# Fondements de la robotique

## ROB-101 • Manuel universitaire illustré

### ÉDITION VISUELLE ENRICHIE • APPRENTISSAGE À DISTANCE

*Planche de couverture — architecture fonctionnelle d'un système robotique.*

**Angelo Nibizi**

Recteur du Collège du Sacré-Cœur
Gatineau, Québec

Nibizi Technologies • Édition 2026 • Tous droits réservés

## POLITIQUE DE LISIBILITÉ DES FIGURES

Toutes les anciennes miniatures à texte incrusté ont été retirées de cette édition. Seules les planches redessinées en grand format sont conservées. Les acronymes et explications détaillées sont donnés dans le texte courant en 14 pt minimum.

# Comment étudier ROB-101 à distance

Chaque leçon associe le texte technique à deux planches visuelles. L'étudiant doit d'abord observer la planche, nommer les éléments, suivre les flux et redessiner le mécanisme. Il lit ensuite l'explication, refait les calculs, réalise le laboratoire simulé et répond aux exercices sans regarder le corrigé.

Les mêmes planches sont conçues pour le film pédagogique : apparition progressive des composants, animation des mouvements ou flux, affichage des équations, démonstration simulée, panne volontaire et diagnostic.

## Progression

01 — Anatomie fonctionnelle d'un robot

02 — Coordonnées, axes, articulations, degrés de liberté et espace de travail

03 — Transformations homogènes et repères

04 — Cinématique directe

05 — Cinématique inverse

06 — Jacobien, vitesses et singularités

07 — Génération de trajectoires

08 — Commande PID et asservissement

09 — Dynamique, forces et couples

10 — Capteurs, incertitude et fusion

11 — Architecture d’un robot autonome

12 — ROS 2 : nœuds, topics, services et actions

13 — SLAM, localisation et navigation

14 — Vision 3D et perception robotique

15 — Préhension, sécurité et projet intégrateur

Ces planches complètent les schémas fonctionnels par des représentations plus proches d’un manuel universitaire illustré. Elles sont conçues pour l’étude hors ligne et pour la production du film pédagogique associé.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Anatomie fonctionnelle d’un robot.**

## 1. Notion fondamentale

Un robot est un système cyberphysique : des capteurs transforment des phénomènes physiques en données, le calcul produit une décision et les actionneurs reconvertissent cette décision en action mécanique.

## 2. Notion fondamentale

Le modèle fondamental du cours est : PERCEVOIR → TRAITER → DÉCIDER → AGIR → MESURER LE RÉSULTAT → CORRIGER. Une machine qui bouge n’est donc pas automatiquement autonome.

## 3. Notion fondamentale

Pour diagnostiquer correctement, on sépare alimentation, perception, calcul, communication, commande et actionnement. Une panne observée au mouvement peut avoir sa cause dans n’importe laquelle de ces couches.

## Exemple numérique entièrement résolu

Un robot mesure un obstacle à 0,42 m alors que la distance minimale de mission est 0,50 m. L’écart est 0,08 m. Continuer la commande précédente serait incohérent avec l’observation : la boucle doit modifier l’action.

## Laboratoire à distance

Construire le diagramme fonctionnel d’un robot mobile. Pour chaque bloc, indiquer entrée, sortie, unité, fréquence approximative et un mode de panne.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Pourquoi une voiture télécommandée n’est-elle pas nécessairement autonome ?**

Corrigé : Parce que l’être humain ferme principalement la boucle de décision.

**Q2. Quelle différence entre actionner et contrôler ?**

Corrigé : Actionner fournit l’effort; contrôler mesure le résultat et corrige l’erreur.

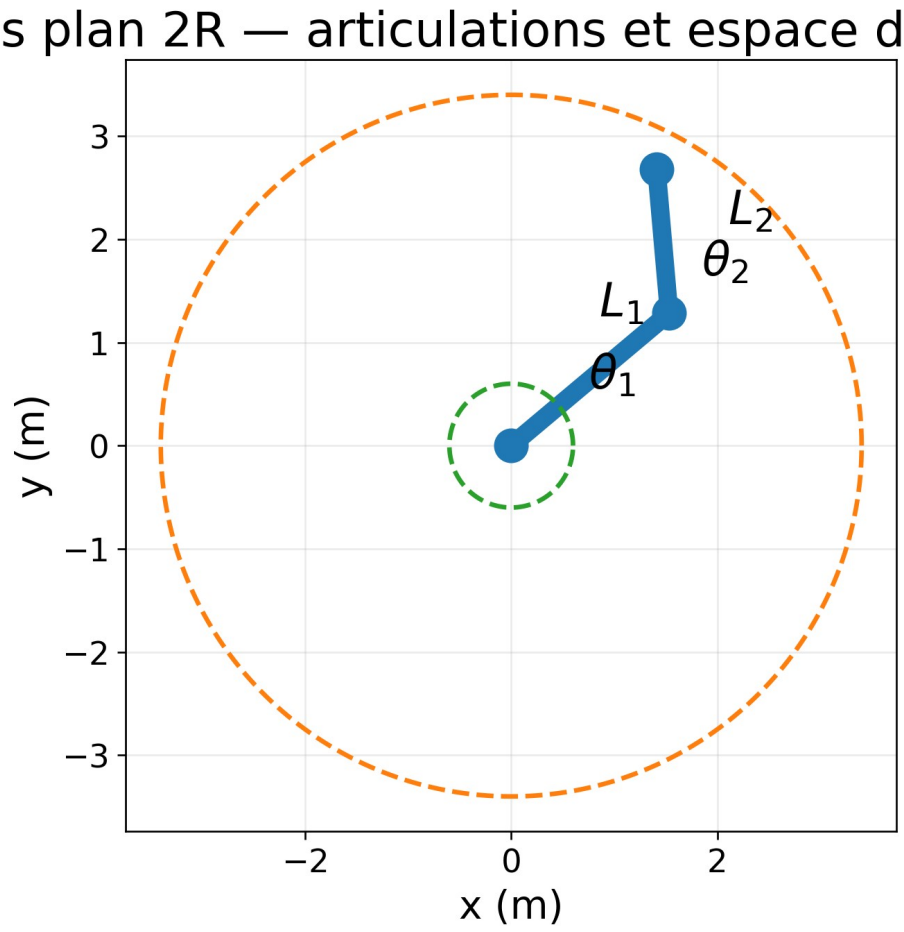
**Q3. Donnez une panne de capteur difficile à détecter par timeout.**

Corrigé : Un capteur bloqué sur une valeur plausible et constante.

## Pour le film pédagogique

Afficher d’abord la planche sans légendes; faire nommer les éléments par l’étudiant; animer ensuite le mécanisme; faire apparaître l’équation au moment où la grandeur correspondante est montrée; terminer par une erreur volontaire que l’étudiant doit diagnostiquer avant l’explication.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ




*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d'ordinateur.*

# LEÇON 01 • COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

# Comprendre

Anatomie fonctionnelle d’un robot

Objectif : Distinguer énergie, perception, calcul, décision et action.

Cette leçon relie la théorie à un comportement mesurable du robot et exige une validation expérimentale.

Expliquer correctement les notions centrales : Corps, Capteurs, Calcul, Actionneurs.

Passer d’une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Définir clairement entrées, sorties, unités et hypothèses.

Construire un modèle avant de modifier le système.

Comparer le résultat calculé à une observation, une simulation ou une mesure.

Modèle directeur : PERCEVOIR → TRAITER → DÉCIDER → AGIR → MESURER → CORRIGER.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

# Laboratoire à distance

## Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

## Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

## Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l’unité lorsqu’ils s’appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

## Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d’ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation

reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Coordonnées, axes, articulations, degrés de liberté et espace de travail.**

## 1. Notion fondamentale

Une position 3D s'écrit p=[x,y,z]^T dans un repère explicitement nommé. Sans repère, une coordonnée est ambiguë.

## 2. Notion fondamentale

Une articulation rotoïde est décrite par un angle θ; une articulation prismatique par un déplacement d. Le vecteur q regroupe les variables articulaires indépendantes.

## 3. Notion fondamentale

Pour un bras plan 2R idéal, la distance radiale atteignable vérifie $|L1-L2| \leq r \leq L1+L2$. Les butées, collisions et orientations exigées réduisent ensuite l'espace réellement utilisable.

## Exemple numérique entièrement résolu

Pour L1=0,60 m et L2=0,40 m, rmax=1,00 m et rmin=0,20 m. Une cible située à 1,10 m de la base est hors de portée, quelle que soit la combinaison d'angles.

## Laboratoire à distance

Tracer à l'échelle un bras 2R de 30 cm + 20 cm. Marquer douze configurations et approximer la frontière de son espace de travail.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Qu'est-ce qu'un degré de liberté ?**

Corrigé : Une variable indépendante nécessaire pour décrire le mouvement.

**Q2. Pourquoi parle-t-on souvent de 6 DOF pour une pose générale ?**

Corrigé : Trois translations et trois rotations décrivent une pose rigide générale.

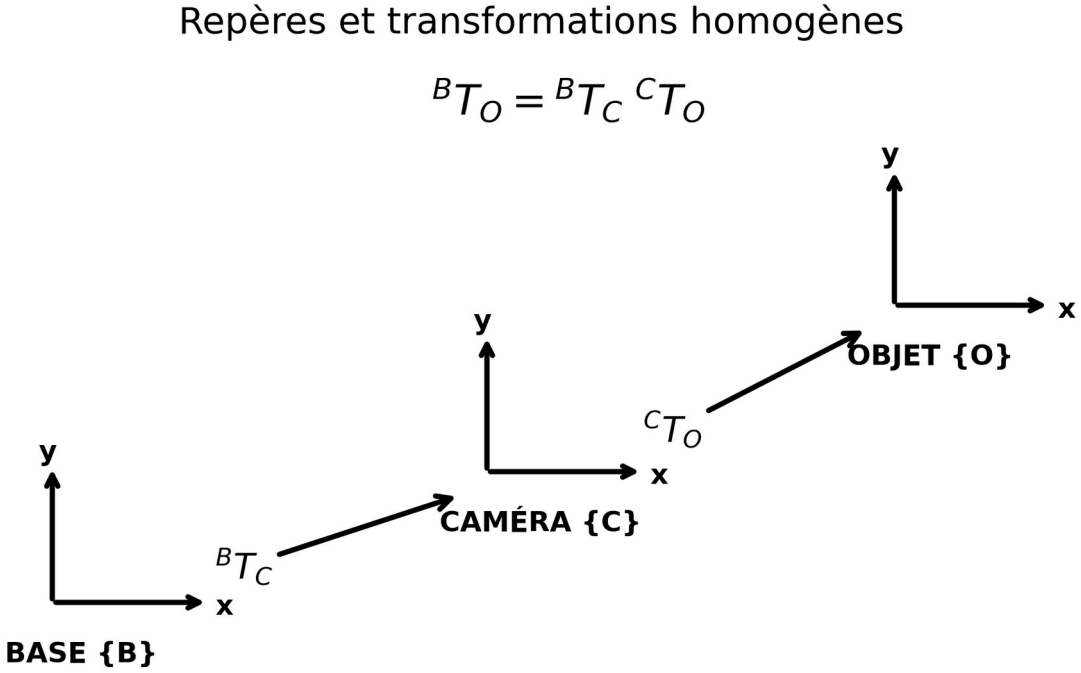
**Q3. Une cible située dans l'enveloppe géométrique est-elle toujours atteignable ?**

Corrigé : Non : limites articulaires, collisions et orientation peuvent l'interdire.

## Pour le film pédagogique

Afficher d'abord la planche sans légendes; faire nommer les éléments par l'étudiant; animer ensuite le mécanisme; faire apparaître l'équation au moment où la grandeur correspondante est montrée; terminer par une erreur volontaire que l'étudiant doit diagnostiquer avant l'explication.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ




*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d'ordinateur.*

# LEÇON 02 ● COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

## Comprendre

Coordonnées, axes, articulations, degrés de liberté et espace de travail

Objectif : Décrire un robot par ses repères, articulations et degrés de liberté.

Un robot ne peut pas être commandé rigoureusement sans définir ses repères, ses axes articulaires et ses degrés de liberté.

Expliquer correctement les notions centrales : Repères, Axes, DOF, Workspace.

Passer d’une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Repère base {B}, repère outil {T}, axe de rotation ou de translation de chaque articulation.

Un degré de liberté correspond à une variable indépendante nécessaire pour décrire la configuration.

L’espace de travail est l’ensemble des poses ou positions atteignables sous contraintes.

Un repère cartésien est défini par une origine et des axes. Une articulation rotoïde ajoute une variable angulaire; une articulation prismatique ajoute une variable de translation.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

## Laboratoire à distance

### Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

### Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

### Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l'unité lorsqu'ils s'appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

### Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d'ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l'étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l'étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Repères, rotations et transformations homogènes.**

## 1. Notion fondamentale

Une matrice de rotation R valide satisfait $R^TR=I$ et $\det(R)=1$. Elle change l'orientation d'un vecteur sans changer sa norme.

## 2. Notion fondamentale

Une transformation homogène T=[[R,p],[0,1]] regroupe rotation et translation dans une matrice 4×4.

## 3. Notion fondamentale

Les transformations ont un sens. Si l'on connaît ${}^AT_B$ et ${}^BT_C$, alors ${}^AT_C={}^AT_B\cdot{}^BT_C$. L'ordre ne peut pas être inversé arbitrairement.

## Exemple numérique entièrement résolu

Une caméra est située 0,30 m devant la base sans rotation. Elle mesure un objet à [0,50;0;0,20] m. La position dans la base devient [0,80;0;0,20] m.

## Laboratoire à distance

Créer trois repères — base, caméra, objet — avec des translations simples. Calculer manuellement puis vérifier par matrice la position de l'objet dans la base.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Pourquoi $AB \neq BA$ en général ?**

Corrigé : Parce que la multiplication matricielle et les transformations rigides ne commutent pas en général.

**Q2. Pourquoi utiliser une coordonnée homogène égale à 1 ?**

Corrigé : Elle permet d'intégrer la translation dans la multiplication matricielle.

**Q3. Comment tester une rotation calculée ?**

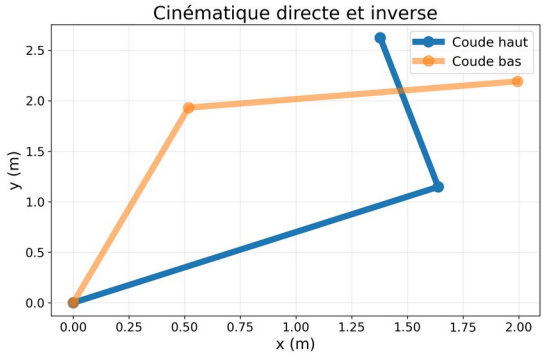
Corrigé : Vérifier $R^TR \approx I$ et $\det(R) \approx 1$.

## Pour le film pédagogique

Afficher d'abord la planche sans légendes; faire nommer les éléments par l'étudiant; animer ensuite le mécanisme; faire apparaître l'équation au moment où la grandeur correspondante est montrée; terminer par une erreur volontaire que l'étudiant doit diagnostiquer avant l'explication.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ

$$x = L_1\cos\theta_1 + L_2\cos(\theta_1+\theta_2)$$
$$y = L_1\sin\theta_1 + L_2\sin(\theta_1+\theta_2)$$




*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d'ordinateur.*

# LEÇON 03 • COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

# Comprendre

Transformations homogènes et repères

Objectif : Transformer une position et une orientation d'un repère vers un autre.

Les transformations homogènes unifient rotation et translation dans une seule représentation matricielle.

Expliquer correctement les notions centrales : Rotation, Translation, Matrice T, Chaînage.

Passer d'une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Une pose 3D combine $R \in SO(3)$ et $p \in \mathbb{R}^3$.

Le chaînage des repères respecte l'ordre matriciel : AB n'est pas BA en général.

Toujours vérifier le sens de la transformation : de quel repère vers quel repère ?

Transformation homogène : ${}^{A}T_B = [[R, p],[0,1]]$ et ${}^{A}P = {}^{A}T_B \cdot {}^{B}P$. L'ordre des transformations est essentiel.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d'abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d'interprétation cette planche permet-elle d'éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

# Laboratoire à distance

## Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

## Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

## Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l'unité lorsqu'ils s'appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

### Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d’ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Cinématique directe.**

## 1. Notion fondamentale

La cinématique directe répond à : connaissant q, quelle est la pose de l'effecteur ?

## 2. Notion fondamentale

Pour un bras plan 2R : $x=L1\cos\theta1 + L2\cos(\theta1+\theta2)$ et $y=L1\sin\theta1 + L2\sin(\theta1+\theta2)$.

## 3. Notion fondamentale

Sur une chaîne série, la pose finale résulte de la composition successive des transformations de chaque articulation et de chaque maillon.

## Exemple numérique entièrement résolu

Prenons L1=0,50 m, L2=0,30 m, $\theta1=30°$ et $\theta2=60°$. $x\approx0{,}50\cos30° +0{,}30\cos90°\approx0{,}433$ m. $y\approx0{,}50\sin30°+0{,}30\sin90°=0{,}55$ m.

## Laboratoire à distance

Calculer cinq configurations d'un bras 2R, reporter les positions de l'effecteur sur un graphique et vérifier les cas $\theta1=\theta2=0$ et bras replié.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Quelle information entre dans la cinématique directe ?**

Corrigé : Les variables articulaires q et les paramètres géométriques du robot.

**Q2. Pourquoi tester une configuration à angles nuls ?**

Corrigé : Elle permet de détecter rapidement une erreur de signe, d'axe ou de longueur.

**Q3. Un même q donne-t-il plusieurs poses dans le même modèle ?**

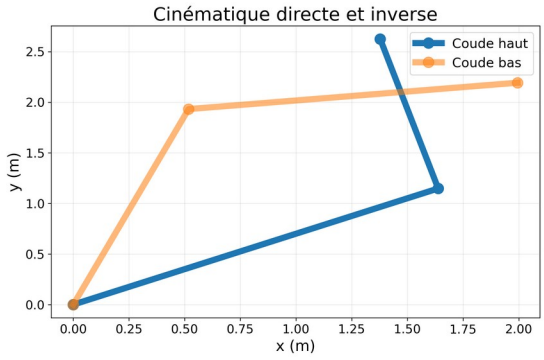
Corrigé : Non, la cinématique directe déterministe donne une pose déterminée pour un q donné.

## Pour le film pédagogique

Afficher d'abord la planche sans légendes; faire nommer les éléments par l'étudiant; animer ensuite le mécanisme; faire apparaître l'équation au moment où la grandeur correspondante est montrée; terminer par une erreur volontaire que l'étudiant doit diagnostiquer avant l'explication.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ

$$x = L_1\cos\theta_1 + L_2\cos(\theta_1+\theta_2)$$
$$y = L_1\sin\theta_1 + L_2\sin(\theta_1+\theta_2)$$




*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d'ordinateur.*

# LEÇON 04 • COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

# Comprendre

Cinématique directe

Objectif : Calculer la pose de l’effecteur à partir des variables articulaires.

La cinématique directe calcule la pose de l’effecteur à partir des variables articulaires.

Expliquer correctement les notions centrales : Angles q, Modèle, Pose TCP, Vérification.

Passer d’une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Construire la chaîne articulation par articulation.

Valider le modèle sur des configurations simples connues.

Comparer la pose calculée à une mesure ou à la simulation.

Bras 2R : $x = L1 \cos \theta1 + L2 \cos(\theta1+\theta2)$ ; $y = L1 \sin \theta1 + L2 \sin(\theta1+\theta2)$.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande.

Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

# Laboratoire à distance

## Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

## Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

## Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l’unité lorsqu’ils s’appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

## Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d’ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration

simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Cinématique inverse.**

## 1. Notion fondamentale

La cinématique inverse répond à : connaissant une pose cible, quelles variables articulaires q permettent de l'atteindre ?

## 2. Notion fondamentale

Elle peut avoir plusieurs solutions, une seule solution à une frontière, ou aucune solution.

## 3. Notion fondamentale

Une solution algébrique n'est pas encore une solution robotique : il faut vérifier limites articulaires, collisions, singularités et contraintes de mission.

## Exemple numérique entièrement résolu

Pour $L1=L2=0{,}50$ m et la cible $(0{,}50;0{,}50)$, $\cos\theta 2=(x^2+y^2-L1^2-L2^2)/(2L1L2)=0$. Ainsi $\theta 2=+90°$ ou $-90°$ : deux branches géométriques sont possibles.

## Laboratoire à distance

Choisir trois cibles : une centrale, une proche de la portée maximale et une hors portée. Déterminer le nombre de solutions et justifier le choix de configuration.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Pourquoi l'IK peut-elle échouer ?**

Corrigé : La cible peut être hors espace de travail ou incompatible avec les contraintes.

**Q2. Que signifie coude haut/coude bas ?**

Corrigé : Deux branches géométriques distinctes donnant la même cible.

**Q3. Pourquoi ne pas toujours choisir la solution la plus proche en angles ?**

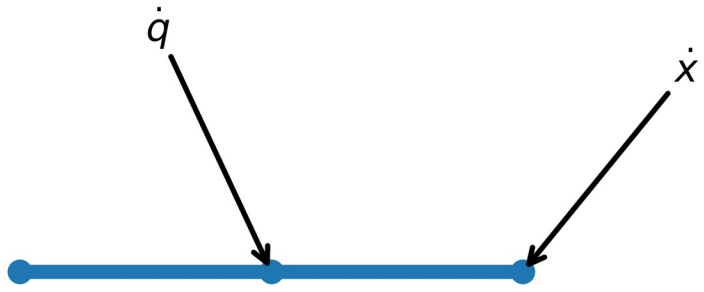
Corrigé : Elle peut traverser un obstacle ou approcher une singularité.

## Pour le film pédagogique

Afficher d'abord la planche sans légendes; faire nommer les éléments par l'étudiant; animer ensuite le mécanisme; faire apparaître l'équation au moment où la grandeur correspondante est montrée; terminer par une erreur volontaire que l'étudiant doit diagnostiquer avant l'explication.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ

Jacobien et configuration singulière




$$\dot{x} = J(q)\dot{q}$$

**Bras étendu → perte de mobilité dans certaines directions**

*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d'ordinateur.*

# LEÇON 05 • COMPRENDRE

# Atlas technique de la leçon

## Comprendre

Cinématique inverse

Objectif : Déterminer les configurations articulaires permettant d’atteindre une cible.

La cinématique inverse recherche les configurations articulaires permettant d’atteindre une pose cible.

Expliquer correctement les notions centrales : Cible, Solutions IK, Limites, Choix.

Passer d’une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Il peut exister zéro, une ou plusieurs solutions.

Les limites articulaires, collisions et singularités filtrent les solutions.

La solution mathématique la plus proche n’est pas toujours la meilleure opérationnellement.

Pour le bras 2R : $\cos \theta 2 = (x^2+y^2-L1^2-L2^2)/(2L1L2)$. Deux solutions peuvent exister : coude haut et coude bas.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

## Laboratoire à distance

### Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

### Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

### Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l’unité lorsqu’ils s’appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

### Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d’ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Jacobien, vitesses et singularités.**

## 1. Notion fondamentale

Le Jacobien J(q) est la dérivée locale de la cinématique directe. Il relie les vitesses articulaires aux vitesses cartésiennes par xdot = J(q) qdot.

## 2. Notion fondamentale

Chaque colonne du Jacobien décrit la contribution instantanée d'une articulation au mouvement de l'effecteur. Cette lecture géométrique est aussi importante que le calcul matriciel.

## 3. Notion fondamentale

Une singularité apparaît lorsque le rang de J diminue. Avant même la singularité exacte, un mauvais conditionnement peut amplifier fortement les vitesses articulaires et les erreurs numériques.

## Exemple numérique entièrement résolu

Pour un bras 2R complètement étendu, les deux maillons deviennent colinéaires. Dans cette configuration, certaines directions cartésiennes ne peuvent plus être produites régulièrement. Une petite demande de vitesse cartésienne peut alors exiger une très grande variation articulaire.

## Laboratoire à distance

Dans une simulation 2R, approcher progressivement l'extension complète. À chaque étape, calculer ou observer le nombre de condition de J et la norme de qdot nécessaire pour produire la même petite vitesse cartésienne.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Que représente une colonne du Jacobien ?**

Corrigé : La contribution instantanée d’une articulation au mouvement de l’effecteur.

**Q2. Pourquoi la pseudo-inverse ne supprime-t-elle pas une singularité ?**

Corrigé : Elle fournit une solution numérique, mais la perte physique de mobilité demeure.

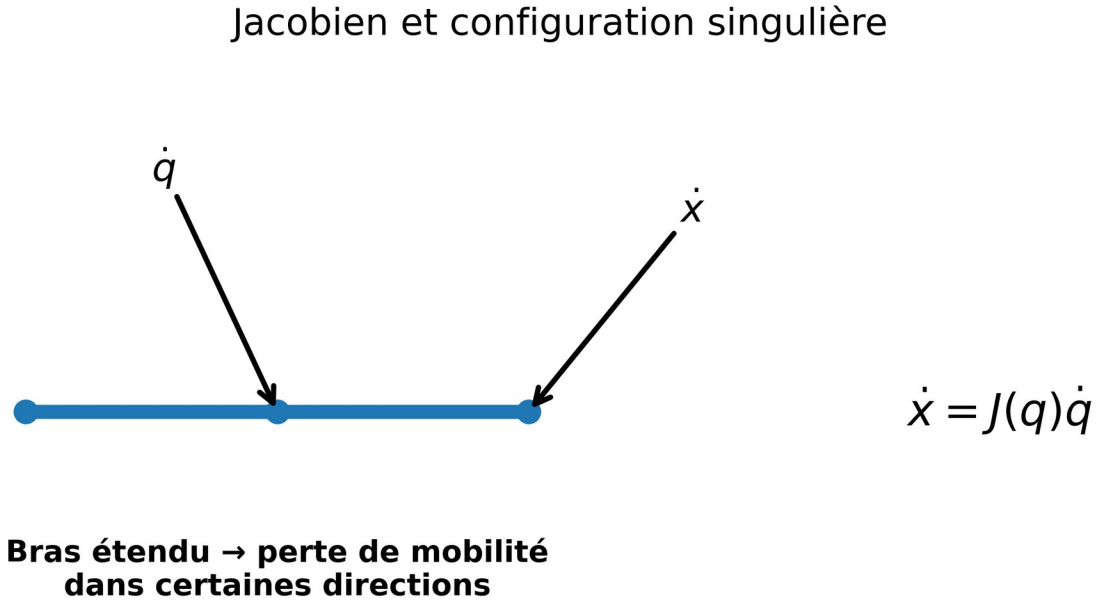
**Q3. Quel indicateur permet de repérer une zone mal conditionnée ?**

Corrigé : Le nombre de condition ou les valeurs singulières de J.

## Pour le film pédagogique

Commencer par la planche scientifique sans réponse affichée. Animer ensuite la grandeur physique étudiée, faire apparaître l’équation au moment correspondant, résoudre l’exemple numérique étape par étape, puis introduire une panne ou une mauvaise hypothèse et demander à l’étudiant de la diagnostiquer avant la correction.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ



*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d'ordinateur.*

# LEÇON 06 ● COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

## Comprendre

Jacobien, vitesses et singularités

Objectif : Relier vitesses articulaires et vitesse cartésienne et reconnaître une singularité.

Le Jacobien relie les vitesses articulaires aux vitesses cartésiennes et révèle les singularités locales.

Expliquer correctement les notions centrales : $\dot{q}$, Jacobien J, $\dot{x}$, Singularité.

Passer d'une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Analyser rang, valeurs singulières et conditionnement.

Près d'une singularité, de petites demandes cartésiennes peuvent exiger de grandes vitesses articulaires.

La pseudo-inverse doit être utilisée avec conscience du conditionnement.

Relation différentielle : $\dot{x} = J(q)\,\dot{q}$. Lorsque le rang de J diminue, certaines directions cartésiennes deviennent impossibles ou exigent de très grandes vitesses articulaires.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

## Laboratoire à distance

### Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

### Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

### Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l'unité lorsqu'ils s'appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

### Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d'ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l'étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l'étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Génération de trajectoires.**

## 1. Notion fondamentale

Un chemin indique où passer; une trajectoire précise aussi quand passer. Elle décrit donc q(t), qdot(t) et qddot(t), et parfois le jerk.

## 2. Notion fondamentale

Les conditions aux limites imposent par exemple position et vitesse au départ et à l'arrivée. Les polynômes cubiques et quintiques permettent de construire des profils continus satisfaisant ces contraintes.

## 3. Notion fondamentale

Une trajectoire robotique doit respecter les limites articulaires, de vitesse, d'accélération et les contraintes dynamiques. Une courbe mathématiquement lisse n'est pas automatiquement physiquement réalisable.

## Exemple numérique entièrement résolu

Pour un déplacement normalisé de 0 à 1 en durée T, le profil quintique $s(\tau)=10\tau^3-15\tau^4+6\tau^5$ avec $\tau=t/T$ impose vitesse et accélération nulles aux deux extrémités. La consigne articulaire devient $q(t)=q0+(qf-q0)s(t/T)$.

## Laboratoire à distance

Tracer q(t), qdot(t) et qddot(t) pour une articulation allant de 0 à 1,2 rad en 2 s. Mesurer les maxima de vitesse et d'accélération et vérifier des limites imposées.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Quelle différence entre chemin et trajectoire ?**

Corrigé : La trajectoire ajoute une loi temporelle au chemin géométrique.

**Q2. Pourquoi éviter une discontinuité de vitesse ?**

Corrigé : Elle correspondrait idéalement à une accélération impulsionnelle et peut exciter ou endommager la mécanique.

**Q3. Que mesure le jerk ?**

Corrigé : La variation temporelle de l’accélération.

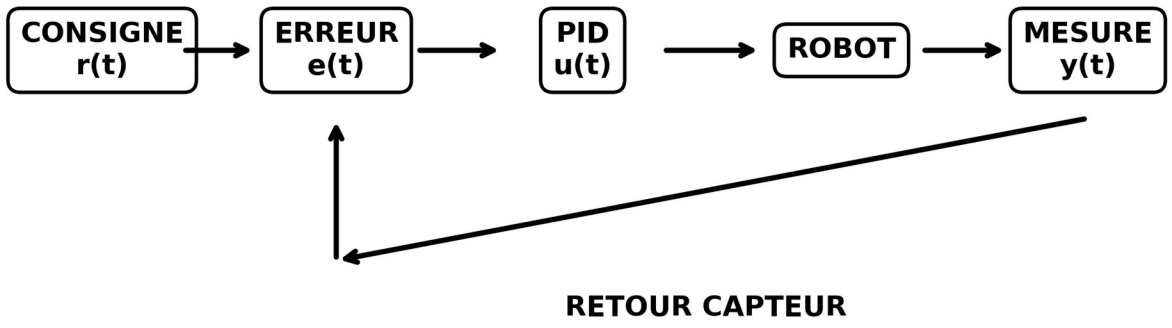
## Pour le film pédagogique

Commencer par la planche scientifique sans réponse affichée. Animer ensuite la grandeur physique étudiée, faire apparaître l’équation au moment correspondant, résoudre l’exemple numérique étape par étape, puis introduire une panne ou une mauvaise hypothèse et demander à l’étudiant de la diagnostiquer avant la correction.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ

Commande PID — boucle fermée

$$u = K_P e + K_I \int e\,dt + K_D \frac{de}{dt}$$




*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d’ordinateur.*

# LEÇON 07 ● COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

## Comprendre

Génération de trajectoires

Objectif : Construire un mouvement continu respectant position, vitesse et accélération.

Cette leçon relie la théorie à un comportement mesurable du robot et exige une validation expérimentale.

Expliquer correctement les notions centrales : Départ, Profil, Contraintes, Arrivée.

Passer d’une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Définir clairement entrées, sorties, unités et hypothèses.

Construire un modèle avant de modifier le système.

Comparer le résultat calculé à une observation, une simulation ou une mesure.

Une trajectoire doit spécifier q(t), q̇(t) et q̈(t), tout en respectant les limites de position, vitesse, accélération et collision.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

## Laboratoire à distance

### Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

### Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

### Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l’unité lorsqu’ils s’appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

### Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d’ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Commande PID et asservissement.**

## 1. Notion fondamentale

Une boucle fermée compare la consigne r(t) à la mesure y(t) et forme l’erreur e(t)=r(t)−y(t). Le contrôleur agit pour réduire cette erreur.

## 2. Notion fondamentale

Le PID calcule u(t)=Kp e(t)+Ki∫e(t)dt+Kd de(t)/dt. P réagit au présent, I à l’erreur accumulée et D à la tendance de l’erreur.

## 3. Notion fondamentale

Le réglage est un compromis entre rapidité, dépassement, stabilité, erreur statique, bruit et saturation des actionneurs. Aucun gain ne doit être choisi uniquement parce qu’une courbe paraît plus rapide.

## Exemple numérique entièrement résolu

Consigne 1,00 rad, mesure 0,92 rad : e=0,08 rad. Avec Kp=5, la contribution proportionnelle vaut 0,40. Si l’intégrale accumulée vaut 0,12 rad·s et Ki=1,5, sa contribution vaut 0,18. Avant le terme D, u=0,58 unité de commande.

## Laboratoire à distance

Simuler une réponse à échelon avec P faible, P élevé, PI puis PID. Pour chaque essai, mesurer temps de montée, dépassement, temps d’établissement et erreur finale.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Quel terme aide à supprimer une erreur persistante ?**

Corrigé : Le terme intégral.

**Q2. Pourquoi D est-il sensible au bruit ?**

Corrigé : La dérivation amplifie les variations rapides présentes dans la mesure.

**Q3. Qu’est-ce que l’integral windup ?**

Corrigé : L’accumulation excessive de l’intégrale lorsque l’actionneur est saturé.

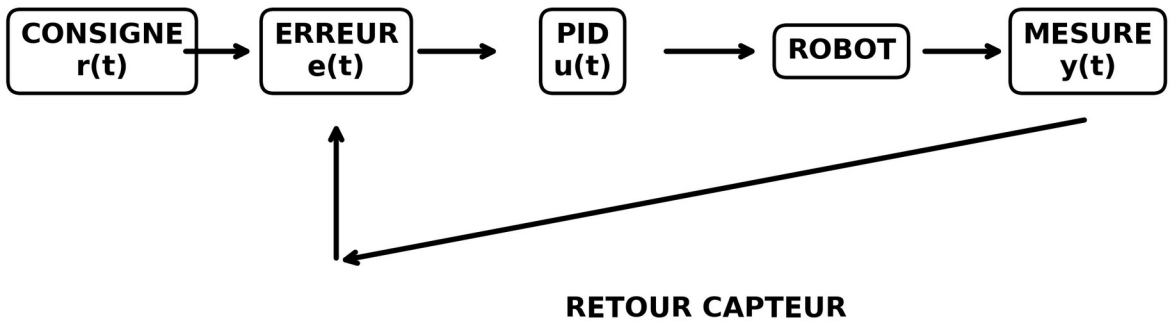
## Pour le film pédagogique

Commencer par la planche scientifique sans réponse affichée. Animer ensuite la grandeur physique étudiée, faire apparaître l’équation au moment correspondant, résoudre l’exemple numérique étape par étape, puis introduire une panne ou une mauvaise hypothèse et demander à l’étudiant de la diagnostiquer avant la correction.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ

Commande PID — boucle fermée

$$u = K_P e + K_I \int e\,dt + K_D \frac{de}{dt}$$




*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d’ordinateur.*

# LEÇON 08 • COMPRENDRE

# Atlas technique de la leçon

## Comprendre

Commande PID et asservissement

Objectif : Comprendre et régler une boucle fermée P-I-D.

L’asservissement compare continuellement une consigne à une mesure et corrige l’erreur.

Expliquer correctement les notions centrales : Consigne, Erreur, PID, Actionneur.

Passer d’une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

P réagit à l’erreur présente, I à l’erreur accumulée, D à sa variation.

Le réglage doit être validé sur le système réel ou un modèle fidèle.

Prévoir saturation, anti-windup et limites physiques.

PID : $u(t)=Kp\ e(t)+Ki\int e(t)dt+Kd\ de(t)/dt$. P réagit à l’erreur, I corrige l’erreur persistante, D amortit les variations rapides.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

## Laboratoire à distance

### Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

### Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

### Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l’unité lorsqu’ils s’appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

### Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d’ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Dynamique, forces et couples.**

## 1. Notion fondamentale

La cinématique décrit le mouvement sans calculer les efforts nécessaires. La dynamique relie positions, vitesses et accélérations aux forces et couples.

## 2. Notion fondamentale

Une forme standard est M(q)qddot + C(q,qdot)qdot + g(q) = tau. M représente l'inertie, C les effets liés au mouvement et g la gravité.

## 3. Notion fondamentale

La charge utile modifie les couples gravitationnels et l'inertie. La même trajectoire peut donc être acceptable à vide et dépasser les capacités du robot lorsqu'il transporte une masse.

## Exemple numérique entièrement résolu

Une masse de 2 kg tenue horizontalement à 0,40 m de l'axe produit approximativement tau=mgr=2×9,81×0,40=7,85 N·m. Ce calcul ne comprend même pas encore la masse propre du maillon.

## Laboratoire à distance

Calculer le couple statique pour des charges de 0,5; 1; 2 et 3 kg à 0,20; 0,40 et 0,60 m. Tracer tau en fonction de la distance et expliquer la pente.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Pourquoi une charge proche de l'axe est-elle plus facile à tenir ?**

Corrigé : Parce que le bras de levier est plus petit.

**Q2. Quelle est l’unité SI du couple ?**

Corrigé : Le newton-mètre, N·m.

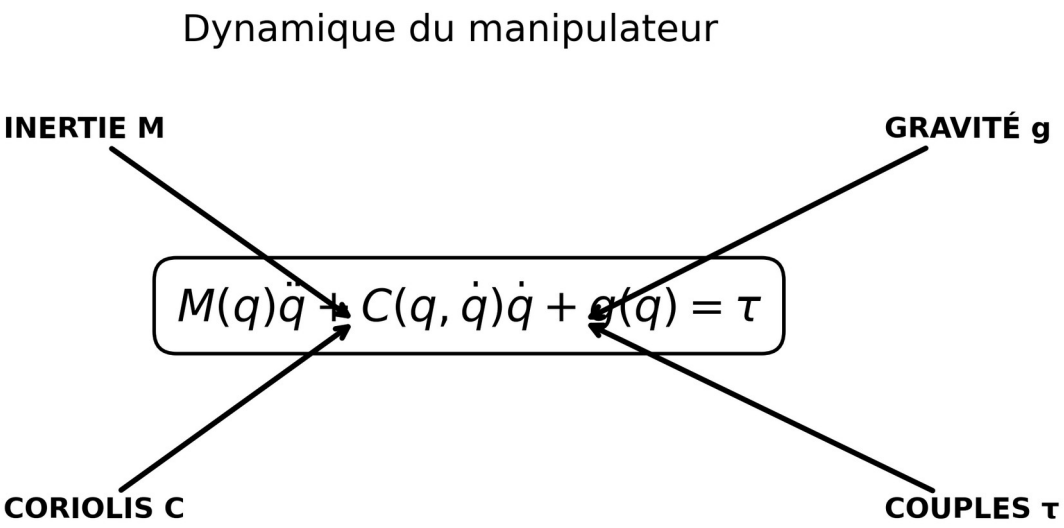
**Q3. La cinématique suffit-elle pour choisir un moteur ?**

Corrigé : Non. Il faut considérer couples, vitesses, accélérations, pertes, thermique et marges.

## Pour le film pédagogique

Commencer par la planche scientifique sans réponse affichée. Animer ensuite la grandeur physique étudiée, faire apparaître l’équation au moment correspondant, résoudre l’exemple numérique étape par étape, puis introduire une panne ou une mauvaise hypothèse et demander à l’étudiant de la diagnostiquer avant la correction.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ




*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d’ordinateur.*

# LEÇON 09 • COMPRENDRE

# Atlas technique de la leçon

## Comprendre

Dynamique, forces et couples

Objectif : Relier mouvement, masse, inertie, gravité et couples.

Cette leçon relie la théorie à un comportement mesurable du robot et exige une validation expérimentale.

Expliquer correctement les notions centrales : Masse, Inertie, Couple, Mouvement.

Passer d’une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Définir clairement entrées, sorties, unités et hypothèses.

Construire un modèle avant de modifier le système.

Comparer le résultat calculé à une observation, une simulation ou une mesure.

Dynamique : $M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau$. Le couple demandé dépend donc de la configuration, du mouvement et de la gravité.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

## Laboratoire à distance

### Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

### Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

### Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l’unité lorsqu’ils s’appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

### Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d’ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Capteurs, bruit, incertitude et fusion.**

## 1. Notion fondamentale

Une mesure robotique doit être interprétée avec son unité, son repère, son timestamp, sa plage valide et son état de santé. Une valeur seule est insuffisante.

## 2. Notion fondamentale

Le bruit produit des variations rapides autour d'une valeur; le biais produit un décalage systématique; la dérive fait évoluer progressivement l'erreur. Un même filtre ne corrige pas ces trois phénomènes.

## 3. Notion fondamentale

La fusion combine plusieurs sources complémentaires pour estimer un état xhat et son incertitude P. Elle exige une synchronisation temporelle et une modélisation réaliste de la qualité des capteurs.

## Exemple numérique entièrement résolu

Un capteur immobile retourne 1,02; 0,99; 1,01; 0,98; 1,00 m. La moyenne vaut 1,00 m. Si une mesure suivante vaut 4,80 m, il faut déterminer si elle représente un événement réel ou une valeur aberrante avant de la supprimer.

## Laboratoire à distance

Créer 100 mesures simulées d'une distance de 1 m avec bruit gaussien et biais de +0,05 m. Comparer moyenne, médiane et moyenne glissante. Montrer explicitement que le lissage réduit le bruit mais ne supprime pas le biais.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Une moyenne glissante supprime-t-elle un biais constant ?**

Corrigé : Non, elle lisse surtout les variations rapides.

**Q2. Pourquoi les timestamps sont-ils essentiels ?**

Corrigé : Ils permettent de fusionner des observations correspondant au même état physique.

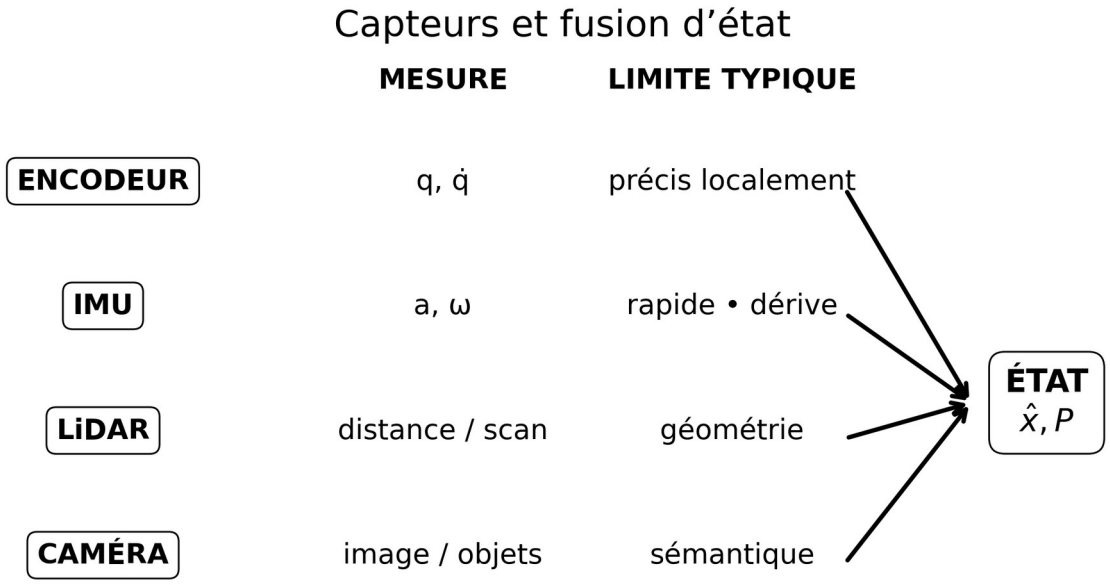
**Q3. Que signifie une donnée STALE ?**

Corrigé : Elle existe mais elle est trop ancienne pour l’usage prévu.

## Pour le film pédagogique

Commencer par la planche scientifique sans réponse affichée. Animer ensuite la grandeur physique étudiée, faire apparaître l’équation au moment correspondant, résoudre l’exemple numérique étape par étape, puis introduire une panne ou une mauvaise hypothèse et demander à l’étudiant de la diagnostiquer avant la correction.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ



*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d'ordinateur.*

# LEÇON 10 ● COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

## Comprendre

Capteurs, incertitude et fusion

Objectif : Interpréter les limites des capteurs et combiner plusieurs sources.

Cette leçon relie la théorie à un comportement mesurable du robot et exige une validation expérimentale.

Expliquer correctement les notions centrales : Encodeur, IMU, Vision, Fusion.

Passer d'une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Définir clairement entrées, sorties, unités et hypothèses.

Construire un modèle avant de modifier le système.

Comparer le résultat calculé à une observation, une simulation ou une mesure.

Une mesure utile doit être accompagnée de son unité, timestamp, validité et incertitude. Plusieurs capteurs peuvent être fusionnés pour obtenir un état plus robuste.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

# Laboratoire à distance

## Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

## Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

### Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l'unité lorsqu'ils s'appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

### Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d'ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l'étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l'étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Architecture d’un robot autonome.**

## 1. Notion fondamentale

Une architecture autonome sépare les responsabilités : perception, estimation d’état, planification, contrôle, diagnostic et gestion de mission. Cette séparation permet de raisonner sur les interfaces et de contenir les pannes.

## 2. Notion fondamentale

Les couches n’ont pas les mêmes contraintes temporelles. Une IMU peut produire 200 Hz, un contrôleur moteur 500 Hz, une caméra 30 Hz et un gestionnaire de mission seulement quelques hertz ou des événements. Le système ne doit pas forcer la couche rapide à attendre la couche lente.

## 3. Notion fondamentale

Chaque interface doit documenter valeur, unité, repère, timestamp, fréquence, timeout et comportement lorsque la donnée est invalide. L’autonomie robuste exige aussi des états DEGRADED, SAFE_STOP et RECOVERY.

## Exemple numérique / raisonnement entièrement résolu

Supposons IMU=200 Hz, LiDAR=10 Hz, caméra=30 Hz et contrôle=500 Hz. La période du contrôle est 2 ms, celle du LiDAR 100 ms. Faire attendre le contrôleur à chaque scan LiDAR multiplierait par 50 son intervalle normal et détruirait la boucle rapide.

## Laboratoire à distance

Concevoir l’architecture d’un robot de service comportant au moins huit composants. Pour chaque liaison, inscrire fréquence nominale, timeout,

unité et réaction à la perte de donnée. Injecter ensuite la perte de la caméra et expliquer ce qui continue à fonctionner.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Pourquoi séparer mission et contrôle moteur ?**

Corrigé : Le contrôle doit rester rapide et déterministe malgré un raisonnement de mission plus lent.

**Q2. Qu’est-ce qu’un watchdog ?**

Corrigé : Un mécanisme qui détecte qu’un composant ou heartbeat attendu n’arrive plus dans le délai prévu.

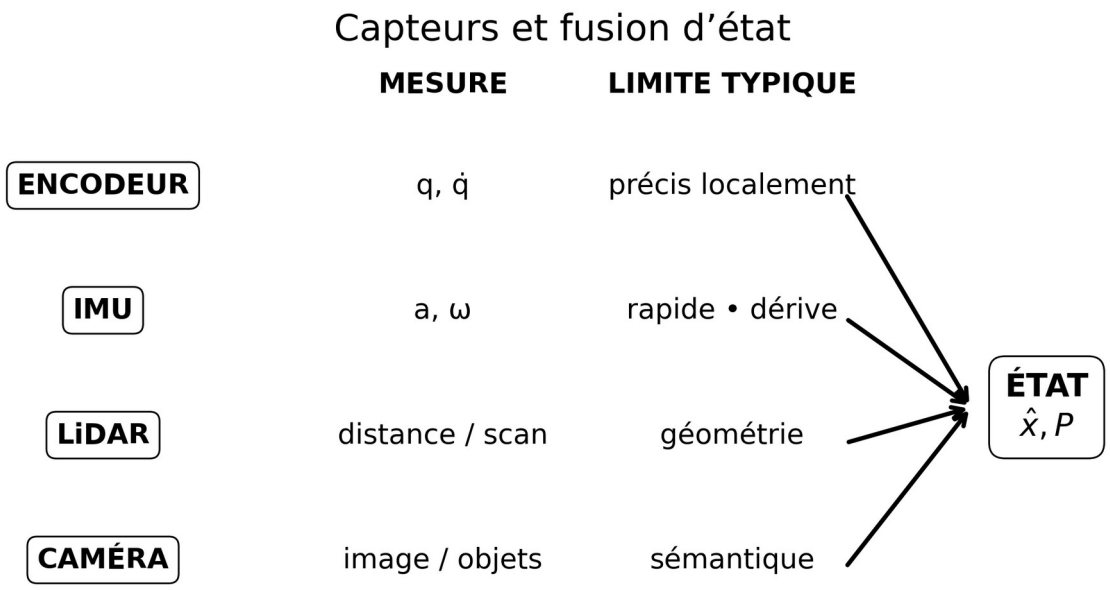
**Q3. Pourquoi ALIVE ne signifie-t-il pas HEALTHY ?**

Corrigé : Un processus peut répondre tout en produisant des données fausses, trop anciennes ou de mauvaise qualité.

## Pour le film pédagogique

Ouvrir sur la planche scientifique de la leçon. Faire identifier les composants et repères avant d’afficher les légendes. Animer ensuite les flux de données ou le mouvement, superposer l’équation ou le contrat d’interface correspondant, puis montrer une exécution correcte et une panne contrôlée. Suspendre la narration avant la correction pour que l’étudiant formule son diagnostic comme il le ferait en laboratoire présentiel.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ




*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d’ordinateur.*

# LEÇON 11 • COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

## Comprendre

Architecture d’un robot autonome

Objectif : Décomposer l’autonomie en perception, estimation, planification, contrôle et diagnostic.

Cette leçon relie la théorie à un comportement mesurable du robot et exige une validation expérimentale.

Expliquer correctement les notions centrales : Perception, État, Décision, Action.

Passer d’une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Définir clairement entrées, sorties, unités et hypothèses.

Construire un modèle avant de modifier le système.

Comparer le résultat calculé à une observation, une simulation ou une mesure.

Architecture : capteurs → perception → estimation d’état → planification → contrôle → actionneurs, avec diagnostic transversal.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

# Laboratoire à distance

## Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

## Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

## Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l’unité lorsqu’ils s’appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

## Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d’ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — ROS 2 : nœuds, topics, services, actions et TF2.**

## 1. Notion fondamentale

ROS 2 organise un robot en nœuds faiblement couplés. Un publisher ne doit pas connaître tous les consommateurs d’un topic, ce qui facilite la modularité, le test et le remplacement d’un composant.

## 2. Notion fondamentale

Un topic convient à un flux asynchrone; un service à une requête/réponse courte; une action à une opération longue nécessitant feedback, résultat et annulation. Le choix de l’interface fait partie de l’architecture.

## 3. Notion fondamentale

TF2 maintient les relations temporelles entre repères. Une pose sans frame_id ou sans timestamp fiable est insuffisante pour une transformation correcte. Le QoS définit notamment fiabilité, historique et profondeur des files.

## Exemple numérique / raisonnement entièrement résolu

Chaîne minimale : lidar_node publie /scan; slam_node s’abonne à /scan et publie /map; navigation utilise /map et /odom puis publie /cmd_vel; controller transforme /cmd_vel en commandes physiques. Si /scan vaut 10 Hz, son intervalle nominal est 100 ms; un timeout peut être défini en fonction de la mission et de la tolérance aux pertes.

## Laboratoire à distance

Sur papier ou dans ROS 2, créer un graphe avec capteur, estimation, navigation, commande et diagnostic. Pour chaque topic, préciser type, unité, frame_id, fréquence et QoS. Provoquer ensuite une incompatibilité de nom ou de QoS et documenter le symptôme.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Pourquoi un topic plutôt qu'un appel direct entre programmes ?**

Corrigé : Il réduit le couplage et permet plusieurs abonnés indépendants.

**Q2. À quoi sert frame_id ?**

Corrigé : À préciser le repère spatial dans lequel la donnée est exprimée.

**Q3. Pourquoi une Action convient-elle mieux à une navigation longue ?**

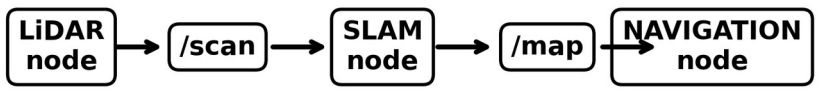
Corrigé : Elle permet goal, feedback, résultat et annulation pendant l'exécution.

## Pour le film pédagogique

Ouvrir sur la planche scientifique de la leçon. Faire identifier les composants et repères avant d'afficher les légendes. Animer ensuite les flux de données ou le mouvement, superposer l'équation ou le contrat d'interface correspondant, puis montrer une exécution correcte et une panne contrôlée. Suspendre la narration avant la correction pour que l'étudiant formule son diagnostic comme il le ferait en laboratoire présentiel.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ

ROS 2 — nœuds et interfaces




**TOPIC = flux asynchrone • SERVICE = requête/réponse • ACTION = objectif long**

*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d'ordinateur.*

# LEÇON 12 ● COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

## Comprendre

ROS 2 : nœuds, topics, services et actions

Objectif : Comprendre l'architecture logicielle distribuée d'un robot moderne.

ROS 2 structure un robot comme un système distribué de nœuds et d'interfaces explicites.

Expliquer correctement les notions centrales : Nodes, Topics, Services, Actions.

Passer d'une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Topics pour flux, services pour requête-réponse, actions pour opérations longues.

QoS doit être choisi selon la sémantique et la fraîcheur des données.

Les lifecycle nodes facilitent un démarrage contrôlé.

ROS 2 sépare les responsabilités en nœuds. Topics pour les flux, services pour requête-réponse, actions pour objectifs longs avec feedback et annulation.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

## Laboratoire à distance

### Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

### Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

### Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l'unité lorsqu'ils s'appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

### Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d'ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l'étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l'étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — SLAM, localisation et navigation.**

## 1. Notion fondamentale

Le SLAM estime simultanément la trajectoire x0:t et une carte m à partir des commandes/odométrie et observations. Le problème existe parce que la carte aide à localiser le robot alors que la localisation est nécessaire pour construire la carte.

## 2. Notion fondamentale

Le scan matching cherche la transformation alignant deux observations successives. L'odométrie fournit souvent une estimation initiale; le LiDAR ou la vision ajoute une contrainte géométrique.

## 3. Notion fondamentale

La fermeture de boucle reconnaît un lieu déjà observé et ajoute une contrainte globale. Une bonne loop closure réduit la dérive; une fausse loop closure peut déformer toute la carte. La navigation utilise ensuite carte globale, costmaps, footprint et planification locale.

## Exemple numérique / raisonnement entièrement résolu

Un robot parcourt une boucle de 40 m et l'odométrie termine 0,60 m à côté du départ. L'erreur relative de fermeture vaut environ 0,60/40=1,5 %. Une loop closure cohérente permet à l'optimisation de redistribuer cette erreur au lieu de simplement déplacer le dernier point.

## Laboratoire à distance

Créer une carte d'occupation simulée avec murs et obstacles. Simuler une trajectoire fermée, ajouter progressivement une erreur d'odométrie, puis appliquer une contrainte de fermeture. Comparer trajectoire brute et corrigée.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Pourquoi l’odométrie seule dérive-t-elle ?**

Corrigé : Les petites erreurs de roues, glissement et quantification s’accumulent.

**Q2. Qu’est-ce qu’une occupancy grid ?**

Corrigé : Une grille où chaque cellule représente l’état ou la probabilité d’occupation.

**Q3. Pourquoi une fausse loop closure est-elle grave ?**

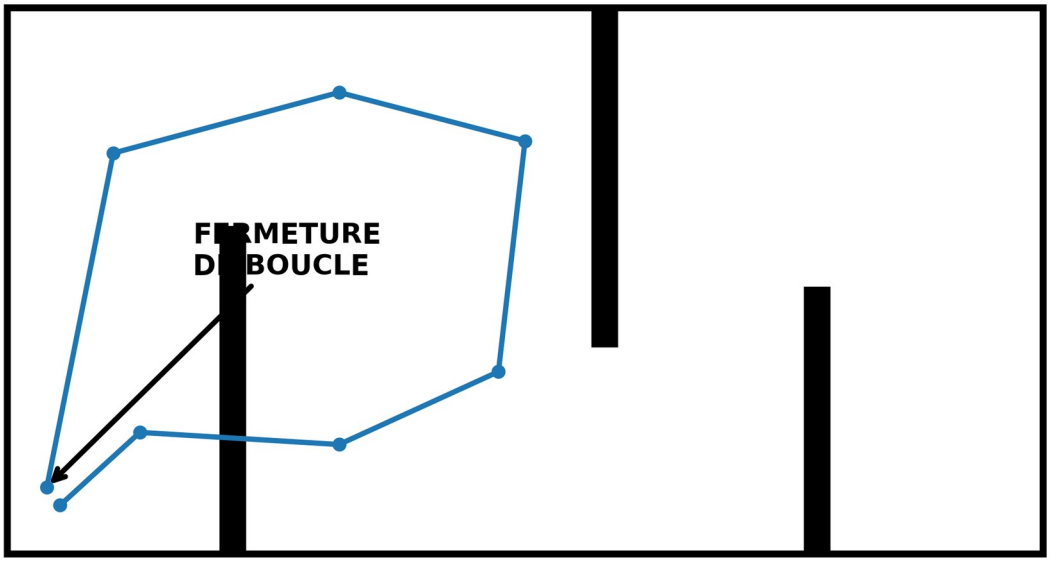
Corrigé : Elle introduit une contrainte incorrecte susceptible de déformer globalement carte et trajectoire.

## Pour le film pédagogique

Ouvrir sur la planche scientifique de la leçon. Faire identifier les composants et repères avant d’afficher les légendes. Animer ensuite les flux de données ou le mouvement, superposer l’équation ou le contrat d’interface correspondant, puis montrer une exécution correcte et une panne contrôlée. Suspendre la narration avant la correction pour que l’étudiant formule son diagnostic comme il le ferait en laboratoire présentiel.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ

SLAM — carte, trajectoire et fermeture de boucle




*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d'ordinateur.*

# LEÇON 13 • COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

## Comprendre

SLAM, localisation et navigation

Objectif : Construire une carte, estimer la pose et planifier un déplacement.

Cette leçon relie la théorie à un comportement mesurable du robot et exige une validation expérimentale.

Expliquer correctement les notions centrales : Scan, Carte, Localisation, Plan.

Passer d’une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Définir clairement entrées, sorties, unités et hypothèses.

Construire un modèle avant de modifier le système.

Comparer le résultat calculé à une observation, une simulation ou une mesure.

SLAM estime simultanément la trajectoire et la carte. La fermeture de boucle permet de corriger une dérive accumulée lorsqu’un lieu déjà visité est reconnu.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

# Laboratoire à distance

## Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

## Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

## Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l’unité lorsqu’ils s’appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

## Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d’ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Vision 3D et perception robotique.**

## 1. Notion fondamentale

La classification répond « quoi ? », la détection ajoute « où dans l'image ? », la segmentation identifie les pixels de l'objet et l'estimation de pose cherche sa position et son orientation 3D.

## 2. Notion fondamentale

Pour une caméra calibrée avec profondeur Z : $X=(u-cx)Z/fx$ et $Y=(v-cy)Z/fy$. Le point obtenu est d'abord exprimé dans le repère caméra; il faut ensuite le transformer vers la base du robot.

## 3. Notion fondamentale

Une prédiction sémantique ne remplace pas la métrologie. Pour saisir un objet, le robot doit combiner classe, masque ou géométrie, profondeur, calibration et transformations de repères, avec une mesure d'incertitude.

## Exemple numérique / raisonnement entièrement résolu

Prenons $fx=fy=600$ px, $cx=320$, $cy=240$. Pour $u=380$, $v=270$ et $Z=1{,}20$ m : $X=(60\times1{,}20)/600=0{,}12$ m; $Y=(30\times1{,}20)/600=0{,}06$ m. Le point caméra est donc $[0{,}12;0{,}06;1{,}20]$ m avant transformation vers la base.

## Laboratoire à distance

Choisir dix couples pixel-profondeur simulés. Reconstruire les points 3D, tracer le nuage et calculer son centroïde. Ajouter ensuite une transformation caméra-base simple et vérifier la nouvelle position.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Pourquoi une bounding box ne suffit-elle pas à une préhension précise ?**

Corrigé : Elle localise une région image mais ne fournit pas à elle seule une pose métrique 3D.

**Q2. Qu’est-ce qu’une pose 6D ?**

Corrigé : Trois coordonnées de position et trois degrés de liberté d’orientation.

**Q3. Pourquoi la calibration caméra-base est-elle critique ?**

Corrigé : Une petite erreur angulaire ou de translation devient directement une erreur de position de la cible pour le bras.

## Pour le film pédagogique

Ouvrir sur la planche scientifique de la leçon. Faire identifier les composants et repères avant d’afficher les légendes. Animer ensuite les flux de données ou le mouvement, superposer l’équation ou le contrat d’interface correspondant, puis montrer une exécution correcte et une panne contrôlée. Suspendre la narration avant la correction pour que l’étudiant formule son diagnostic comme il le ferait en laboratoire présentiel.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ

Vision RGB-D — du pixel à la pose 3D

$$X = \frac{(u - c_x)Z}{f_x} \qquad Y = \frac{(v - c_y)Z}{f_y}$$




*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d'ordinateur.*

# LEÇON 14 • COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

## Comprendre

Vision 3D et perception robotique

Objectif : Passer des pixels à une position 3D exploitable par le robot.

Cette leçon relie la théorie à un comportement mesurable du robot et exige une validation expérimentale.

Expliquer correctement les notions centrales : Image, Profondeur, Objet, Pose 3D.

Passer d’une description qualitative à un modèle calculable ou testable.

Identifier au moins une défaillance plausible et construire une procédure de vérification.

Produire un schéma ou une trace expérimentale pouvant être réutilisé dans le film pédagogique.

Définir clairement entrées, sorties, unités et hypothèses.

Construire un modèle avant de modifier le système.

Comparer le résultat calculé à une observation, une simulation ou une mesure.

Vision 3D : X=(u-cx)Z/fx ; Y=(v-cy)Z/fy ; Z=profondeur. La pose caméra doit ensuite être transformée vers base_link.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

# Laboratoire à distance

## Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

## Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

## Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l’unité lorsqu’ils s’appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

## Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d’ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant révélation de la réponse.

# APPROFONDISSEMENT UNIVERSITAIRE

**Objectif renforcé — Préhension, sécurité et projet intégrateur.**

## 1. Notion fondamentale

La préhension relie perception et action physique. Le système génère plusieurs grasp candidates, puis élimine ceux qui violent l'IK, les limites articulaires, les collisions, l'ouverture de pince ou les contraintes de charge.

## 2. Notion fondamentale

Une commande de fermeture de pince n'est pas une preuve de réussite. La prise doit être vérifiée par position, force/courant, vision ou combinaison de capteurs. Le transport ne doit commencer qu'après GRASP_VERIFIED selon la politique du système.

## 3. Notion fondamentale

Le projet intégrateur doit suivre la chaîne : SELF_TEST → LOCALIZE → NAVIGATE → DETECT → ESTIMATE_POSE → PLAN_GRASP → CHECK_IK/COLLISION → EXECUTE → VERIFY → TRANSPORT → PLACE → VERIFY → REPORT. Les chemins d'échec doivent être conçus aussi précisément que le chemin nominal.

## Exemple numérique / raisonnement entièrement résolu

Supposons trois candidats de préhension : G1 score 0,92 mais collision détectée; G2 score 0,84 et IK valide; G3 score 0,79 mais proche d'une limite articulaire. G1 est rejeté malgré son meilleur score IA; G2 devient le candidat exploitable. La prédiction IA ne constitue donc jamais à elle seule une autorisation physique.

## Laboratoire à distance

Projet final : simuler un robot qui va vers une table, localise un objet, choisit une préhension, vérifie IK/collision, saisit, confirme la prise et transporte l'objet. Injecter au moins trois fautes : objet absent, grasp failed et capteur indisponible. Produire un journal horodaté et un rapport de cause.

## Autoévaluation et corrigé

**Q1. Pourquoi l'IA ne doit-elle pas contourner une collision détectée ?**

Corrigé : La confiance d'un modèle ne remplace pas une contrainte physique ou de sécurité.

**Q2. Que signifie GRASP_VERIFIED ?**

Corrigé : Que des preuves capteurs définies par la conception confirment que l'objet est effectivement tenu.

**Q3. Quelle propriété distingue un projet intégrateur professionnel d'une simple démonstration ?**

Corrigé : La présence d'exigences mesurables, de chemins d'échec, de tests, de preuves et d'une vérification du résultat.

## Pour le film pédagogique

Ouvrir sur la planche scientifique de la leçon. Faire identifier les composants et repères avant d'afficher les légendes. Animer ensuite les flux de données ou le mouvement, superposer l'équation ou le contrat d'interface correspondant, puis montrer une exécution correcte et une panne contrôlée. Suspendre la narration avant la correction pour que l'étudiant formule son diagnostic comme il le ferait en laboratoire présentiel.

## PLANCHE GRANDE LISIBILITÉ

Vision RGB-D — du pixel à la pose 3D

$$X = \frac{(u - c_x)Z}{f_x} \qquad Y = \frac{(v - c_y)Z}{f_y}$$




*Version redessinée : gros caractères, axes et flèches renforcés, contraste élevé. Cette planche doit rester lisible sur papier, tablette et écran d'ordinateur.*

# LEÇON 15 • COMPRENDRE

## Atlas technique de la leçon

## Comprendre

Préhension, sécurité et projet intégrateur

Objectif : Combiner perception, géométrie, planification, commande et vérification.

Une préhension valide exige perception, pose 3D, IK, absence de collision, limites articulaires, commande de pince et vérification physique du résultat.

Comprendre ce que vous voyez

Repérez d’abord les blocs ou axes principaux. Suivez ensuite les flèches dans leur ordre. Expliquez oralement ce qui entre dans chaque bloc, ce qui en sort et quelle grandeur physique ou information est transformée.

Question de lecture : quelle erreur de conception ou d’interprétation cette planche permet-elle d’éviter ?

Comparez cette seconde représentation à la première. Identifiez ce qui relève de la géométrie, du logiciel, de la mesure ou de la commande. Lorsque des symboles mathématiques apparaissent dans la leçon, montrez sur la planche à quelle partie physique ils correspondent.

## Laboratoire à distance

### Mission

Construire ou simuler un exemple minimal de la notion étudiée, produire une preuve mesurable et expliquer le résultat comme dans un laboratoire présentiel.

Procédure : 1) définir les hypothèses et unités; 2) construire le modèle; 3) exécuter un cas nominal; 4) injecter une erreur ou une condition limite; 5) comparer résultat attendu et résultat observé; 6) consigner les données.

### Exercices

1. Définissez les variables importantes et leurs unités.

2. Reproduisez le schéma sans regarder la page précédente.

3. Donnez un cas où le système peut produire un résultat plausible mais faux.

4. Proposez une mesure ou un test permettant de détecter cette erreur.

### Corrigé - repères

Une bonne réponse identifie explicitement la grandeur mesurée, le repère ou l’unité lorsqu’ils s’appliquent, les hypothèses du modèle et une méthode de vérification indépendante.

### Storyboard du film pédagogique

Plan 1 : vue d’ensemble de la planche. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation reliée visuellement au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant affichage de la réponse.

## Travail visuel obligatoire

1. Redessiner une des deux planches sans la regarder. 2. Ajouter les unités et repères manquants. 3. Expliquer oralement le mécanisme en 90 secondes. 4. Identifier une panne ou erreur de modèle que la planche permet de diagnostiquer.

## Séquence pour le film pédagogique

Plan 1 : vue globale. Plan 2 : apparition progressive des éléments. Plan 3 : animation des flux ou mouvements. Plan 4 : équation superposée au composant correspondant. Plan 5 : démonstration simulée. Plan 6 : panne volontaire et diagnostic. Plan 7 : question à l’étudiant avant révélation de la réponse.

# Évaluation finale ROB-101

L’étudiant doit démontrer qu’il sait passer du robot physique au modèle mathématique, du modèle à la simulation, puis de la simulation à une stratégie de commande vérifiable. L’évaluation combine schémas annotés, calculs, diagnostic, laboratoire simulé et explication orale.

## Crédits iconographiques

Les planches techniques de cette édition sont des créations pédagogiques intégrées au programme ROB-101. Toute image de tiers ajoutée dans une édition ultérieure devra conserver sa licence et son crédit explicite.