



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

اللجنة البيداغوجية الوطنية لميدان العلوم و التكنولوجيا

Comité Pédagogique National du domaine Sciences et Technologies



Offre de formation Master Professionnalisant

2025 - 2026

Établissement	Faculté	Département
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene U. S. T. H. B	Génie Electrique	Télécommunications

Domaine	Filière	Spécialité
Sciences et Technologies S.T	Télécommunications	Systemes intelligents de protection et de neutralisation d'objets mobiles



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية République Algérienne Démocratique et
Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
اللجنة البيداغوجية الوطنية لميدان العلوم و التكنولوجيا
Comité Pédagogique National du domaine Sciences et Technologies



عرض تكوين ماستر مهني

2025-2026

القسم	الكلية	المؤسسة
اتصالات سلكية ولاسلكية	الهندسة الكهربائية	جامعة هواري بومدين للعلوم والتكنولوجيا
التخصص	الفرع	الميدان
أنظمة ذكية لحماية وتحديد الأجسام المتحركة	اتصالات سلكية ولاسلكية	علوم وتكنولوجيا

I – Fiche d'identité du Master

1 - Localisation de la formation :

**Faculté de Génie Electrique à L'université des sciences et de la technologie
Houari Boumediene (USTHB)
Département : Télécommunication**

2- Partenaires de la formation *:

- autres établissements universitaires :

- Ecole Nationale Supérieure de Technologie des Systèmes Autonomes (ENSTSA)
Sidi Abdellah
- CENTRE DE DÉVELOPPEMENT DES TECHNOLOGIES AVANCÉES CDTA
- Centre de Recherche en Technologies Industrielles CRTI
- CENTRE DE RECHERCHE SUR L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
CERIST

- entreprises et autres partenaires socio-économiques :

- Partenaires internationaux :

3 – Contexte et objectifs de la formation

A – Conditions d'accès *(indiquer les spécialités de licence qui peuvent donner accès au Master)*

Filière	Master harmonisé	Licences ouvrant accès au master	Classement selon la compatibilité de la licence	Coefficient affecté à la licence
Télécommunication		Télécommunication	1	1.00
		Electronique	2	1.00
		Electrotechnique	2	0.80
		Autres licences du domaine ST	3	0.60

B - Objectifs de la formation *(compétences visées, connaissances pédagogiques acquises à l'issue de la formation- maximum 20 lignes)*

La formation de Master en Brouillage et neutralisation des drones a pour objectif de former des ingénieurs hautement qualifiés et des experts techniques capables de répondre aux défis croissants posés par l'usage illicite ou hostile des drones autonomes, en particulier dans les domaines sensibles tels que la défense, la sécurité intérieure, la protection des infrastructures critiques et les zones interdites au survol.

Face à l'essor rapide des technologies de drones et à leur accessibilité grandissante, cette formation vise à doter les étudiants des compétences scientifiques, techniques, réglementaires et opérationnelles nécessaires à la conception, la mise en œuvre et l'évaluation de dispositifs de brouillage et de neutralisation adaptés à différents types de menaces.

Cette formation s'adresse aux étudiants issus de filières scientifiques et techniques (électronique, télécommunications, informatique, robotique, aéronautique, etc.) souhaitant acquérir une spécialisation pointue dans un domaine stratégique au carrefour des technologies de défense, de cybersécurité et de guerre électronique.

C – Profils et compétences métiers visés (en matière d'insertion professionnelle - maximum 20 lignes) :

Les diplômés du Master pourront occuper des postes dans les secteurs suivants :

Défense et sécurité

- Ingénieur en guerre électronique ou en contre-mesures C-UAS
- Officier ou expert technique en systèmes de neutralisation pour la défense
- Technicien spécialisé dans les équipements anti-drones pour zones sensibles

Industrie et technologies

- Ingénieur en R&D dans les entreprises développant des technologies de sécurité aérienne ou de brouillage RF
- Chef de projet systèmes embarqués et guerre électronique
- Intégrateur de solutions de neutralisation dans des infrastructures critiques (aéroports, centrales, prisons)

Conseil, audit et réglementation

- Consultant en cybersécurité aérienne et protection électronique
- Expert en conformité réglementaire liée à l'usage de brouillage
- Chargé de veille technologique et stratégique dans les agences de sécurité

D- Potentialités régionales et nationales d'employabilité des diplômés

Face à la multiplication des usages malveillants ou non autorisés des drones, les besoins en personnels spécialisés dans la neutralisation électronique sont en forte croissance, aussi bien à l'échelle nationale que régionale. Les diplômés du Master s'inscrivent pleinement dans cette dynamique en répondant à un enjeu stratégique pour la sécurité des infrastructures sensibles, la souveraineté technologique et la maîtrise de l'espace aérien.

Niveau régional

Les perspectives d'employabilité sont favorisées par :

- La mise en place de zones interdites au survol autour d'installations critiques (aéroports, raffineries, sites militaires, prisons...)
- Le développement de centres de recherche et de formation en sécurité et cybersécurité
- La demande croissante des forces de sécurité, de l'armée et de la gendarmerie nationale pour des profils capables de contrer les intrusions de drones
- Les appels d'offres émis par les opérateurs publics ou semi-publics pour la protection électronique des infrastructures

Niveau national

L'émergence de politiques nationales axées sur la cybersécurité, la défense électronique et la souveraineté technologique ouvre de vastes opportunités :

- Recrutement dans les institutions étatiques : Ministère de la Défense, DGSN, Douanes, Protection civile

- Intégration dans les entreprises de défense et de technologies électroniques (publiques ou privées)
- Participation à des projets nationaux de surveillance et de sécurisation de l'espace aérien
- Création de startups innovantes dans les domaines du C-UAS (Counter-Unmanned Aerial Systems), du brouillage GNSS ou de la détection radar
- Collaboration avec les universités, centres technologiques et laboratoires nationaux pour le développement de solutions locales adaptées

Un profil rare et recherché

Le profil formé par ce Master est encore peu représenté dans les formations classiques, ce qui renforce l'employabilité des diplômés auprès :

- Des secteurs civils sensibles (transport aérien, énergie, télécoms)
- Du secteur militaire et de la sécurité intérieure
- Des bureaux d'études et intégrateurs de solutions anti-drone
- Des organismes internationaux ou ONG traitant des problématiques de sécurité technologique

E – Passerelles vers d'autres spécialités

La majorité des sciences de l'ingénieur font de plus en plus appel à des outils de télécommunication avancés. Electronique, l'instrumentation. Les passerelles peuvent se faire avec le Master Electronique des Systèmes Embarqués, le Master réseaux et télécommunication le Master Automatique et Système, Electrotechnique industrielle, le Master en Génie Electrique : Ingénierie de l'instrumentation électrique.

F – Indicateurs de suivi de la formation

Toute formation doit répondre aux exigences de qualité d'aujourd'hui et de demain. A ce titre, pour mieux apprécier les performances attendues de la formation proposée d'une part et en exploitant la flexibilité et la souplesse du système LMD d'autre part, il est proposé, à titre indicatif, pour ce Master un certain nombre de mécanismes pour évaluer et suivre le déroulement des enseignements, les programmes de la formation, les relations étudiant/enseignant et étudiant/administration, le devenir des diplômés de ce Master ainsi que les appréciations des partenaires de l'université quant à la qualité des diplômés recrutés et/ou des enseignements dispensés. Il revient à l'équipe de formation d'enrichir cette liste avec d'autres critères en fonction de ses moyens et ses objectifs propres. Les modalités d'évaluation peuvent être concrétisées par des enquêtes, un suivi sur terrain des étudiants en formation et des sondages auprès des diplômés recrutés ainsi qu'avec leurs employeurs. Pour cela, un rapport doit être établi, archivé et largement diffusé.

En plus des réunions ordinaires du comité pédagogique, une réunion à la fin de chaque semestre est organisée. Elle regroupe les enseignants et des étudiants de la promotion afin de débattre des problèmes éventuellement rencontrés, des améliorations possibles à apporter aux méthodes d'enseignement en particulier et à la qualité de la formation en général. A cet effet, il est proposé ci-dessous une liste plus ou moins exhaustive sur les indicateurs et les modalités envisagées pour l'évaluation et le suivi de ce projet de formation par le comité pédagogique :

- ✓ Evolution du taux d'étudiants ayant choisi ce Master (Rapport offre / demande).
- ✓ Taux et qualité des étudiants qui choisissent ce Master.
- ✓ Régularité des réunions des comités pédagogiques.
- ✓ Conformité des thèmes des Projets de Fin de Cycle avec la nature de la formation.
- ✓ Qualité de la relation entre les étudiants et l'administration.
- ✓ Soutien fourni aux étudiants en difficulté.
- ✓ Taux de satisfaction des étudiants sur les enseignements et les méthodes d'enseignement.
- ✓ Taux de réussite des étudiants par semestre dans ce Master.
- ✓ Taux de déperdition (échecs et abandons) des étudiants.
- ✓ Identification des causes d'échec des étudiants.
- ✓ Des alternatives de réorientation sont proposées aux étudiants en situation d'échec.
- ✓ Taux des étudiants qui obtiennent leurs diplômes dans les délais.
- ✓ Taux de recrutement des diplômés dans le secteur socio-économique dans un poste en relation directe avec la formation.
- ✓ Nature des emplois occupés par les diplômés.
- ✓ Diversité des débouchés.
- ✓ Installation d'une association des anciens diplômés de la filière.
- ✓ Création de petites entreprises par les diplômés de la spécialité.
- ✓ Degré de satisfaction des employeurs.

G – Capacité d'encadrement (donner le nombre d'étudiants qu'il est possible de prendre en charge)

30 étudiants

4 – Moyens humains disponibles

A : Enseignants de l'établissement intervenant dans la spécialité :

Nom, prénom	Diplôme graduation + Spécialité	Diplôme Post graduation + Spécialité	Grade	Type d'intervention *	Emargement

Visa du département

Visa de la faculté

* = Cours, TD, TP, Encadrement de stage, Encadrement de mémoire, autre (à préciser)

B : Encadrement Externe :**Etablissement de rattachement :**

Nom, prénom	Diplôme graduation + Spécialité	Diplôme Post graduation + Spécialité	Grade	Type d'intervention *	Emargement

Visa du département

Visa de la faculté

* = Cours, TD, TP, Encadrement de stage, Encadrement de mémoire, autre (à préciser)

5 – Moyens matériels spécifiques disponibles

A- Laboratoires Pédagogiques et Equipements : Fiche des équipements pédagogiques existants pour les TP de la formation envisagée (1 fiche par laboratoire)

Intitulé du laboratoire : Laboratoire des Systèmes Numériques

Capacité en étudiants : 12 par séance de 3h (soit 180 étudiants par semaine)

N°	Intitulé de l'équipement	Nombre	Observations
1	Carte FPGA Nexys 2.	12	
2	Carte FPGA Altera	08	
3	Carte DSP (TMS320C6713)	12	
4	Carte de développement EasydsPIC7	16	
5	Carte de développement ARM	10	
6	Carte banc didactique pour l'étude des Systèmes Embarqués Linux	01	
7	Carte de développement Arduino et Raspberry	20	

Intitulé du laboratoire : Laboratoire de microondes

Capacité en étudiants : 6 (90 étudiants par semaine)

N°	Intitulé de l'équipement	Nombre	Observations
1	Banc micro onde	01	
2	Vobulateur	01	
3	Alimentation stabilisée	06	
4	Oscilloscope	06	
5	Module générateur basse fréquence	06	
6	Module multimètre	06	
7	Module générateur d'impulsion	06	
8	Banc micro onde	01	
9	Générateur de signaux	03	

Intitulé du laboratoire : Salle machine 01 de simulation et CAO

Capacité en étudiants : 10 (150 étudiants par semaine)

N°	Intitulé de l'équipement	Nombre	Observations
1	Station de travail	10	

Intitulé du laboratoire : Salle machine 02 de simulation et CAO

Capacité en étudiants : 10 (150 étudiants par semaine)

N°	Intitulé de l'équipement	Nombre	Observations
1	Station de travail	10	

Intitulé du laboratoire : Salle machine 03 de simulation et CAO
Capacité en étudiants : 10 (150 étudiants par semaine)

N°	Intitulé de l'équipement	Nombre	Observations
1	Station de travail	10	

Intitulé du laboratoire : LABORATOIRE D'ELECTRONIQUE GENERALE

Capacité en étudiants : 20 par séance de 3h (soit 300 étudiants par semaine)

N°	Intitulé de l'équipement	Nombre	Observations
1	Banc didactique d'étude des montages de polarisation du transistor à effet de champ	10	
2	Banc didactique d'étude des montages amplificateurs à transistor bipolaire	10	
3	Banc didactique d'étude des montages amplificateurs à transistor à effet de champ	10	
4	Banc didactique d'étude des montages amplificateurs à amplificateur opérationnel	10	
5	Banc didactique d'étude de la contre-réaction	10	
6	Banc didactique d'étude de la diode	10	
7	Banc didactique d'étude du redressement	10	
8	Banc didactique d'étude des montages de polarisation du transistor bipolaire	10	
9	Voltmètre analogique	10	
10	Résistances à cinq décades de 1 à 10000Ω	10	
11	Oscilloscope 2x30MHz	10	
12	Milliampèremètre analogique	10	
13	Générateur de signaux bas fréquence (2 MHz)	10	
14	Alimentation double stabilisée de laboratoire	10	
15	Sonde d'oscilloscope	20	
16	Microampèremètre	10	
17	Boîtes de résistances à décade x1Ω	10	
18	Boîtes de résistances à décade x10Ω	10	
19	Boîtes de résistances à décade x100Ω	10	
20	Boîtes de résistances à décade x1000Ω	10	

Intitulé du laboratoire : Laboratoire Maquettes Electroniques
Capacité en étudiants : 12 par séance de 3h (180 étudiants par semaine)

N°	Intitulé de l'équipement	Nombre	Observations
1	Alimentation stabilisée	08	
2	Oscilloscope	06	
3	Module générateur basse fréquence	06	
4	Module multimètre	06	
5	Module générateur d'impulsion	06	
6	Station de soudage	02	
7	Miniperceuse pour circuit imprimé	01	
8	Fer à souder	07	
9	Loupe	01	
10	Metrix	01	
11	Analyseur de spectre	06	
12	P.C.	03	

Capacité en étudiants : 20 par séance de 3h (soit 300 étudiants par semaine)

N°	Intitulé de l'équipement	Nombre	Observations
1	Générateur de signaux radio-fréquence(400MHz)	5	
2	Banc didactique d'étude de l'oscillateur Collpit	10	
3	Banc didactique d'étude des oscillateurs harmoniques	10	
4	Banc didactique d'étude de la modulation AM	10	
5	Banc didactique d'étude de la modulation BLU	10	
6	Banc didactique d'étude de la modulation FM	10	
7	Banc didactique d'étude de la modulation de phase	10	
8	Voltmètre analogique	10	
9	Résistances à cinq décades de 1 à 10000Ω	10	
10	Oscilloscope 2x30MHz	10	
11	Oscilloscope 2x100MHz	5	
12	Générateur de signaux basse fréquence (2MHz)	10	
13	Alimentation double stabilisée de laboratoire	10	
14	Sonde d'oscilloscope	30	
15	Banc didactique d'étude du trigger de Schmitts	10	
16	Banc didactique d'étude de l'astable à amplificateur opérationnel	10	
17	Banc didactique d'étude du générateur de signaux triangulaire	10	
18	Banc didactique d'étude de l'astable à transistor	10	

B- Terrains de stage et formation en entreprise :

[illegible]

C- Laboratoire(s) de recherche de soutien au master :

Chef du laboratoire
N° Agrément du laboratoire
Date :
Avis du chef de laboratoire :

Chef du laboratoire
N° Agrément du laboratoire
Date :
Avis du chef de laboratoire :

D- Projet(s) de recherche de soutien au master :

Intitulé du projet de recherche	Code du projet	Date du début du projet	Date de fin du projet

E- Espaces de travaux personnels et TIC :

En plus des moyens cités précédemment il existe un espace TIC à la disposition des étudiants au niveau de la biblio centrale.

Bibliothèque	- Bibliothèque centrale de l'université (Disponibilité de documentation d'électronique) - Bibliothèque de la faculté (Disponibilité de documentation d'électronique)
Equipements Informatiques	5 salles de TP Informatique Une salle d'Internet

F- Support d'apprentissage

Indiquer la plateforme de diffusion des enseignements :

Type de plateforme (Moodle,)	Etablissement parraineur	Lien de la plateforme
Moodle, ENT	USTHB	USTHB

II – Fiches d'organisation semestrielles des enseignements de la spécialité

Semestre 1

Unité d'enseignement	Matières	Crédits	Coefficient	Volume horaire hebdomadaire			Volume Horaire Semestriel (15 semaines)	Travail Complémentaire en Consultation (15 semaines)	Mode d'évaluation	
	Intitulé			Cours	TD	TP			Contrôle Continu	Examen
UE Fondamentale Code : UEF 1.1.1 Crédits : 10 Coefficients : 5	Eléments de Compatibilité Electromagnétique	6	3	3h00	1h30		67h30	82h30	40%	60%
	Antennes et Propagation	4	2	1h30	1h30		45h00	55h00	40%	60%
UE Fondamentale Code : UEF 1.1.2 Crédits : 8 Coefficients : 4	DSP et FPGA pour les applications Anti-Drone	4	2	1h30	1h30		45h00	55h00	40%	60%
	Traitement d'image et vision artificiel	4	2	1h30	1h30		45h00	55h00	40%	60%
UE Méthodologique Code : UEM 1.1 Crédits : 9 Coefficients : 5	TP Compatibilité Electromagnétique	2	1			1h30	22h30	27h30	100%	
	TP Antennes et Propagation	2	1			1h30	22h30	27h30	100%	
	TP DSP et FPGA pour les applications Anti-Drone /TP Traitement d'image et vision artificiel	2	1			1h30	22h30	27h30	100%	
	Conception mécanique CFAO	3	2	1h30		1h00	37h30	37h30	40%	60%
UE Découverte Code : UED 1.1 Crédits : 2 Coefficients : 2	Aérodynamique et dynamique du Vol	1	1	1h30			22h30	02h30		100%
	Architecture des drones	1	1	1h30			22h30	02h30		100%
UE Transversale Code : UET 1.1 Crédits : 1 Coefficients : 1	Télécommunication spatiale	1	1	1h30			22h30	02h30		100%
Total semestre 1		30	17	13h30	6h00	5h30	375h00	375h00		

Semestre 2

Unité d'enseignement	Matières	Crédits	Coefficient	Volume horaire hebdomadaire			Volume Horaire Semestriel (15 semaines)	Travail Complémentaire en Consultation (15 semaines)	Mode d'évaluation	
	Intitulé			Cours	TD	TP			Contrôle Continu	Examen
UE Fondamentale Code : UEF 1.2.1 Crédits : 10 Coefficients : 5	Brouillage des Signaux RF	6	3	3h00	1h30		67h30	82h30	40%	60%
	Systèmes multi-capteurs	4	2	1h30	1h30		45h00	55h00	40%	60%
UE Fondamentale Code : UEF 1.2.2 Crédits : 8 Coefficients : 4	Système Embarqué et Système Temps Réel	4	2	1h30	1h30		45h00	55h00	40%	60%
	Les Dispositifs de Brouillage	4	2	1h30		1h30	45h00	55h00	40%	60%
UE Méthodologique Code : UEM 1.2 Crédits : 9 Coefficients : 5	TP Brouillage des Signaux RF	2	1			1h30	22h30	27h30	100%	
	TP Systèmes multi-capteurs	2	1			1h30	22h30	27h30	100%	
	TP Système Embarqué et Système Temps Réel	2	1			1h30	22h30	27h30	100%	
	Etude et Réalisation des projets	3	2	1h30		1h00	37h30	37h30	40%	60%
UE Découverte Code : UED 1.2 Crédits : 2 Coefficients : 2	Système de navigation aérienne	1	1	1h30			22h30	02h30		100%
	Cybersécurité des drones	1	1	1h30			22h30	02h30		100%
UE Transversale Code : UET 1.2 Crédits : 1 Coefficients : 1	Législation et régulation du Brouillage des Drones	1	1	1h30			22h30	02h30		100%
Total semestre 2		30	17	13h30	6h00	5h300	375h00	375h00		

Semestre 3

Unité d'enseignement	Matières	Crédits	Coefficient	Volume horaire hebdomadaire			Volume Horaire Semestriel (15 semaines)	Travail Complémentaire en Consultation (15 semaines)	Mode d'évaluation	
	Intitulé			Cours	TD	TP			Contrôle Continu	Examen
UE Fondamentale Code : UEF 2.1.1 Crédits : 10 Coefficients : 5	Techniques de Contre-mesures et Défense contre le Brouillage	6	3	3h00	1h30		67h30	82h30	40%	60%
	Techniques de Localisation et de Suivi des Drones	4	2	1h30	1h30		45h00	55h00	40%	60%
UE Fondamentale Code : UEF 2.1.2 Crédits : 8 Coefficients : 4	Technologies Laser Appliquées à la Lutte Anti-Drone	4	2	1h30	1h30		45h00	55h00	40%	60%
	Communication numérique et cryptologie des Drones	4	2	1h30	1h30		45h00	55h00	40%	60%
UE Méthodologique Code : UEM 2.1 Crédits : 9 Coefficients : 5	TP Techniques de Contre-mesures et Défense contre le Brouillage	2	1			1h30	22h30	27h30	100%	
	TP Techniques de Localisation et de Suivi des Drones	2	1			1h30	22h30	27h30	100%	
	TP Internet des objets pour Drone / TP Communication numérique et cryptologie des drones	2	1			1h30	22h30	27h30	100%	
	Robot operating System ROS	3	2	1h30		1h00	37h30	37h30	40%	60%
UE Découverte Code : UED 2.1 Crédits : 2 Coefficients : 2	Guère électronique et sécurité aérienne	1	1	1h30			22h30	02h30		100%
	Communication Satellite / UAV	1	1	1h30			22h30	02h30		100%
UE Transversale Code : UET 2.1 Crédits : 1 Coefficients : 1	Intelligence artificielle pour la défense anti-drone	1	1	1h30			22h30	02h30		100%
Total semestre 3		30	17	13h30	6h00	5h30	375h00	375h00		

Orientations générales sur le choix des matières transversales et de découverte :

Matières avec programmes détaillés :

Autres matières laissées au libre choix des établissements (programmes ouverts après validation du CPND)

- ...

Semestre 4

Stage en entreprise sanctionné par un mémoire et une soutenance.

	VHS	Coeff	Crédits
Travail Personnel	550	09	18
Stage en entreprise	100	04	06
Séminaires	50	02	03
Autre (Encadrement)	50	02	03
Total Semestre 4	750	17	30

Ce tableau est donné à titre indicatif

Evaluation du Projet de Fin de Cycle de Master

- Valeur scientifique (Appréciation du jury) /6
- Rédaction du Mémoire (Appréciation du jury) /4
- Présentation et réponse aux questions (Appréciation du jury) /4
- Appréciation de l'encadreur /3
- Présentation du rapport de stage (Appréciation du jury) /3

III - Programme détaillé par matière du semestre S1

Semestre : 1

Unité d'enseignement : UEF 1.1.1

Matière 1 : Eléments de Compatibilité Electromagnétique

VHS : 67h30 (Cours : 3h00, TD : 1h30)

Crédits : 6

Coefficient : 3

Objectifs de l'enseignement :

Ce module a pour objectif d'introduire les principes fondamentaux de la Compatibilité Électromagnétique (CEM), d'identifier les sources de perturbations, de comprendre les mécanismes de couplage, ainsi que les techniques de protection et de mise en conformité des équipements électroniques avec les normes CEM.

Connaissances préalables recommandées :

Théorie des circuits, Électromagnétisme, Traitement du signal de base.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction à la CEM

(1 semaine)

Définitions : CEM, perturbations, susceptibilité, immunité, Importance industrielle et réglementaire, Enjeux de la CEM dans les systèmes électroniques modernes

Chapitre 2 : Sources et Types de Perturbations

(2 semaines)

Perturbations conduites vs rayonnées, Sources internes et externes : commutations, moteurs, radiofréquences, etc. Classification : rayonnement continu, impulsions, ESD, CEM atmosphérique

Chapitre 3 : Mécanismes de Couplage

(2 semaines)

Couplage capacitif, Couplage inductif, Couplage par rayonnement, Couplage par conduction (mode commun / différentiel)

Chapitre 4 : Moyens de Protection et de Réduction des Perturbations

(3semaines)

Blindage électromagnétique, Filtres CEM : passe-bas, passe-haut, etc. Mise à la masse et câblage, Circuits imprimés : règles de conception pour la CEM, Compatibilité dans les systèmes numériques et RF

Chapitre 5 : Normes et Réglementation CEM

(3 semaines)

Normes CISPR, EN, FCC, MIL-STD, Procédures de tests et certification, Exemples d'applications dans les secteurs automobile, aéronautique et médical.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- Claude Beaujean – Compatibilité électromagnétique, Éditions Dunod, 2014.
- 2- Michel Ney – CEM en électronique de puissance et conversion d'énergie, Éditions Dunod, 2017
- 3- Pierre Degauque, Frédéric Issac – Compatibilité électromagnétique – Théorie et techniques, Ellipses, 2009.
- 4- Christian Vollaire – Compatibilité électromagnétique des systèmes électroniques, Éditions Hermes Science, 2013.
- 5- Henry W. Ott – Electromagnetic Compatibility Engineering, Wiley, 2009.
- 6- Paul Clayton R. – Introduction to Electromagnetic Compatibility, Wiley-Interscience, 2e édition, 2006.
- 7- Tim Williams – EMC for Product Designers, Newnes, 2016 (4e édition)

Semestre : 1

Unité d'enseignement : UEF 1.1.1

Matière 2 : Antennes et Propagation

VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD: 1h30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Ce module a pour objectif de fournir aux étudiants les connaissances fondamentales et pratiques sur le fonctionnement, la modélisation, et la mise en œuvre des antennes ainsi que sur les mécanismes de propagation des ondes électromagnétiques en milieu libre et complexe.

Connaissances préalables recommandées :

Électromagnétisme (niveau L3 ou équivalent), Théorie des circuits haute fréquence, Bases en traitement du signal

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction aux antennes

(1 semaine)

Rappel sur les ondes électromagnétiques, Fonction et rôle d'une antenne dans un système de communication, Paramètres caractéristiques d'une antenne : impédance, gain, directivité, efficacité, largeur de faisceau, bande passante, polarisation

Chapitre 2 : Antennes élémentaires

(2 semaines)

Dipôle demi-onde, monopôle, Boucle magnétique, Antenne $\lambda/4$, $\lambda/2$, Rayonnement d'un courant élémentaire

Chapitre 3 : Types d'antennes

(2 semaines)

Antennes filaires : dipôles, monopôles, Yagi-Uda, Antennes patch (microstrip), Antennes à ouverture : cornet, parabole, Réseaux d'antennes : linéaires et plans, diagramme en faisceau, formation de faisceau (beamforming), Antennes hélicoïdales et log-périodiques.

Chapitre 4 : Méthodes de modélisation et de mesure

(2 semaines)

Utilisation des logiciels de simulation électromagnétique (CST, HFSS, FEKO, etc.), Mesures en chambre anéchoïque : diagramme de rayonnement, VSWR, impédance, Caractérisation expérimentale d'antennes.

Chapitre 5 : Propagation des ondes électromagnétiques

(2 semaines)

Propagation en espace libre : équation de Friis, Pertes de transmission, zone de Fresnel, Propagation dans des milieux réels : réflexion, diffraction, diffusion, Propagation en milieux urbains, intérieurs, ruraux, Effets de la météo et du relief, Modèles empiriques : Hata, COST-231, Okumura, etc.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- Jean-Charles Bolomey, François E. Gardiol – Antennes, Éditions Dunod, 2001.
- 2- Roger Fieux – Propagation des ondes électromagnétiques, Masson, 1993.
- 3- Serge Chaumet – Antennes et lignes de transmission, Ellipses, 2020.
- 4- Constantine A. Balanis – Antenna Theory: Analysis and Design, Wiley, 4e édition, 2016.
- 5- F.T. Ulaby, U. Ravaioli – Fundamentals of Applied Electromagnetics, Pearson, 7e édition, 2015.
- 6- Stutzman & Thiele – Antenna Theory and Design, Wiley, 3e édition, 2012.
- 7- Ramo, Whinnery & Van Duzer – Fields and Waves in Communication Electronics, Wiley, 3e édition, 1994

Semestre : 1

Unité d'enseignement : UEF 1.1.2

Matière 3 : DSP et FPGA pour les applications Anti-Drone

VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Ce module a pour but de fournir aux étudiants les connaissances théoriques et pratiques nécessaires à la mise en œuvre d'algorithmes de traitement du signal (DSP) dédiés aux applications de brouillage, détection et neutralisation de drones, à l'aide de circuits logiques reconfigurables (FPGA).

Les étudiants apprendront à concevoir et implémenter des systèmes temps réel capables de générer, traiter ou perturber des signaux RF en environnement embarqué ou tactique.

Connaissances préalables recommandées :

Logique combinatoire et séquentielle, traitement numérique de signal, architecture des processeurs, microcontrôleur.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction au traitement numérique du signal (DSP) (1 semaine)

Principes de la DSP : échantillonnage, filtrage, FFT, Cas d'application : détection de signaux drones, génération de bruit, modulation C2.

Chapitre 2 : Architecture et fonctionnement des FPGA (2 semaines)

Logique programmable, blocs LUT, horloges, registres, Différences entre FPGA, ASIC et microcontrôleurs, Notions de SoC (System-on-Chip) et FPGA embarqué.

Chapitre 3 : Langages et outils de développement FPGA (3 semaines)

VHDL / Verilog : structures de base, Outils de simulation et de synthèse (Xilinx Vivado, Intel Quartus), Contraintes de timing, fréquence d'horloge, débit

Chapitre 4 : Chaînes de traitement DSP sur FPGA (3 semaines)

Implémentation de filtres numériques (FIR, IIR), FFT temps réel sur architecture reconfigurable, Génération de signaux de brouillage numériques (GNSS, Wi-Fi...).

Chapitre 5 : Interfaçage avec systèmes RF et SDR (2 semaines)

Connexion ADC/DAC, Contrôle de fréquence, phase et amplitude, Communication avec modules SDR (ex : USRP, HackRF).

Chapitre 6 : Applications pratiques en contexte anti-drone (2 semaines)

Génération d'un signal de brouillage GNSS sur FPGA, Implémentation d'un détecteur de fréquence suspecte, Simulation d'un émetteur de spoofing sur base de signaux GPS.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- Philippe Lacomme – Guerre électronique : Concepts, technologies et système, Éditions Cépaduès, 2020.
- 2- Robert Lacoste – Conception d'applications sur FPGA : Du prototype à l'industrialisation, Dunod, 2017.
- 3- Sanjit Mitra – Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach, McGraw-Hill, 4e édition.
- 4- Steven Smith – The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing,
- 5- Wayne Wolf – FPGA-Based System Design, Prentice Hall, 2004.
- 6- U. Meyer-Baese – Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Arrays, Springer, 5e édition, 2020.
- 7- Mahmood R. – Anti-Drone Systems: Technologies and Techniques, Artech House, 2022

Semestre : 1**Unité d'enseignement : UEF 1.1.2****Matière 4 : Traitement d'image et vision artificiel****VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)****Crédits : 4****Coefficient : 2****Objectifs de l'enseignement :**

Ce module vise à fournir les bases théoriques et pratiques du traitement numérique d'image et de la vision par ordinateur. L'accent est mis sur les techniques fondamentales d'analyse d'image ainsi que sur les applications avancées en vision artificielle (détection, reconnaissance, suivi, reconstruction 3D, etc.).

Connaissances préalables recommandées :

Bases en programmation (Python ou C++), Algèbre linéaire et traitement du signal, Notions d'intelligence artificielle ou d'apprentissage automatique (souhaitable mais pas indispensable)

Contenu de la matière :**Chapitre 1 : Introduction au traitement d'image****(1 semaine)**

Nature et représentation des images numériques (niveaux de gris, couleurs, formats), Acquisition et capteurs, Notions de résolution, dynamique, histogrammes, Outils de base : convolution, corrélation.

Chapitre 2 : Traitements de base**(2 semaines)**

Amélioration de l'image : filtrage spatial (moyenne, médiane, gaussien), rehaussement de contraste, Transformée de Fourier 2D, Réduction de bruit, Opérations morphologiques : érosion, dilatation, ouverture, fermeture.

Chapitre 3 : Segmentation d'images**(2 semaines)**

Seuillage global et adaptatif, Détection de contours : Sobel, Prewitt, Canny, Régions homogènes : croissance de régions, k-means, watershed.

Chapitre 4 : Extraction de caractéristiques**(2 semaines)**

Descripteurs simples : moments, zones, contours, Points d'intérêt : Harris, SIFT, SURF, ORB, HOG (Histogram of Oriented Gradients), LBP (Local Binary Patterns).

Chapitre 5 : Vision artificielle et reconnaissance**(2 semaines)**

Correspondance d'images et appariement, Suivi d'objets : optical flow, Kalman, MeanShift, Détection et reconnaissance d'objets (machine learning, CNNs), Classification : SVM, k-NN, réseaux de neurones, Introduction à la vision 3D : stéréovision, structure-from-motion

Chapitre 6 : Outils et bibliothèques**(2 semaines)**

Introduction à OpenCV (Python ou C++), Manipulation d'images et de vidéos, Démonstrations sur des projets réels (vision mobile, caméra intelligente, détection d'anomalies).

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- Gonzalez & Woods – Traitement d'image numérique, Pearson / Dunod (édition française).
- 2- Michel Paindavoine – Vision par ordinateur : Des algorithmes à l'intelligence artificielle, Ellipses, 2021.
- 3- Rachid Chelouah – Introduction au traitement d'image avec Python, Dunod, 2018.
- 4- Richard Gonzalez & Richard Woods – Digital Image Processing, Pearson, 4e édition, 2018.
- 5- Szeliski, Richard – Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer, 2e édition, 2022.
- 6- Simon J. D. Prince – Computer Vision: Models, Learning, and Inference, Cambridge University Press.

Semestre : 1**Unité d'enseignement : UEM 1.1****Matière 1 : TP Compatibilité Electromagnétique****VHS : 22h30 (TP : 1h30)****Crédits : 2****Coefficient : 1****Objectifs de l'enseignement :**

Permettre aux étudiants de mettre en œuvre, observer, mesurer et analyser les phénomènes électromagnétiques perturbateurs (émissions rayonnées ou conduites, susceptibilité, couplages, etc.) dans des circuits et systèmes électroniques, et de comprendre les techniques de mitigation (filtrage, blindage, mise à la masse, découplage, etc.) dans une optique d'ingénierie de la fiabilité CEM.

Connaissances préalables recommandées :

Lois fondamentales : Coulomb, Faraday, Lenz, Maxwell, Ondes électromagnétiques : propagation, réflexion, transmission, Notions de champ électrique / champ magnétique / champ rayonné.

Contenu de la matière :

- TP1 : • Mesure de perturbations conduites et rayonnées**
- TP2 : • Analyse au spectre et en temps**
- TP3 : • Étude de l'efficacité des filtres et blindages**
- TP4 : • Étude de cas : diagnostic et correction d'un problème de non-conformité**

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100 %.

Références bibliographiques :

- 1- Michel Ney – Compatibilité électromagnétique : Cours et exercices corrigés, Éditions Ellipses, 2019.
- 2- Jean-Marc Laheurte – Compatibilité électromagnétique : Théorie et pratiques de mise en œuvre, Dunod, 2014.
- 3- Gérard Ferré – Compatibilité électromagnétique dans les systèmes électroniques, Dunod, 2020.
- 4- Henry W. Ott – Electromagnetic Compatibility Engineering, Wiley, 2009.
- 5- Clayton R. Paul – Introduction to Electromagnetic Compatibility, Wiley, 2e édition.

Semestre : 1
Unité d'enseignement : UEM 1.1
Matière 2 : TP Antennes et Propagation
VHS : 22h30 (TP : 1h30)
Crédits : 2
Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Familiariser les étudiants avec les principes, caractéristiques, mesures et comportements des antennes, ainsi que les phénomènes de propagation électromagnétique, en les confrontant à des situations expérimentales réalistes.

Les TP visent à développer une compréhension appliquée des systèmes de communication sans fil, en particulier dans des contextes opérationnels comme les drones, les radars ou les systèmes de brouillage.

Connaissances préalables recommandées :

Compréhension des équations de Maxwell (forme simplifiée), Concepts de champ électrique (E) et champ magnétique (H), Onde électromagnétique : direction de propagation, polarisation, vitesse, Propagation en espace libre et loi de Friis, Atténuation avec la distance, absorption, réflexion, diffraction, Notions de multi-trajets (multipath), fading, effet Doppler.

Contenu de la matière :

TP1 : Simulation d'antennes simples (dipôle, patch, réseau)

TP2 : Mesures de diagrammes de rayonnement en chambre anéchoïque

TP3 : Étude comparative des performances de différents types d'antennes

TP4 : Simulation de la propagation en environnement urbain

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100 %.

Références bibliographiques :

- 1- Balanis, Constantine A. Antenna Theory: Analysis and Design, Wiley, 4^e édition, 2016.
- 2- Stutzman, Warren L. & Thiele, Gary A. Antenna Theory and Design, Wiley, 3^e édition, 2012.
- 3- Kraus, John D. & Marhefka, Ronald J. Antennas for All Applications, McGraw-Hill, 3^e édition, 2002.
- 4- Zhi Ning Chen & Kwai-Man Luk, Antenna Design for Mobile Devices, Wiley, 2008.
- 5- David M. Pozar, Microwave Engineering, Wiley, 4^e édition, 2011.
- 6- MATLAB Antenna Toolbox Documentation, MathWorks.

Semestre : 1

Unité d'enseignement : UEM 1.1

Matière 3 : TP DSP et FPGA pour les applications Anti-Drone /TP Traitement d'image et vision artificiel

VHS : 22h30 (TP : 1h30)

Crédits : 2

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Permettre aux étudiants de concevoir, implémenter et tester des traitements de signal en temps réel à l'aide de processeurs de signal numérique (DSP) et de circuits logiques programmables (FPGA), appliqués à la détection, identification et neutralisation de drones. Initier les étudiants à la détection, reconnaissance et suivi de drones à partir d'images ou vidéos en temps réel, en utilisant des techniques de vision par ordinateur et d'intelligence artificielle embarquée.

Connaissances préalables recommandées :

Logique combinatoire et séquentielle, Circuits logiques (portes, registres, compteurs, multiplexeurs, Notions de base en VHDL ou Verilog, Lecture, modification et simulation de blocs simples, Connaissances de base sur les DSP (Digital Signal Processor) ou microcontrôleurs, Notions de pixel, image en niveaux de gris / couleur (RGB), Filtres de lissage et de détection de contours (Sobel, Canny, etc.).

Contenu de la matière :

TP1 : Filtrage spatial et détection de contours avec OpenCV

TP2 : Segmentation d'image avec seuillage adaptatif

TP3 : Extraction de caractéristiques et appariement entre images

TP4 : Détection et suivi d'un objet en temps réel

TP5 : Reconnaissance faciale ou classification d'images simples avec un réseau de neurones

TP6 : Filtrage numérique FIR/IIR – implémentation FPGA

TP7 : Transformée de Fourier (FFT) en temps réel sur FPGA

TP8 : Communication FPGA – SDR / UART / I2C / SPI

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100 %.

Références bibliographiques :

- 1- Lyons, Richard G. Understanding Digital Signal Processing, Pearson, 3^e éd., 2010.
- 2- Smith, Steven W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California Technical Publishing, 1997.
- 3- Poulin, François. Traitement du signal numérique avec MATLAB, Dunod, 2020.
- 4- Maxfield, Clive. The Design Warrior's Guide to FPGAs, Newnes, 2004.
- 5- Skahill, Kevin. VHDL for Programmable Logic, Addison-Wesley, 1996.
- 6- Xilinx / Intel (Altera), User Guides & Labs: Vivado Design Suite / Quartus Prime.
- 7- Gonzalez, Rafael C., & Woods, Richard E. Digital Image Processing, Pearson, 4^e éd., 2018.
- 8- Szeliski, Richard. Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer, 2022.
- 9- Jähne, Bernd. Digital Image Processing, Springer, 6^e éd., 2005.

Semestre : 1**Unité d'enseignement : UEM 1.1****Matière 4 : Conception mécanique CFAO****VHS : 37h30 (Cours : 1h30, TP : 1h00)****Crédits : 3****Coefficient : 2****Objectifs de l'enseignement :**

Concevoir des pièces mécaniques adaptées aux systèmes de brouillage (antennes directionnelles, supports, boîtiers, fixations UAV), Utiliser des outils de CAO/FAO pour modéliser et produire des prototypes, Choisir des matériaux selon les contraintes électromagnétiques et mécaniques, Intégrer la conception mécanique dans un cycle de prototypage rapide (impression 3D, usinage)

Connaissances préalables recommandées :

Logiciels : SolidWorks / CATIA / Fusion 360 / AutoCAD / Cura / Inventor, Outils FAO : CAMWorks, Mastercam, Slic3r.

Contenu de la matière :**Chapitre 1 : Rappels de conception mécanique****(1 semaine)**

Modélisation des assemblages mécaniques, Résistance des matériaux : effort, fatigue, vibrations, Choix des matériaux pour compatibilité électromagnétique.

Chapitre 2 : Conception assistée par ordinateur**(2 semaines)**

Logiciels utilisés (SolidWorks, CATIA, Fusion 360, etc.), Modélisation 3D de pièces et d'assemblages, Création de plans techniques et tolérancement, Conception d'un châssis ou d'un support de brouilleur

Chapitre 3 : Simulation mécanique**(2 semaines)**

Analyse par éléments finis (statique, vibratoire, thermique), Simulation de contraintes sur supports embarqués, Optimisation topologique.

Chapitre 4 : Fabrication assistée par ordinateur**(2 semaines)**

Principes de la FAO : usinage CNC, découpe laser, impression 3D, Génération de parcours outils (G-code), Chaîne numérique de fabrication (du fichier 3D à la pièce).

Chapitre 5 : Intégration électromécanique**(2 semaines)**

Montage de sous-systèmes (batterie, antenne, cartes RF), Compatibilité électromagnétique et blindage, Dissipation thermique dans un boîtier de brouillage.

TP1 : Projet de conception d'un boîtier de brouillage portable**TP2 : Impression 3D ou usinage d'une pièce****TP3 : Assemblage et test mécanique d'un prototype****Mode d'évaluation :**

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- Christian Lemoine. Conception Mécanique : Méthodes de conception et d'analyse, Dunod, 2021.
- 2- Yves Jezequel. Conception mécanique des ensembles industriels, Éditions Technip, 2018.
- 3- Gérard Sciarretta. Dessin technique pour l'ingénieur avec AutoCAD / CATIA, Cépaduès, 2017.
- 4- David Planchard. Engineering Design with SOLIDWORKS, SDC Publications, édition annuelle.
- 5- Krar, Gill, Smid. Technology of Machine Tools, McGraw-Hill, 8^e éd., 2020.
- 6- Farid Ameer. Usinage et fabrication assistée par ordinateur, Dunod, 2015.
- 7- Andreas Gebhardt. Understanding Additive Manufacturing, Carl Hanser Verlag, 2012.
- 8- Gibson, Rosen, Stucker. Additive Manufacturing Technologies, Springer, 2^e éd., 2015.

Semestre : 1**Unité d'enseignement : UED 1.1****Matière 1 : Aérodynamique et dynamique du Vol****VHS : 22h30 (cours : 1h30)****Crédits : 1****Coefficient : 1****Objectifs de l'enseignement :**

Comprendre les forces aérodynamiques agissant sur un drone. Modéliser la dynamique du vol (translation et rotation). Expliquer le rôle des capteurs et des contrôleurs dans la stabilisation. Analyser les effets du brouillage sur la navigation et la commande. Identifier les stratégies de résilience face aux interférences.

Connaissances préalables recommandées :

Algèbre linéaire et Equations différentielles. Notions de mécanique du point et des solides (forces, moments, accélération). Connaissances en automatique (systèmes linéaires, stabilité, régulation). Bases en électronique et traitement du signal (filtrage, capteurs). Utilisation de MATLAB/Simulink ou Python (pour les simulations).

Contenu de la matière :**Chapitre 1 : Aérodynamique appliquée aux drones****(1 semaines)**

Propriétés de l'air : pression, densité, viscosité, nombre de Reynolds. Forces aérodynamiques : portance, traînée, poussée, poids. Coefficients aérodynamiques C_L , C_D , C_M . Polaire d'un profil. Notion d'angle d'attaque et de décrochage. Fonctionnement des pales de rotor. Théorie simplifiée de la quantité de mouvement (moment cinétique, poussée). Théorie de la pale élémentaire (approche qualitative). Interaction entre rotors, effet de sol, turbulence. Limites de la poussée en fonction de la vitesse.

Chapitre 2 : Cinématique et dynamique du vol**(3 semaines)**

Repères utilisés : terrestre (NED), corps, aérodynamique. Angles d'Euler : roulis (ϕ), tangage (θ), lacet (ψ). Limitations : blocage de cardan (gimbal lock). Introduction aux quaternions (définition, avantages). Transformation de vecteurs entre repères (matrices de rotation). Vitesses linéaires (dans le repère terrestre et corps). Vitesses angulaires (p , q , r) mesurées par le gyromètre. Relation entre dérivée des angles d'Euler et vitesses angulaires. Application : estimation de l'orientation à partir du gyromètre. Dynamique du vol – Forces et équations de translation. Dynamique du vol – Moments et équations de rotation. Application aux quadrirotors : relation entre vitesses moteurs et moments. Linéarisation des équations autour d'un point d'équilibre (vol stationnaire). Modes de mouvement : Phugoid (lent, en aile fixe), Oscillation de courte période, Mode de roulis, tangage, lacet. Notion de stabilité dynamique : amortissement, fréquence naturelle.

Chapitre 3 : Stabilité statique et dynamique des drones et Commande**(3 semaines)**

Stabilité statique : tendance à revenir après perturbation. Stabilité dynamique : évolution temporelle (oscillations amorties, instabilité). Exemples : drone stable vs instable. Rôle du centre de gravité et de la distribution des masses. Multicoptères : instabilité naturelle $\rightarrow$ besoin de contrôle actif. Boucles de commande – PID. Commande avancée – Retour d'état et LQR.

Chapitre 4 : Capteurs et fusion sensorielle**(3 semaines)**

Rôle des capteurs : Gyromètre : vitesse angulaire. Accéléromètre : accélération $\rightarrow$ orientation statique. GPS : position, vitesse. Magnétomètre : cap (Nord magnétique). Baromètre : altitude. Limites de chaque capteur (bruit, latence, dérive). Fusion de capteurs : complémentarité accélero/gyro. Effets du brouillage sur les capteurs. Stratégies de tolérance au brouillage

Chapitre 5 : Synthèse et étude de cas**(2 semaines)**

Revue des concepts clés : forces, dynamique, commande, brouillage. Étude de cas 1 : Un drone subit un brouillage GPS en vol stationnaire. Étude de cas 2 : Comparaison drone grand public vs professionnel (robustesse). Discussion : comment concevoir un drone résilient ?

Mode d'évaluation :

Examen : 100%.

Références bibliographiques :

- 1- John D. Anderson Jr. Fundamentals of Aerodynamics, McGraw-Hill, 6^e éd., 2016.
- 2- E. L. Houghton, P. W. Carpenter. Aerodynamics for Engineering Students, Butterworth-Heinemann, 7^e éd., 2016.
- 3- Kuethe, A. M. & Chow, C.-Y. Foundations of Aerodynamics, Wiley, 5^e éd., 1997.
- 4- Jean-Claude Germain. Aérodynamique appliquée – Méthodes et applications, Cépaduès, 2020.
- 5- Bernard Etkin, Lloyd Duff Reid. Dynamics of Flight: Stability and Control, Wiley, 2009.
- 6- Steven A. Brandt et al. Introduction to Flight, McGraw-Hill, 9^e éd., 2020.
- 7- Rafael Yanushevsky. Modern Guidance, Navigation, and Control Processing for Missile and UAV Systems, CRC Press, 2018.
- 8- Doug Marshall. UAS Handbook: A Guide to the Operations of Unmanned Aircraft Systems, CRC Press, 2021.

Semestre : 1**Unité d'enseignement : UED 1.1****Matière 2 : Architecture des drones****VHS : 22h30 (cours : 1h30)****Crédits : 1****Coefficient : 1****Objectifs de l'enseignement :**

Ce module vise à familiariser les étudiants avec la structure globale d'un drone (aéronef sans pilote), à comprendre l'agencement des sous-systèmes matériels et logiciels, et à permettre la conception, l'intégration et l'optimisation de plateformes volantes autonomes ou télécommandées.

Connaissances préalables recommandées :

Connaissances de base en électronique, systèmes embarqués et contrôle automatique, Bases en programmation (C/C++, Python), Notions de mécanique du vol (souhaitées).

Contenu de la matière :**Chapitre 1 : Introduction aux systèmes de drones (1 semaine)**

Classification des drones : multicopters, ailes fixes, VTOL, hybrides, Applications : civil, militaire, industriel, agricole, surveillance, livraison, Contraintes techniques, énergétiques, environnementales et réglementaires, Cycle de vie d'un drone : conception, intégration, test, déploiement.

Chapitre 2 : Sous-systèmes matériels (2 semaines)

- Structure/châssis : matériaux, géométrie, contraintes mécaniques,
- Système de propulsion : moteurs (BLDC), hélices, ESC (Electronic Speed Controllers)
- Énergie : batteries LiPo, gestion d'énergie, autonomie
- Capteurs embarqués : IMU, GPS, baromètre, magnétomètre, caméras
- Actionneurs : servomoteurs, contrôleurs moteurs
- Interfaces de communication : radio, télémétrie, Wi-Fi, 4G/5G

Chapitre 3 : Architecture logicielle embarquée (2 semaines)

Microcontrôleurs, cartes de vol (Pixhawk, Ardupilot, etc.), Firmware et systèmes d'exploitation embarqués (RTOS, Linux embarqué), Boucle de contrôle (stabilisation, navigation, suivi de trajectoire), Protocole MAVLink, ROS (Robot Operating System) pour les drones, Sécurité, redondance, diagnostic embarqué.

Chapitre 4 : Intégration des systèmes (2 semaines)

Schémas d'architecture drone (niveau système, fonctionnel, matériel), Conception modulaire, bus de communication interne (I2C, SPI, UART, CAN), Synchronisation capteurs/actionneurs, Simulation et test d'intégration (HIL – Hardware-in-the-Loop), Compatibilité entre composants et interfaçage

Chapitre 5 : Cas pratiques et démonstrations (2 semaines)

Assemblage et configuration d'un drone multicopter, Calibration des capteurs, réglage des PID de stabilisation, Simulation de vol (Gazebo, DroneSim, PX4 SITL), Analyse de missions types : suivi de cible, cartographie, vol autonome GPS, Diagnostic de panne ou de défaillance système.

Mode d'évaluation :

Examen : 100%.

Références bibliographiques :

- 1- Reg Austin. Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment, Wiley, 2^e éd., 2010.
- 2- Kimon P. Valavanis & George J. Vachtsevanos. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, Springer, 5 volumes, 2015.
- 3- Paul G. Fahlstrom & Thomas J. Gleason. Introduction to UAV Systems, Wiley, 4^e éd., 2012.
- 4- Luis Rodolfo Garcia Carrillo et al. Quad Rotorcraft Control: Vision-Based Hovering and Navigation, Springer, 2012.
- 5- Saeed B. Niku. Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications, Wiley, 4^e éd., 2019.

Semestre : 1

Unité d'enseignement : UET 1.1

Matière : Télécommunication spatiale

VHS : 22h30 (cours : 1h30)

Crédits : 1

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Comprendre les fondements des télécommunications spatiales, y compris les réseaux satellitaires et les technologies associées. Appréhender les vulnérabilités des drones vis-à-vis des brouillages (GPS, communications RF, etc.). Étudier les techniques de brouillage ciblées contre les drones et les méthodes de défense et de contre-mesures. Acquérir des compétences pratiques sur l'analyse des signaux, le brouillage et la protection des systèmes de communication spatiaux utilisés par les drones.

Connaissances préalables recommandées :

Connaissances en télécommunications et en réseaux sans fil, Bases en systèmes de communication et de radar. Connaissances de base en électronique et en signal processing. Familiarité avec les systèmes de positionnement par satellite (GPS, Galileo, etc.).

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction aux systèmes de télécommunication spatiale (1 semaine)

- Concepts de base des télécommunications spatiales
- Définition des réseaux de communication spatiaux.
- Types de satellites utilisés : géostationnaires, moyennes orbites, orbites basses (LEO).
- Fonctionnement des systèmes de communication par satellite et leur impact sur les drones.
- Caractéristiques des signaux spatiaux
- Propagation des ondes et caractéristiques des signaux RF spatiaux.
- Impact des distances longues et des conditions atmosphériques sur la qualité des communications.
- Applications des satellites pour les drones
- Positionnement et navigation (GPS, Galileo, GLONASS).
- Transmission des données de commande et contrôle (C2) des drones via satellites.
- Applications civiles et militaires : surveillance, cartographie, collecte de données, etc.

Chapitre 2 : Drones et vulnérabilité aux brouillages (2 semaines)

- Les systèmes de navigation par satellite utilisés par les drones
- Le GPS et ses alternatives (Galileo, GLONASS, etc.).
- Navigation assistée par satellite (A-GNSS), augmentation de la précision et des risques.
- Types de brouillage affectant les drones
- Brouillage des signaux GPS (Spoofing, jamming) : principes et impact.
- Interférence sur les communications RF entre drone et station de contrôle.
- Déni de service dans les communications par satellite (attaque sur les réseaux de télécommunications spatiaux).
- Mécanismes de brouillage :
- Jamming (brouillage) : Saturation du spectre des signaux GPS.
- Spoofing (usurpation de signal) : Injection de signaux GPS faussement positionnés.
- Brouillage RF : Perturbation des canaux de communication drone-station de contrôle.

Chapitre 3 : Techniques de brouillage contre les drones (2 semaines)

- Brouillage GPS et ses impacts
- Techniques de perturbation des signaux GPS : jamming et spoofing.
- Détection des attaques de spoofing via des mesures de redondance (comme les capteurs inertiels).
- Technologies de contre-mesures spécifiques au GPS : Antennes Directionnelles, Technologies de Détection de Spoofing.

- Brouillage RF des communications
 - Techniques de brouillage RF contre les systèmes de communication de contrôle de drones.
 - Techniques de synchronisation et leur vulnérabilité.
 - Interception et détection des fréquences de communication.
- Brouillage des systèmes de télémétrie et des images satellites
 - Brouillage des transmissions de données (images, vidéos).
 - Impact sur les systèmes de collecte de données et les missions en temps réel.

Chapitre 4 : Méthodes de défense contre le brouillage des drones (2 semaines)

- Techniques de défense contre le brouillage GPS
 - Filtrage et techniques de fusion de données : utilisation de capteurs alternatifs (IMU, baromètres, magnétomètres).
 - Systèmes de détection de spoofing et d'attaque GPS (exemples : récepteurs multipath, analyse de la variabilité des signaux).
 - Intégration de solutions de géopositionnement autonomes (insensibles au GPS).
- Contre-mesures pour les communications RF
 - Techniques de communication sécurisée : cryptage et authentification des signaux.
 - Diversification des fréquences : saut de fréquence (frequency hopping).
 - Systèmes de communication à faible probabilité de détection (Low Probability of Detection - LPD).
- Techniques de réduction du bruit et de résistance au brouillage
 - Modulation et codage robuste.
 - Réseaux maillés et interconnectivité entre drones.
 - Antennes directionnelles et systèmes de communication avec faible empreinte radio (LPI/LPD).

Chapitre 5 : Approches avancées et technologies de défense (2 semaines)

- Systèmes de détection de brouillage
 - Radar et systèmes de détection RF.
 - Analyse spectrale et techniques de triangulation pour localiser les brouilleurs.
 - Intégration de l'intelligence artificielle pour la détection et la réponse en temps réel.
- Systèmes autonomes et résilients face aux brouillages
 - Utilisation de l'intelligence artificielle pour la gestion des attaques et la reconfiguration des systèmes.
 - Simulation d'attaque et défense avec des réseaux de drones (essais en laboratoire et simulations).
 - Approches coopératives entre drones pour contrer le brouillage (formation en essaim, détection distribuée).
- Sécurisation des communications via satellite
 - Cryptage et sécurisation des communications satellitaires.
 - Pratiques et normes en matière de sécurité dans les télécommunications spatiales.

Mode d'évaluation :

Examen : 100%.

Références bibliographiques :

- 1- Dennis Roddy. Satellite Communications, McGraw-Hill, 4^e édition, 2006.
- 2- Timothy Pratt, Charles W. Bostian & Jeremy Allnutt. Satellite Communications, Wiley, 2^e édition, 2003.
- 3- Tri T. Ha. Digital Satellite Communications, McGraw-Hill, 2^e édition, 1990.
- 4- M. Richharia & L. Westbrook. Satellite Communication Systems: Design Principles, McGraw-Hill / Wiley, 2011.
- 5- Delbert Tesar. Communications for UAVs: Ground-to-Space and Space-to-Ground Links, IEEE Press, 2020.
- 6- Andrea Goldsmith. Wireless Communications, Cambridge University Press, 2005.
- 7- Simon Haykin. Digital Communication Systems, Wiley, 2013.

IV - Programme détaillé par matière du semestre S2

Semestre : 2

Unité d'enseignement : UEF 1.2.1

Matière 1 : Brouillage des Signaux RF

VHS : 67h30 (Cours : 3h00, TD : 1h30)

Crédits : 6

Coefficient : 3

Objectifs de l'enseignement :

Ce module a pour but de former les étudiants aux principes, méthodes et techniques de brouillage (jamming) des signaux radiofréquences, dans un cadre scientifique, technologique et réglementé. Il couvre les bases théoriques, les applications pratiques (défense, sécurité, protection d'infrastructures) et les contremesures associées.

Connaissances préalables recommandées :

Signaux et systèmes, traitement numérique du signal, Radiofréquences et télécommunications, Connaissances de base en électronique ou systèmes embarqués, Programmation et manipulation d'outils comme MATLAB ou Python.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Fondamentaux des signaux RF

(1 semaine)

Caractéristiques des signaux radio : fréquence, bande passante, puissance, Modulations analogiques et numériques (AM, FM, PSK, QAM, OFDM), Propagation des ondes : espace libre, multi-trajets, fading, Vue d'ensemble des standards RF : Wi-Fi, GSM, GPS, LTE, etc.

Chapitre 2 : Théorie du brouillage

(2 semaines)

Définitions : brouillage, interférence, saturation, spoofing, Types de brouillage : Brouillage de bruit (noise jamming), Brouillage à tonalité (tone jamming), Brouillage impulsif / par rafales, Brouillage réactif ou adaptatif, Brouillage de protocoles spécifiques (ex : GPS spoofing). Paramètres influents : rapport signal/brouilleur (S/J), distance, puissance.

Chapitre 3 : Conception et architecture d'un système de brouillage

(2 semaines)

Générateur de signal et modulateur, Amplificateurs RF et antennes de brouillage, Stratégies d'émission : directionnelle, omnidirectionnelle, Brouilleurs à base de SDR (Software Defined Radio), Environnements contrôlés de test (chambre blindée, simulateur RF).

Chapitre 4 : Simulation et analyse d'efficacité

(2 semaines)

Outils de simulation : MATLAB, GNU Radio, Simulink, CST, Scénarios de brouillage : télécommande, Wi-Fi, GPS, liaisons drone, Évaluation de la portée et de l'impact d'un brouillage, Étude du taux d'erreur binaire (BER), capacité du canal, QoS perturbée.

Chapitre 5 : Contremesures et protection

(2 semaines)

Techniques d'étalement de spectre (FHSS, DSSS), Systèmes à redondance fréquentielle ou spatiale (MIMO, diversité), Cryptage et authentification du signal, Détection de brouillage : analyse de spectre, détection de patterns, Systèmes anti-jamming intelligents (IA, apprentissage automatique).

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- David Adamy. EW 101: A First Course in Electronic Warfare, Artech House, 2001.
- 2- David Adamy. EW 102: A Second Course in Electronic Warfare, Artech House, 2004.
- 3- Andrea De Martino. Introduction to Modern EW Systems, Artech House, 2012.
- 4- Simon Haykin. Communication Systems, Wiley, 5^e éd., 2009.

Semestre : 2

Unité d'enseignement : UEF 1.2.1

Matière 2 : Systèmes multi-capteurs

VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Ce module a pour objectif de former les étudiants à la conception, la mise en œuvre et la fusion de données de systèmes multi-capteurs, avec une orientation vers les applications embarquées (drones, véhicules autonomes, robots, systèmes intelligents).

Connaissances préalables recommandées :

Traitement du signal et estimation, Programmation (Python / C++), Connaissances de base en capteurs et électronique embarquée, Systèmes embarqués et robotique (souhaité).

Contenu de la matière :

Chapitre1 : Introduction aux systèmes multi-capteurs

(1semaine)

Définition et intérêt des systèmes multi-capteurs, Exemples d'applications (drones, robotique, IoT, véhicules autonomes), Architecture générale : capteurs, prétraitement, fusion, décision, Contraintes : temps réel, bande passante, consommation, redondance.

Chapitre2 : Typologie des capteurs embarqués

(2 semaines)

Capteurs de position et mouvement : IMU, gyroscope, accéléromètre, magnétomètre, Capteurs optiques : caméras RGB, infrarouges, stéréovision, Capteurs de distance : Lidar, Radar, ultrason, Capteurs de positionnement : GPS, GNSS RTK, Capteurs environnementaux : pression, température, humidité.

Chapitre 3 : Acquisition, synchronisation et étalonnage

(2 semaines)

Interfaces de communication : I2C, SPI, UART, CAN, Ethernet, Cadencement, horodatage, synchronisation matérielle / logicielle, Étalonnage des capteurs : biais, bruit, dérive, méthodes de correction, Gestion des erreurs de mesure et de la redondance.

Chapitre 4 : Fusion de données multi-capteurs

(2 semaines)

Motivation et objectifs : fiabilité, précision, robustesse

Méthodes classiques :

- Moyenne pondérée
- Filtres de Kalman (KF, EKF, UKF)
- Algorithmes bayésiens

Fusion à différents niveaux :

- Données brutes (low-level)
- Caractéristiques (feature-level)
- Décisions (high-level)

Chapitre 5 : Architectures logicielles et frameworks

(2 semaines)

Architectures embarquées pour multi-capteurs : microcontrôleurs, SoC, ROS, Middleware : ROS (Robot Operating System), DDS, Gestion de capteurs dans des environnements temps réel, Exemple d'implémentation sur cartes NVIDIA Jetson, STM32, Raspberry Pi.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- Martin Liggins II, David Hall & James Llinas. Handbook of Multisensor Data Fusion: Theory and Practice, CRC Press, 2^e édition, 2008.
- 2- David L. Hall & Sonya A. H. McMullen. Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion, Artech House, 2^e édition, 2004.

- 3- H. B. Mitchell. Data Fusion: Concepts and Ideas, Springer, 2012.
- 4- Walt Kester (Analog Devices). The Data Conversion Handbook, Newnes, 2004.
- 5- R. G. Brown & P. Y. C. Hwang. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, Wiley, 3^e éd., 1997.
- 6- Paul Zarchan & Howard Musoff. Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach, AIAA Education Series, 2015.

Semestre : 2

Unité d'enseignement : UEF 1.2.2

Matière 3 : Système Embarqué et Système Temps Réel

VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Ce module a pour objectif de former les étudiants à la conception, au développement et à la mise en œuvre de systèmes embarqués, en particulier dans des environnements temps réel contraints, typiques des applications critiques (drones, robotique, automobile, aérospatial, santé, etc.).

Connaissances préalables recommandées :

Notions de base en programmation (C, Python), Bases en microcontrôleurs et électronique numérique, Connaissances en systèmes d'exploitation (souhaitées).

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction aux systèmes embarqués (1 semaine)

Définitions, caractéristiques et enjeux, Exemples d'applications (IoT, drones, robotique, automobile, etc.), Microcontrôleurs vs microprocesseurs, Architectures typiques : ARM Cortex-M, AVR, ESP32, STM32, Interfaces de communication : UART, SPI, I2C, CAN, GPIO.

Chapitre 2 : Environnement de développement (2 semaines)

Outils : IDE (Keil, STM32CubeIDE, PlatformIO, etc.), Langages : C/C++, Python embarqué, assembleur (bref aperçu), Chaîne de compilation croisée, Programmation bare-metal vs avec RTOS.

Chapitre 3 : Introduction aux systèmes temps réel (1 semaine)

Définitions : système temps réel dur / mou / ferme, Modèles d'ordonnancement : à priorité fixe (RM, DM), dynamique (EDF), Contraintes de latence, gigue, fréquence d'échantillonnage, Analyse de la charge processeur et de la faisabilité temps réel.

Chapitre 4 : Systèmes d'exploitation temps réel (RTOS) (2 semaines)

Structure et fonctionnalités d'un RTOS (FreeRTOS, Zephyr, ChibiOS, etc.), Tâches, files d'attente, sémaphores, mutex, Timers et interruptions, Gestion de la mémoire (pile, tas, mémoire partagée), Synchronisation et communication inter-tâches, Démonstration sur STM32 ou ESP32 avec FreeRTOS.

Chapitre 5 : Interfaces et capteurs dans les systèmes embarqués (2 semaines)

Acquisition de données (capteurs analogiques et numériques), Conversion A/N, N/A, Lecture de capteurs IMU, GPS, capteurs de température, ultrasons, Commande de moteurs, PWM, contrôle d'actionneurs, Intégration avec bus de terrain (CAN, Modbus).

Chapitre 6 : Sécurité et fiabilité des systèmes embarqués (2 semaines)

Détection d'erreurs, tolérance aux fautes, Watchdog, redondance, mécanismes d'autoréparation, Sécurité logicielle de bas niveau, Aspects critiques en applications médicales, aéronautiques, militaires.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- Frank Vahid & Tony Givargis. Embedded System Design: A Unified Hardware/Software Introduction, Wiley, 2002.
- 2- Marilyn Wolf. Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design, Morgan Kaufmann, 4^e éd., 2016.
- 3- Wayne Wolf. Embedded System Interfacing: Design for the Real World, Addison-Wesley, 2000.

- 4- Jane W. S. Liu. Real-Time Systems, Pearson, 2000.
- 5- K.C. Wang. Embedded and Real-Time Operating Systems, Springer, 2017.
- 6- Phillip A. Laplante. Real-Time Systems Design and Analysis, Wiley-IEEE Press, 4^e éd., 2011.
- 7- Jonathan W. Valvano. Embedded Systems: Real-Time Interfacing to ARM Cortex-M Microcontrollers, CreateSpace, 2015.
- 8- Michael Barr & Anthony Massa. Programming Embedded Systems in C and C++, O'Reilly Media, 2006.

Semestre : 2
Unité d'enseignement : UEF 1.2.2
Matière 4 : Les Dispositifs de Brouillage
VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)
Crédits : 4
Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Ce module a pour but de donner aux étudiants une connaissance approfondie des technologies, architectures et techniques de mise en œuvre des dispositifs de brouillage, en s'appuyant sur des cas d'usage réels (brouillage de drones, GNSS, télécoms, etc.), tout en intégrant les aspects techniques, réglementaires et stratégiques.

Connaissances préalables recommandées :

RF et télécommunications, Systèmes embarqués et capteurs, Bases en traitement du signal, Connaissances de GNU Radio ou MATLAB souhaitées.

Contenu de la matière :

Chapitre1 : Introduction aux dispositifs de brouillage (1 semaine)

Définitions : brouillage, interférence intentionnelle, guerre électronique, Classification des brouilleurs : tactiques, portables, fixes, embarqués, Historique et évolutions (militaire, civil, cybersécurité), Exemples de dispositifs existants : anti-GPS, anti-drones, anti-Wi-Fi, anti-GSM.

Chapitre 2 : Architecture matérielle des dispositifs de brouillage (2 semaines)

Générateur de signal RF : bruit blanc, signal modulé, Amplificateurs de puissance RF, Antennes de brouillage (omnidirectionnelles, directionnelles, réseaux adaptatifs), Systèmes d'alimentation et de refroidissement, Cartes à base de SDR (ex : HackRF, USRP), FPGA, microcontrôleurs embarqués.

Chapitre 3 : Techniques de brouillage mises en œuvre (2 semaines)

Brouillage de bruit, tonalité, impulsionnel, Brouillage chirp et à balayage fréquentiel, Brouillage réactif (détection automatique du signal cible), Brouillage intelligent (IA, apprentissage automatique), Simulation de brouillage GPS, Wi-Fi, GSM, LTE, drones.

Chapitre 4 : Conception et intégration (2 semaines)

Spécification d'un dispositif de brouillage selon l'environnement cible, Intégration sur plateforme mobile (véhicule, drone, sac à dos), Coordination multi-brouilleurs (effets de couverture, saturation), Tests sur bancs de simulation ou en environnement clos, Gestion de l'autonomie, dissipation thermique, robustesse mécanique.

Chapitre 5 : Lutte anti-drones (C-UAS) et applications spécifiques (2 semaines)

Brouilleurs GNSS et de liaison de commande, Systèmes hybrides : brouillage + détection (RF, radar, caméra), Exemples de systèmes C-UAS intégrés (DroneGun, DroneDefender, etc.).

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- David L. Adamy. EW 101: A First Course in Electronic Warfare, Artech House, 2001.
- 2- Richard A. Poisel. Modern Communications Jamming: Principles and Techniques, Artech House, 2011.
- 3- Richard A. Poisel. Introduction to Communication Electronic Warfare Systems, Artech House, 2008.
- 4- Andrea De Martino. Introduction to Modern EW Systems, Artech House, 2012.
- 5- David Adamy. EW 102: A Second Course in Electronic Warfare, Artech House, 2004.

- 6- James Genova. Electronic Warfare Signal Processing, Artech House, 2018.
- 7- Paul Hannen (NATO, RTO Reports). Electronic Warfare Against UAVs (NATO STO Publications).
- 8- Anti-Drone Systems: A Survey on Technologies and Challenges. IEEE Access, 2021.
- 9- Neutralisation des drones par saturation des liaisons radiofréquence. CNES / IRSEM 2019.

Semestre : 2

Unité d'enseignement : UEM 1.2

Matière 1 : TP Brouillage des Signaux RF

VHS : 22h30 (TP : 1h30)

Crédits : 2

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Permettre aux étudiants d'acquérir une compréhension pratique des techniques de brouillage radiofréquence (RF) à travers la mise en œuvre, l'analyse et l'évaluation de scénarios de brouillage dans un cadre contrôlé, en lien avec les menaces drones.

Connaissances préalables recommandées :

Propagation des ondes électromagnétiques (loi de Friis, atténuation, multi-trajets), Bandes de fréquence ISM, GNSS, C2 (command and control des drones), Caractéristiques des antennes (gain, directivité, diagramme de rayonnement).

Contenu de la matière :

TP1 : Génération d'un brouillage RF à l'aide d'un SDR (HackRF, USRP, RTL-SDR)

TP2 : Simulation de brouillage sur un signal OFDM (Wi-Fi) ou GNSS

TP3 : Évaluation des performances d'une liaison sous attaque

TP4 : Détection d'un brouilleur dans un spectre radio

TP5 : Mise en œuvre de contremesures (FHSS, filtrage adaptatif)

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100%

Références bibliographiques :

- 1- Richard A. Poisel – Introduction to Communication Electronic Warfare Systems. Artech House, 2012
- 2- David Adamy – EW 101: A First Course in Electronic Warfare. Artech House, 2001
- 3- Paul Hannen – Electronic Warfare Target Location Methods. Artech House, 2013.
- 4- Alexander M. Wyglinski, Di Pu, Theodore S. Rappaport – Wireless Transceiver Design: Mastering the Design of Modern Wireless Equipment and Systems. Wiley, 2010.
- 5- Cody T. Wild – Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR. Strathclyde Academic Media, 2018

Semestre : 2

Unité d'enseignement : UEM 1.2

Matière 2 : TP Systèmes multi-capteurs

VHS : 22h30 (TP : 1h30)

Crédits : 2

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Comprendre comment interfacier des capteurs de types différents (optiques, acoustiques, RF, inertiels...) dans un même système embarqué. Apprendre à synchroniser les flux de données multi-capteurs dans un contexte temps réel. Identifier les forces et limites de chaque technologie (GPS, IMU, caméras, LIDAR, radars, capteurs magnétiques...). Exploiter la redondance et la complémentarité pour améliorer la robustesse du système global.

Connaissances préalables recommandées :

Compréhension du fonctionnement de capteurs analogiques et numériques (capteur de température, IMU, GPS, LIDAR, etc.). Savoir utiliser un microcontrôleur (Arduino, STM32, Raspberry Pi...) pour interfacier un capteur

Contenu de la matière :

TP1 : Intégration et lecture simultanée d'un GPS + IMU + magnétomètre

TP2 : Filtrage de Kalman pour estimation de la position et de l'orientation

TP3 : Calibration croisée caméra-IMU (Visual-Inertial Odometry)

TP4 : Mini-projet : perception multi-capteurs pour évitement d'obstacles

TP5 : Fusion temps réel sur carte embarquée (STM32 ou Jetson Nano)

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100%

Références bibliographiques :

- 1- "Data Fusion: Concepts and Ideas" – H.B. Mitchell. Springer, 2012.
- 2- "Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB" – Jitendra R. Raol. CRC Press, 2009.
- 3- "Sensor Technologies: Healthcare, Wellness and Environmental Applications" – Michael J. McGrath, Cliodhna Ni Scanail. Apress, 2013.
- 4- "A Survey of Sensor Fusion Algorithms for Localization and Mapping" – C. Cadena et al. IEEE Transactions on Robotics, 2016.
- 5- "Review of Multi-Sensor Fusion Techniques in Intelligent Systems" – Various Authors. MDPI Sensors Journal.

Semestre : 2

Unité d'enseignement : UEM 1.2

Matière 3 : TP Système Embarqué et Système Temps Réel

VHS : 22h30 (TP : 1h30)

Crédits : 2

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Comprendre le fonctionnement d'un système embarqué (matériel + logiciel). Identifier les composants clés : microcontrôleur, capteurs, actionneurs, bus de communication.

Connaissances préalables recommandées :

Connaissance des composants typiques : GPIO, ADC, timers, PWM, mémoire flash/RAM. Notions sur les interfaces de communication (UART, SPI, I2C, CAN). Bases des systèmes d'exploitation temps réel (RTOS). Compréhension des concepts de multitâche, d'ordonnancement, de priorités.

Contenu de la matière :

TP1 : Développement d'un programme temps réel sur STM32 avec FreeRTOS

TP2 : Lecture de capteurs + affichage en temps réel (ex : OLED, UART)

TP3 : Mesure et analyse des temps de réponse et de la latence

TP4 : Priorisation et synchronisation de tâches concurrentes

TP5 : Mini-projet : prototype de système embarqué (drone, robot, dispositif IoT)

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100%

Références bibliographiques :

- 1- Jonathan W. Valvano. "Embedded Systems: Introduction to ARM Cortex-M Microcontrollers". (Éd. CreateSpace).
- 2- Elecia White. "Making Embedded Systems: Design Patterns for Great Software".(O'Reilly Media, 2011).
- 3- Joseph Yiu. "The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors".(Newnes, 3e édition).
- 4- Qing Li, Caroline Yao. "Real-Time Concepts for Embedded Systems".(CMP Books, 2003).
- 5- Jim Cooling. "Real-Time Operating Systems: Book 1 – The Theory".(WIT Press).
- 6- Richard Barry (créateur de FreeRTOS)"Mastering the FreeRTOS Real Time Kernel – A Hands-On Tutorial Guide"

Semestre : 2

Unité d'enseignement : UEM 1.2

Matière 4 : Etude et Réalisation des projets

VHS : 37h30 (Cours : 1h30, TP : 1h00)

Crédits : 3

Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Identifier et formuler un problème technologique dans le domaine anti-drone, Concevoir une solution innovante intégrant plusieurs disciplines (mécanique, électronique, logiciel, traitement du signal), Réaliser un prototype fonctionnel (ou simulation avancée), Gérer un projet technique (organisation, planification, suivi, gestion des risques), Communiquer efficacement les résultats du projet (rapport et soutenance).

Connaissances préalables recommandées :

Aucune

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Choix et cadrage du projet (1 semaine)

Brainstorming de projets anti-drone, Rédaction du cahier des charges fonctionnel, Étude de faisabilité technique (moyens disponibles, contraintes), Validation du sujet par l'encadrant.

Chapitre 2 : Phase de conception technique (2 semaines)

Architecture système : sous-systèmes (RF, traitement, mécanique...), Choix des composants (FPGA, SDR, batteries, antennes...), Schémas électroniques, CAO mécanique, schémas bloc, Simulation / modélisation préliminaire.

Chapitre 3 : Phase de réalisation / prototypage (2 semaines)

Programmation (DSP, VHDL, C/C++, Python), Intégration de modules RF, antennes, FPGA, microcontrôleurs, Fabrication de supports mécaniques (impression 3D, découpe laser), Tests et validation fonctionnelle.

Chapitre 4 : Communication et valorisation du projet (2 semaines)

Rédaction du rapport technique (normes de rédaction scientifique), Création d'un poster ou d'une présentation technique, Soutenance orale devant jury (technique + innovation).

Chapitre 5 : Évaluation et retour d'expérience (2 semaines)

Autoévaluation et évaluation croisée des membres du groupe, Retours du jury, Améliorations proposées et perspectives R&D.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

Semestre : 2

Unité d'enseignement : UED 1.2

Matière 1 : Système de navigation aérienne

VHS : 22h30 (cours : 1h30)

Crédits : 1

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Former les étudiants à la compréhension, à la mise en œuvre et à l'analyse des systèmes de navigation aérienne (GNSS, inertiels, hybrides), utilisés dans les aéronefs pilotés et autonomes (drones), en tenant compte des contraintes réglementaires, technologiques et opérationnelles.

Connaissances préalables recommandées :

Bases en mécanique du vol et cinématique, Traitement du signal et estimation, Connaissances de base en électronique embarquée et capteurs, Notions de programmation (MATLAB, Python ou C)

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction à la navigation aérienne (1 semaine)

Définitions et objectifs, Historique et évolution des systèmes de navigation, Catégories de navigation : à vue, inertielle, satellite, radionavigation, Exigences ICAO / EASA (intégrité, précision, continuité)

Chapitre 2 : Systèmes de positionnement par satellite (GNSS) (2 semaine)

Constellations GNSS : GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou, Principe de trilatération et calcul de position, Erreurs et sources d'incertitude : ionosphère, multi-trajets, horloges, Systèmes d'augmentation : SBAS (EGNOS), GBAS, RAIM, Application à l'aviation : navigation en route, approche, atterrissage.

Chapitre 3 : Systèmes de navigation inertielle (INS) 2 semaines)

Accéléromètres et gyroscopes : principes physiques (MEMS, FOG, RLG), Intégration des mesures et calcul de position, Dérive et recalage des systèmes inertiels, Architecture INS (strapdown, plateforme stable), Navigation morte et limitations.

Chapitre 4 : Fusion de données et systèmes hybrides GNSS/INS (2 semaines)

Intérêt de la fusion : redondance, robustesse, précision, Filtres de Kalman et estimation d'état, Intégration multi-capteurs (GNSS, IMU, magnétomètre, altimètre), Navigation dans environnements GNSS-dénis (tunnels, combats, brouillage).

Chapitre 5 : Autres technologies et aides à la navigation (2 semaines)

Radionavigation : VOR, DME, ILS, TACAN, Navigation basée sur la vision (Visual Odometry, SLAM), Navigation à l'aide de signaux opportunistes (Wi-Fi, LTE, RF), Suivi de trajectoires et géorepérage (geofencing).

Mode d'évaluation :

Examen : 100 %

Références bibliographiques :

- 1- R. P. G. Collinson . "Introduction to Avionics Systems", (Springer).
- 2- Pierre T. Kabamba, Anouck R. Girard. "Fundamentals of Aerospace Navigation and Guidance".(Cambridge University Press).
- 3- Elliott D. Kaplan, Christopher Hegarty. "Understanding GPS: Principles and Applications".(Artech House, 2e édition).
- 4- Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews. "Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration".(Wiley).
- 5- Randy Beard, Timothy W. McLain. "Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice". (Princeton University Press).
- 6- "UAV Navigation Systems: GPS/INS and Sensor Fusion". Articles et thèses diverses en accès libre sur IEEE Xplore / ResearchGate.

Semestre : 2

Unité d'enseignement : UED 1.2

Matière 2 : Cybersécurité des drones

VHS : 22h30 (cours : 1h30)

Crédits : 1

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Ce module vise à former les étudiants à la protection des systèmes de drones contre les menaces cyber, en leur donnant les compétences nécessaires pour détecter, prévenir et répondre aux cyberattaques ciblant les communications, les capteurs, le contrôle à distance, les données et les composants embarqués.

Connaissances préalables recommandées :

Systèmes embarqués, Réseaux sans fil, Notions de cybersécurité, Bases en programmation (Python, C/C++), Architecture des drones (souhaité).

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction à la cybersécurité appliquée aux drones (1 semaine)

Architecture typique d'un drone (UAV) : communications, capteurs, autopilote, Enjeux de cybersécurité pour les drones civils, militaires et industriels, Cadre réglementaire (RGPD, ISO/IEC 27001, NIST, EASA, ANSSI, etc.), Risques : interception, usurpation, sabotage, prise de contrôle.

Chapitre 2 : Attaques sur les communications (2 semaines)

- Protocoles radio utilisés (Wi-Fi, RF, LTE, Lora, 5G, Zigbee)
- Attaques de type :
 - Spoofing GPS
 - Hijacking / commande non autorisée
 - Jamming RF
 - Sniffing et injection de paquets
- Mesures de protection : chiffrement, authentification, redondance

Chapitre 3 : Sécurité du logiciel embarqué (2 semaines)

Vulnérabilités dans le firmware des contrôleurs de vol (ex : ArduPilot, PX4), Analyse statique et dynamique du code, Techniques de durcissement logiciel (secure boot, firmware signing), Mise à jour sécurisée du logiciel (OTA).

Chapitre 4 : Sécurité des réseaux et télémétrie (2 semaines)

Analyse du canal sol-bord (liaison GCS – drone), VPN, SSH, tunnels sécurisés, Détection d'intrusion dans les flux de télémétrie, Protocoles MAVLink : sécurité, version sécurisée (MAVLink 2.0).

Chapitre 5 : Protection physique et matérielle (2 semaines)

Sécurité des ports (USB, UART, I2C, JTAG), Cryptographie matérielle embarquée (TPM, HSM, Secure Elements), Détection de compromission physique (capteurs de sabotage), Cloisonnement des fonctions critiques (partitionnement).

Chapitre 6 : Détection, test et réponse aux incidents (2 semaines)

Tests de pénétration (pen-testing) sur drones, Outils et méthodes (Kismet, Wireshark, SDR, Metasploit, UAVsploit), Scénarios d'attaque simulée et analyse post-mortem, Systèmes de détection d'intrusion embarqués (IDS), Protocoles de réponse et résilience en vol.

Mode d'évaluation :

Examen : 100 %

Références bibliographiques :

- 1- Kartik Vasanth, Bimal Bhattarai, Sudip Misra, "Cybersecurity for Unmanned Aerial Vehicles", (Springer, 2023).
- 2- Robert Radvanovsky, Jacob Brodsky, "Cyber-Physical Security: Protecting Critical Infrastructure at the State and Local Level". (CRC Press.

- 3- Fei Hu ."Security and Privacy in Internet of Things (IoTs): Models, Algorithms, and Implementations", (CRC Press, 2016).
- 4- Y. Xiao, F. Hu ."Wireless Network Security: Theories and Applications", (Springer).
- 5- Mark L. Psiaki ."GNSS Spoofing and Jamming: A Practical Guide", (Cambridge University Press, à paraître/2024).
- 6- Amber R. Sinclair ."Drone Security" (Chapitre dans "Counter-UAS Technology"), (Artech House).
- 7- "Survey of Security Threats in Unmanned Aerial Vehicle Networks". IEEE Communications Surveys & Tutorials.

Semestre : 2

Unité d'enseignement : UET 1.2

Matière : Législation et régulation du Brouillage des Drones

VHS : 22h30 (Cours : 1h30)

Crédit : 1

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Comprendre les textes juridiques nationaux et internationaux relatifs à l'usage des drones et à leur neutralisation. Identifier les limites légales de l'utilisation des technologies de brouillage. Appréhender les enjeux éthiques et sécuritaires liés à l'usage de dispositifs anti-drones. Connaître les autorités compétentes en matière de réglementation et de contrôle.

Connaissances préalables recommandées :

Aucune

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction générale (1 semaine)

Définitions juridiques des drones (UAV, UAS, RPAS), Typologie des drones civils et militaires, Problématique du survol illicite et menaces associées.

Chapitre 2 : Cadre juridique national (2 semaines)

Législation nationale sur l'utilisation des drones (ex. : Algérie, France, etc.), Zones d'exclusion aérienne, autorisations de vol, Lois encadrant l'interception et la neutralisation de drones, Cas particulier de la défense et de la sécurité intérieure.

Chapitre 3 : Réglementation internationale (2 semaines)

Normes de l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), Réglementations européennes (EASA) et américaines (FAA), Coopération transfrontalière et enjeux de souveraineté.

Chapitre 4 : Brouillage et neutralisation : cadre légal (2 semaines)

Définition technique du brouillage (jamming, spoofing), Légalité de l'utilisation de brouilleurs radiofréquences, Acteurs autorisés à neutraliser des drones, Responsabilités civiles et pénales.

Chapitre 5 : Éthique et droits fondamentaux (2 semaines)

Respect de la vie privée, Surveillance, interception de données et libertés publiques, Proportionnalité et nécessité dans les mesures anti-drones.

Chapitre 6 : Études de cas et jurisprudence (2 semaines)

Études de cas concrets (événements sportifs, prisons, aéroports, sites sensibles), Analyse de jurisprudence sur les litiges liés aux drones et au brouillage.

Mode d'évaluation :

Examen : 100 %

Références bibliographiques :

- 1- Union Internationale des Télécommunications (UIT / ITU), Radio Regulations – ITU Publications.
- 2- ENISA (European Union Agency for Cybersecurity), "Cybersecurity and Drones: Challenges and Recommendations" (2020).
- 3- EASA (European Union Aviation Safety Agency), "Regulations for UAS (Unmanned Aircraft Systems)".
- 4- "Neutralisation des drones : entre nécessité de sécurité et respect du droit". Revue Défense & Sécurité Internationale.
- 5- "Legal Aspects of Counter-UAS Operations". George Washington University / NATO Legal Gazette.

V - Programme détaillé par matière du semestre S3

Semestre : 3

Unité d'enseignement : UEF 2.1.1

Matière 1 : Techniques de Contre-mesures et Défense contre le Brouillage

VHS : 67h30 (Cours : 3h00, TD : 1h30)

Crédits : 6

Coefficient : 3

Objectifs de l'enseignement :

Comprendre les principes de base du brouillage et des contre-mesures. Étudier les différentes techniques de brouillage utilisées dans les systèmes de communication et de radar. Apprendre les méthodes de détection et de défense contre le brouillage. Savoir concevoir des systèmes robustes et résilients face au brouillage.

Connaissances préalables recommandées :

Connaissances de base en systèmes de communication (modulation, propagation des ondes, etc.). Bases en électronique et en systèmes de transmission radio. Notions de traitement du signal et d'analyse de spectre.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction aux concepts fondamentaux

(1 semaine)

Présentation du brouillage et des contre-mesures

- Définition du brouillage (jamming) et ses types (brouillage continu, pulsé, de saturation, etc.).
- Objectifs du brouillage (déstabiliser la réception, empêcher la communication, etc.).
- Rôle des contre-mesures (CM) : prévention, détection, atténuation des effets du brouillage.

Environnement radio et techniques de modulations utilisées

- Impact des modulations (AM, FM, PSK, QAM) sur la vulnérabilité aux brouillages.
- Analyse spectrale et répartition de puissance dans les systèmes sans fil.

Chapitre 2 : Types de brouillage et techniques associées

(2 semaines)

Brouillage des systèmes de communication :

- Brouillage d'interférence (interférences d'amplitude, fréquence, et phase).
- Brouillage thermique et bruit de fond.
- Brouillage par des signaux non cohérents et incohérents.

Brouillage des systèmes radar :

- Brouillage par répétition de faux échos.
- Brouillage par suppression des signaux réfléchis.
- Brouillage par suppression d'angle d'azimut ou de portée.

Chapitre 3 : Techniques de détection de brouillage

(2 semaines)

Méthodes de détection du brouillage

- Détection par analyse de spectre : techniques d'analyse FFT (Fast Fourier Transform).
- Détection par analyse d'histogramme et de densité spectrale.
- Techniques de suivi des variations du signal et de la puissance reçue.

Techniques de localisation du brouilleur

- Triangulation et géolocalisation via des réseaux de capteurs.
- Systèmes d'alerte précoce basés sur des capteurs multiples

Chapitre 4 : Techniques de contre-mesures

(2 semaines)

Contre-mesures actives

- Brouillage réactif : utilisation de signaux brouilleurs pour contre-attaquer un brouilleur.
- Techniques de suppression du bruit et amélioration du signal (filtres adaptatifs, techniques de corrélation).
- Utilisation de fréquences de saut (frequency hopping) et de transmissions étalées dans le temps (spread spectrum).

Contre-mesures passives

- Masquage des signaux : utilisation de terrains ou d'obstacles pour limiter l'exposition.
- Réduction de la signature du signal.

- Techniques de camouflage électronique.

Chapitre 5 : Approches avancées de défense

(2 semaines)

Techniques de défense sur des réseaux complexes

- Sécurisation des communications via des protocoles robustes (cryptographie).
- Utilisation de la diversité spatiale et temporelle pour réduire les impacts du brouillage.

Systèmes multi-antennes et MIMO pour contrer le brouillage

- Théorie des systèmes à antennes multiples pour la suppression de brouillage.
- Techniques de formation de faisceaux pour isoler le signal utile.

Applications militaires et civiles

- Défense contre le brouillage dans les systèmes de communication militaires.
- Résilience des réseaux de communication civile face aux brouillages intentionnels ou accidentels.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- Richard A. Poisel . "Modern Communications Jamming: Principles and Techniques". Artech House, 2011.
- 2- David Adamy. "EW 102: A Second Course in Electronic Warfare". Artech House, 2004.
- 3- Andrea De Martino. "Introduction to Modern EW Systems". Artech House, 2018.
- 4- Elliott Kaplan & Christopher Hegarty. "Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications". Artech House, 3e edition.
- 5- Paul D. Groves. "Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems". Artech House, 2e éd.
- 6- "A Survey on Anti-Jamming Techniques in Wireless Networks". IEEE Communications Surveys & Tutorials.
- 7- "GNSS Resilience and Anti-Jamming Techniques". Inside GNSS Journal.

Semestre : 3

Unité d'enseignement : UEF 2.1.1

Matière 2 : Techniques de Localisation et de Suivi des Drones

VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Comprendre les principes fondamentaux de la détection, localisation et suivi de drones. Identifier et comparer les différentes technologies et approches de localisation (radar, radiofréquence, optique, acoustique, GNSS...). Maîtriser les techniques de traitement de données issues de capteurs hétérogènes. Concevoir et évaluer des architectures de systèmes de suivi pour des scénarios de surveillance ou de neutralisation.

Connaissances préalables recommandées :

Principes de fonctionnement des UAV (contrôle, navigation, capteurs). Typologie des drones et comportements typiques en vol. Principes de base des transmissions radio. Modulations, bande passante, bruit. Localisation par RF (TDOA, RSSI, AoA) notions introductives.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction générale

(1 semaine)

Enjeux de la localisation de drones (sécurité, défense, trafic civil). Classification des méthodes de détection et de suivi. Problématiques spécifiques aux mini-drones

Chapitre 2 : Technologies de détection et de localisation

(2 semaines)

Radar Doppler / radar passif pour UAV, Capteurs RF : triangulation, TDOA, AoA, RSSI, Vision optique et thermique : suivi par caméra, détection d'objets, Capteurs acoustiques : traitement du signal audio, suivi par bruit d'hélices. GNSS et spoofing : exploitation et vulnérabilités

Chapitre 3 : Techniques de traitement et de fusion de données

(2 semaines)

Filtrage de Kalman, filtre particulaire, Fusion multicapteurs, Algorithmes de poursuite (MHT, JPDA). Apprentissage machine pour suivi automatique de cibles

Chapitre 4 : Systèmes embarqués et plateformes de détection

(3 semaines)

Architecture matérielle de systèmes de localisation anti-drone. Réseaux de capteurs déployés (stationnaires, mobiles). Communication inter-capteurs, IoT pour localisation.

Chapitre 5 : Applications spécifiques

(3 semaines)

Localisation en environnement urbain, montagneux ou GNSS-denied. Détection et suivi de drones furtifs. Interface avec les systèmes de neutralisation.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- Mahafza, B. R. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, CRC Press.
- 2- Skolnik, M. I. Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill.
- 3- Li, X. R., Jilkov, V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models, IEEE Transactions.
- 4- Mahapatra et al. Detection and Localization of UAVs using RF Techniques, Springer.
- 5- Ristic, B., Arulampalam, S., Gordon, N. Beyond the Kalman Filter: Particle Filters for Tracking Applications, Artech House.
- 6- Valavanis, K. P., Vachtsevanos, G. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, Springer.

Semestre : 3

Unité d'enseignement : UEF 2.1.2

Matière 3 : Technologies Laser Appliquées à la Lutte Anti-Drone

VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Ce module vise à fournir aux étudiants les bases théoriques, technologiques et opérationnelles de l'utilisation des systèmes laser comme moyens de détection, de perturbation ou de neutralisation physique des drones. Il couvre à la fois les lasers dirigés à haute énergie (HEL) et les systèmes à impulsion faible destinés à l'aveuglement des capteurs optiques.

Connaissances préalables recommandées :

Physique appliquée (optique, électromagnétisme), Notions de vision artificielle, drones, guerre électronique.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Fondamentaux des systèmes laser

(1 semaine)

Physique des lasers : émission stimulée, sources, longueurs d'onde, Types de lasers : solides, fibres, CO₂, diode, impulsions, Paramètres importants : puissance, divergence, distance, focalisation.

Chapitre 2 : Laser et brouillage optique

(3 semaines)

Aveuglement et saturation de caméras embarquées, Dérèglement des algorithmes de vision artificielle, Cas d'usages dans les missions furtives ou défensives.

Chapitre 3 : Neutralisation physique par laser

(3 semaines)

Lasers haute énergie (HEL) : effets thermiques et mécaniques, Exemples de destruction de drones par laser dans des scénarios militaires, Technologies de poursuite et stabilisation du faisceau.

Chapitre 4 : Cadre réglementaire et éthique

(3 semaines)

Réglementation sur l'usage des armes à énergie dirigée, Risques pour l'environnement et les populations civiles, Compatibilité avec le droit international humanitaire.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- William T. Silfvast. "Laser Fundamentals" — Cambridge University Press.
- 2- Orazio Svelto. "Principles of Lasers" — Springer.
- 3- Jeff Hecht. "Understanding Lasers: An Entry-Level Guide" — Wiley-IEEE Press.
- 4- Edward Colby et al.. "Directed Energy Weapons" — Springer Series in Optical Sciences.
- 5- Ronald O'Rourke (U.S. Congressional Research Service). Navy Lasers, Railgun, and Gun-Launched Guided Projectiles (Rapport technique, 2021).
- 6- "Laser-Based Counter-UAS Technologies: Capabilities and Limitations". IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine.
- 7- "Modeling and Simulation of Laser Interactions with UAV Materials". Applied Optics / Optics Express Journals.

Semestre : 3

Unité d'enseignement : UEF 2.1.2

Matière 4 : Communication numérique et cryptologie des Drones

VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Ce module vise à doter les étudiants des compétences nécessaires pour concevoir, analyser et sécuriser les communications numériques dans les systèmes UAV (drones), en mettant l'accent sur la cryptologie appliquée, les protocoles robustes, et la résistance aux attaques (interception, brouillage, spoofing...).

Connaissances préalables recommandées :

Notions en traitement du signal et en réseaux de communication, Bases en programmation (Python, C/C++), Introduction à la cryptographie ou à la cybersécurité (souhaitée)

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction aux communications drone-sol (1 semaine)

Architecture générale des communications UAV, Liens de commande (C2), télémétrie, vidéo, données utiles, Bandes de fréquence utilisées (ISM, LTE, bandes militaires), Contraintes spécifiques : mobilité, portée, latence, consommation.

Chapitre 2 : Transmission numérique appliquée aux drones (2 semaines)

Techniques de modulation numérique (ASK, FSK, PSK, OFDM), Codage de canal (Hamming, CRC, LDPC), Accès multiple : TDMA, FDMA, CDMA, Synchronisation, interférences, et correction d'erreurs, Implémentation sur radios logicielles (SDR).

Chapitre 3 : Protocoles de communication drone (2 semaines)

Protocoles de niveau application : MAVLink, RTPS, SRT, Transmission de flux vidéo : RTP, RTSP, WebRTC, Intégration des protocoles dans les piles réseau UAV, Optimisation de la bande passante et de la latence.

Chapitre 4 : Cryptologie appliquée aux drones (2 semaines)

Rappels sur la cryptographie symétrique (AES, RC4), Cryptographie asymétrique (RSA, ECC), Protocoles d'échange de clés (Diffie-Hellman, ECDH), Chiffrement des canaux : TLS, DTLS, IPSec, Signatures numériques et authentification.

Chapitre 5 : Sécurité des communications UAV (2 semaines)

Menaces : interception, usurpation (spoofing), brouillage, détournement, Sécurisation des liaisons C2 et données de mission, Protection des mises à jour OTA (Over The Air), Mécanismes d'authentification et intégrité des messages, Gestion des clés, certificats, tokens d'accès

Chapitre 6 : Applications et normes de sécurité (2 semaines)

Exemples de protocoles sécurisés pour drones militaires et civils, Études de cas : DJI, Parrot, ArduPilot, LoRaWAN sécurisé, Perspectives : communication quantique, IA pour cybersécurité embarquée.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- Bernard Sklar. Digital Communications: Fundamentals and Applications — Prentice Hall, 2e édition.
- 2- Simon Haykin. Communication Systems — Wiley, 5e édition.
- 3- Andrea Goldsmith. Wireless Communications — Cambridge University Press, 2005.
- 4- T. S. Rappaport. Wireless Communications: Principles and Practice — Prentice Hall, 2e éd.
- 5- William Stallings. Cryptography and Network Security: Principles and Practice — Pearson, 8e édition.

Semestre : 3

Unité d'enseignement : UEM 2.1

Matière 1 : TP Techniques de Contre-mesures et Défense contre le Brouillage

VHS : 22h30 (TP : 1h30)

Crédits : 2

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Identifier et caractériser les types de brouillage : bruit blanc, balayage, barrage, modulé, réactif, etc.
Analyser les effets de ces brouillages sur les communications radio, GNSS, et liaisons drone-sol.

Connaissances préalables recommandées :

Modulations numériques : BPSK, QPSK, QAM, OFDM. Codage et détection : codage correcteur d'erreurs (FEC), codage canal. Notions de bruit, interférences et rapport signal/bruit (SNR)

Contenu de la matière :

TP1 : Identification de signaux de brouillage dans l'espace RF

TP2 : Détection automatique des anomalies RF

TP3 : Défense contre le brouillage de signaux GPS

TP4 : Contre-mesures par élargissement spectral et fréquence agile

TP5 : Réduction du brouillage par traitement spatial du signal

TP6 : Intégration de plusieurs contre-mesures dans une liaison UAV simulée

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100%

Références bibliographiques :

- 1- Michael Ossmann. Software Defined Radio with HackRF — Great Scott Gadgets, Open Access.
- 2- Travis F. Collins, Robin Getz et al. Teaching and Experimenting with SDR — Analog Devices + GNU Radio Labs.
- 3- Alexander M. Wyglinski, Di Pu, Thomas W. Rondeau. Digital Communication Systems Engineering with Software-Defined Radio — Artech House.
- 4- Richard G. Lyons. Understanding Digital Signal Processing, 3e éd. — Pearson.
- 5- Steven W. Smith. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing — California Technical Pub.
- 6- "Experimental Evaluation of Anti-Jamming Techniques for GNSS" — IEEE Access, 2021.
- 7- "Jamming and Anti-Jamming Techniques in Wireless Networks" — Elsevier, Ad Hoc Networks Journal.

Semestre : 3

Unité d'enseignement : UEM 2.1

Matière 2 : TP Techniques de Localisation et de Suivi des Drones

VHS : 22h30 (TP : 1h30)

Crédits : 2

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Appliquer les méthodes de détection, de localisation et de suivi des drones. Utiliser les différentes technologies (GNSS, RF, vision, radar, etc.) pour le tracking d'objets volants. Concevoir un système de suivi basé sur la fusion de données multi-capteurs. Développer des algorithmes de traitement en temps réel (Kalman, corrélation, Deep Learning léger). Tester et valider la robustesse des techniques de localisation dans des scénarios d'interférence ou de brouillage.

Connaissances préalables recommandées :

Principes des systèmes GNSS (GPS, GLONASS, Galileo...). Systèmes de coordonnées (géodésique, cartésienne, polaire). Localisation par triangulation, trilatération, TDOA, AoA

Contenu de la matière :

TP1 : Localisation par RSSI / TDOA / AoA

TP2 : Détection visuelle et suivi d'objets

TP3 : Tracking GPS + inertiel

TP4 : Suivi radar de cibles lentes (initiation)

TP5 : Suivi multi-capteurs en environnement simulé

TP6 : Scénarios de poursuite dynamique

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100%.

Références bibliographiques

- 1- Beard, R., & McLain, T. (2012). Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice. Princeton University Press.
- 2- Austin, R. (2011). Unmanned Aircraft Systems: UAV Design, Development and Deployment. Wiley.
- 3- Zhou, B., et al. (2015). Multisensor Fusion in Tracking and Navigation. CRC Press.
- 4- Farrell, J. (2008). Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors. McGraw-Hill.
- 5- Simon, D. (2006). Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches. Wiley-Interscience.

Semestre : 3

Unité d'enseignement : UEM 2.1

Matière 3 : TP Internet des objets pour Drone / TP Communication numérique et cryptologie des drones

VHS : 22h30 (TP : 1h30)

Crédits : 2

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Intégrer des capteurs et modules de communication IoT dans un drone ou système embarqué, Transmettre des données à distance via des protocoles IoT (MQTT, HTTP, LoRa), Concevoir un tableau de bord distant pour la télémétrie drone, Comprendre les enjeux de sécurité, de latence et de couverture réseau dans un contexte UAV/IoT. Analyser et simuler les chaînes de transmission numérique des drones, Comprendre et implémenter des techniques de modulation, codage, et correction d'erreur, Chiffrer et déchiffrer des communications de commande et télémétrie, Détecter et prévenir les attaques sur les liaisons de communication UAV (interception, injection, spoofing).

Connaissances préalables recommandées :

Réseaux informatiques, microcontrôleurs (Arduino/Pi), bases en communication sans fil, Théorie des communications, codage, base en sécurité des systèmes.

Contenu de la matière :

TP1 : Télémétrie UAV avec protocole HTTP/MQTT

TP2 : Communication longue portée : LoRa & GSM pour drones IoT

TP3 : Contrôle d'un drone via réseau IoT (commande à distance)

TP4 : Codage de canal et correction d'erreurs

TP5 : Cryptographie symétrique appliquée à la commande de drone

TP6 : Authentification et protection des liaisons drone

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100%

Références bibliographiques

- 1- "Internet of Things with ESP32" – Neil Kolban
- 2- "Learning IoT with Python and Raspberry Pi" – S. Singh
- 3- "Cryptography and Network Security" – William Stallings
- 4- "Security of UAV Systems: Attacks and Countermeasures" – IEEE Surveys
- 5- MAVLink documentation : <https://mavlink.io>
- 6- GitHub : MAVLink sniffers, secure-drone-comms, UAV-LoRa

Semestre : 3

Unité d'enseignement : UEM 2.1

Matière 4 : Robot operating System ROS

VHS : 37h30 (Cours : 1h30, TP : 1h00)

Crédits : 3

Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Ce module a pour objectif d'initier les étudiants à l'environnement ROS (Robot Operating System), standard de facto en robotique, et de leur permettre de concevoir, simuler et implémenter des systèmes robotiques ou drones intelligents, interconnectant capteurs, actionneurs, perception et contrôle.

Connaissances préalables recommandées :

Connaissances en programmation Python ou C++, Notions de robotique mobile ou de systèmes embarqués, Bases en Linux et en communication réseau (souhaité).

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction à ROS

(1 semaine)

Philosophie de ROS : modularité, interopérabilité, middleware, Architecture de base : nœuds, topics, messages, services, actions, Installation et configuration de ROS (Noetic / ROS 2 Foxy), Outils de base : roscore, roslaunch, rosbag.

Chapitre 2 : Programmation sous ROS

(2 semaines)

Écriture de nœuds en Python (rospy) et C++ (roscpp), Publication et souscription aux topics, Appel de services, gestion des actions, Paramétrage dynamique avec ROS Param Server.

Chapitre 3 : Intégration capteurs/actionneurs

(2 semaines)

Utilisation de drivers ROS pour capteurs (LIDAR, IMU, GPS, caméras), Contrôle de moteurs via ROS (ex. : robots mobiles, bras robotisés), Communication série / I2C / USB avec le matériel, ROS avec Arduino, Raspberry Pi, Jetson Nano.

Chapitre 4 : Visualisation et simulation

(2 semaines)

Visualisation des capteurs et trajectoires avec RViz, Utilisation de Gazebo pour simuler un robot/drones dans un monde 3D, Mapping, SLAM, navigation basique, Rejouer des logs avec rosbag pour analyse offline.

Chapitre 5 : ROS pour drones et systèmes mobiles

(2 semaines)

Architecture ROS sur un drone autonome, Interface avec PX4, MAVROS pour drones (par exemple sous QGroundControl), Suivi de trajectoires, planification de missions, Détection d'obstacles et évitement.

Chapitre 6 : Vers ROS 2 et systèmes distribués

(2 semaines)

Différences entre ROS 1 et ROS 2 (DDS, sécurité, temps réel), Communication inter-machine (multi-robots), Déploiement sur systèmes embarqués, Introduction à la sécurité ROS et à l'optimisation temps réel

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques

- 1- Morgan Quigley, Brian Gerkey, William D. Smart. Programming Robots with ROS: A Practical Introduction to the Robot Operating System. O'Reilly Media, 2015.
- 2- Lentin Joseph. Learning Robotics using Python. Packt Publishing, 2e édition, 2018.
- 3- Lentin Joseph. Mastering ROS for Robotics Programming. Packt Publishing, 3e édition, 2021.
- 4- Anil Mahtani, Luis Sánchez, Enrique Fernández. Effective Robotics Programming with ROS. Packt, 2e édition, 2016.
- 5- Aaron Martinez, Enrique Fernández. ROS 2: Basics and Advanced Programming.
- 6- Lentin Joseph. ROS2 Robotics Projects. Packt Publishing, 2020.

- 7- "Integration of UAVs using ROS and MAVROS" — IEEE Conference Papers / arXiv.
- 8- "Simulation and Deployment of Multi-Robot Systems using ROS and Gazebo" — Springer Robotics Book Series.

Semestre : 3

Unité d'enseignement : UED 2.1

Matière 1 : Guerre électronique et sécurité aérienne

VHS : 22h30 (Cours : 1h30)

Crédits : 1

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Ce module vise à fournir aux étudiants une compréhension approfondie des techniques de guerre électronique (GE), de leur rôle dans les conflits modernes et leur impact sur la sécurité des systèmes aéronautiques, notamment les drones, les avions, les radars et les communications aériennes.

Connaissances préalables recommandées :

Bases en télécommunications, signaux RF, Notions de systèmes de communication aéronautiques et de cybersécurité, Introduction à la défense ou systèmes embarqués (souhaité).

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction à la guerre électronique (1 semaine)

Définitions, enjeux géostratégiques et historiques, Domaines de la GE : attaque, protection, soutien, Plateformes concernées : aéronefs, drones, satellites, systèmes au sol, Environnements électromagnétiques (EME).

Chapitre 2 : Spectre électromagnétique et capteurs (2 semaines)

Notions de fréquence, puissance, bande passante, Capteurs : radars, LIDAR, RF scanners, récepteurs SIGINT, Caractéristiques des systèmes de communication et de détection à bord des drones et avions.

Chapitre 3 : Guerre électronique offensive (Electronic Attack – EA) (2 semaines)

Techniques de brouillage : bruit, répétition, saturation, décalage de fréquence, Leurrage radar et IR : DRFM, chaff, flares, spoofing GPS, Interruption ou modification des communications (jamming C2, Datalink), Simulation d'attaques par ondes RF.

Chapitre 4 : Guerre électronique défensive (Electronic Protection – EP) (2 semaines)

Techniques anti-brouillage et anti-leurrage, Filtrage adaptatif, sauts de fréquence, codage résilient, Blindage électromagnétique et conception EMC/EMI, Exemples de systèmes d'autoprotection embarqués (DIRCM, RWR).

Chapitre 5 : Soutien en guerre électronique (Electronic Support – ES) (2 semaines)

SIGINT / ELINT / COMINT, Analyse spectrale, géolocalisation de sources EM, Intégration dans des systèmes de commandement et de surveillance (C4ISR).

Mode d'évaluation :

Examen : 100 %

Références bibliographiques :

- 1- David Adamy. EW 101: A First Course in Electronic Warfare. Artech House, 2001.
- 2- Andrea De Martino. Introduction to Modern EW Systems. Artech House, 2018.
- 3- Richard A. Poisel. Modern Communications Jamming: Principles and Techniques. Artech House, 2011.
- 4- Elliott D. Kaplan & Christopher Hegarty. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. Artech House, 2017.
- 5- Paul D. Groves. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Navigation Systems. Artech House, 2013.
- 6- Joseph Weiss. Protecting Industrial Control Systems from Electronic Threats. Momentum Press, 2010.
- 7- IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine
- 8- IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility
- 9- IEEE Communications Surveys & Tutorials

Semestre : 3

Unité d'enseignement : UED 2.1

Matière 2 : Communication Satellite / UAV

VHS : 22h30 (Cours : 1h30)

Crédits : 1

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Comprendre les architectures de communication UAV-Satellite (SATCOM), Identifier les technologies de transmission et protocoles utilisés, Analyser les vulnérabilités des liaisons SATCOM face au brouillage ou au piratage, Appréhender les contre-mesures et méthodes de sécurisation, Mettre en œuvre des simulations ou études de cas d'attaques sur la communication UAV/SAT.

Connaissances préalables recommandées :

Traitement du signal, radiofréquences, réseaux sans fil

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction aux communications UAV et satellites (1 semaine)

Historique et évolution des systèmes SATCOM, Rôle des communications satellites dans les drones longue portée, Architectures typiques de communication (SATCOM, RF, 4G/5G, etc.).

Chapitre 2 ; Bases des communications par satellite (2 semaines)

Orbites (LEO, MEO, GEO) et couverture, Types de satellites utilisés (communication, navigation, observation), Liaison montante et descendante : caractéristiques et contraintes, Modulation, codage, multiplexage.

Chapitre 3 : Systèmes de communication UAV (2 semaines)

Liaisons C2 (Command and Control) vs liaisons de charge utile (payload), Protocoles de communication pour UAV, Réseaux mesh UAV et intégration satellite, Latence, bande passante, QoS.

Chapitre 4 : Vulnérabilités et menaces (2 semaines)

Attaques sur la liaison SATCOM : brouillage (jamming), usurpation (spoofing), interférence, Attaques sur les protocoles UAV : interception, désynchronisation, injection de commandes, Exemples d'incidents réels (militaires et civils)

Chapitre 5 : Brouillage et contre-mesures (2 semaines)

Principes du brouillage SATCOM : types, effets, portée, Techniques de détection et localisation du brouillage, Sécurisation des communications UAV/Satellite : cryptage, redondance, FHSS, DSSS, Matériels de protection et blindage.

Mode d'évaluation :

Examen : 100 %

Références bibliographiques :

- 1- Dennis Roddy. Satellite Communications, 4e édition. McGraw-Hill, 2006.
- 2- Timothy Pratt, Charles Bostian, Jeremy Allnutt. Satellite Communications, 2e édition. Wiley, 2003.
- 3- Bruce Elbert. Introduction to Satellite Communication. Artech House, 3e éd., 2008.
- 4- Kamesh Namuduri, Mohammad Saad Bhamidipati (Eds.). UAV Communications for 5G and Beyond. Wiley, 2021.
- 5- Anis Koubaa (Ed.). Unmanned Aerial Vehicles: Breakthroughs in Research and Practice. IGI Global, 2020.
- 6- Mehdi Mozaffari et al. "A Tutorial on UAVs for Wireless Networks". IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019.

Semestre : 3

Unité d'enseignement : UET 2.1

Matière : Intelligence artificielle pour la défense anti-drone

VHS : 22h30 (Cours : 1h30)

Crédit : 1

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Ce module vise à former les étudiants aux techniques d'intelligence artificielle (IA) utilisées dans les systèmes de détection, classification, suivi et neutralisation de drones, en intégrant les concepts de traitement de données multi-capteurs, vision par ordinateur, apprentissage automatique, et décision autonome.

Connaissances préalables recommandées :

Bases en intelligence artificielle (réseaux de neurones, SVM...), Connaissances en traitement du signal ou vision par ordinateur, Programmation Python (NumPy, scikit-learn, PyTorch ou TensorFlow), Notions de systèmes embarqués ou robotiques (souhaité).

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction à la menace drone et concepts de défense (1 semaine)

Typologie des drones (COTS, DIY, militaires) et modes d'intrusion, Composantes d'un système anti-drone : détection, identification, neutralisation, Limites des systèmes traditionnels de défense, Apports de l'IA dans la réactivité, la précision et la capacité adaptative.

Chapitre 2 : Capteurs et données pour la détection de drones (2 semaines)

Données issues de capteurs : radar, RF, vision, acoustique, thermique, LIDAR, Caractéristiques des signatures drones : spectres, silhouettes, trajectoires, Prétraitement et fusion de données multi-capteurs, Constitution d'ensembles de données pour l'entraînement des modèles IA.

Chapitre 3 : Apprentissage automatique pour la détection de drones (2 semaines)

Introduction au machine learning supervisé / non supervisé, Réduction de dimension, extraction de caractéristiques, Modèles classiques : SVM, k-NN, arbres de décision, Random Forest, Métriques d'évaluation de performance : précision, rappel, courbe ROC.

Chapitre 4 : Vision par ordinateur et Deep Learning (2 semaines)

Détection d'objets en vidéo : YOLO, SSD, Faster R-CNN, Suivi d'objets : Kalman filter, Deep SORT, Optical Flow, Reconnaissance de type de drone via CNN, Techniques de segmentation, tracking multi-objets, Réseaux de neurones embarqués (TinyML, quantisation).

Chapitre 5 : IA embarquée et architecture temps réel (2 semaines)

Contraintes embarquées : latence, consommation, compacité, Frameworks IA temps réel (TensorRT, ONNX, OpenVINO), Déploiement sur plateformes : Jetson Nano, Raspberry Pi, FPGA, microcontrôleurs, Edge computing et stratégie de détection distribuée.

Chapitre 6 : Systèmes intelligents de neutralisation (3 semaines)

Systèmes autonomes de décision (rule-based, IA), Détection de comportement anormal et prédiction de trajectoire, Simulation d'interventions : brouillage, interception, géofencing intelligent, Cas d'utilisation : protection d'infrastructures critiques, événements publics.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Références bibliographiques :

- 1- Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville. "Deep Learning" — MIT Press, 2016.
- 2- Aurélien Géron. "Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow" O'Reilly, 2022.
- 3- Sebastian Raschka, Vahid Mirjalili. "Python Machine Learning" Packt Publishing, 2022.
- 4- K. P. Soman et al. "Machine Learning and AI for Sensor Fusion and Object Detection".
- 5- "Deep Learning-Based Drone Detection and Classification" – IEEE Access, 2020–2024
- 7- "Anti-Drone Systems using AI-Based RF Analysis" – IEEE Sensors Journal.

Avis et Visas des organes Administratifs et Consultatifs

Intitulé du Master : Systèmes intelligents de protection et de neutralisation
d'objets mobiles
d'objets mobiles

Chef de département + Responsable de l'équipe de domaine

Date et visa

Date et visa

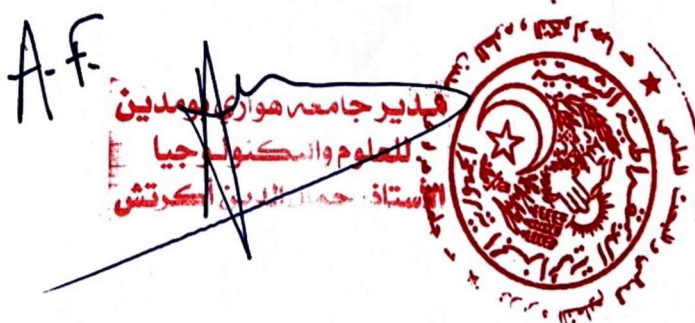
Doyen de la faculté

Date et visa :



Chef d'établissement universitaire

Date et visa



**VII – Avis et Visa de la Conférence Régionale
(Uniquement dans la version définitive transmise au MESRS)**

**Avis et Visa du Comité pédagogique National de Domaine
(Uniquement dans la version définitive transmise au MESRS)**