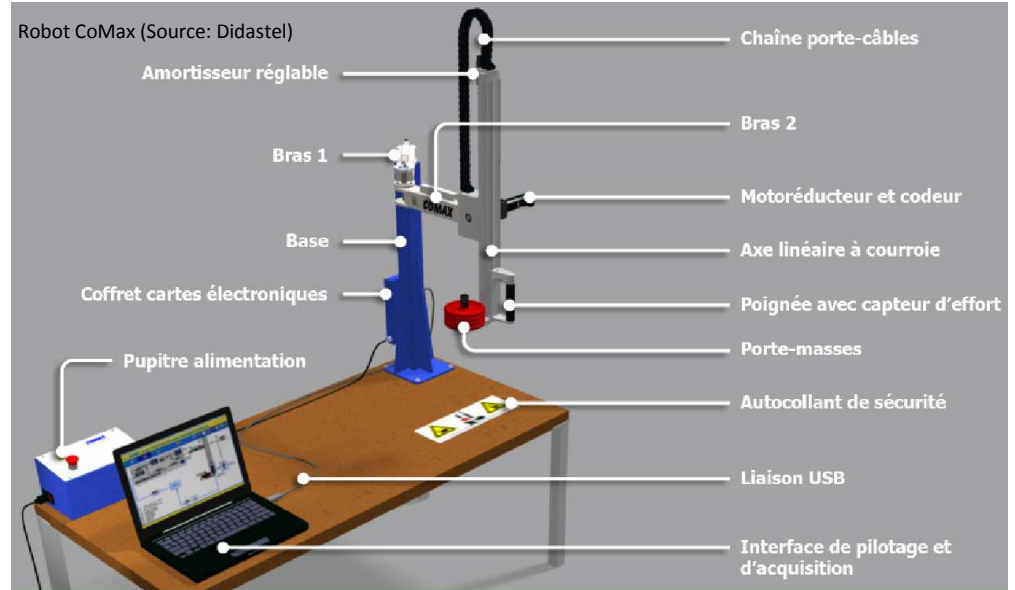


Présentation du système industriel:

La cobotique (robotique collaborative) est une réponse aux troubles musculo-squelettiques auxquels sont soumis les opérateurs en milieu industriel. Le système Comax, objet de cette étude est une adaptation pédagogique de la solution industrielle ZE de SAPELEM. Le principe de fonctionnement de ces deux systèmes repose sur l'utilisation d'un système de levage motorisé, associé à une poignée, équipée d'un capteur d'effort. La poignée communique en permanence l'intention de l'opérateur au système de levage. Celui-ci réagit en conséquence et assiste l'opérateur grâce à un moteur électrique, pour qu'il puisse déplacer l'objet manutentionné sans en percevoir son poids.



L'ensemble des **performances attendues du système** sont définies dans les descriptions SysML en Annexe.

Les performances, objets de cette étude, sont celles associées aux exigences:

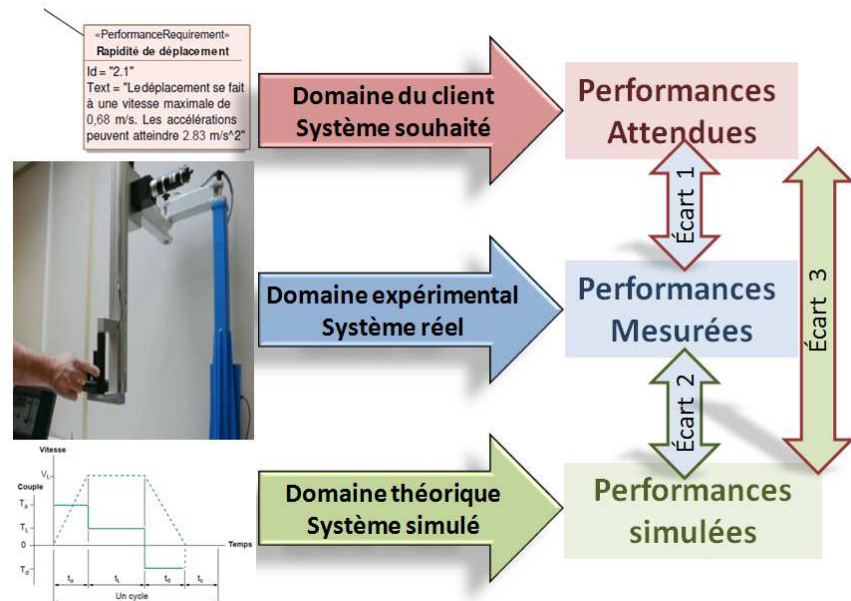
- Id 2.1: "**Rapidité de déplacement**";
- Id 2.2: "**Masse des objets manipulés**".

Objectif de l'étude:

- **Proposer des modèles** permettant de **prévoir les performances associées aux exigences Id 2.1 et Id 2.2,**

- **Analyser les performances mesurées** issues de mesures réalisées sur le robot CoMax du Lycée Kléber,

- **Valider ou affiner ces modèles** en quantifiant les écarts entre les **performances mesurées** et les **performances simulées**.



1. Analyser le support d'étude: Questions basées sur le sujet zéro de l'oral de dossier (Scooter électrique).

Activité 1: A partir du diagramme des exigences [req], présenter et classer les exigences (fonctionnelles, de performance, de contraintes) auxquelles répond le système CoMax.

Le bureau d'étude a choisi une architecture de solution basée sur la motorisation électrique d'un axe linéaire asservi, piloté par une carte de commande.

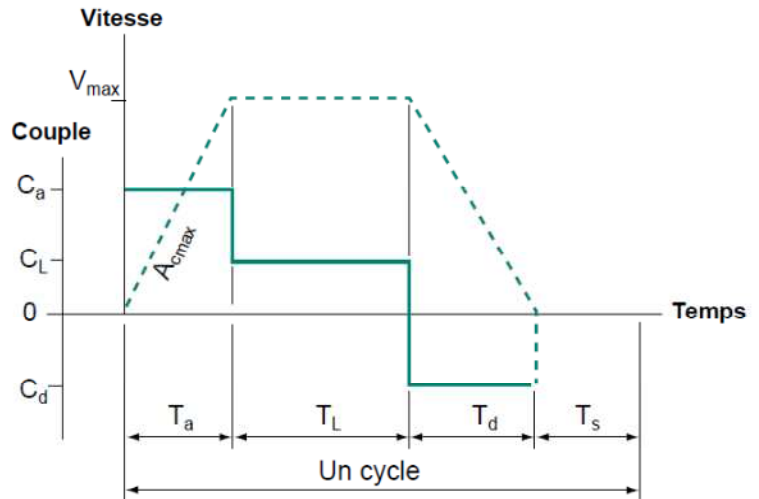
Activité 2: A partir des annexes présentant l'organisation structurelle du système (Annexes 2, 3, 8), recenser les systèmes extérieurs qui interagissent avec le CoMax et préciser les interfaces.

Activité 3: A partir du diagramme de blocs internes [ibd] et des données sur la chaîne d'énergie, décrire les flux de matière, d'énergie et d'informations.

2-1. Modéliser la loi de commande en vitesse à imposer au moteur dans les conditions les plus critiques.

On souhaite valider les performances du système "au pire des cas", par conséquent on modélise le comportement cinématique pour la loi de vitesse en trapèze avec une accélération constante $A_{cmax} = 2,83 \text{ m/s}^2$ et une vitesse maximale $V_{max} = 0,68 \text{ m/s}$. La décélération constante se fera à $-2,83 \text{ m/s}^2$. L'amplitude du déplacement retenu pour la modélisation sera de $X = 0,163 \text{ m}$.

Sur le robot CoMax, la transmission du mouvement, de l'axe du moteur à l'axe linéaire se fait par un réducteur de rapport de réduction $k=15.88$ dont l'arbre de sortie est accouplé sur l'axe linéaire tel qu'un tour d'arbre génère un déplacement en translation de 108mm.



Les résultats de l'étude seront synthétisés sur le document " 4. Communiquer les résultats et conclure l'étude".

Activité 4: Modéliser la relation cinématique entre la vitesse angulaire du moteur et la vitesse linéaire de l'axe:

- Déterminer la relation entre la vitesse de translation de l'axe linéaire $v(t)$ [en m/s] et la vitesse de rotation de l'axe moteur $N_{mot}(t)$ [en tr/min ou rpm]. En déduire la valeur maximale de N_{mot_max} .
- Déterminer la relation entre l'accélération de l'axe linéaire $A_c(t)$ [en m/s²] et l'accélération angulaire de l'axe moteur $\ddot{\theta}_{mot}(t)$ [en rpm/s]. En déduire la valeur maximale de $\ddot{\theta}_{max_mot}$.

Activité 5: Modéliser la loi de vitesse en trapèze au niveau du moteur:

- Pour la phase d'accélération: exprimer $N_{mot}(t)$ en fonction de $\ddot{\theta}_{max_mot}$ puis $X(t)$ en fonction de $\ddot{\theta}_{max_mot}$.
- En déduire la durée de la phase d'accélération T_a ainsi que la distance parcourue pendant cette phase du mouvement. Déterminer également les durées de déplacement à vitesse constante T_L et de décélération constante T_d .

2-2. Analyser les performances mesurées au laboratoire de SI -CPGE du lycée Kléber.

Sur le robot CoMax, des mesures ont été réalisées en imposant en consigne la loi de vitesse précédemment définie pour un déplacement de 163mm. Le système réel est asservi en position. Le logiciel associé au système permet de visualiser les résultats graphiquement et d'exporter les points de mesure dans un fichier .csv. Les grandeurs mesurées sont:

- La position angulaire du moteur en "points codeur", via le codeur incrémental. Cette grandeur est convertie pour afficher le déplacement de l'axe en [mm].
- La tension au niveau du moteur en [volt]. Cette grandeur est convertie pour afficher la vitesse de rotation du moteur en [tr/mn=rpm].
- Le courant électrique qui circule dans le moteur en [A]. Cette grandeur permet de déterminer le couple moteur en utilisant la constante électrique du moteur fournie en Annexe 3. Rappel: $C_{mot}(t)=k_i.i(t)$, avec $k_i=30,2 \text{ mN.m/A}$.

Activité 6: Extraire des tracés expérimentaux fournis en Annexe 4, des valeurs pour: N_{mot_max} , $\ddot{\theta}_{max_mot}$, X_{max} , T_a , T_d .

2-3: Quantifier les écarts entre les performances mesurées et simulées pour valider ou affiner le modèle.

Activité 7: Sur l'Annexe 4, tracer la loi de commande en trapèze théorique pour la variable $N_{mot}(t)$ en prenant soin de la caler à l'instant où sur le système expérimental commence son déplacement.

Activité 8: Quantifier le pourcentage d'erreur entre les performances simulées et les performances mesurées vis à vis des grandeurs N_{mot_max} , $\ddot{\theta}_{mot}(t)$, X , T_a , T_d . Ces écarts sont-ils acceptables?

Activité 9: Diagnostic: Quelles peuvent être les raisons de ces écarts?

3. Appliquer la démarche de l'ingénieur à l'exigence: Id 2.2: "Masse des objets manipulés"

3-1. Modéliser l'expression du couple moteur pour assurer le comportement dynamique du CoMax.

Les phases d'accélération et de décélération vont nécessiter de la part du moteur de fournir des couples différents. Par ailleurs, le cas le plus critique pour le couple moteur aura lieu lors d'une montée avec la charge maximale. Dans un premier temps, on souhaite modéliser le comportement dynamique du système en supposant que les liaisons entre les solides sont parfaites. On notera S, le système en mouvement constitué de l'arbre du moteur, les pièces mobiles du réducteur et des pièces mobiles de l'axe linéaire. L'inertie équivalente du CoMax ramenée sur l'arbre moteur sera notée J_{eq_max} et la masse de l'ensemble des pièces en translation sera notée $M_{tot} = M_{axe} + M_{ajoutée}$. $M_{axe} = 3,4\text{kg}$.

Activité 10: Déterminer les différentes expressions des couples C_i par l'application du théorème de l'énergie-puissance.

- Déterminer l'expression théorique de l'énergie cinétique de l'ensemble S par rapport à un repère galiléen Rg, notée $EC_{(S/Rg)}$. En déduire que l'expression de l'inertie équivalente de l'ensemble S, ramenée sur l'arbre moteur J_{eq_max} peut se mettre sous la forme : $J_{eq_max} = J_{mot} + \frac{(J_{red} + J_{poulie_axe})}{k^2} + \frac{M_{tot}}{k^2} \cdot \frac{p^2}{(2\pi)^2}$.
- Faire le bilan des puissances internes P_{int} et des puissances externes $P_{ext \rightarrow S/Rg}$ au système S.
- Appliquer le théorème de l'énergie puissance à l'ensemble S dans un repère galiléen pour les différentes phases de fonctionnement du système. En déduire les expressions littérales et numériques des couples C_i .

Les constructeurs de moteurs électriques fournissent une méthode de calcul du couple moyen que devra fournir le moteur lors de son fonctionnement. Ce couple moyen, appelé également "couple thermique équivalent" ou "couple efficace" est

calculé sur la base d'une moyenne quadratique de la manière suivante: $C_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n C_i^2 \cdot T_i}{\sum T_i}}$. RMS : Root Mean Square en anglais ou Moyenne quadratique en français. Cette méthode de calcul nécessite de modéliser le cycle de fonctionnement du moteur afin de déterminer les différentes périodes de fonctionnement T_i .

Activité 11: Calculer le couple thermique équivalent C_{RMS} en utilisant la méthode fournie par le constructeur.

3-2. Analyser les performances mesurées au laboratoire de SI -CPGE du lycée Kléber.

Activité 12: Extraire des tracés expérimentaux fournis en Annexe 4, des valeurs des couples C_i^{exp} pour les différentes périodes de fonctionnement T_i^{exp} . Pourquoi le couple est non nul avant le démarrage? Pourquoi le couple moteur n'est pas négatif lors de la phase de freinage?

Activité 13: Calculer le couple thermique équivalent expérimental par moyenne quadratique C_{RMS}^{exp} .

3-3: Quantifier les écarts entre les performances mesurées et simulées pour valider ou affiner le modèle.

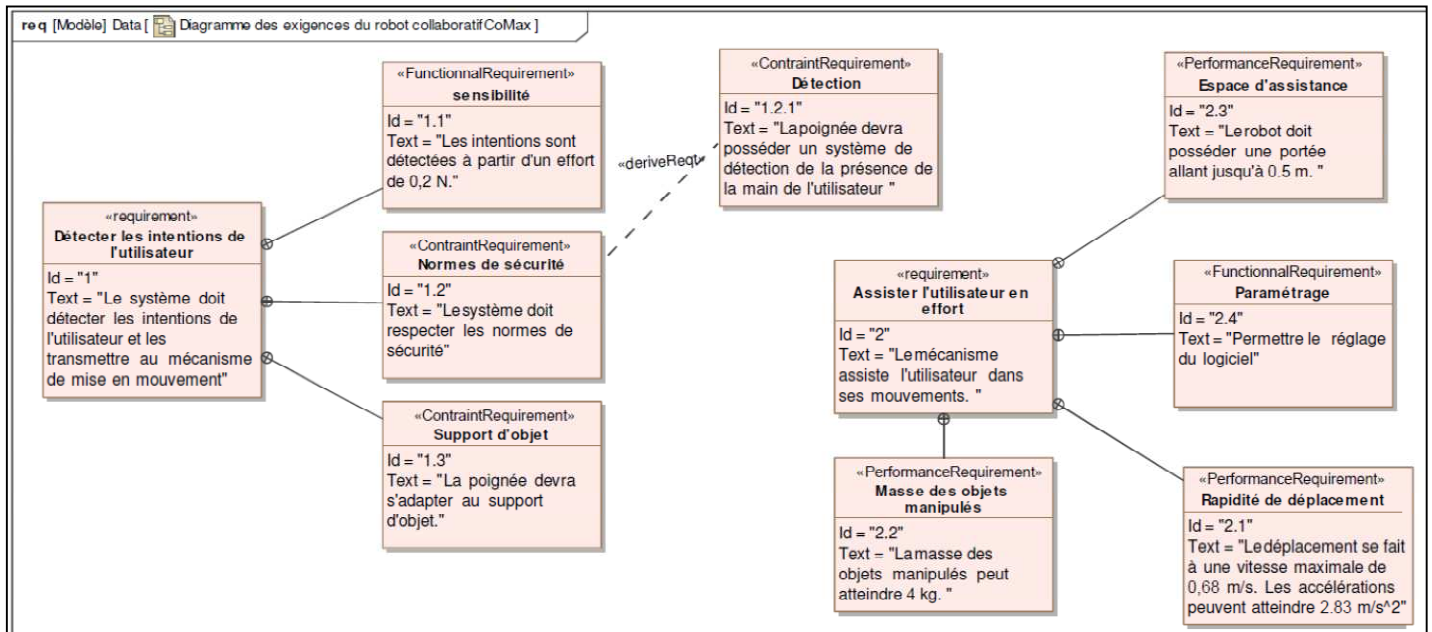
Activité 14: Sur l'Annexe 4, tracer l'évolution des couples C_i théoriques calculés précédemment en prenant soin de les caler à l'instant où sur le système expérimental commence son déplacement.

Activité 15: Quantifier le pourcentage d'erreur entre les couples simulés C_i et les couples mesurés C_i^{exp} . Ces écarts sont-ils acceptables? Quelles peuvent être les raisons de ces écarts? Les documentations techniques précisent les valeurs des rendements suivants: rendement moteur: 91%, rendement réducteur: 90%, rendement axe linéaire: 75%. Ces informations permettent-elles de justifier certains résultats?

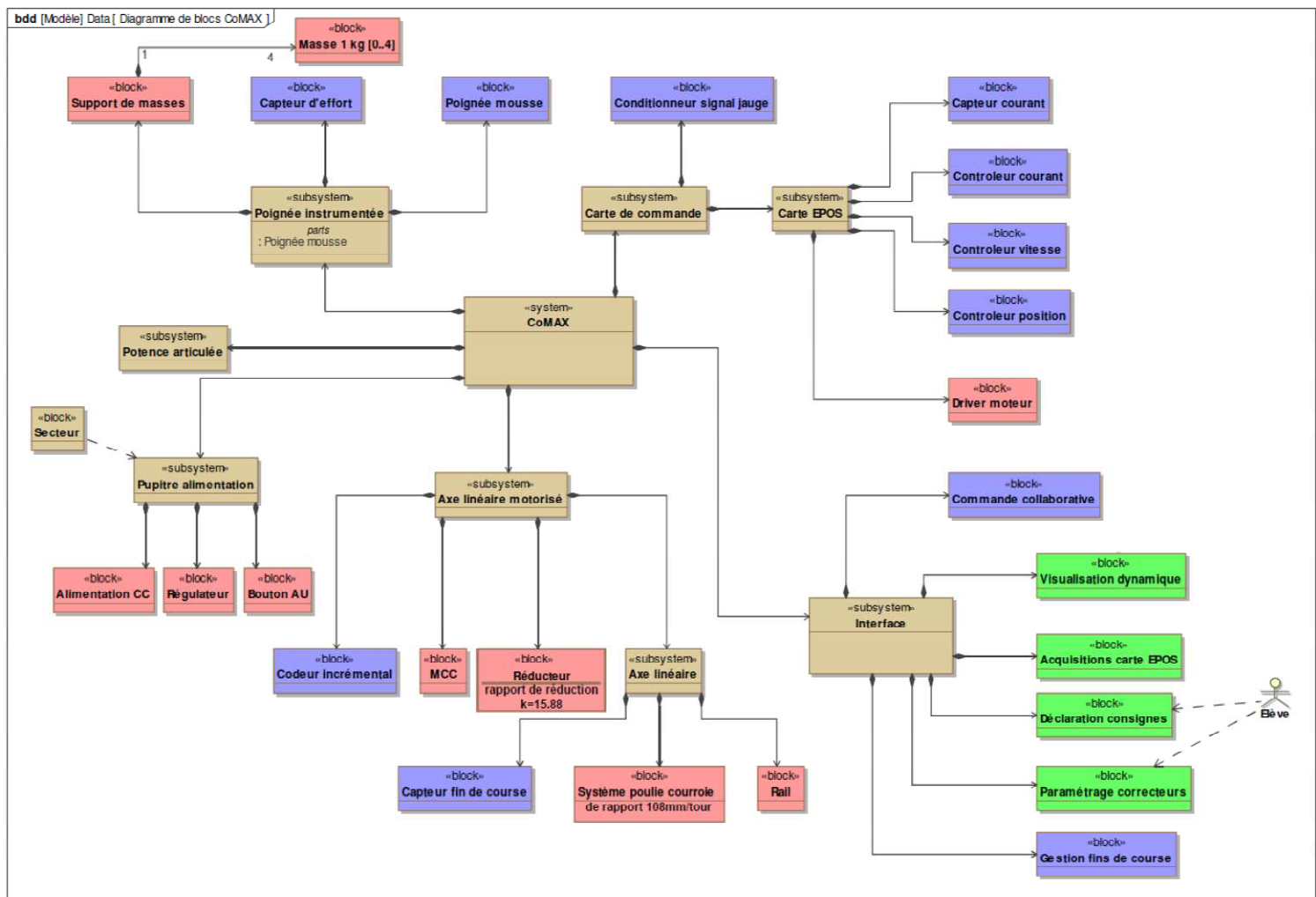
Activité 16: Affiner le modèle théorique en tenant compte des frottements. Recalculer les couples théoriques C_i et le couple thermique équivalent. L'écart entre le modèle et le réel est-il acceptable à présent?

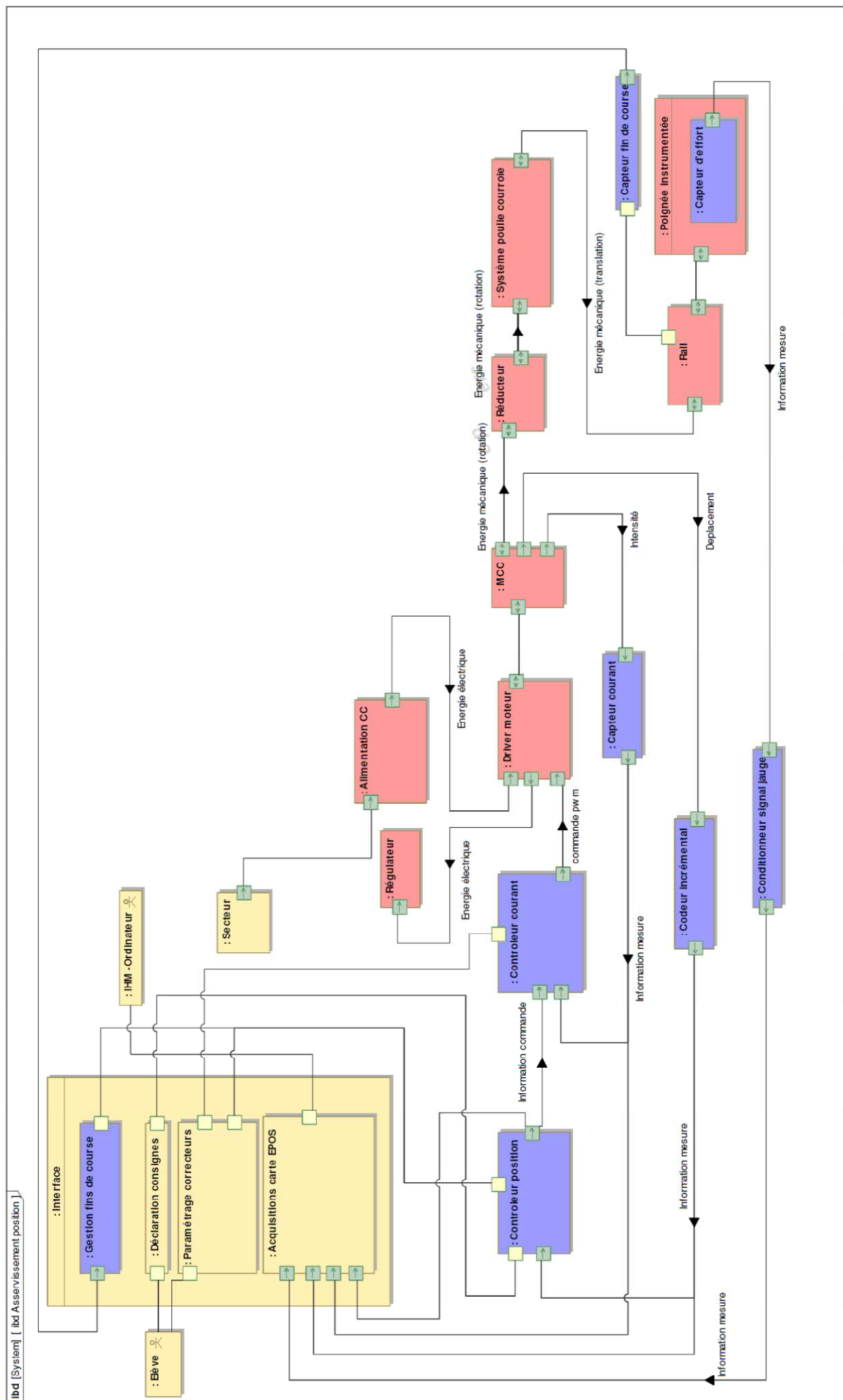
4. Réflexion sur la démarche de l'ingénieur:

Activité 17: Synthèse: Situer les activités 4 à 15 par rapport à la démarche de l'ingénieur présentée page 1.



Annexe 2: Diagramme de Description de Blocs [bdd] du CoMax. Adapté de source Didastel

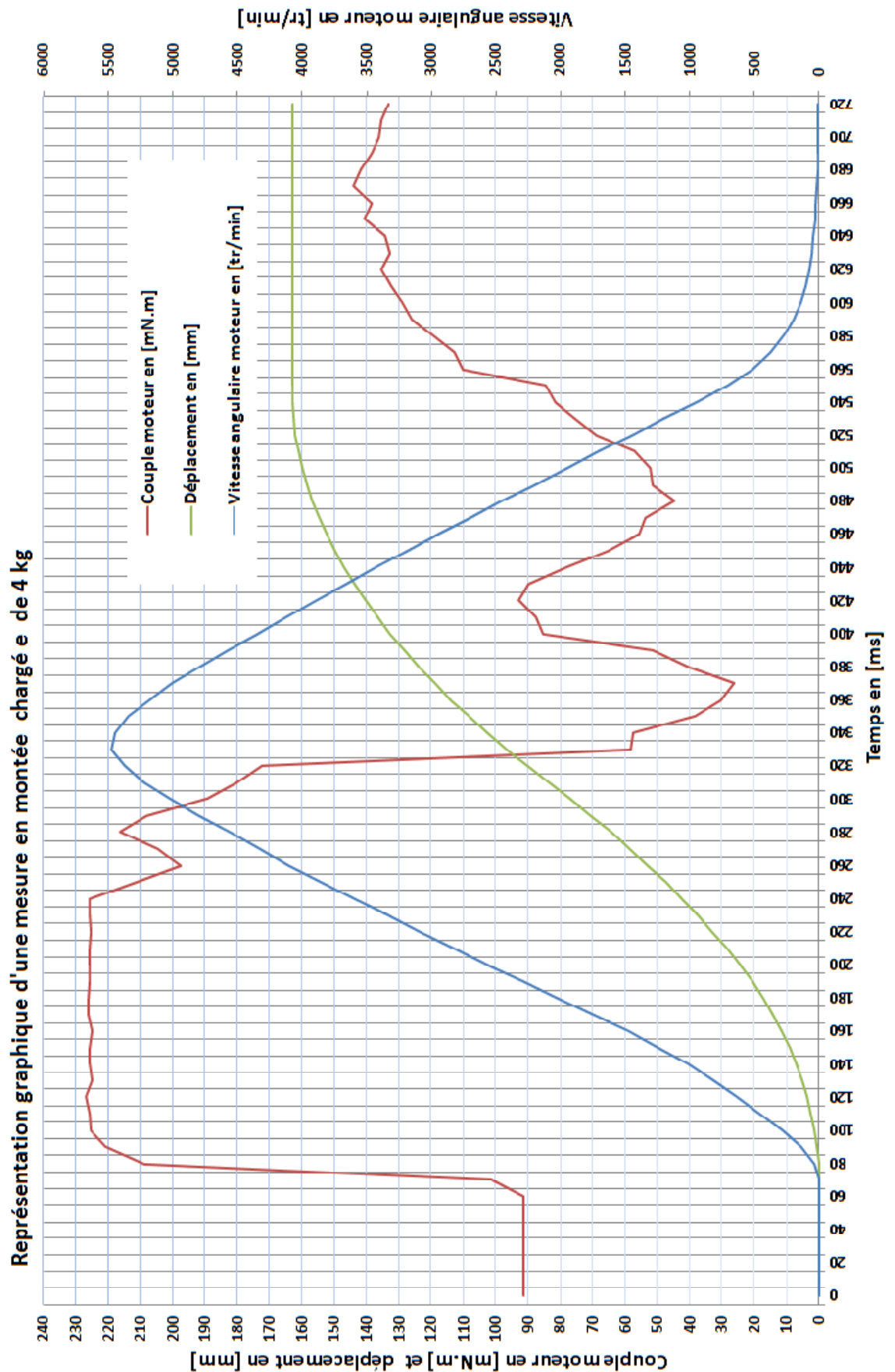




Annexe 4: Performances mesurées sur le Comax du lycée Kléber - Strasbourg.

■ Protocole expérimental:

- M=4 kg ajoutés en montée,
- Système asservi en position avec une consigne de 163mm en suivant une loi de vitesse en trapèze où:
- Vitesse maximale moteur : 6000 tr/min ou rpm,
- Accélération maxi moteur: 25000 rpm/s.



Id 2.1: "Rapidité de déplacement":			
Performances simulées		Performances mesurées	
Valeurs calculées de: <ul style="list-style-type: none">▪ N_{mot_max}▪ $\ddot{\theta}_{max_mot}$▪ $X_{max}=$▪ $T_a =$ $T_L=$ $T_d =$		Valeurs mesurées de: <ul style="list-style-type: none">▪ N_{mot_max}▪ $\ddot{\theta}_{max_mot}$▪ $X_{max}=$▪ $T_a =$ $T_L=$ $T_d =$	
Quantification des écarts et recherche des raisons des écarts:			
Id 2.2: "Masses à déplacer":			
▪ Calcul du couple thermique équivalent $C_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n C_i^2 T_i}{\sum T_i}} =$	Périodes T_i [en sec]	Couples C_i [en mN.m]	$C^{\text{exp}}_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n C_i^2 T_i}{\sum T_i}} =$
	$T_a =$	$C_a =$	
	$T_L =$	$C_L =$	
	$T_d =$	$C_d =$	
Quantification des écarts et recherche des raisons des écarts:			



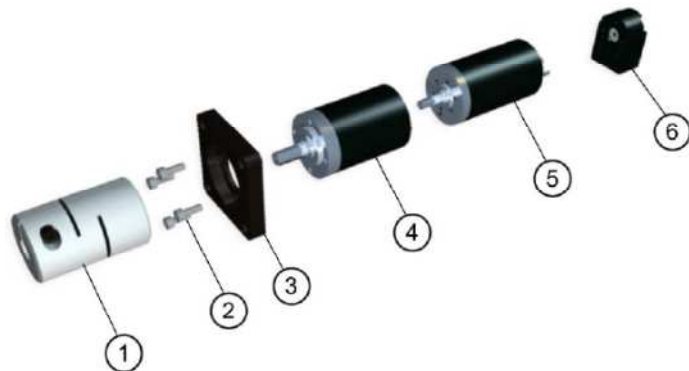
Annexe 5: Caractéristiques du moteur électrique Source: Maxon

		148866	148867
Motor Data			
Values at nominal voltage			
1 Nominal voltage	V	12.0	24.0
2 No load speed	rpm	6920	7580
3 No load current	mA	241	137
4 Nominal speed	rpm	6370	6930
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	94.9	170
6 Nominal current (max. continuous current)	A	6.00	5.77
7 Stall torque	mNm	1680	2280
8 Starting current	A	102	75.7
9 Max. efficiency	%	88	91
Characteristics			
10 Terminal resistance	Ω	0.117	0.317
11 Terminal inductance	mH	0.0245	0.0823
12 Torque constant	mNm / A	16.4	30.2
13 Speed constant	rpm / V	581	317
14 Speed / torque gradient	rpm / mNm	4.15	3.33
15 Mechanical time constant	ms	6.03	4.81
16 Rotor inertia	gcm ²	139	138

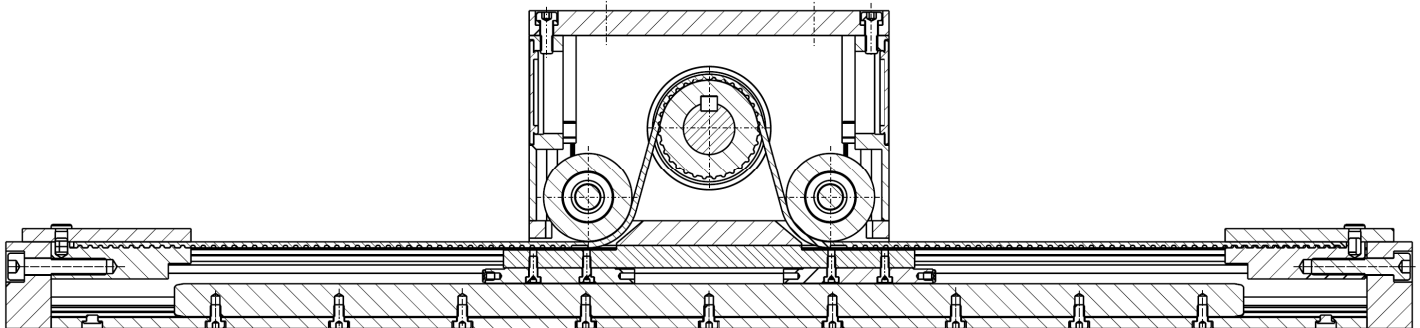


Annexe 6: Vue éclatée de l'ensemble motorisation. Source: Didastel

1. Accouplement élastique de compensation des défauts de coaxialité entre l'axe du réducteur et l'axe linéaire;
- 2-3. Bride et vis de fixation du bâti du réducteur sur le bâti de l'axe linéaire;
- 4-5. Association moto-réducteur à double train épicycloïdal
Maxon DP RE040 (148867) G/PM42 (24V/0016): puissance 150W; rapport de réduction 15,88
6. Codeur incrémental opto-électrique HEDL 5540 à 500 impulsions /tour;



Annexe 7: Axe linéaire à poulie crantée rapport de transmission: 108mm/ tour.



Source: Parker

Annexe 8: Architecture globale du système Source Didastel

