

Enseignement d'intégration

— Robot de radiologie vasculaire

ST2 Robotique Médicale 2024-2025

Thiago Alves Lima, Antoine Gufflet,
Guillaume Puel

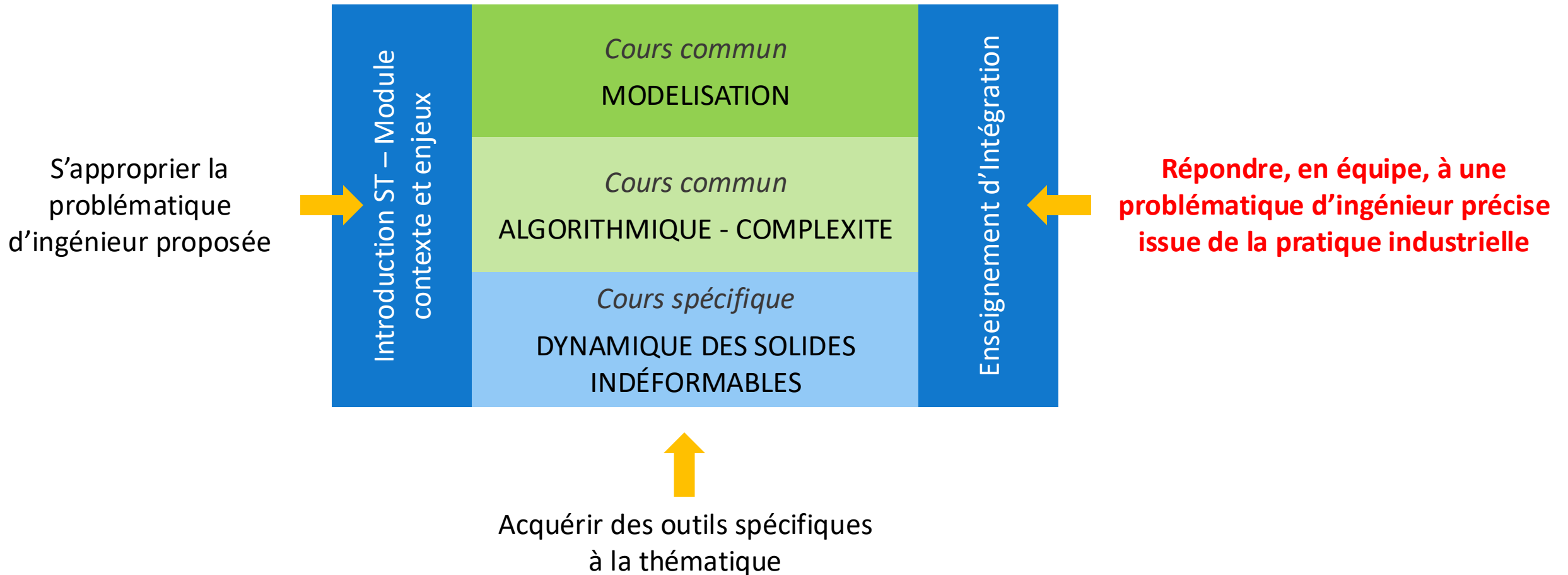
Code équipe Teams : 9gt55aw



ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Responsables : Maria Makarov, Guillaume Puel



ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Responsables : Maria Makarov, Guillaume Puel

Description des objectifs principaux des EI

- Introduction aux systèmes mécatroniques - **Conception et modélisation d'un robot médical** : radiologie interventionnelle / chirurgie mini-invasive / orthèse
- 4 aspects possibles dans les enseignements d'intégration :
 - Développement de modèles (cinématique, dynamique...) de robots poly-articulés
 - Analyse (statique et dynamique) et étude de l'interaction performances/dimensionnement
 - Simulation et validation des modèles développés associées à une identification au regard de mesures
 - Prise en compte des contraintes structurelles, technologiques et humaines (sécurité, ergonomie) liées au domaine médical

Robot de radiologie interventionnelle (GEHC)

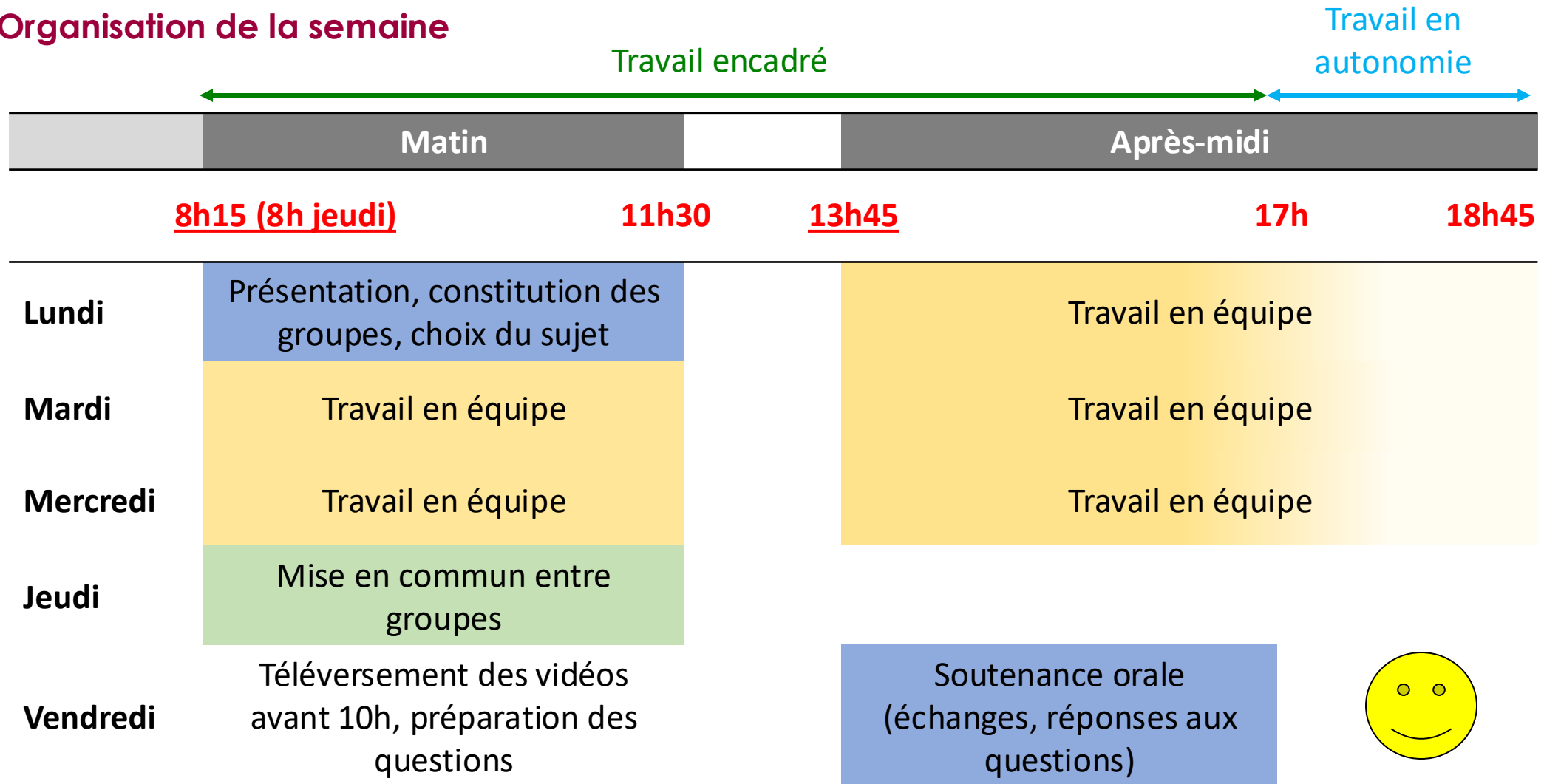
- Encadrement : Thiago Alves Lima, Antoine Gufflet, Guillaume Puel
- Support : robot de radiologie vasculaire Innova (GE HealthCare)
- Problématiques possibles : modélisation cinématique/dynamique, identification paramétrique, planification et suivi de trajectoire



ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Organisation de la semaine





ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Déroulement de la semaine

- 👉 Horaires : matin 8h15 (8h jeudi), pause 11h30-13h45, travail encadré jusqu'à 17h, travail en autonomie jusqu'à 18h45
- Au démarrage chaque matin : **bilan de la veille** avec les encadrants (**1 slide résumé du travail par personne + 1 slide planning envisagé de la journée**)
- Jeudi : mise en commun des travaux des groupes en fonction de l'avancement
- **Vendredi**
 - ✓ **Matin (en autonomie) : préparation de la soutenance orale**
 - ✓ Finalisation des slides, enregistrement d'une vidéo **sous Teams** et mise en ligne à **10h au plus tard** (avec la présentation), préparation des questions à poser aux autres groupes
 - ✓ Vidéo : 15 min (**prévoir 3 min de temps de parole par personne**)
 - ✓ **Après midi : soutenance orale** (réponses aux questions suscitées par les vidéos)
 - ✓ Présence obligatoire de chacun sur tout le créneau + soutenance orale de chaque groupe
 - ✓ Soutenance orale :
 - ✓ Créneau de 20 min par groupe : questions/débriefing, chacun dans le groupe doit prendre la parole
 - ✓ Chaque groupe sera également « opposant » de deux autres groupes lors de la présentation → prépare et pose des questions permettant d'approfondir l'analyse
- **Pénalité 2 points par demi-journée d'absence injustifiée** 💣 ⚠️ ⓘ



ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Livrables

👉 **A remettre sur Edunao - Lundi 3/2 minuit au plus tard**

👉 **Vidéo** (+ présentation associée)

👉 **Archive avec les documents de l'étude**

➤ **Format** = archive .zip nommée selon la convention <thème>_<n° sujet> où <thème> = Radio ou Chir ou Exo - Par exemple Radio_2 pour le sujet 2 sur le thème du Robot interventionnel

➤ **Contenu de l'archive :**

1. Notice technique (format .pdf + fichiers source, comme le .docx ou code Latex)

✓ Maximum 10 pages

✓ Contenu conseillé :

1. Contexte

2. Démarche

3. Hypothèses (de modélisation)

4. Description + équations du modèle

5. Description de simulations (conditions de simulation et résultats)

6. Analyse de résultats

7. Conclusion (lien éventuel avec autres équipes)

2. Code documenté (archive .zip avec un fichier récapitulant tous les fichiers et ordre d'exécution – readme.txt + code commenté au fur et à mesure)



ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Evaluation

/10 : travail réalisé

- /4 : participation – individualisée
- /6 : livrables – commun à l'équipe

/10 soutenance orale












- /6 : fond
 - ✓ /2 : pertinence de la démarche – équipe
 - ✓ /2 : analyse critique des résultats – équipe
 - ✓ /2 : qualité des questions et des réponses aux questions – individualisée
- /4 : forme
 - ✓ /1 : qualité de support – équipe
 - ✓ /1 : cohérence du discours – individualisée
 - ✓ /1 : précision des informations et vocabulaire – individualisée
 - ✓ /1 : sélection des informations présentées – équipe

 **Pénalité : 2 points par demi-journée d'absence injustifiée**   

ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Evaluation des compétences

- **C1** Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
- **C4** Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- **C7** Savoir convaincre
- **C8** Mener un projet, une équipe

Activité \ Ci	C1	C4	C7	C8
Module contexte et enjeux				
Cours spécifique				
Enseignement d'intégration	 	 	 	 



Apports



Evaluation

ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Evaluation des compétences

Ci	Cij	Description générale de ce qui est évalué	Occurrence au cours de la semaine d'EI
C1	C1.1 à C1.4	Qualité de l'approche technique et des résultats obtenus	Tout au long de la semaine
C4	C4.1, C4.2	Reformulation et compréhension du fond du problème; Recul sur les enjeux et l'impact de l'étude réalisée vis-à-vis du sujet, voire par rapport à l'état de l'art scientifique / technique	Surtout au début et à la fin de la semaine
C7	C7.1 à C7.4	Qualité du rapport écrit et présentation orale, fond et forme	Surtout à la fin de la semaine
C8	C8.1 à C8.4	Efficacité du travail d'équipe	Tout au long de la semaine

ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Les applications de l'imagerie médicale

Imagerie Médicale

Imagerie fonctionnelle
(NM / PET)



IRM



Ultrasons



Rayons X

Mammographie



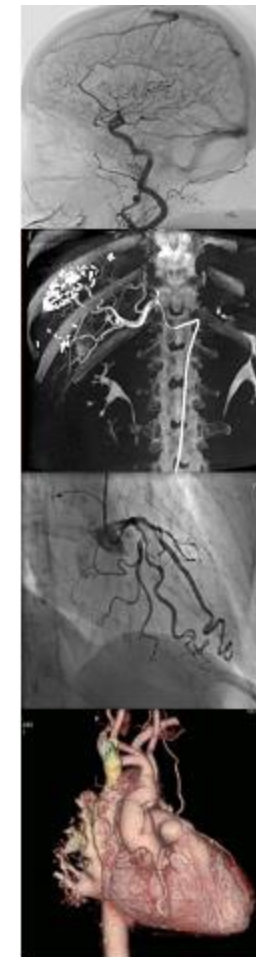
CT (Computed Tomography)



Radiographie & fluoroscopie



Radiologie interventionnelle

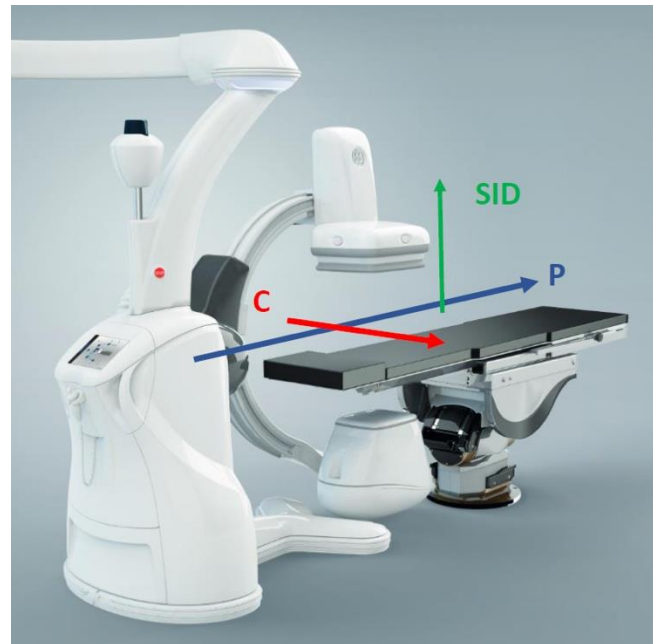


ST2 Robotique médicale

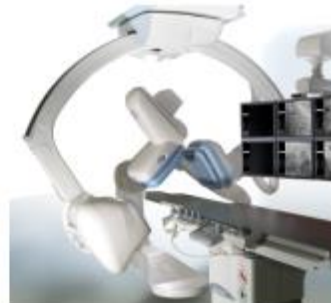
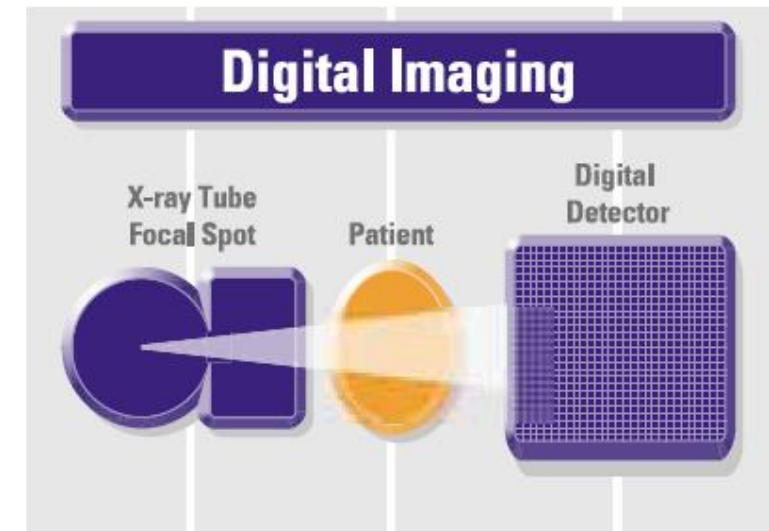
Enseignement d'intégration

Les robots de radiologie interventionnelle

<https://www.youtube.com/watch?v=FpdpJnFBG1M>



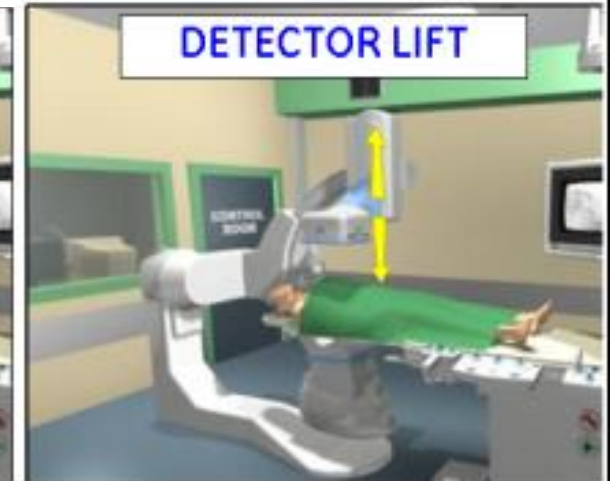
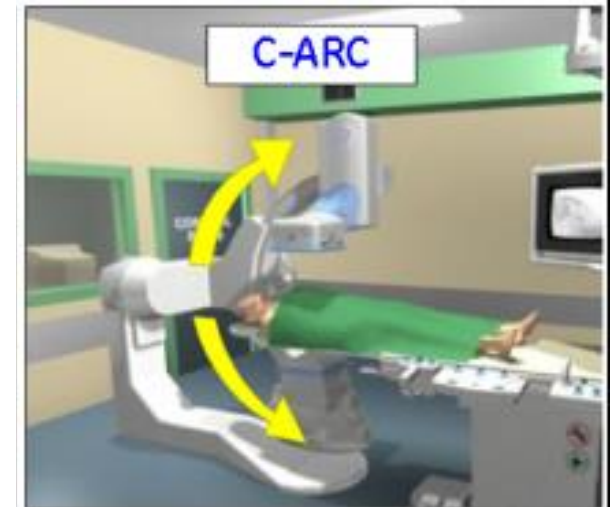
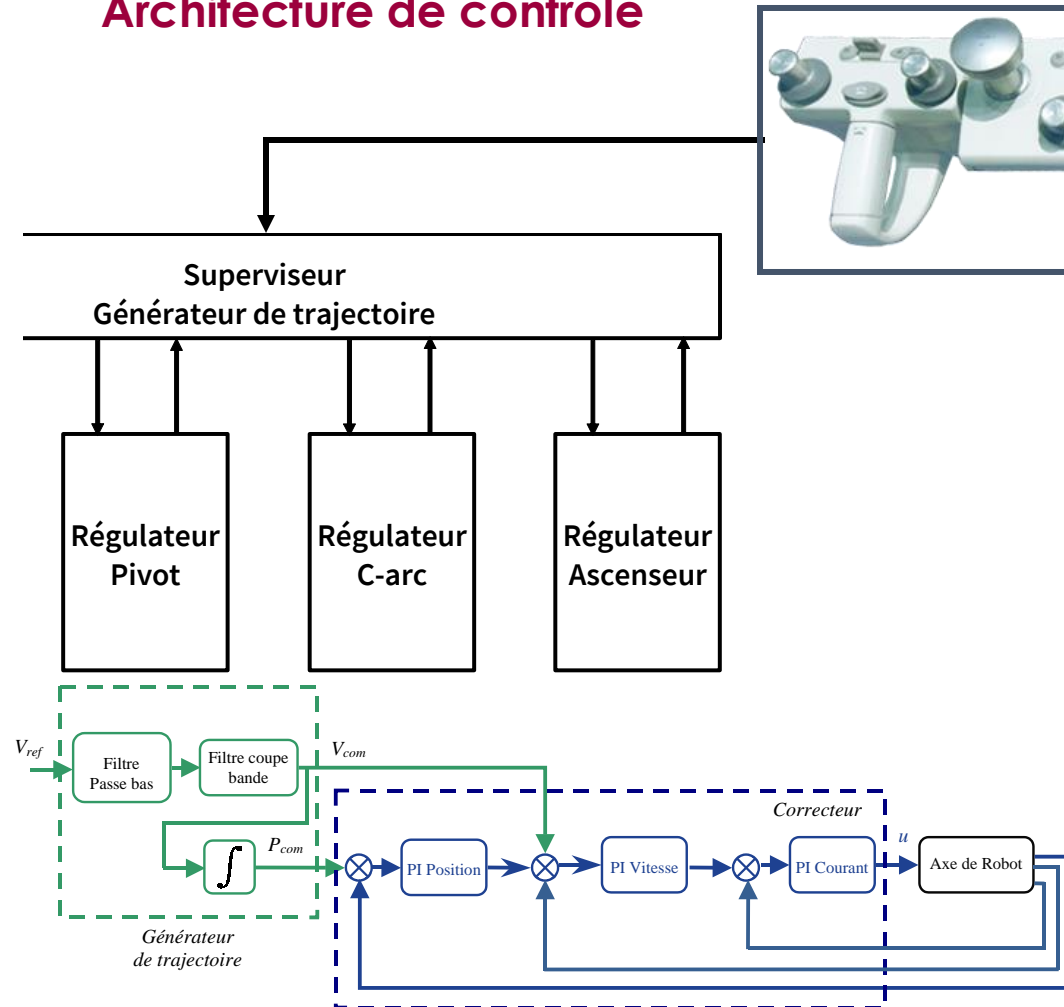
Chaîne image



ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

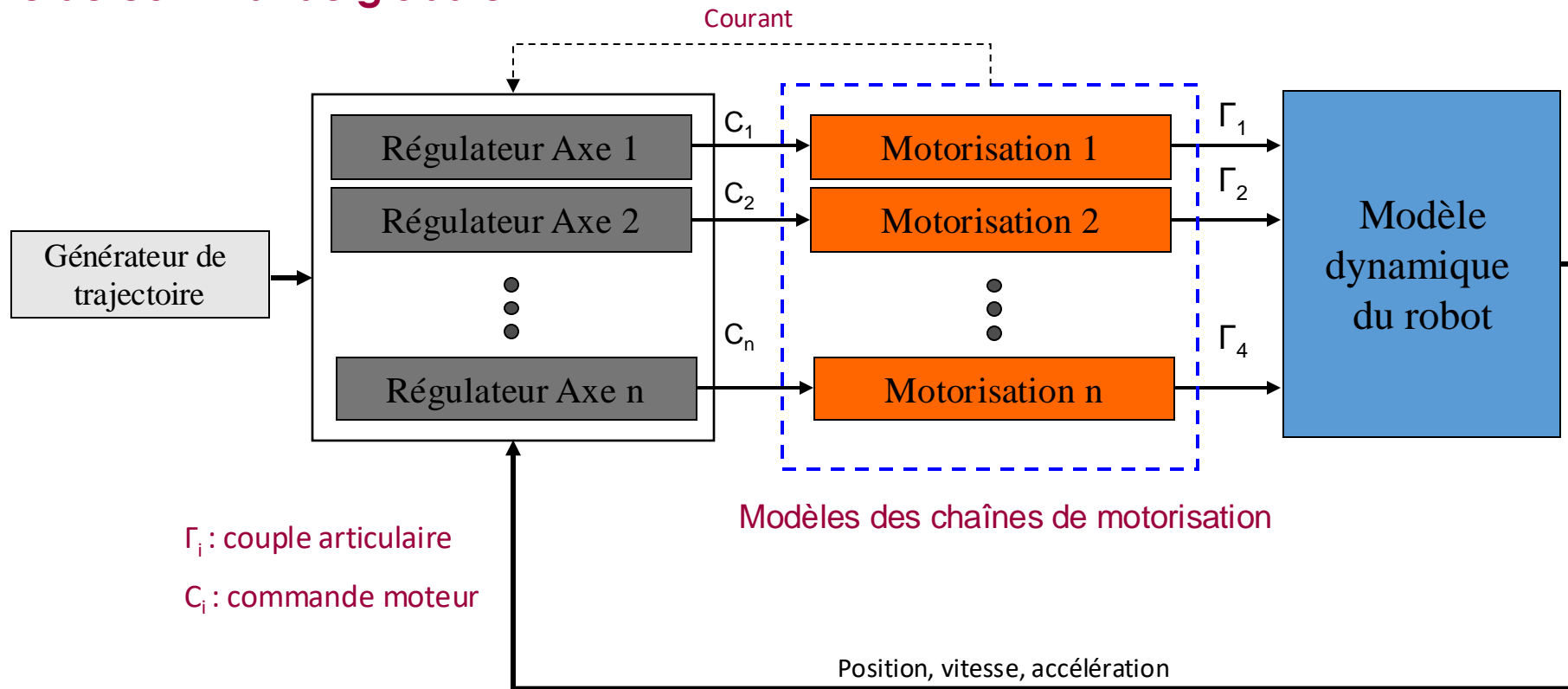
Architecture de contrôle



ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Structure de commande globale

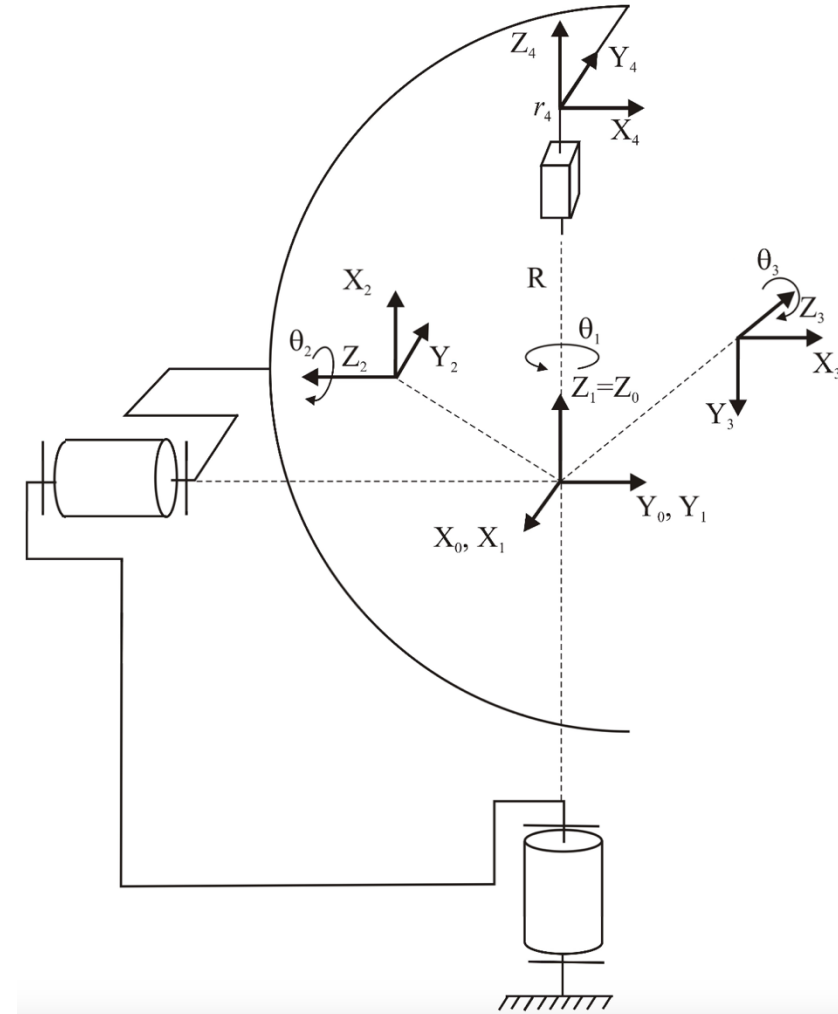
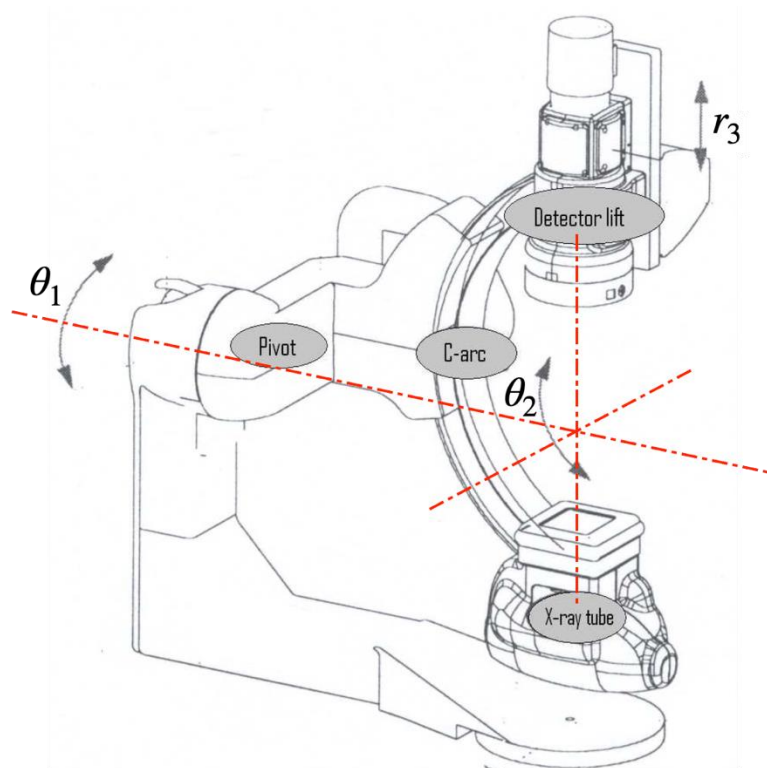


ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Méthodologie de Modélisation

Paramétrage géométrique



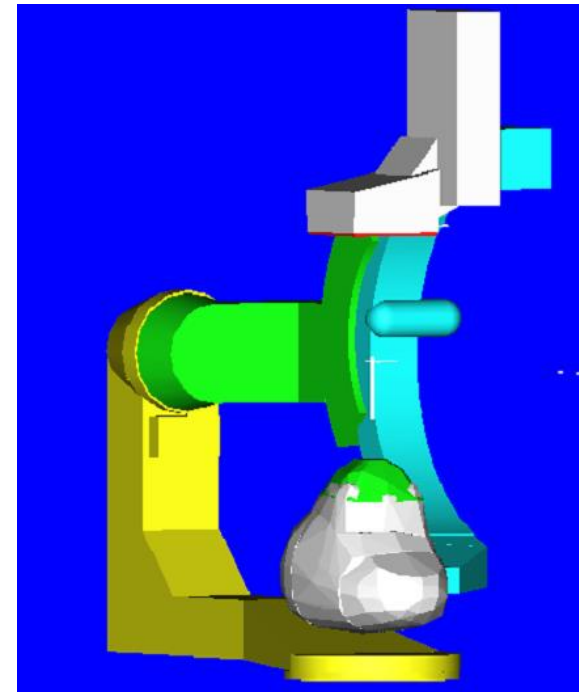
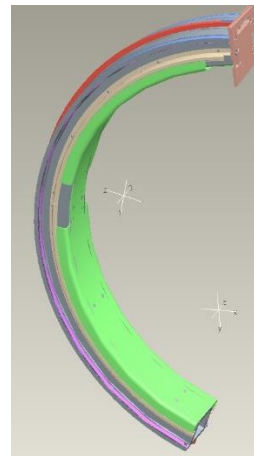
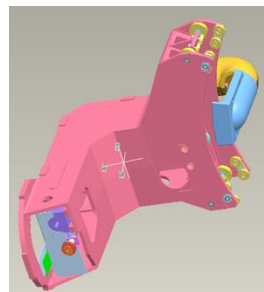
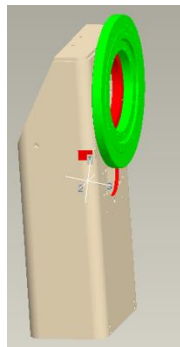
ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Méthodologie de Modélisation

Paramétrage géométrique

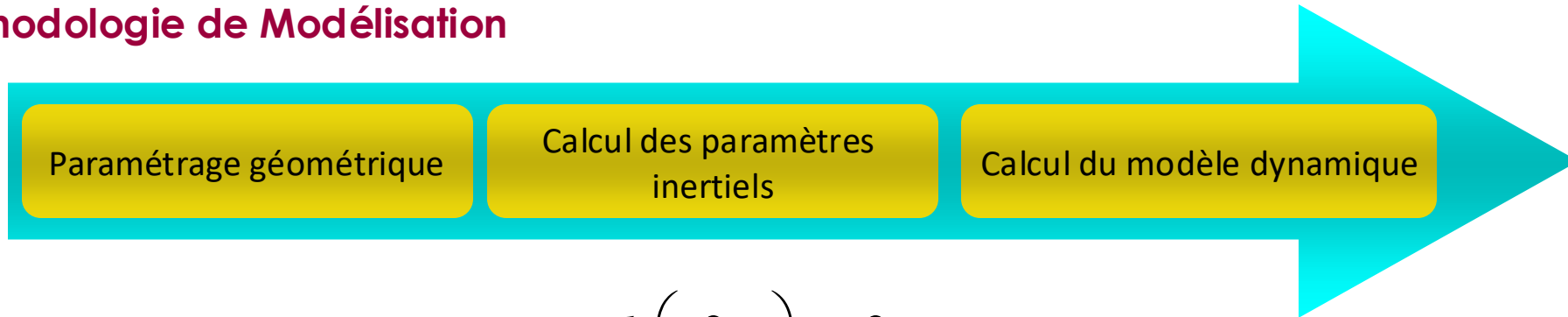
Calcul des paramètres
inertiels



ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Méthodologie de Modélisation



L : Lagrangien $L=E-U$

E : énergie cinétique totale

U : énergie potentielle totale

Γ_j : Couple généralisé

q_j : position articulaire

$$\Gamma_j = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j}$$



$$\Gamma = A(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) + Q(q)$$

Matrice d'inertie du robot

Matrice des couples/forces de Coriolis et centrifuges

Vecteur des couples/forces de gravité

ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Identification des paramètres du modèle

Dynamique du robot

Paramètres (pou chaque axe)	Calculable	Identifiable expérimentalement
Paramètres Inertiels		
- Masse (M)	X	X
- Centre de gravité (X_g, Y_g, Z_g)	X	X
- Matrice d'inertie (XX, XY, XZ, YY, YZ, ZZ)	X	X
Moteur DC:		
-Constante de couple (K_t)	X	X
-Resistance (R)	X	X
-Inductance (L)	X	X
Frottement (dans le sens direct et inverse du mouvement) :		
- Frottement sec au démarrage (F_d, F_{d_inv})	Ordre de grandeur	X
- Frottement sec (F_s, F_{s_inv})	Ordre de grandeur	X
- Frottement visqueux (F_v, F_{v_inv})	Ordre de grandeur	X
- Rendement côté moteur/charge (η_m, η_c)	Ordre de grandeur	X
Reducteur :		
- Rapport de réduction (N)	X	X
- Raideur de transmission (k)	X	X

Etalonnage

Définition d'un modèle de la chaîne d'étalonnage permettant de prendre en compte les imperfections géométrique et/ou des éléments négligés



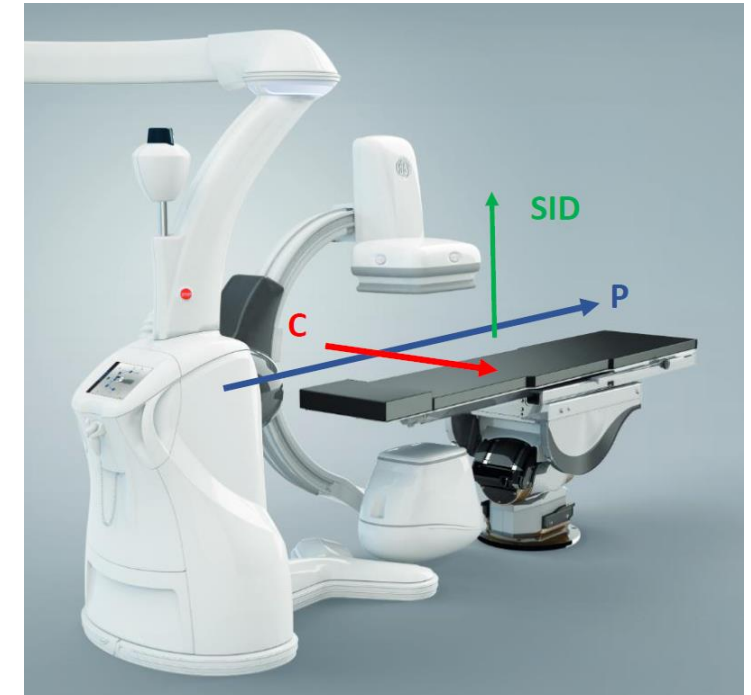
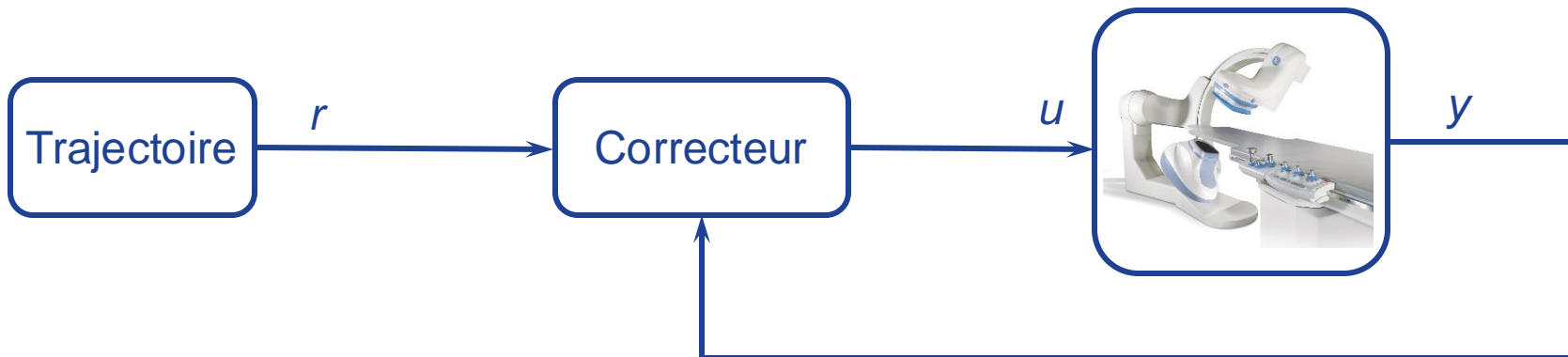
Paramètres identifiables expérimentalement

ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Sujets

- 👉 S1 : Planification de trajectoire 3D du robot pour une analyse de type « cardiac spin »
- 👉 S2 et S5 : Développement d'un simulateur d'un modèle dynamique du robot Innova
- 👉 S3 et S6 : Identification des paramètres d'un modèle dynamique d'un robot de radiologie interventionnelle
- 👉 S4 et S7 : Développement d'un modèle d'un robot porteur à 2 roues motrices



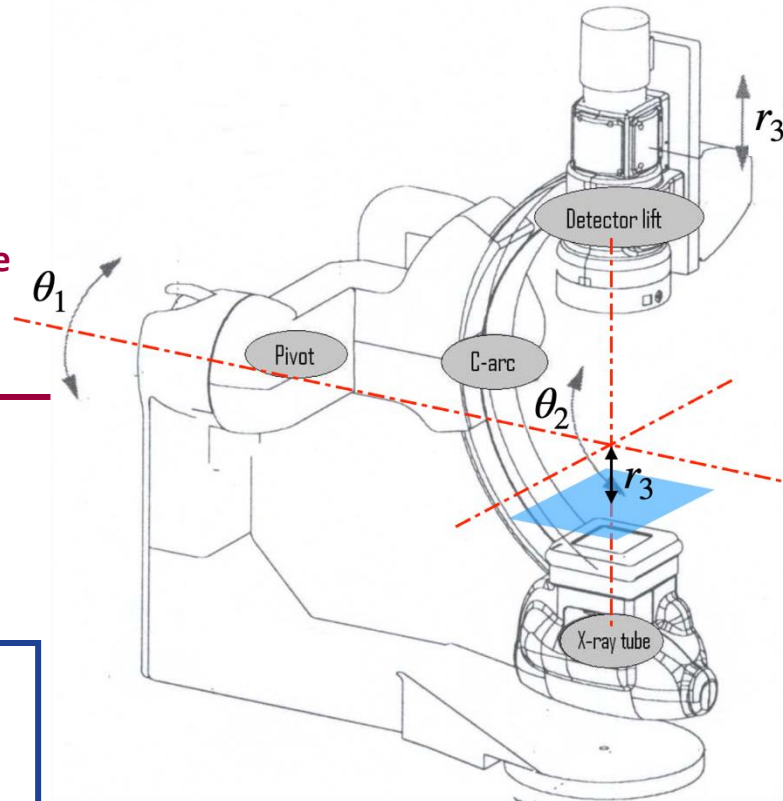
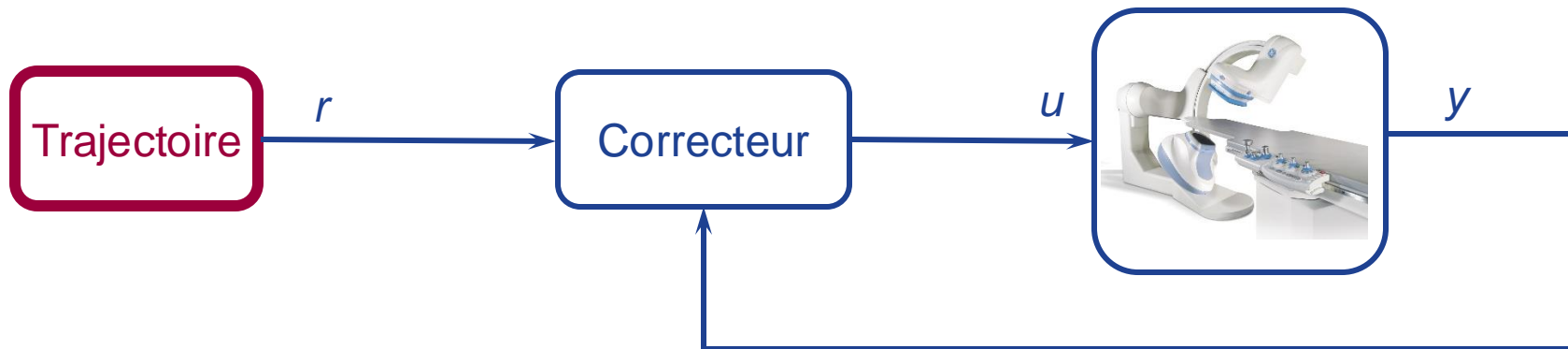
ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Sujet S1 : Planification de trajectoire 3D du robot pour une analyse de type « cardiac spin »

Contexte

- ☞ Pour certaines analyses médicales, le radiologue définit des trajectoires dans un repère cartésien
- ☞ Pour des questions de facilité de réalisation, l'asservissement du robot est réalisé sur les vitesses articulaires (vitesses des axes du robot)
- ☞ Besoin de connaître l'espace d'évolution du plan image du robot

➔ **Nécessité de développer un générateur de trajectoires prenant en entrée la trajectoire dans le repère cartésien et fournissant en sortie les positions de référence des articulations du robot**





ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Sujet S1 : Planification de trajectoire 3D du robot pour une analyse de type « cardiac spin »

Objectifs

- 👉 Formulation des modèles géométriques et cinématiques directs du robot (passage articulaire vers cartésien)
- 👉 Evaluation en simulation des approches par inversion analytique et par la commande cinématique dans le but d'inverser le modèle géométrique (cartésien vers articulaire)
- 👉 Détermination de la trajectoire articulaire du robot pour réaliser un mouvement connu à l'avance dans le repère cartésien
- 👉 Choix d'une méthode d'interpolation permettant de déterminer la trajectoire cartésienne sous contraintes de vitesse et accélération maximales, et détermination par inversion de modèle les trajectoires articulaires correspondantes
- 👉 Développement d'un module de visualisation élémentaire permettant de valider la trajectoire effectuée

Données fournies

- 👉 Données géométriques et cinématiques d'un robot 3 axes
- 👉 Documentation sur la modélisation cinématique des robots

Livrables

- 👉 Procédure de calcul dans l'environnement Matlab des positions articulaires à partir d'une trajectoire dans le repère cartésien
- 👉 Module de visualisation du robot représenté par des formes élémentaires dans l'environnement Matlab/Simulink
- 👉 Documentation exploitable par d'autres équipes et présentation du travail réalisé

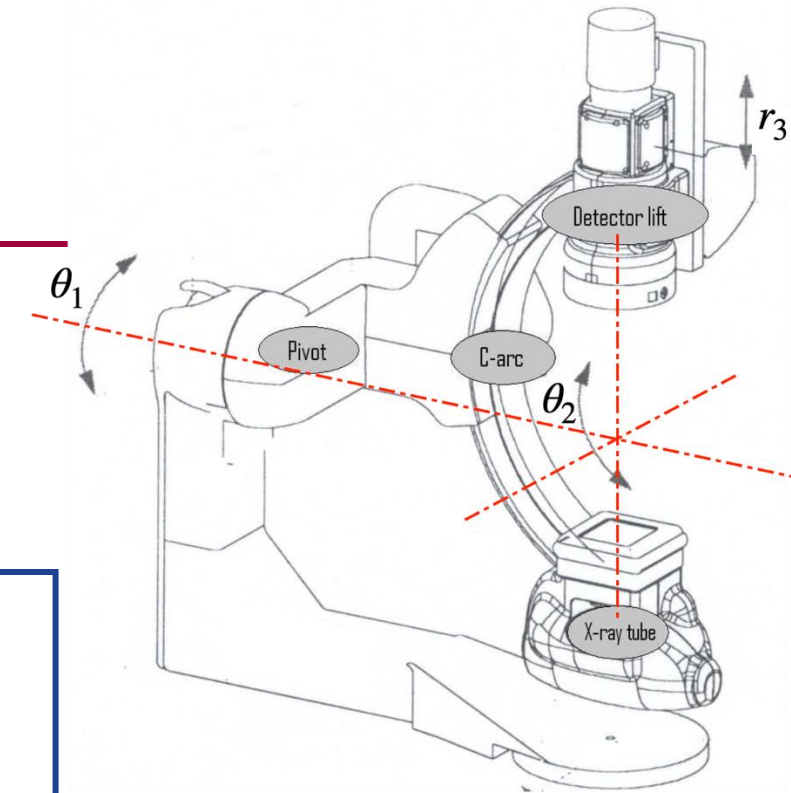
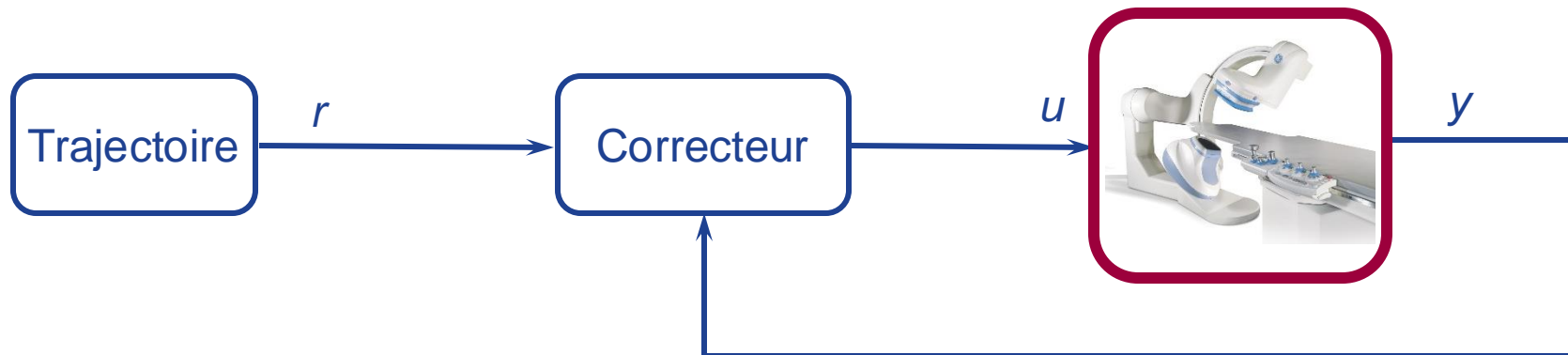
ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Sujets S2 et S5 : Développement d'un simulateur d'un modèle dynamique du robot Innova

Contexte

- 👉 Développement de lois de commande pour le pilotage du robot
- 👉 Vérification des performances
- 👉 Dimensionnement des éléments constitutifs

➡ **Nécessité de développer un modèle dynamique de simulation du robot**





ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Sujets S2 et S5 : Développement d'un simulateur d'un modèle dynamique du robot Innova

Objectifs

- 👉 Développer un modèle dynamique de simulation du robot restreint à deux axes (pivot et C-arc) dans un premier temps, mais facilement généralisable pour le compléter avec l'ascenseur (mouvement du détecteur) dans un deuxième temps
- Formulation du modèle dynamique du robot vasculaire deux axes, configurable facilement pour une extension à 3 axes
- Proposition de matrices d'inertie pour les différents éléments du robot en considérant des formes simplifiées
- Développement du modèle de simulation dans l'environnement Matlab/Simulink (modèle de motorisation fourni)
- Validation du modèle au regard d'essais (numériques) simples

Données fournies

- 👉 Données géométriques et cinématiques d'un robot 2/3 axes
- 👉 Documentation sur la modélisation dynamique des robots

Livrables

- 👉 Modèle d'un robot deux ou trois axes : Pivot et C-arc (et ascenseur) à implémenter dans Matlab/Simulink
- 👉 Procédures de validation de la cohérence des résultats obtenus
- 👉 Documentation exploitable par d'autres équipes et présentation du travail réalisé

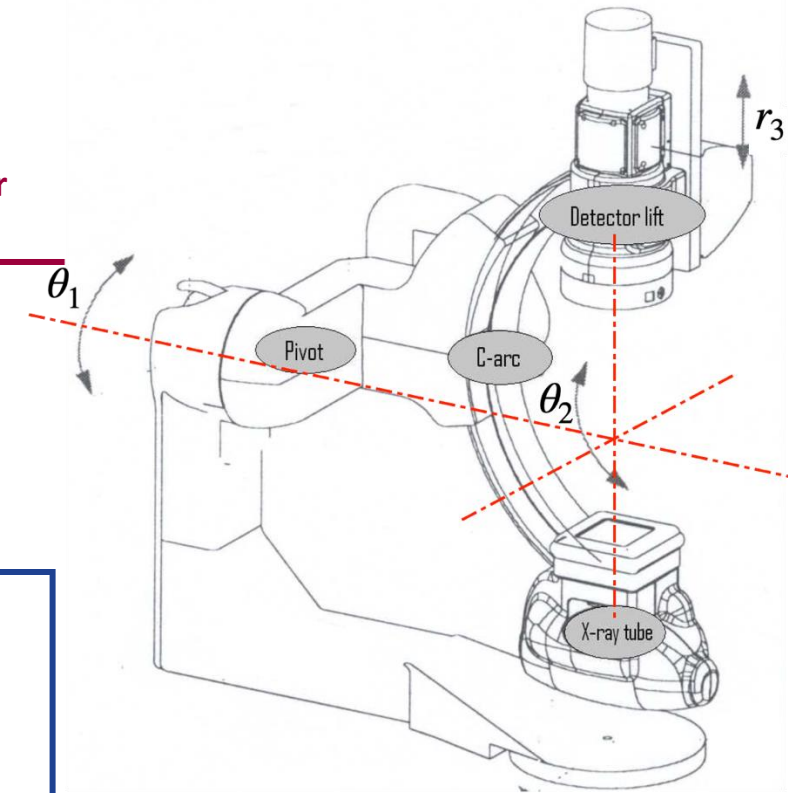
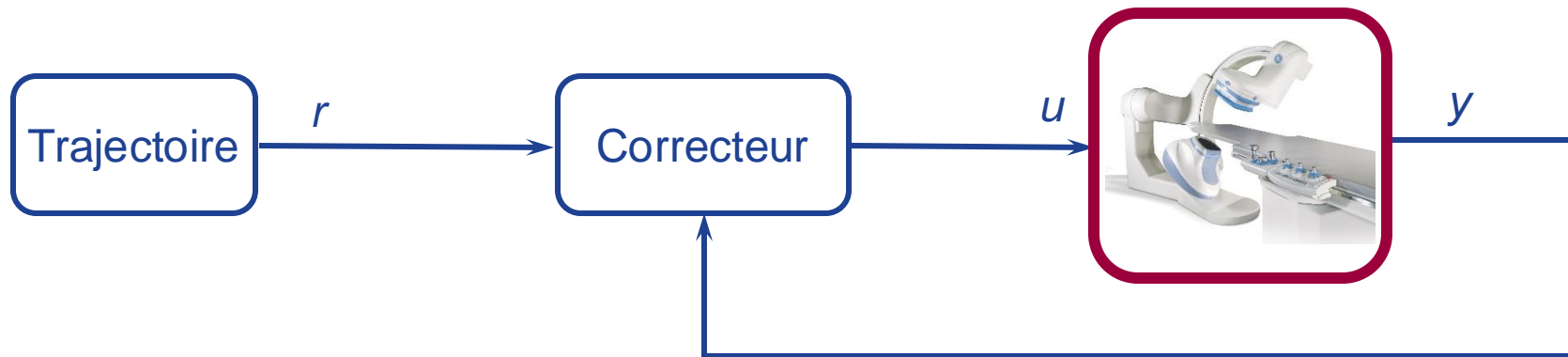
ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Sujets S3 et S6 : Identification des paramètres d'un modèle dynamique d'un robot de radiologie interventionnelle

Contexte

- 👉 Développement de lois de commande pour le pilotage du robot
- 👉 Vérification des performances
- 👉 Analyse de la robustesse (stabilité, performances) du robot au regard des incertitudes

➡ **Nécessité d'identifier les paramètres d'un modèle dynamique de simulation du robot à partir de données mesurées**





ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Sujets S3 et S6 : Identification des paramètres d'un modèle dynamique d'un robot de radiologie interventionnelle

Objectifs

- 👉 Développer une procédure d'identification visant à déterminer les paramètres inconnus, mal connus ou incertains :
 - Prenant en entrée des grandeurs externes mesurables (positions et vitesses articulaires)
 - Fournissant en sortie les valeurs d'un ensemble de paramètres du modèle retenu
 - Analysant l'influence du bruit dans les données mesurées

Données fournies

- 👉 Modèle dynamique (de type « boîte noire ») deux axes du robot régulé permettant de réaliser des essais numériques en vue d'obtenir les données nécessaires à l'identification des paramètres du modèle
- 👉 Documentation sur la modélisation dynamique des robots

Livrables

- 👉 Modèle formulé pour l'identification paramétrique du robot faisant apparaître les paramètres à identifier
- 👉 Procédures d'identification opérant à partir des données issues de simulations
- 👉 Valeurs identifiées pour le modèle dynamique fourni
- 👉 Documentation exploitable par d'autres équipes et présentation du travail réalisé

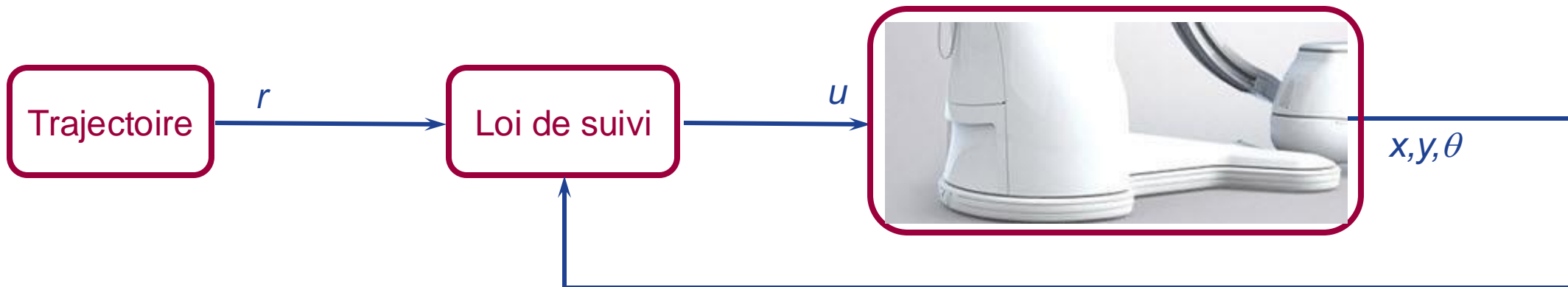
ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Sujets S4 et S7 : Développement d'un modèle d'un robot porteur à 2 roues motrices

Contexte

- ☞ Lors des phases d'intervention, la zone d'opération doit pouvoir être dégagée et le système d'imagerie porté par le robot doit être déplacé. Plusieurs solutions :
 - ☞ Utilisation d'un robot fixe dont l'une des articulations est en rotation autour d'un axe vertical, permettant de dégager l'ensemble portant le système d'imagerie
 - ☞ Utilisation d'un robot sur roues portant le système de prises d'images

➔ Deuxième solution plus complexe, mais offrant aussi une plus grande souplesse en permettant de dégager l'ensemble de la zone d'opération





ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Sujets S4 et S7 : Développement d'un modèle d'un robot porteur à 2 roues motrices

Objectifs

- ☞ Conception et développement d'un chariot mobile
 - Prenant en entrée les vitesses aux roues (modèle cinématique) ou les couples aux roues (modèle dynamique)
 - Fournissant en sortie la trajectoire suivie et l'orientation (lacet)
- ☞ Développement d'une méthodologie de planification de trajectoire et/ou de suivi de trajectoire

Données fournies

- ☞ Caractéristiques géométriques du chariot
- ☞ Cas types d'utilisation
- ☞ Documentation sur la modélisation cinématique et dynamique des robots mobiles

Livrables

- ☞ Modèles cinématique et dynamique du chariot
- ☞ Résultats de validation des cas d'étude retenus
- ☞ Méthode de planification et/ou de suivi d'une trajectoire
- ☞ Documentation exploitable par d'autres équipes et présentation du travail réalisé

ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Check-list pour préparer la présentation

1. Les slides doivent être **numérotés** (pour référence facilitée lors des questions)
2. La présentation doit être structurée avec des **parties et sous-parties** bien nommées et numérotées, et un **sommaire** présenté au début
 - ☐ La présentation doit contenir un slide de conclusion récapitulatif et d'ouverture
3. Le **nombre de slides** doit être adapté à la durée de la présentation
 - ☐ Compter environ 1 slide / minute
4. Les informations présentées doivent être lisibles et compréhensibles
 - ☐ Pas trop de **texte** (c.à.d *pas comme sur ce slide de référence...*)
 - ☐ Toutes les **notations** expliquées au moins à l'oral (équations, figures...)
 - ☐ Pas de **code MATLAB**, pas de **schémas Simulink** « bruts » (non lisibles) → schémas blocs dessinés spécialement pour la présentation (Powerpoint)
 - ☐ Les **graphiques** lisibles (titre, axes annotés et gradués, légende...)
 - ☐ Approche **système** :
 - En décrivant un système, préciser ses entrées et sorties, faire des schémas blocs
 - Préciser les modèles et hypothèses utilisés
5. Les **sources** des images / informations doivent être citées
 - ☐ Par exemple par une référence brève [<Auteur><Année>] explicitée en bas de slide



ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Rappel d'éléments de communication orale (ateliers API)

Préparer la vidéo de présentation

- ☞ Quel sera l'auditoire et quelles sont ses attentes ?
- ☞ Quels seront les moyens audio visuels utilisés et la configuration du lieu ?
- ☞ Quelle est la **durée** pour l'intervention prévue/nécessaire ?
- ☞ Comment débiter l'exposé et **établir la relation avec l'auditoire** ? POINT CLE !!!
- ☞ Comment introduire le sujet et présenter **les objectifs** de la présentation ?
- ☞ Quels sont les **messages importants** à communiquer et dans quel ordre les présenter ?
- ☞ Comment structurer le discours en établissant des liens clairs et pertinents ?
- ☞ Comment donner du poids aux messages les plus importants ?
- ☞ Comment faire participer l'auditoire, **susciter l'intérêt** et maintenir l'attention ?
- ☞ Essayer d'**anticiper** les questions qui pourront être posées
- ☞ Comment **conclure en ouvrant** sur les questions et comment répondre de façon convaincante en mobilisant l'ensemble de l'équipe en fonction des sujets ?



ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Rappel d'éléments de communication orale (ateliers API)

Les essentiels de la communication orale

👉 La communication repose autant, voire plus, sur le non verbal que sur le verbal

- Eviter trop de texte sur les supports ou trop d'oral sans supports visuels
- Privilégier schémas, graphiques, images
- Soigner les passages de paroles
- Mettre en place un mécanisme permettant de connaître quel est le présentateur

👉 Les questions sont aussi importantes que l'exposé,

- Ecouter l'auditoire lorsqu'il vous interrompt
- Ne jamais répondre du tac au tac : préparer la réponse, reformuler la question, prendre le temps de consulter l'équipe si nécessaire, répondre

👉 Manifester conviction et enthousiasme

- Eviter le ton monotone
- Ne pas avoir peur de laisser passer des émotions

👉 Attention à l'attitude des autres membres de l'équipe pendant que l'un parle :

Être prêt à aider l'orateur si nécessaire mais sans le couper, éviter les mains dans les poches, éviter de chuchoter entre membres de l'équipe, avoir de la « présence », ...

ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Rappel d'éléments de communication orale (ateliers API)

Attention au format des illustrations

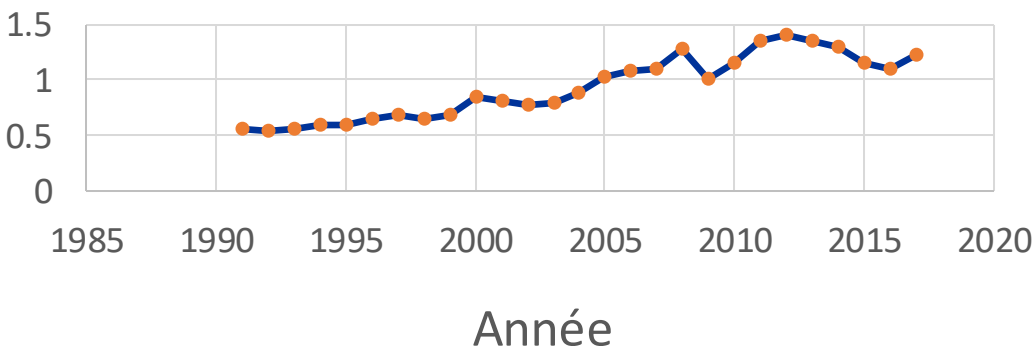
- Se rappeler qu'il est important d'utiliser les graphiques à bon escient
- Comparer les 2 slides ci-dessous, qui présentent toutes la même information de façon différente

Détails des prix du gazole

Date	Prix annuel Gazole en euros	Date	Prix annuel Gazole en euros
1991	0,55	2005	1,03
1992	0,53	2006	1,08
1993	0,56	2007	1,09
1994	0,59	2008	1,27
1995	0,59	2009	1,00
1996	0,65	2010	1,15
1997	0,68	2011	1,34
1998	0,64	2012	1,40
1999	0,69	2013	1,35
2000	0,85	2014	1,29
2001	0,80	2015	1,15
2002	0,77	2016	1,10
2003	0,79	2017	1,23
2004	0,88		

De grands tableaux sont souvent peu lisibles

Evolution du prix du diesel en France



Source: <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/prix-des-carburants/s-1762-evolution-du-prix-du-gazole.php>

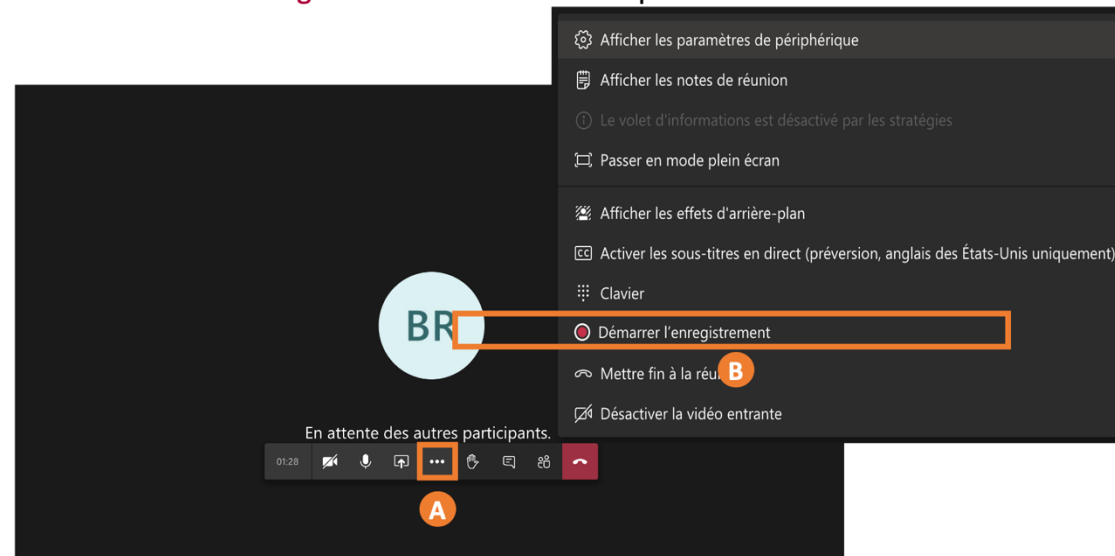
- Axes clairs
- Caractères lisibles
- Source des données précisée

ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Enregistrement de la présentation sous Teams

1 Pour enregistrer une vidéo :

- A Cliquez sur le menu contextuel « ... »
- B Cliquez sur le bouton « Démarrer l'enregistrement ». Pour mettre fin à l'enregistrement, cliquez sur le bouton « Arrêter l'enregistrement » au même emplacement »



Attention ! mettre fin à l'enregistrement ne mettra pas fin à la réunion ! Une fois l'enregistrement terminé, il sera disponible en visionnage directement depuis le canal de discussion de votre équipe et sur Stream (slide suivant)

ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Grille d'évaluation de la présentation

Fond de la présentation (/6)		0	0,5	1	1,5	2
1	Pertinence de la démarche employée (/2)					
2	Analyse critique des résultats (/2)					
3	Qualité des réponses aux questions (/2) + Chaque groupe posera au moins deux questions au cours de l'après-midi sur les présentations de deux autres équipes					
Forme de la présentation (/4)		0	0,25	0,5	0,75	1
1	Qualité du support (/1) • Les slides sont claires et attractives • Les graphes sont tous lisibles (titres, axes, étiquette, courbes,...)					
2	Cohérence du discours (/1) • La présentation est structurée et facile à suivre • Le discours est clair, articulé et coordonné entre les intervenants • Le temps de parole est réparti équitablement (y compris les réponses aux questions)					
3	Précision des informations et du vocabulaire (/1)					
4	Pertinence dans le choix des informations (/1) • Sélection des informations présentées, choix du scénario illustratif...					

ST2 Robotique médicale - Enseignement d'intégration

Evaluation des compétences

	Barème	C1	C4	C7	C8
1. Travail réalisé sur la semaine	/10				
1.1 Participation	/4				(7)
1.2 Livrables	/6	(1)		(5) Sauf code	
- étude des docs / biblio			(3)		
2. Soutenance	/10			(6) Avec questions	
2.1 Fond	/6	(2) Sauf questions			
- slide impact du travail			(4)		
2.2 Forme	/4				
NOTE TOTALE	/20	/10		/14	(8)
Critères de validation des Ci		(1)+(2)> 6	(3)&(4) : PASS/FAIL	(5)+(6)>8,4	(7) >2 (individuel) & (8) >12 (équipe)

ST2 Robotique médicale

Enseignement d'intégration

Code équipe Teams : 9gt55aw

- Constitution des équipes (5 membres max. par équipe)
- Répartition des sujets (sur la base des vœux de chaque équipe)
 - S1 – Planification de trajectoire et visualisation associée
 - S2/S5 – Modélisation dynamique du robot 3 axes
 - S3/S6 – Identification paramétrique du robot 2 axes
 - S4/S7 – Modélisation du chariot mobile

À vous de jouer !

