

# **MASTER INGENIERIE DES SYSTEMES COMPLEXES**

**1<sup>ère</sup> ANNEE**

**PARCOURS ROC**

**SYLLABUS SIMPLIFIE**

## **Semestre 1**

### **UE 12: Modélisation robotique**

- Modélisation des systèmes mécaniques
- Modélisation des systèmes marins

### **UE 13: Systèmes et commande linéaire**

- Automatique linéaire des systèmes multivariables (commun avec VISTA)

### **UE 14: Apprentissage**

- Apprentissage non supervisé
- Apprentissage supervisé
- Apprentissage par renforcement

### **UE 15: Electronique et Télécommunication**

- Traitement analogique du signal
- Electronique des radiocommunications
- Electronique numérique embarquée

## **Semestre 2**

### **UE 22: Mécanique pour la robotique**

- Chaîne d'actionnement
- Biomécanique

### **UE 23: Contrôle optimal**

- Techniques d'optimisation (commun avec VISTA)
- Automatique non linéaire

### **UE 24: Apprentissage statistique profond**

- Apprentissage profond basé vision
- Perception multimodale

### **UE 25: Systèmes embarqués connectés**

- Capteurs numériques et bus
- Réseaux et communication sans fil
- Instrumentation et capteurs

## **UE 12 : Modélisation des systèmes mécaniques (cours : 14h, TD : 9h, TP : 6h) - ECTS : 3**

### Objectifs

Modéliser le comportement dynamique d'un robot type manufacturier.  
Savoir caractériser et modéliser mathématiquement une chaîne cinématique actionnée en termes d'effort, vitesse et puissance.  
Connaître les principes de contrôle d'un système robotique.

### Contenu

- Typologie des chaînes cinématiques rigides.
- Introduction aux coordonnées homogènes.
- Modélisation géométrique et cinématique des robots sériel et parallèle.
- Ellipsoïdes de puissance.
- Modélisation dynamique (Formalismes de Lagrange, Newton/Euler, Hamilton. Quaternions) - Dualité statique-cinématique.

### Prérequis

Mécanique générale du solide (théorèmes généraux, Lagrange). Algèbre linéaire. Calcul matriciel.

## **UE 12 : Modélisation des systèmes marins (cours : 8h, TD : 7h, TP : 8h) - ECTS : 3**

### Objectifs

Modéliser des robots mobiles sous-marins, à des fins de conception, dimensionnement et commande.

Modéliser le comportement dynamique d'un robot mobile sous-marin.

Savoir prendre en compte les interactions d'un système marin avec le milieu aquatique.

Connaître les principes de contrôle d'un système robotique.

### Contenu

- Rappels de mécanique des fluides (hydrostatisme, écoulements).
- Paramètres hydrodynamiques : phénomènes physiques et identification.
- Modèle dynamique du robot immergé. Modèles de bateaux/drones.
- Capteurs dédiés à l'environnement sous-marin.
- Principes des lois de commandes pour contrôle autonome.

### Prérequis

Mécanique générale du solide (théorèmes généraux, Lagrange). Algèbre linéaire. Calcul matriciel. Physique de la mécanique des fluides.

## **UE 13 : Automatique linéaire des systèmes multivariables (cours : 21h, TD : 15h, TP : 15h) - ECTS : 6**

### Objectifs

Ce cours a pour objectif de présenter les bases théoriques et les concepts généraux pour l'analyse et la commande des systèmes dynamiques multivariables linéaires ou linéarisés autour d'un point de fonctionnement.

### Contenu

- Représentation d'état à temps continu et discret,
- Représentation d'état vs formalisme de Laplace,
- Résolution de l'équation d'état - Matrice de transition,
- Commandabilité et observabilité, critère de Kalman,
- Stabilité au sens de Lyapunov,
- Commande par retour d'état,
- Commande linéaire quadratique (LQR),
- Synthèse d'Observateurs (Luenberger, Kalman).

### Prérequis

Bases de l'automatique et notions élémentaires de l'analyse et la commande des systèmes linéaires continus et discrets. Identification et commande des systèmes. Algèbre linéaire.

## **UE 14 : Apprentissage non-supervisé (cours : 10h, TP : 9h) - ECTS : 2**

### Objectifs

Donner les compétences élémentaires en apprentissage non supervisé pour des problèmes de regroupement, d'estimation de densité et de classification et régression. L'objectif principal est de pouvoir résumer aussi fidèlement que possible un ensemble large de données et d'obtenir des modèles de généralisation et prédiction performants.

A l'issue de ce cours, les étudiants devront être capables de :

- créer et coder des prototypes de solutions rapides d'apprentissage de représentation optimale de séries temporelles complexes (marines)
- les intégrer à des systèmes de classification / indexation automatique,
- comprendre la complexité des données et de leur flux,
- extraire de la valeur des data à partir du jeu de données, identifier les variables importantes puis construire des outils prédicateurs.

### Contenu

Algorithmie et programmation pour l'Intelligence Artificielle.

Plus proche voisin et K-means.

Estimateur de densité Parzen.

Modèle de loi mélange et algorithme EM (espérance-maximisation).

### Prérequis

Bases d'algorithmie et de programmation.

## **UE 14 : Apprentissage supervisé (cours : 12h, TP : 12h) - ECTS : 3**

### Objectifs

Donner les compétences élémentaires en apprentissage supervisé pour des problèmes de regroupement, d'estimation de densité et de classification et régression. L'objectif principal est de pouvoir classer un ensemble large de données et d'obtenir des modèles de généralisation et prédiction performants sur des formes et des séries temporelles.

### Contenu

Convexité et gradient.

Introduction à l'apprentissage supervisé.

Fonctions de coût mixte.

Malédiction des grandes dimensions.

Minimisation de l'erreur structurelle et classifieur à vaste marge: réseau neuronal, perceptron MLP, réseau convolutionnel CNN, modèle à mémoire à empan variable LSTM.

### Prérequis

Apprentissage non supervisé.

## **UE 14 : Apprentissage par renforcement (cours : 6h, TP : 4h) - ECTS : 1**

### Objectifs

Savoir utiliser l'apprentissage par renforcement, notamment pour le déplacement de robots autonomes. Nous présenterons le renforcement learning par une démonstration édifiante en 2016 d'AlphaGo, robot qui remporta le championnat de Go. Nous montrerons comment ces algorithmes sont aussi ceux traitant le cas de la conduite de voiture autonome.

### Contenu

Introduction à l'apprentissage par renforcement.  
Programmation dynamique, modèle de Markov, méthode Monte-Carlo.  
Exploration exhaustive et sous-optimale des politiques d'actions.

### Prérequis

Apprentissage non supervisé et supervisé.



## **UE 15 : Traitement analogique du signal (cours : 12h, TD : 4h, TP : 3h) - ECTS : 2**

### Objectifs

Maitriser la conception électronique des systèmes à temps continu pour la mise en œuvre de systèmes électroniques embarqués.

### Contenu

L'électronique analogique est la base fondamentale de l'électronique. Même si le numérique est aujourd'hui très présent, notamment grâce à des fréquences d'échantillonnage élevées, la réalisation de certaines fonctions reste beaucoup plus immédiate et simple en analogique.

Dans un premier temps les équations fondamentales du transistor MOS et Bipolaires sont présentées. Le fonctionnement en régime dynamique large signal et petit-signal est ensuite introduit dans le cas de la polarisation en mode saturé du MOS et Régime Actif Directe du Bipolaire. Les différents éléments petits-signaux prenant en compte l'effet du substrat et les effets parasites, hautes fréquences, sont étudiés avec attention. La 2<sup>ème</sup> partie du cours présente la réalisation d'amplificateurs simples ou de type cascode.

L'étude se poursuit sur le régime large et faible signal en basses et moyennes fréquences. La 3<sup>ème</sup> partie du cours introduit les miroirs de courant (polarisation et transfert des signaux variables). La suite concerne les principales structures différentielles (opamps) et leurs applications (filtres quadratiques -> filtre de Butterworth/Tchebychev, oscillateurs, boucle à verrouillage de phase (PLL), synthétiseur de fréquence analogique et numérique). Des séances de TD et de TP permettent de mettre en pratique les connaissances acquises, par exemple la mise en œuvre d'un système d'amplification audio et d'un filtre contrôlé du 2<sup>nd</sup> ordre.

### Prérequis

Systèmes linéaires, transformée de Fourier, filtres passifs, fonctions de la variable complexe, diagramme de Bode, théorie de la stabilité (Nyquist), Automatique, dérivées partielles, principe électrique des systèmes linéaires, théorie des quadripôles, principe de la physique du semi-conducteur. Connaissance théorique du traitement des signaux DC (statique) et AC (dynamique), en particulier la capacité à construire un schéma électrique petit-signal.

## **UE 15 : Electronique des radiocommunications (cours : 11h, TD : 4h, TP : 3h) - ECTS : 2**

### Objectifs

Présenter le fonctionnement général d'une chaîne de communication Radiofréquence Homodyne ou Hétérodyne (front-end RF : LNA : low noise amplifieur, Mixer, PLL) ; comprendre les principes de la modulation analogique et fréquentielle ; introduire différentes modulations numériques (FSK, BPSK, QPSK, QAM ..).

### Contenu

Ce cours concerne l'étude des principaux procédés de modulation et de démodulation analogiques ainsi que les modulateurs/démodulateurs numériques (introduction) utilisés dans les systèmes de communication. L'étudiant qui complète le cours avec succès devrait être en mesure d'appliquer aisément les outils de l'analyse spectrale à l'étude des signaux déterministes et des systèmes linéaires rencontrés dans l'étude des systèmes de communication, être en mesure d'expliquer les principes de fonctionnement des différents procédés de modulation et de démodulation et d'apprécier leurs exigences spectrales (IM3, IIP3, THD%, S/N ..), être familier avec le schéma-bloc et les caractéristiques globales d'une chaîne de modulation et pouvoir identifier la fonction et les caractéristiques de chacun des éléments de la chaîne, de pouvoir évaluer les performances des systèmes étudiés.

### Prérequis

Systèmes linéaires, transformée de Fourier, filtres passifs, fonctions de la variable complexe, diagramme de Bode, théorie de la stabilité (Nyquist), automatique, dérivées partielles, principe électrique des systèmes linéaires, théorie des quadripôles, électronique analogique (niveau L3).

## **UE 15 : Electronique numérique embarquée (cours : 8h, TD : 4h, TP : 3h) - ECTS : 1**

### Objectifs

Maitriser la conception électronique des systèmes à temps continu pour la mise en œuvre de systèmes électroniques embarqués.

### Contenu

L'électronique numérique est omniprésente dans les systèmes électroniques actuels, basés sur des processeurs.

Dans un premier temps, la chaîne d'acquisition d'un système numérique basé sur un processeur sera abordée, avec en particulier les aspects conversions analogique numérique haute performance.

Puis, la théorie des systèmes à temps discret basé sur la transformée en Z sera abordée et appliquée au cas du filtrage numérique sur processeurs embarqués.

Dans un 3e temps les questions relatives à l'efficacité des traitements numérique seront abordées au travers des unités de calcul en virgule fixe et flottante et des structures permettant leur implantation.

Enfin, les aspects Low Power pour les systèmes embarqués seront abordés.

Des séances de TD et de TP permettent de mettre en pratique les connaissances acquises, par exemple la mise en œuvre d'une chaîne d'acquisition numérique et de filtrage contrôlé du 2nd ordre.

### Prérequis

Langage C, fonctions et structures de base de l'électronique numérique

## **UE 22 : Chaîne d'actionnement (cours : 14h, TD : 7h, TP : 3h) - ECTS : 3**

### Objectifs

A l'issue de ce cours, l'étudiant devrait être en mesure de spécifier les organes d'action et de perception proprioceptive d'un robot ou d'un système robotique en interaction avec l'humain en vue de sa conception, de son pilotage et de l'évaluation de ses performances vis-à-vis de son cahier des charges spécifique.

### Contenu

- Actionnement des robots (généralités sur fluide, électrique, thermique).
- Moteurs électriques pour la robotique (principes, modèles, dimensionnement, pilotage).
- Perception proprioceptive et extéroceptive (chaîne de mesure).
- Capteurs de déplacement et d'effort.
- Chaîne d'action et de perception proprioceptive.
- Dimensionnement d'actionneur électrique.

### Prérequis

Mécanique générale et bases d'électronique.

## **UE 22 : Biomécanique (cours : 7h, TD : 9h, TP : 8h) - ECTS : 3**

### Objectifs

Maîtriser les outils de modélisation et d'analyse des mouvements humains pour des applications en robotique, biomécanique et dans le domaine biomédical via des capteurs embarqués.

### Contenu

La compréhension des spécificités mécaniques des systèmes biologiques est nécessaire pour l'élaboration de systèmes artificiels versatiles et pour l'évaluation de la motricité experte dans le domaine sportif ou en cas de déficience dans le domaine biomédical par des capteurs embarqués. Ainsi, l'objectif de ce cours est de présenter les outils biomécaniques spécifiques à l'étude et la simulation de la motricité du corps humain modélisé par des modèles polyarticulés multi chaînes.

Les points abordés en cours et en TD seront les suivants :

1. Lien entre robotique et biomécanique : reproduire et simuler l'organisation du mouvement des systèmes biologiques (approche bioinspirée)
2. Modélisation biomécanique
  - Modélisation du corps humain, structure cinématique, paramètres géométriques et inertiels
  - Mécanique musculaire
  - Evaluation de paramètres inobservables pour comprendre les efforts subis par le corps humain (cinématique inverse, dynamique inverse, efforts musculaires)
3. Mesure du mouvement humain
4. Indices d'évaluation issus de la robotique pour la biomécanique : manipulabilité et polytope de force
5. Application : équilibre postural, locomotion, préhension, handicap

### Thématique des TP :

Analyse du mouvement via un modèle musculosquelettique : l'objectif des TP est de permettre aux étudiants de maîtriser un logiciel open source de référence en modélisation musculosquelettique appelé Opensim. Nous aborderons la mise à l'échelle d'un modèle de référence à partir de données issues d'un système optoélectronique, l'évaluation de la cinématique inverse à partir de données mesurées ainsi que l'évaluation des couples articulaires et forces musculaires résultantes obtenues par optimisation. Les différents aspects liés à la modélisation du corps humain seront abordés. Dans un second temps, des indices d'évaluation issus de la robotique seront évalués afin de quantifier la qualité d'une posture ou d'un mouvement.

### Prérequis

Modélisation des systèmes mécaniques



## **UE 23 : Techniques d'optimisation (cours : 12h, TP : 12h) - ECTS : 3**

### Objectifs

Savoir formuler un problème d'optimisation numérique (identifier les paramètres, définir la fonction de coût, décrire les contraintes)  
Savoir le caractériser (linéaire ou non, avec ou sans contraintes)  
Savoir choisir la méthode d'optimisation adaptée au problème.

### Contenu

#### 1. Rappels mathématiques

Positivité, Convexité

Notion d'optimum

Dérivabilité, Gradient et Hessien

Conditions d'existence d'un point optimum

#### 2. Optimisation sans contraintes

Formulation du problème d'optimisation

Méthode du gradient

Méthodes des directions conjuguées

Méthodes de Newton et de Levenberg-Marquardt

#### 3. Optimisation avec contraintes

Méthode du simplexe de Nelder-Mead

Méthode du point intérieur

Multiplicateurs de Lagrange

Conditions de Karush-Kuhn-Tucker

### Prérequis

Mathématiques : analyse numérique, notion de dérivabilité, de continuité.

Programmation scientifique : maîtriser les outils de programmation scientifique.

## **UE 23 : Automatique non-linéaire (cours : 23h, TD : 6h) - ECTS : 4**

### Objectifs

Ce cours est un cours très important de l'UE2, il donne l'essentiel des méthodes de contrôle avancé. A l'issue de ce cours, l'étudiant devra savoir analyser un système caractérisé par un modèle dynamique non linéaire, savoir le contrôler et être capable d'estimer l'état du système.

### Contenu

Le cours commence par rappeler quelques notions de géométrie différentielle (dérivées de Lie, distribution de champs de vecteurs). Puis on aborde la stabilité, locale et globale : fonctions de Lyapunov, principe d'invariance de Lasalle.

Ensuite, plusieurs méthodes de contrôle sont abordées:

- Commande non-linéaire : linéarisation par feedback des systèmes mécaniques, commande géométrique, stabilisation par la méthode de Lyapunov, commande prédictive;
- Principe du maximum de Pontryagin, synthèse optimale, approches directes et indirectes;
- Modes glissants, commande à structure variable;
- Commande sans modèle.

Dans ce cours, pour lequel les méthodes sont essentiellement basées sur des commandes par retour d'état, on étudiera aussi les observateurs grand-gain et en particulier le filtre de Kalman étendu, dans sa version grand-gain.

### Prérequis

Calcul matriciel,  
Automatique linéaire (filtrage et commande),  
Optimisation



## **UE 24 : Apprentissage profond basé vision (cours : 12h, TP : 12h) - ECTS : 3**

### Objectifs

Donner les compétences élémentaires en modélisation et discrimination des données sonars, image, et multimodales par approches d'apprentissage profond 'deep learning' à partir de leur projection en espace 2D. Les apprentissages de représentation dense, propres au codage en système basse consommation seront particulièrement traités.

### Contenu

Modèles supervisés et non supervisés pour la classification dans des plans 2D : spectrogramme, scalogramme.

### Prérequis

Notion en codage et en apprentissage profond supervisé et non supervisé dans des espaces n dimension. Notion de recherche d'espace de sous dimension, analyse en composante principale, analyse discriminante (ACP, LDA).

## **UE 24 : Perception multimodale (cours : 12h, TP : 12h) - ECTS : 3**

### Objectifs

Donner les compétences élémentaires en modélisation et discrimination des données sonars, acoustiques image et spectrales, et multimodales par approches 'deep learning' (réseaux profonds).

### Contenu

Manipuler, compresser, indexer, classer, généraliser les données hétérogènes : audiovisuelles, son : les représenter et les analyser pour en déduire des décisions de type perception / action sur un système autonome. Renforcement de la boucle perception action en intégrant l'analyse jointe audio et visuelle ou multicauteurs. Système de localisation et identification joints de sources acoustiques sous marines et autres par 'deep learning' et réseaux récurrents. Les étudiants seront rapidement mis en condition pour traiter des cas réels de robotique surface et sous marine avec IA embarquée pour la détection et le suivi de cibles. Des liens avec des industriels seront possibles, notamment SeaProven, Osean, DCNS dans le cadre de mini projets.

### Prérequis

Méthodes d'apprentissage pour la fusion et les apprentissages joints, fonction objective mixtes.

## **UE 25 : Capteurs numériques et bus (cours : 8h, TD : 6h, TP : 3h) - ECTS : 2**

### Objectifs

Maîtriser l'interfaçage des capteurs et traitements de signaux avancés pour la mise en œuvre de systèmes électroniques embarqués.

### Contenu

Les capteurs actuels intègrent de plus en plus des fonctionnalités avancées leur permettant de fonctionner de manière autonome et d'apporter des fonctionnalités autres que celle d'une simple mesure d'une valeur à un système embarqué. Pour cette raison, ils ne peuvent plus s'interface de manière strictement analogique, mais ils nécessitent la mise en œuvre de bus de communication adaptés à leur usage.

Dans un premier temps, un historique et une classification des bus terrains sera présentée, et couplée à la description de leurs protocoles de communication. Dans un second temps les capteurs numériques classiques (accéléromètre, gyroscopes, magnétomètres, ECG, ADC externe haute performance...) et utiles dans les systèmes embarqués seront présentés ainsi que leurs interfaces (SPI I2C, CAN en particulier).

Les filtrages spécifiques (par exemple Kalman) à certains de ces capteurs pris seuls ou en combinaison seront également développés dans ce cours.

Des séances de TD et de TP permettent de mettre en pratique les connaissances acquises, par exemple la mise en œuvre d'un positionnement par centrale inertielle avec filtrage par filtre de Kalman.

### Prérequis

Electronique numérique embarquée. Electronique des radiocommunications.

## **UE 25 : Réseaux et communication sans fil (cours : 8h, TP : 6h) - ECTS : 1**

### Objectifs

Avoir une vision claire des solutions d'échange de données distribués et utilisés dans le domaine de l'IoT.

### Contenu

Les objets connectés utilisent les réseaux de communication pour les échanges de données entre systèmes d'acquisition et pour la remontée des données vers des serveurs distants.

La connaissance des réseaux de capteurs permettant ces échanges est donc un enjeu majeur de l'IoT. Une typologie des réseaux de capteurs d'après les normes IEEE 802.15.1 et IEEE 802.15.4 sera présentée dans un premier temps, avec des cas d'usage pour chaque type de réseau. Les réseaux de type PAN et MESH seront en particulier étudiés en détail.

Les réseaux émergents seront également étudiés de manière à donner aux étudiants les outils leur permettant d'exercer leur esprit critique pour faire les bons choix technologiques en fonction des besoins rencontrés, et pour exercer leur créativité afin d'engager des travaux de recherche novateurs dans ce domaine.

### Prérequis

Electronique numérique embarquée. Electronique des radiocommunications.

## **UE 25 : Instrumentation et capteurs (cours : 12h, TD : 3h) - ECTS : 2**

### Objectifs

Mettre en œuvre des fonctions électroniques permettant de traiter des signaux électriques à temps continu issus d'un capteur. Comprendre le fonctionnement d'une chaîne d'instrumentation.

### Contenu

Dans un premier temps les caractéristiques métrologiques : sensibilité, linéarité, rapidité, précision des capteurs sont présentés. Ensuite certains montages électroniques ou « conditionneur » sont étudiés (ponts de Wheatstone, amplificateurs, différenciateurs, convertisseurs ...). Les contraintes de mise en œuvre dues aux sources de bruits et à la présence de tensions ou de courants d'offsets sont présentées. La notion et certains principes de calibration sont abordés. Le cours et les TD associés comportent des études de cas allant jusqu'à l'étude d'un système complet. Cette dernière étude comprend le calcul de l'amplificateur d'instrumentation à faible taux de réjection de mode commun et l'étude de convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique.

### Prérequis

Systèmes électriques linéaires & équations différentielle associées, fonctions de la variable complexe. Électronique analogique et numérique, transformée de Fourier, Série de Taylor, notion de traitement analogique et numérique du signal.