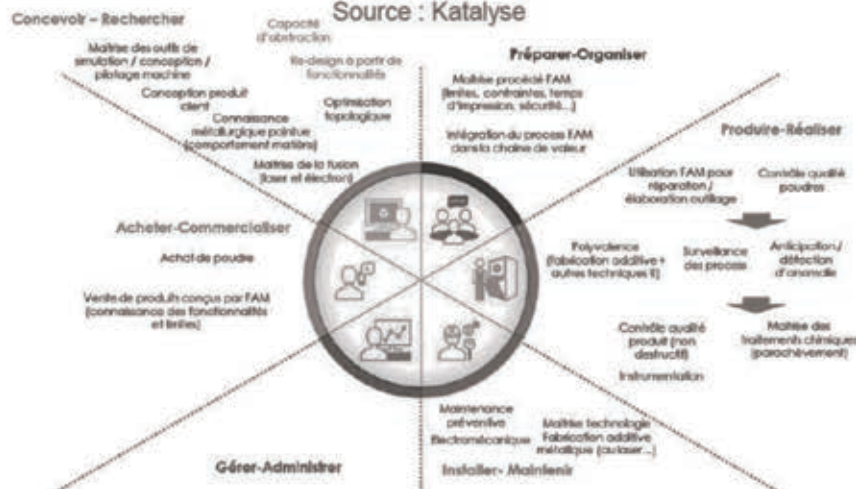
Qui recrute ? (% d'offres demandant des compétences en fabrication additive par secteur en 2015/2016)



Source : Offres Apec diffusées en 2015 et 2016 demandant des compétences en fabrication additive.

### Impact de la fabrication additive métallique sur les compétences dans le secteur de l'élaboration des métaux et sa première transformation

Source : Katalyse



|                                                                 |        |                |
|-----------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur             |        | Session : 2018 |
| Analyse et exploitation pédagogique d'un système pluritechnique | Code : | Page 44 sur 45 |

## DP 8 – Ressources pour la séquence pédagogique

• **Technologie SLM (Selective Laser Melting ou Fusion sélective par laser)** qui consiste à produire des pièces métalliques à l'aide de lasers de haute puissance, faisant fusionner progressivement et localement, c'est-à-dire de façon sélective, une poudre métallique. Elle permet de réaliser des pièces métalliques directes, très complexes, et sans outillage. Plusieurs matériaux métalliques peuvent être utilisés comme les aciers inoxydables, alliages de titane, d'aluminium.

Animateur de l'atelier : Hervé BONNEFOY



• **Technologie LMD (Laser Metal Deposition ou fusion laser par projection de poudre)** qui consiste à produire des pièces métalliques à l'aide de lasers de haute puissance au travers duquel est projeté de la poudre métallique ainsi mise en fusion. Cette technologie permet de réaliser des pièces métalliques ou de recharger des pièces ou outillages existants. Elle permet également de créer de nouveaux alliages en mélangeant plusieurs types de poudres.

Animateur de l'atelier : Thomas PACHEU

• **Technologie « Projection de liant sur du sable »** qui consiste à réaliser des moules ou des noyaux en sable utilisés pour réaliser des pièces de fonderie. Le sable déposé couche par couche est agrégé par une résine polymérisée. Cette technologie permet de réaliser des produits très complexes, alliant les possibilités géométriques offertes par la fabrication additive et les résistances mécaniques proposées par les pièces de fonderie (fonte, acier, aluminium, cuproalliage, ...).

Animateur de l'atelier : Nicolas PONSART



• **Technologie « Dépôt de microgouttelettes polymères »** qui assure la production de prototypes ou de petites séries de pièces par dépôt en goutte à goutte, sur couches successives, de matières thermoplastiques préalablement fondues. Elle permet la réalisation de pièces complexes avec support déliant à l'eau avec une grande variété de thermoplastiques. Cette technologie confère de bonnes propriétés mécaniques.

Animatrices de l'atelier : Delphine AUZENE & Gaëlle DANGLA

• **Technologie MOVINGLight®** qui consiste à réaliser des pièces en résines photopolymérisables. Elle permet de réaliser des pièces en grande quantité, à vitesse élevée, de grande taille et à haut niveau de précision. Les résines utilisées confèrent aux pièces des résistances importantes à l'usure, la température, la réalisation d'outillage pour la plasturgie ou la fonderie.

Animateur de l'atelier : Brice FAYNOT



• **Optimisation topologique** qui permet d'adapter la géométrie des pièces et de bénéficier des avantages de la fabrication additive au maximum. Cette technique consiste à « supprimer » la matière superflue et à la localiser en fonction du cahier des charges fonctionnelles et en fonction des efforts. Cette méthodologie permet des gains considérables sur le poids des pièces et donc l'engagement matière.

Animateurs de l'atelier : Olivier DIEGERICK (MATERIALISE)

• **Technologie FDM (Fused Deposition Modeling ou Dépôt d'un fil fondu)** qui consiste à faire fondre un filament de thermoplastique (généralement un plastique type ABS ou PLA) à travers une buse (ou extrudeur) chauffée à une température variant entre 160 et 400 °C suivant la température de plasticité du polymère. Le fil en fusion, d'un diamètre de l'ordre du dixième de millimètre, est déposé sur le modèle et vient se coller par re-fusion sur la couche précédente.

Animatrice de l'atelier : Laurine RENAUX - FABMANAGER

