Perception, capteurs et estimation d’état

ROB-103 • Manuel universitaire illustré

Angelo Nibizi • Nibizi Technologies • Édition 2026

COLLÈGE DU SACRÉ-CŒUR DE GATINEAU • ROB-103

GRANDE LISIBILITÉ • APPRENTISSAGE À DISTANCE

CHAÎNE DE PERCEPTION



Du monde physique à l'état estimé.

Angelo Nibizi

Recteur du Collège du Sacré-Cœur
Gatineau, Québec

Angelo Nibizi • Nibizi Technologies • Édition 2026

DROITS D’AUTEUR ET DONNÉES D’ÉDITION

© 2026 Angelo Nibizi. Tous droits réservés.

ROB-103 — Perception, capteurs et estimation d’état
Manuel universitaire illustré de robotique
Auteur : Angelo Nibizi
Établissement : Collège du Sacré-Cœur de Gatineau, Québec
Éditeur : Nibizi Technologies
Première édition : 2026

Aucune partie de cet ouvrage ne peut être reproduite, distribuée, transmise, adaptée ou stockée dans un système de récupération, sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, sauf dans les cas permis par la loi ou avec l’autorisation écrite préalable du titulaire des droits.

AVERTISSEMENT PÉDAGOGIQUE ET DE SÉCURITÉ

Cet ouvrage est destiné à l’enseignement de la robotique, de la perception et de l’estimation d’état. Les exemples, simulations et procédures ne remplacent pas les normes, manuels des fabricants, procédures de laboratoire ni l’encadrement requis pour les systèmes électriques, mécaniques, autonomes ou de forte énergie. Les essais réels doivent être réalisés avec les protections, limites de puissance, arrêts d’urgence et procédures adaptés.

CRÉDITS DES ILLUSTRATIONS

Schémas techniques, graphiques et mise en page pédagogique : préparés pour cette édition sous la direction éditoriale d’Angelo Nibizi.

Illustrations pédagogiques réalistes : créées avec assistance d’outils d’intelligence

artificielle générative pour ce manuel, puis sélectionnées, découpées, légendées et intégrées au contexte pédagogique de l'ouvrage.

Avant toute diffusion commerciale, l'éditeur doit vérifier qu'aucune photographie, marque, capture d'écran ou ressource externe ajoutée ultérieurement ne nécessite une autorisation ou un crédit supplémentaire.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Titre : ROB-103 — Perception, capteurs et estimation d'état
Auteur : Angelo Nibizi
Éditeur : Nibizi Technologies
Lieu de publication : Gatineau (Québec), Canada
Année : 2026
Langue : français

STANDARD ÉDITORIAL — ÉDITION MAÎTRE

Cette édition consolidée applique le standard ROB-103 : texte pédagogique en 14 pt minimum, images réalistes présentées séparément et en grand, schémas XL à faible densité textuelle, équations et calculs en texte Word lisible, laboratoires à distance, diagnostic, corrigés et storyboards audiovisuels.

Nibizi Technologies • Édition 2026

Progression ROB-103

Cette première édition applique dès le départ le standard établi dans ROB-102 : corps 14 pt minimum, schémas XL, exemples numériques, laboratoire à distance, diagnostic et storyboard audiovisuel.

01 — Introduction à la perception robotique

02 — Capteurs, bruit, biais et calibration

03 — Probabilités et incertitude

04 — Filtrage et filtre de Kalman

05 — Encodeurs, IMU et odométrie

06 — LiDAR et perception géométrique

07 — Caméras, calibration et vision 3D

08 — Fusion multicapteur et estimation de pose

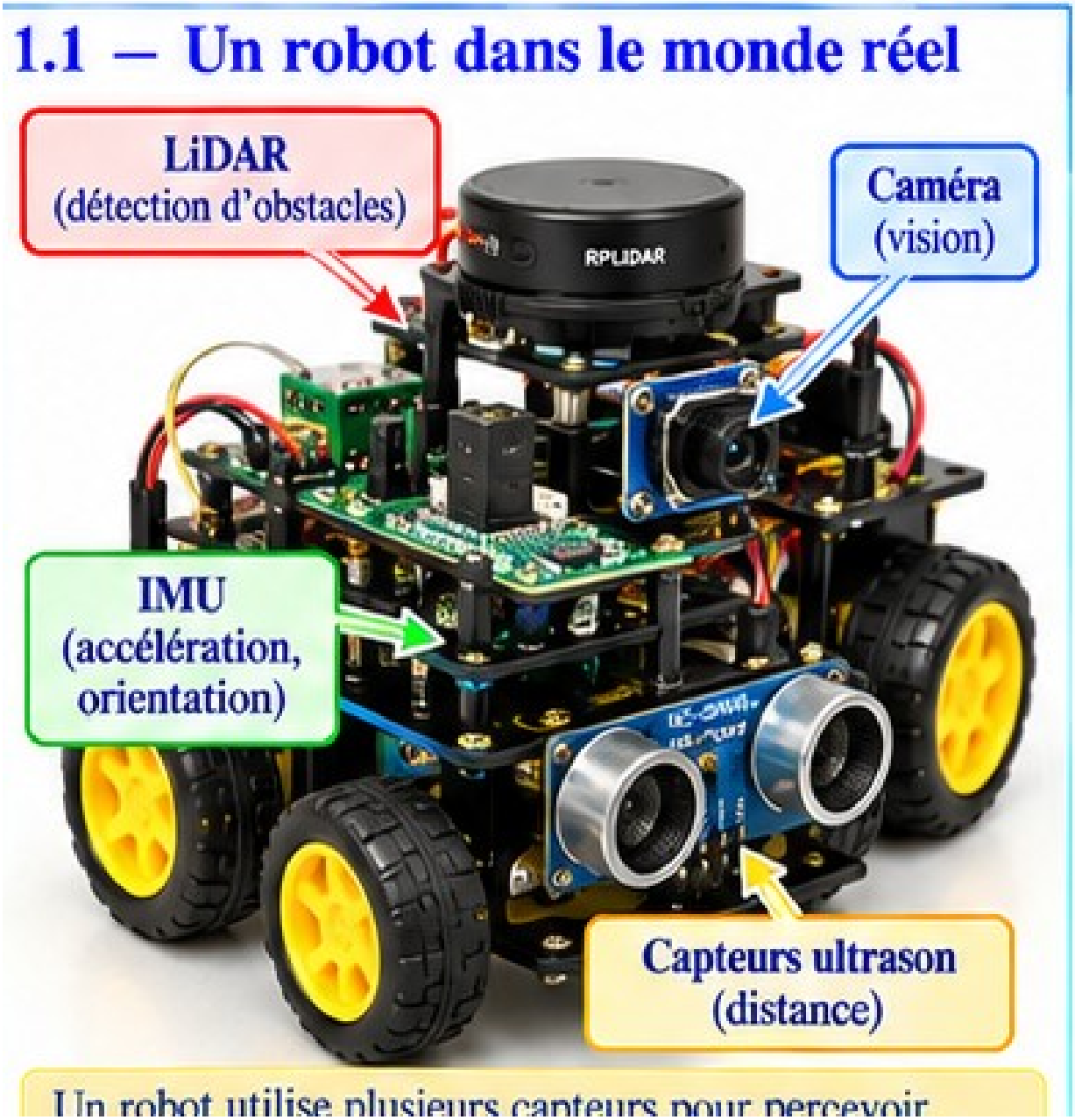
09 — Détection de défauts et modes dégradés

10 — Projet intégrateur de perception

ATLAS VISUEL RÉALISTE — LEÇON 1

Observer d’abord le matériel réel, puis utiliser les schémas XL pour comprendre les flux et le texte Word pour les détails mathématiques.

IMAGE RÉALISTE — ROBOT MULTICAPTEUR



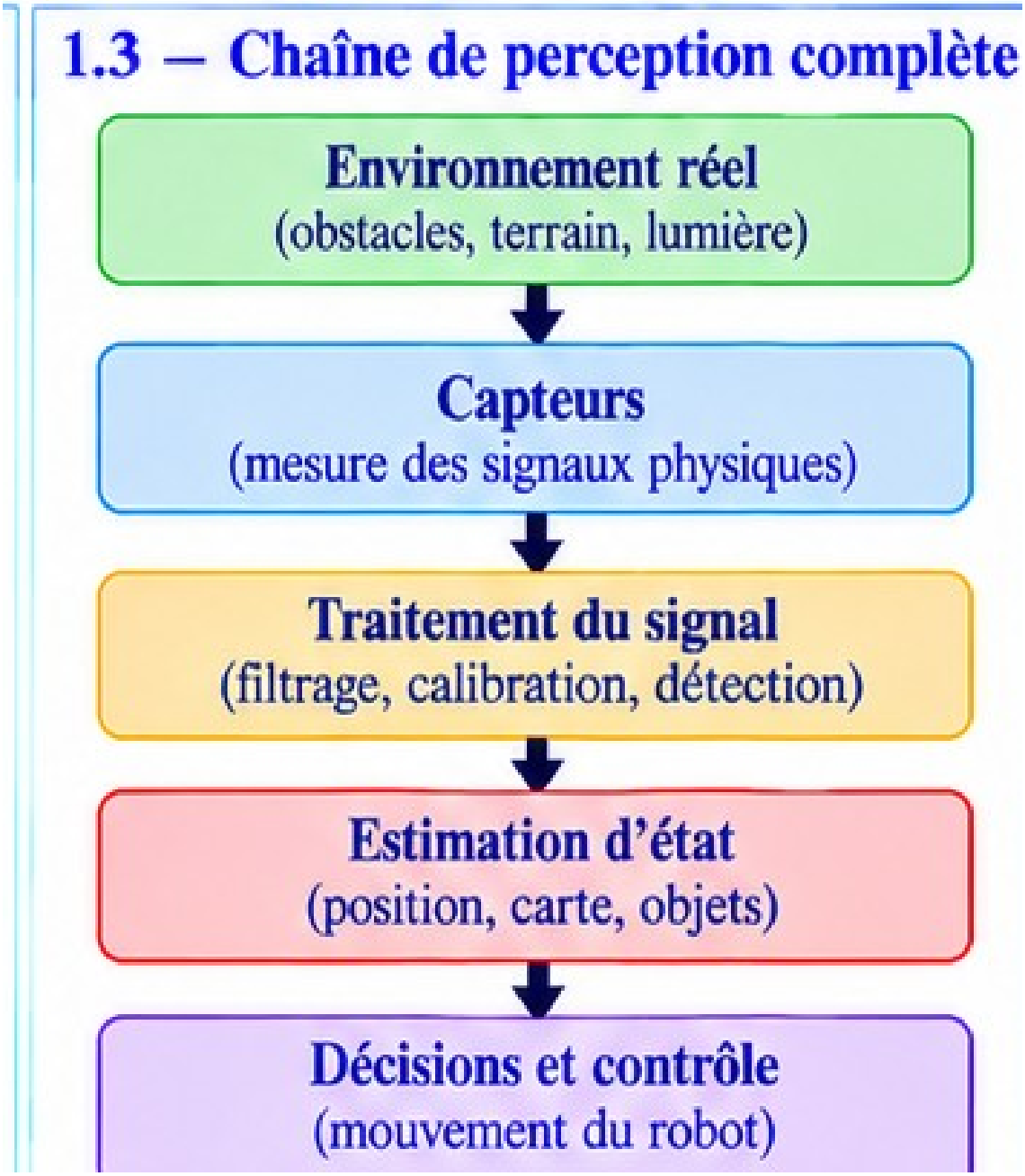
Repérer LiDAR, caméra, IMU et capteurs de distance sur un robot mobile.

IMAGE RÉALISTE — FAMILLES DE CAPTEURS



Reconnaître encodeur, IMU, ultrason, LiDAR, caméra RGB-D et GNSS/GPS.

SCHÉMA VISUEL — CHAÎNE DE PERCEPTION



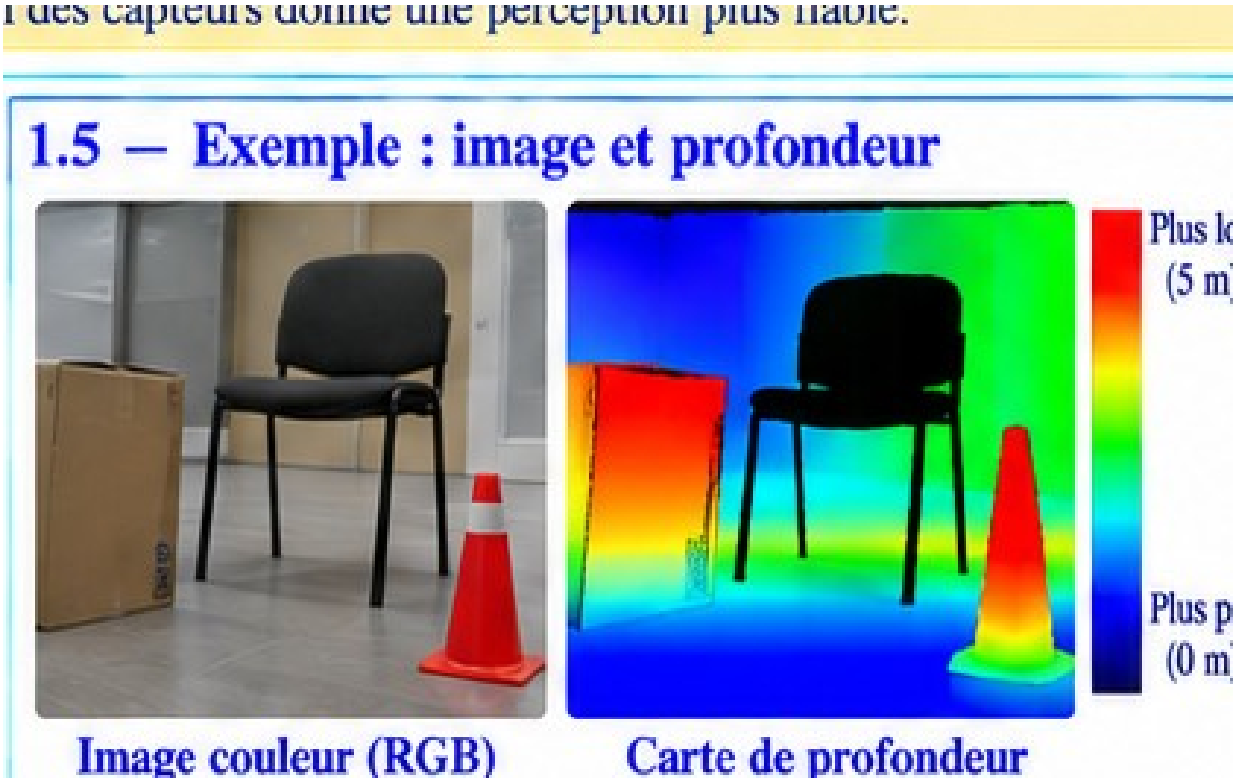
Du monde réel à la mesure, au traitement, à l'estimation puis à la décision.

IMAGE RÉALISTE — CAPTEUR ULTRASON



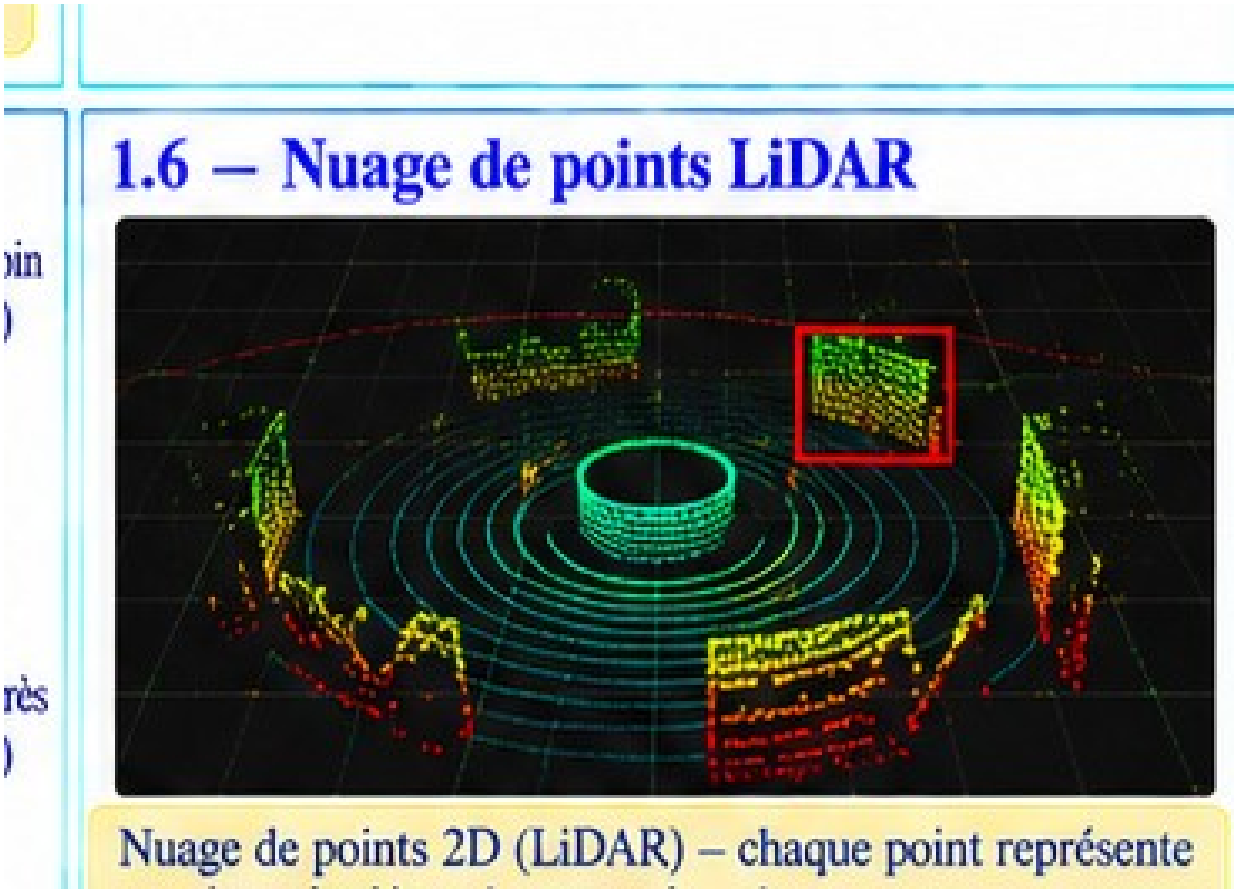
La distance est déduite du temps aller-retour d'une onde acoustique.

IMAGE RÉALISTE — CAMÉRA RGB-D



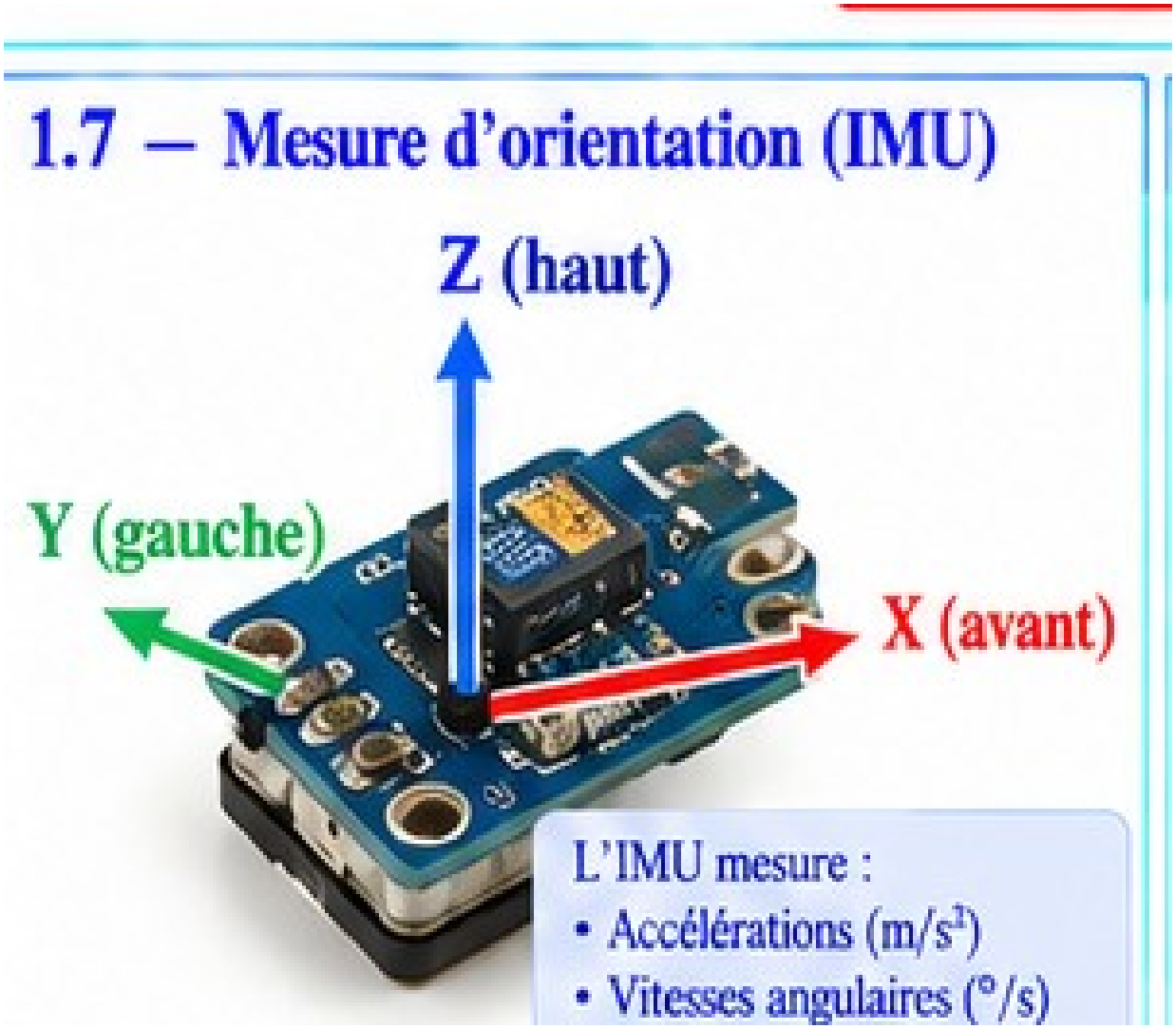
La couleur et la profondeur fournissent des informations complémentaires.

IMAGE RÉALISTE — NUAGE DE POINTS LiDAR



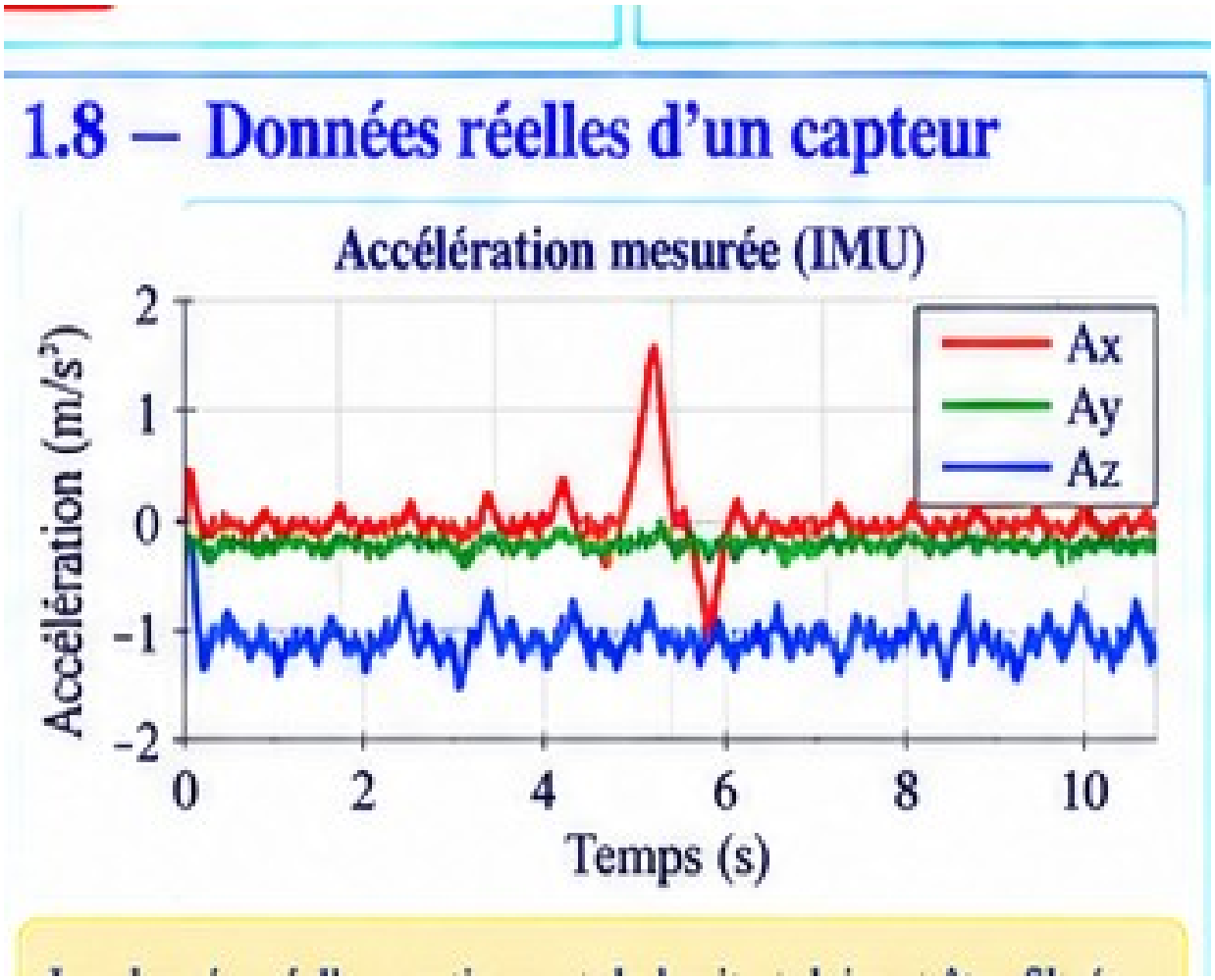
Chaque mesure contribue à une représentation géométrique de l'environnement.

IMAGE RÉALISTE — IMU ET AXES



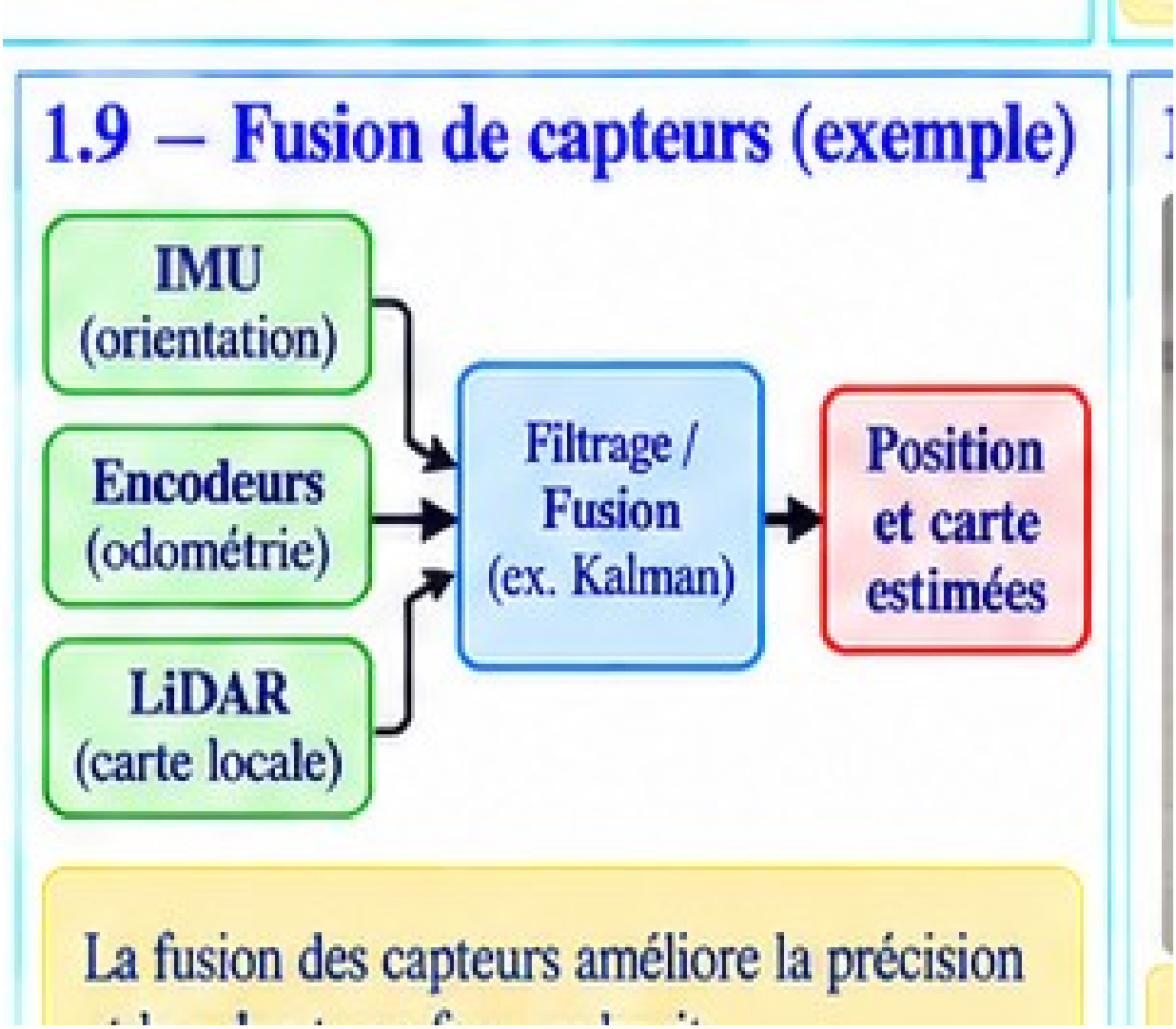
Relier l'orientation physique du capteur aux axes utilisés dans les données.

ILLUSTRATION — BRUIT DE MESURE



Une mesure réelle varie; l'estimation doit représenter cette incertitude.

SCHÉMA VISUEL — FUSION DES CAPTEURS



Plusieurs sources complémentaires contribuent à une estimation plus robuste.

IMAGE RÉALISTE — NAVIGATION AUTONOME



La perception devient utile lorsqu'elle soutient une décision et une action vérifiables.

TRAVAIL VISUEL OBLIGATOIRE

1. Identifier sur le robot au moins quatre capteurs et indiquer ce que chacun mesure.

2. Expliquer pourquoi une caméra RGB et un LiDAR ne fournissent pas la même information.

3. Sur l'IMU, associer les axes physiques aux données d'accélération et de vitesse angulaire.

4. Observer la courbe bruitée et distinguer variation normale, pic et biais possible.

5. Expliquer oralement la chaîne complète : monde → capteurs → estimation → décision → action.

Leçon 1 — Introduction à la perception robotique

Objectifs

- Comprendre la grandeur réellement observée.
- Relier mesure, repère, timestamp et incertitude.

- Détecter une donnée incohérente et définir une réaction.

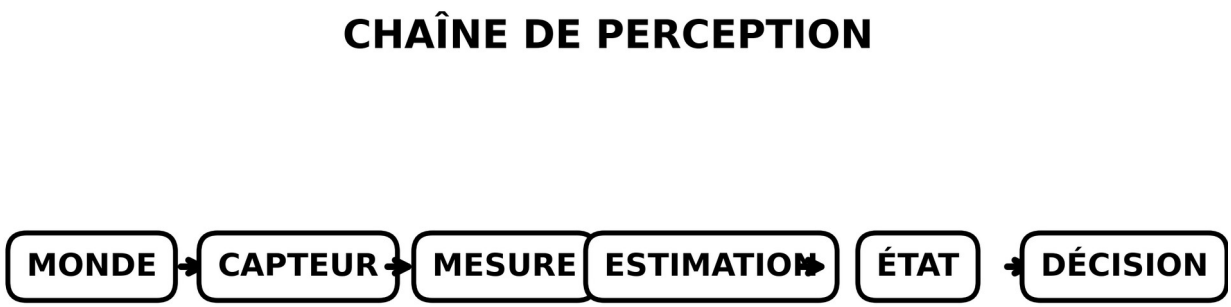


Planche ROB-103.1 — grande lisibilité.

Théorie fondamentale

La perception transforme les signaux du monde physique en informations exploitables. Toute donnée doit être reliée à une grandeur, une unité, un repère, un timestamp et une qualité.

Exemple résolu

Mesure 1,02 m pour une référence 1,00 m : erreur instantanée +0,02 m.

Laboratoire à distance

Simuler des mesures, ajouter bruit/biais/latence, appliquer la méthode de la leçon, tracer résultat et incertitude, puis injecter une faute et documenter la réaction.

Diagnostic

- Unité correcte ?
- Repère correct ?

- Timestamp récent ?
- Valeur physiquement plausible ?
- Incertitude cohérente ?

Autoévaluation corrigée

Q. Pourquoi une mesure seule ne suffit-elle pas ?

Corrigé : Il faut unité, repère, timestamp, qualité et incertitude.

Q. Que signifie STALE ?

Corrigé : La donnée est trop ancienne pour l’usage prévu.

Q. Pourquoi conserver la covariance ?

Corrigé : Pour représenter explicitement l’incertitude.

Storyboard du film pédagogique

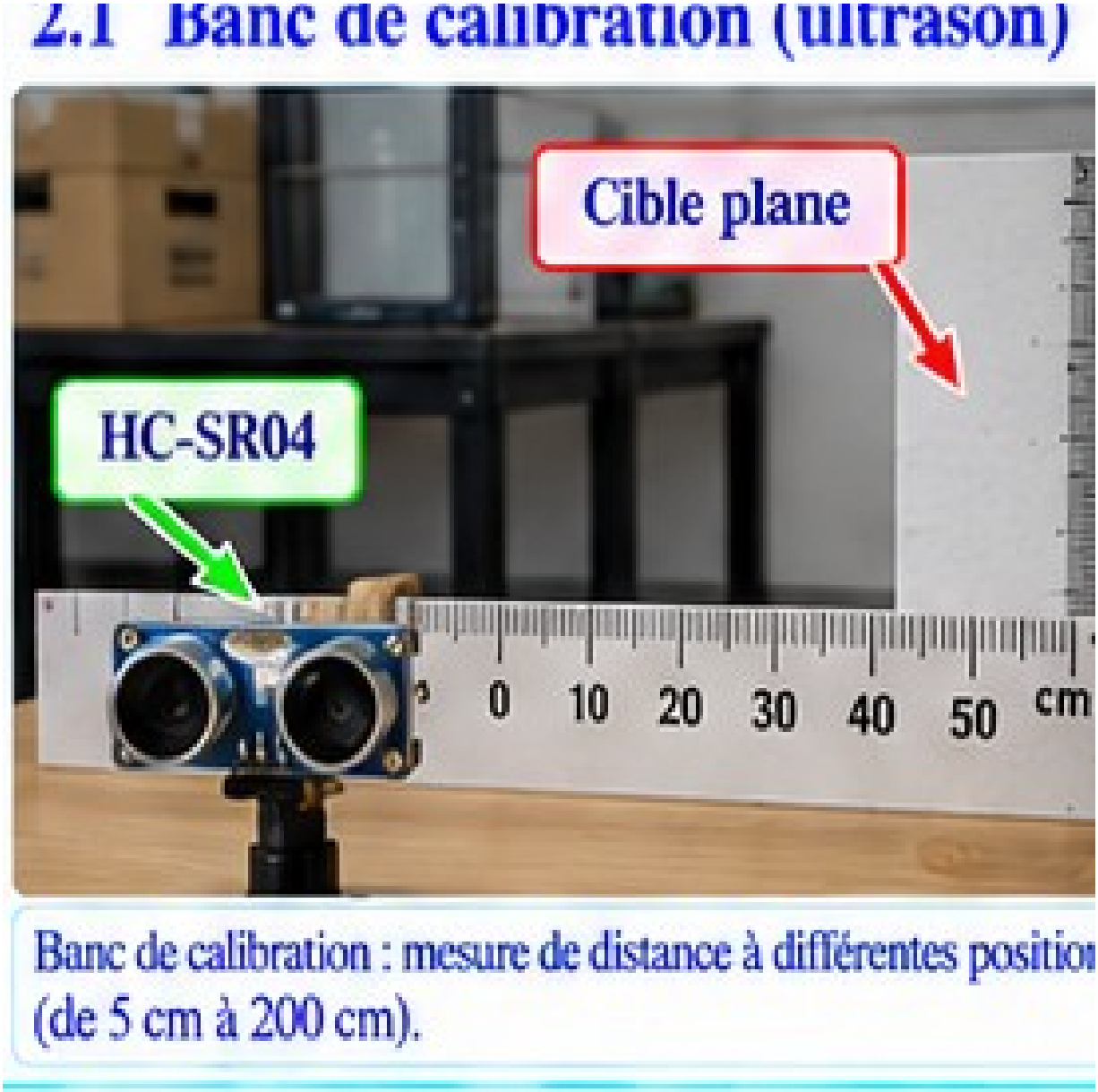
Montrer le capteur → afficher la mesure brute → introduire bruit/biais → calibrer/estimer → visualiser l’incertitude → injecter une panne → laisser l’étudiant diagnostiquer avant la correction.

COLLÈGE DU SACRÉ-CŒUR DE GATINEAU • ROB-103

ATLAS VISUEL — CALIBRATION ET ERREURS DE MESURE

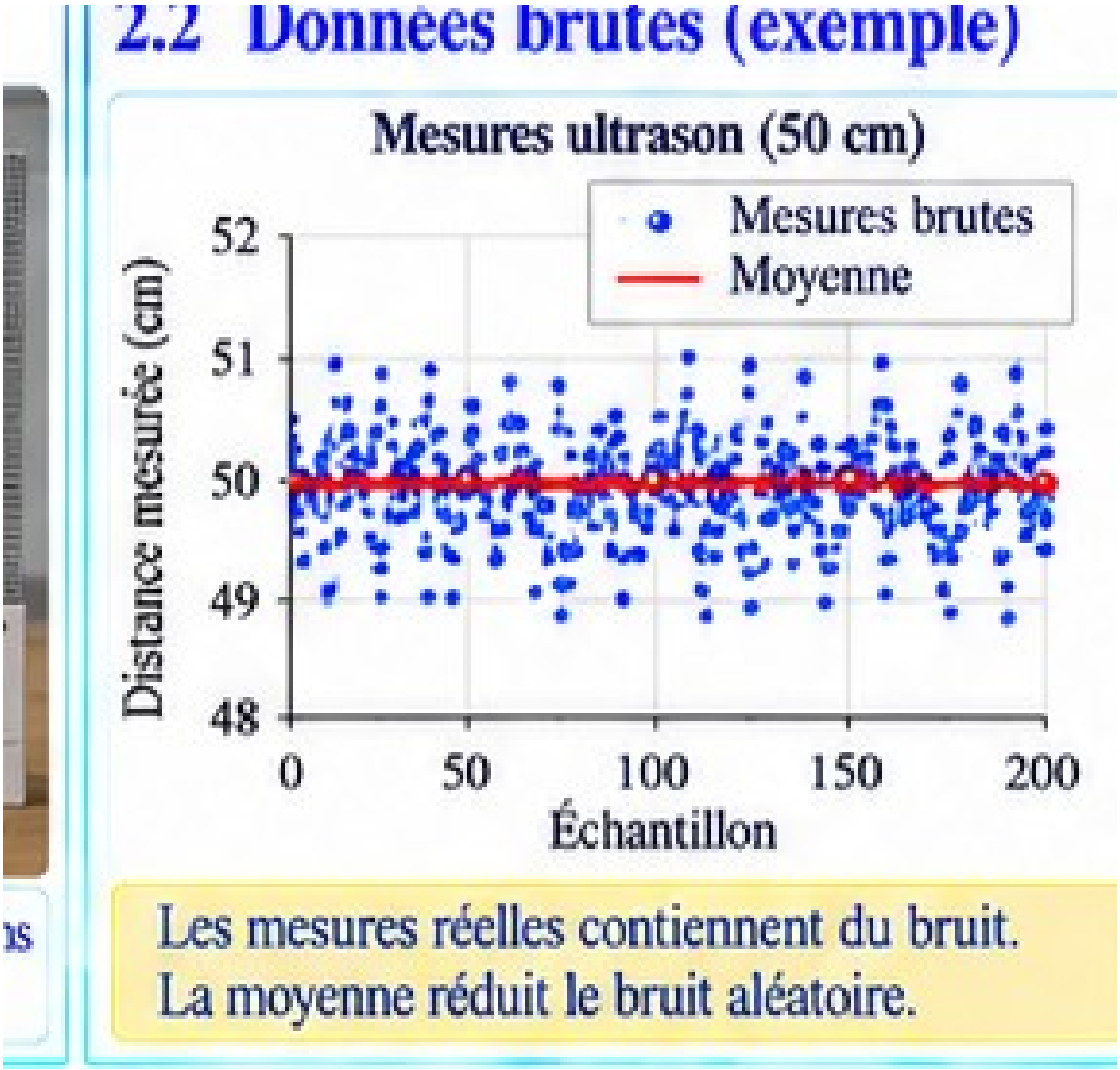
Angelo Nibizi • Nibizi Technologies • Édition 2026

IMAGE RÉALISTE — BANC DE CALIBRATION



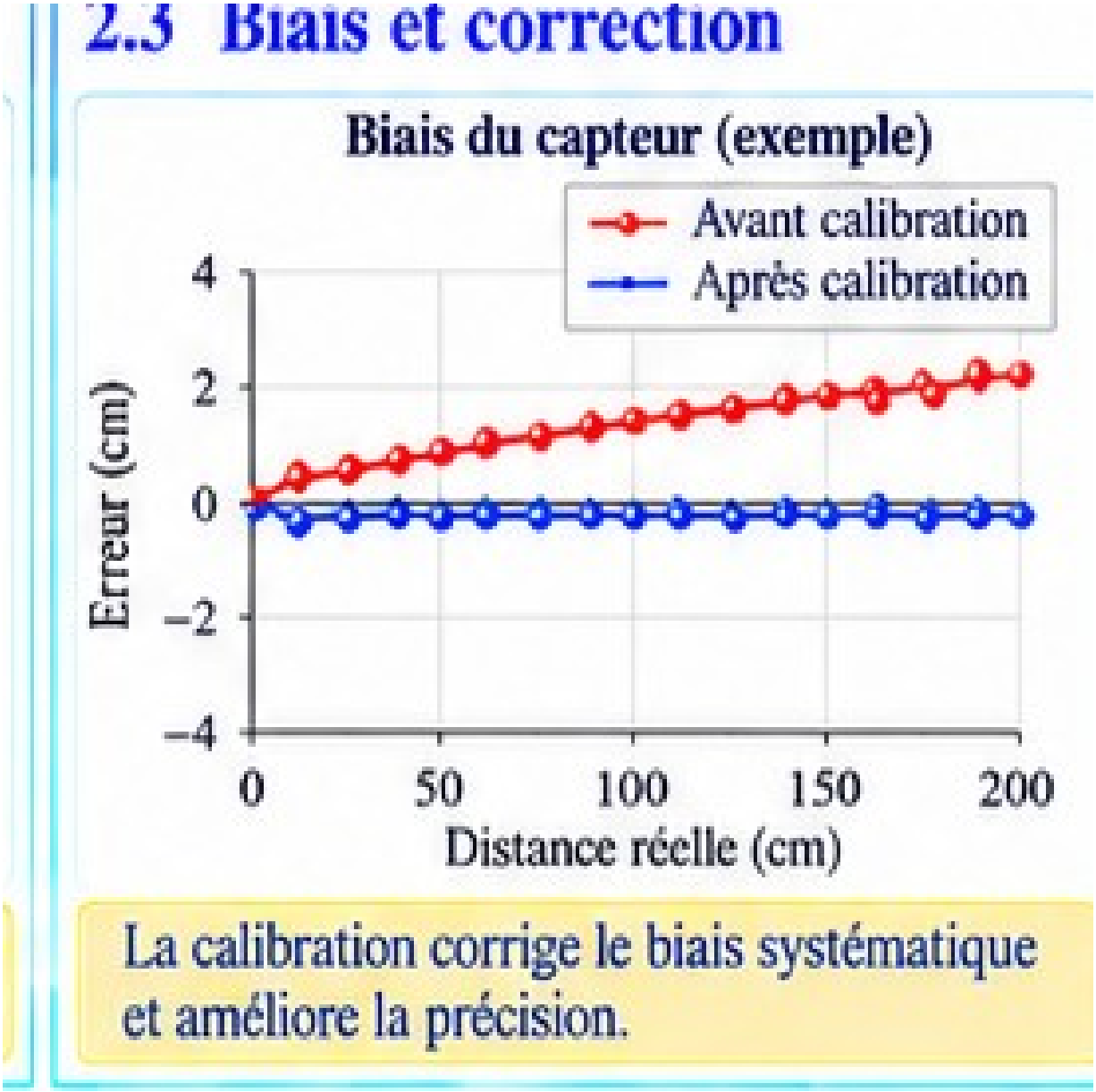
Comparer la mesure du capteur à une distance de référence connue.

ILLUSTRATION — MESURES BRUTES



La dispersion des points montre le bruit; la moyenne ne supprime pas automatiquement le biais.

GRAPHIQUE — BIAIS AVANT / APRÈS CALIBRATION



La calibration vise à corriger une erreur systématique identifiable.

IMAGE RÉALISTE — CALIBRATION CAMÉRA



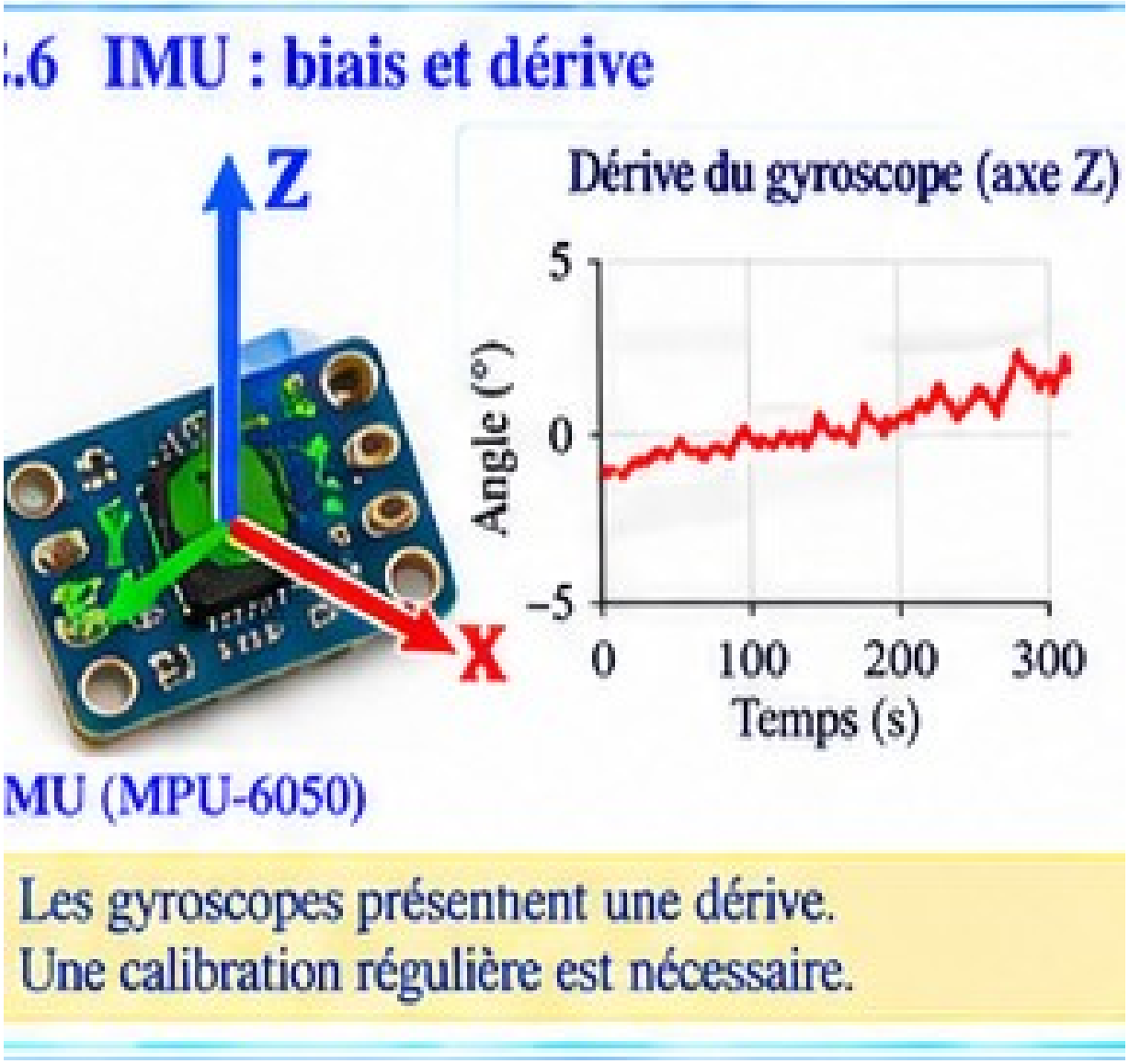
Une mire connue permet d'estimer les paramètres nécessaires à des mesures géométriques.

IMAGE RÉALISTE — CALIBRATION LiDAR



Une cible de position connue aide à vérifier échelle, alignement et cohérence.

IMAGE RÉALISTE — IMU, BIAIS ET DÉRIVE



Un petit biais gyroscope intégré dans le temps produit une dérive d'orientation.

IMAGE RÉALISTE — REPÈRES VISUELS



Des marqueurs visuels connus peuvent fournir des références de pose pour calibration et validation.

TABLEAU VISUEL — TYPES D'ERREURS

2.8 Résumé des types d'erreurs

Type d'erreur	Cause	Exemple	Correction
Biais	Décalage systématique	+2 cm (toujours)	Calibration (offset)
Bruit	Variations aléatoires	±1 cm	Moyenne filtrage
Dérive	Changement dans le temps	Gyro dérive 0,5 °/min	Recalibration (filtre, fusion)
Non-linéarité	Réponse non linéaire	Erreur plus grande à longue distance	Modèle de correction
Facteurs environnementaux	Température, lumière, surface	Ultrasons sur tapis	Adaptation, fusion capteurs

Distinguer biais, bruit, dérive, non-linéarité et facteurs environnementaux.

TRAVAIL VISUEL — LEÇON 2

Identifier sur le banc la référence connue et la mesure du capteur.

Sur la courbe brute, distinguer dispersion aléatoire et décalage systématique.

Expliquer pourquoi une moyenne peut réduire le bruit sans corriger un biais.

Leçon 2 — Capteurs, bruit, biais et calibration

Objectifs

- Comprendre la grandeur réellement observée.
- Relier mesure, repère, timestamp et incertitude.

- Détecter une donnée incohérente et définir une réaction.

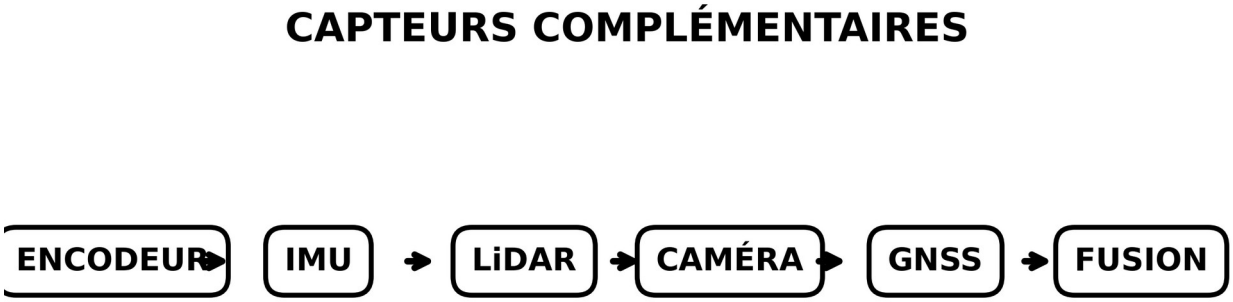


Planche ROB-103.2 — grande lisibilité.

Théorie fondamentale

Un capteur possède plage, résolution, bruit, biais, dérive, latence et fréquence. La calibration corrige un modèle de mesure à partir de références connues.

Exemple résolu

Biais +0,05 m : mesure brute 2,13 m → valeur corrigée 2,08 m, avant autres erreurs.

Laboratoire à distance

Simuler des mesures, ajouter bruit/biais/latence, appliquer la méthode de la leçon, tracer résultat et incertitude, puis injecter une faute et documenter la réaction.

Diagnostic

- Unité correcte ?

- Repère correct ?
- Timestamp récent ?
- Valeur physiquement plausible ?
- Incertitude cohérente ?

Autoévaluation corrigée

Q. Pourquoi une mesure seule ne suffit-elle pas ?

Corrigé : Il faut unité, repère, timestamp, qualité et incertitude.

Q. Que signifie STALE ?

Corrigé : La donnée est trop ancienne pour l’usage prévu.

Q. Pourquoi conserver la covariance ?

Corrigé : Pour représenter explicitement l’incertitude.

Storyboard du film pédagogique

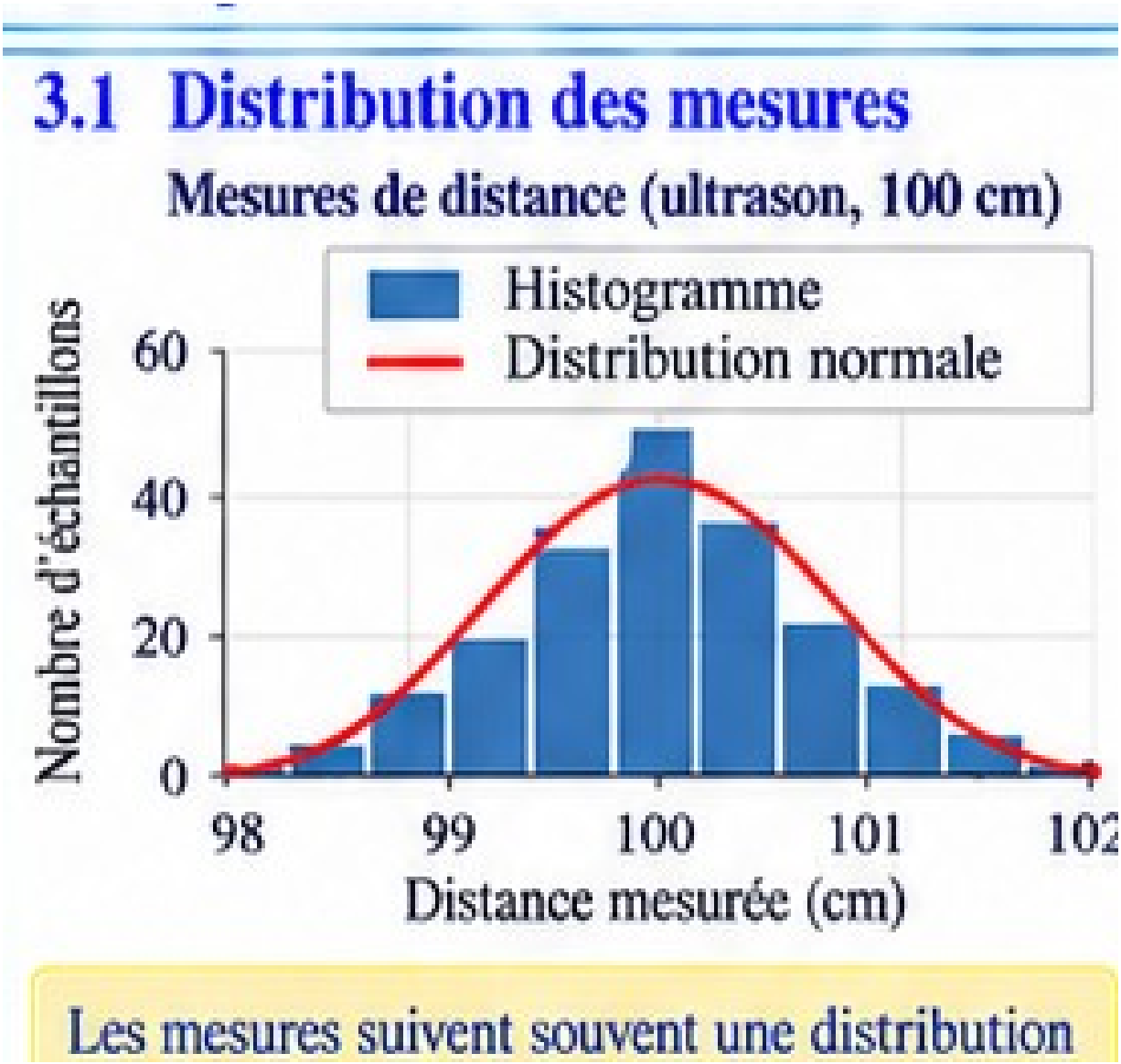
Montrer le capteur → afficher la mesure brute → introduire bruit/biais → calibrer/estimer → visualiser l’incertitude → injecter une panne → laisser l’étudiant diagnostiquer avant la correction.

COLLÈGE DU SACRÉ-CŒUR DE GATINEAU • ROB-103

ATLAS VISUEL — PROBABILITÉS ET INCERTITUDE

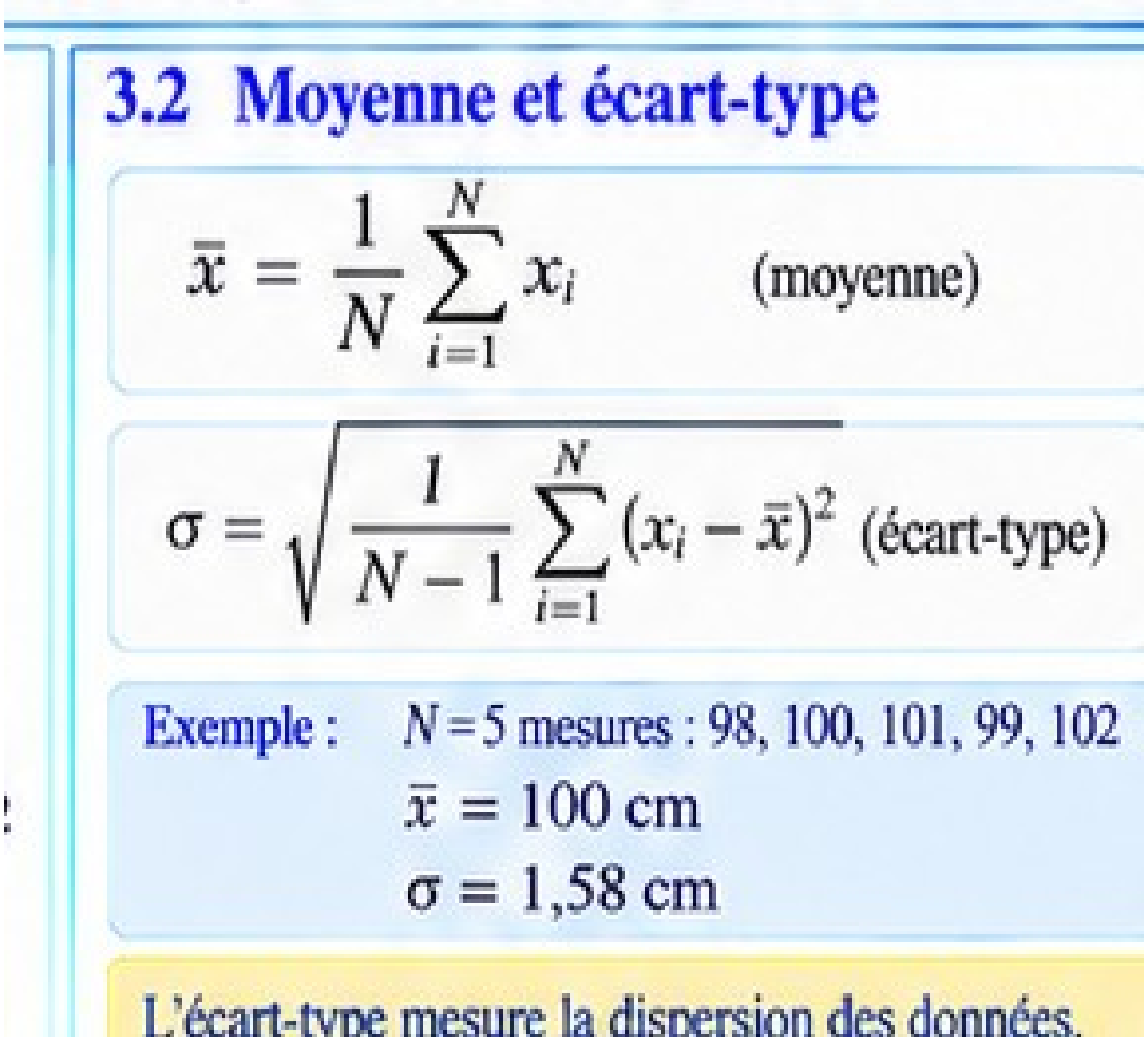
Angelo Nibizi • Nibizi Technologies • Édition 2026

GRAPHIQUE — DISTRIBUTION DES MESURES



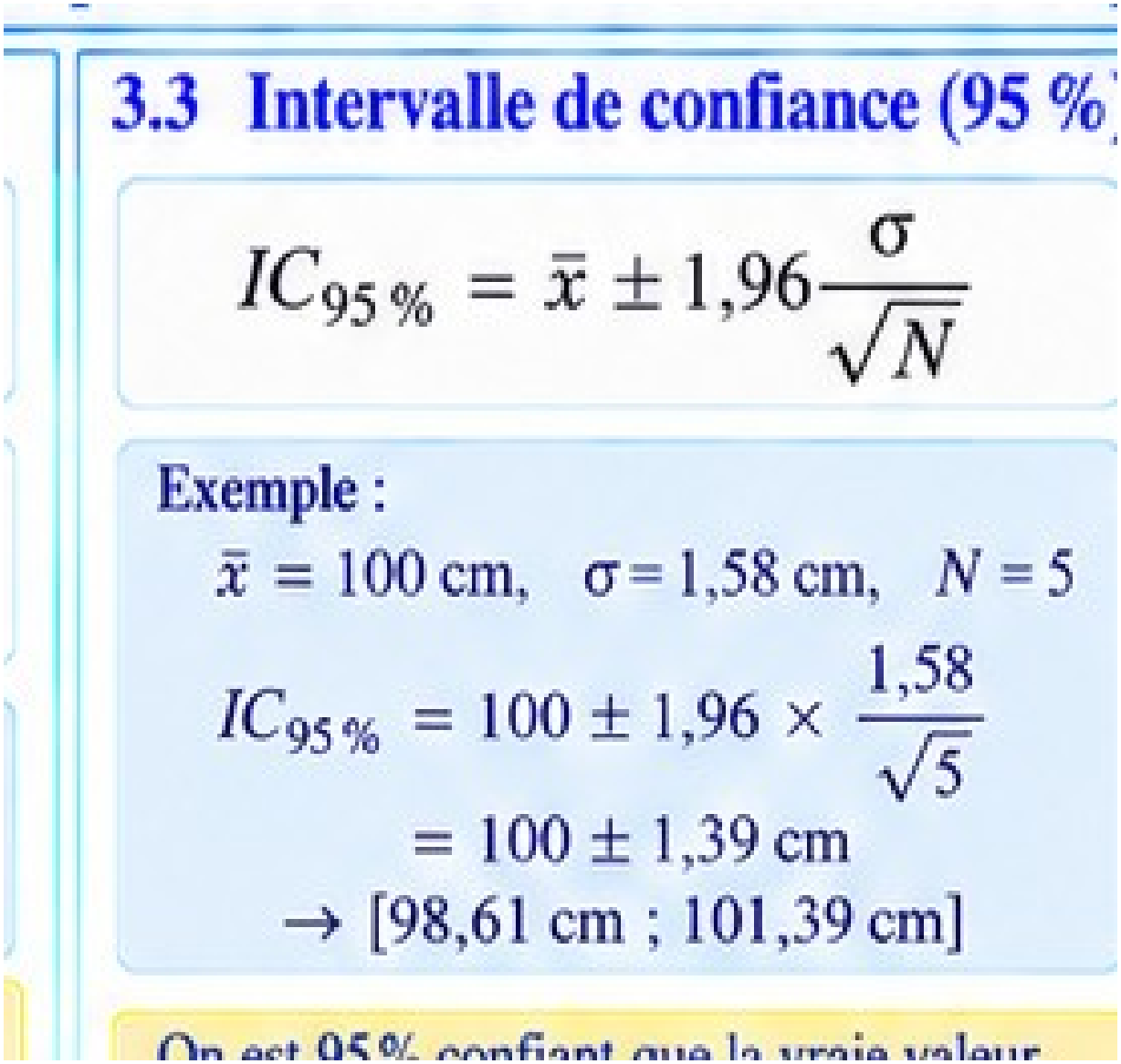
Un histogramme permet d'observer centre, dispersion et forme d'un ensemble de mesures.

FORMULES VISUELLES — MOYENNE ET ÉCART-TYPE



La moyenne décrit le centre; l'écart-type décrit la dispersion.

VISUALISATION — INTERVALLE DE CONFIANCE



3.3 Intervalle de confiance (95 %)

$$IC_{95\,\%} = \bar{x} \pm 1{,}96\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Exemple :

$\bar{x} = 100$ cm, $\sigma = 1{,}58$ cm, $N = 5$

$$IC_{95\,\%} = 100 \pm 1{,}96 \times \frac{1{,}58}{\sqrt{5}}$$

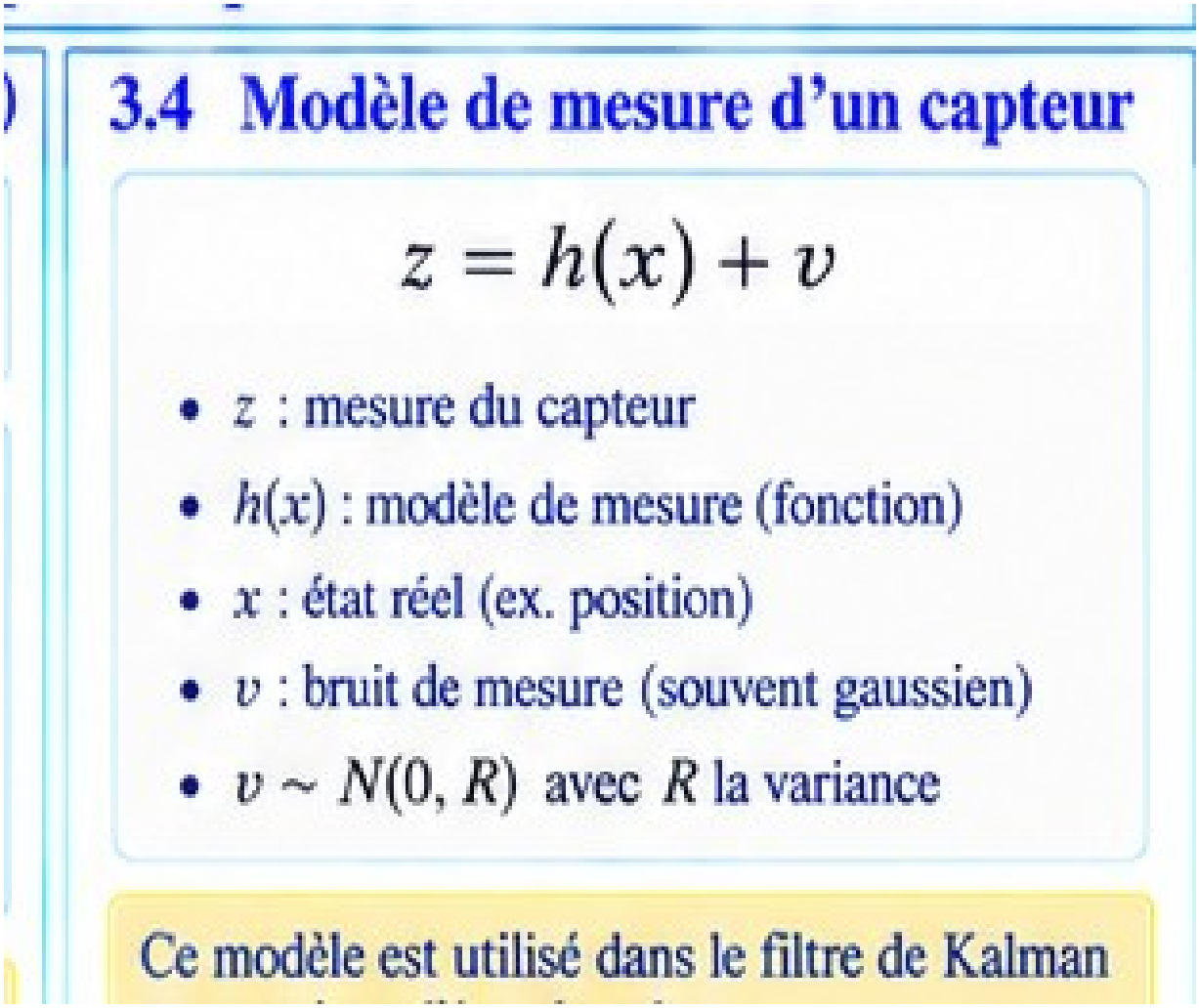
$$= 100 \pm 1{,}39 \text{ cm}$$

$\rightarrow$ [98,61 cm ; 101,39 cm]

On est 95 % confiant que la vraie valeur

L’incertitude sur une moyenne dépend notamment de la dispersion et du nombre d’échantillons.

MODÈLE DE MESURE



Écrire explicitement z=h(x)+v sépare l'état, le modèle et le bruit.

EXEMPLE RÉALISTE — ULTRASON



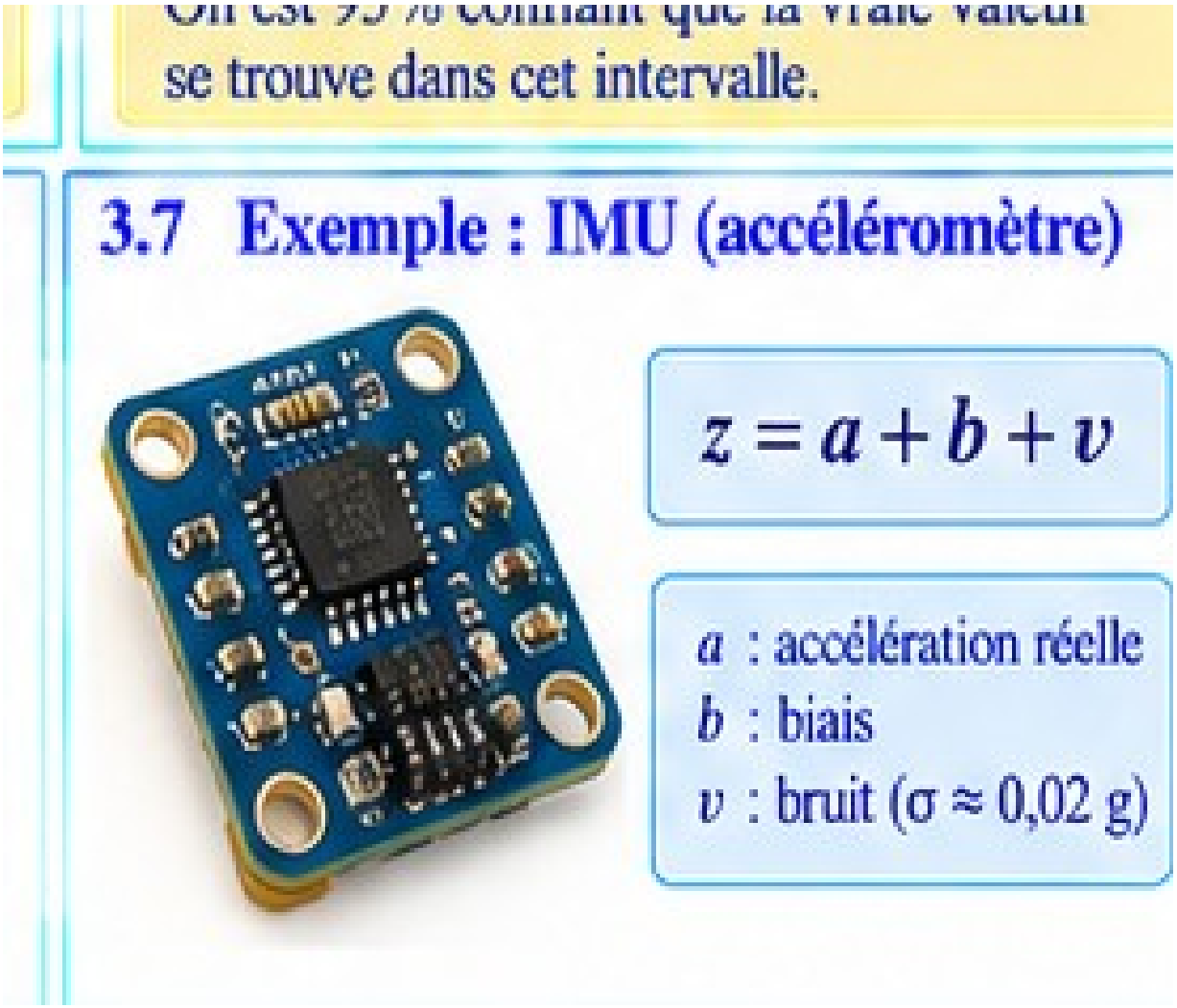
La distance réelle, la mesure et le bruit doivent être distingués.

EXEMPLE RÉALISTE — ENCODEUR



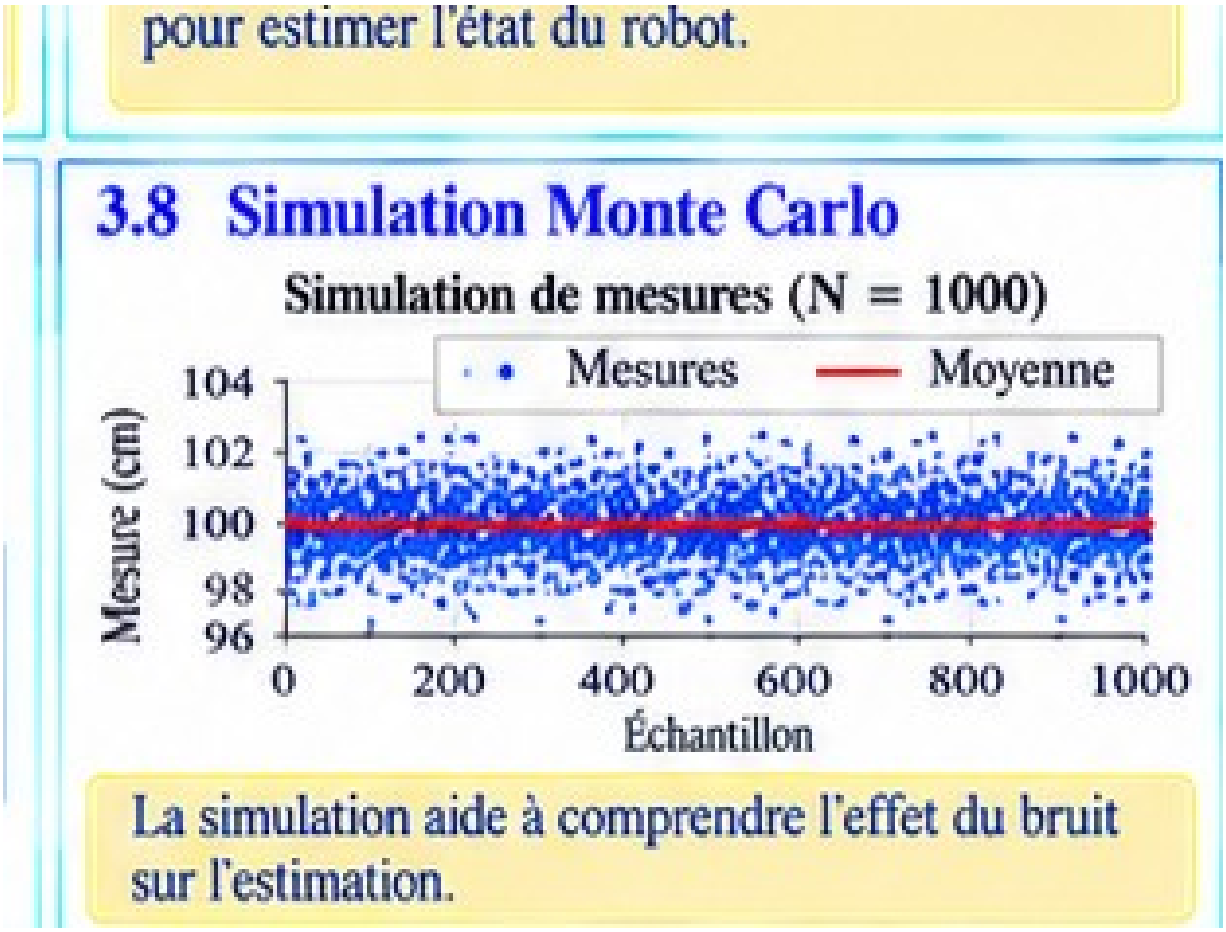
La quantification et les erreurs mécaniques influencent la mesure de position.

EXEMPLE RÉALISTE — IMU



Une mesure inertielle combine grandeur réelle, biais et bruit.

SIMULATION — MONTE CARLO



Répéter aléatoirement une expérience permet de visualiser l'effet du bruit sur l'estimation.

TRAVAIL VISUEL — LEÇON 3

Lire l'histogramme : où se situe le centre et quelle est la dispersion ?

Calculer moyenne et écart-type sur cinq mesures simples.

Expliquer le modèle z=h(x)+v avec un capteur réel.

Décrire ce que montre une simulation Monte Carlo et ce qu'elle ne prouve pas.

Leçon 3 — Probabilités et incertitude

Objectifs

- Comprendre la grandeur réellement observée.
- Relier mesure, repère, timestamp et incertitude.

- Détecter une donnée incohérente et définir une réaction.

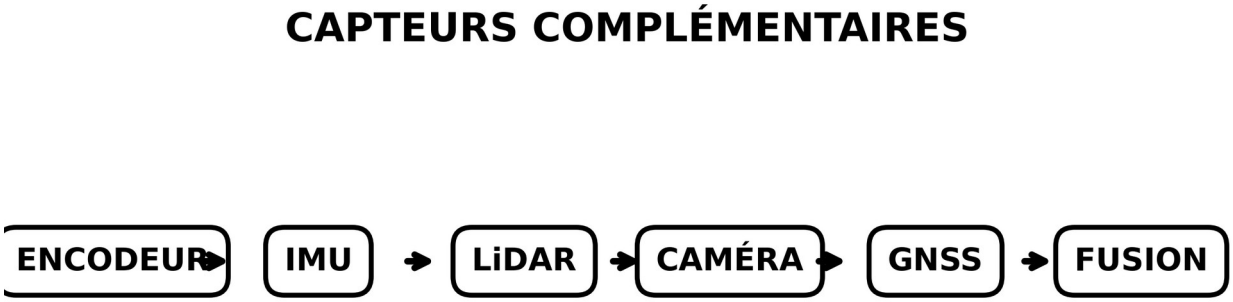


Planche ROB-103.3 — grande lisibilité.

Théorie fondamentale

L’estimation doit représenter ce que le robot sait et ce qu’il ignore. Moyenne, variance et covariance quantifient cette incertitude.

Exemple résolu

$\sigma = 0{,}10$ m → variance $\sigma^2 = 0{,}01$ m².

Laboratoire à distance

Simuler des mesures, ajouter bruit/biais/latence, appliquer la méthode de la leçon, tracer résultat et incertitude, puis injecter une faute et documenter la réaction.

Diagnostic

- Unité correcte ?
- Repère correct ?
- Timestamp récent ?

- Valeur physiquement plausible ?
- Incertitude cohérente ?

Autoévaluation corrigée

Q. Pourquoi une mesure seule ne suffit-elle pas ?

Corrigé : Il faut unité, repère, timestamp, qualité et incertitude.

Q. Que signifie STALE ?

Corrigé : La donnée est trop ancienne pour l’usage prévu.

Q. Pourquoi conserver la covariance ?

Corrigé : Pour représenter explicitement l’incertitude.

Storyboard du film pédagogique

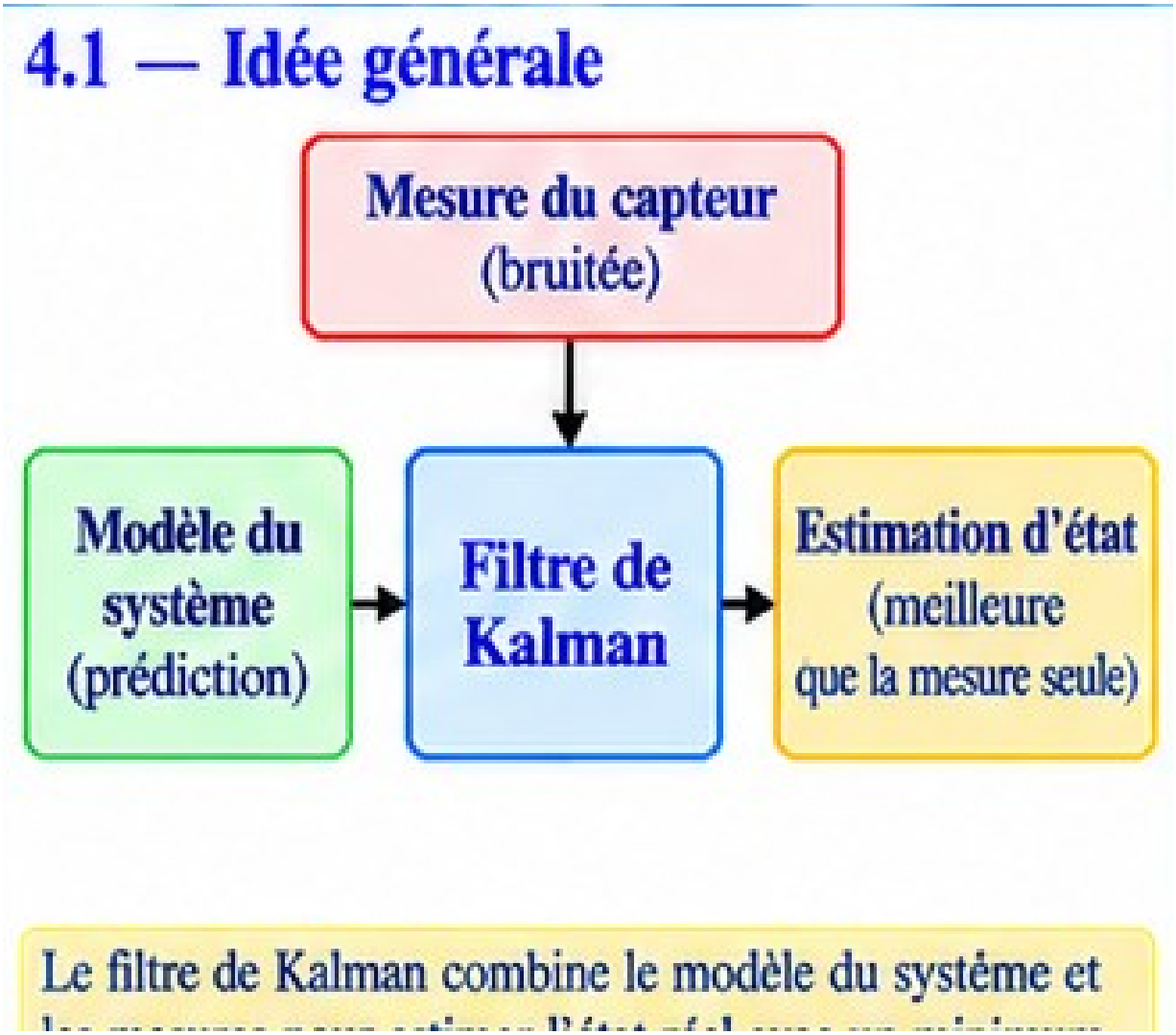
Montrer le capteur → afficher la mesure brute → introduire bruit/biais → calibrer/estimer → visualiser l’incertitude → injecter une panne → laisser l’étudiant diagnostiquer avant la correction.

COLLÈGE DU SACRÉ-CŒUR DE GATINEAU • ROB-103

ATLAS VISUEL — FILTRE DE KALMAN

Angelo Nibizi • Nibizi Technologies • Édition 2026

SCHÉMA — IDÉE GÉNÉRALE



Le filtre combine une prédiction issue du modèle et une mesure bruitée.

ÉQUATIONS — PRÉDICTION ET CORRECTION

4.2 — Les deux étapes principales

1. Prédiction (modèle)

$$\hat{x}_{k|k-1} = A\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_k$$

$$P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q$$

2. Mise à jour (mesure)

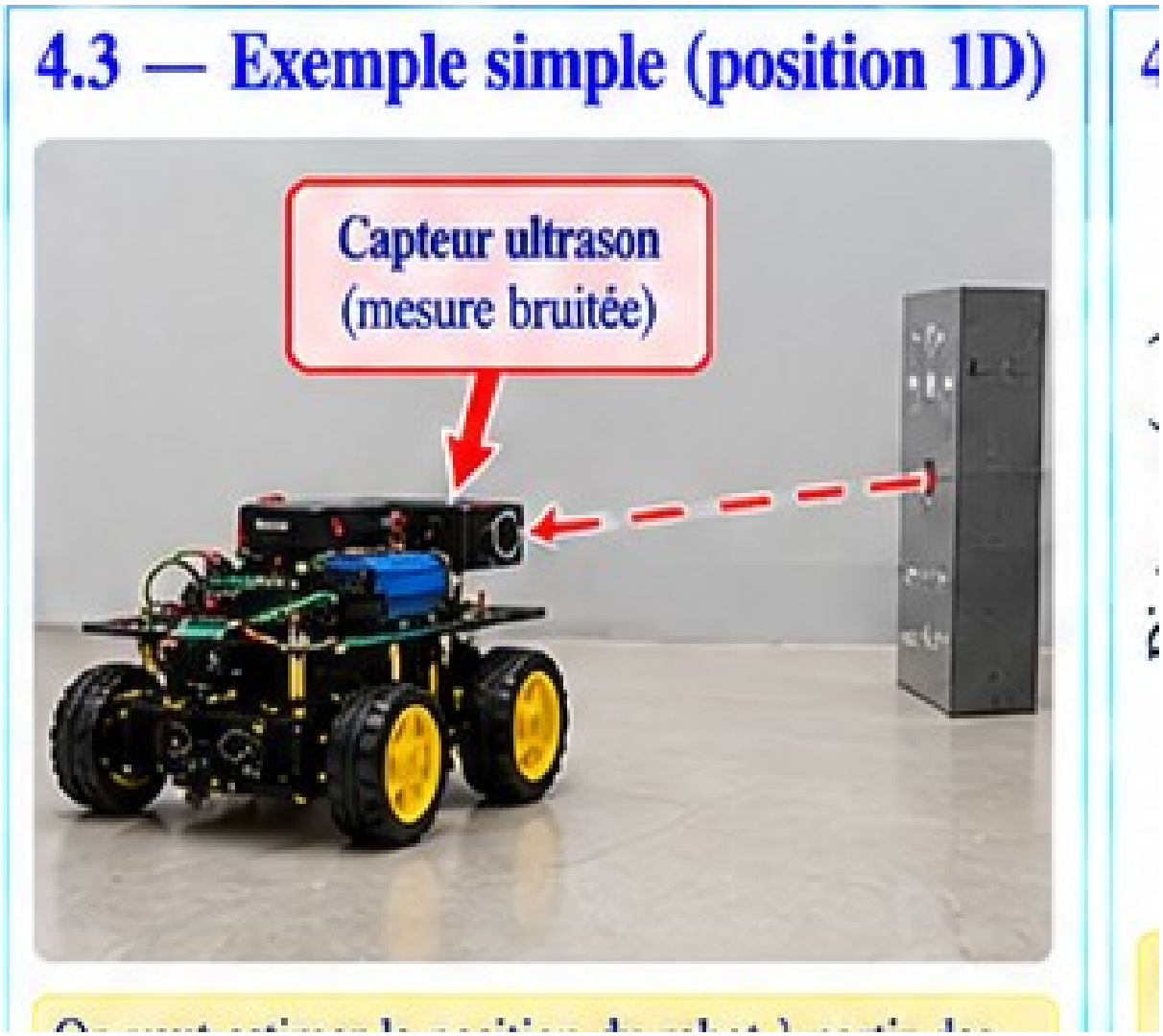
$$K_k = P_{k|k-1}H^T(HP_{k|k-1}H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k|k-1})$$

$$P_{k|k} = (I - K_kH)P_{k|k-1}$$

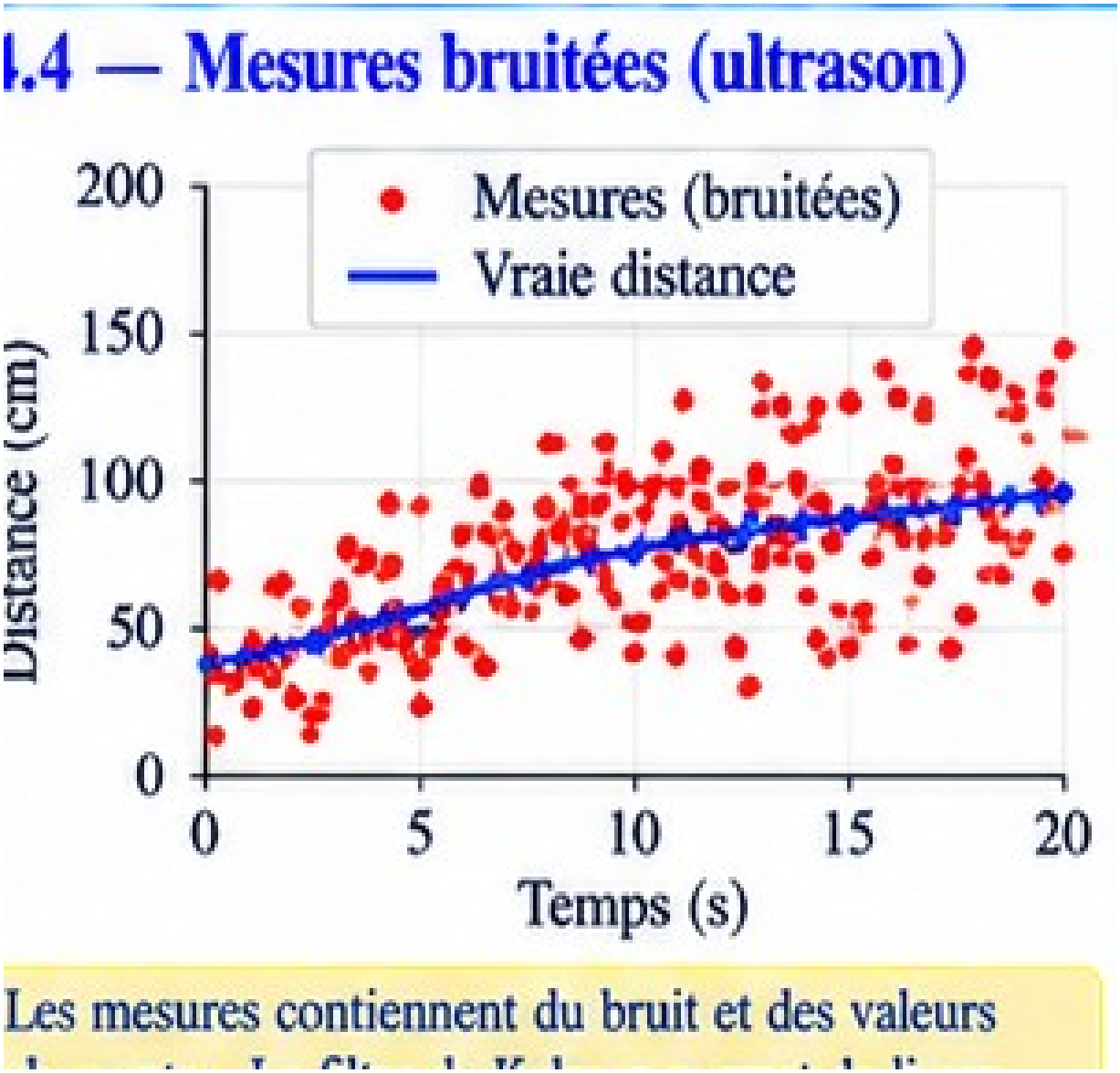
Lire les équations après avoir compris le cycle prédire → mesurer → corriger.

IMAGE RÉALISTE — MESURE DE POSITION



Le robot observe une grandeur physique avec un capteur imparfait.

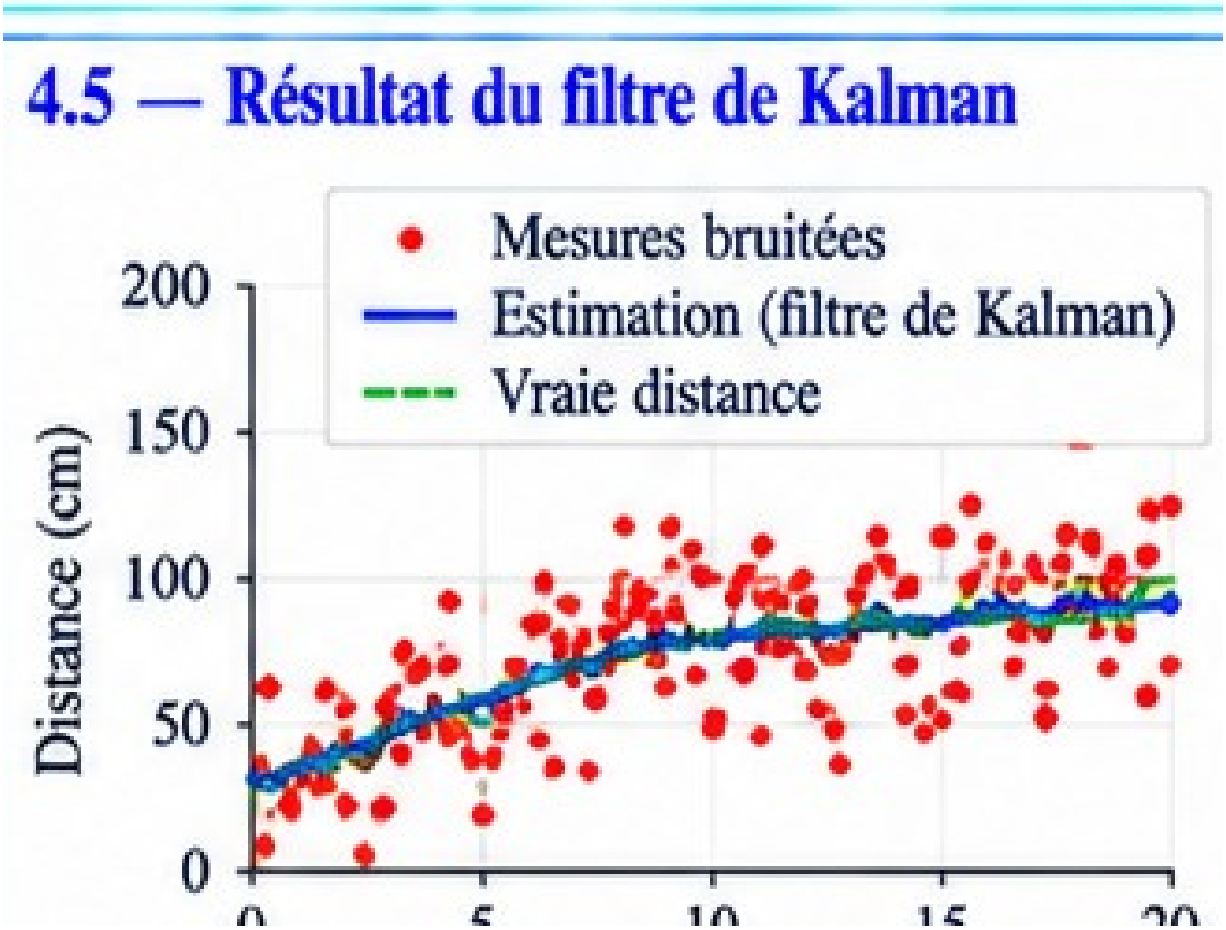
GRAPHIQUE — MESURES BRUITÉES



Les points rouges représentent des observations; ils ne doivent pas être confondus avec l'état réel.

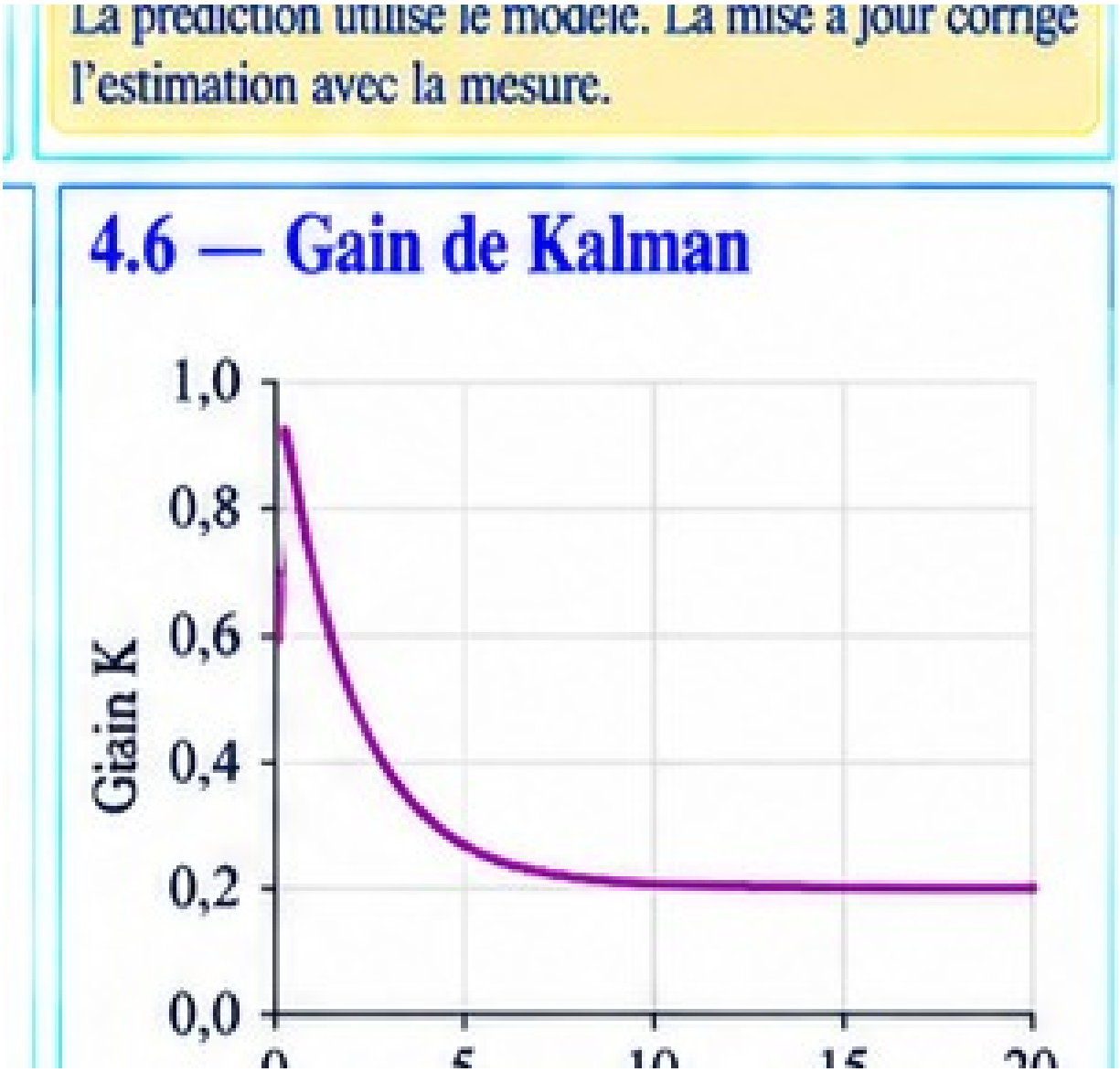
GRAPHIQUE — ESTIMATION FILTRÉE

les mesures pour estimer l'état réel avec un minimum d'erreur.



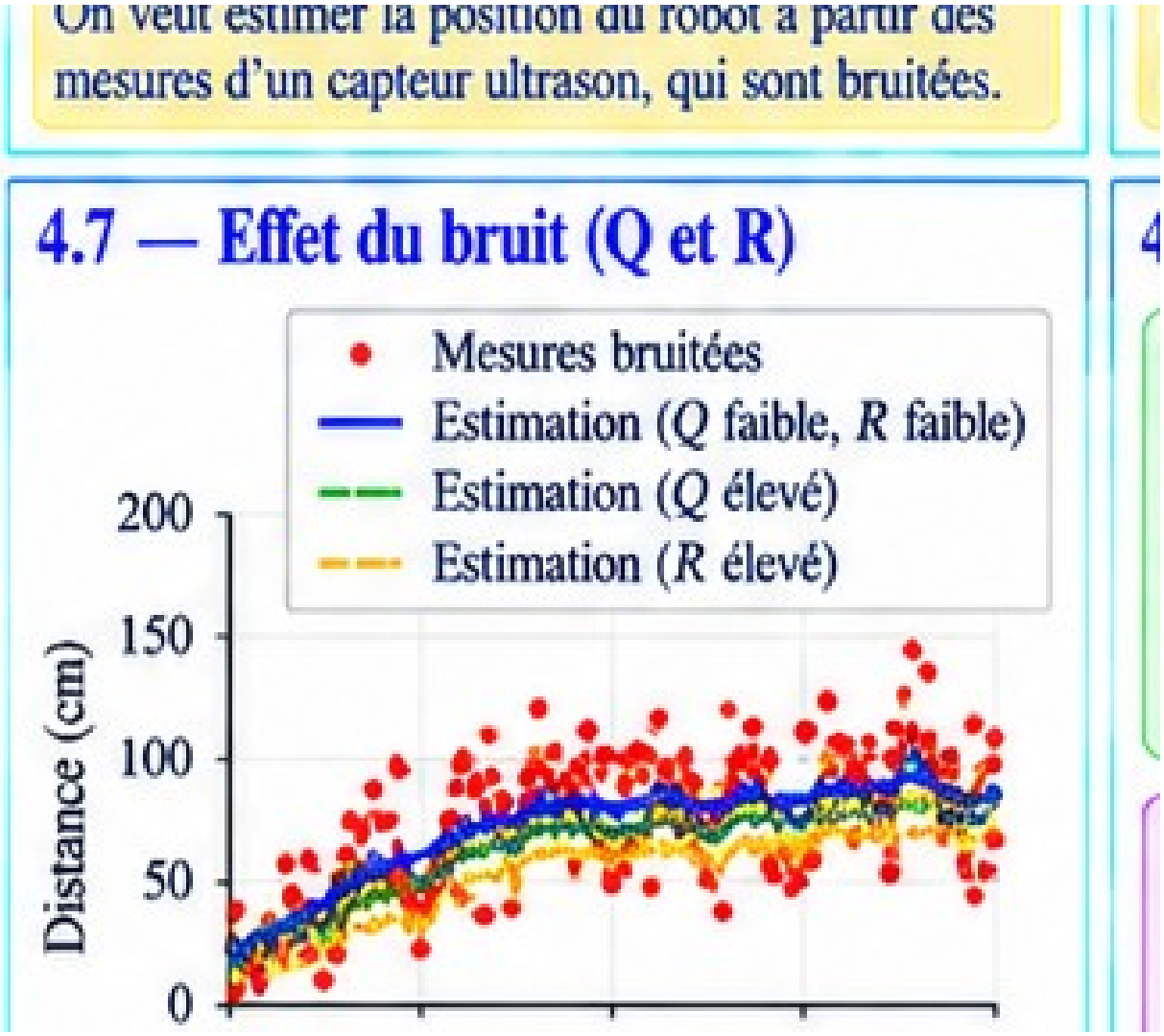
Comparer mesure brute, état réel de référence et estimation.

GRAPHIQUE — GAIN DE KALMAN



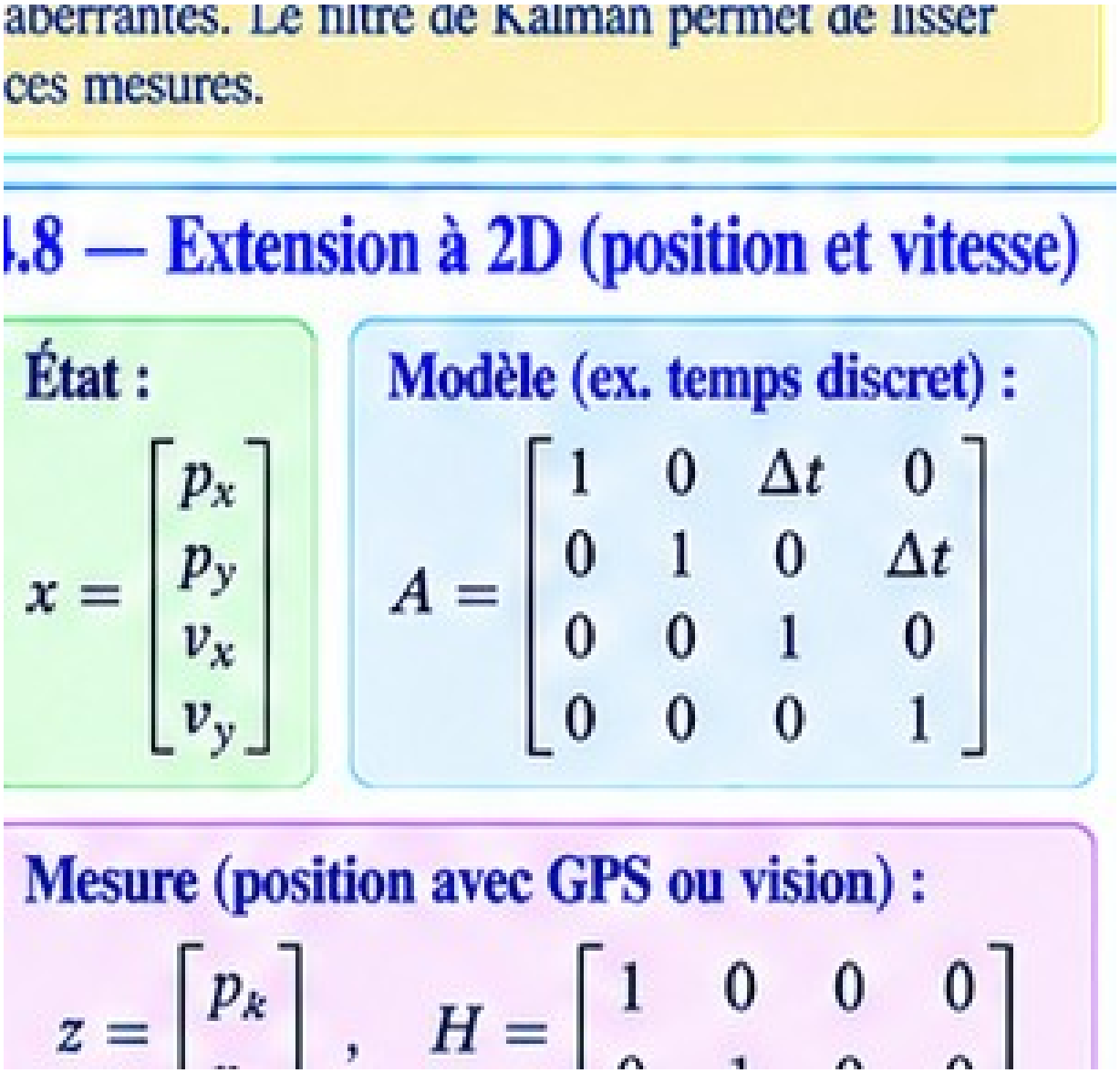
Le gain règle le poids accordé à l'innovation de mesure.

GRAPHIQUE — EFFET DE Q ET R



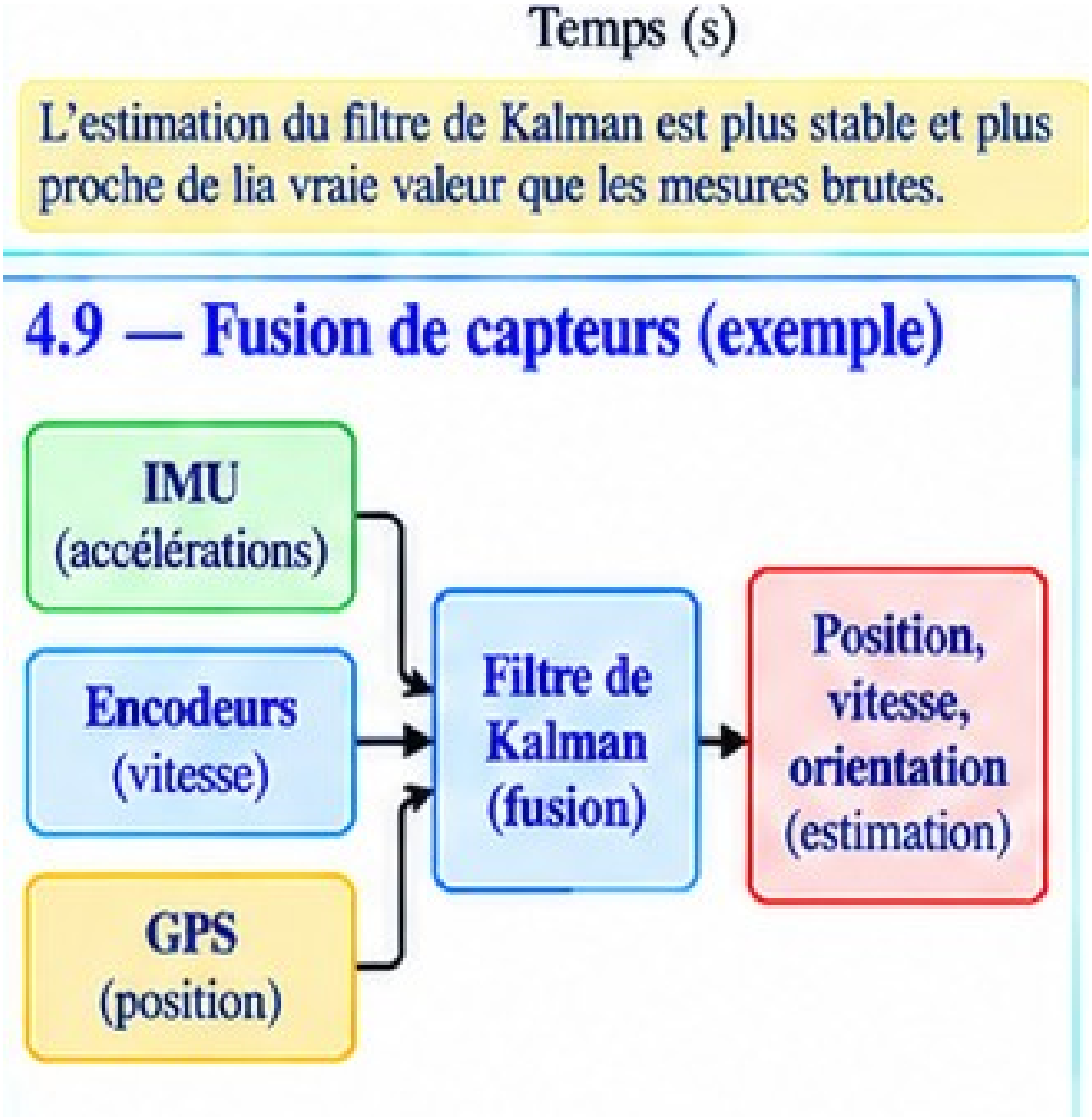
Q représente l'incertitude du modèle; R celle de la mesure.

SCHÉMA — ÉTAT POSITION/VITESSE



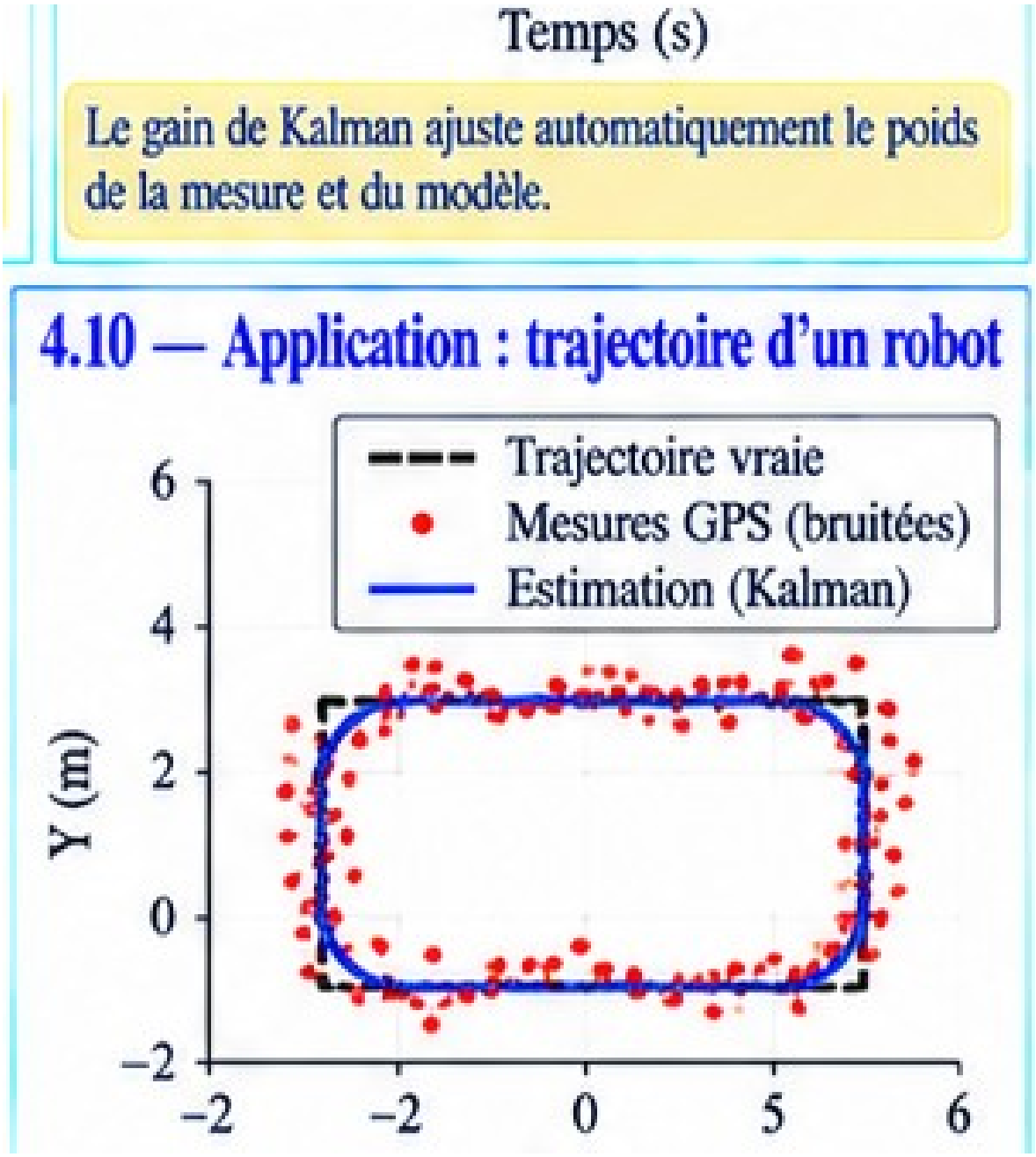
Un état peut contenir plusieurs variables corrélées, pas seulement une distance.

SCHÉMA — FUSION DE CAPTEURS



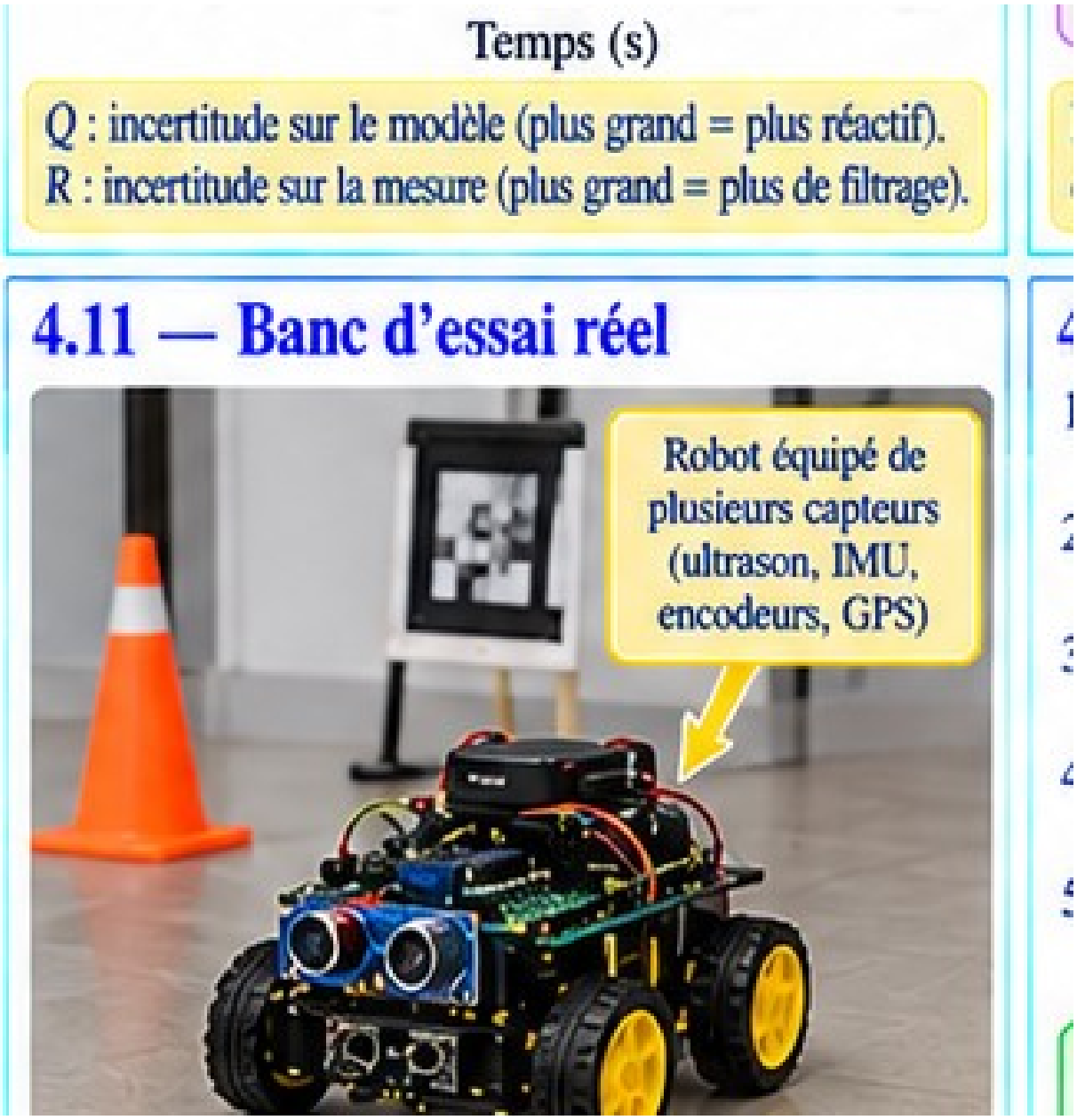
IMU, encodeurs et position absolue peuvent contribuer à une estimation commune.

GRAPHIQUE — TRAJECTOIRE DU ROBOT



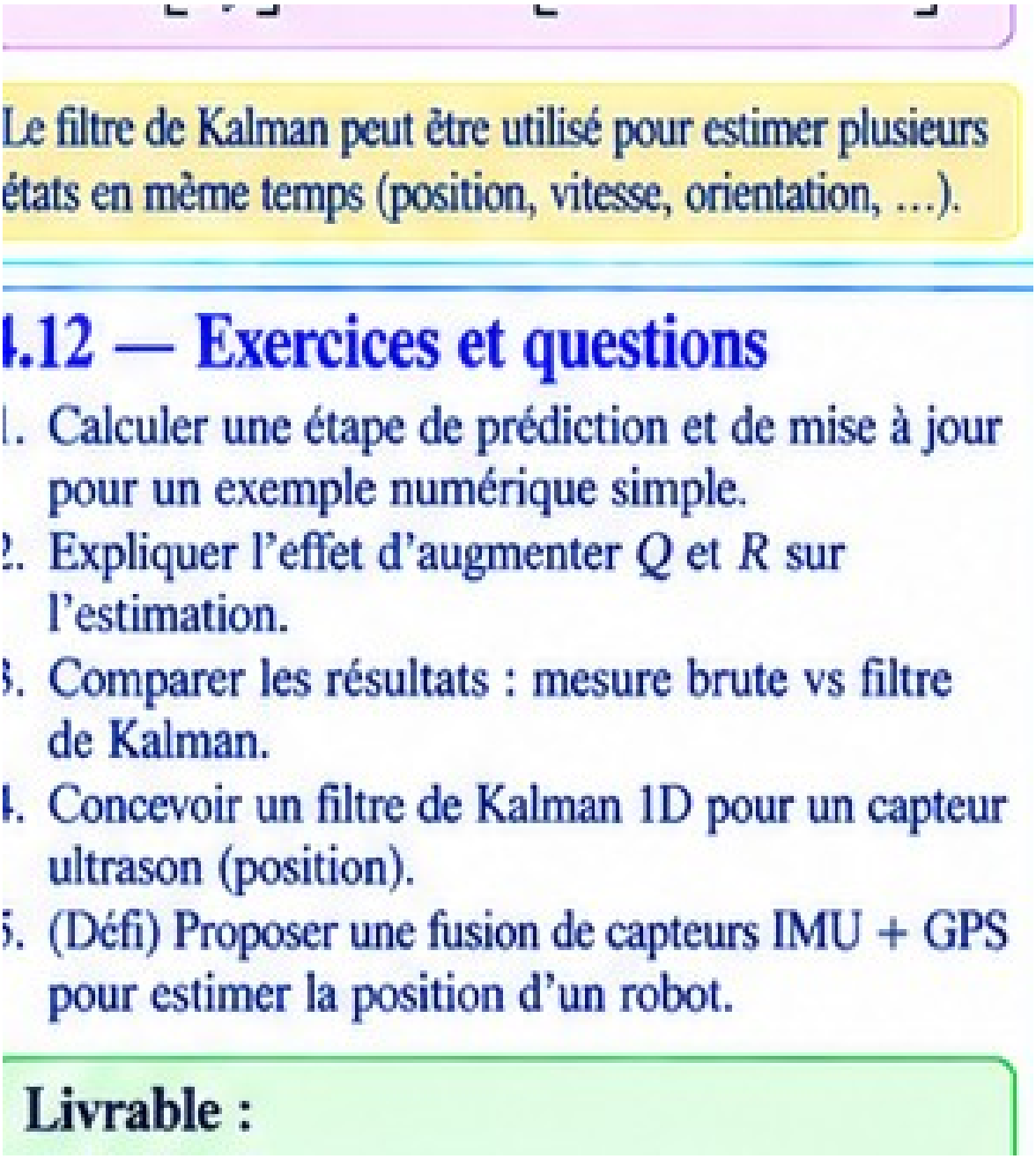
L'estimation doit être évaluée sur une trajectoire, pas seulement sur un point.

IMAGE RÉALISTE — BANC D’ESSAI



Tester le filtre sur un robot et des références connues avant de lui faire confiance.

EXERCICES VISUELS



Le filtre de Kalman peut être utilisé pour estimer plusieurs états en même temps (position, vitesse, orientation, …).

4.12 — Exercices et questions

1. Calculer une étape de prédiction et de mise à jour pour un exemple numérique simple.
2. Expliquer l'effet d'augmenter Q et R sur l'estimation.
3. Comparer les résultats : mesure brute vs filtre de Kalman.
4. Concevoir un filtre de Kalman 1D pour un capteur ultrason (position).
5. (Défi) Proposer une fusion de capteurs IMU + GPS pour estimer la position d'un robot.

Livrable :

Les exercices relient calcul, interprétation des graphes et conception d'un estimateur.

EXEMPLE NUMÉRIQUE PAS À PAS

État prédit : $x^- = 10{,}0$ m. Variance prédite : $P^- = 4{,}0$ m².

Mesure : $z = 12{,}0$ m. Variance de mesure : $R = 1{,}0$ m².

Innovation : $y = z - x^{-} = 2{,}0$ m.

Gain : $K = P^{-}/(P^{-}+R) = 4/(4+1) = 0{,}8$.

État corrigé : $x = x^{-} + Ky = 10 + 0{,}8\times 2 = 11{,}6$ m.

Variance corrigée : $P = (1-K)P^{-} = 0{,}2\times 4 = 0{,}8$ m².

Interprétation : la mesure est considérée plus précise que la prédiction; l’estimation se déplace donc fortement vers z et l’incertitude diminue.

LABORATOIRE À DISTANCE — KALMAN 1D

1. Générer une trajectoire 1D de référence.

2. Ajouter un bruit de mesure gaussien.

3. Implémenter prédiction et correction.

4. Tracer référence, mesures et estimation sur le même graphique.

5. Augmenter R puis expliquer pourquoi le filtre fait moins confiance au capteur.

6. Augmenter Q puis expliquer pourquoi le filtre devient plus réactif au modèle incertain.

7. Supprimer plusieurs mesures et observer la croissance de l’incertitude.

Leçon 4 — Filtrage et filtre de Kalman

Objectifs

- Comprendre la grandeur réellement observée.
- Relier mesure, repère, timestamp et incertitude.

- Détecter une donnée incohérente et définir une réaction.

FILTRE DE KALMAN



Planche ROB-103.4 — grande lisibilité.

Théorie fondamentale

Le filtre de Kalman combine une prédiction issue du modèle et une mesure, pondérées par leurs incertitudes.

Exemple résolu

Prédiction 10, variance 4; mesure 12, variance 1 : K=4/(4+1)=0,8; correction=11,6.

Laboratoire à distance

Simuler des mesures, ajouter bruit/biais/latence, appliquer la méthode de la leçon, tracer résultat et incertitude, puis injecter une faute et documenter la réaction.

Diagnostic

- Unité correcte ?
- Repère correct ?

- Timestamp récent ?
- Valeur physiquement plausible ?
- Incertitude cohérente ?

Autoévaluation corrigée

Q. Pourquoi une mesure seule ne suffit-elle pas ?

Corrigé : Il faut unité, repère, timestamp, qualité et incertitude.

Q. Que signifie STALE ?

Corrigé : La donnée est trop ancienne pour l’usage prévu.

Q. Pourquoi conserver la covariance ?

Corrigé : Pour représenter explicitement l’incertitude.

Storyboard du film pédagogique

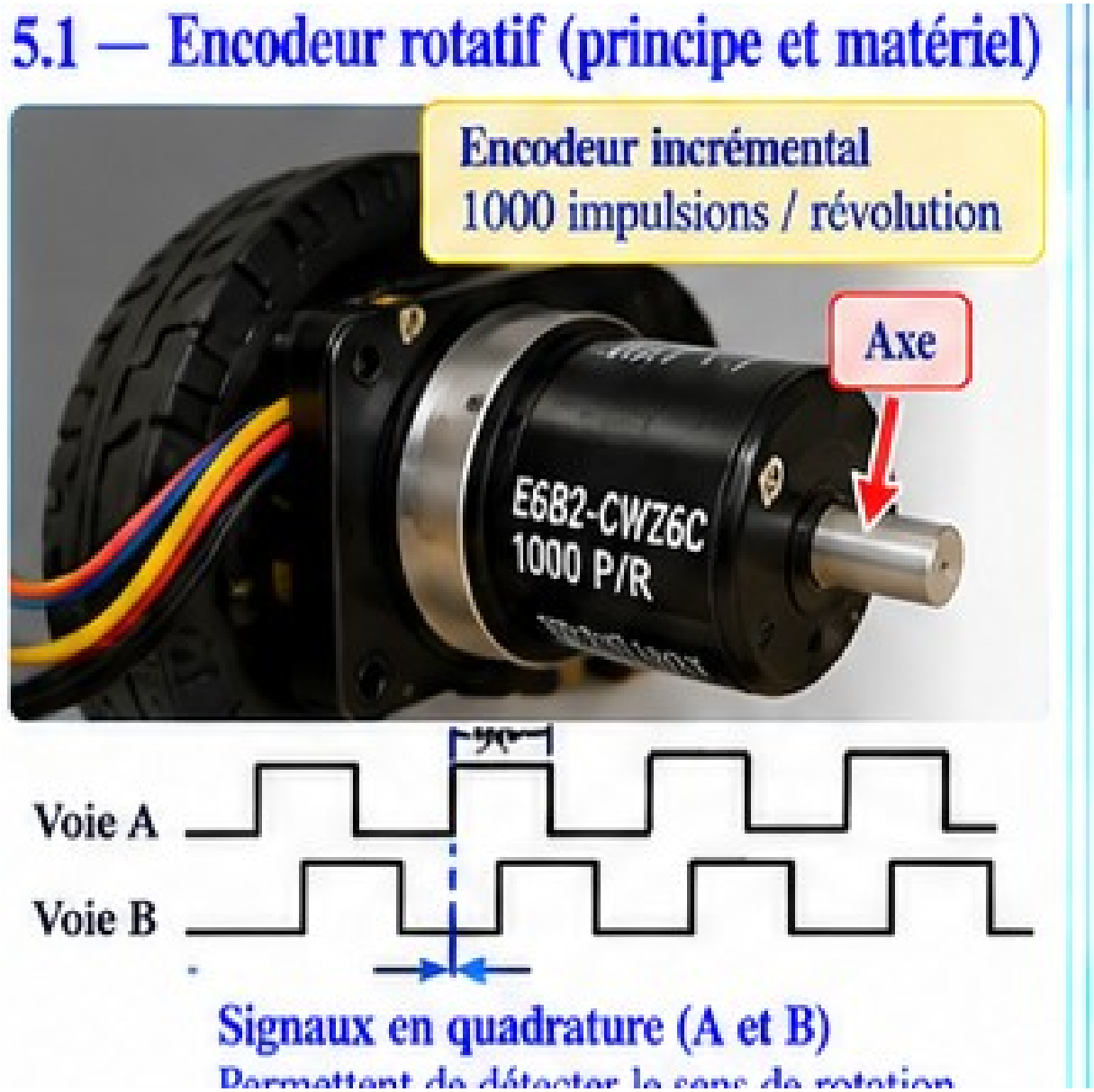
Montrer le capteur → afficher la mesure brute → introduire bruit/biais → calibrer/estimer → visualiser l’incertitude → injecter une panne → laisser l’étudiant diagnostiquer avant la correction.

COLLÈGE DU SACRÉ-CŒUR DE GATINEAU • ROB-103

ATLAS VISUEL — ENCODEURS, IMU ET ODOMÉTRIE

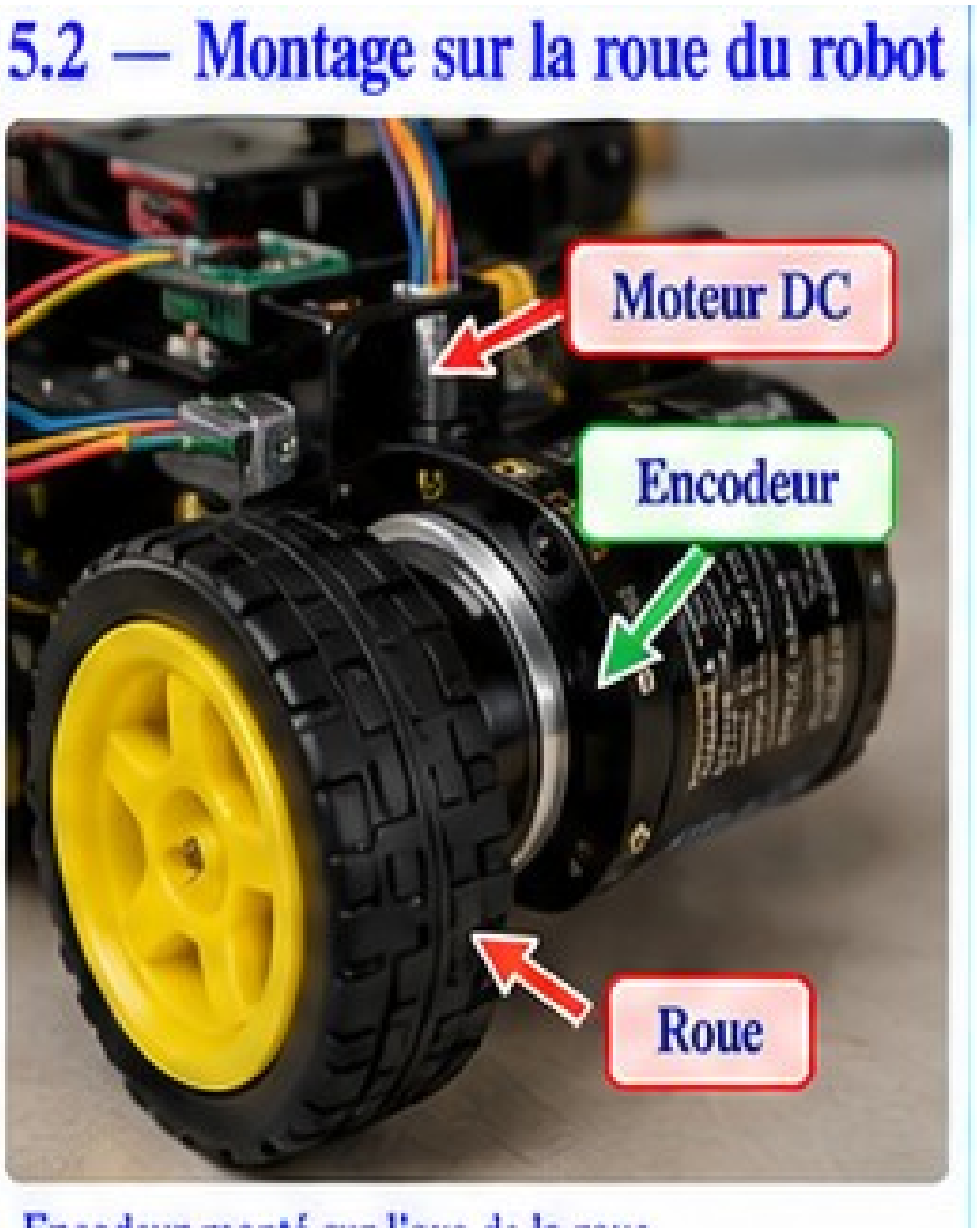
Angelo Nibizi • Nibizi Technologies • Édition 2026

IMAGE RÉALISTE — ENCODEUR ROTATIF



Observer l'encodeur et les voies A/B en quadrature utilisées pour compter les impulsions et déterminer le sens.

IMAGE RÉALISTE — ENCODEUR SUR LA ROUE



Relier mécaniquement rotation moteur/roue et mesure d'impulsions.

CALCUL VISUEL — DISTANCE PAR TICKS

5.3 — Calcul de distance à partir des ticks

$$d = \frac{N \times 2\pi r}{P}$$

d : distance parcourue (m)
N : nombre d'impulsions (ticks)
r : rayon de la roue (m)
P : nombre d'impulsions par révolution

Exemple :

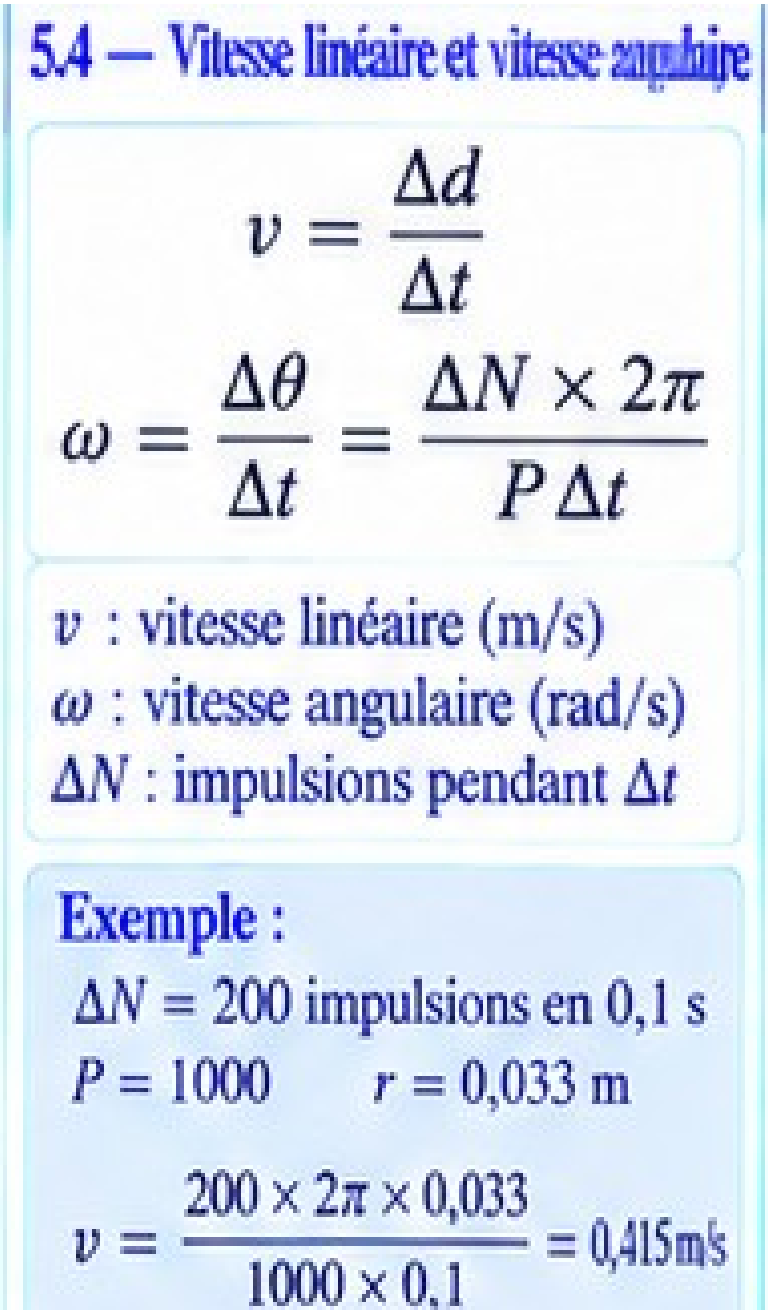
$r = 0{,}033$ m (roue 6,6 cm de diamètre)
$P = 1000$ impulsions/rev
$N = 500$ impulsions

$$d = \frac{500 \times 2\pi \times 0{,}033}{1000} = 0{,}104 \text{ m}$$

(10.4 cm)

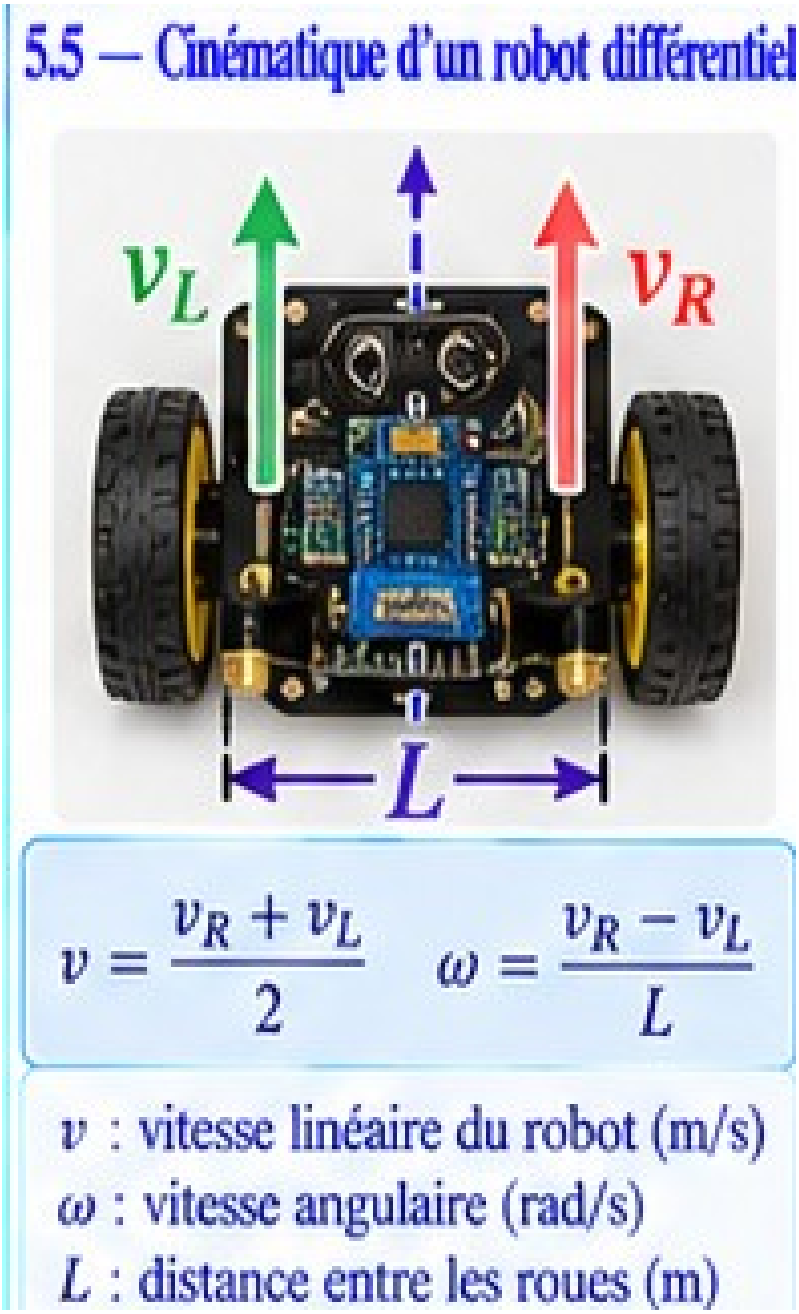
Chaque tick représente une fraction de la circonférence de roue.

CALCUL VISUEL — VITESSES



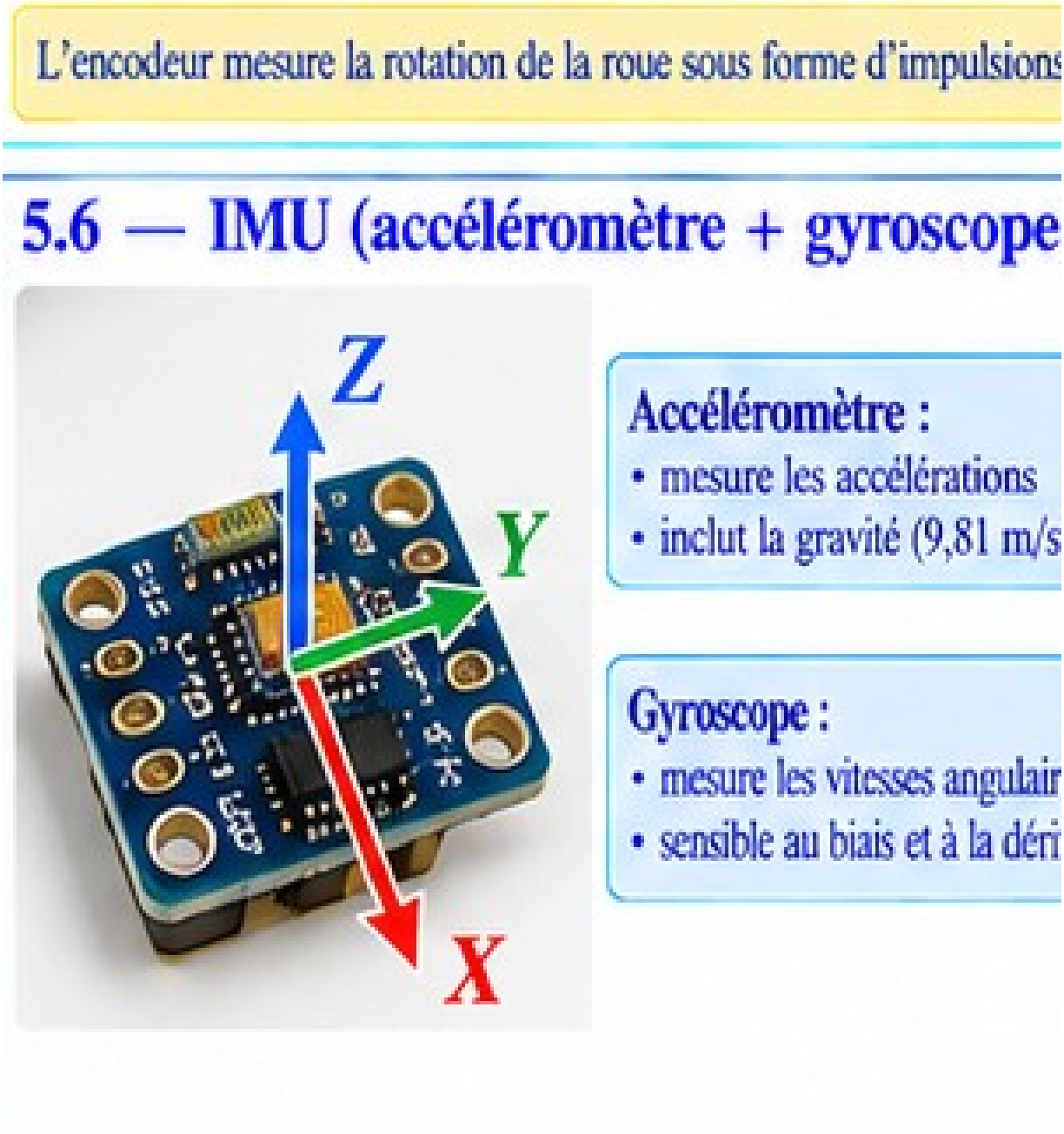
La variation des ticks pendant Δt permet d'estimer vitesse linéaire et rotation.

SCHÉMA — ROBOT DIFFÉRENTIEL



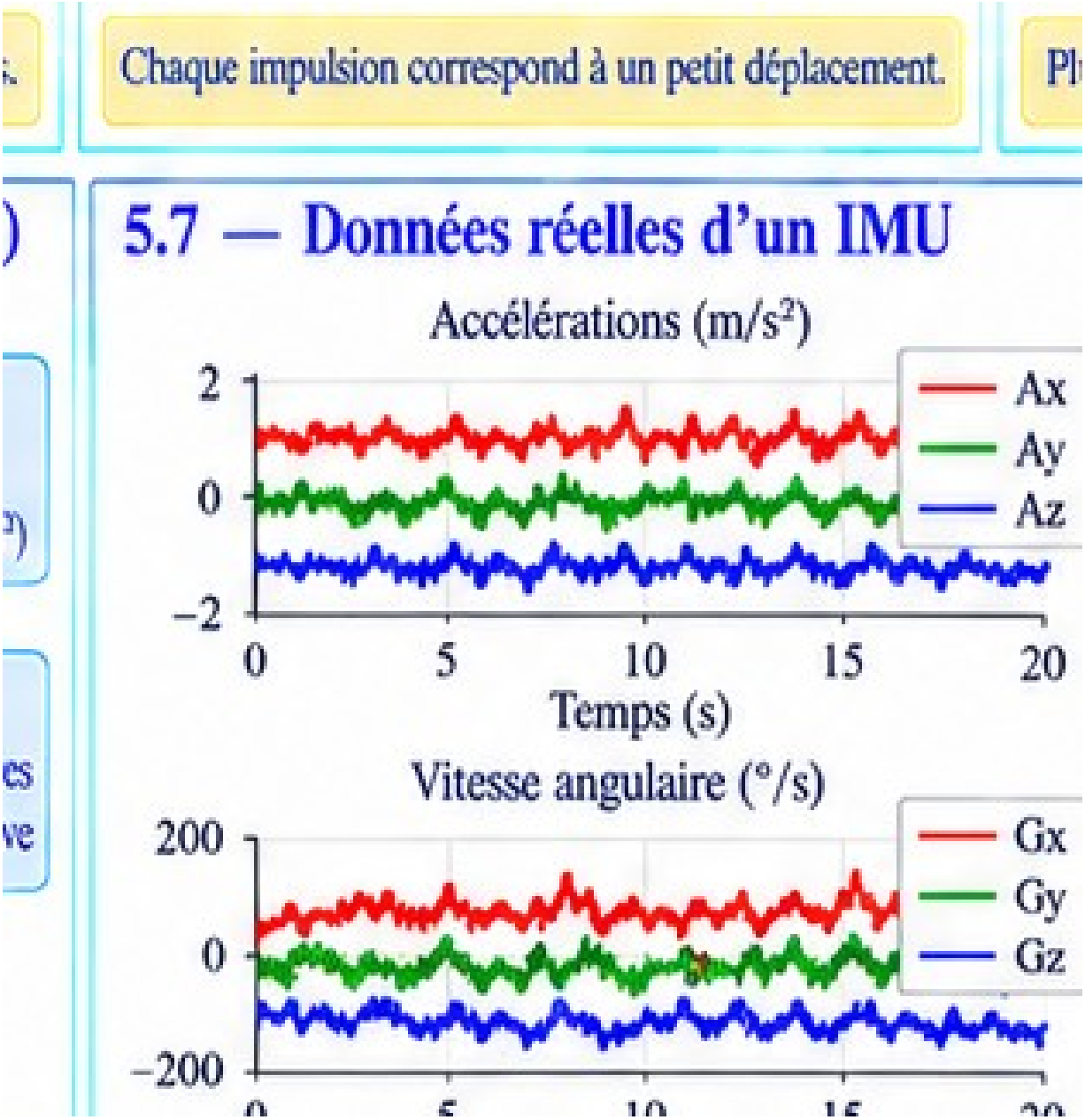
Des vitesses gauche et droite différentes produisent une rotation du robot.

IMAGE RÉALISTE — IMU ET AXES



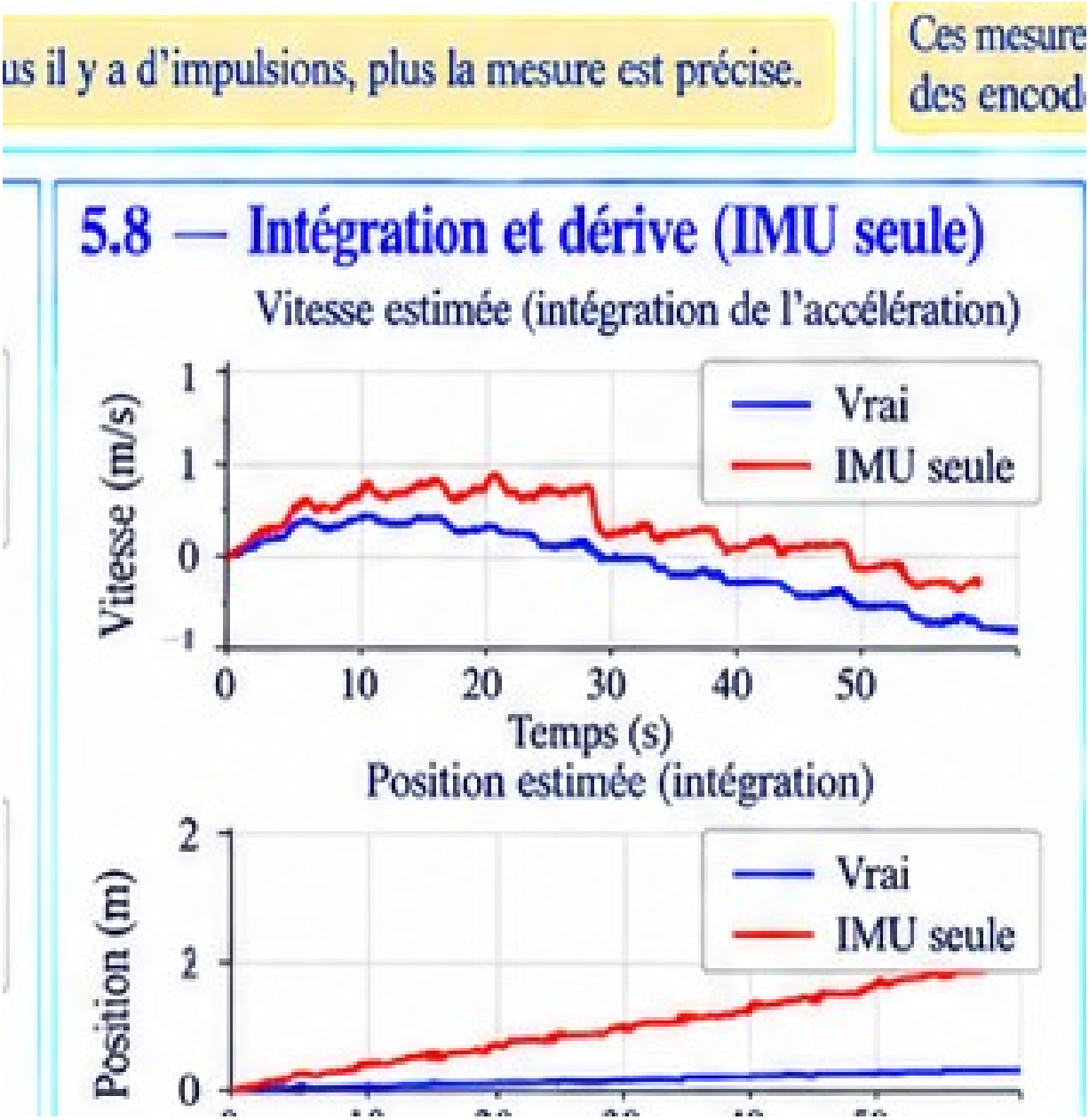
L'IMU mesure accélérations et vitesses angulaires dans son propre repère.

DONNÉES RÉELLES — IMU



Les signaux inertiels contiennent bruit, biais et effets du mouvement.

GRAPHIQUE — INTÉGRATION ET DÉRIVE

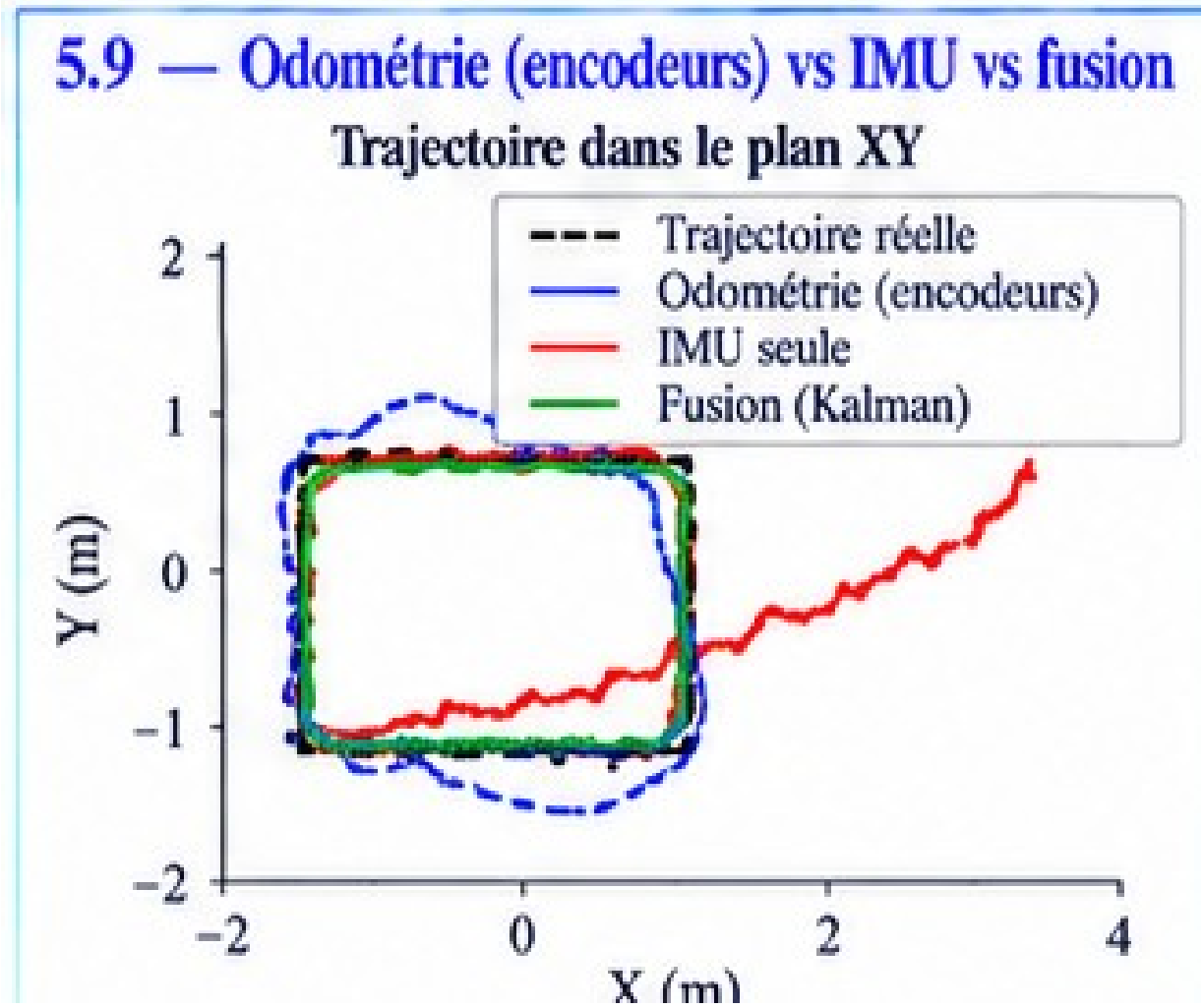


Intégrer un petit biais pendant longtemps produit une erreur croissante.

GRAPHIQUE — ODOMÉTRIE, IMU ET FUSION

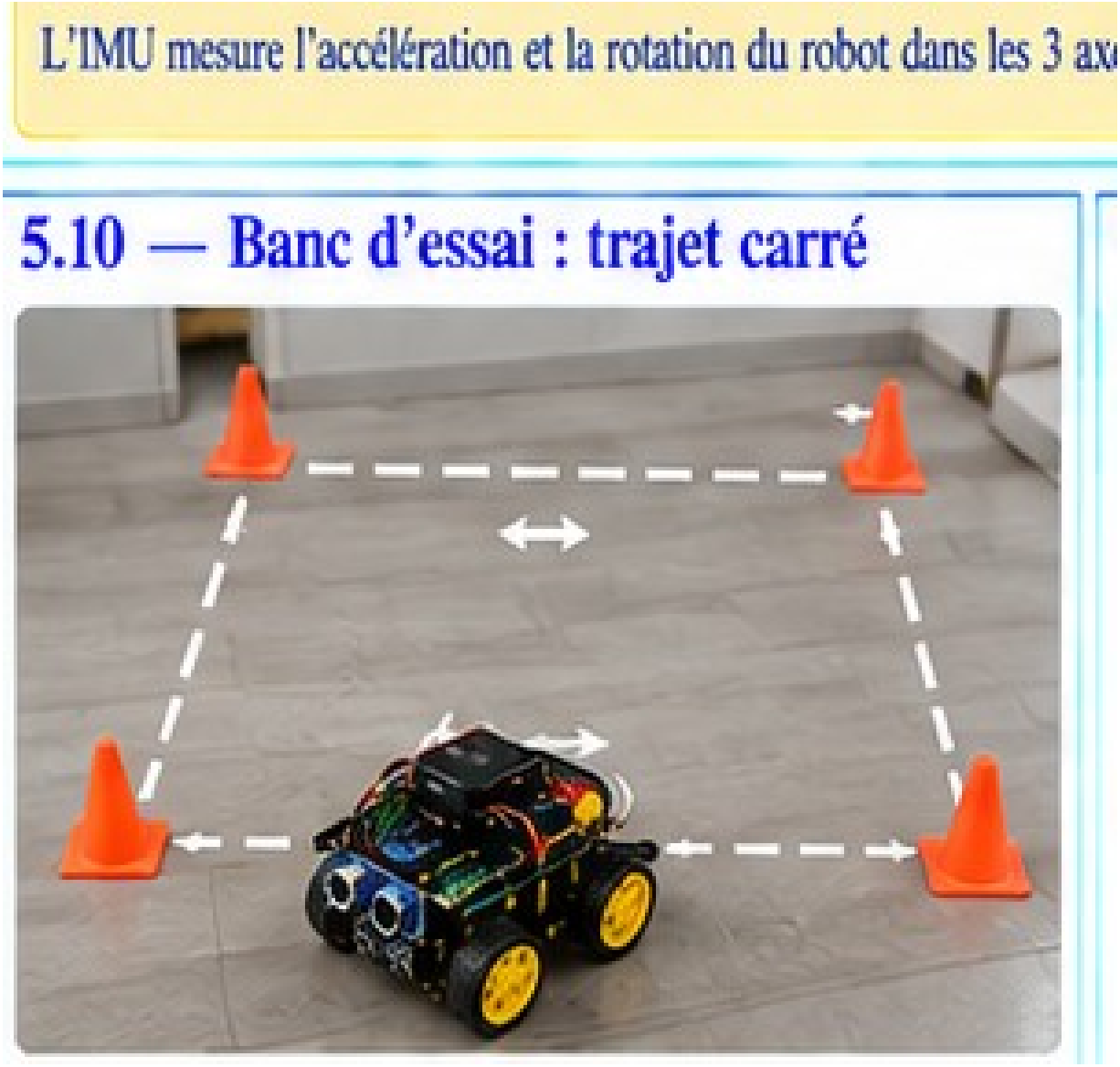
s proviennent uniquement
eurs.

Des vitesses différentes sur les roues permettent de tourner.



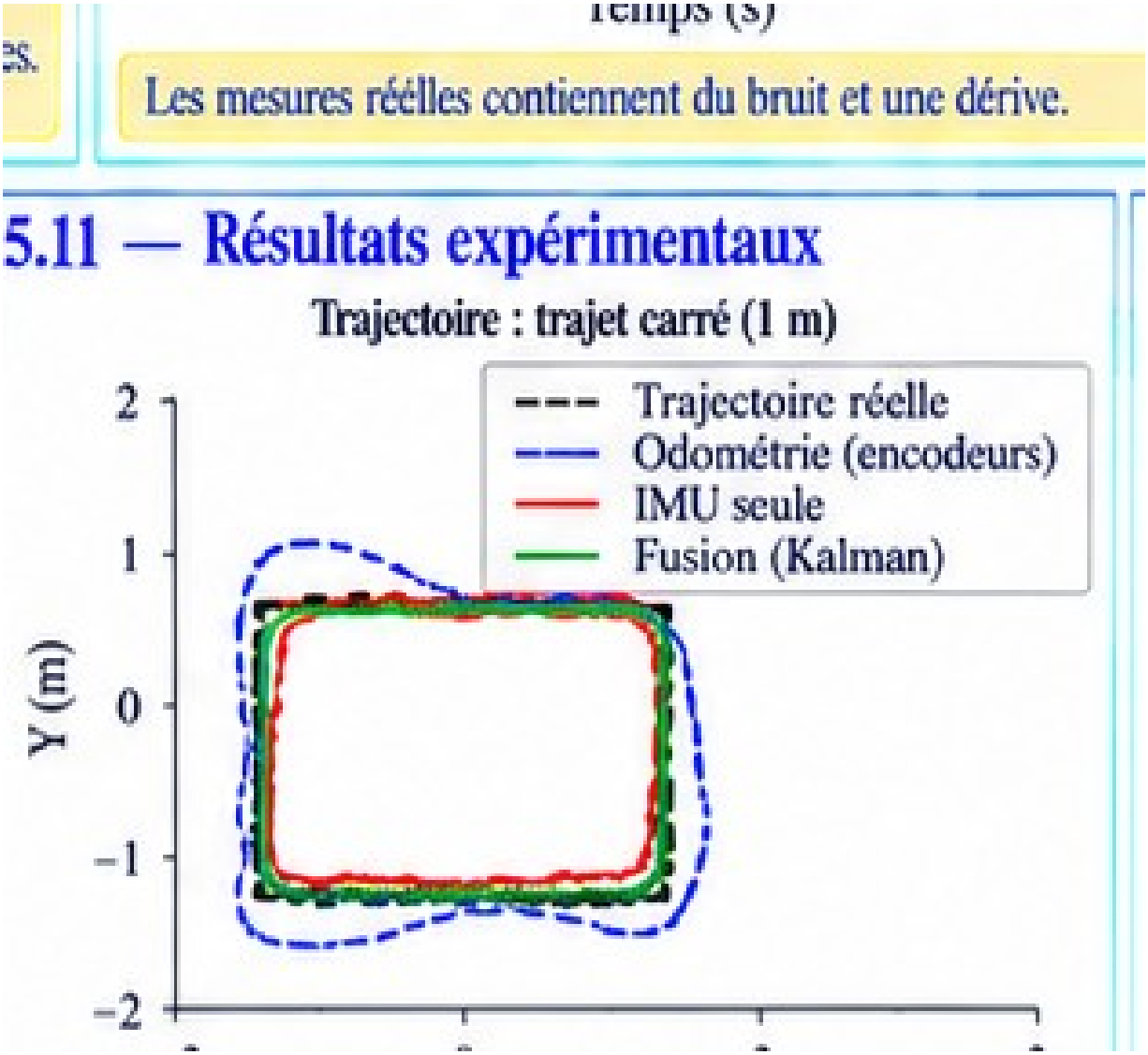
Comparer les trajectoires permet de voir pourquoi les capteurs complémentaires sont fusionnés.

IMAGE RÉALISTE — BANC D’ESSAI TRAJET CARRÉ



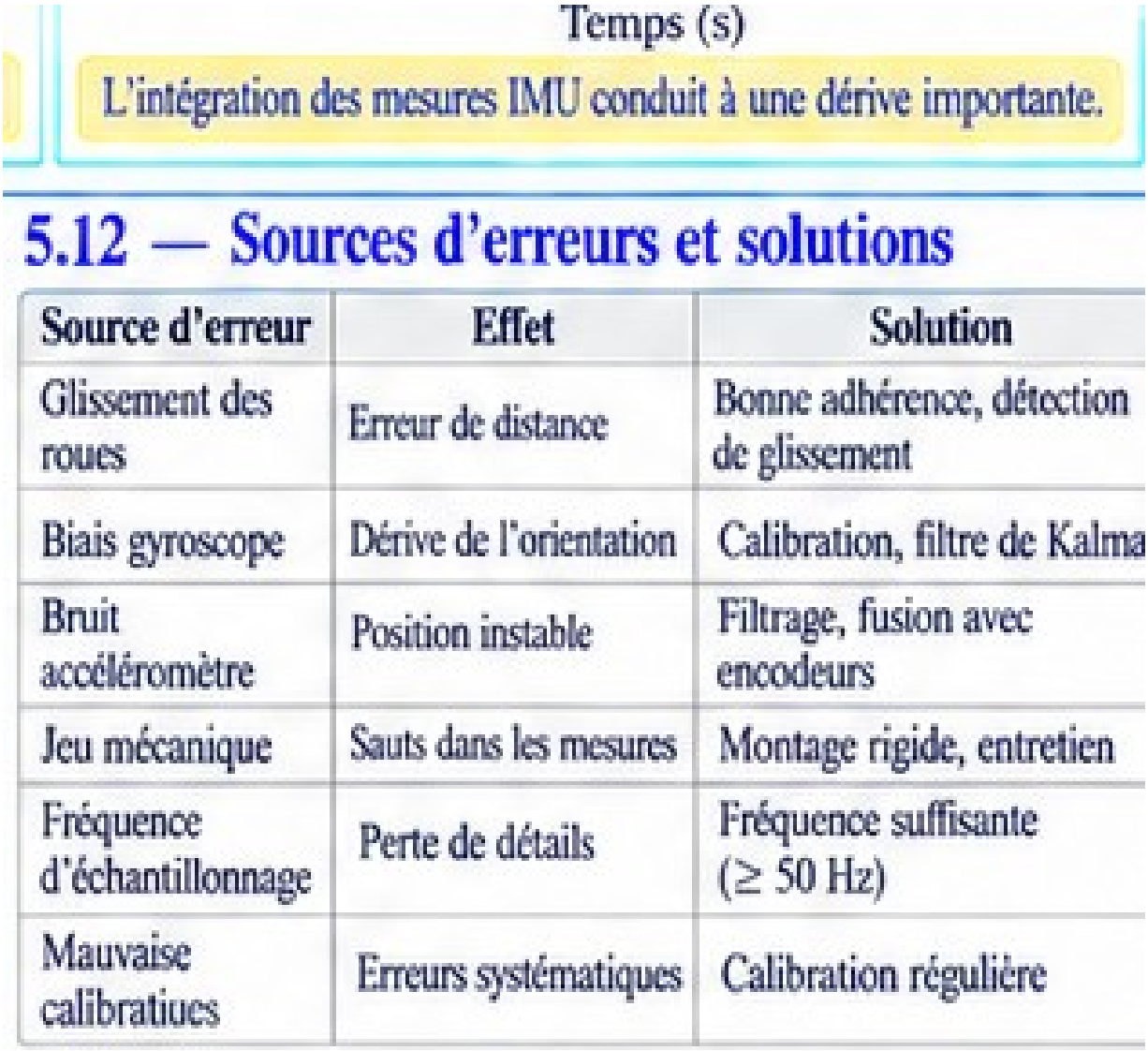
Une trajectoire géométrique connue fournit une référence simple pour valider l’odométrie.

GRAPHIQUE — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX



Comparer trajectoire réelle, odométrie, IMU seule et fusion.

TABLEAU VISUEL — SOURCES D'ERREURS


Temps (s)

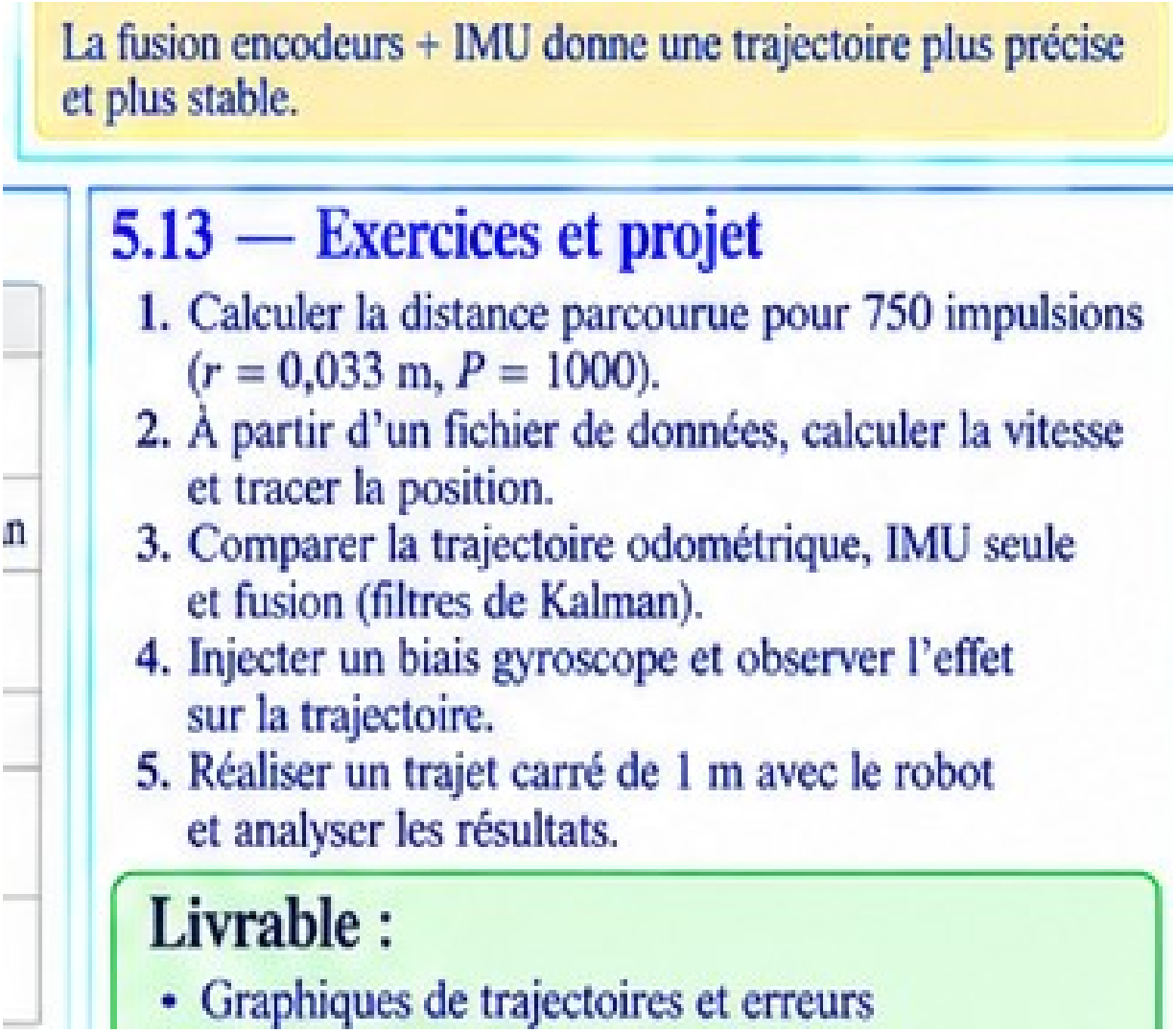
L'intégration des mesures IMU conduit à une dérive importante.

5.12 — Sources d'erreurs et solutions

Source d'erreur	Effet	Solution
Glissement des roues	Erreur de distance	Bonne adhérence, détection de glissement
Biais gyroscope	Dérive de l'orientation	Calibration, filtre de Kalma
Bruit accéléromètre	Position instable	Filtrage, fusion avec encodeurs
Jeu mécanique	Sauts dans les mesures	Montage rigide, entretien
Fréquence d'échantillonnage	Perte de détails	Fréquence suffisante (≥ 50 Hz)
Mauvaise calibratiues	Erreurs systématiques	Calibration régulière

Glissement, biais, bruit, jeu mécanique et mauvaise calibration ont des signatures différentes.

EXERCICES ET PROJET


La fusion encodeurs + IMU donne une trajectoire plus précise et plus stable.

5.13 — Exercices et projet

1. Calculer la distance parcourue pour 750 impulsions ($r = 0{,}033$ m, $P = 1000$).
2. À partir d'un fichier de données, calculer la vitesse et tracer la position.
3. Comparer la trajectoire odométrique, IMU seule et fusion (filtres de Kalman).
4. Injecter un biais gyroscope et observer l'effet sur la trajectoire.
5. Réaliser un trajet carré de 1 m avec le robot et analyser les résultats.

Livrable :

- Graphiques de trajectoires et erreurs

Les exercices demandent calcul, traitement de données et validation sur trajectoire.

CALCULS FONDAMENTAUX — TEXTE GRANDE LISIBILITÉ

Distance par tick : d_tick = 2πr / P.

Pour r = 0,033 m et P = 1000 ticks/tour : d_tick ≈ 2π×0,033/1000 ≈ 0,000207 m = 0,207 mm.

Pour N = 500 ticks : d ≈ 500×0,207 mm ≈ 103,7 mm = 0,104 m.

Robot différentiel : $v = (v_R + v_L)/2$ et $\omega = (v_R - v_L)/L$, où L est l'écartement des roues.

Exemple : $v_R=0{,}50$ m/s, $v_L=0{,}30$ m/s, $L=0{,}40$ m → $v=0{,}40$ m/s et $\omega=0{,}50$ rad/s.

LABORATOIRE À DISTANCE — TRAJET CARRÉ

1. Simuler un robot différentiel avec encodeurs gauche/droit.

2. Commander un carré de 1 m de côté.

3. Ajouter 1 % d'erreur sur le rayon de la roue droite.

4. Tracer la trajectoire odométrique et mesurer l'erreur de fermeture.

5. Ajouter un biais gyroscope et observer la dérive IMU.

6. Fusionner odométrie et IMU; comparer les trajectoires.

7. Injecter du glissement sur une roue et documenter le comportement de l'estimation.

Leçon 5 — Encodeurs, IMU et odométrie

Objectifs

- Comprendre la grandeur réellement observée.
- Relier mesure, repère, timestamp et incertitude.

- Détecter une donnée incohérente et définir une réaction.

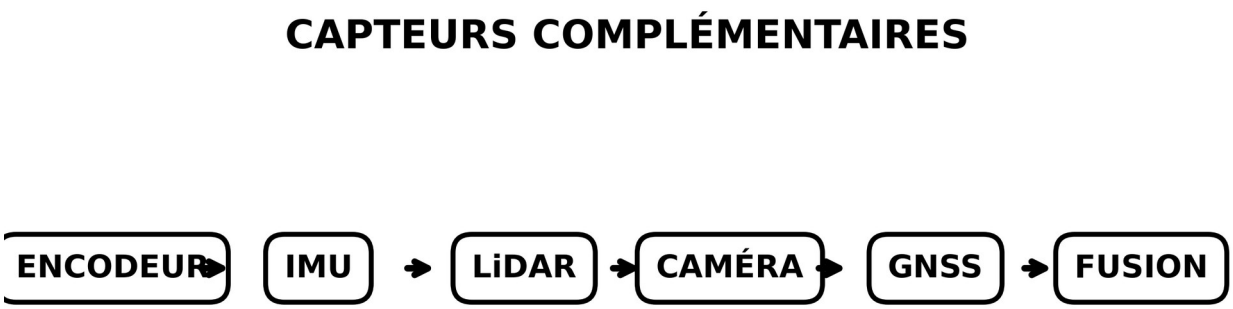


Planche ROB-103.5 — grande lisibilité.

Théorie fondamentale

Les encodeurs décrivent les rotations; l'IMU mesure accélérations et vitesses angulaires. Leur intégration est rapide mais dérive avec le temps.

Exemple résolu

Roue r=0,10 m : un tour=$2\pi r \approx 0{,}628$ m; 1000 ticks/tour → ≈0,628 mm/tick.

Laboratoire à distance

Simuler des mesures, ajouter bruit/biais/latence, appliquer la méthode de la leçon, tracer résultat et incertitude, puis injecter une faute et documenter la réaction.

Diagnostic

- Unité correcte ?
- Repère correct ?
- Timestamp récent ?

- Valeur physiquement plausible ?
- Incertitude cohérente ?

Autoévaluation corrigée

Q. Pourquoi une mesure seule ne suffit-elle pas ?

Corrigé : Il faut unité, repère, timestamp, qualité et incertitude.

Q. Que signifie STALE ?

Corrigé : La donnée est trop ancienne pour l’usage prévu.

Q. Pourquoi conserver la covariance ?

Corrigé : Pour représenter explicitement l’incertitude.

Storyboard du film pédagogique

Montrer le capteur → afficher la mesure brute → introduire bruit/biais → calibrer/estimer → visualiser l’incertitude → injecter une panne → laisser l’étudiant diagnostiquer avant la correction.

COLLÈGE DU SACRÉ-CŒUR DE GATINEAU • ROB-103

ATLAS VISUEL — LiDAR ET PERCEPTION GÉOMÉTRIQUE

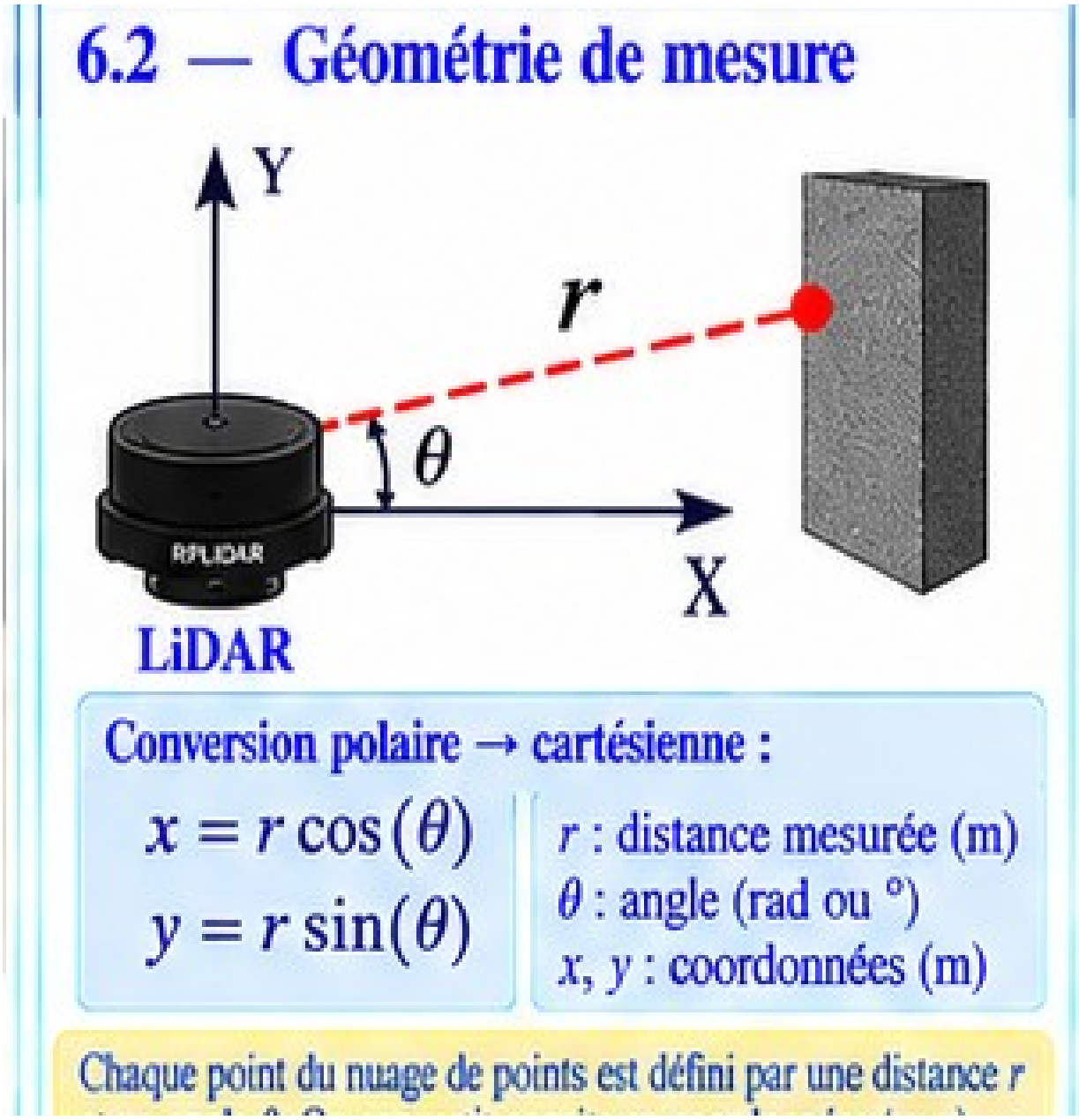
Angelo Nibizi • Nibizi Technologies • Édition 2026

IMAGE RÉALISTE — LiDAR 360°



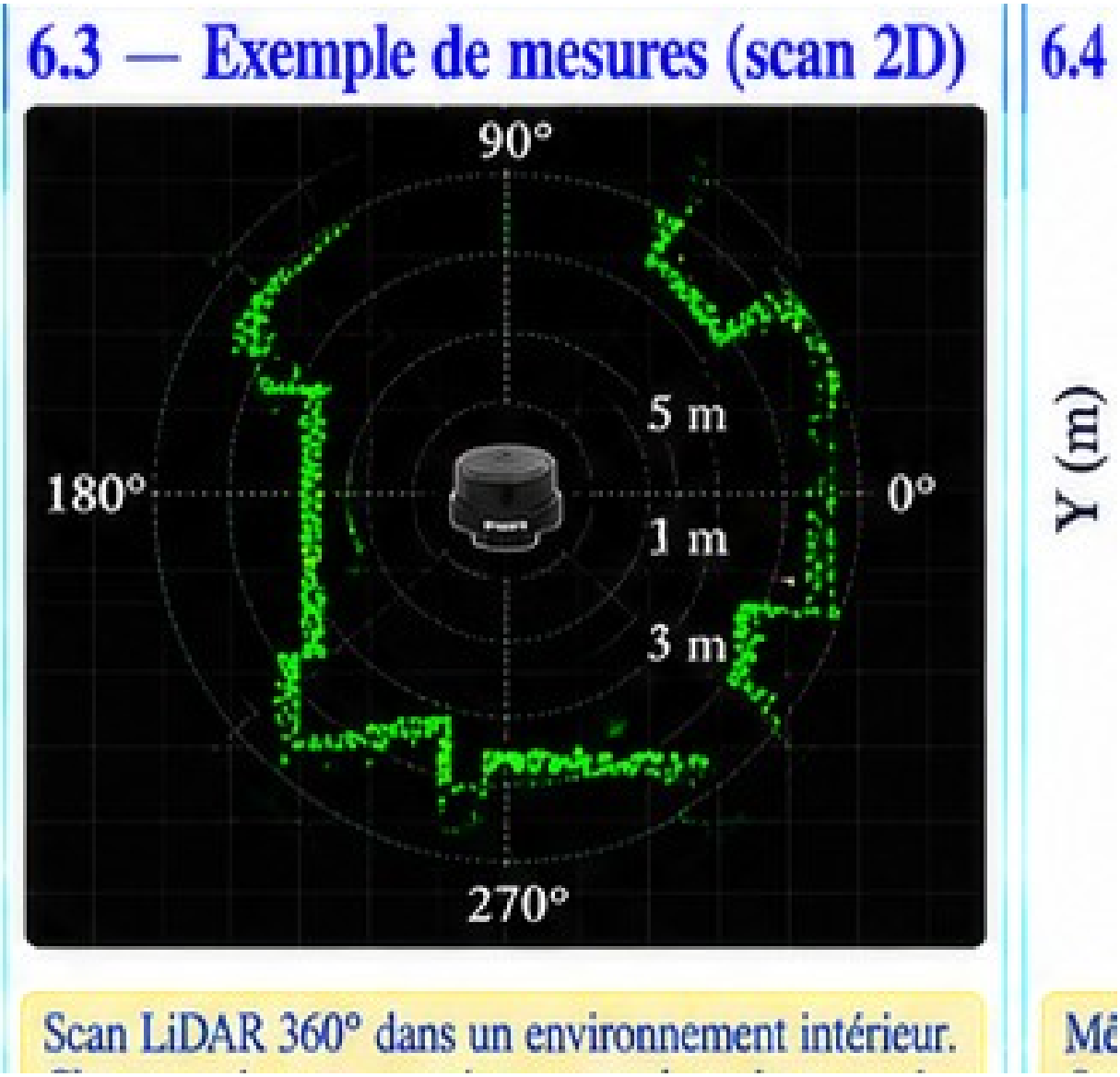
Observer le capteur réel et comprendre que le balayage fournit des distances selon des angles successifs.

SCHÉMA — GÉOMÉTRIE DE MESURE



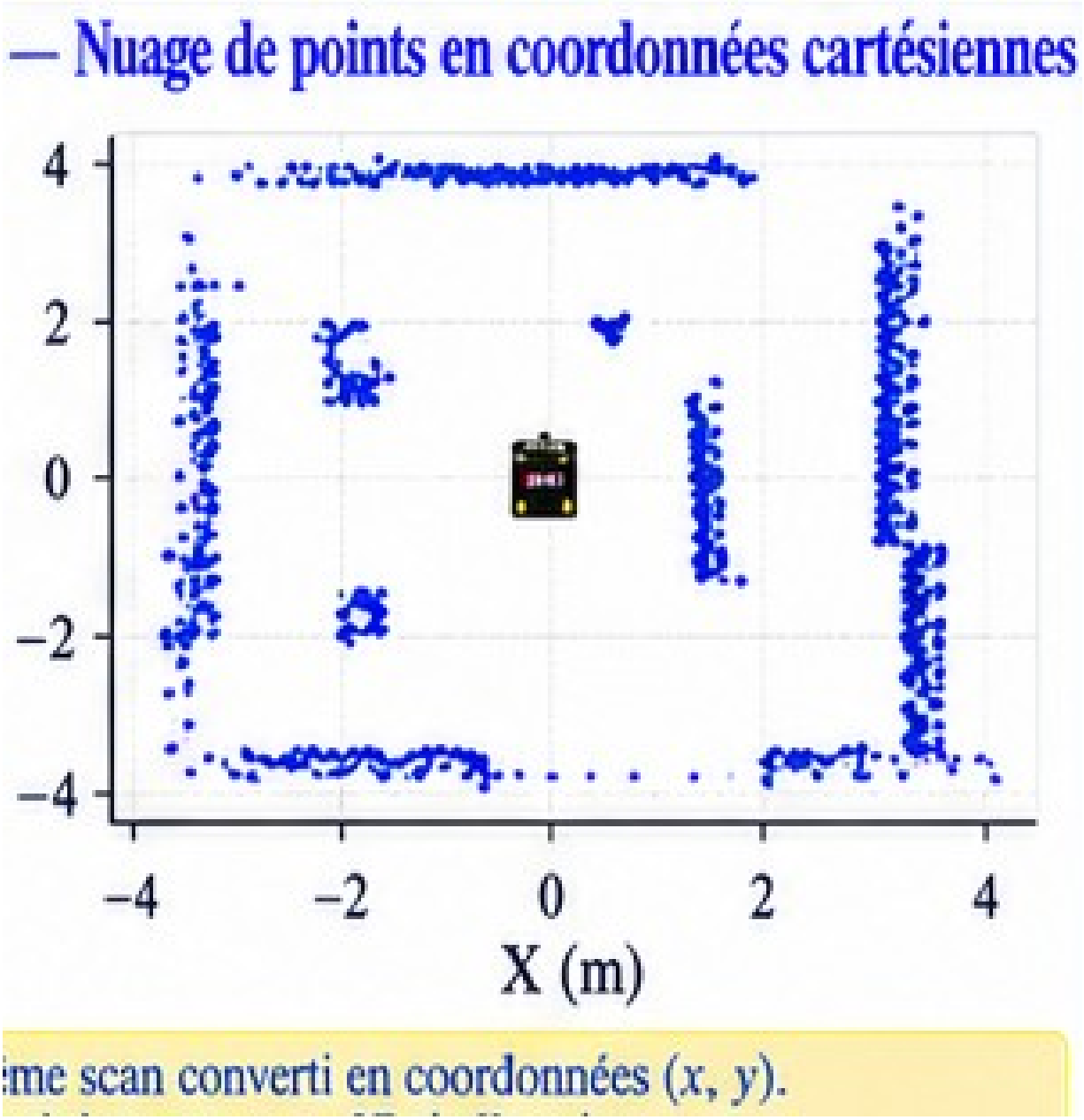
Une mesure polaire (r, θ) devient un point cartésien (x, y).

VISUALISATION — SCAN LiDAR 2D



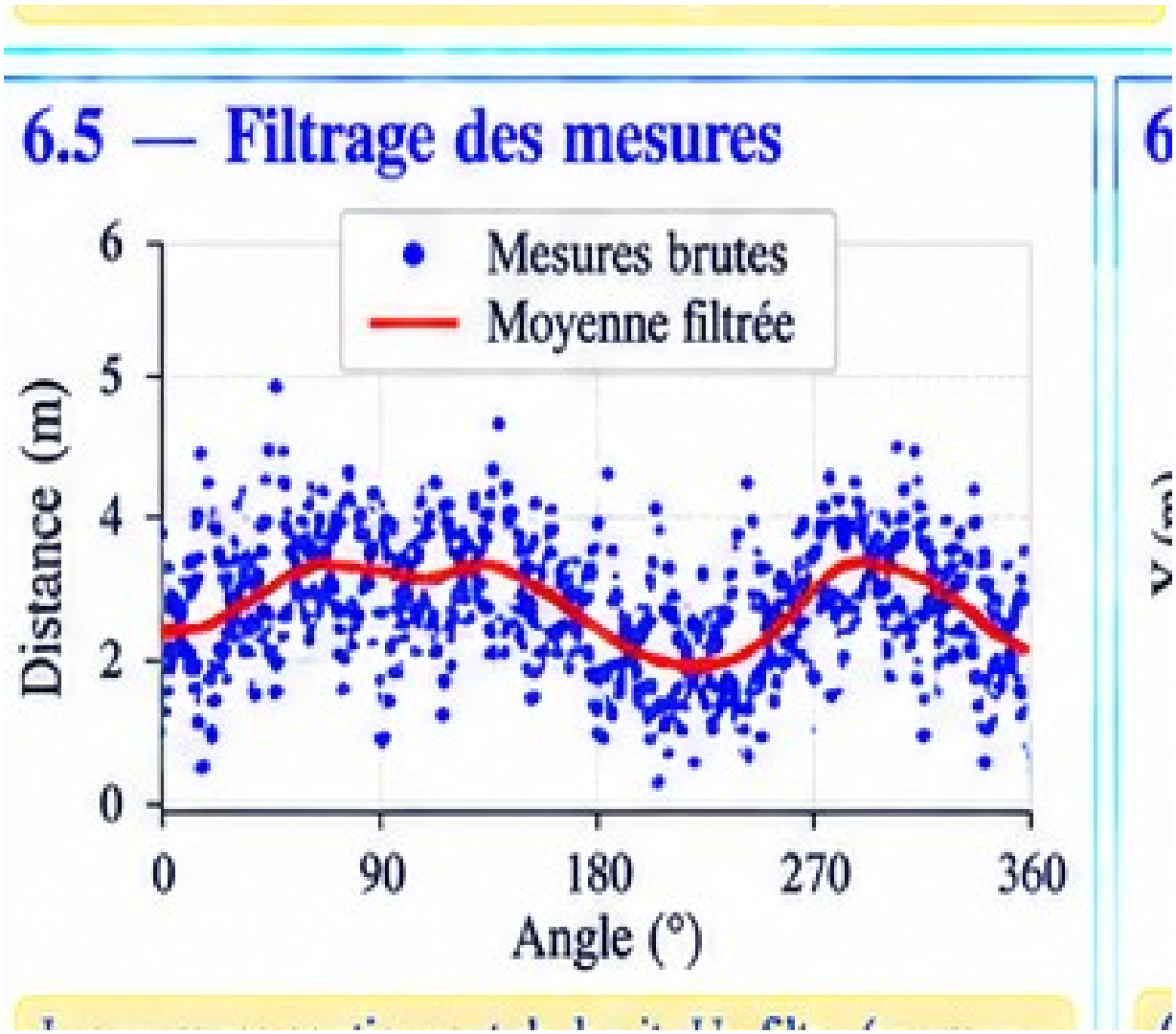
Chaque point correspond à une distance mesurée dans une direction donnée.

GRAPHIQUE — NUAGE DE POINTS CARTÉSIEN



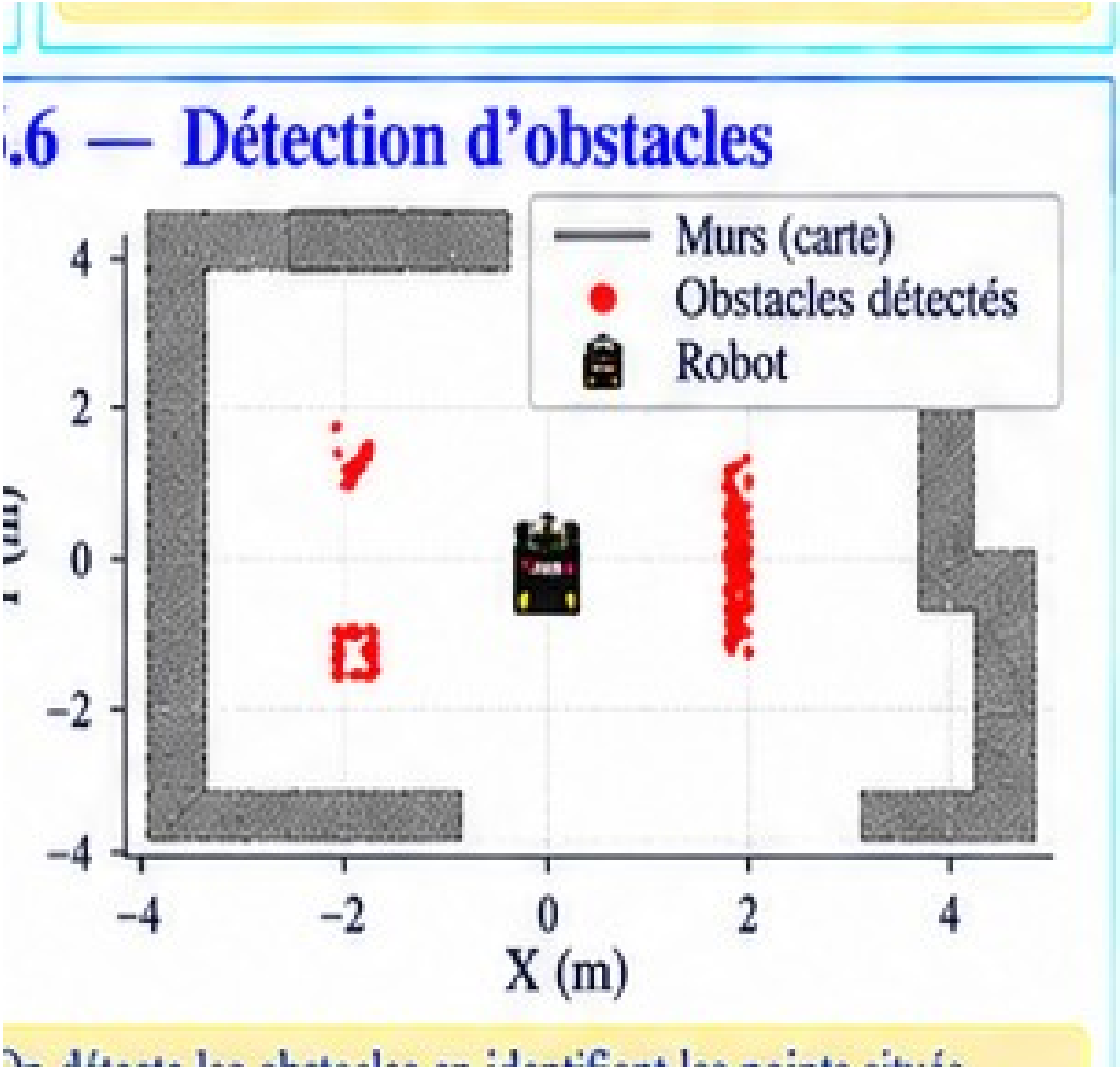
La conversion en (x,y) permet de reconstruire la géométrie locale.

GRAPHIQUE — FILTRAGE DES MESURES



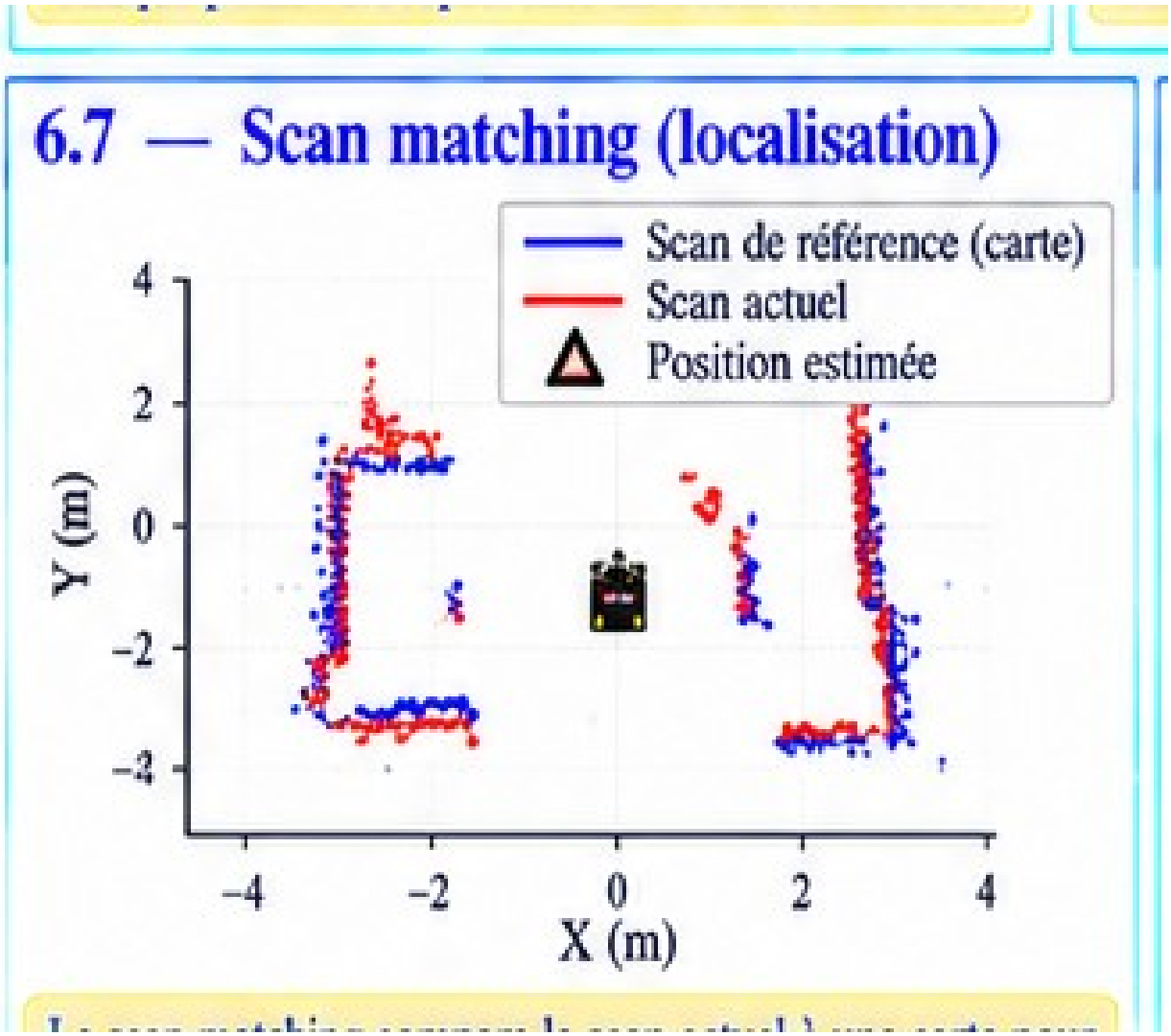
Le bruit et les valeurs aberrantes doivent être traités sans effacer les obstacles réels.

GRAPHIQUE — DÉTECTION D’OBSTACLES



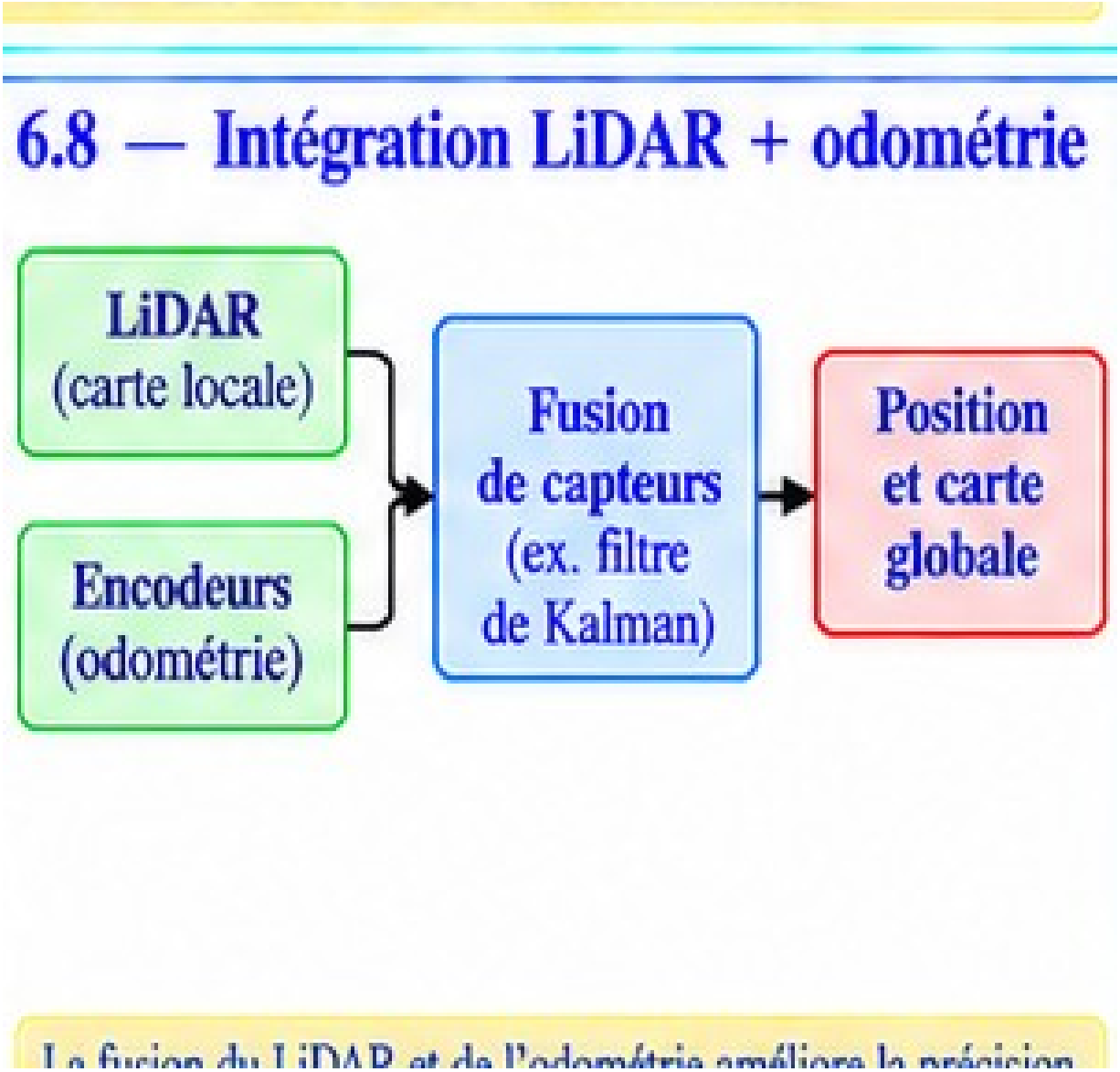
Des groupes de points cohérents peuvent être interprétés comme obstacles.

GRAPHIQUE — SCAN MATCHING



Aligner deux scans permet d’estimer un déplacement relatif du robot.

SCHÉMA — LiDAR + ODOMÉTRIE



La fusion combine information géométrique et mouvement des roues.

IMAGE RÉALISTE — NAVIGATION AUTONOME



Le LiDAR soutient évitement d'obstacles et navigation lorsqu'il est correctement intégré.

IMAGES — LIMITES DU LiDAR

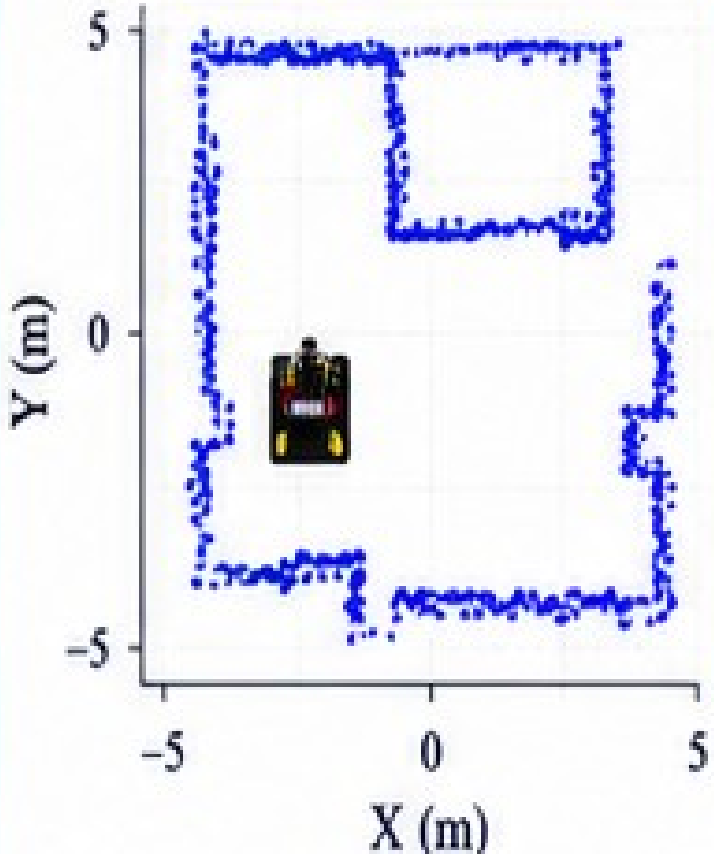


Surfaces réfléchissantes, objets fins et conditions environnementales peuvent dégrader les mesures.

PROJET VISUEL — CARTOGRAPHIER UNE PIÈCE

estimer la position du robot (translation + rotation).

6.11 — Projet : cartographier une pièce

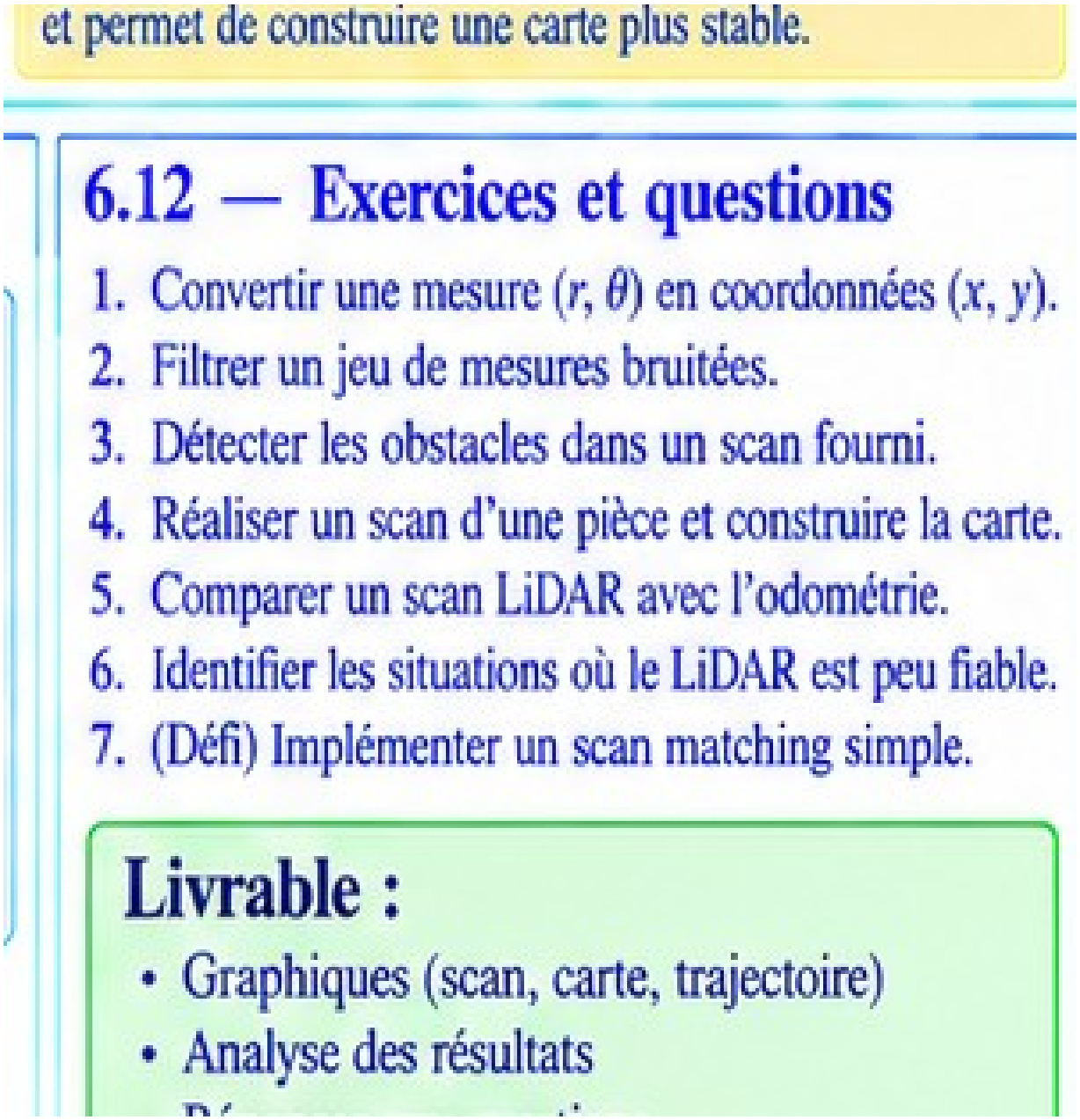


Étapes :

1. Collecter un scan 360°.
2. Filtrer les mesures.
3. Convertir en (x, y).
4. Détecter les obstacles.
5. Construire la carte.
6. Comparer la carte avec la réalité.

Construire une carte exige collecte, filtrage, conversion, localisation et validation.

EXERCICES ET QUESTIONS



et permet de construire une carte plus stable.

6.12 — Exercices et questions

1. Convertir une mesure (r, θ) en coordonnées (x, y).
2. Filtrer un jeu de mesures bruitées.
3. Détecter les obstacles dans un scan fourni.
4. Réaliser un scan d'une pièce et construire la carte.
5. Comparer un scan LiDAR avec l'odométrie.
6. Identifier les situations où le LiDAR est peu fiable.
7. (Défi) Implémenter un scan matching simple.

Livrable :

- Graphiques (scan, carte, trajectoire)
- Analyse des résultats

Les exercices relient géométrie, traitement de données, cartographie et diagnostic.

CALCULS FONDAMENTAUX — GRANDE LISIBILITÉ

$x = r\cos(\theta)$; $y = r\sin(\theta)$.

Exemple : $r=2{,}00$ m et $\theta=30°$. $x=2\cos 30° \approx 1{,}732$ m; $y=2\sin 30° = 1{,}000$ m.

Pour $r=3{,}00$ m et $\theta=-45°$: $x\approx 2{,}121$ m; $y\approx -2{,}121$ m.

Une erreur de distance ou d’angle se propage donc directement dans les coordonnées cartésiennes.

LABORATOIRE À DISTANCE — CARTOGRAPHIE 2D

1. Générer ou importer un scan 360° simulé.
2. Convertir chaque paire (r,θ) en (x,y).
3. Tracer le nuage de points.
4. Ajouter des valeurs aberrantes et concevoir un filtre.
5. Détecter plusieurs obstacles par regroupement spatial simple.
6. Déplacer virtuellement le robot et comparer deux scans.
7. Estimer translation/rotation par scan matching simple.
8. Comparer la carte obtenue à la géométrie de référence.

Leçon 6 — LiDAR et perception géométrique

Objectifs

- Comprendre la grandeur réellement observée.
- Relier mesure, repère, timestamp et incertitude.

- Détecter une donnée incohérente et définir une réaction.

LiDAR



Planche ROB-103.6 — grande lisibilité.

Théorie fondamentale

Un LiDAR mesure r selon θ. En 2D : $x=r\cos\theta$ et $y=r\sin\theta$.

Exemple résolu

$r=2$ m, $\theta=30°$ → $x\approx1{,}732$ m et $y=1{,}0$ m.

Laboratoire à distance

Simuler des mesures, ajouter bruit/biais/latence, appliquer la méthode de la leçon, tracer résultat et incertitude, puis injecter une faute et documenter la réaction.

Diagnostic

- Unité correcte ?
- Repère correct ?
- Timestamp récent ?
- Valeur physiquement plausible ?

- Incertitude cohérente ?

Autoévaluation corrigée

Q. Pourquoi une mesure seule ne suffit-elle pas ?

Corrigé : Il faut unité, repère, timestamp, qualité et incertitude.

Q. Que signifie STALE ?

Corrigé : La donnée est trop ancienne pour l’usage prévu.

Q. Pourquoi conserver la covariance ?

Corrigé : Pour représenter explicitement l’incertitude.

Storyboard du film pédagogique

Montrer le capteur → afficher la mesure brute → introduire bruit/biais → calibrer/estimer → visualiser l’incertitude → injecter une panne → laisser l’étudiant diagnostiquer avant la correction.

COLLÈGE DU SACRÉ-CŒUR DE GATINEAU • ROB-103

ATLAS VISUEL — VISION ET PERCEPTION 3D

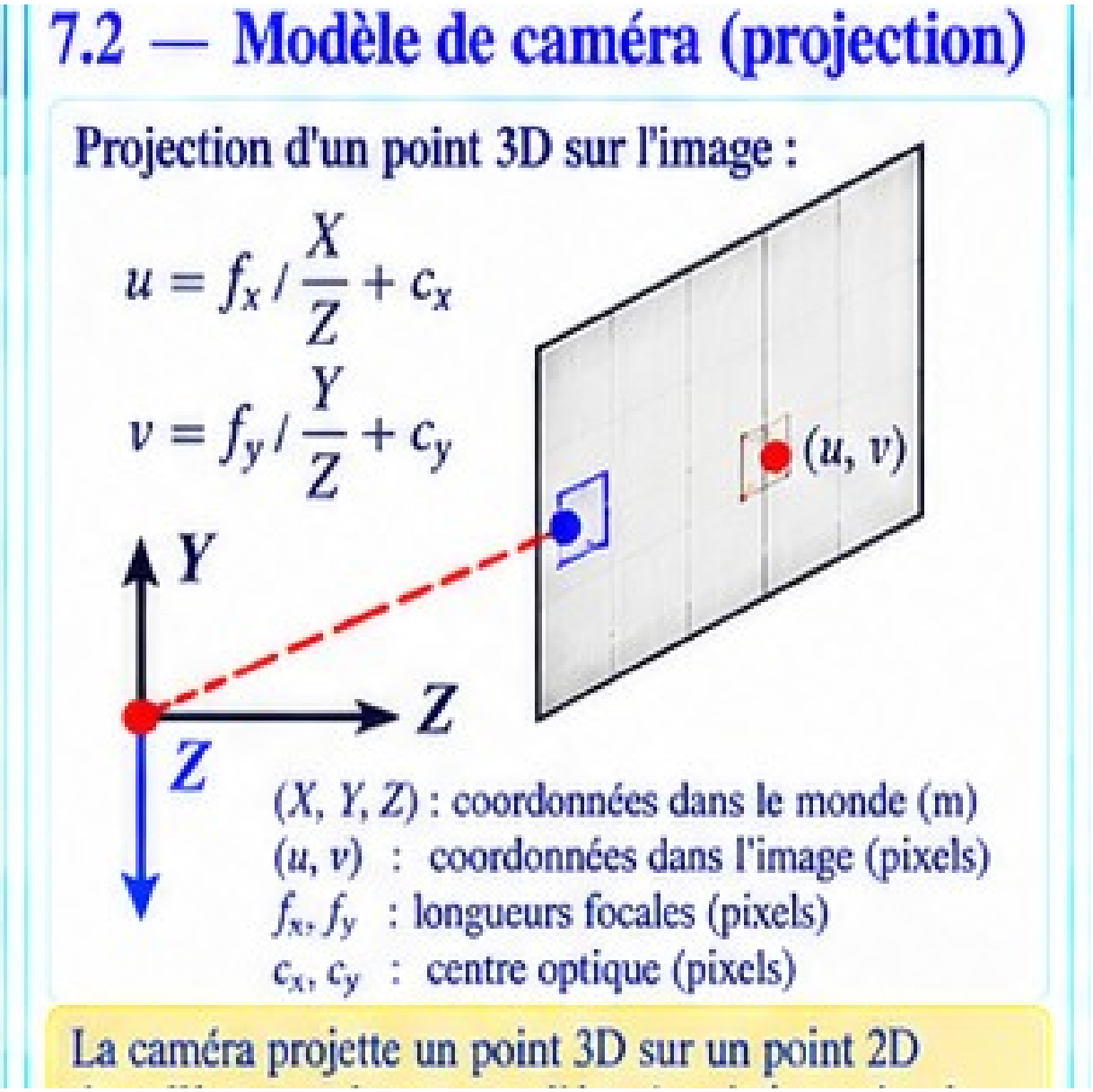
Angelo Nibizi • Nibizi Technologies • Édition 2026

IMAGE RÉALISTE — CAMÉRAS RGB ET RGB-D



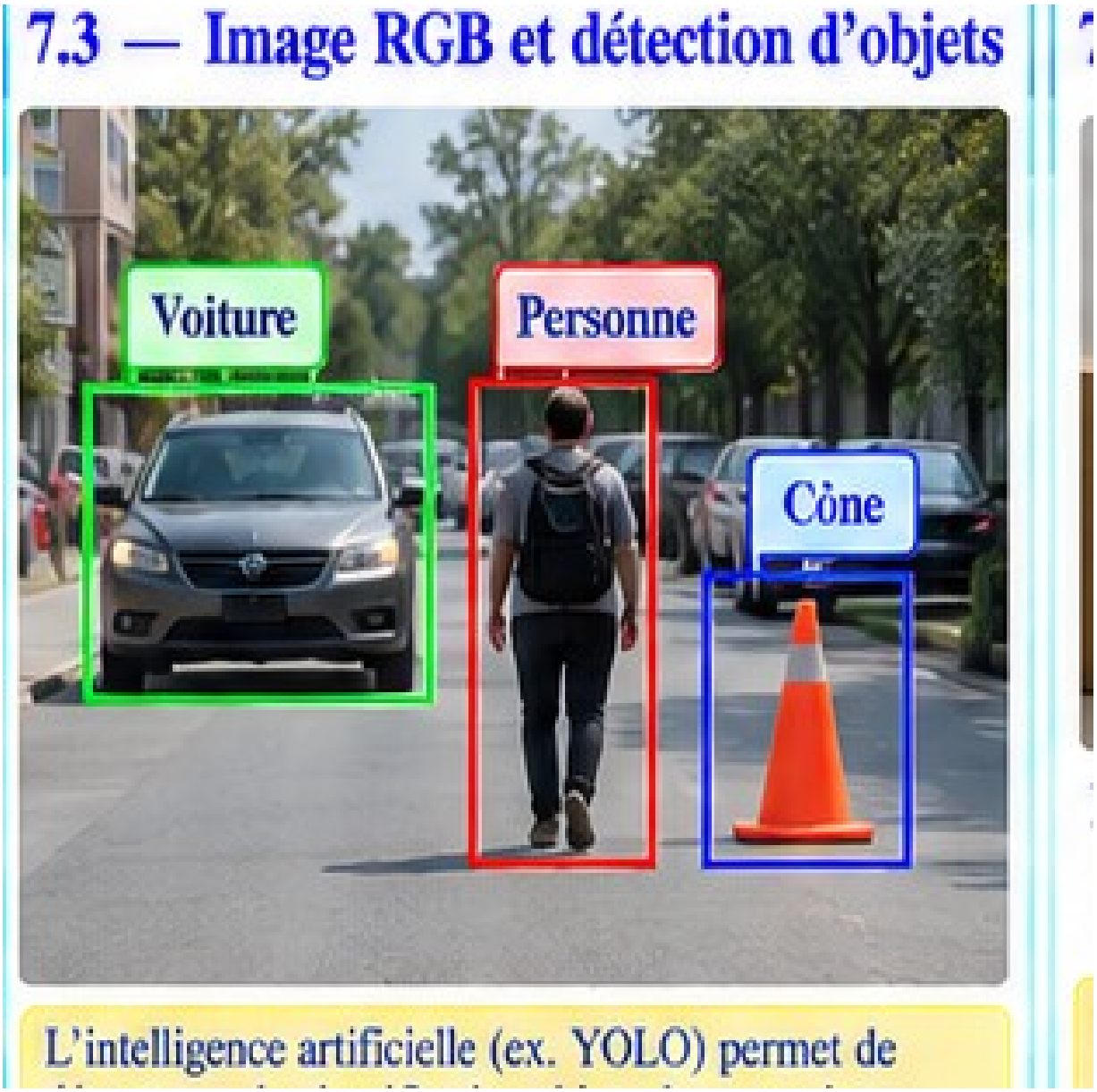
Reconnaître caméra couleur, caméra profondeur et caméra embarquée.

SCHÉMA — MODÈLE DE PROJECTION



Relier un point 3D (X,Y,Z) à un pixel (u,v) grâce aux paramètres intrinsèques.

IMAGE — DÉTECTION D’OBJETS



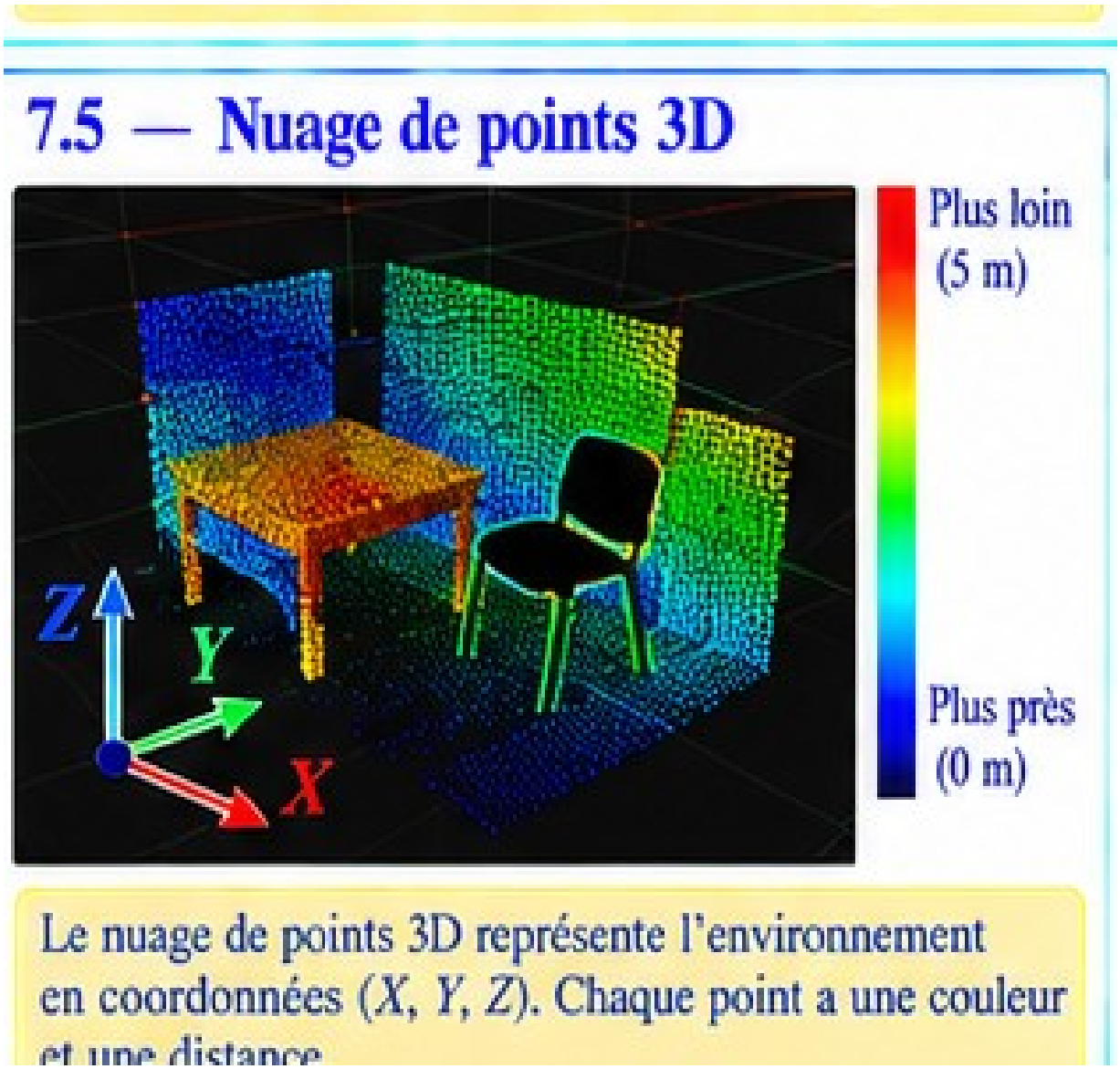
La détection fournit classe et région image; elle ne fournit pas automatiquement une pose 3D.

IMAGE RÉALISTE — CARTE DE PROFONDEUR



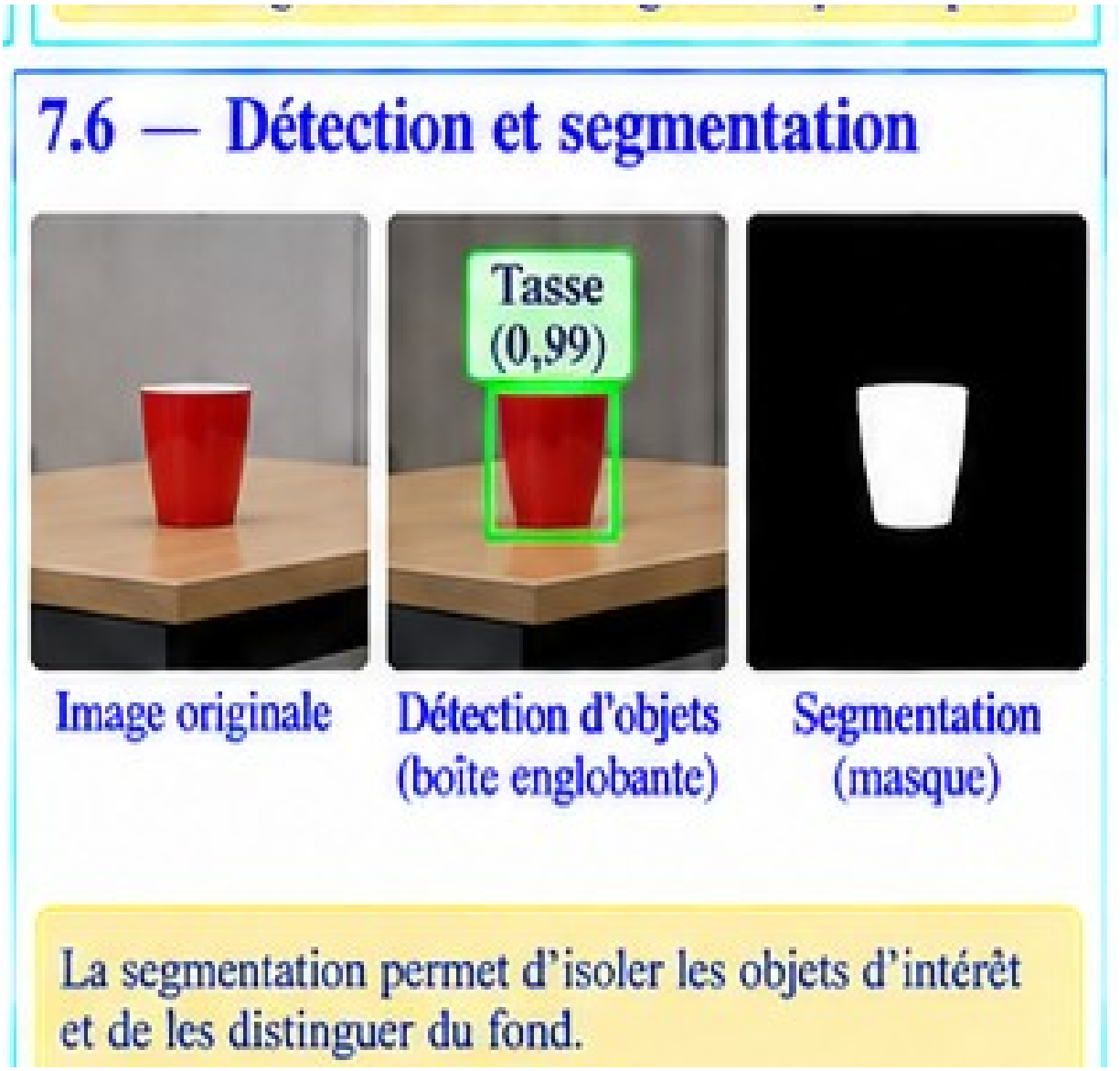
Chaque pixel de profondeur associe une distance à la scène observée.

VISUALISATION — NUAGE DE POINTS 3D



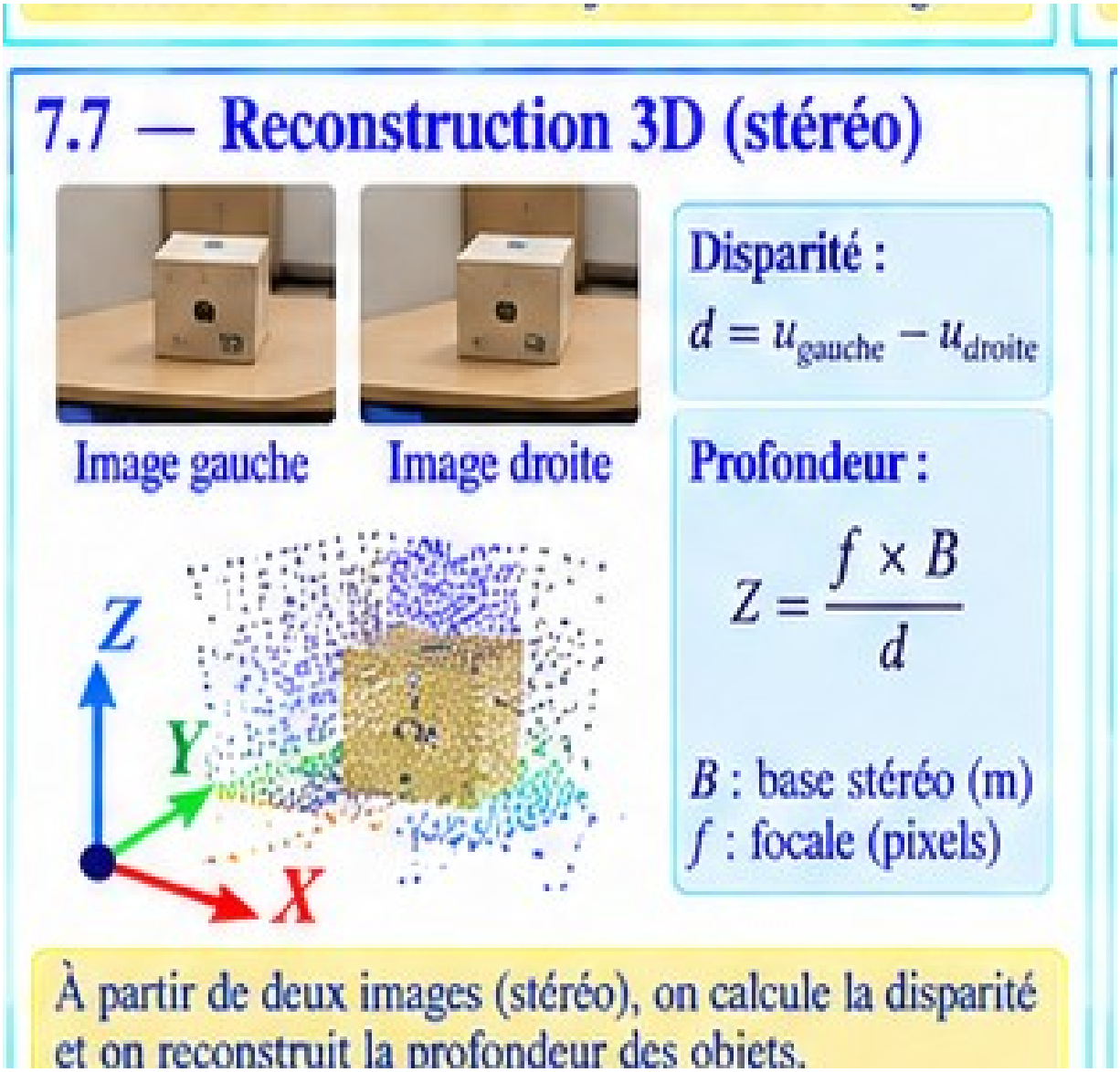
Les pixels avec profondeur peuvent être convertis en points métriques dans le repère caméra.

IMAGE — DÉTECTION ET SEGMENTATION



La segmentation fournit un masque plus précis qu'une simple boîte englobante.

SCHÉMA — STÉRÉOVISION



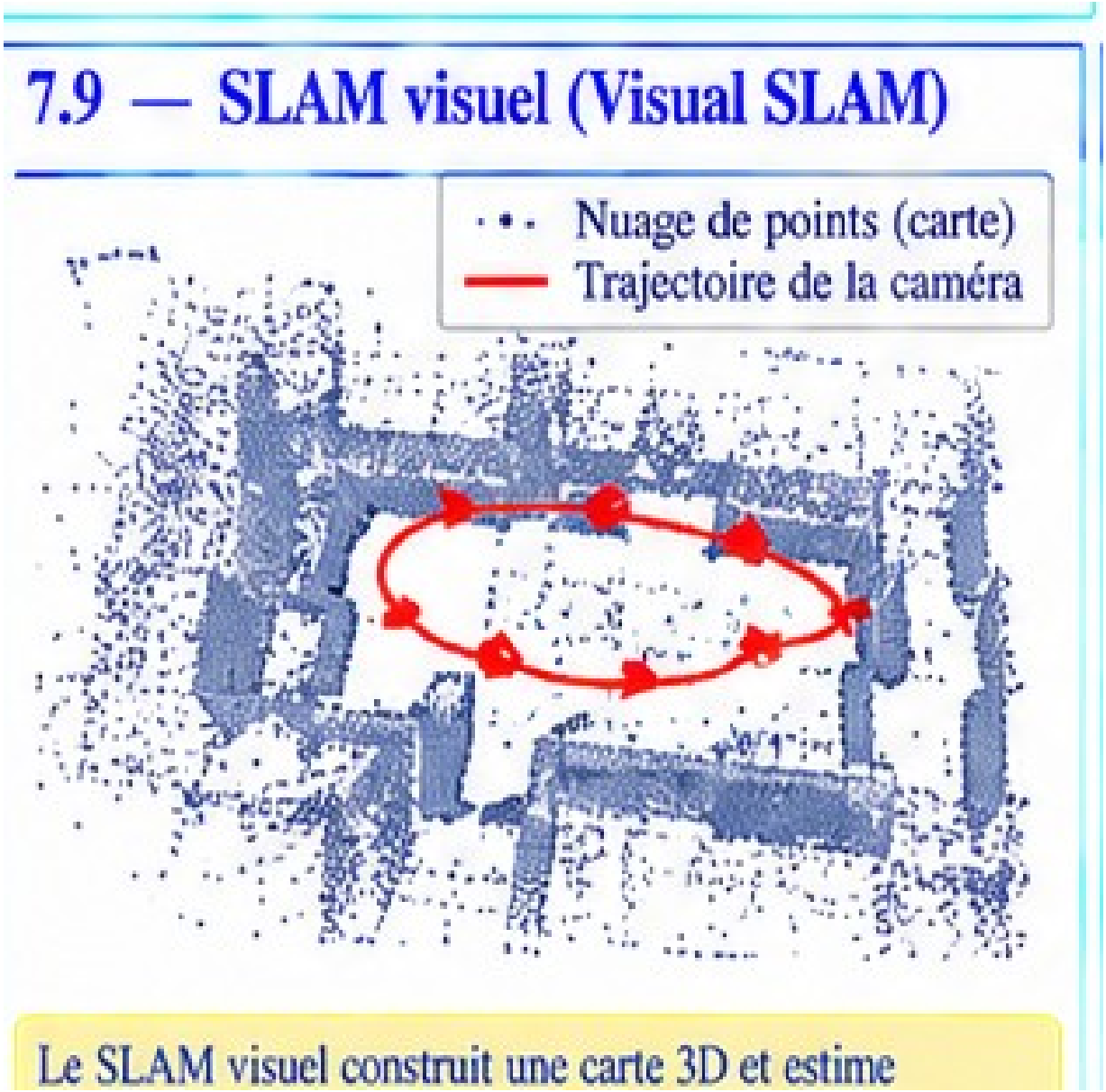
La disparité entre deux images permet d'estimer la profondeur lorsque la géométrie stéréo est calibrée.

IMAGE RÉALISTE — ÉVITEMENT D’OBSTACLES



La vision soutient navigation seulement après conversion en information géométrique exploitable.

VISUALISATION — VISUAL SLAM



Le SLAM visuel estime simultanément mouvement de caméra et structure de l’environnement.

IMAGES — APPLICATIONS ROBOTIQUES



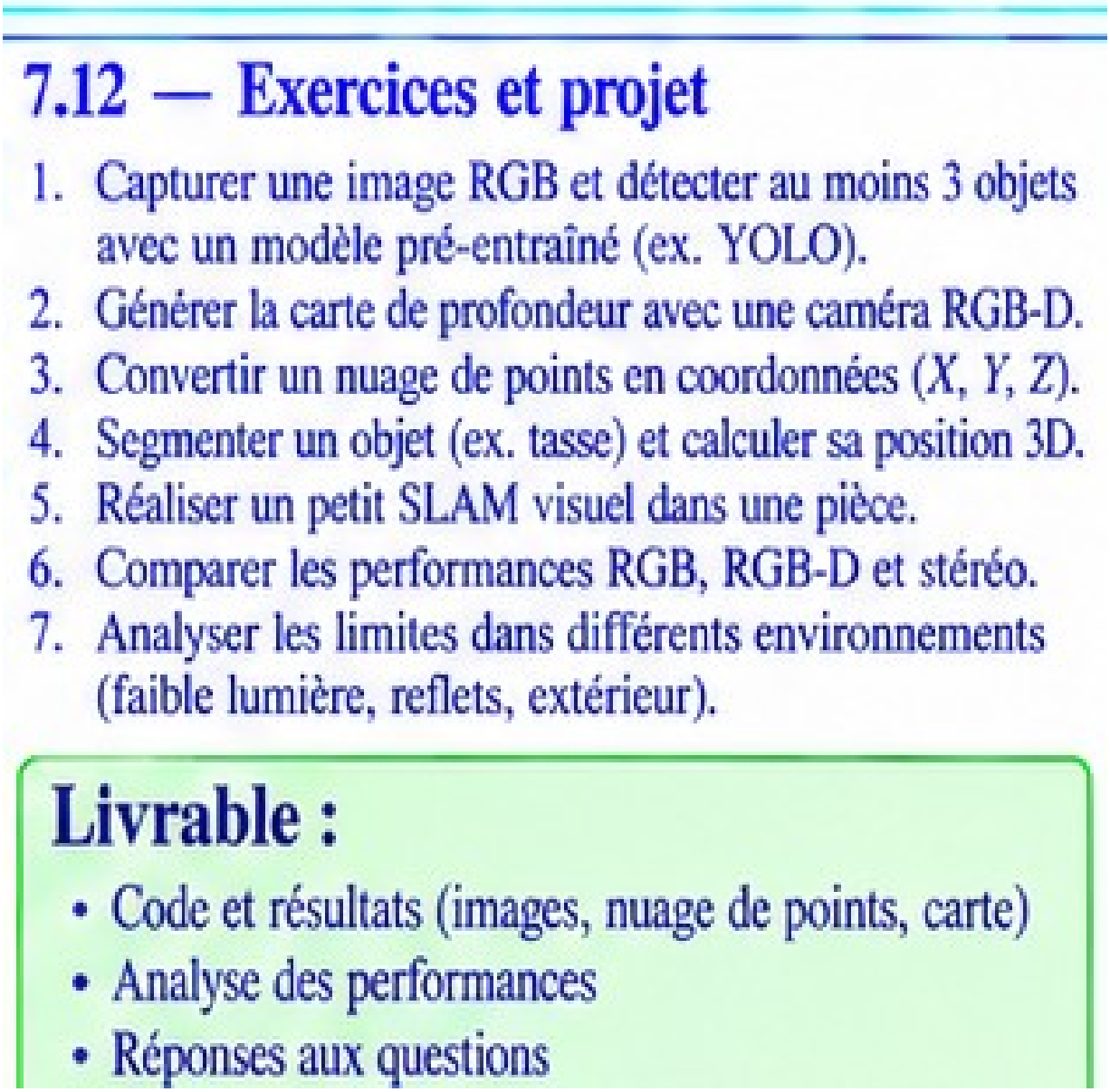
Manipulation, navigation, drones et agriculture utilisent la vision avec des contraintes différentes.

IMAGES — LIMITES ET DÉFIS



Faible lumière, éblouissement, faible texture et météo peuvent dégrader fortement la perception.

EXERCICES ET PROJET



7.12 — Exercices et projet

1. Capturer une image RGB et détecter au moins 3 objets avec un modèle pré-entraîné (ex. YOLO).
2. Générer la carte de profondeur avec une caméra RGB-D.
3. Convertir un nuage de points en coordonnées (X, Y, Z).
4. Segmenter un objet (ex. tasse) et calculer sa position 3D.
5. Réaliser un petit SLAM visuel dans une pièce.
6. Comparer les performances RGB, RGB-D et stéréo.
7. Analyser les limites dans différents environnements (faible lumière, reflets, extérieur).

Livrable :

- Code et résultats (images, nuage de points, carte)
- Analyse des performances
- Réponses aux questions

Le projet relie acquisition, détection, profondeur, nuage de points, navigation et analyse des limites.

CALCULS FONDAMENTAUX — CAMÉRA RGB-D

Projection : $u = f_x \cdot X/Z + c_x$; $v = f_y \cdot Y/Z + c_y$.

Reconstruction avec profondeur Z : $X=(u-c_x)Z/f_x$; $Y=(v-c_y)Z/f_y$.

Exemple : fx=fy=600 px, cx=320, cy=240, u=380, v=270, Z=1,20 m.

X=(380−320)×1,20/600=0,12 m.

Y=(270−240)×1,20/600=0,06 m.

Le point dans le repère caméra est donc environ [0,12 ; 0,06 ; 1,20] m.

LABORATOIRE À DISTANCE — DU PIXEL AU POINT 3D

1. Utiliser une image RGB et une carte de profondeur simulée.

2. Sélectionner dix pixels appartenant à plusieurs objets.

3. Convertir chaque pixel en point 3D avec les paramètres intrinsèques.

4. Tracer le nuage de points.

5. Segmenter un objet et calculer son centroïde 3D.

6. Ajouter une transformation caméra→base et exprimer le centroïde dans le repère robot.

7. Dégrader la lumière ou la profondeur et documenter l'effet sur la perception.

Leçon 7 — Caméras, calibration et vision 3D

Objectifs

- Comprendre la grandeur réellement observée.
- Relier mesure, repère, timestamp et incertitude.

- Détecter une donnée incohérente et définir une réaction.

VISION 3D



Planche ROB-103.7 — grande lisibilité.

Théorie fondamentale

Une caméra projette la 3D en pixels. Avec calibration et profondeur, on reconstruit un point métrique puis on le transforme vers la base.

Exemple résolu

fx=600 px, cx=320, u=380, Z=1,2 m → X=0,12 m.

Laboratoire à distance

Simuler des mesures, ajouter bruit/biais/latence, appliquer la méthode de la leçon, tracer résultat et incertitude, puis injecter une faute et documenter la réaction.

Diagnostic

- Unité correcte ?
- Repère correct ?
- Timestamp récent ?

- Valeur physiquement plausible ?
- Incertitude cohérente ?

Autoévaluation corrigée

Q. Pourquoi une mesure seule ne suffit-elle pas ?

Corrigé : Il faut unité, repère, timestamp, qualité et incertitude.

Q. Que signifie STALE ?

Corrigé : La donnée est trop ancienne pour l’usage prévu.

Q. Pourquoi conserver la covariance ?

Corrigé : Pour représenter explicitement l’incertitude.

Storyboard du film pédagogique

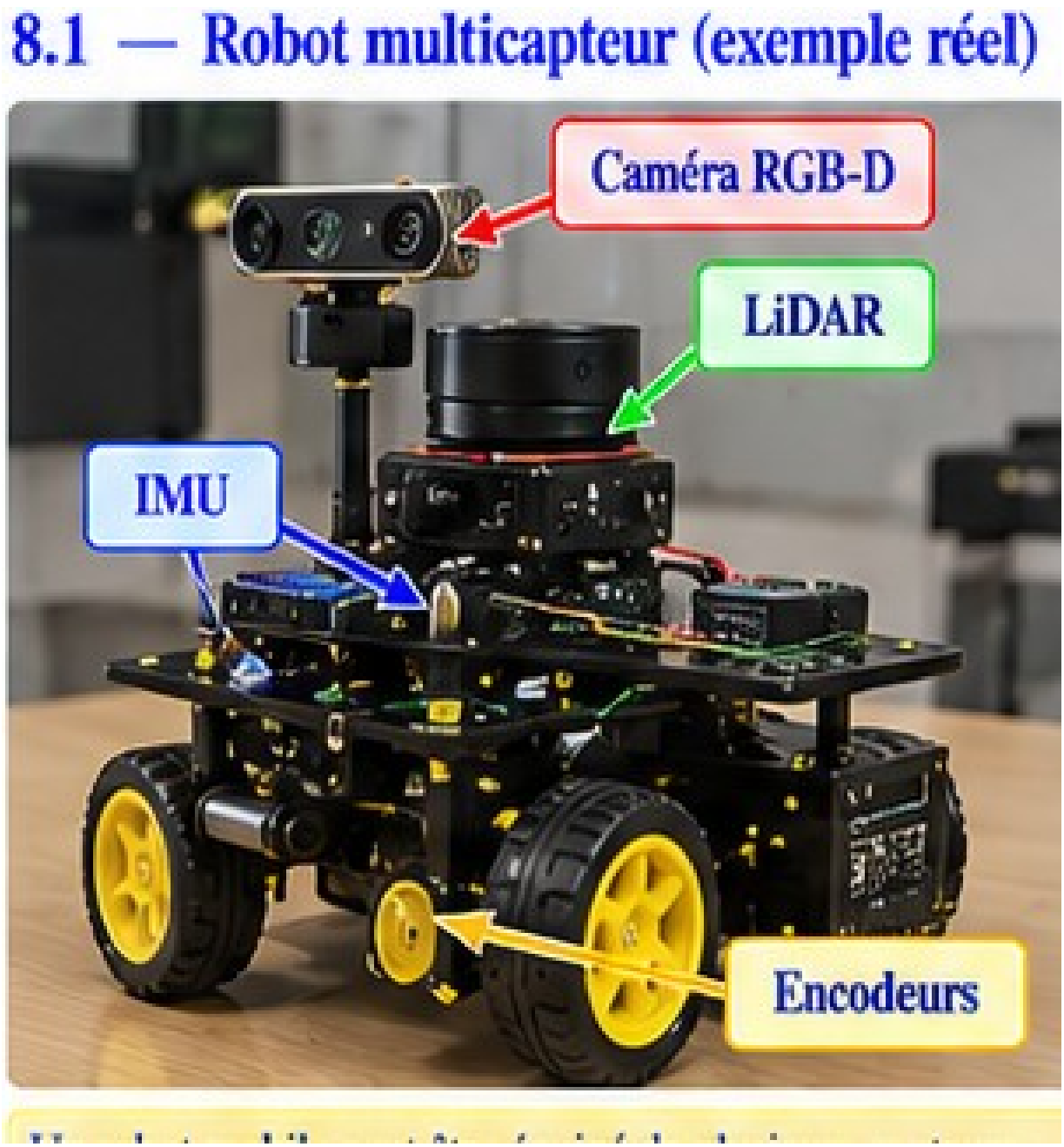
Montrer le capteur → afficher la mesure brute → introduire bruit/biais → calibrer/estimer → visualiser l’incertitude → injecter une panne → laisser l’étudiant diagnostiquer avant la correction.

COLLÈGE DU SACRÉ-CŒUR DE GATINEAU • ROB-103

ATLAS VISUEL — FUSION MULTICAPTEUR

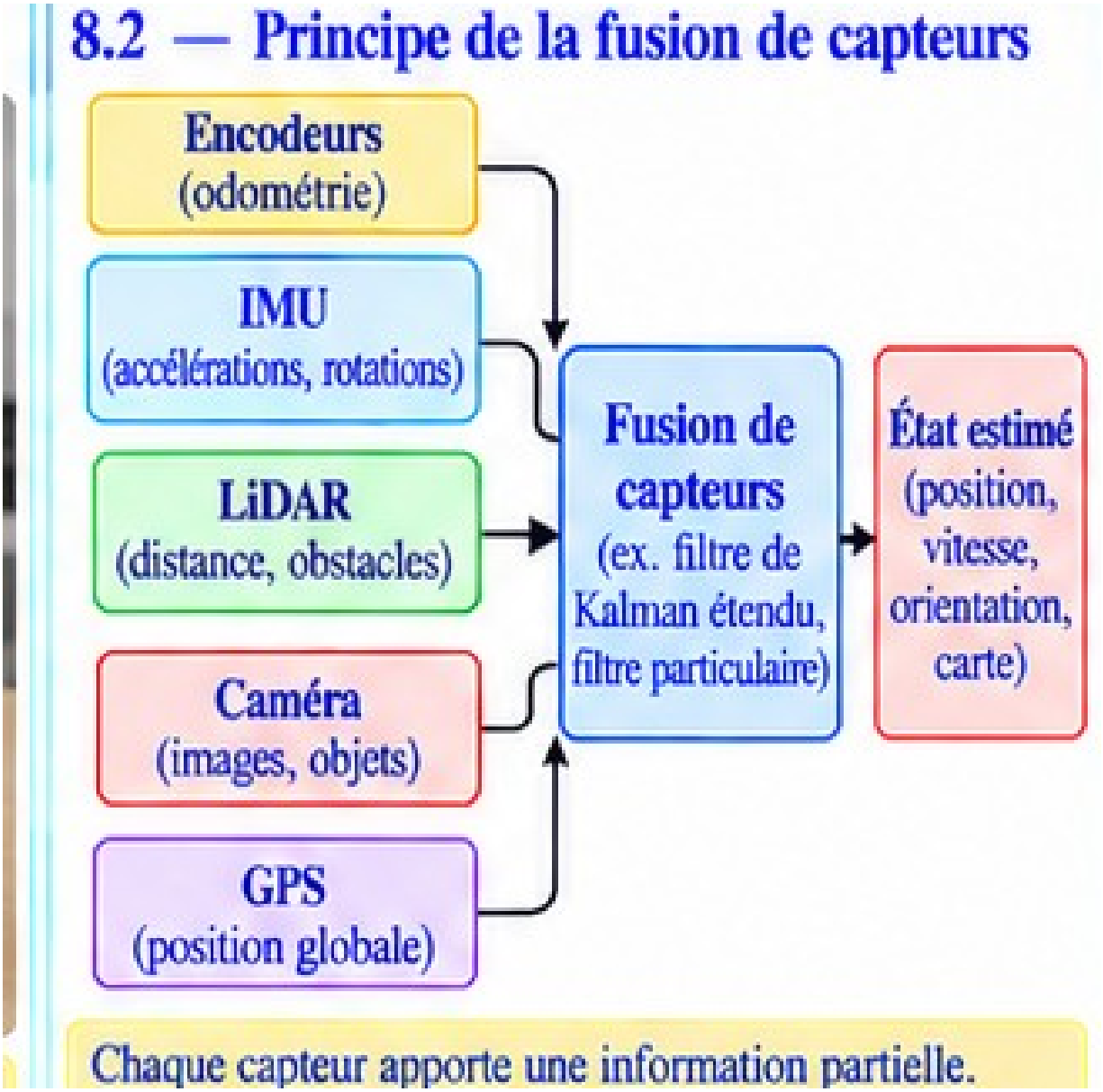
Angelo Nibizi • Nibizi Technologies • Édition 2026

IMAGE RÉALISTE — ROBOT MULTICAPTEUR



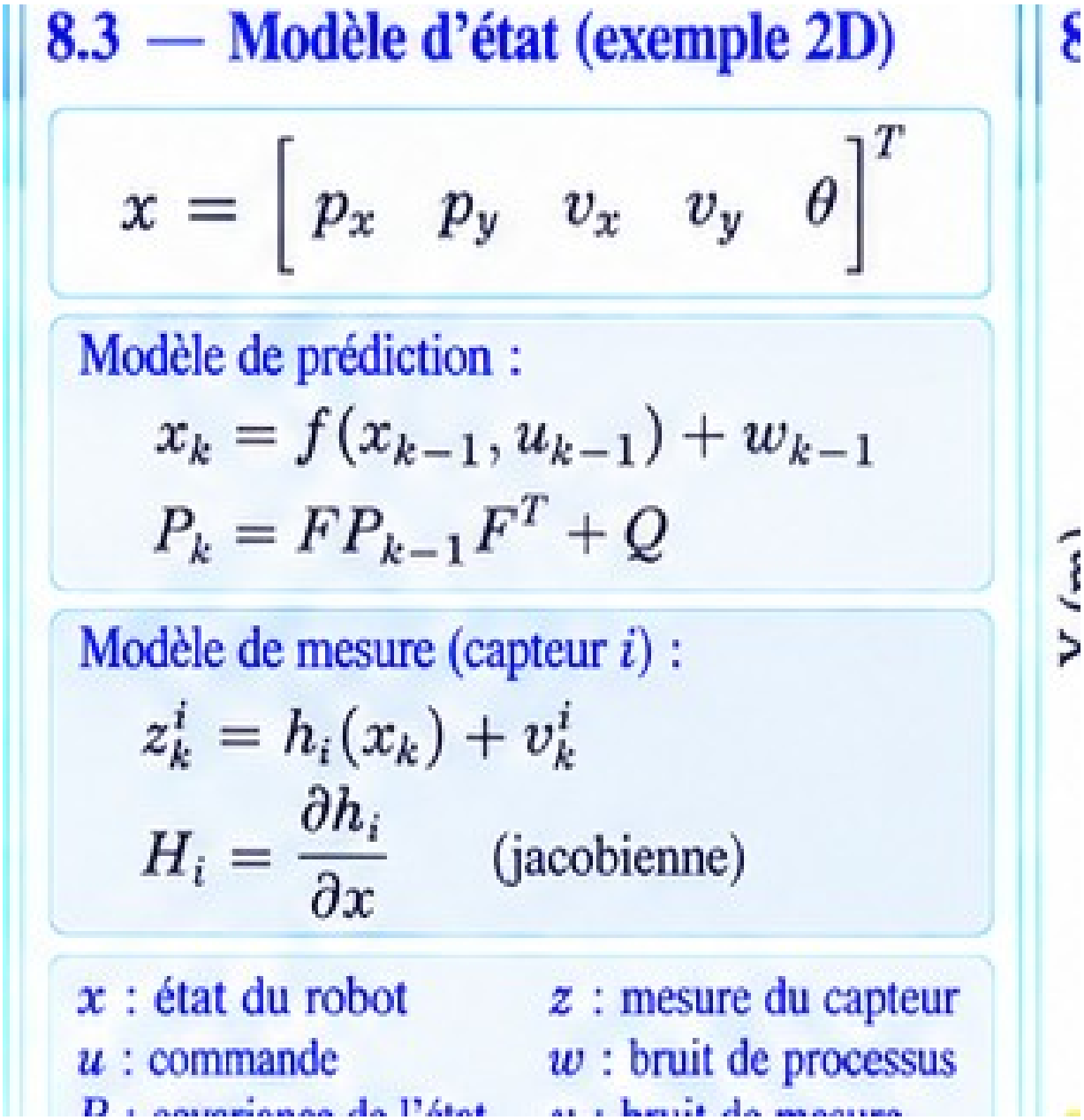
Repérer encodeurs, IMU, LiDAR et caméra sur le même robot avant d'étudier leur fusion.

SCHÉMA — PRINCIPE DE FUSION



Chaque capteur apporte une information partielle avec une incertitude propre.

MODÈLE D'ÉTAT — POSITION, VITESSE, ORIENTATION



8.3 — Modèle d'état (exemple 2D)

$$x = \begin{bmatrix} p_x & p_y & v_x & v_y & \theta \end{bmatrix}^T$$

Modèle de prédiction :

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1}$$

$$P_k = F P_{k-1} F^T + Q$$

Modèle de mesure (capteur i) :

$$z_k^i = h_i(x_k) + v_k^i$$

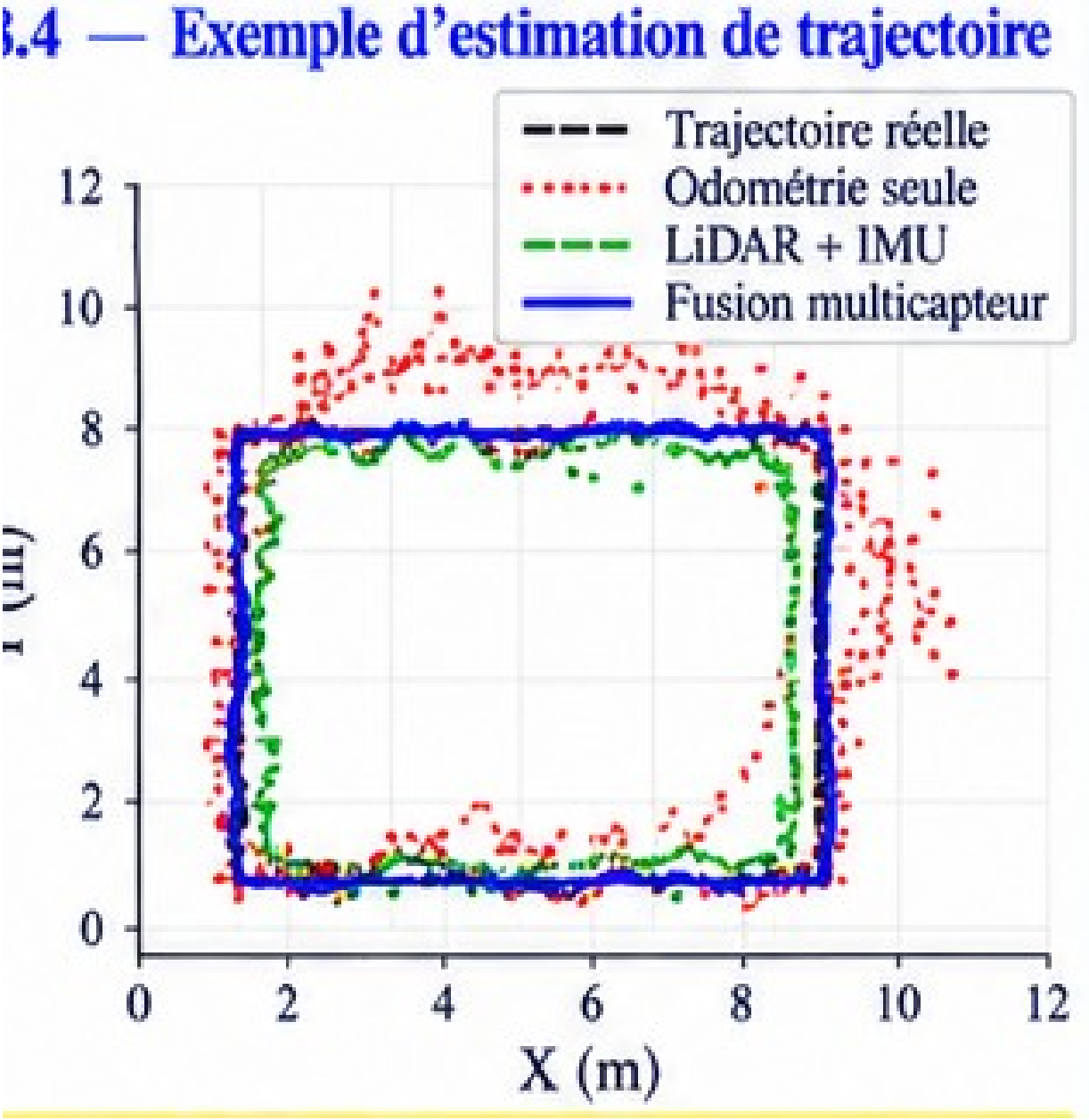
$$H_i = \frac{\partial h_i}{\partial x} \quad \text{(jacobienne)}$$

x : état du robot — z : mesure du capteur

u : commande — w : bruit de processus

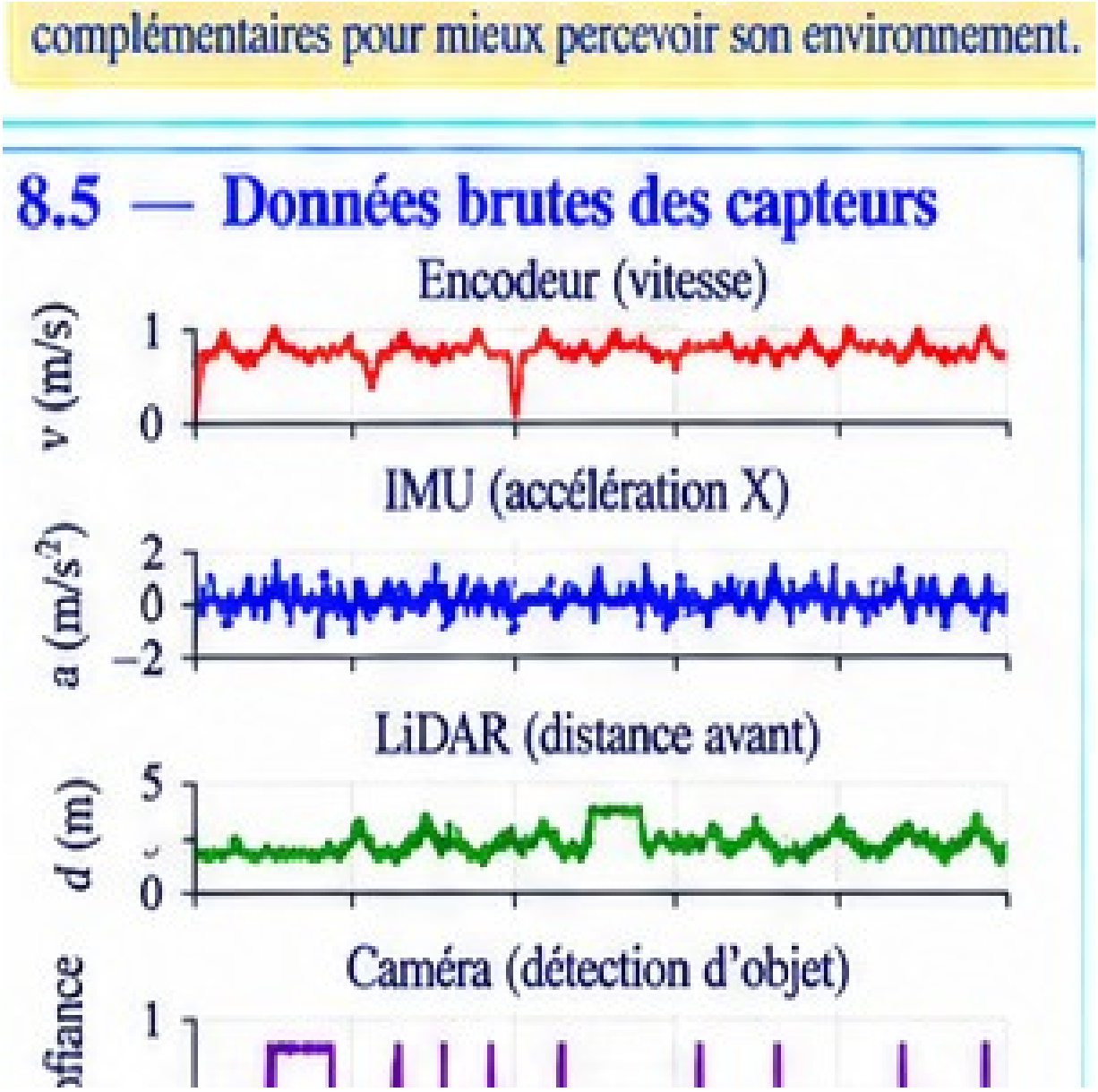
L'état estimé regroupe les variables nécessaires à la mission et leur covariance.

GRAPHIQUE — ESTIMATION DE TRAJECTOIRE



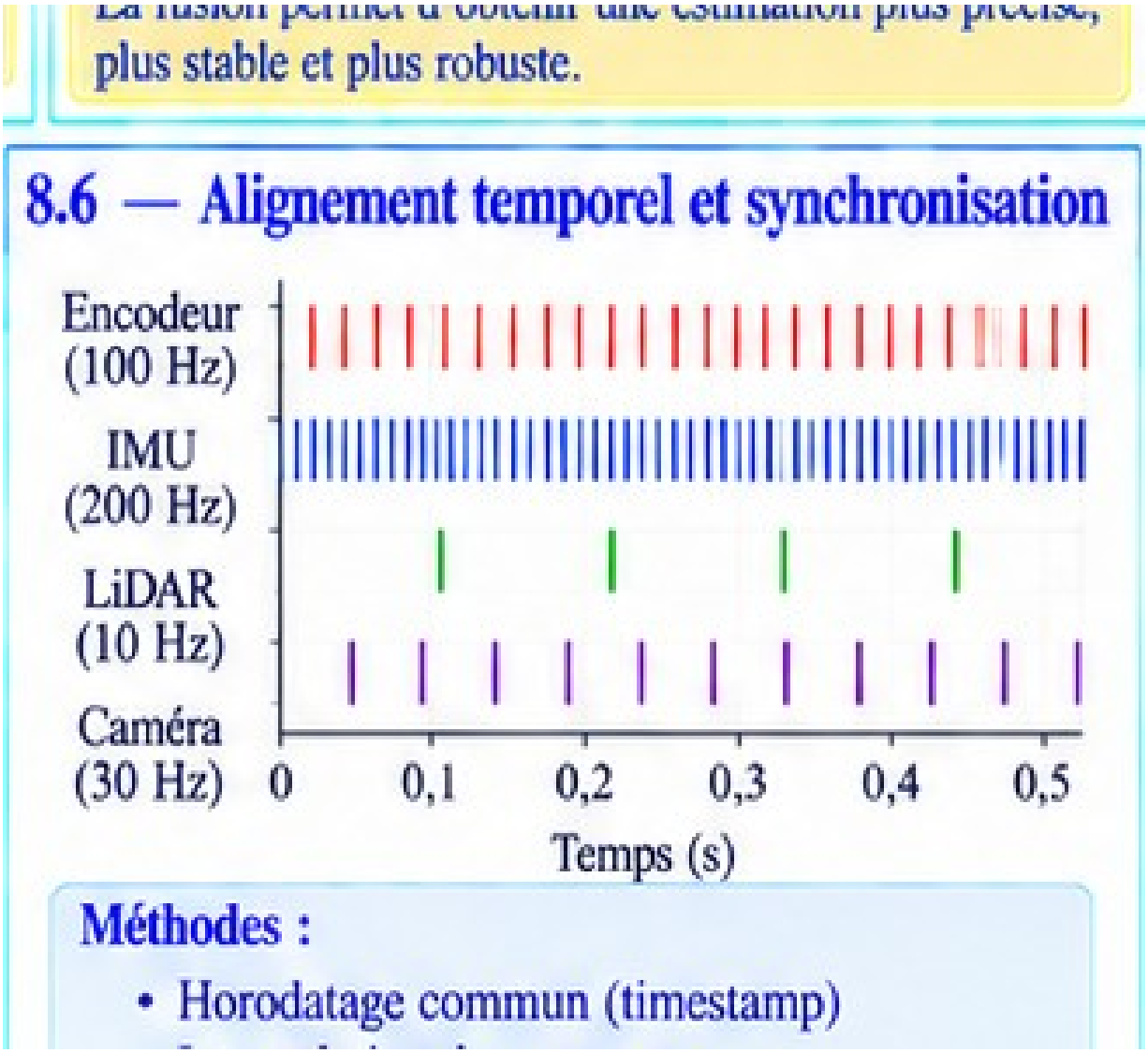
Comparer odométrie seule, fusion partielle et fusion multicapteur à une référence.

DONNÉES RÉELLES — FRÉQUENCES DIFFÉRENTES



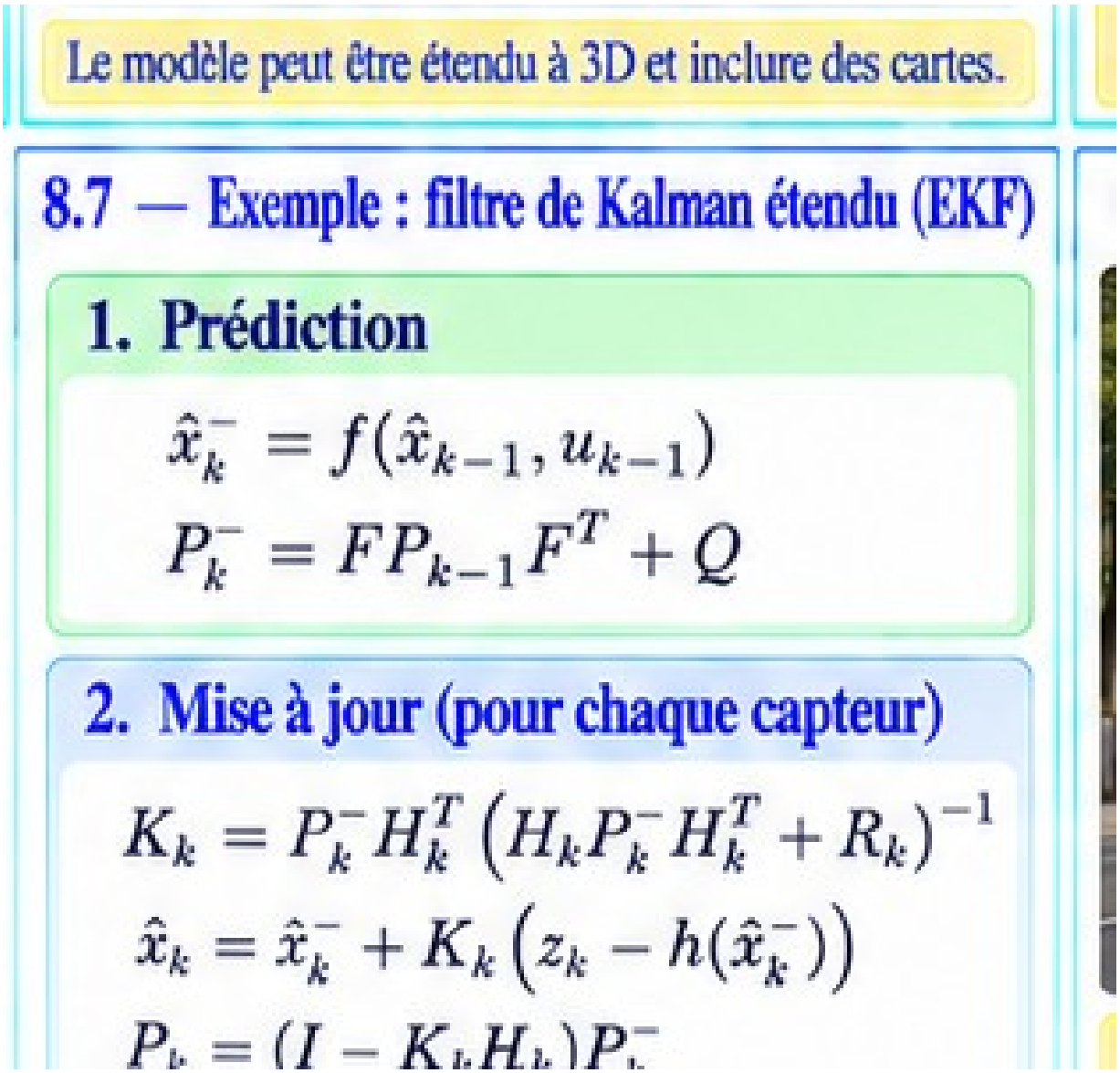
Les capteurs ne publient ni à la même fréquence ni avec le même bruit.

SCHÉMA — SYNCHRONISATION TEMPORELLE



Les timestamps et buffers permettent d'aligner des observations prises à des instants différents.

ÉQUATIONS — EKF



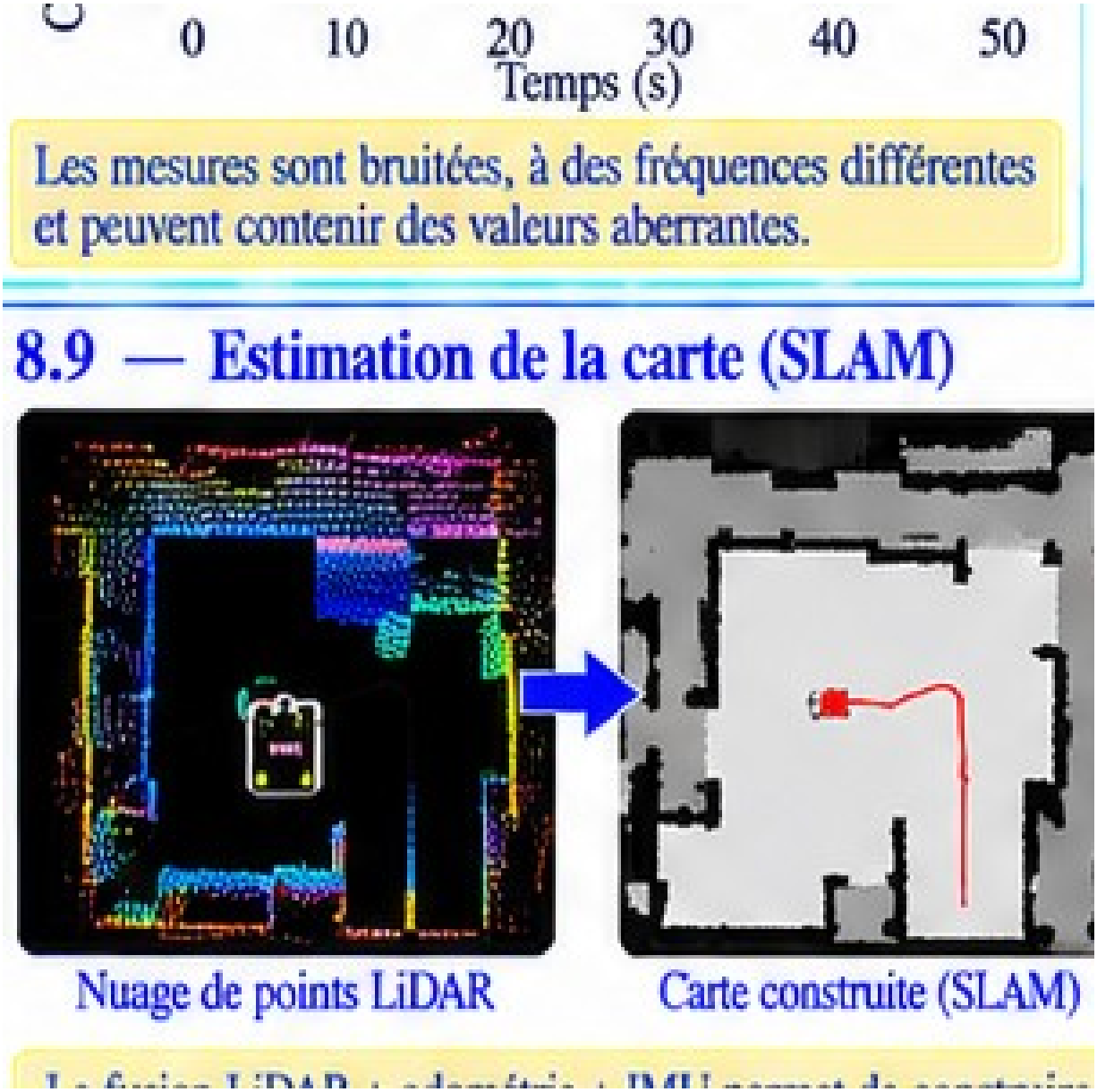
L’EKF linéarise localement les modèles non linéaires pour appliquer prédiction et correction.

IMAGE — QUALITÉ DES MESURES



La confiance dans un capteur dépend du contexte : lumière, obstacles, environnement urbain ou intérieur.

VISUALISATION — FUSION ET SLAM



La fusion de mouvement et de perception soutient simultanément localisation et cartographie.

IMAGES — SITUATIONS DIFFICILES



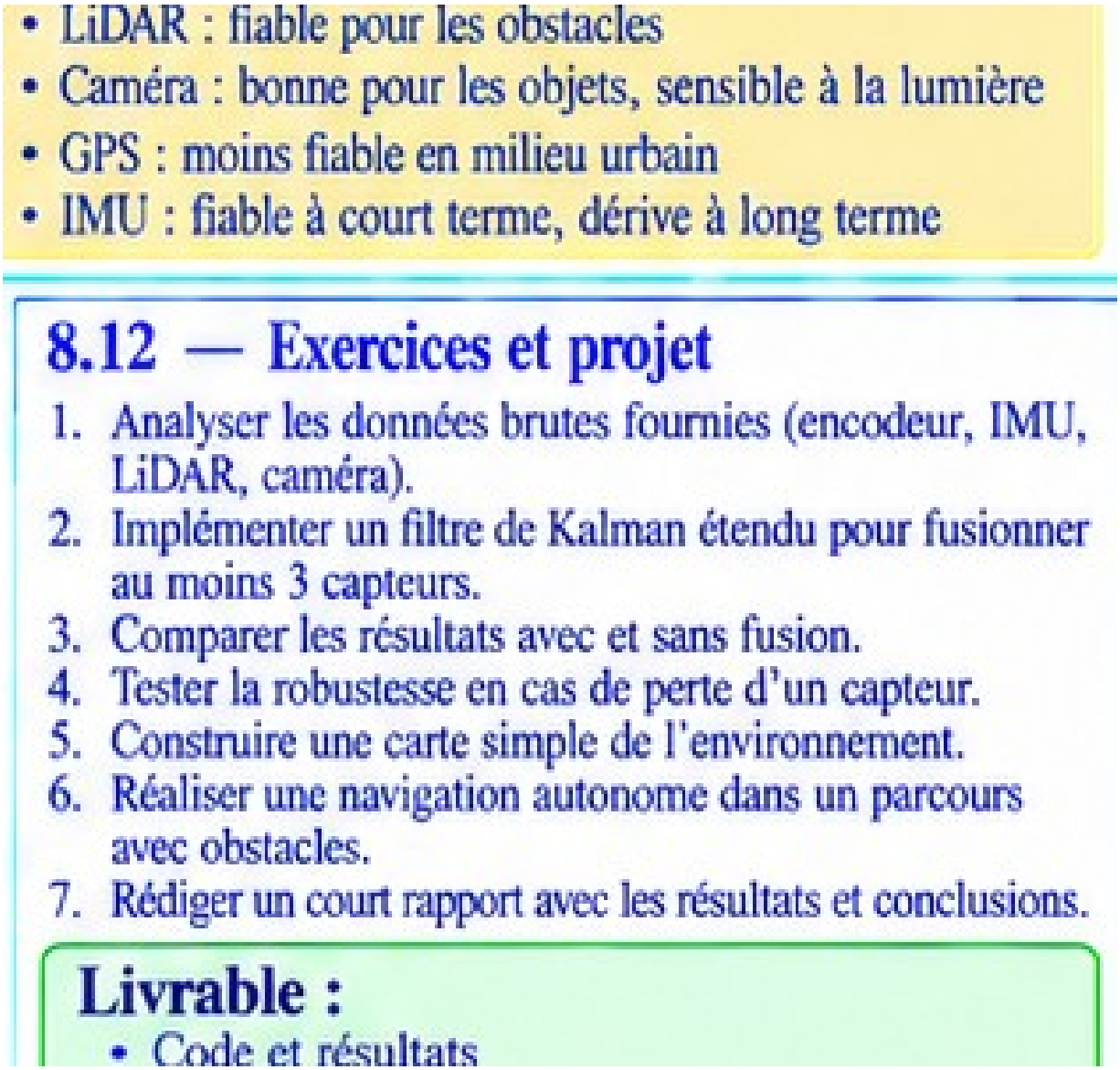
Perte GPS, capteur absent, valeur aberrante et environnement dynamique exigent des réactions explicites.

IMAGE RÉALISTE — NAVIGATION AUTONOME



L’estimation d’état devient utile lorsqu’elle soutient une trajectoire sûre et vérifiable.

EXERCICES ET PROJET



- LiDAR : fiable pour les obstacles
- Caméra : bonne pour les objets, sensible à la lumière
- GPS : moins fiable en milieu urbain
- IMU : fiable à court terme, dérive à long terme

8.12 — Exercices et projet

1. Analyser les données brutes fournies (encodeur, IMU, LiDAR, caméra).
2. Implémenter un filtre de Kalman étendu pour fusionner au moins 3 capteurs.
3. Comparer les résultats avec et sans fusion.
4. Tester la robustesse en cas de perte d'un capteur.
5. Construire une carte simple de l'environnement.
6. Réaliser une navigation autonome dans un parcours avec obstacles.
7. Rédiger un court rapport avec les résultats et conclusions.

Livrable :

- Code et résultats

Le projet demande données, fusion, analyse de robustesse, carte et navigation.

EXEMPLE NUMÉRIQUE — FUSION DE DEUX MESURES

Mesure A : $x_A = 10{,}0$ m avec variance $R_A = 4{,}0$ m².

Mesure B : $x_B = 12{,}0$ m avec variance $R_B = 1{,}0$ m².

Pour deux mesures indépendantes d'une même grandeur, une fusion pondérée par l'inverse des variances donne :

$x_f \approx [(xA/RA)+(xB/RB)] / [(1/RA)+(1/RB)]$.

$x_f \approx [(10/4)+(12/1)] / [(1/4)+1] = 14{,}5/1{,}25 = 11{,}6$ m.

Interprétation : la mesure B influence davantage le résultat car son incertitude déclarée est plus faible.

LABORATOIRE À DISTANCE — FUSION ET PANNE CAPTEUR

1. Simuler encodeurs à 100 Hz, IMU à 200 Hz et LiDAR à 10 Hz.

2. Ajouter timestamps, bruit et biais propres à chaque source.

3. Resynchroniser les mesures dans une base temporelle commune.

4. Comparer odométrie seule, IMU seule et fusion.

5. Introduire une perte LiDAR pendant plusieurs secondes.

6. Augmenter l’incertitude pendant la période sans correction absolue.

7. Réintroduire le LiDAR et vérifier que l’estimation converge sans saut non maîtrisé.

8. Injecter une valeur aberrante et définir un critère de rejet ou de réduction de confiance.

Leçon 8 — Fusion multicapteur et estimation de pose

Objectifs

- Comprendre la grandeur réellement observée.
- Relier mesure, repère, timestamp et incertitude.

- Détecter une donnée incohérente et définir une réaction.



Planche ROB-103.8 — grande lisibilité.

Théorie fondamentale

La fusion combine des capteurs complémentaires sans prétendre supprimer l’incertitude. Une source rapide mais dérivante peut être corrigée par une source plus absolue.

Exemple résolu

Une mesure plus précise reçoit généralement davantage de poids qu’une mesure très incertaine.

Laboratoire à distance

Simuler des mesures, ajouter bruit/biais/latence, appliquer la méthode de la leçon, tracer résultat et incertitude, puis injecter une faute et documenter la réaction.

Diagnostic

- Unité correcte ?

- Repère correct ?
- Timestamp récent ?
- Valeur physiquement plausible ?
- Incertitude cohérente ?

Autoévaluation corrigée

Q. Pourquoi une mesure seule ne suffit-elle pas ?

Corrigé : Il faut unité, repère, timestamp, qualité et incertitude.

Q. Que signifie STALE ?

Corrigé : La donnée est trop ancienne pour l’usage prévu.

Q. Pourquoi conserver la covariance ?

Corrigé : Pour représenter explicitement l’incertitude.

Storyboard du film pédagogique

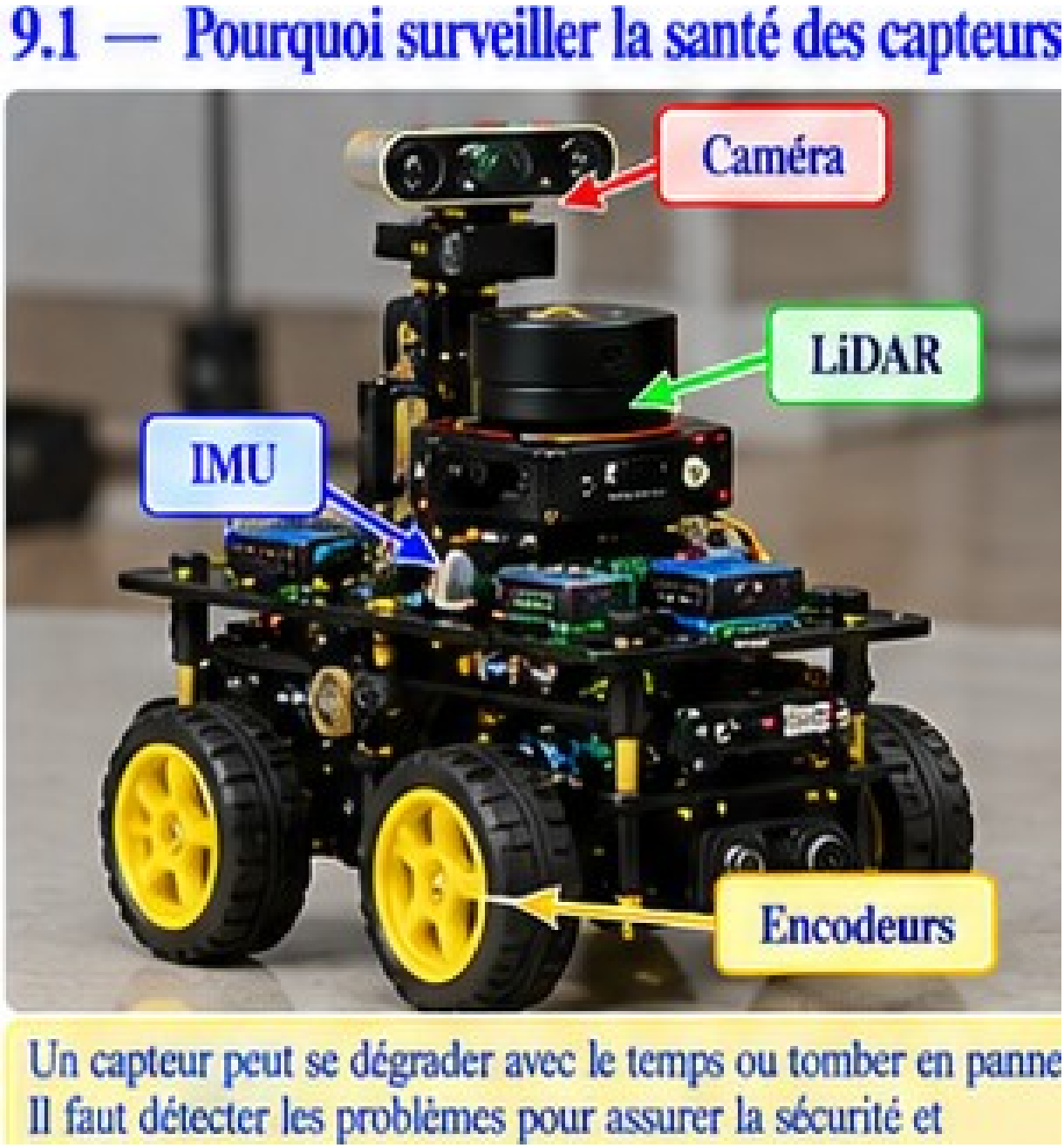
Montrer le capteur → afficher la mesure brute → introduire bruit/biais → calibrer/estimer → visualiser l’incertitude → injecter une panne → laisser l’étudiant diagnostiquer avant la correction.

COLLÈGE DU SACRÉ-CŒUR DE GATINEAU • ROB-103

ATLAS VISUEL — SANTÉ DES CAPTEURS ET MODES DÉGRADÉS

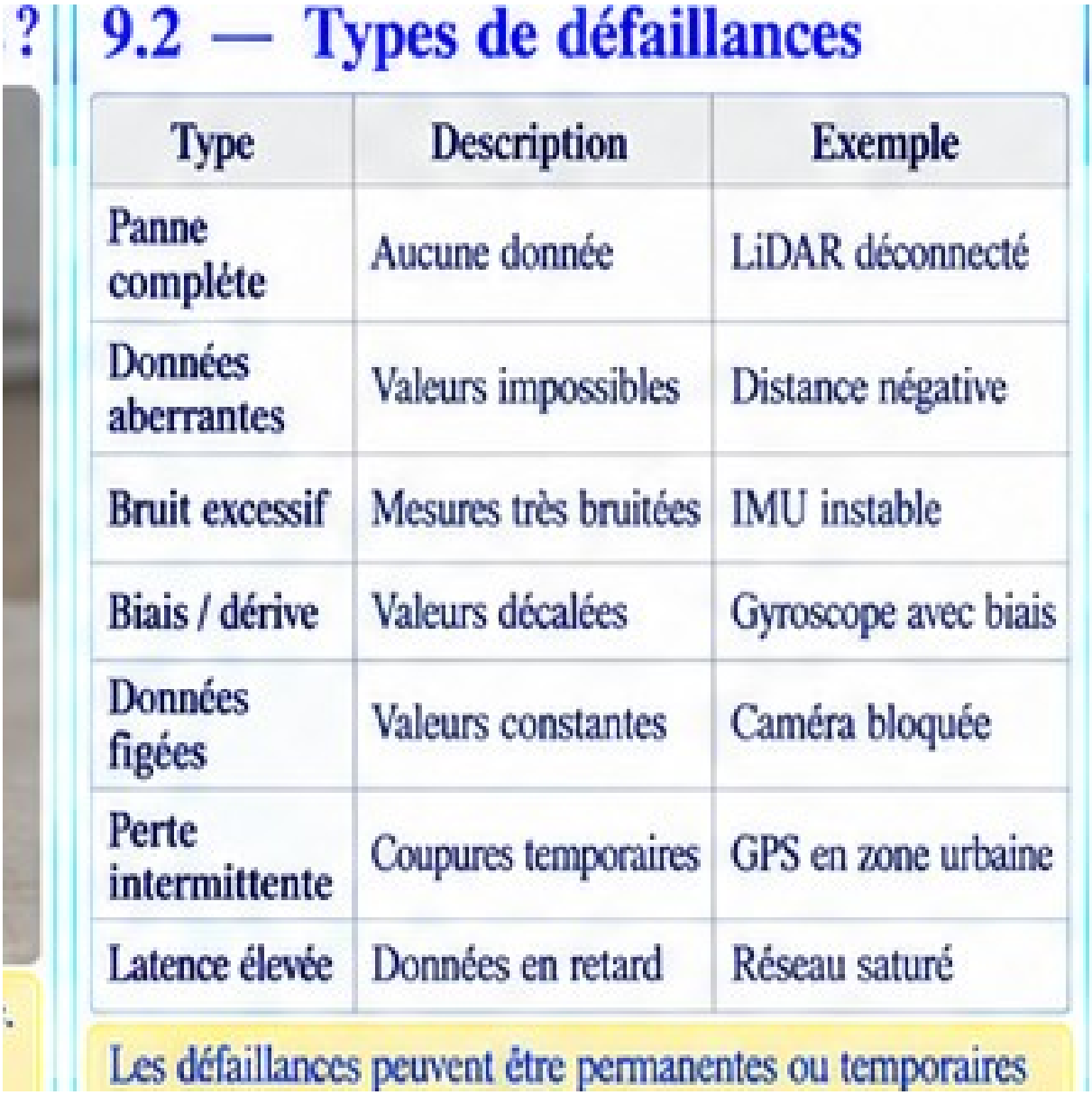
Angelo Nibizi • Nibizi Technologies • Édition 2026

IMAGE RÉALISTE — ROBOT ET CAPTEURS À SURVEILLER



Un système autonome doit surveiller en permanence la disponibilité et la qualité de ses sources.

TABLEAU VISUEL — TYPES DE DÉFAILLANCES



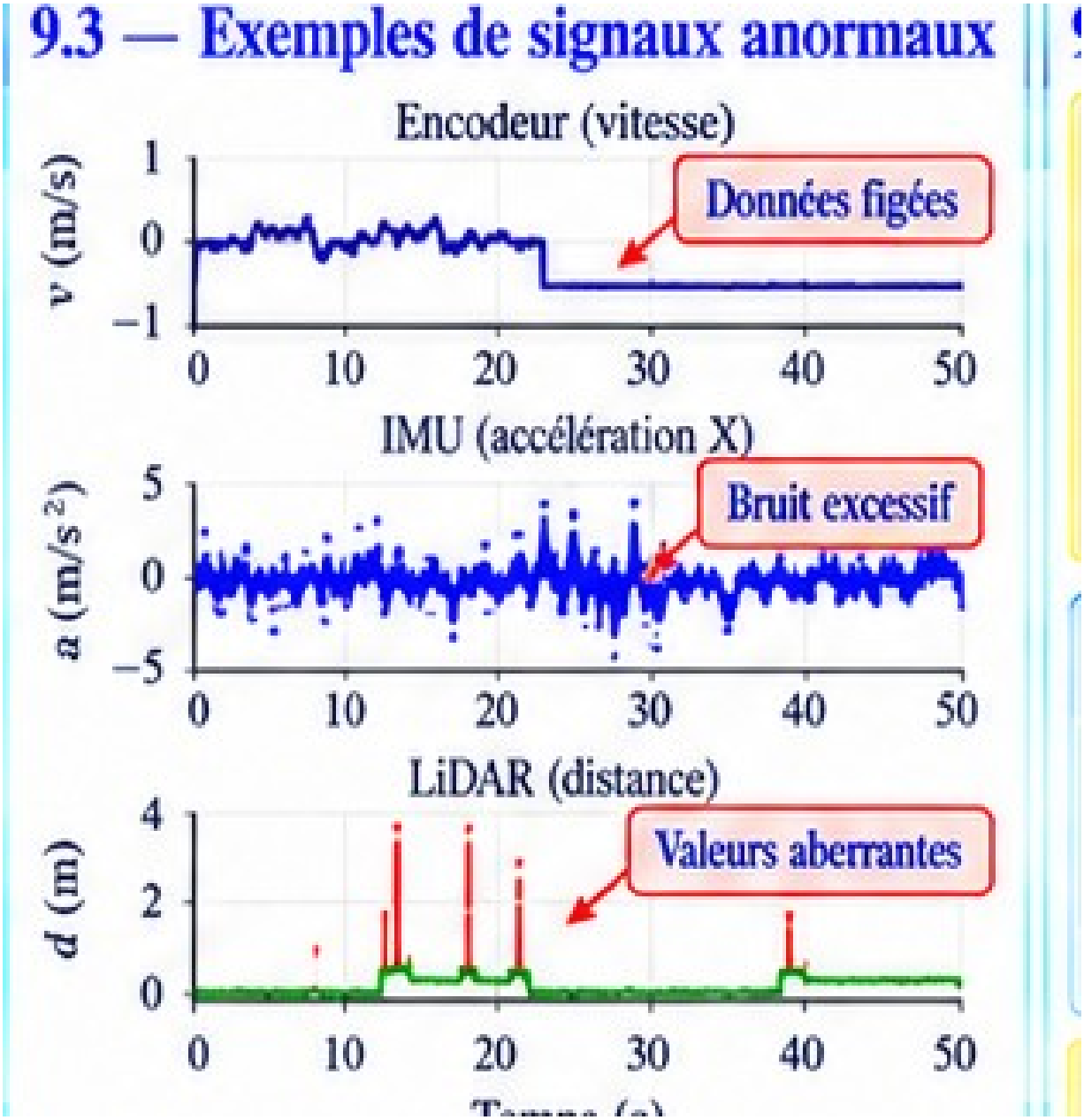
9.2 — Types de défaillances

Type	Description	Exemple
Panne complète	Aucune donnée	LiDAR déconnecté
Données aberrantes	Valeurs impossibles	Distance négative
Bruit excessif	Mesures très bruitées	IMU instable
Biais / dérive	Valeurs décalées	Gyroscope avec biais
Données figées	Valeurs constantes	Caméra bloquée
Perte intermittente	Coupures temporaires	GPS en zone urbaine
Latence élevée	Données en retard	Réseau saturé

Les défaillances peuvent être permanentes ou temporaires

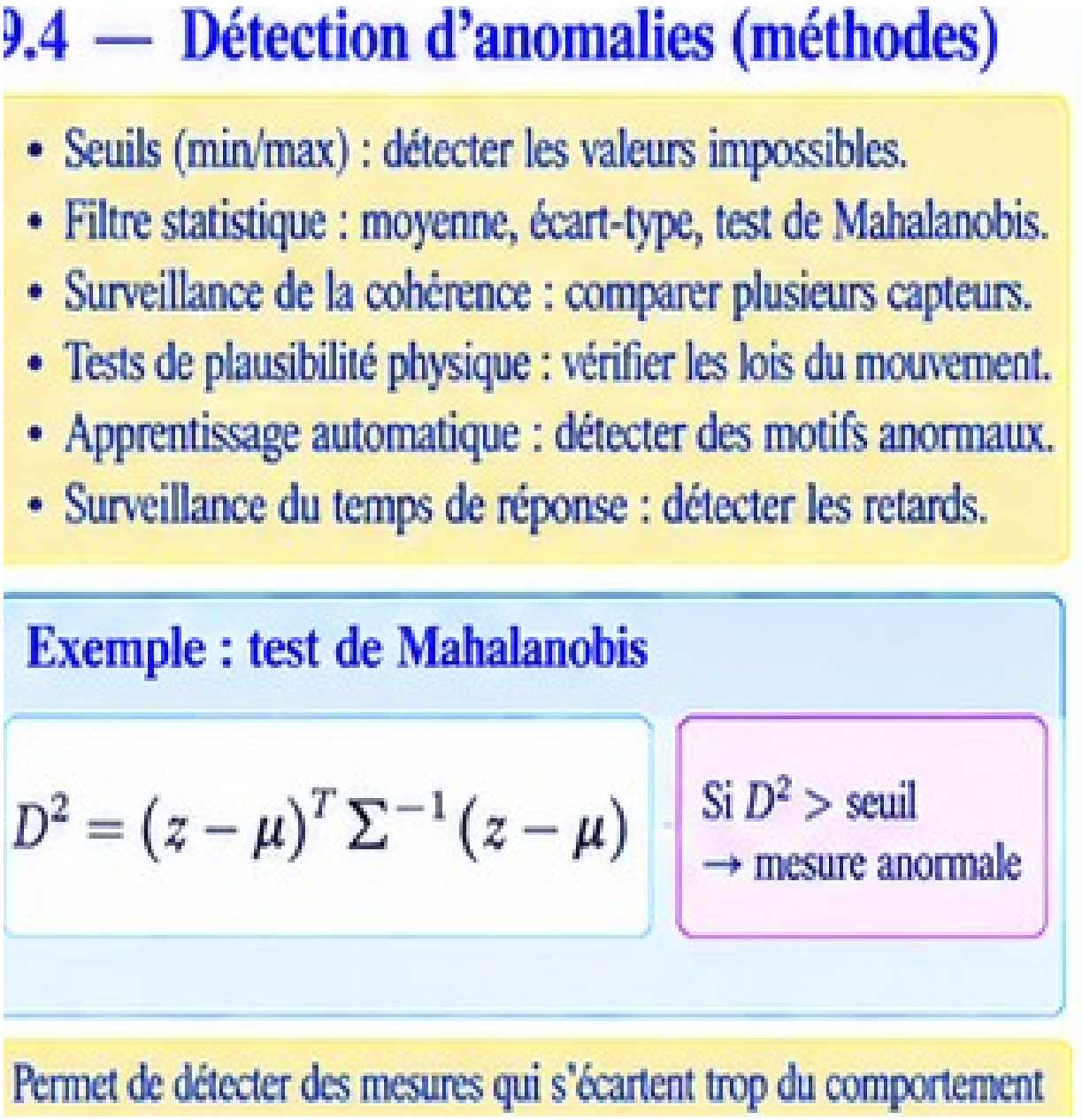
Distinguer panne complète, valeur aberrante, bruit excessif, biais, donnée figée et latence.

GRAPHIQUES — SIGNAUX ANORMAUX



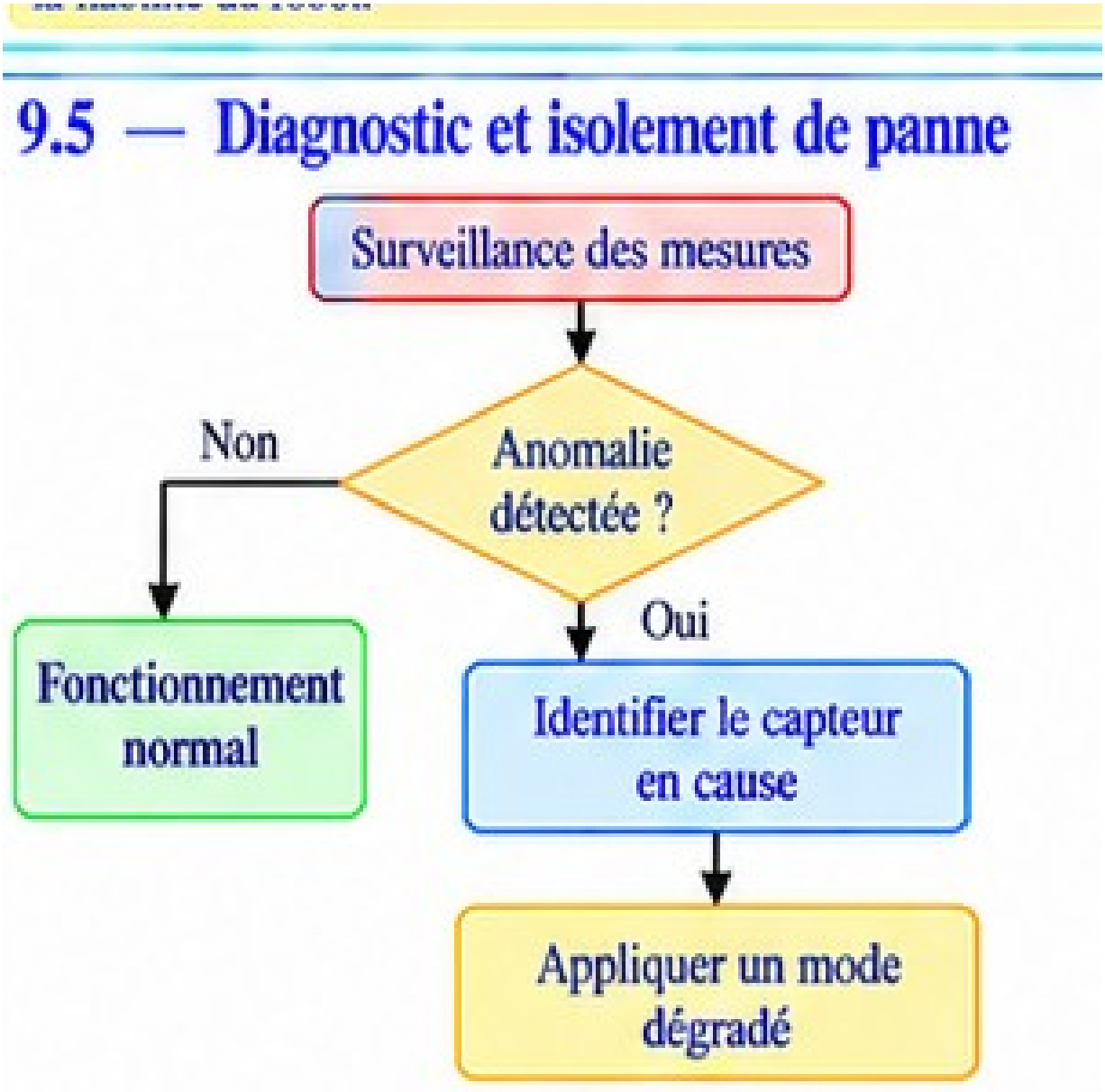
Une panne peut apparaître comme valeur figée, bruit accru ou pics aberrants.

MÉTHODES — DÉTECTION D'ANOMALIES



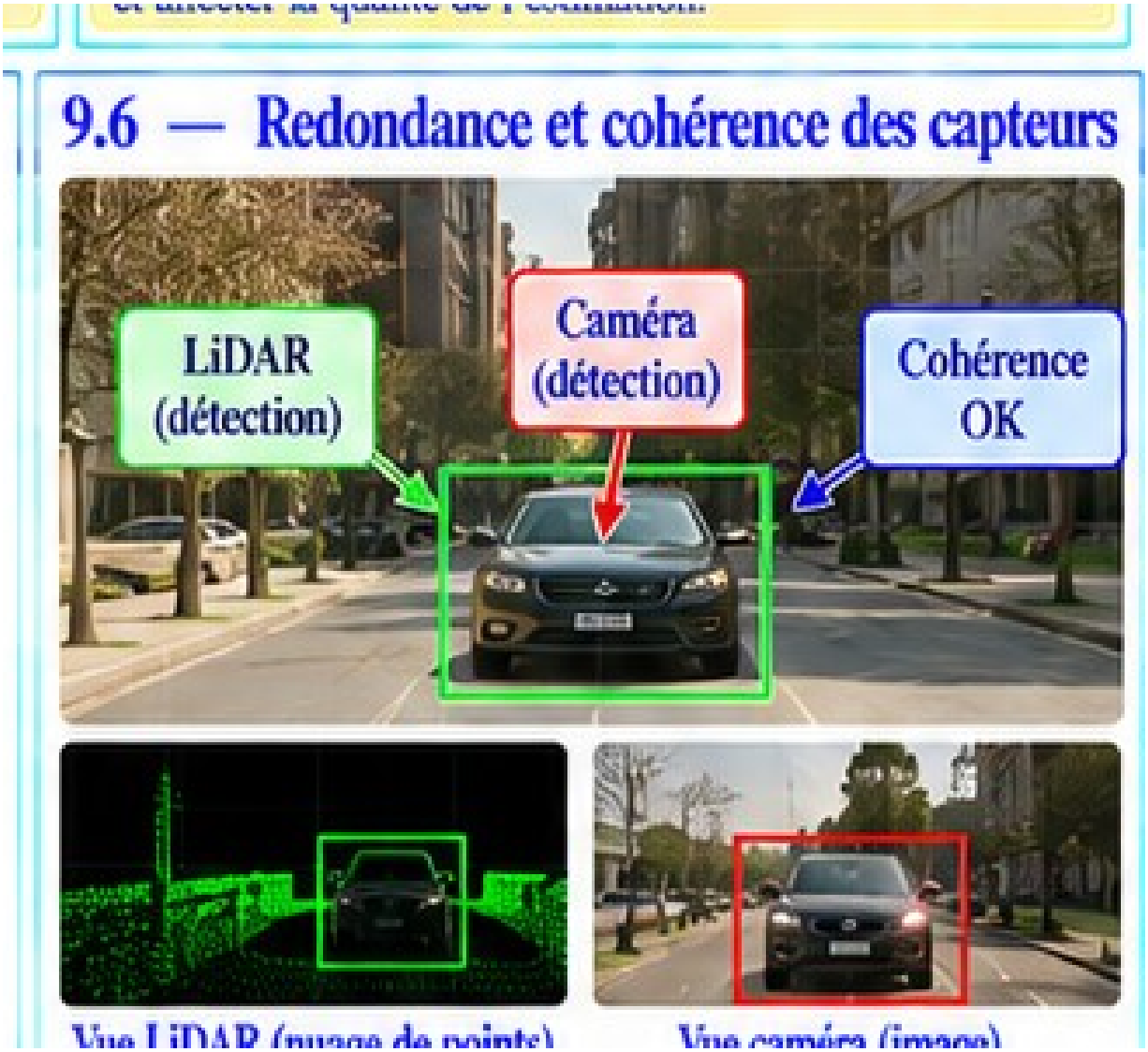
Seuils, cohérence, statistiques et plausibilité physique répondent à des défauts différents.

SCHÉMA — DIAGNOSTIC ET ISOLEMENT



Détecter l’anomalie ne suffit pas : il faut identifier la source et choisir une réaction.

IMAGE — REDONDANCE ET COHÉRENCE



Comparer plusieurs capteurs aide à identifier une mesure incohérente.

TABLEAU — MODES DÉGRADÉS

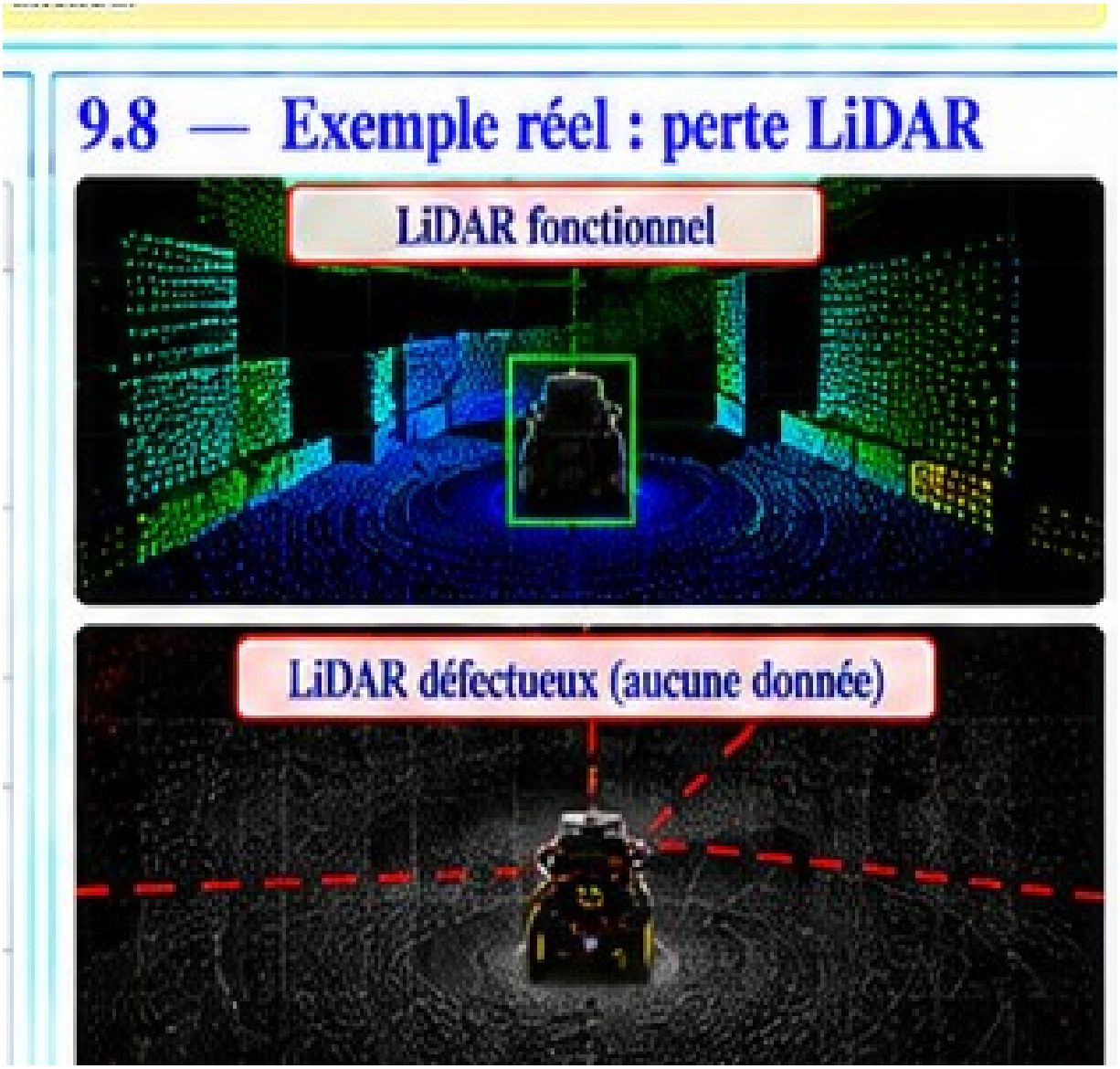


9.7 — Modes dégradés (exemples)

Capteur perdu	Solution (mode dégradé)
LiDAR	Utiliser caméra + odométrie Réduire la vitesse Maintenir une distance de sécurité
Caméra	Utiliser LiDAR + odométrie Désactiver la détection d'objets visuels
GPS	Utiliser SLAM (LiDAR/caméra)
IMU	Se fier aux encodeurs + LiDAR Augmenter la covariance
Encodeurs	Utiliser IMU + LiDAR Réduire la précision, mais continuer

La perte d'un capteur doit conduire à une stratégie définie plutôt qu'à un comportement improvisé.

IMAGE — PERTE LiDAR



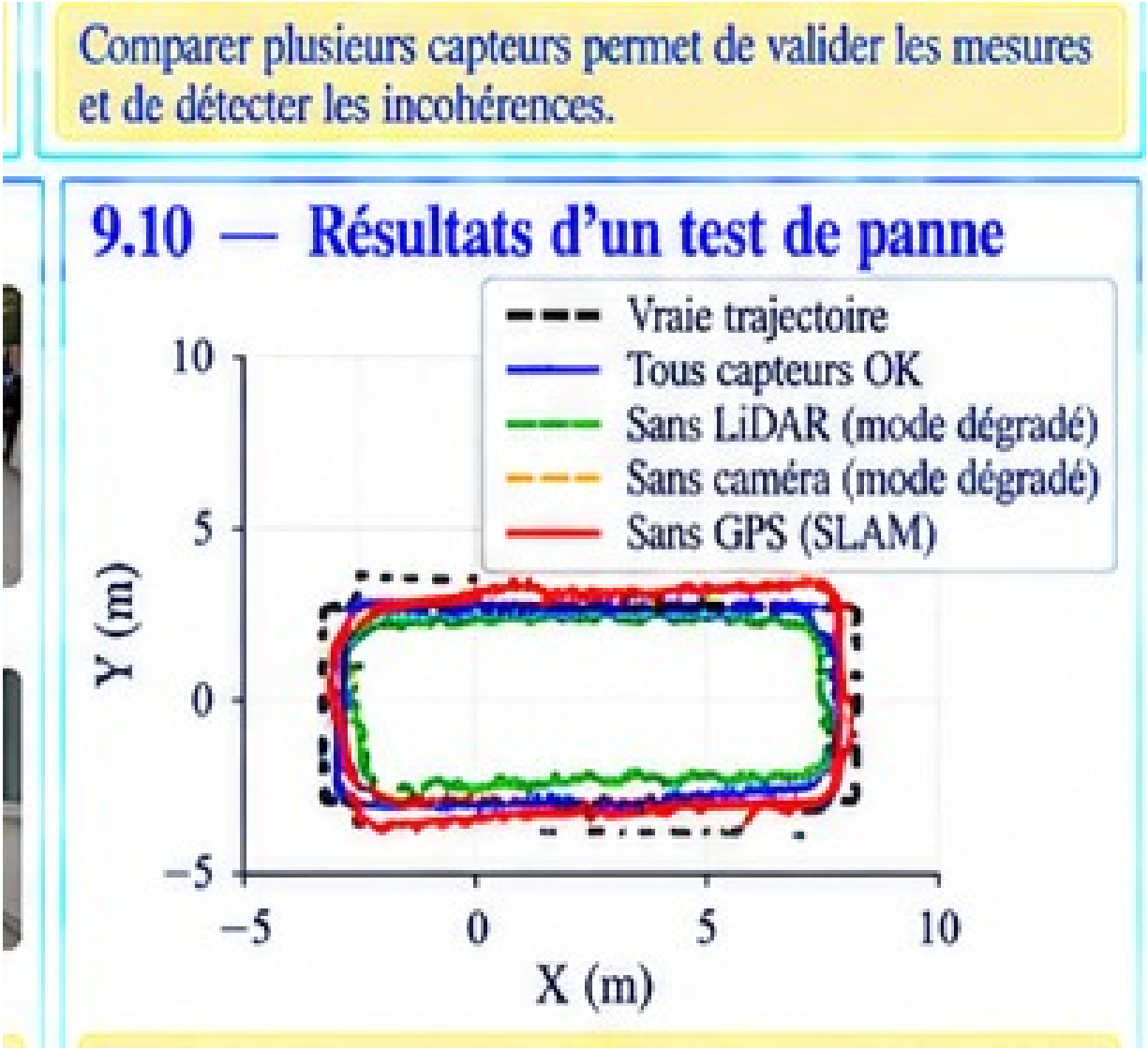
Le robot doit détecter l'absence de données et basculer vers les sources encore disponibles.

IMAGES — TESTS DE ROBUSTESSE



Lumière, brouillard, obstacles dynamiques et intérieur doivent faire partie des scénarios de validation.

GRAPHIQUE — RÉSULTATS APRÈS PANNE



Un mode dégradé peut préserver la mission avec une précision moindre et une incertitude plus élevée.

TABLEAU — INDICATEURS DE SANTÉ

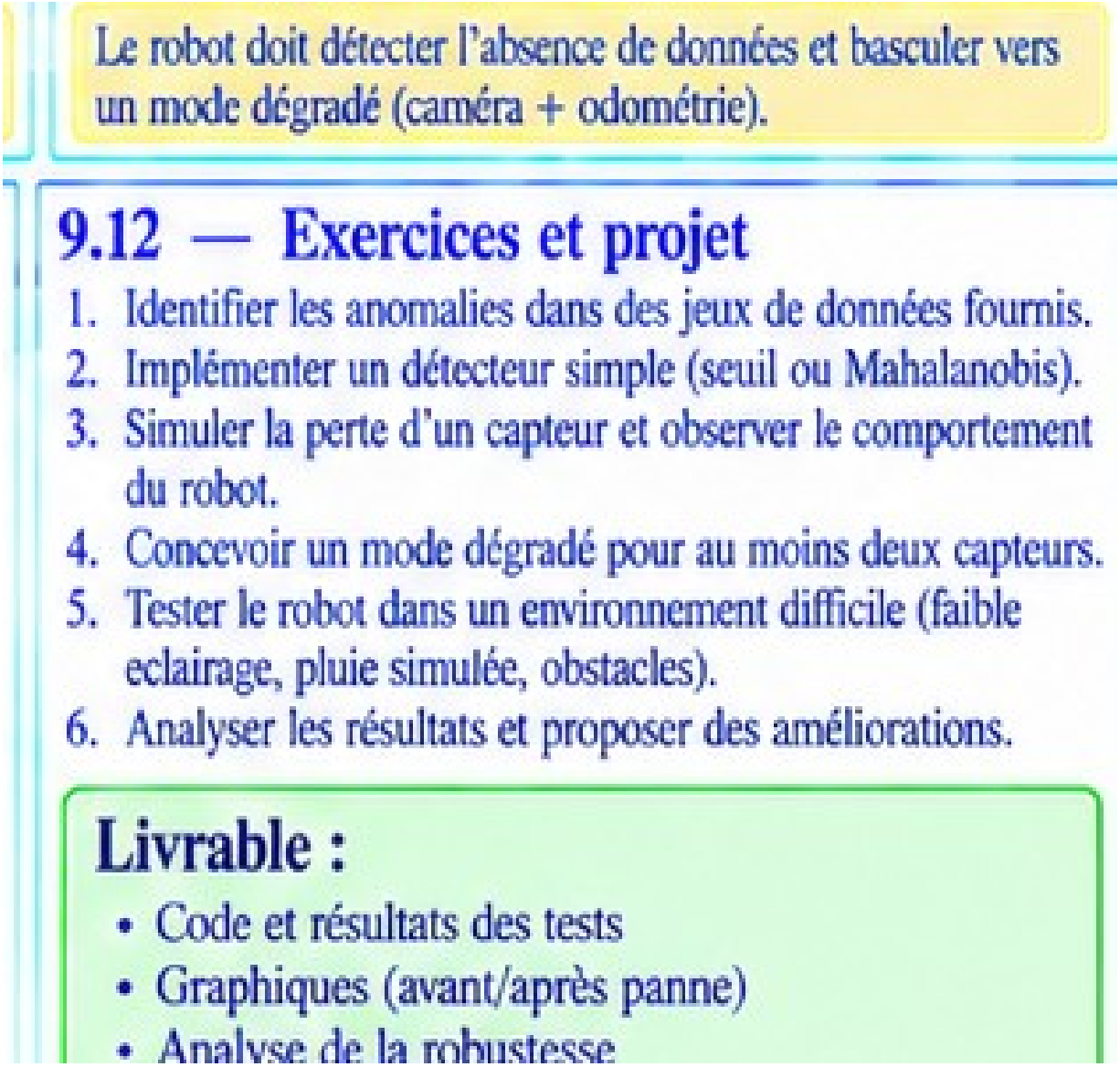
Un mode dégradé permet de poursuivre la mission même en cas de panne d'un capteur.

9.11 — Indicateurs de santé des capteurs

Capteur	Indicateurs	Seuil typique
Encodeurs	Vitesse, incohérence A/B	$\lvert\Delta v\rvert > 0{,}5$ m/s
IMU	Bruit, biais, température	$\sigma > 0{,}5$ m/s^2
LiDAR	Nombre de points, distance max	< 100 pts
Caméra	Luminosité, détection d'objets	Image trop sombre
GPS	Nombre de satellites, DOP	DOP > 5
Système	Latence, paquets perdus	> 10 % perdus

Chaque capteur doit avoir des indicateurs, seuils et timeouts explicitement définis.

EXERCICES ET PROJET



Le robot doit détecter l'absence de données et basculer vers un mode dégradé (caméra + odométrie).

9.12 — Exercices et projet

1. Identifier les anomalies dans des jeux de données fournis.
2. Implémenter un détecteur simple (seuil ou Mahalanobis).
3. Simuler la perte d'un capteur et observer le comportement du robot.
4. Concevoir un mode dégradé pour au moins deux capteurs.
5. Tester le robot dans un environnement difficile (faible eclairage, pluie simulée, obstacles).
6. Analyser les résultats et proposer des améliorations.

Livrable :

- Code et résultats des tests
- Graphiques (avant/après panne)
- Analyse de la robustesse

Le projet exige injection de fautes, détection, isolement, mode dégradé et analyse de robustesse.

CONTRAT DE SANTÉ D'UN CAPTEUR — TEXTE GRANDE LISIBILITÉ

État OK : donnée récente, dans la plage physique et cohérente avec les autres observations.

État NOISY : variance ou dispersion supérieure à la limite définie.

État BIASED : décalage systématique détecté par comparaison à une référence ou à d’autres capteurs.

État STALE : dernière donnée plus ancienne que le timeout autorisé.

État ABSENT : aucune donnée reçue.

État INVALID : valeur impossible, format incorrect ou test de plausibilité échoué.

État DEGRADED : le système continue avec moins de sources et augmente explicitement son incertitude ou réduit ses performances.

LABORATOIRE À DISTANCE — INJECTION DE FAUTES

1. Simuler LiDAR, IMU, encodeurs et caméra avec timestamps.

2. Geler la valeur d’un encodeur pendant 3 s.

3. Ajouter un biais progressif au gyroscope.

4. Injecter des valeurs LiDAR physiquement impossibles.

5. Arrêter complètement le flux caméra.

6. Détecter et classer chaque faute.

7. Basculer vers un mode dégradé approprié.

8. Augmenter la covariance ou réduire la vitesse maximale lorsque la qualité de perception diminue.

9. Rétablir le capteur et vérifier une récupération contrôlée.

Leçon 9 — Détection de défauts et modes dégradés

Objectifs

- Comprendre la grandeur réellement observée.
- Relier mesure, repère, timestamp et incertitude.

- Détecter une donnée incohérente et définir une réaction.

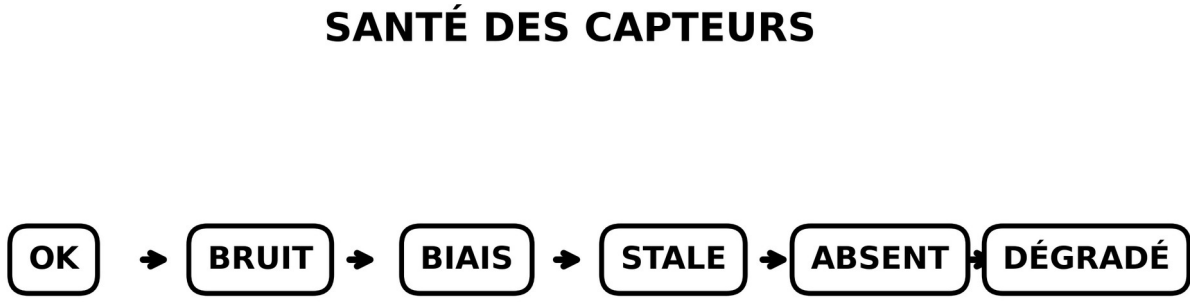


Planche ROB-103.9 — grande lisibilité.

Théorie fondamentale

Une donnée peut être présente mais inutilisable : trop ancienne, hors plage, incohérente ou physiquement impossible. Le système doit qualifier sa santé.

Exemple résolu

LiDAR attendu à 10 Hz, aucune donnée depuis 0,8 s : la dernière mesure existe mais doit être déclarée STALE selon le timeout.

Laboratoire à distance

Simuler des mesures, ajouter bruit/biais/latence, appliquer la méthode de la leçon, tracer résultat et incertitude, puis injecter une faute et documenter la réaction.

Diagnostic

- Unité correcte ?
- Repère correct ?

- Timestamp récent ?
- Valeur physiquement plausible ?
- Incertitude cohérente ?

Autoévaluation corrigée

Q. Pourquoi une mesure seule ne suffit-elle pas ?

Corrigé : Il faut unité, repère, timestamp, qualité et incertitude.

Q. Que signifie STALE ?

Corrigé : La donnée est trop ancienne pour l’usage prévu.

Q. Pourquoi conserver la covariance ?

Corrigé : Pour représenter explicitement l’incertitude.

Storyboard du film pédagogique

Montrer le capteur → afficher la mesure brute → introduire bruit/biais → calibrer/estimer → visualiser l’incertitude → injecter une panne → laisser l’étudiant diagnostiquer avant la correction.

COLLÈGE DU SACRÉ-CŒUR DE GATINEAU • ROB-103

ATLAS VISUEL — PROJET INTÉGRATEUR ROB-103

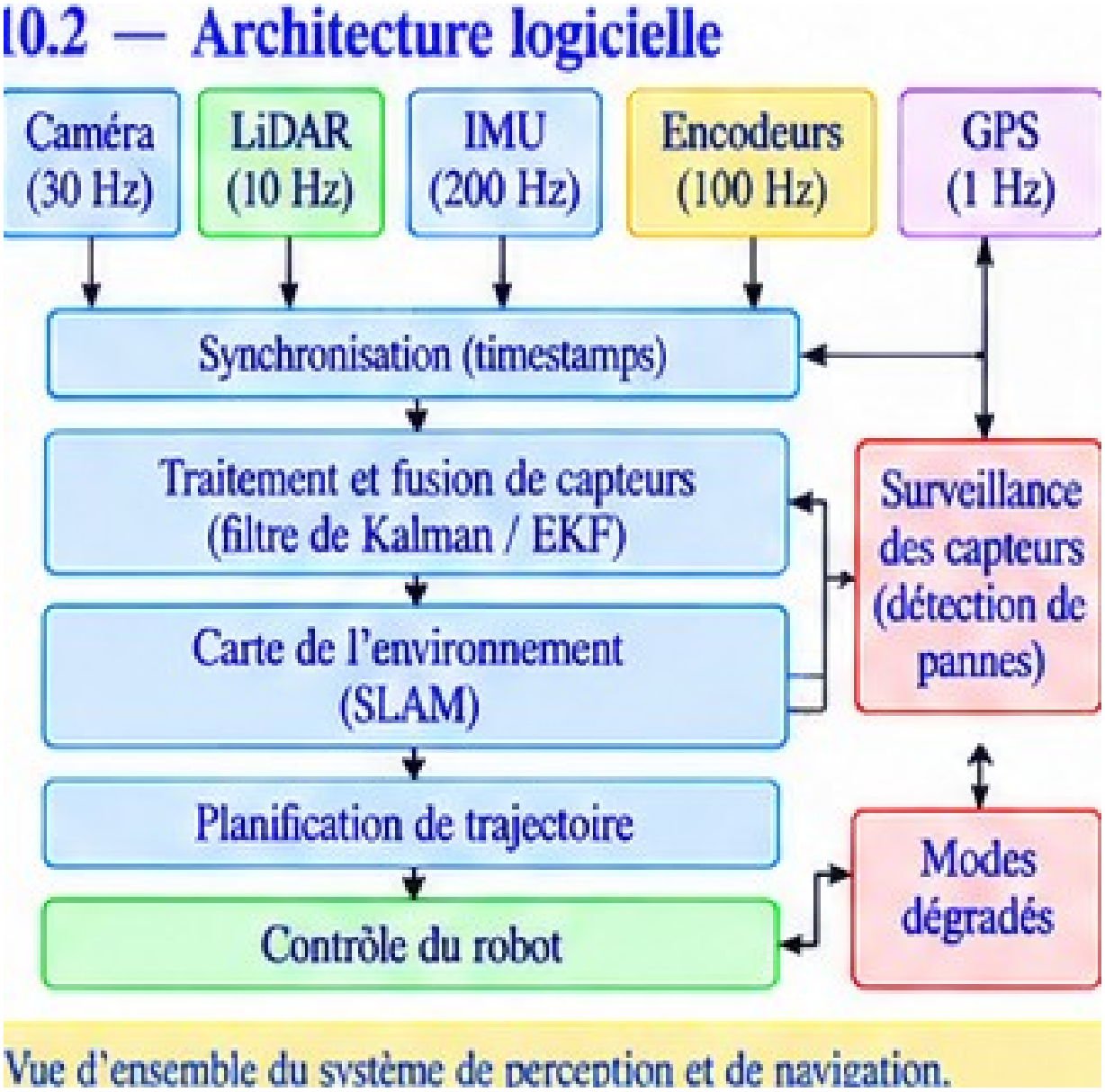
Angelo Nibizi • Nibizi Technologies • Édition 2026

IMAGE RÉALISTE — ROBOT DU PROJET



Tous les capteurs étudiés dans ROB-103 sont réunis sur une même plateforme.

SCHÉMA — ARCHITECTURE LOGICIELLE



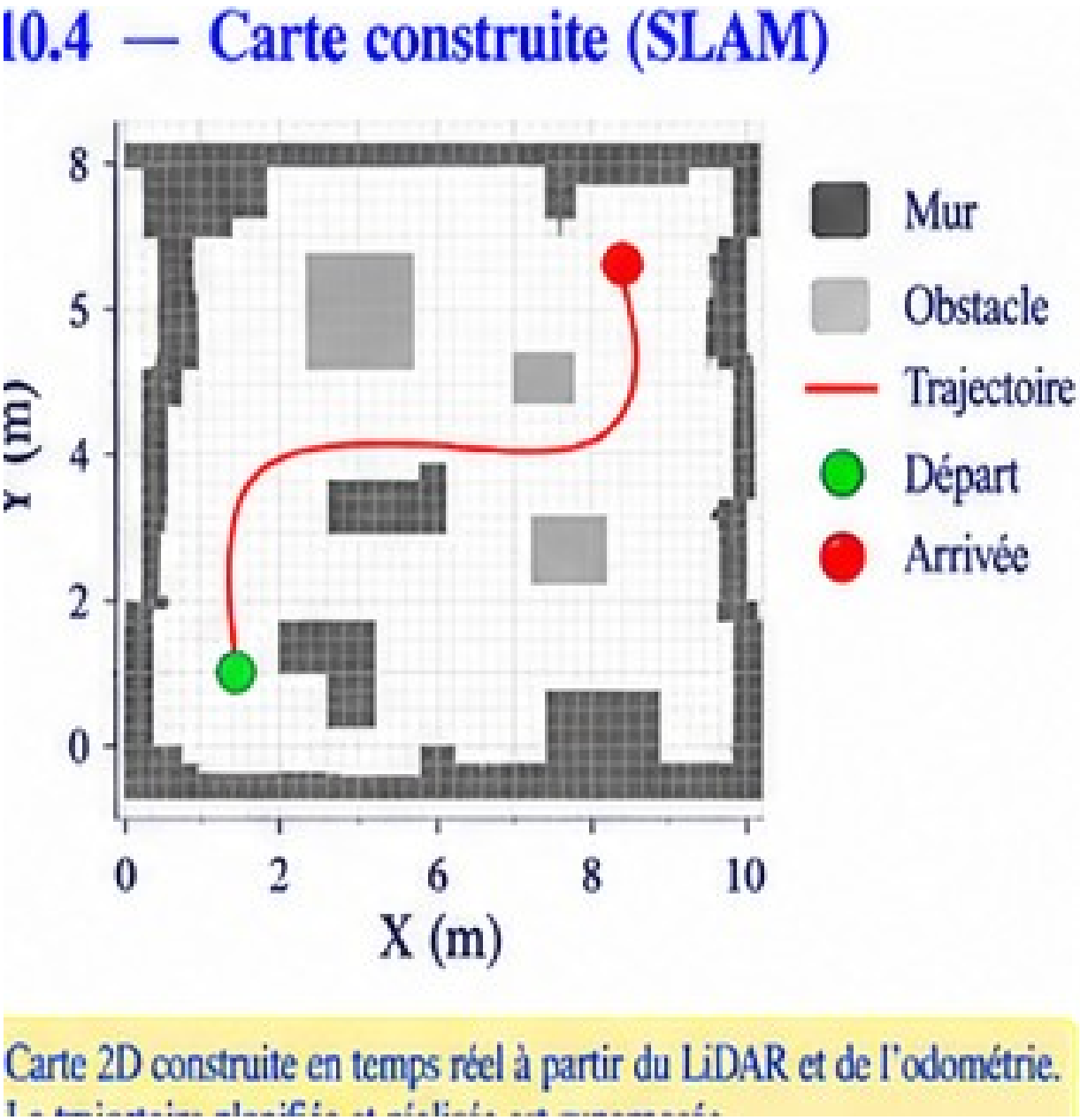
Synchronisation, fusion, SLAM, surveillance, planification et contrôle forment une chaîne complète.

IMAGE RÉALISTE — ENVIRONNEMENT DE TEST



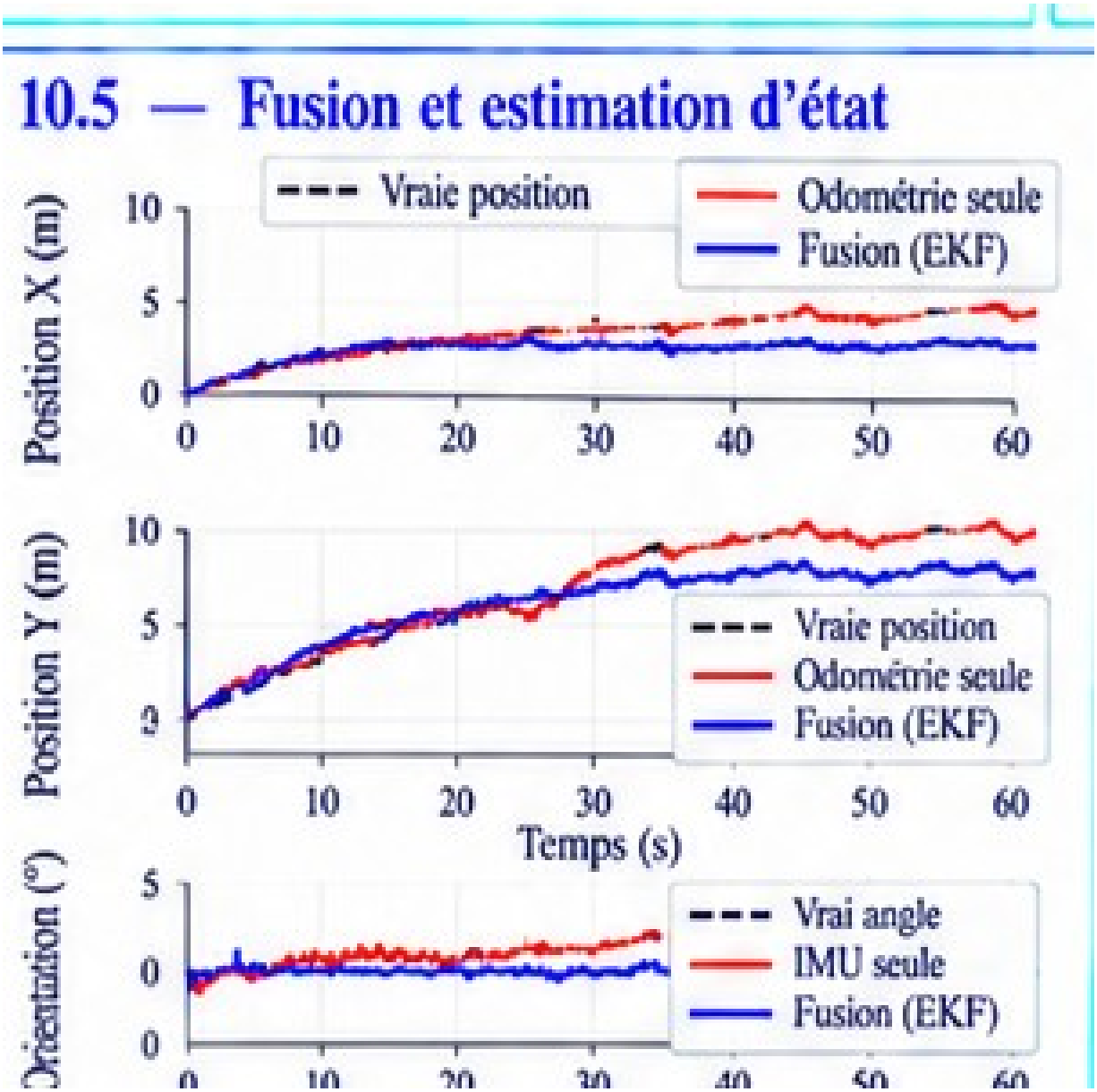
Le parcours contient obstacles et objectifs permettant de vérifier la perception en situation.

CARTE — SLAM ET TRAJECTOIRE



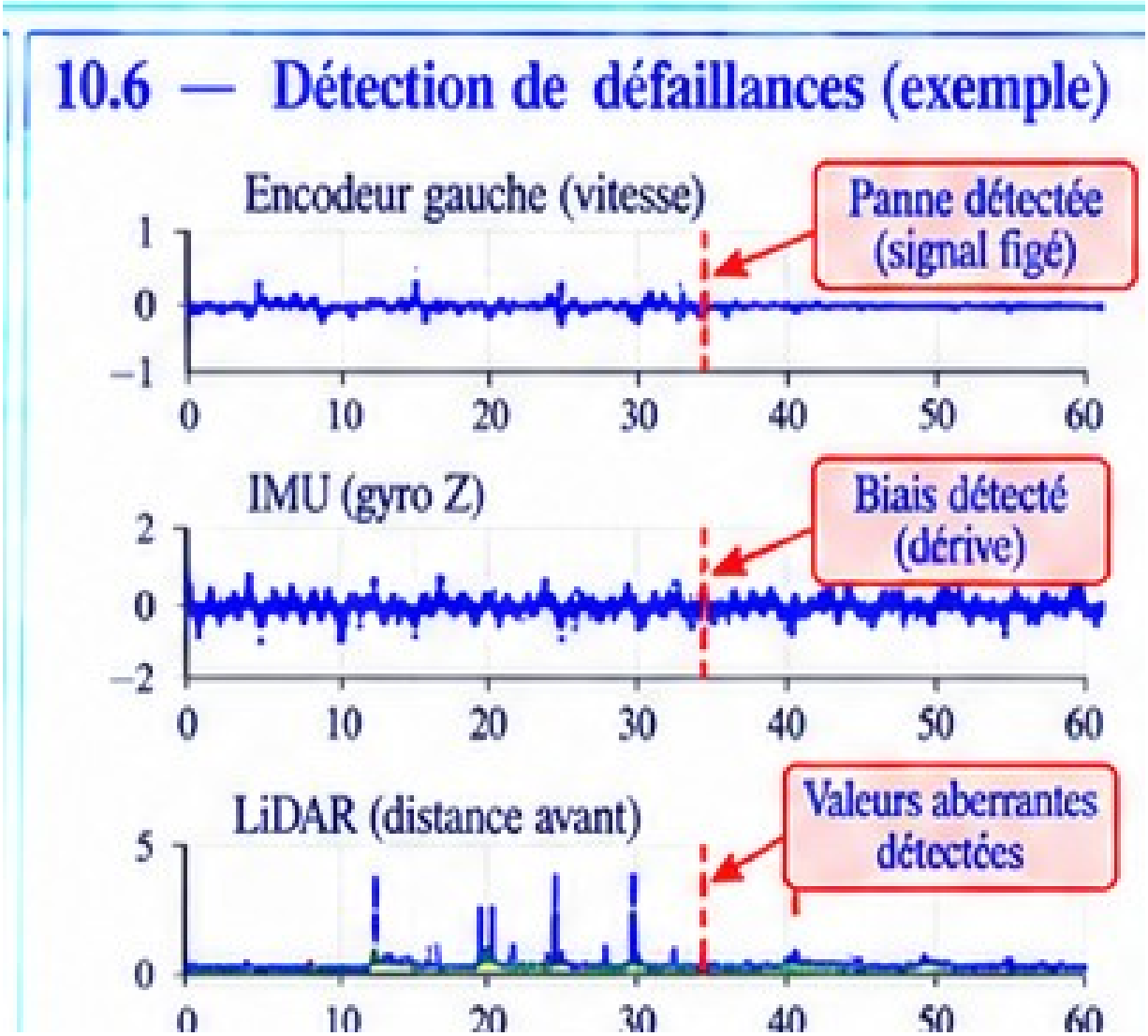
La carte, les obstacles et la trajectoire doivent être cohérents dans le même repère.

GRAPHIQUES — FUSION ET ESTIMATION D’ÉTAT



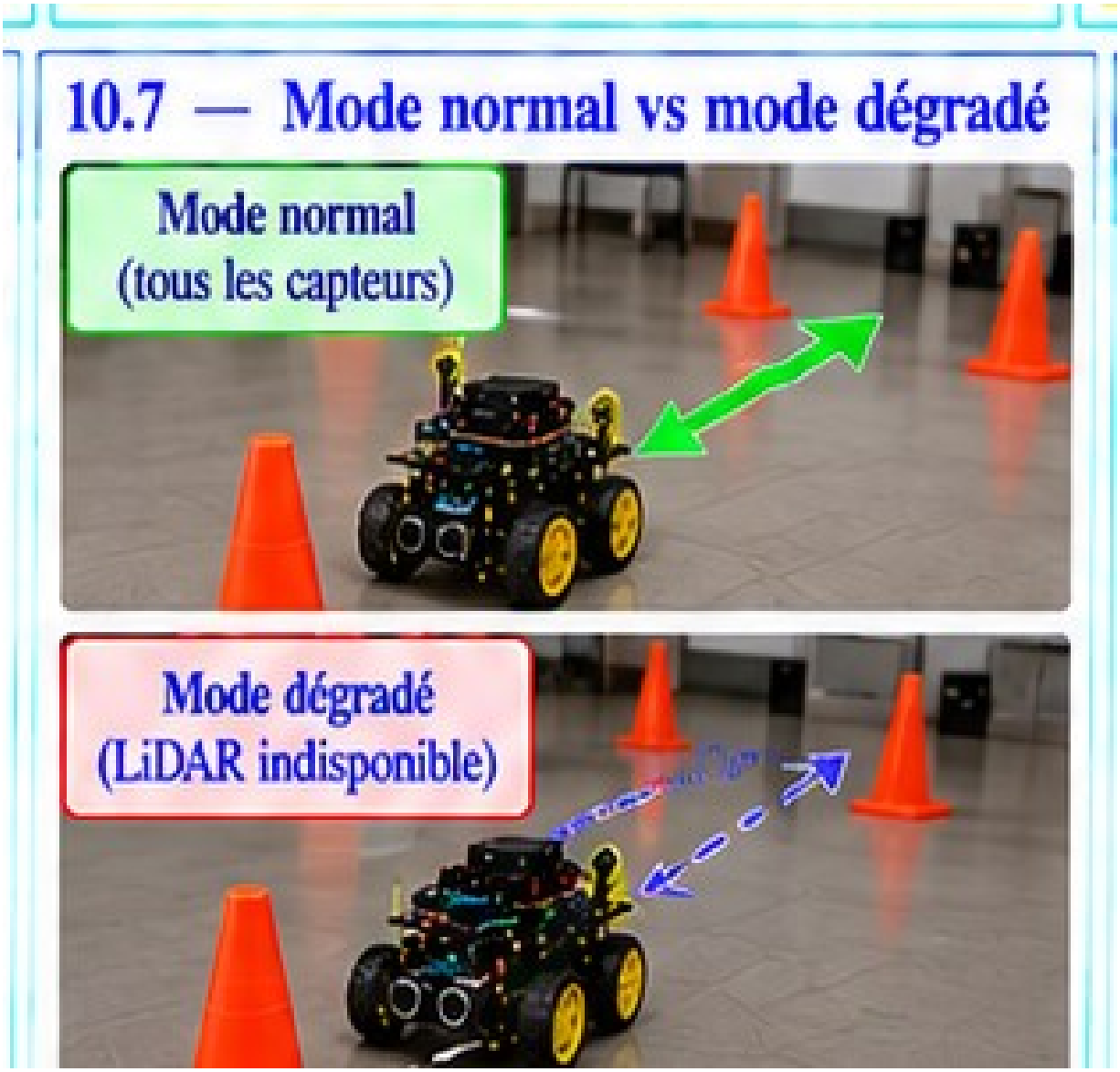
Comparer vérité de référence, odométrie et estimation fusionnée.

GRAPHIQUES — DÉTECTION DE DÉFAILLANCES



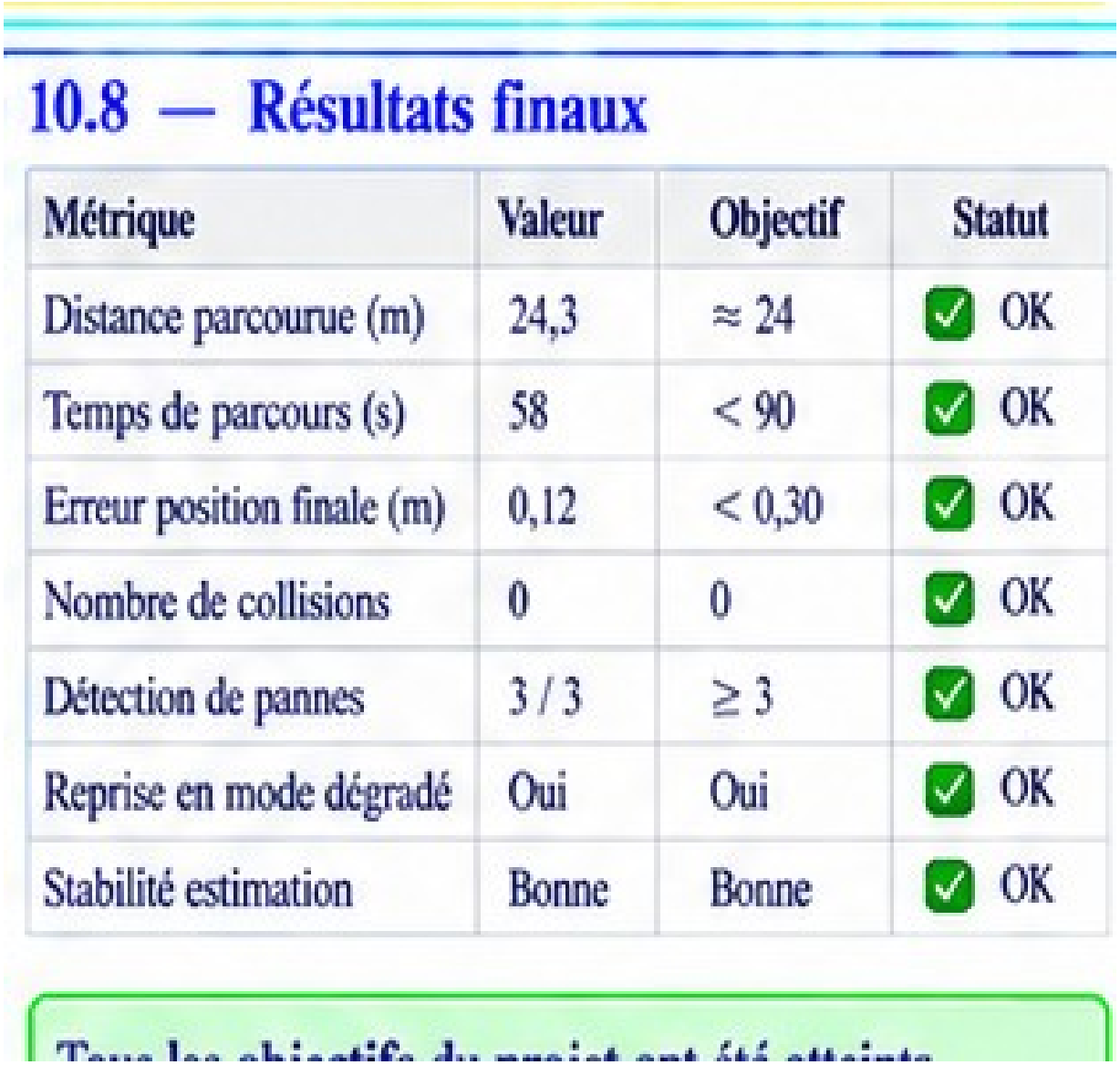
Le système doit détecter signal figé, biais et valeurs aberrantes sans attendre la panne totale.

IMAGES — MODE NORMAL / MODE DÉGRADÉ



La mission continue avec des performances adaptées lorsque certaines sources deviennent indisponibles.

TABLEAU — RÉSULTATS FINAUX



10.8 — Résultats finaux

Métrique	Valeur	Objectif	Statut
Distance parcourue (m)	24,3	≈ 24	✅ OK
Temps de parcours (s)	58	< 90	✅ OK
Erreur position finale (m)	0,12	< 0,30	✅ OK
Nombre de collisions	0	0	✅ OK
Détection de pannes	3 / 3	≥ 3	✅ OK
Reprise en mode dégradé	Oui	Oui	✅ OK
Stabilité estimation	Bonne	Bonne	✅ OK

Les performances doivent être comparées à des critères d'acceptation définis avant le test.

IMAGES — SCÉNARIOS DE ROBUSTESSE



Tester personnes, passage étroit, faible éclairage et obstacles déplacés.

ÉTAPES — RÉALISATION DU PROJET



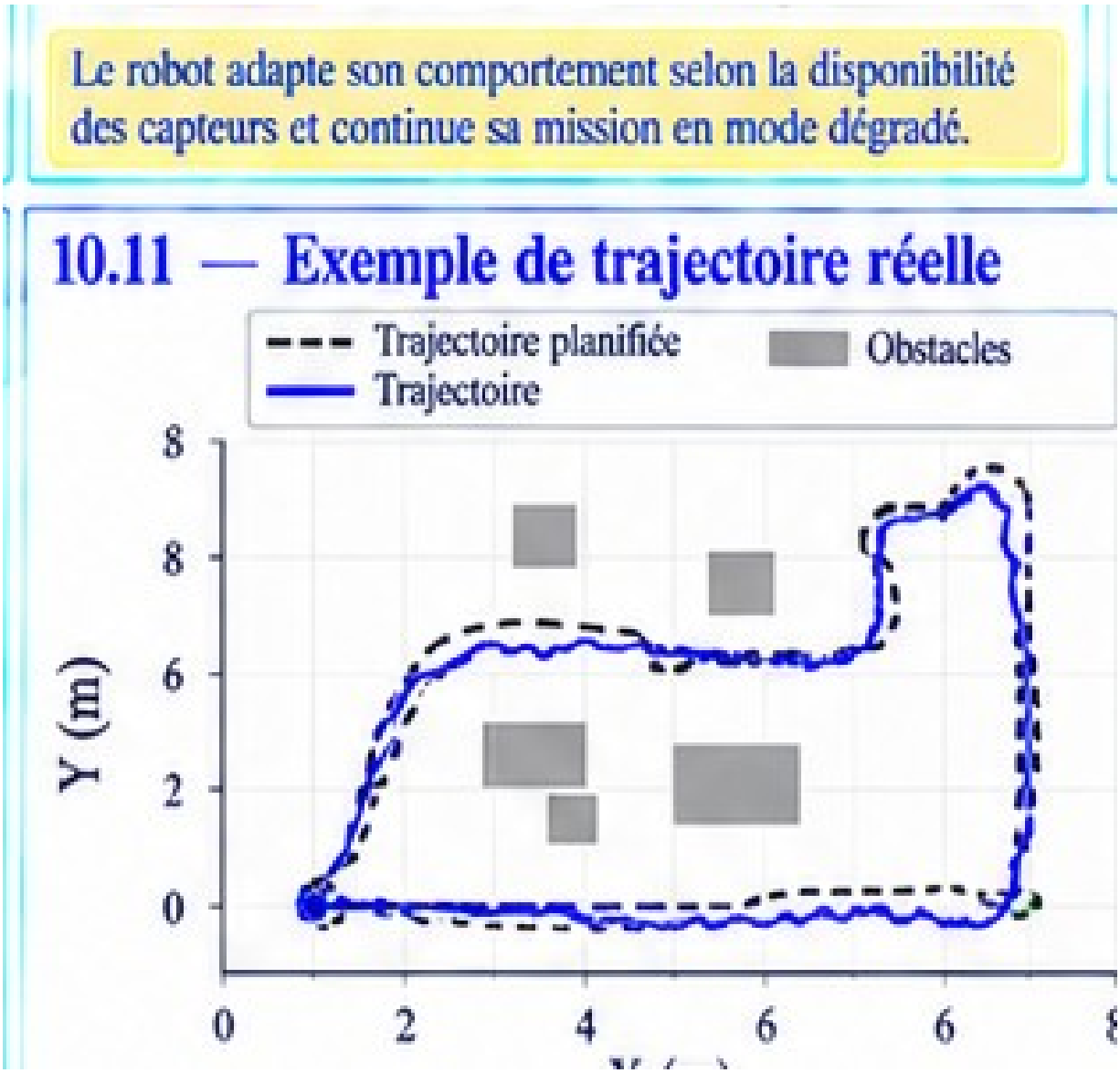
La surveillance des capteurs permet de détecter automatiquement les pannes, les biais et les valeurs aberrantes.

10.10 — Étapes de réalisation

1. Assembler le robot et vérifier tous les capteurs.
2. Calibrer les capteurs (encodeurs, IMU, caméra, LiDAR).
3. Implémenter la synchronisation (timestamps).
4. Développer la fusion de capteurs (EKF).
5. Construire la carte (SLAM).
6. Implémenter la planification de trajectoire.
7. Ajouter la détection de défaillances et les modes dégradés.
8. Tester dans l'environnement réel.
9. Analyser les résultats et rédiger un rapport

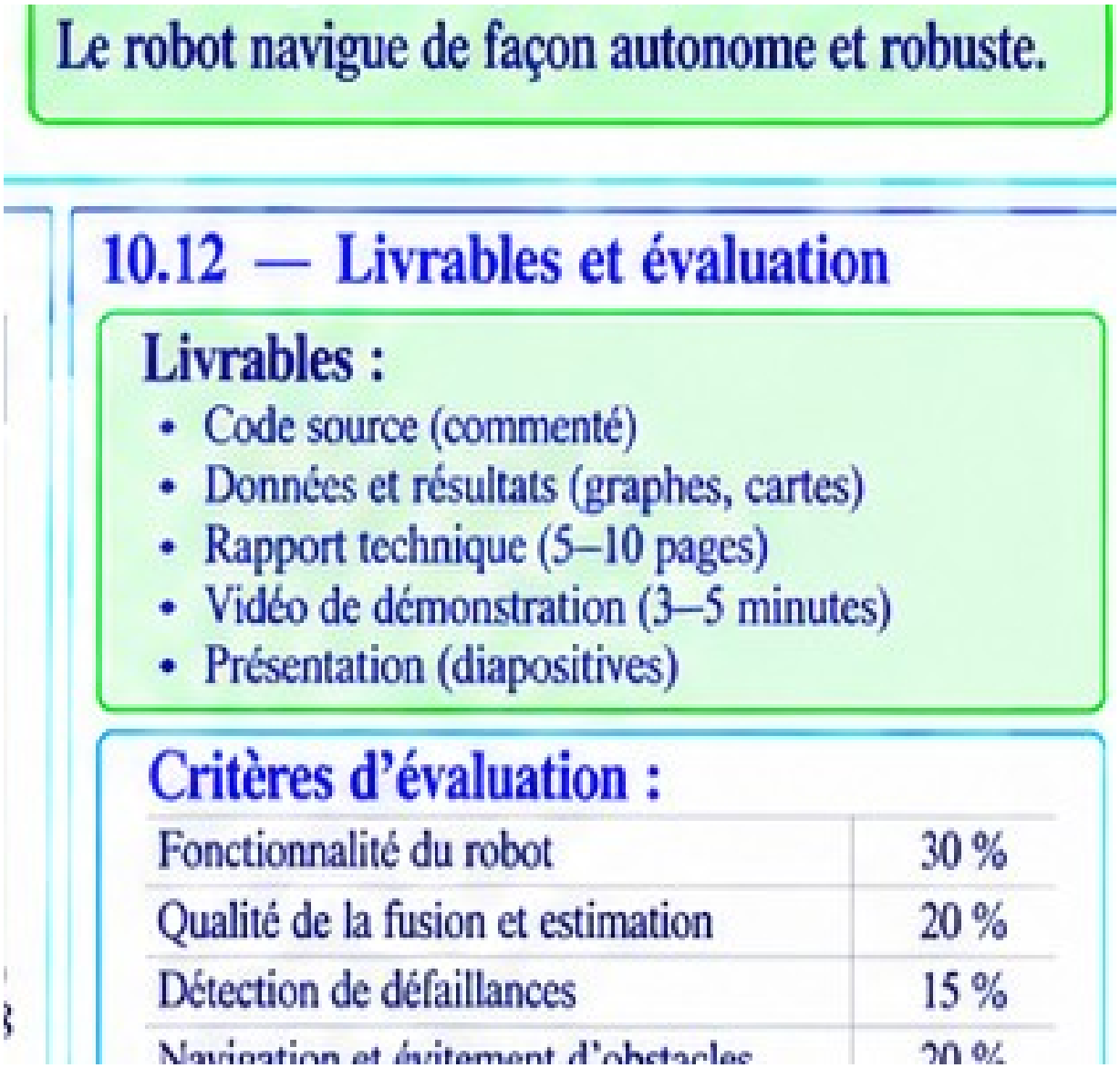
Construire progressivement : matériel, calibration, synchronisation, fusion, SLAM, navigation, fautes et validation.

GRAPHIQUE — TRAJECTOIRE RÉELLE



Comparer trajectoire planifiée et trajectoire réalisée autour des obstacles.

LIVRABLES ET ÉVALUATION



Le robot navigue de façon autonome et robuste.

10.12 — Livrables et évaluation

Livrables :

- Code source (commenté)
- Données et résultats (graphes, cartes)
- Rapport technique (5–10 pages)
- Vidéo de démonstration (3–5 minutes)
- Présentation (diapositives)

Critères d'évaluation :

Fonctionnalité du robot	30 %
Qualité de la fusion et estimation	20 %
Détection de défaillances	15 %
Navigation et évitement d'obstacles	20 %

Le projet doit produire code, données, rapport, vidéo de démonstration et présentation.

SPÉCIFICATION DU PROJET — TEXTE GRANDE LISIBILITÉ

Mission : partir d'une zone A, construire ou utiliser une carte, rejoindre une zone B et éviter les obstacles.

Capteurs minimaux : encodeurs + IMU + une source géométrique (LiDAR ou caméra profondeur).

Chaque message doit posséder timestamp, unité, repère et indicateur de santé.

L’estimateur doit publier pose, vitesse/orientation pertinente et covariance.

Le système doit détecter au moins trois fautes injectées.

En mode dégradé, les limites de vitesse ou marges de sécurité doivent être adaptées à la qualité de perception.

Le test final doit être reproductible et comparé à des critères d’acceptation.

PROTOCOLE DE VALIDATION FINAL

1. SELF_TEST — vérifier disponibilité et plausibilité des capteurs.

2. CALIBRATE — charger/vérifier les calibrations.

3. SYNCHRONIZE — contrôler timestamps et latences.

4. ESTIMATE — démarrer odométrie/fusion et vérifier covariance.

5. MAP / LOCALIZE — construire ou charger la carte et confirmer le repère.

6. NAVIGATE — exécuter la mission nominale.

7. INJECT_FAULT — provoquer perte LiDAR, biais IMU ou encodeur figé.

8. DEGRADED_MODE — vérifier détection, isolation et adaptation.

9. RECOVER — restaurer la source et vérifier une récupération contrôlée.

10. REPORT — archiver logs, graphiques, carte, trajectoire, erreurs et conclusion.

Leçon 10 — Projet intégrateur de perception

Objectifs

- Comprendre la grandeur réellement observée.
- Relier mesure, repère, timestamp et incertitude.

- Détecter une donnée incohérente et définir une réaction.

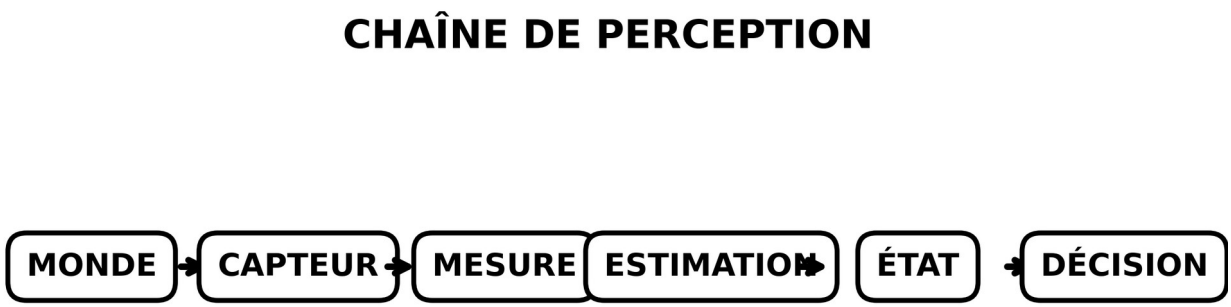


Planche ROB-103.10 — grande lisibilité.

Théorie fondamentale

Le projet réunit acquisition, calibration, timestamps, repères, fusion, covariance, diagnostic et visualisation.

Exemple résolu

Fusionner odométrie + IMU + LiDAR, injecter une panne IMU et documenter l’effet sur l’incertitude.

Laboratoire à distance

Simuler des mesures, ajouter bruit/biais/latence, appliquer la méthode de la leçon, tracer résultat et incertitude, puis injecter une faute et documenter la réaction.

Diagnostic

- Unité correcte ?
- Repère correct ?

- Timestamp récent ?
- Valeur physiquement plausible ?
- Incertitude cohérente ?

Autoévaluation corrigée

Q. Pourquoi une mesure seule ne suffit-elle pas ?

Corrigé : Il faut unité, repère, timestamp, qualité et incertitude.

Q. Que signifie STALE ?

Corrigé : La donnée est trop ancienne pour l’usage prévu.

Q. Pourquoi conserver la covariance ?

Corrigé : Pour représenter explicitement l’incertitude.

Storyboard du film pédagogique

Montrer le capteur → afficher la mesure brute → introduire bruit/biais → calibrer/estimer → visualiser l’incertitude → injecter une panne → laisser l’étudiant diagnostiquer avant la correction.

SYNTHÈSE ROB-103 — DE LA MESURE À LA DÉCISION

Mesurer → calibrer → synchroniser → estimer → quantifier l'incertitude → fusionner → surveiller la santé → passer en mode dégradé → récupérer → valider.

La compétence finale n'est pas seulement de produire une position : l'étudiant doit pouvoir expliquer d'où vient l'estimation, à quel instant elle s'applique, dans quel repère elle est exprimée, quelle incertitude l'accompagne et comment le système réagit lorsqu'un capteur devient non fiable.

Projet final ROB-103

Construire une chaîne de perception avec au moins trois sources, synchronisation, repères, estimation de pose, covariance, surveillance de santé et mode dégradé. Fournir données, graphiques, journal de fautes et critères d'acceptation.

REGISTRE DES DROITS ICONOGRAPHIQUES

Élément	Origine	Statut à conserver	Crédit
Schémas et graphiques ROB-103	Créés pour le manuel	Fichiers sources conservés	Angelo Nibizi / Nibizi Technologies
Illustrations génératives	Créées avec assistance IA	Conserver les fichiers et la traçabilité	Illustrations pédagogiques créées avec assistance IA
Ressources externes futures	À identifier individuellement	Licence/ autorisation à vérifier	Selon la source