

Activités pédagogiques Robot Franka-Emika & SFERE

Robot collaboratif (Cobot) industriel 7 axes

Commandes et instrumentations didactisées



FRANKA EMIKA



Caractéristiques générales Franka Emika + SFERE :

- Moteurs brushless + réducteurs harmonic-drive (étage unique) :
 - Très faibles couples de frottements
 - Très faible inertie interne aux motoréducteurs
 - Modèles proches de la réalité
- Robot au contact des étudiants :
 - Certifié « cobot » : faible énergie d'impact, pas de risques de pincements...
 - Aucune cage ou barrière infrarouge, mouvements collaboratifs ou commandés
 - Seuils de déclenchements réglables (robot industriel à grande vitesse)
 - Réglage des droits utilisateurs pour régler les paramètres, exécuter des déplacements et simplifier l'interface graphique



Caractéristiques générales SFERE :

- ▶ Paramétrage facile et précis des déplacements :
 - ▶ Limitations possibles des déplacements grâce à 8 murs virtuels
 - ▶ Détection automatique des contacts et des collisions
 - ▶ Paramétrage complet des asservissements internes (PID)
 - ▶ Compensation automatique de la gravité, de Coriolis « force centrifuge »
 - ▶ Compensation réglable de l'inertie du robot
- ▶ Affichage didactisé ou détaillé des mesures :
 - ▶ Vue 3D de la position du robot
 - ▶ Valeurs numériques de toutes les mesures du robot (unités SI)
 - ▶ Calcul intégré du modèle mécanique

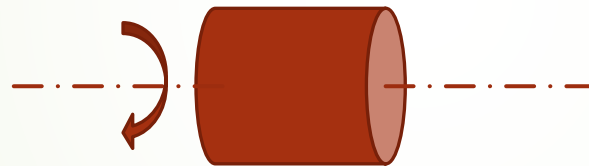


Caractéristiques générales SFERE :

- ▶ Données échantillonnées à 1ms des grandeurs commandées et échantillonnées du robot :
 - ▶ Position angulaire, position cartésienne, vitesse angulaire, vitesse cartésienne, couple, effort, matrices de positionnement homogène...
 - ▶ Tracé des courbes (site web intégré, Python 3)
 - ▶ Exports des données en texte (CSV) et au format Excel (XLSX)
- ▶ Boitier de commande temps réel autonome, aucune installation particulière sur les PC étudiants :
 - ▶ Liaison Ethernet sur USB (aucun driver requis sous Windows 10 et 11)
 - ▶ Utilisable depuis un simple navigateur web (Firefox...)
 - ▶ Entièrement piloté et instrumenté depuis Python 3 (Idle, Spyder standards)

Exploitations pédagogiques SFERE : étude des mouvements mécaniques

- ▶ En mode collaboratif et/ou pendant les déplacements commandés
- ▶ Sur les 7 positions/vitesses/accélérations articulaires



Commandes et paramètres : commande en positions articulaires

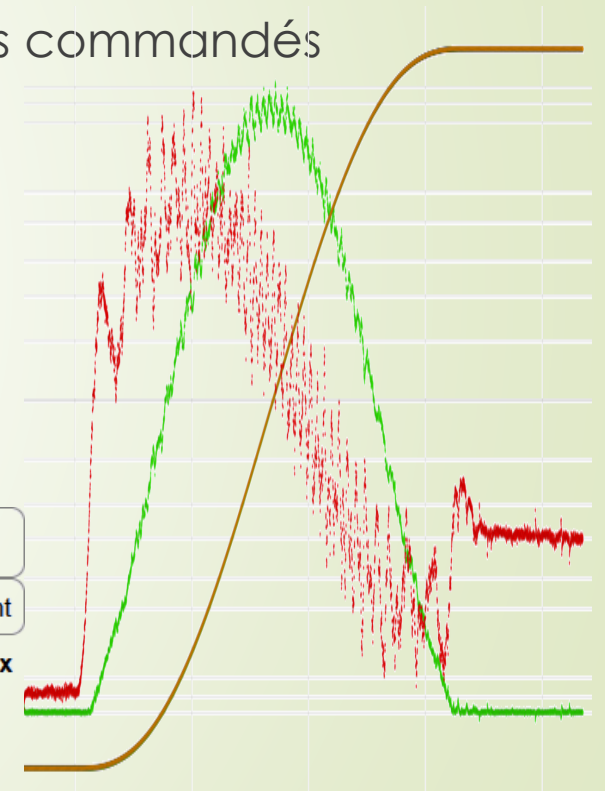
Position de déplacement :

Sauvegarder la position

Afficher la position courante

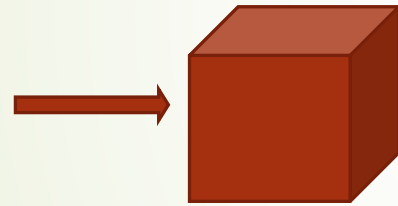
Effectuer ce déplacement

Nom	Position min	Curseur	Position	Position max
joint1	-166.00°	<input type="range"/>	7.27	166.00°
joint2	-101.00°	<input type="range"/>	-83.98	101.00°



Exploitations pédagogiques SFERE : étude des mouvements mécaniques

- ▶ En mode collaboratif et/ou pendant les déplacements commandés
- ▶ Sur les 6 positions/vitesses/accélérations cartésiennes



- ▶ X/Y/Z + 3 rotations (quaternions)

Commandes et paramètres : commande en positions cartésiennes

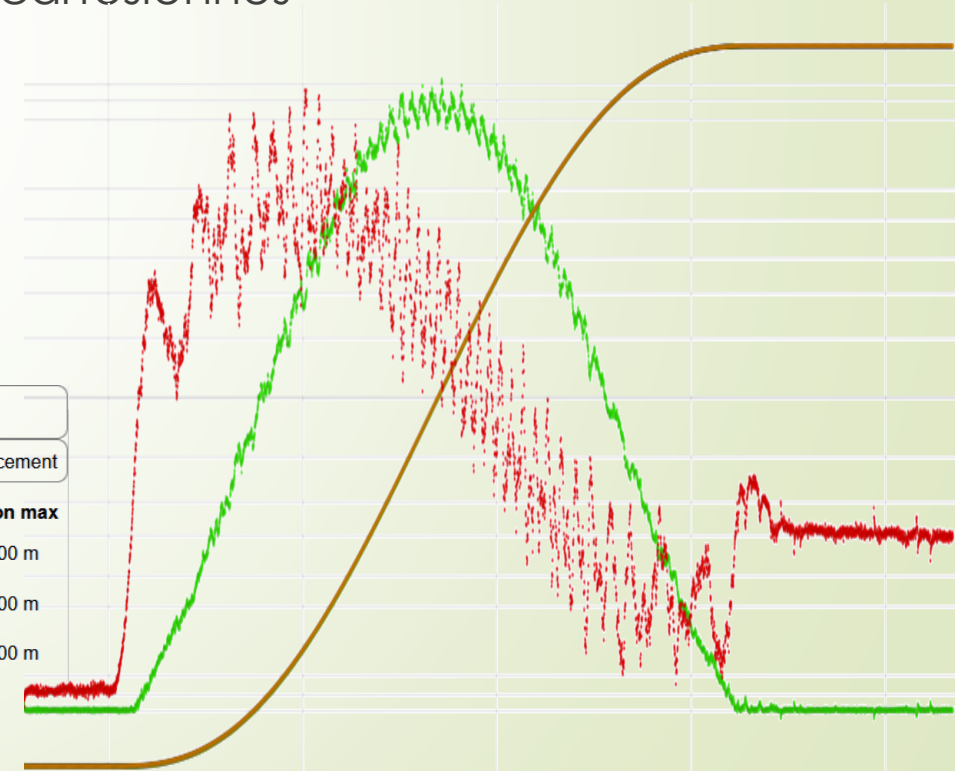
Position de déplacement dans le repère du robot :

Sauvegarder la position

Afficher la position courante

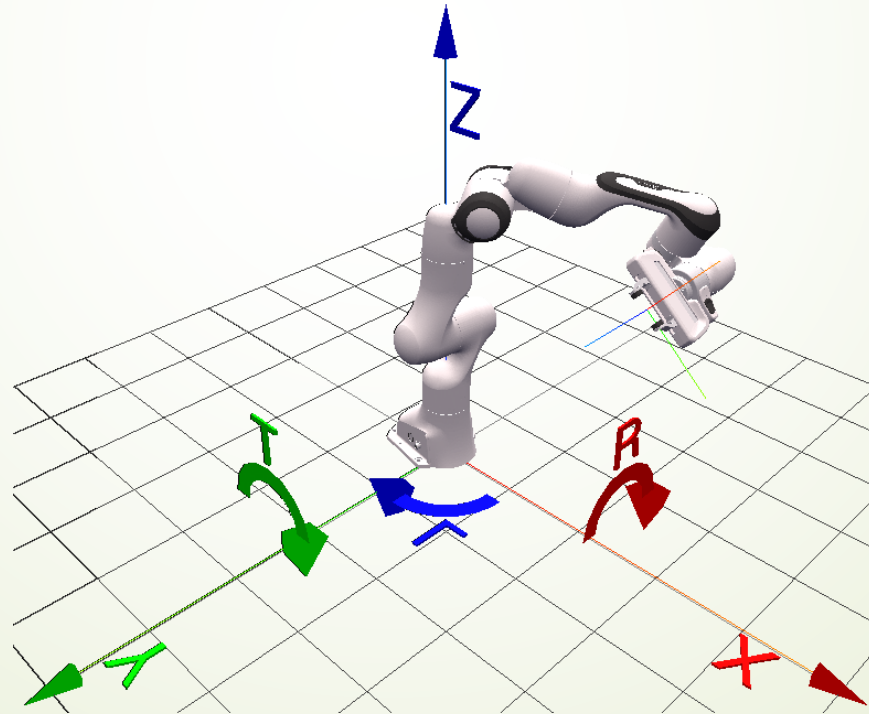
Effectuer ce déplacement

Nom	Position min	Curseur	Position	Position max
X	-1.0000 m	<input type="text"/>	0.1776	1.0000 m
Y	-1.0000 m	<input type="text"/>	0.1718	1.0000 m
Z	0.0000 m	<input type="text"/>	0.5361	1.0000 m



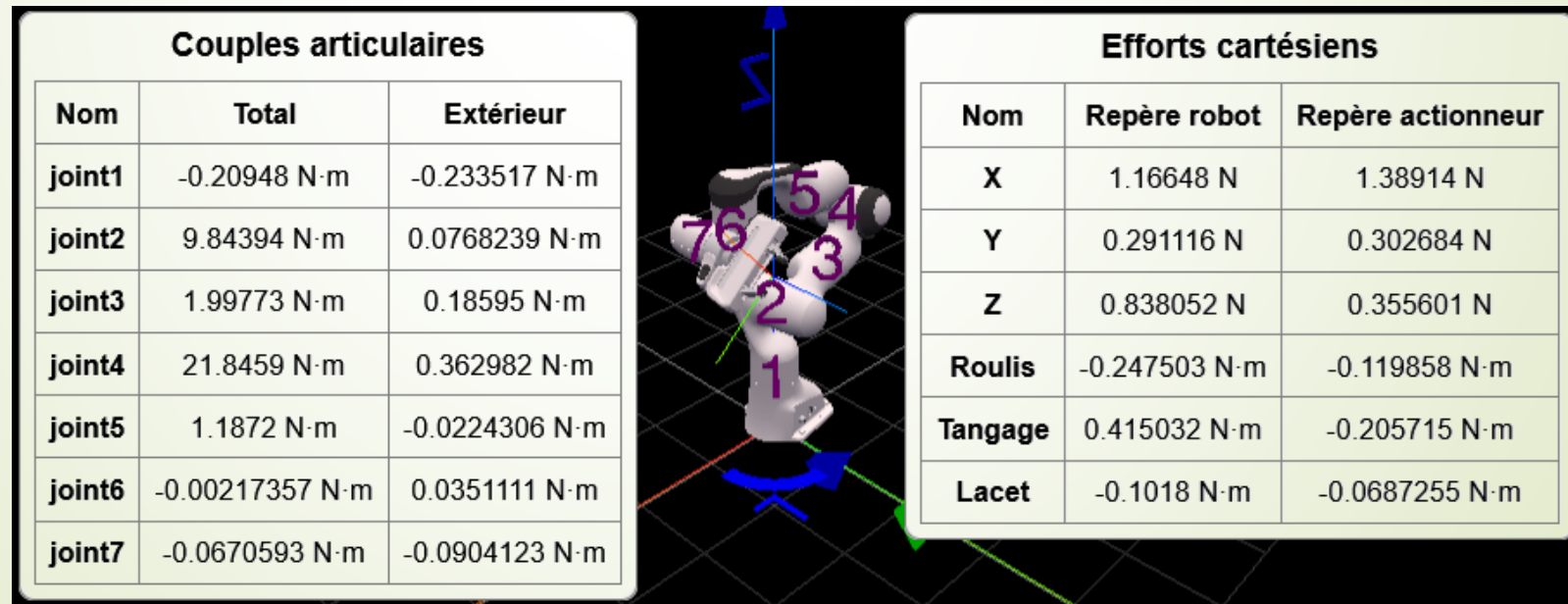
Exploitations pédagogiques SFERE : Vue 3D du robot (HTML5)

- Synchronisation immédiate avec la position du robot
- Affichage des repères utilisés, planification des mouvements



Exploitations pédagogiques SFERE : couples et efforts statiques mesurés

- Application et mesure des 7 couples articulaires :
 - Modèle et mesure de la compensation du poids
 - Mesure des couples externes sur l'actionneur et/ou les segments du bras
 - Mesure des efforts cartésiens externes sur l'actionneur





Exploitations pédagogiques SFERE : couples et efforts statiques appliqués

- Calculs des bras de levier pour transformer les couples et efforts
- Commande en couple du robot :

Commandes et paramètres : commande en couples articulaires

Couple appliqué :

Effectuer ce déplacement

Nom	Couple min	Curseur	Couple	Couple max
joint1	-87.00 N·m		3	87.00 N·m
joint2	-87.00 N·m		-1.5	87.00 N·m

- Mesure des efforts réels sur l'actionneur : dynamomètre ou balance

Exploitations pédagogiques SFERE : efforts et couples statiques appliqués

- Commande en efforts cartésiens du robot :

Commandes et paramètres : commande en efforts cartésiens

Effort appliqué dans le repère du robot : Effectuer ce déplacement

Nom	Effort min	Curseur	Effort	Effort max
X	-100.00 N	<input type="text"/>	0	100.00 N
Y	-100.00 N	<input type="text"/>	0	100.00 N

- Introduction aux matrices jacobiennes de changement de repère :

Matrice jacobienne de l'actionneur dans son repère

	joint1	joint2	joint3	joint4	joint5	joint6	joint7
X	0.0967815	-0.0579541	0.0966761	0.355227	0.0197096	0.207686	-1.31433e-18
Y	-0.572752	-0.00748614	-0.573099	0.062386	-0.121572	0.0336706	-3.23775e-18
Z	-0.00533867	0.562283	-0.00378378	-0.450874	-6.93889e-18	-0.088	1.2008e-19
Roulis	0.153261	0.392158	0.142923	-0.164635	0.812354	-0.160031	-2.77556e-17
Tangage	0.0351025	-0.919456	0.0306409	0.986322	0.131701	0.987102	-3.46945e-17
Lacet	-0.987562	0.0281786	-0.989259	0.00676447	0.568087	-1.38778e-17	1

- Vérification des couples appliqués sur les articulations



Exploitations pédagogiques SFERE : Mouvements mécaniques

- ▶ Études limitées à une seule ou plusieurs articulations :
 - ▶ Modèles mécaniques simples, expérimentations faciles à obtenir,
 - ▶ Résultats immédiats (cas statiques) ou détaillés (cas dynamiques),
 - ▶ Possibilité de faire varier simplement l'inertie ou les efforts résistants à l'aide des autres articulations ou de la charge saisie par le robot
 - ▶ Trajectoires calculées automatiquement en respectant les contraintes de vitesses, d'accélération et de jerks
- ▶ Système mécanique à 6/7 degrés de liberté :
 - ▶ Études couplées des rotations et des translations : approche Lagrangienne
 - ▶ Système sous-contraint, 6 DOF dans le repère cartésien, 7 articulations
- ▶ Adapté à la découverte des mouvements mécaniques (CPGE, IUT)
- ▶ Adapté à leur enseignement avancé (grandes écoles, universités)



Exploitations pédagogiques SFERE : Déplacements en Python

- ▶ Translation selon l'axe X jusqu'à $X=0.5\text{m}$:
 - ▶ `robot.setCartesianPositionTarget(t0=0.5)`
 - ▶ `robot.ControlCartesianPositionPID()`
- ▶ Rotation de l'actionneur jusqu'à l'angle π radians à la vitesse de 0.2 radians/s :
 - ▶ `robot.setJointPositionTarget(t6=math.pi)`
 - ▶ `robot.setJointSpeedMax(s6=0.2)`
 - ▶ `robot.ControlJointPositionPID()`
- ▶ Commande de 5 N.m sur la première articulation :
 - ▶ `robot.setJointTorqueTarget(t0=5);`
 - ▶ `robot.ControlJointTorque()`
- ▶ Utilisable dans des boucles ou tout programme/toute fonction Python 3



Exploitations pédagogiques SFERE : Courbes en Python

- Sélection des données à enregistrer :
 - `robot.setLogger(logControlJointPosition=1,logMeasureJointPosition=1)`
- Exécution du déplacement :
 - `robot.ControlJointPositionPID()`
- Récupération des données de la première articulation :
 - `values = robot.execLogValues()`
 - `target = list(map(lambda positions: positions[0], values.control_joint_position))`
 - `measure = list(map(lambda positions: positions[0], values.measure_joint_position))`
- Tracé des résultats :
 - `plt.subplot()`
 - `plt.plot(values.time_ms,target)`
 - `plt.plot(values.time_ms,measure)`
 - `plt.show()`



Exploitations pédagogiques SFERE : Modélisation mécanique intégrée

- Modèle géométrique direct en Python, chaîne de translations/rotations :
 - Position actionneur 0 = origine + translation fixe
 - Position actionneur 1 = position actionneur 0 + rotation actionneur 0 + translation fixe
 - Position actionneur 2 = position actionneur 1 + rotation actionneur 1 + translation fixe + rotation fixe
 - ...
 - Position actionneur connue en position (XYZ) et rotation (Roulis Tangage Lacet)
- Modèle géométrique inverse en Python (méthode de Newton itérative) :
 - Calcul matrice jacobienne à la position articulaire courante
 - Convergence dans l'espace cartésien vers la position souhaitée



Exploitations pédagogiques SFERE : Programmation en Python

- Programmation procédurale :
 - tous les paramètres sont vérifiés/validés avant leur application
 - paramètres facultatifs : lecture facilitée des opérations réalisées
 - tous les paramètres des déplacements (positions, vitesses, accélérations...), de la charge (masse, inertie...), de sécurité (murs virtuels, seuils de collision) sont accessibles via programmation (les droits utilisateurs s'appliquent)
- Exécution des commandes par un service web :
 - Commande possible pour tous les langages disposants d'une bibliothèque type Request/Curl (C, C++, C#, Java, Javascript, Python...)
- Adapté à la programmation avec parties opératives (Lycée, IUT)
- Adapté à l'enseignement avancé (grandes écoles, universités)

Exploitations pédagogiques SFERE : Modélisation mécanique intégrée

- Matrices de positionnement homogène (conv. possible vers quaternions) :

Matrice de positionnement de l'articulation 1

	X	Y	Z	W
X	0.703717	-0.710481	0	0
Y	0.710481	0.703717	0	0
Z	0	0	1	0.333
W	0	0	0	1

Position mesurée de l'actionneur final (O_T_EE)			
0.359674	0.928829	0.0888374	0.299629
0.920393	-0.368816	0.129737	0.497665
0.153268	0.0351022	-0.987561	0.364482
0	0	0	1

- Modèle calculé des couples compensant le poids et Coriolis (centrifuge) :

Vecteur des couples de coriolis

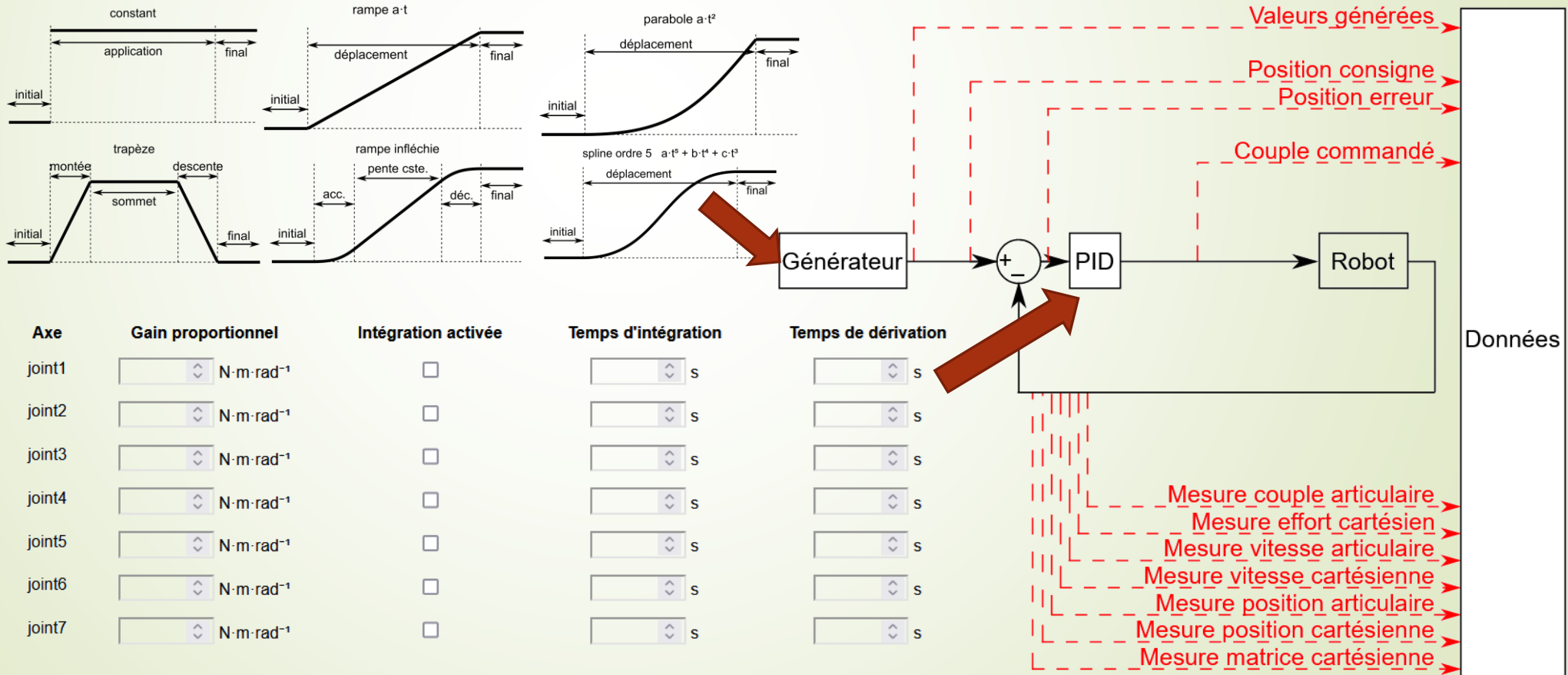
	joint1	joint2	joint3	joint4	joint5	joint6	joint7
Coriolis	2.29672e-7 N·m	-0.00000562432 N·m	2.0866e-7 N·m	-2.92473e-7 N·m	1.83038e-8 N·m	-2.33211e-7 N·m	1.79272e-8 N·m

Vecteur des couples liés à la force de gravitation

	joint1	joint2	joint3	joint4	joint5	joint6	joint7
Pesenteur	-6.28837e-18 N·m	-28.3324 N·m	-0.091833 N·m	22.5253 N·m	0.690587 N·m	2.47965 N·m	0.00147411 N·m

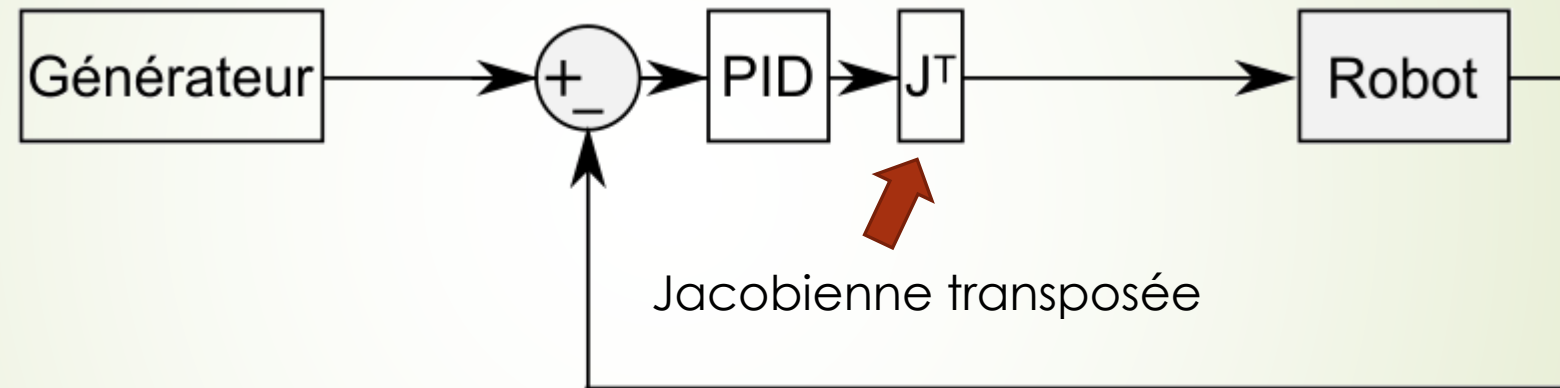
Exploitations pédagogiques SFERE : Modélisation asservissement PID

► Commande en positions articulaires, schéma équivalent des 7 actionneurs :

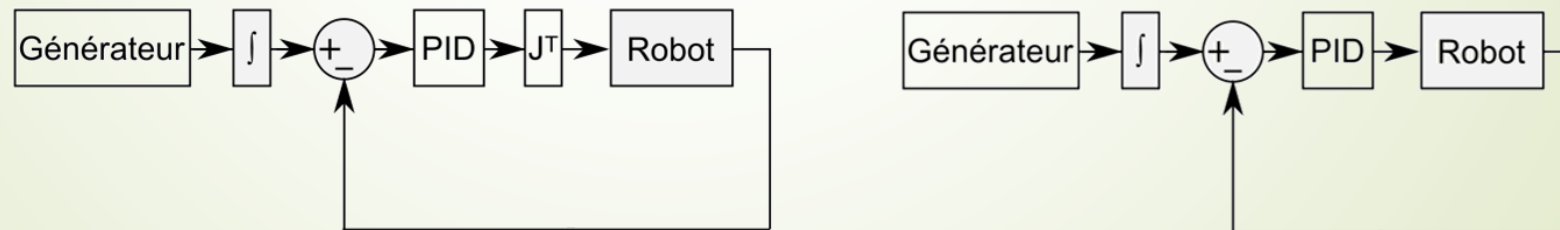


Exploitations pédagogiques SFERE : Modélisation asservissement PID

- Commande en positions cartésiennes :

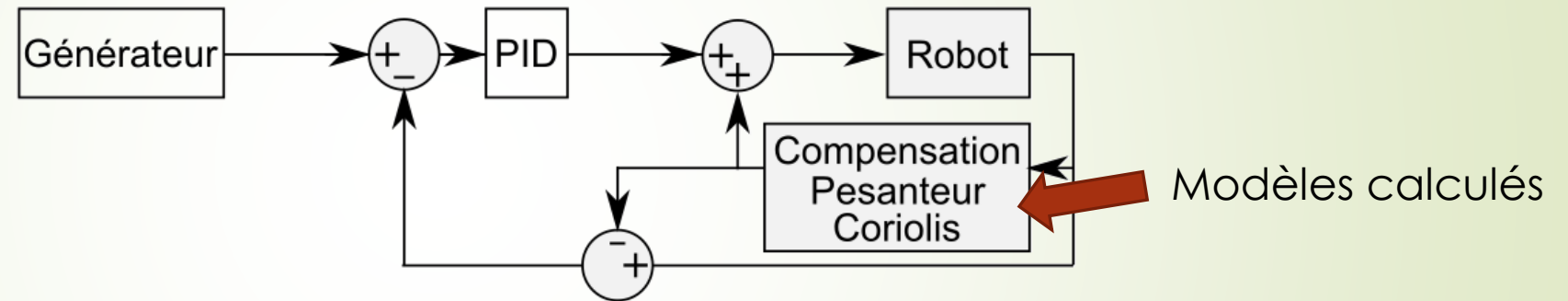


- Commande en vitesses articulaires ou cartésiennes :

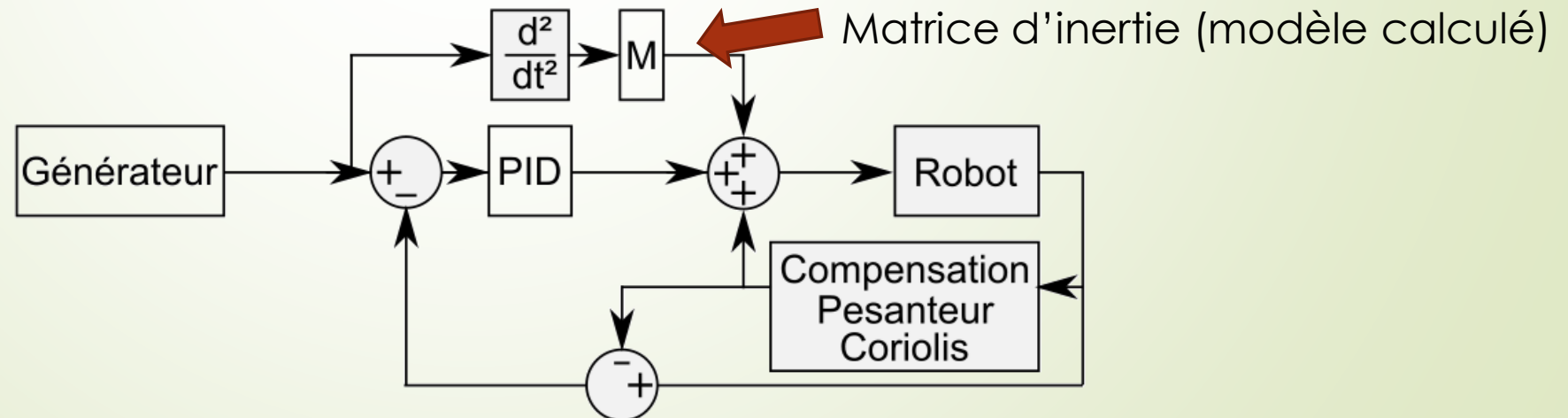


Exploitations pédagogiques SFERE : Modélisation asservissement PID

- Commande « explicite » avec compensation poids/centrifuge :



- Commande « industrielle » avec compensation des inerties robot et charge :





Exploitations pédagogiques SFERE : Modélisation asservissement PID

- ▶ Essais dans toutes les positions et vitesses possibles du robot :
 - ▶ Effets des régulateurs P, PI et PID
 - ▶ Réglage et optimisation des performances (temps de réponse, dépassements, oscillations...)
 - ▶ Performances pour des configurations différentes du robot (replié, déplié)
 - ▶ Performances pour des charges variables
 - ▶ Compensation réglable (de 0% à 200%) de l'inertie du robot et de la charge (perturbations)
- ▶ Système multi-entrées/multi-sorties :
 - ▶ Couplages croisés lors de la commande de plusieurs axes (retour d'état)
 - ▶ Contrôle/commande avec changement de référentiel de l'état
- ▶ Adapté à la découverte des asservissements (CPGE, IUT)
- ▶ Adapté à leur enseignement avancé (grandes écoles, universités)