

CURRICULUM ET LIGNES DIRECTRICES POUR LA FORMATION AUX SOLUTIONS D'ÉNERGIE SOLAIRE

Volet Énergie solaire du livrable D3.1

**PRISTINE VET – Renforcement des capacités Erasmus+ dans l'enseignement et la formation
professionnels**

Lot de travaux 3 : Élaboration des contenus de formation et apprentissage

Bénéficiaire chef de file **NOWOCERT LIMITED (NWC)**

Acronyme du projet PRISTINE VET

Mois d'échéance M8

Niveau de diffusion PUBLIC

Version **1.0**

Date Août 2026

Contrôle du document

Référence du livrable	D3.1
Titre du livrable	Curriculum et lignes directrices pour la formation aux solutions d'énergie solaire, éolienne et biomasse
Volet technologique	Solutions d'énergie solaire
Lot de travaux	WP3 – Élaboration des contenus de formation et apprentissage
Bénéficiaire chef de file / partenaire responsable	NOWOCERT LIMITED (NWC)
Partenaires contributeurs du WP3	UNIN, AAMUSTED et ITU (élaboration des contenus et expérimentation)
Début du projet / durée	01 janvier 2026 / 24 mois
Mois d'échéance	M8
Niveau de diffusion	PUBLIC
Type de document	Curriculum et lignes directrices de mise en œuvre de la formation
Version / date	v1.0 / août 2026

Historique des révisions

Version	Date	Statut	Description
1.0	Août 2026	Version finale pour soumission	Version finale du curriculum et des lignes directrices de formation Énergie solaire, intégrant les plans de cours détaillés de S1-01 à S2-07.

Statut du document

Le présent document constitue le volet Énergie solaire du livrable D3.1 ; il fournit le curriculum de référence et le guide de mise en œuvre du programme de formation Énergie solaire de PRISTINE VET. Les supports pédagogiques et d'apprentissage détaillés sont gérés séparément au sein du paquet de formation Solaire relevant du D3.3.

Structure du programme

Le programme Énergie solaire comprend 12 modules – 5 de niveau Base et 7 de niveau Avancé. Les durées de modules indiquées totalisent 17,0 heures au niveau Base et 23,5 heures au niveau Avancé, soit un total calculé de 40,5 heures pour le programme. La séquence des modules et les durées figurant à la section 3.3 constituent le calendrier de référence de ce curriculum.

Table des matières

Résumé exécutif

1. Contexte du projet et du curriculum

2. Finalité, périmètre et principes de conception

3. Profil et structure du programme

4. Acquis d'apprentissage du programme et référentiel de compétences

5. Plans de cours détaillés et spécifications des modules

S1-01 Histoire et introduction à l'énergie solaire

S1-02 Règles fondamentales du rayonnement solaire dans la conversion d'énergie PV et la conception des centrales

S1-03 Structure mécanique et mécanismes des systèmes PV solaires – Partie I

S1-04 Structure électrique des systèmes PV solaires – Partie I

S1-05 Électronique de puissance dans la production d'énergie solaire

S2-01 Introduction aux mécanismes avancés des systèmes PV solaires

S2-02 Structure électrique des systèmes PV solaires – Partie II

S2-03 Systèmes de commande, de surveillance et SCADA dans les centrales PV solaires

S2-04 Technologies d'électronique de puissance dans les systèmes PV solaires

S2-05 Planification et implantation des centrales de production d'énergie solaire

S2-06 Identification et diagnostic des défauts dans les systèmes PV solaires

S2-07 Programme d'exploitation et de maintenance des centrales PV solaires

6. Lignes directrices d'enseignement, d'apprentissage et de formation pratique

7. Évaluation et alignement sur la certification

8. Ressources de formation, santé et sécurité, environnement et inclusion

9. Lignes directrices pour les formateurs et les apprenants

10. Assurance qualité, suivi et révision du curriculum

11. Mise en œuvre, contrôle documentaire et articulation avec les supports pédagogiques

Acronymes et abréviations

Acronyme	Signification
AC	Courant alternatif
CAPEX	Dépenses d'investissement
DC	Courant continu
DHI	Irradiance horizontale diffuse
DNI	Irradiance normale directe
EACEA	Agence exécutive européenne pour l'éducation et la culture
EIA	Étude d'impact environnemental
GHI	Irradiance horizontale globale
GPOA	Irradiance dans le plan des modules
I-V	Caractéristique courant-tension
LCOE	Coût actualisé de l'énergie
LOTO	Consignation / déconsignation
LVRT	Tenue aux creux de tension
MPPT	Suivi du point de puissance maximale
O&M	Exploitation et maintenance
OPEX	Dépenses d'exploitation
PPE	Équipements de protection individuelle
PR	Ratio de performance

Acronyme	Signification
PV	Photovoltaïque
P-V	Caractéristique puissance-tension
SCADA	Contrôle-commande et acquisition de données
SPD	Parafoudre (dispositif de protection contre les surtensions)
STC	Conditions d'essai normalisées
WBL	Apprentissage en milieu professionnel

Résumé exécutif

PRISTINE VET est un projet Erasmus+ de renforcement des capacités dans le domaine de la formation professionnelle (VET), d'une durée de 24 mois, destiné à moderniser la formation professionnelle aux énergies renouvelables en Afrique de l'Ouest. Dans le cadre du WP3 – Élaboration des contenus de formation et apprentissage –, le projet développe des curricula alignés sur les besoins de l'industrie, des supports de formation, des ressources numériques et des approches d'évaluation pour les solutions d'énergie solaire, éolienne, biomasse et hydrogène, NWC assurant la conduite du lot de travaux.

Le présent document, Curriculum et lignes directrices de formation Énergie solaire, définit la structure de référence du programme de formation Énergie solaire. Il convertit les supports de cours Solaire de niveau Base et Avancé disponibles en un curriculum VET cohérent et fondé sur les compétences, et précise les acquis d'apprentissage du programme, le séquençement, la dispensation, l'apprentissage pratique, l'évaluation, la sécurité, les attentes envers les formateurs et les apprenants, l'assurance qualité et les modalités de mise en œuvre.

Le curriculum comprend 12 modules : cinq modules de niveau Base et sept modules de niveau Avancé. Le niveau Base établit le contexte des systèmes PV solaires, les fondamentaux de la ressource solaire et de la conversion, le support mécanique, la structure électrique et les bases de l'électronique de puissance. Le niveau Avancé développe une compréhension intégrée des systèmes PV, la conception électrique avancée des champs, la commande et le SCADA, l'électronique de puissance avancée, la planification des centrales, le diagnostic des défauts ainsi que l'exploitation et la maintenance.

Les durées de modules indiquées représentent 17,0 heures d'apprentissage au niveau Base et 23,5 heures au niveau Avancé, soit un total calculé de 40,5 heures. La dispensation suit un modèle VET hybride associant apprentissage en ligne et enseignement encadré par un formateur, avec calculs, schémas, simulation, interprétation de données, études de cas, travaux pratiques, démonstrations et apprentissage en milieu professionnel ou exposition sur le terrain lorsque cela est réalisable et sûr.

Principe du curriculum

Le curriculum définit ce qui doit être appris, les compétences à développer, la manière dont l'apprentissage est organisé et dispensé, ainsi que la manière dont les acquis sont attestés. Les supports pédagogiques Solaire détaillés du D3.3 fournissent le contenu d'enseignement permettant de mettre en œuvre ce curriculum.

1. Contexte du projet et du curriculum

1.1 Contexte de PRISTINE VET

PRISTINE VET répond au développement des compétences dans les énergies vertes en Afrique de l'Ouest par la modernisation des curricula, la formation technique pratique, l'apprentissage numérique et le renforcement des liens entre les prestataires VET, l'industrie et les parties prenantes publiques. Le projet s'appuie sur les contenus photovoltaïques existants tout en élargissant et en actualisant la formation aux technologies solaire, éolienne, biomasse et hydrogène.

Le WP3 – Élaboration des contenus de formation et apprentissage – est piloté par NOWOCERT LIMITED (NWC) durant les mois 1 à 12. Le lot de travaux exige des curricula actualisés et alignés sur les besoins de l'industrie, comportant au moins 10 cours en ligne par spécialité, un alignement sur le PANER et sur les priorités locales, régionales et nationales, une conception des modules et des compétences éclairée par les parties prenantes, des ressources numériques et des outils d'évaluation, des versions linguistiques accessibles, ainsi que l'expérimentation des cours avec les formateurs et les prestataires VET partenaires.

1.2 Positionnement du livrable

Production du WP3	Finalité	Lien avec l'Énergie solaire
D3.1	Curriculum et lignes directrices pour la formation aux solutions d'énergie solaire, éolienne et biomasse	Le présent document constitue le volet Énergie solaire : architecture du programme, compétences, plans de cours détaillés, lignes directrices de dispensation et de mise en œuvre.

Production du WP3	Finalité	Lien avec l'Énergie solaire
D3.3	Supports pédagogiques pour la formation aux solutions d'énergie solaire, en anglais et en français	Contenus de cours Solaire détaillés et supports pédagogiques utilisés par les formateurs et les apprenants pour mettre en œuvre ce curriculum.
D3.4	Rapport sur l'organisation des cours de formation (formateurs) pour les solutions d'énergie solaire	Éléments probants relatifs à l'organisation des cours de formateurs, à l'expérimentation, au retour d'expérience et à l'amélioration à la suite de l'élaboration du curriculum et des supports.

1.3 Exigences du projet couvertes par le curriculum

Exigence du projet	Réponse du curriculum
Curriculum fondé sur les compétences et aligné sur les besoins de l'industrie	Acquis d'apprentissage du programme, domaines de compétences, spécifications détaillées des modules et éléments probants orientés vers le milieu professionnel.
Au moins 10 cours en ligne par spécialité	Les 12 modules Solaire sont structurés et séquencés sur les niveaux Base et Avancé.
Conception du curriculum éclairée par les parties prenantes	La contextualisation locale et une revue structurée par les établissements VET, les entreprises et les autorités compétentes sont intégrées à la mise en œuvre et à l'assurance qualité.
Formation technique pratique	Calculs, schémas de systèmes PV, travaux sur les champs et les implantations, analyse SCADA/données, diagnostic de défauts, mise en service, exploitation et maintenance et activités de sécurité sont intégrés.
Apprentissage numérique	La dispensation hybride, les fichiers de cours numériques, les schémas interactifs, la simulation, les quiz, les données de surveillance et l'apprentissage orienté SCADA sont pris en charge.
Accessibilité en anglais/français et en langues locales	Le curriculum permet la dispensation et l'adaptation dans les langues du projet et, si nécessaire, dans les langues locales, sans réduire le niveau de compétence technique.
Expérimentation des cours et retour d'expérience	La dispensation pilote, le retour d'expérience des formateurs et des partenaires, celui des apprenants et la révision maîtrisée du curriculum sont intégrés au cycle d'assurance qualité.
Alignement sur la certification	Les éléments probants d'évaluation sont conçus pour être ultérieurement alignés sur le référentiel de certification fondé sur les compétences du WP4 et sur les exigences nationales VET applicables.

2. Finalité, périmètre et principes de conception

2.1 Finalité

Le présent document a pour finalité de fournir un cadre unique et cohérent de curriculum et de mise en œuvre pour la formation à l'énergie solaire dans le cadre de PRISTINE VET. Il s'adresse aux prestataires VET, aux formateurs, aux experts techniques, aux concepteurs de curricula et aux partenaires du projet chargés d'organiser, de dispenser, d'évaluer et d'améliorer le programme Énergie solaire.

2.2 Périmètre

Le curriculum couvre l'intégralité du parcours d'apprentissage, depuis le contexte de l'énergie solaire et les fondamentaux du PV jusqu'au rayonnement solaire, à la conversion PV, au montage mécanique, à la structure électrique, à l'électronique de puissance, à la conception avancée des champs, à la commande et au SCADA, à la planification des centrales, au diagnostic des défauts, à la mise en service, à l'exploitation et à la maintenance. Il intègre également la sécurité, la responsabilité environnementale, l'apprentissage numérique, l'évaluation, l'assurance qualité et la pratique professionnelle.

Le présent document ne remplace pas les supports pédagogiques détaillés. Les formateurs doivent utiliser les supports de cours S1/S2 correspondants pour les explications techniques complètes, les figures, les équations, les exemples résolus et le traitement approfondi des sujets. Le curriculum régit la séquence d'apprentissage, les acquis d'apprentissage, les attentes en matière de compétences, la logique de dispensation et les preuves d'apprentissage.

Principe du curriculum

Le curriculum définit ce qui doit être appris, les compétences à développer, la manière dont l'apprentissage est organisé et dispensé, ainsi que la manière dont les acquis sont attestés. Les supports pédagogiques Solaire détaillés fournissent la matière permettant de mettre en œuvre ce curriculum.

2.3 Principes de conception du curriculum

Principe	Application
Fondé sur les compétences	Les acquis d'apprentissage décrivent des connaissances, une interprétation, des calculs, une analyse et une capacité pratique démontrables, et non la seule exposition à des sujets.
Progressif	Les modules de niveau Base établissent les fondations ; les modules de niveau Avancé exigent une intégration des systèmes, un raisonnement de conception, une interprétation des données, un diagnostic, une planification et une approche par cycle de vie.
Aligné sur l'industrie	Le contenu est organisé autour de centrales PV réelles, de modules et de champs, de structures de montage, de systèmes électriques, d'onduleurs, de commandes, du raccordement au réseau, du diagnostic et de l'exploitation-maintenance.
Orienté vers la pratique	La théorie est reliée à des calculs, des schémas de systèmes, des fiches de conception, des données SCADA/de surveillance, des scénarios de défaut ainsi que des cas d'inspection et de maintenance.
Hybride et outillé par le numérique	L'apprentissage en ligne et les ressources numériques sont combinés à des explications encadrées par un formateur, à la simulation, au travail sur cas et à l'apprentissage pratique supervisé.
Adapté au contexte	Les exemples, les cas, les conditions de site et les modalités de mise en œuvre doivent être adaptés aux systèmes énergétiques ouest-africains et aux priorités des pays partenaires.
Inclusif	La formation doit favoriser l'égalité des chances, l'intégration de la dimension de genre, une participation accessible et des environnements d'apprentissage respectueux.
Guidé par la sécurité	Les risques électriques, mécaniques, liés aux toitures et au travail en hauteur, à l'installation et à la maintenance sont intégrés à l'enseignement et à la conception des activités pratiques.
Soumis au contrôle qualité	Le curriculum et les supports font l'objet de revues, d'expérimentations de cours, de retours d'expérience, de révisions et d'une gestion des versions.

2.4 Contextualisation locale et normes

Le noyau technique du curriculum doit rester homogène entre les établissements partenaires, tandis que les exemples, les jeux de données, les échelles de systèmes, les méthodes de dispensation et les modalités pratiques doivent être contextualisés en fonction des ressources solaires locales, des conditions de réseau, des contextes bâtis et d'occupation des sols, des équipements disponibles et des besoins du marché du travail. Les exigences nationales et locales applicables en matière de sécurité électrique, de structures, de raccordement au réseau, de protection de l'environnement, de sécurité au travail et de dispensation de la formation professionnelle doivent être appliquées lors de la localisation et de la validation par les parties prenantes.

3. Profil et structure du programme

3.1 Profil du programme

Intitulé du programme	Cours certifiants PRISTINE VET sur les solutions d'énergie solaire – Curriculum et lignes directrices de formation
Structure du programme	12 modules de cours : 5 de niveau Base + 7 de niveau Avancé
Temps d'apprentissage total recommandé	40,5 heures calculées à partir des durées de modules indiquées (17,0 Base + 23,5 Avancé)
Modalité de dispensation	VET hybride : théorie en ligne/en salle + activités pratiques, calculs, démonstrations, simulations, études de cas et apprentissage en milieu professionnel (WBL)/exposition sur le terrain lorsque cela est réalisable
Public cible	Étudiants des établissements VET d'Afrique de l'Ouest ; techniciens des énergies renouvelables ; stagiaires et assistants techniques du secteur de l'énergie ; ingénieurs recherchant des connaissances structurées en PV

Prérequis recommandés	solaire ; professionnels intéressés par les technologies d'énergie propre
	Mathématiques de base ; physique de base ; notions élémentaires d'électricité/électronique et de mécanique ; familiarité avec les technologies d'énergie renouvelable. Ces prérequis sont recommandés et non obligatoires.
Profil du formateur	Ingénieurs en énergies renouvelables, spécialistes du PV solaire et formateurs techniques expérimentés. Les modules de niveau Avancé doivent, selon les cas, faire intervenir des spécialistes de la conception électrique PV, de l'électronique de puissance, de la commande/SCADA, de la planification des centrales, du diagnostic et de l'exploitation-maintenance.
Niveaux du programme	Base (S1) et Avancé (S2). Il s'agit de niveaux internes au programme ; le positionnement formel en matière de qualification/accréditation doit être aligné sur le WP4 et sur les cadres nationaux applicables.
Langue/accessibilité	Curriculum de référence en anglais ; les supports d'accompagnement doivent être disponibles/adaptés en anglais et en français et, si nécessaire, dans les langues locales, conformément aux dispositions du WP3.

Base d'évaluation	Quiz alignés sur les acquis d'apprentissage, exercices techniques, tâches de calcul/conception, analyse de cas, interprétation de données, tâches d'évaluation de systèmes, travaux pratiques et scénarios de recherche de pannes.
--------------------------	--

3.2 Objectifs du programme

- Doter les apprenants d'une compréhension structurée de l'énergie PV solaire, depuis les fondamentaux de la ressource solaire jusqu'à l'exploitation complète des centrales et à la gestion du cycle de vie.
- Développer une compétence pratique et analytique en conversion PV, montage mécanique, configuration électrique, électronique de puissance, commande, SCADA et intégration au réseau.
- Développer la capacité à interpréter les données de performance PV, à reconnaître les comportements anormaux, à diagnostiquer les défauts courants et à contribuer à une recherche de pannes et à une maintenance sûres.
- Développer la compétence en évaluation de la ressource solaire, choix de site, implantation des centrales PV, analyse d'ombrage, raccordement au réseau et planification économique/environnementale préliminaire.
- Relier la théorie à la pratique technique au moyen de calculs, de simulations, de schémas de systèmes, d'études de cas, de travaux pratiques et de possibilités d'apprentissage en milieu professionnel.
- Soutenir les compétences vertes utiles à l'industrie et les parcours d'insertion professionnelle au sein des systèmes d'énergie renouvelable ouest-africains.
- Fournir une base curriculaire cohérente pour le développement des formateurs, l'expérimentation des cours, l'alignement sur la certification et l'actualisation future du curriculum.

3.3 Structure du programme et séquence recommandée

Code	Cours / module	Niveau	Durée
S1-01	Histoire et introduction à l'énergie solaire	Base	3,0 h
S1-02	Règles fondamentales du rayonnement solaire dans la conversion d'énergie PV et la conception des centrales	Base	4,0 h
S1-03	Structure mécanique et mécanismes des systèmes PV solaires – Partie I	Base	4,0 h
S1-04	Structure électrique des systèmes PV solaires – Partie I	Base	3,5 h
S1-05	Électronique de puissance dans la production d'énergie solaire	Base	2,5 h
S2-01	Introduction aux mécanismes avancés des systèmes PV solaires	Avancé	2,5 h
S2-02	Structure électrique des systèmes PV solaires – Partie II	Avancé	4,0 h
S2-03	Systèmes de commande, de surveillance et SCADA dans les centrales PV solaires	Avancé	3,0 h
S2-04	Technologies d'électronique de puissance dans les systèmes PV solaires	Avancé	3,5 h
S2-05	Planification et implantation des centrales de production d'énergie solaire	Avancé	4,5 h
S2-06	Identification et diagnostic des défauts dans les systèmes PV solaires	Avancé	3,0 h
S2-07	Programme d'exploitation et de maintenance des centrales PV solaires	Avancé	3,0 h

Total du niveau Base : 17,0 heures. Total du niveau Avancé : 23,5 heures. Total calculé du programme : 40,5 heures.

3.4 Progression du niveau Base au niveau Avancé

Domaine	Attendu au niveau Base	Attendu au niveau Avancé
Ressource solaire et contexte PV	Reconnaître les technologies d'énergie solaire, les configurations de systèmes, les applications, la variabilité de la ressource et le rôle dans la transition énergétique.	Interpréter les implications en matière de ressource, de projet, de performance et de cycle de vie à l'échelle de centrales PV complètes.
Conversion et performance PV	Expliquer l'irradiance/l'irradiation, la géométrie solaire, la conversion PV et les effets environnementaux au premier ordre.	Utiliser les indicateurs de performance, les pertes du système et les données d'exploitation pour étayer les décisions de commande, de planification, de diagnostic et d'exploitation-maintenance.
Systèmes mécaniques	Identifier les modules, cadres, rails, pinces, structures fixes/au sol/en toiture, fondations et cheminements de charge élémentaires.	Intégrer les considérations mécaniques dans la conception des centrales, l'installation, la mise en service, l'inspection, la fiabilité et les décisions de cycle de vie.
Systèmes électriques	Expliquer le comportement des cellules/modules/chaînes/champs PV, les composants DC, la protection et l'appariement élémentaire des onduleurs.	Concevoir et analyser les limites de chaînes, les champs en parallèle, la segmentation, les pertes, la protection, l'architecture de raccordement au réseau et la fiabilité électrique.
Électronique de puissance	Comprendre les onduleurs, la conversion DC/DC, les fonctions du bus DC, le MPPT élémentaire et le fonctionnement en réseau/autonome.	Analyser les topologies d'onduleurs, l'électronique multi-MPPT/au niveau module, la synchronisation au réseau, la qualité de l'énergie, le soutien au réseau, la gestion thermique et les onduleurs intelligents.
Commande / SCADA	Reconnaître les fonctions de surveillance et de commande des onduleurs au sein de la chaîne énergétique PV élémentaire.	Analyser la commande hiérarchisée, la commande MPPT/onduleur, les contrôleurs de centrale, les capteurs, le SCADA, les alarmes, le fonctionnement hybride et le soutien au réseau.
Planification / diagnostic / exploitation-maintenance	Introduction par les composants du système, le cycle de vie du projet et le contexte de sécurité.	Planifier les sites et les implantations ; évaluer les contraintes de réseau et économiques ; diagnostiquer les défauts ; contribuer à la mise en service, au suivi des performances, à la maintenance et à la gestion du cycle de vie.

4. Acquis d'apprentissage du programme et référentiel de compétences

4.1 Acquis d'apprentissage du programme

Code	Acquis d'apprentissage du programme
PLO1	Expliquer le développement, les applications et le rôle de l'énergie solaire dans le système énergétique, et décrire les principales configurations et étapes du cycle de vie des systèmes PV solaires.
PLO2	Appliquer les concepts fondamentaux de rayonnement solaire, de géométrie solaire et de conversion PV pour expliquer la performance PV, les effets environnementaux et les choix préliminaires de conception des centrales.
PLO3	Identifier et expliquer les structures mécaniques PV, les systèmes de montage, les cheminements de charge, les fondations, les matériaux, les exigences d'installation et la sécurité structurale élémentaire.
PLO4	Expliquer la production électrique PV, les cellules/modules/chaînes/champs, l'infrastructure DC, la protection, le comportement I-V/P-V, le dimensionnement élémentaire des champs et l'appariement des onduleurs.
PLO5	Expliquer la conversion par électronique de puissance en PV solaire, le fonctionnement des onduleurs, la conversion DC/DC, le MPPT, les fonctions du bus DC et l'interfaçage élémentaire avec la charge et le réseau.
PLO6	Analyser la conception électrique avancée des champs PV, les pertes électriques, le mismatch, la mise à la terre/protection, l'architecture raccordée au réseau et les enjeux de fiabilité.
PLO7	Analyser la commande des centrales PV, la coordination des onduleurs, le SCADA/l'acquisition de données, le suivi des performances, les alarmes, le fonctionnement hybride et les fonctions de soutien au réseau.

Code	Acquis d'apprentissage du programme
PLO8	Évaluer les topologies d'onduleurs avancées, les technologies de convertisseurs/MPPT, la qualité de l'énergie, la synchronisation, la commande de la puissance réactive, le soutien au réseau, la gestion thermique et les technologies émergentes d'électronique de puissance.
PLO9	Interpréter les informations relatives à la ressource solaire, au site, à l'ombrage, à l'implantation, au réseau, à l'économie, à l'environnement et au cycle de vie du projet pour la planification et l'implantation des centrales PV.
PLO10	Identifier et diagnostiquer les défauts courants de modules, de chaînes, de câblage, d'onduleurs et de protections à l'aide de mesures électriques appropriées, de courbes I-V, de la thermographie et des informations de surveillance/SCADA.
PLO11	Contribuer à la sécurité de l'installation, de la mise en service, de l'exploitation, du suivi des performances, de la maintenance préventive/corrective/prédictive, de la recherche de pannes et de la gestion du cycle de vie des systèmes PV.
PLO12	Appliquer les principes appropriés de santé, de sécurité, d'environnement et de pratique professionnelle, et utiliser des schémas techniques, des calculs, des jeux de données et des outils numériques pour communiquer et résoudre des problèmes structurés de PV solaire.

4.2 Domaines de compétences

Code	Domaine de compétences	Périmètre
C1	Ressource solaire, fondamentaux du PV et contexte sectoriel	Développement de l'énergie solaire, variabilité de la ressource, applications PV, configurations de systèmes, chaîne énergétique et contexte de cycle de vie.
C2	Rayonnement solaire, conversion PV et performance	Irradiance/irradiation, géométrie solaire, ressource dans le plan des modules, effet photovoltaïque, pertes environnementales, productible et raisonnement sur la performance.
C3	Structures mécaniques et installation	Modules, cadres, rails, pinces, structures en toiture/au sol, concepts d'inclinaison fixe/de suiveur, fondations, cheminements de charge, matériaux, installation et sécurité mécanique.
C4	Systèmes électriques, protection et conception des champs	Cellules/modules/chaînes/champs, composants DC, comportement I-V/P-V, dimensionnement des chaînes, pertes de câblage/mismatch, mise à la terre, protection, transformateurs, appareillage et architecture de raccordement au réseau.
C5	Électronique de puissance, commande, SCADA et intégration au réseau	Onduleurs, convertisseurs DC/DC, MPPT, bus DC, commande de centrale/d'onduleur, capteurs, SCADA, synchronisation, qualité de l'énergie, puissance réactive et soutien au réseau.
C6	Planification des centrales PV, raccordement au réseau et faisabilité de projet	Évaluation de la ressource solaire et du site, ombrage, implantation, dimensionnement des systèmes, contraintes de réseau, autorisations, économie, considérations environnementales/sociales et cycle de vie du projet.
C7	Diagnostic de défauts, mise en service, exploitation-maintenance et performance	Classification des défauts, outils de diagnostic, recherche de pannes, mise en service, ratio de performance/productible/disponibilité, inspection, maintenance préventive/corrective/prédictive et fiabilité sur le cycle de vie.
C8	Sécurité, durabilité et pratique professionnelle	Sécurité électrique DC/AC, LOTO, travail en hauteur, risques liés à l'installation, PPE, responsabilité environnementale, inclusion, travail en équipe et conduite professionnelle.

4.3 Correspondance entre modules et compétences

Module	Domaines de compétences principaux	Accent mis sur
S1-01	C1, C8	Contexte de l'énergie solaire, vue d'ensemble des systèmes PV, applications et bases du cycle de vie
S1-02	C1, C2	Rayonnement solaire, conversion PV, effets environnementaux et conception préliminaire des centrales
S1-03	C3, C8	Structure mécanique, montage, cheminements de charge, durabilité et installation en sécurité
S1-04	C2, C4, C8	Production électrique PV, structure des champs, protection, comportement I-V/P-V et appariement

Module	Domaines de compétences principaux	Accent mis sur
		des onduleurs
S1-05	C4, C5	Bases de l'électronique de puissance, fonctionnement des onduleurs, MPPT et interface réseau/charge
S2-01	C1-C7	Approche systémique intégrée couvrant la conception, la commande, le diagnostic et le cycle de vie des centrales PV
S2-02	C4, C7, C8	Conception électrique avancée des champs, pertes, protection, architecture de raccordement au réseau et fiabilité
S2-03	C5, C7	Commande, SCADA, suivi des performances, alarmes et fonctionnement hybride/soutien au réseau
S2-04	C5, C7	Topologies avancées d'onduleurs/convertisseurs, MPPT, qualité de l'énergie, soutien au réseau et fiabilité
S2-05	C1, C2, C3, C4, C6, C8	Évaluation du site et de la ressource, implantation, réseau, économie, planification environnementale et faisabilité du projet
S2-06	C4, C5, C7, C8	Classification des défauts PV, diagnostic, analyse des causes racines et action corrective
S2-07	C3, C4, C5, C7, C8	Installation/mise en service, exploitation, performance, maintenance, sécurité et gestion du cycle de vie

5. Plans de cours détaillés et spécifications des modules

Les 12 plans de cours suivants définissent les acquis d'apprentissage, la séquence d'enseignement, les activités appliquées, l'approche d'évaluation et la progression de chaque module Énergie solaire. Ils constituent une feuille de route au niveau du curriculum, dérivée des supports Solaire de niveau Base et Avancé. Ces plans résument volontairement le contenu d'enseignement technique complet plutôt que de le reproduire ; ce contenu demeure dans les supports pédagogiques Solaire détaillés.

5.1 S1-01 – Histoire et introduction à l'énergie solaire

Code du cours	S1-01
Niveau	Base
Durée recommandée	3,0 heures
Description du cours	Établir une base commune sur le développement, les applications, l'architecture des systèmes et le rôle stratégique de l'énergie solaire, tout en introduisant la chaîne énergétique complète du PV solaire et le cycle de vie d'un projet.

Acquis d'apprentissage

- Décrire le développement des technologies d'énergie solaire et reconnaître les grandes étapes du déploiement photovoltaïque.
- Expliquer l'énergie solaire en tant que ressource renouvelable variable et identifier les principaux facteurs qui influencent la disponibilité solaire.
- Distinguer, à un niveau introductif, les concepts de photovoltaïque, de solaire thermique et de solaire à concentration.
- Retracer la chaîne énergétique du PV solaire, du rayonnement solaire aux modules, aux champs, à la collecte électrique, à la conversion de puissance et à l'usage final de l'énergie.
- Comparer les configurations PV en toiture, au sol, à inclinaison fixe/avec suiveur, autonomes et raccordées au réseau, ainsi que les échelles d'application courantes.
- Expliquer le rôle de l'énergie solaire dans la décarbonation et décrire les principales étapes, de l'évaluation du site à l'exploitation et à la maintenance.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Développement des technologies d'énergie solaire	Premières applications solaires ; évolution des systèmes photovoltaïques et solaires thermiques ; grandes étapes du déploiement moderne du PV solaire.
2. L'énergie solaire en tant que ressource renouvelable	Nature et variabilité du rayonnement solaire ; disponibilité journalière et saisonnière ; effets de la localisation, de la météo, de l'ombrage, des poussières, de la température et de l'orientation de la surface réceptrice.
3. Technologies d'énergie solaire et chaîne énergétique PV	Vue d'ensemble du PV, du solaire thermique et du solaire à concentration ; conversion du rayonnement solaire en courant continu ; modules, chaînes et champs ; collecte électrique, conversion et livraison aux charges ou au réseau.
4. Principaux sous-systèmes PV	Ressource solaire et champ PV ; montage/support mécanique ; collecte et protection électriques ; onduleurs/électronique de puissance ; surveillance et commande.
5. Configurations et applications des systèmes PV	Systèmes en toiture/intégrés au bâti et au sol ; concepts d'inclinaison fixe et de suiveur ; systèmes autonomes et raccordés au réseau ; applications résidentielles, tertiaires, industrielles, rurales et à l'échelle du réseau.
6. Cycle de vie du projet et rôle dans la transition énergétique	Évaluation du site, planification préliminaire, installation, inspection, mise en service, surveillance et maintenance ; rôle dans la décarbonation, bénéfices, limites et tendances mondiales/régionales.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Réaliser un schéma-bloc de système retraçant l'énergie depuis le rayonnement solaire jusqu'à une charge locale ou au réseau public.
- Identifier et légender les principaux sous-systèmes d'une installation PV en toiture ou au sol.
- Comparer deux applications PV solaires, par exemple un système décentralisé/rural et une centrale à l'échelle du réseau, à l'aide d'une fiche structurée.
- Cartographier les principales étapes du cycle de vie d'un projet PV et identifier où interviennent les décisions mécaniques, électriques, de sécurité et d'exploitation.

Approche d'évaluation

Quiz de connaissances, complété par un exercice de cartographie de système PV et une courte tâche de comparaison application/cycle de vie.

Progression et articulation

Fournit le vocabulaire système et le contexte nécessaires à l'étude de la ressource solaire et de la conversion en S1-02, ainsi qu'aux modules mécaniques, électriques et d'électronique de puissance qui suivent.

5.2 S1-02 – Règles fondamentales du rayonnement solaire dans la conversion d'énergie PV et la conception des centrales

Code du cours	S1-02
Niveau	Base
Durée recommandée	4,0 heures
Description du cours	Développer la compréhension de la ressource solaire et de la conversion PV nécessaire pour expliquer pourquoi l'irradiance, la géométrie solaire, la température, l'ombrage et les pertes déterminent la production PV et la conception préliminaire des centrales.

Acquis d'apprentissage

- Distinguer l'irradiance de l'irradiation et expliquer les concepts de rayonnement direct, diffus et réfléchi, ainsi que GHI, DNI, DHI et rayonnement dans le plan des modules.
- Décrire le mouvement apparent du soleil à l'aide des angles solaires élémentaires et expliquer pourquoi l'orientation et l'inclinaison influent sur l'énergie reçue.

- Expliquer le processus de conversion photovoltaïque et interpréter les principales grandeurs électriques d'une cellule, d'un module, d'une chaîne et d'un champ PV.
- Quantifier ou interpréter les effets au premier ordre de l'irradiance, de la température de cellule, de l'ombrage, de la salissure et de la météo sur la puissance et la production d'énergie PV.
- Appliquer les relations élémentaires d'orientation, d'inclinaison, d'espacement des rangées, de budget de pertes, de ratio de performance et de productible dans la conception préliminaire d'une centrale PV.
- Identifier les arbitrages entre captation d'énergie, pertes, contraintes de terrain/d'implantation et conception pratique des centrales.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Fondamentaux du rayonnement solaire	Irradiance et irradiation ; rayonnement direct, diffus et réfléchi ; GHI, DNI, DHI, irradiance dans le plan des modules et réflectance du sol.
2. Course du soleil et géométrie solaire	Latitude, déclinaison, angle horaire, zénith, hauteur, azimut et angle d'incidence ; relation entre la position du soleil et l'orientation et l'inclinaison du champ.
3. Principes de conversion d'énergie PV	Effet photovoltaïque ; concepts de cellule, module, chaîne et champ ; production de puissance en courant continu ; point de fonctionnement et comportement introductif I-V/P-V.
4. Effets environnementaux sur la production PV	Effets de l'irradiance et de la température ; ombrage partiel et mismatch ; salissure/poussières ; effets météorologiques sur la ressource et effets thermiques.
5. Règles élémentaires de conception d'une centrale PV	Orientation et inclinaison ; espacement des rangées et ombrage inter-rangées ; logique d'implantation élémentaire ; estimation préliminaire du productible.
6. Arbitrages entre performance et conception	Rendement et budget de pertes ; ratio de performance ; productible ; occupation des sols et implantation ; équilibre entre captation de la ressource, pertes et contraintes pratiques.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Interpréter un jeu de données simple GHI/DNI/plan des modules et en expliquer les implications pour la production PV attendue.
- Utiliser un exercice de course du soleil ou d'angles solaires pour comparer des orientations/inclinaisons de modules candidates.
- Réaliser un exercice simplifié d'espacement des rangées/d'ombrage pour un champ à inclinaison fixe.
- Estimer le productible ou le ratio de performance à partir d'un jeu de données structuré et identifier les principales catégories de pertes.

Approche d'évaluation

Quiz complété par une interprétation de la ressource solaire et un ou plusieurs exercices de calcul/conception portant sur le rayonnement, le productible, le ratio de performance ou l'espacement des rangées.

Progression et articulation

Fournit les bases de ressource et de performance nécessaires à l'implantation mécanique du S1-03, au comportement électrique du S1-04, puis aux modules ultérieurs de planification, de commande, de diagnostic et d'exploitation-maintenance.

5.3 S1-03 – Structure mécanique et mécanismes des systèmes PV solaires – Partie I

Code du cours	S1-03
Niveau	Base
Durée recommandée	4,0 heures
Description du cours	Présenter le sous-système mécanique d'une installation PV solaire et expliquer comment les modules, les structures de montage, les assemblages et les fondations maintiennent l'orientation et transfèrent en sécurité les charges environnementales et d'exploitation vers la toiture ou le sol porteur.

Acquis d'apprentissage

- Identifier les principaux composants mécaniques d'un système PV et décrire le rôle structural des modules, cadres, rails, pinces, fixations, poteaux, équerres et fondations.
- Distinguer les configurations en toiture, au sol, à inclinaison fixe et à suiveur élémentaire selon leur agencement mécanique et leur cheminement de transfert des charges.
- Expliquer comment la gravité, le vent, les mouvements thermiques et les autres actions sont transférés des modules vers la toiture, la structure, la fondation ou le sol porteur.
- Appliquer, à un niveau introductif, les concepts fondamentaux d'équilibre, de contrainte, de pression du vent, de stabilité des fondations, de dilatation thermique et de précontrainte des assemblages.
- Décrire les exigences de résistance, d'aptitude au service, de durabilité, de résistance à la corrosion, d'alignement et d'accès pour la maintenance.
- Appliquer les bonnes pratiques de manutention des modules, de fixation, d'inspection et d'installation mécanique élémentaire en sécurité.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Fonction mécanique et cheminement complet des charges	Les modules PV comme composants à la fois de conversion d'énergie et de structure ; support, orientation et transfert des charges ; équilibre et nécessité de continuité au niveau de chaque assemblage.
2. Modules, cadres, rails, pinces et fixations	Constitution des modules et sensibilité à la manutention ; rails, équerres, poteaux et contreventements ; pinces intermédiaires et d'extrémité ; classe de fixation, précontrainte et qualité des assemblages.
3. Types de systèmes de montage	Montage en toiture, ancrages de toiture et concepts de lestage ; structures au sol ; systèmes à inclinaison fixe ; agencement et mouvement des suiveurs, à un niveau introductif.
4. Support structural et fondations	Transfert des charges par les supports ; concepts de fondations en béton, sur pieux/vis de sol et autres ; capacité portante du sol et considérations relatives au support de toiture.
5. Conditions élémentaires de conception mécanique	Actions de gravité et de vent ; soulèvement ; dilatation thermique ; alignement, flèche et aptitude au service ; actions environnementales propres au site.
6. Matériaux et durabilité	Corrosion, compatibilité des matériaux et exposition aux intempéries ; durabilité structurale ; inspection des jeux, déformations ou détériorations.
7. Installation et sécurité	Manutention des modules, bridage conforme, alignement, fixation/précontrainte, séquence d'installation, accès et pratiques élémentaires de travail en sécurité.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Légender un schéma de système de montage PV et retracer le cheminement des charges de la surface du module jusqu'à la toiture ou au sol.
- Comparer les agencements en toiture, au sol et à inclinaison fixe/avec suiveur au regard des contraintes de site et d'installation.
- Réaliser un exercice élémentaire d'équilibre, de pression du vent ou de dilatation thermique à partir des exemples du cours.
- Utiliser une liste de contrôle d'installation/d'inspection pour identifier les problèmes d'alignement, de fixation, de corrosion et de manutention.

Approche d'évaluation

Quiz d'identification de composants, complété par un exercice de cheminement des charges/de conception et une tâche structurée d'installation/d'inspection.

Progression et articulation

Fournit les bases mécaniques nécessaires à l'approche systémique intégrée du S2-01, aux décisions de site et d'implantation du S2-05 et à l'installation, la mise en service et l'exploitation-maintenance du S2-07.

5.4 S1-04 – Structure électrique des systèmes PV solaires – Partie I

Code du cours	S1-04
Niveau	Base
Durée recommandée	3,5 heures
Description du cours	Acquérir les compétences fondamentales en production électrique PV, configuration module/chaîne/champ, composants DC, protection, caractéristiques électriques et appariement en sécurité du champ PV avec les limites de fonctionnement de l'onduleur.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer les principes électriques fondamentaux régissant la production PV et décrire le comportement des cellules, modules, chaînes et champs PV dans des conditions de fonctionnement variables.
- Analyser l'influence des connexions série et parallèle sur la tension, le courant et la puissance PV.
- Identifier les câbles DC, connecteurs, boîtes de jonction, interrupteurs-sectionneurs et dispositifs de protection, et expliquer leurs fonctions.
- Appliquer les principes élémentaires de mise à la terre, de protection contre les surintensités, de vérification de polarité et de sécurité d'isolement.
- Interpréter les caractéristiques électriques d'un module à l'aide des courbes I-V et P-V et expliquer l'influence de l'irradiance et de la température.
- Réaliser un dimensionnement élémentaire de champ et configurer les chaînes PV dans le respect des exigences de fonctionnement de l'onduleur.
- Appairer les caractéristiques électriques du champ PV avec les spécifications de l'onduleur en vue d'un fonctionnement sûr et efficace.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Fondamentaux de la production électrique PV	Effet photovoltaïque ; comportement électrique de la cellule PV et notion de circuit équivalent ; production de tension et de courant continus ; influence de l'irradiance, de la température et de la charge.
2. Modules, chaînes et champs	Caractéristiques électriques assignées des modules ; connexions série, parallèle et série-parallèle ; configuration des chaînes ; dimensionnement et segmentation des champs à un niveau élémentaire.
3. Principaux composants électriques DC	Câbles et connecteurs PV ; boîtes de jonction ; interrupteurs-sectionneurs ; fusibles et protection élémentaire des circuits ; points de mesure.
4. Protection élémentaire et sécurité électrique	Concepts de mise à la terre ; protection contre les surintensités côté DC/AC ; vérification de polarité ; intégrité de l'isolement ; principes de consignation et de manipulation en sécurité.
5. Caractéristiques de sortie électrique	Tension en circuit ouvert, courant de court-circuit et grandeurs au point de puissance maximale ; courbes I-V et P-V ; résistances série/shunt et effets environnementaux.
6. Dimensionnement élémentaire du champ et appariement de l'onduleur	Vérifications de tension et de courant de chaîne ; plage d'entrée et compatibilité en puissance de l'onduleur ; choix de configuration favorisant un fonctionnement sûr, efficace et fiable.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Calculer les variations de tension et de courant pour des associations série et parallèle simples de modules.
- Interpréter les courbes I-V et P-V dans différentes conditions d'irradiance ou de température.
- Réaliser un exercice élémentaire de dimensionnement de chaînes et d'appariement d'onduleur.
- Annoter un schéma unifilaire/bloc DC d'un système PV en y indiquant les câbles, la boîte de jonction, le sectionnement et les fonctions de protection.

Approche d'évaluation

Quiz complété par des exercices sur les associations série/parallèle et l'interprétation I-V/P-V, avec une tâche élémentaire de dimensionnement de chaînes ou de protection/appariement.

Progression et articulation

Fournit les bases électriques nécessaires à l'électronique de puissance du S1-05, à la conception avancée des champs du S2-02, à la commande du S2-03, au diagnostic du S2-06 et à l'exploitation-maintenance du S2-07.

5.5 S1-05 – Électronique de puissance dans la production d'énergie solaire

Code du cours	S1-05
Niveau	Base
Durée recommandée	2,5 heures
Description du cours	Présenter les dispositifs d'électronique de puissance et les fonctions de commande qui conditionnent la puissance continue variable du PV, recherchent la puissance maximale disponible et fournissent une électricité utilisable à des charges autonomes ou au réseau public.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer le rôle de l'électronique de puissance dans la conversion d'énergie PV, le conditionnement de puissance et l'intégration au réseau.
- Identifier les diodes, les composants semi-conducteurs de commutation, les convertisseurs DC/DC, les onduleurs et les éléments du bus DC, et expliquer leurs fonctions élémentaires.
- Décrire le fonctionnement des onduleurs autonomes et raccordés au réseau ainsi que la régulation élémentaire de la tension et de la fréquence de sortie.
- Expliquer la courbe de puissance PV ainsi que la finalité et le fonctionnement élémentaire du suivi du point de puissance maximale.
- Reconnaître l'influence des pertes de conversion, des effets thermiques, de la fiabilité et de la protection sur la performance de l'électronique de puissance PV.
- Distinguer, à un niveau introductif, les chaînes de conversion PV à un étage et à deux étages.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Rôle de l'électronique de puissance dans les systèmes PV	Chaîne énergétique du champ PV vers la charge/le réseau ; nécessité de la conversion, de la commande et du conditionnement ; interface entre production DC variable et puissance électrique utile.
2. Principaux composants d'électronique de puissance	Diodes et composants de commutation ; convertisseurs DC/DC ; onduleurs ; condensateurs/inductances de bus DC et fonctions de filtrage en sortie.
3. Fonctionnement élémentaire des onduleurs	Concepts d'onduleur autonome et raccordé au réseau ; conversion DC-AC ; contexte de synchronisation ; régulation élémentaire de la tension et de la fréquence.
4. Suivi du point de puissance maximale	Notion de courbe de puissance PV ; déplacement du point de puissance maximale avec les conditions environnementales ; finalité et logique élémentaire du MPPT.
5. Performance pratique et fiabilité	Pertes de conversion et rendement ; effets thermiques et refroidissement ; protection élémentaire, fiabilité et limites de fonctionnement ; configurations à un étage et à deux étages.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Construire ou annoter un schéma-bloc champ PV – convertisseur – bus DC – onduleur – réseau/charge.
- Associer les composants d'électronique de puissance à leurs fonctions et aux enjeux typiques de rendement et de comportement thermique.
- Interpréter une courbe P-V simple et expliquer pourquoi le MPPT est nécessaire lorsque l'irradiance ou la température varient.
- Comparer les fonctions des onduleurs autonomes et raccordés au réseau à l'aide d'une fiche structurée.

Approche d'évaluation

Quiz de connaissances, complété par des exercices de schéma-bloc/de fonctions des composants et une courte tâche sur le MPPT ou le fonctionnement de l'onduleur.

Progression et articulation

Prépare les apprenants à l'interaction avancée champ/onduleur, à la commande/SCADA et à l'électronique de puissance avancée des modules S2-02 à S2-04.

5.6 S2-01 – Introduction aux mécanismes avancés des systèmes PV solaires

Code du cours	S2-01
Niveau	Avancé
Durée recommandée	2,5 heures
Description du cours	Faire passer les apprenants d'une connaissance au niveau des composants à une vision intégrée de la centrale PV solaire complète, en reliant la planification, la conception des champs et de l'électricité, la conversion de puissance, la commande, la surveillance, le diagnostic, la mise en service et l'exploitation-maintenance sur le cycle de vie.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer pourquoi une centrale PV solaire doit être comprise comme un système intégré de conversion d'énergie et non comme un assemblage de composants indépendants.
- Retracer le flux d'énergie depuis le rayonnement solaire jusqu'aux modules, chaînes, champs, convertisseurs de puissance, onduleurs, transformateurs et appareillages.
- Expliquer comment la commande, le SCADA, la protection, le diagnostic et la maintenance concourent à une exploitation sûre et fiable de la centrale.
- Relier la planification du site et de la ressource, la conception électrique, l'électronique de puissance, la commande, le diagnostic des défauts et l'exploitation-maintenance tout au long du cycle de vie du projet.
- Reconnaître comment des pertes ou des défauts dans un sous-système peuvent affecter la performance et la disponibilité de la centrale.
- Expliquer la finalité et la progression des modules spécialisés de niveau Avancé S2-02 à S2-07.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Architecture avancée des systèmes PV	Structure des centrales PV à l'échelle du réseau et distribuées ; modules/champs, collecte DC, onduleurs, transformateurs, appareillages et interface réseau ; contexte hybride/stockage.
2. Intégration mécanique et électrique	Intégration du module au champ ; interface montage/implantation ; collecte DC ; implantation des onduleurs et transformateurs ; chemin énergétique au niveau système.
3. Intégration de l'électronique de puissance, de la commande et de la surveillance	Onduleurs et convertisseurs DC/DC ; MPPT ; contrôleurs de centrale ; capteurs et compteurs ; réseaux de communication et supervision SCADA.
4. Modes de fonctionnement avancés	Fonctionnement normal, faible irradiance et ombrage partiel ; écrêtement et fonctionnement en soutien au réseau ; réponse de la centrale à l'évolution des conditions environnementales et de réseau.
5. Vue d'ensemble de la protection, de la performance et du diagnostic	Fonctions de protection, alarmes, indicateurs de performance et surveillance ; distinction entre variation environnementale et fonctionnement anormal ou défaut.
6. Feuille de route du cycle de vie du projet et de l'actif	Planification et évaluation du site ; conception ; installation/mise en service ; exploitation ; diagnostic des défauts ; maintenance ; gestion de la fin de vie et interdépendances entre systèmes.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Élaborer une carte intégrée du système d'une centrale PV reliant les sous-systèmes ressource, mécanique, électrique, conversion, commande, réseau et exploitation-maintenance.
- Analyser un court cas transversal dans lequel un ombrage, un problème électrique ou une limitation d'onduleur affecte la production de la centrale.
- Élaborer une feuille de route montrant comment les modules S2-02 à S2-07 s'articulent sur le cycle de vie de la centrale.

Approche d'évaluation

Court quiz d'intégration système, complété par une tâche de cartographie du système complet ou d'analyse de cas transversal.

Progression et articulation

Constitue la passerelle vers les modules S2-02 à S2-07 et doit être suivi avant les modules spécialisés de niveau Avancé.

5.7 S2-02 – Structure électrique des systèmes PV solaires – Partie II

Code du cours	S2-02
Niveau	Avancé
Durée recommandée	4,0 heures
Description du cours	Développer une compétence avancée en configuration électrique des champs PV, conception des tensions de chaîne, analyse du mismatch et des pertes, protection DC, architecture des centrales raccordées au réseau et fiabilité électrique à long terme.

Acquis d'apprentissage

- Concevoir les configurations électriques d'un champ PV en déterminant les limites de tension de chaîne appropriées, les agencements de chaînes en parallèle et la segmentation du champ.
- Analyser les pertes de câblage, le mismatch entre modules et les effets d'ombrage partiel, et évaluer leur incidence sur la production d'énergie.
- Expliquer la coordination avancée des protections DC, la protection contre les surtensions et la foudre et la protection contre les défauts à la terre.
- Décrire l'architecture électrique d'une installation PV raccordée au réseau, y compris les postes onduleurs, les transformateurs, les appareillages et les réseaux de collecte en moyenne tension.
- Évaluer la dégradation de l'isolement, l'échauffement des connecteurs et la dégradation induite par le potentiel, et recommander les mesures d'atténuation ou de maintenance appropriées.
- Relier les choix de conception électrique du champ à la compatibilité avec l'onduleur, à la protection, à la fiabilité et à la performance sur le cycle de vie.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Conception électrique avancée des champs PV	Limites de tension de chaîne par conditions chaudes/froides ; MPPT et limites DC maximales de l'onduleur ; équilibrage des chaînes en parallèle ; segmentation du champ et fiabilité de fonctionnement.
2. Pertes électriques et mismatch	Pertes de tension et de puissance dans les câbles ; mismatch entre modules ; ombrage partiel ; comportement des diodes by-pass ; effets sur la production des chaînes/du champ et sur le productible.
3. Systèmes de protection et de mise à la terre	Coordination des protections DC ; concepts de surintensité et de sectionnement ; protection contre les surtensions et la foudre ; mise à la terre et protection contre les défauts à la terre.
4. Architecture électrique raccordée au réseau	Postes onduleurs ; transformateurs et appareillages ; collecte AC ; réseaux de collecte en moyenne tension ; interfaces entre le champ, les équipements de conversion et le réseau.
5. Fiabilité électrique avancée	Dégradation de l'isolement, courants de fuite/défauts à la terre, échauffement/résistance élevée des connecteurs et dégradation induite par le potentiel ; détection, prévention et implications pour la maintenance.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Réaliser une vérification de conception des tensions de chaîne en conditions chaudes/froides au regard des limites de fonctionnement de l'onduleur.
- Estimer ou comparer les pertes de câblage et de mismatch pour différentes configurations de champ.
- Élaborer un schéma simplifié de protection DC et de mise à la terre pour une section de champ PV.

- Interpréter un cas de fiabilité électrique impliquant un échauffement de connecteurs, une dégradation de l'isolement ou un ombrage partiel.

Approche d'évaluation

Exercice technique de conception/calcul, complété par un cas de pertes électriques/de protection ou de fiabilité et un quiz ciblé.

Progression et articulation

Fournit les bases de conception électrique et de fiabilité nécessaires à la commande/SCADA du S2-03, à l'électronique de puissance du S2-04, au diagnostic des défauts du S2-06 et à l'exploitation-maintenance du S2-07.

5.8 S2-03 – Systèmes de commande, de surveillance et SCADA dans les centrales PV solaires

Code du cours	S2-03
Niveau	Avancé
Durée recommandée	3,0 heures
Description du cours	Développer une compréhension au niveau système de la commande des onduleurs et des centrales PV, du MPPT, de la supervision, des capteurs et communications, des données SCADA, de la gestion des alarmes et du fonctionnement coordonné des systèmes PV raccordés au réseau, en micro-réseau et hybrides.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer les objectifs de commande d'une centrale PV, la régulation en boucle fermée et la coordination entre les onduleurs individuels et le contrôleur de centrale.
- Analyser les stratégies de MPPT et de commande d'onduleur dans des conditions variables d'irradiance et de réseau, y compris la régulation du bus DC et la commande des puissances active et réactive.
- Décrire l'architecture SCADA ainsi que le rôle des capteurs de terrain, des compteurs, des réseaux de communication, de l'acquisition, de l'archivage et de la visualisation des données.
- Analyser les données d'exploitation, les indicateurs de performance, les alarmes et les journaux d'événements afin d'évaluer le comportement de la centrale et d'étayer le diagnostic des défauts.
- Expliquer les stratégies de commande des systèmes PV-stockage et hybrides, y compris le fonctionnement en suivi de charge et le soutien en tension et en fréquence.
- Relier les fonctions de commande et de surveillance à une exploitation de la centrale PV fiable, sûre et conforme aux codes de réseau.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Fondamentaux de la commande des centrales PV	Objectifs de commande pour les systèmes îlotés et raccordés au réseau ; régulation en boucle fermée ; commande hiérarchisée convertisseur/centrale ; coordination entre les onduleurs et le contrôleur de puissance de la centrale.
2. MPPT et commande des onduleurs	MPPT en irradiance variable ; contexte de commande à un ou deux étages ; régulation de la tension du bus DC ; commande en courant de l'onduleur ; commande des puissances active et réactive.
3. Architecture SCADA et acquisition de données	Capteurs d'irradiance, de température et électriques ; compteurs ; réseaux de communication ; acquisition, archivage, visualisation des données et supervision centralisée.
4. Surveillance de l'exploitation, indicateurs clés et alarmes	Ratio de performance et autres indicateurs d'exploitation ; catégories d'alarmes ; journaux d'événements et codes d'état ; interprétation des tendances et des écarts à des fins de performance et de diagnostic.
5. Commande dans les micro-réseaux et les systèmes hybrides	Coordination PV-stockage ; fonctionnement en suivi de charge ; équilibrage des puissances ; soutien en tension et en fréquence et commande coordonnée des ressources distribuées.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Tracer et expliquer une boucle de commande fermée d'onduleur/de centrale PV.
- Interpréter un exemple de tableau de bord SCADA, de journal d'événements ou de séquence d'alarmes et identifier les vérifications à effectuer ensuite.
- Calculer ou interpréter un exemple élémentaire de ratio de performance/d'indicateur clé à partir de données de surveillance.
- Analyser un scénario simple d'exploitation PV-stockage ou de micro-réseau et en identifier les objectifs de commande.

Approche d'évaluation

Exercice de schéma de système de commande, cas SCADA/données/alarmes et quiz de connaissances, avec une courte tâche de suivi des performances ou de commande hybride lorsque cela est réalisable.

Progression et articulation

Intègre les connaissances électriques avancées du S2-02 avec les fonctions onduleur/réseau du S2-04 et fournit les bases de surveillance nécessaires au diagnostic du S2-06 et à l'exploitation-maintenance du S2-07.

5.9 S2-04 – Technologies d'électronique de puissance dans les systèmes PV solaires

Code du cours	S2-04
Niveau	Avancé
Durée recommandée	3,5 heures
Description du cours	Renforcer la compétence des apprenants sur les architectures modernes d'onduleurs PV, la conversion DC/DC, le MPPT distribué, la synchronisation au réseau, la qualité de l'énergie, les fonctions de soutien au réseau, la gestion thermique et de la fiabilité, ainsi que les technologies émergentes d'onduleurs intelligents.

Acquis d'apprentissage

- Différencier les architectures à onduleur central, à onduleur de chaîne et à micro-onduleur, et en évaluer les applications et les arbitrages.
- Expliquer les technologies avancées de convertisseurs DC/DC utilisées pour la régulation de tension et l'extraction de puissance maximale.
- Analyser les systèmes multi-MPPT, les optimiseurs de puissance et l'électronique de puissance au niveau module pour des conditions de fonctionnement non uniformes.
- Décrire la synchronisation au réseau et évaluer l'atténuation des harmoniques, le filtrage, la commande du facteur de puissance et la régulation de la puissance réactive.
- Expliquer la tenue aux creux de tension (LVRT), la régulation volt-var, le soutien en fréquence et l'écrêtement de la puissance active en tant que fonctions de soutien au réseau.
- Évaluer la gestion thermique, la fiabilité des composants de commutation, les semi-conducteurs à large bande interdite et les évolutions des onduleurs intelligents et hybrides.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Topologies avancées d'onduleurs solaires	Architectures à onduleur central, à onduleur de chaîne et à micro-onduleur/au niveau module ; choix selon l'échelle du système, l'ombrage, la maintenabilité, la fiabilité, le rendement et le coût.
2. Technologies de convertisseurs DC/DC	Concepts abaisseur (buck), élévateur (boost) et abaisseur-élévateur (buck-boost) ; adaptation de tension ; chaîne de conversion et usage dans les architectures PV à un ou deux étages.
3. Multi-MPPT et électronique de puissance au niveau module	Voies MPPT multiples ; optimiseurs de puissance ; commande au niveau module ; performance en cas de mismatch/d'ombrage et surveillance distribuée.
4. Interface réseau et qualité de l'énergie	Synchronisation au réseau ; génération et atténuation des harmoniques ; filtrage ; facteur de puissance ; régulation de la puissance réactive et qualité du courant.

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
5. Fonctions de soutien au réseau	Tenue aux creux de tension ; commande volt-var ; soutien en fréquence ; écrêtement de la puissance active et participation des onduleurs intelligents à la stabilité du réseau.
6. Fiabilité et technologies émergentes	Pertes par commutation et par conduction, gestion thermique et refroidissement ; contraintes et protection des semi-conducteurs ; composants à large bande interdite SiC/GaN ; technologies d'onduleurs intelligents et hybrides.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Comparer les architectures à onduleur central, de chaîne et micro-onduleur pour deux applications PV contrastées.
- Construire le schéma-bloc d'un système de conversion PV multi-MPPT/à deux étages et en retracer les objectifs de commande.
- Analyser un cas simplifié de qualité de l'énergie/de soutien au réseau impliquant la puissance réactive, les harmoniques ou la tenue aux creux de tension.
- Examiner un scénario thermique/de fiabilité et identifier les facteurs de conception ou d'exploitation qui influent sur la durée de vie du convertisseur.

Approche d'évaluation

Comparaison de topologies de convertisseurs, complétée par un cas d'interface réseau/de commande et un quiz technique ; y inclure, le cas échéant, une tâche de fiabilité/thermique ou d'application du MPPT.

Progression et articulation

Soutient les décisions d'architecture électrique de centrale et de réseau du S2-05, le diagnostic des défauts du S2-06 ainsi que la maintenance des onduleurs et la gestion de la performance du S2-07.

5.10 S2-05 – Planification et implantation des centrales de production d'énergie solaire

Code du cours	S2-05
Niveau	Avancé
Durée recommandée	4,5 heures
Description du cours	Élargir l'apprentissage de la technologie des composants PV au développement complet d'une centrale, en combinant évaluation de la ressource solaire, choix de site, dimensionnement du système, implantation et ombrage, raccordement au réseau, faisabilité du projet, considérations environnementales et décisions de mise en œuvre.

Acquis d'apprentissage

- Décrire les principales étapes du développement d'un projet PV solaire, de l'identification du site et de la faisabilité jusqu'aux autorisations, à la construction, à la mise en service et à l'exploitation.
- Identifier et évaluer les facteurs clés de choix de site d'une centrale solaire, notamment l'irradiance, le foncier et la topographie, l'accès, la proximité du réseau et les contraintes environnementales et réglementaires.
- Évaluer les données de ressource solaire et appliquer un raisonnement préliminaire de dimensionnement du système et de productible.
- Appliquer les concepts élémentaires d'implantation PV, d'orientation/inclinaison, d'analyse d'ombrage et d'espacement inter-rangées.
- Évaluer les considérations de raccordement au réseau, notamment les exigences d'interconnexion, la capacité, la congestion, l'écrêtement et les contraintes des codes de réseau.
- Réaliser une évaluation économique préliminaire à l'aide des notions de CAPEX, d'OPEX et de LCOE, et relier les choix techniques à la viabilité du projet.
- Reconnaître les considérations environnementales, d'occupation des sols, d'autorisation et de parties prenantes qui influencent l'implantation et le développement du projet.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
-------	----------------------------------

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Processus de développement d'un projet solaire	Identification et présélection des sites ; faisabilité ; conception et autorisations ; approvisionnement et construction ; mise en service ; exploitation et points de décision du cycle de vie du projet.
2. Évaluation de la ressource solaire et du site	Données historiques d'irradiance et de météorologie ; contexte GHI/DNI ; ombrage ; terrain et topographie ; disponibilité foncière ; contexte géotechnique et de fondation ; accès et infrastructures.
3. Dimensionnement du système et estimation du productible	Puissance DC nominale, ratio de performance et hypothèses de ressource ; productible annuel attendu ; relation entre la demande, le foncier, la technologie, le rendement des onduleurs et les pertes du système.
4. Implantation et allocation d'une centrale PV	Orientation et inclinaison ; espacement des rangées ; ombrage inter-rangées ; couloirs d'accès et de maintenance ; segmentation du champ ; implantation des onduleurs et transformateurs et optimisation de l'agencement.
5. Raccordement au réseau et contraintes	Point d'interconnexion ; contexte du réseau de collecte et du poste ; capacité du réseau local ; considérations de tension, de fréquence et de stabilité ; congestion, écrêtement et exigences des codes de réseau.
6. Évaluation économique et faisabilité	Notions de CAPEX, d'OPEX et de LCOE ; comparaison préliminaire coût/énergie ; effet de la ressource, des pertes, du raccordement au réseau et des choix de conception sur la viabilité du projet.
7. Considérations environnementales, réglementaires et de parties prenantes	Présélection environnementale et contexte d'étude d'impact, zonage et autorisations, occupation des sols, contraintes écologiques et sociales et coordination précoce des parties prenantes.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Réaliser un exercice structuré de présélection de site à partir de critères de ressource solaire, de terrain, d'accès, de foncier et de réseau.
- Estimer la taille préliminaire du système et le productible annuel à partir d'un jeu de données simplifié de ressource et de performance.
- Élaborer une implantation élémentaire et justifier l'espacement des rangées et le traitement de l'ombrage pour un site hypothétique.
- Identifier une approche plausible d'interconnexion au réseau et les principales contraintes de réseau pour le cas étudié.
- Préparer une comparaison préliminaire CAPEX/OPEX/LCOE ou de faisabilité à partir des hypothèses fournies.

Approche d'évaluation

Interprétation de la ressource et du site, exercice d'implantation/de dimensionnement et cas intégré de planification PV solaire assorti d'une courte évaluation technique et économique.

Progression et articulation

Relie les connaissances antérieures sur la ressource, la mécanique, l'électricité et les onduleurs au développement réel d'un projet, et fournit la référence projet pour le diagnostic, la mise en service et l'exploitation-maintenance sur le cycle de vie des modules S2-06 et S2-07.

5.11 S2-06 – Identification et diagnostic des défauts dans les systèmes PV solaires

Code du cours	S2-06
Niveau	Avancé
Durée recommandée	3,0 heures
Description du cours	Développer une approche systématique de l'identification, de la localisation et du diagnostic des défauts PV en combinant comportement électrique, indices thermiques, normalisation des performances, analyse I-V, données de surveillance/SCADA et raisonnement structuré sur les causes racines.

Acquis d'apprentissage

- Classer les défauts courants du PV solaire par localisation, mécanisme physique, effet sur le fonctionnement et gravité.
- Expliquer comment les défauts de modules, les problèmes de câblage, l'ombrage, la dégradation, les défaillances d'onduleurs et les défauts de protection modifient le comportement électrique et thermique du PV.
- Interpréter les signatures de défaut dans la tension, le courant, la puissance, la résistance d'isolement, les courbes I-V, les images infrarouges et les enregistrements SCADA.
- Comparer la performance mesurée au comportement attendu/sain en tenant compte de l'irradiance, de la température et de l'état de fonctionnement.
- Appliquer un processus systématique de recherche de pannes comprenant la détection, la localisation, l'analyse des causes racines, l'action corrective, la vérification et la documentation.
- Relier la gravité d'un défaut à la sécurité, à la perte d'énergie, à la disponibilité, à la priorité de maintenance et aux besoins d'escalade.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Notions de défaut et classification	Défaut et symptôme ; défauts soudains, progressifs, intermittents et dépendants des conditions ; effets de la configuration du champ ; performance attendue par rapport à la performance mesurée et raisonnement sur les résidus normalisés.
2. Défauts des modules PV	Points chauds ; fissures de cellules et défauts d'interconnexion ; délamination et détérioration par l'humidité ; salissure et ombrage partiel ; dégradation des modules à long terme et problèmes de diodes by-pass.
3. Défauts de chaînes, de câblage et défauts électriques	Défauts de circuit ouvert et de court-circuit ; défauts à la terre et d'isolement ; défauts d'arc ; défauts de connecteurs et de résistance élevée ; conséquences sur le courant, la tension, l'échauffement et la protection.
4. Défauts d'onduleurs et de protections	États anormaux et arrêts des onduleurs ; fonctionnement des dispositifs de protection ; alarmes, déclenchements et interaction avec les conditions du champ et du réseau.
5. Outils et techniques de diagnostic	Relevé de courbes I-V ; thermographie infrarouge ; mesures de tension, de courant et d'isolement ; analyse des données et alarmes SCADA ; combinaison de plusieurs méthodes pour améliorer la fiabilité du diagnostic.
6. Cause racine, action corrective et vérification	Processus structuré de recherche de pannes ; évaluation de la perte d'énergie et de la criticité ; réparation ou remplacement ; vérification après réparation et documentation technique.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Classer un ensemble de symptômes de défauts PV par sous-système, cause probable et gravité.
- Interpréter des courbes I-V simplifiées présentant des anomalies liées au mismatch, à un circuit ouvert, à l'ombrage ou à une résistance.
- Analyser un exemple de thermographie infrarouge ou une image thermique annotée pour détecter des points chauds ou des problèmes de connexion.
- Utiliser les données SCADA/de surveillance et les mesures électriques pour construire une séquence de décision de localisation de défaut.
- Remplir une fiche de cause racine et d'action corrective incluant la vérification après réparation.

Approche d'évaluation

Évaluation diagnostique sur cas à partir d'éléments électriques/SCADA/I-V ou thermiques, complétée par un quiz de classification des défauts et une tâche de processus de recherche de pannes.

Progression et articulation

Consolide les apprentissages en électricité, commande et électronique de puissance et prépare les apprenants à une maintenance sûre fondée sur les défauts, corrective et prédictive au S2-07.

5.12 S2-07 – Programme d'exploitation et de maintenance des centrales PV solaires

Code du cours

S2-07

Niveau	Avancé
Durée recommandée	3,0 heures
Description du cours	Intégrer l'installation, la mise en service, l'exploitation, le suivi des performances, la maintenance préventive/corrective/prédictive, la recherche de pannes, la sécurité et la gestion du cycle de vie dans un cadre pratique d'exploitation-maintenance du PV solaire.

Acquis d'apprentissage

- Décrire les principales vérifications d'installation et de mise en service mécaniques et électriques ainsi que les exigences de mise sous tension maîtrisée.
- Interpréter les indicateurs quotidiens d'exploitation, le productible, la disponibilité et le ratio de performance au regard de l'irradiance et des conditions de fonctionnement.
- Élaborer des dispositions de maintenance préventive couvrant le nettoyage, l'inspection visuelle et les intervalles d'inspection électrique et mécanique.
- Distinguer la maintenance corrective et la maintenance prédictive et relier les informations de surveillance de l'état à la planification de la maintenance.
- Appliquer une recherche de pannes et une escalade systématiques en s'appuyant sur les registres de la centrale, les données de surveillance et les éléments de diagnostic.
- Appliquer la sécurité électrique DC, la consignation/déconsignation (LOTO), les PPE, les règles de travail en hauteur et de site ainsi que les principes de remise sous tension maîtrisée lors des activités d'exploitation-maintenance.
- Expliquer les considérations relatives aux pièces de rechange, à la documentation, à la réception et à la fin de vie dans le cadre de la gestion d'actifs sur le cycle de vie.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Installation et mise en service d'une centrale PV	Vérifications d'installation mécanique ; intégrité des modules et du montage ; contrôles du câblage DC/AC, de la polarité, de la mise à la terre et de l'isolement ; essais fonctionnels des onduleurs et des boîtes de jonction ; mise sous tension maîtrisée ; raccordement au réseau et vérification de la protection anti-ilotaie ; référence de performance et réception.
2. Exploitation et suivi des performances	État de fonctionnement quotidien ; comportement des onduleurs, des chaînes et du réseau AC ; disponibilité du système de surveillance ; productible ; disponibilité de la centrale ; suivi du ratio de performance et comparaison avec les conditions attendues.
3. Planification de la maintenance préventive	Calendriers de nettoyage ; inspections visuelles ; vérifications des fixations mécaniques et de la structure ; inspections des connexions électriques, des câbles, des protections et des onduleurs ; intervalles fondés sur le risque et la criticité.
4. Maintenance corrective et prédictive	Maintenance déclenchée par les défauts ; recherche de pannes et réparation en sécurité ; surveillance de l'état ; planification de la maintenance fondée sur les tendances et les données ; priorisation selon la sécurité, la perte d'énergie et la criticité.
5. Sécurité et maîtrise des travaux en exploitation-maintenance	Risques électriques DC, isolement et polarité ; consignation en sécurité et LOTO ; PPE ; risques liés aux toitures, au travail en hauteur et à l'installation ; procédures d'urgence et remise en service maîtrisée.
6. Cycle de vie et gestion d'actifs	Planification des pièces de rechange ; registres de maintenance et ordres de travail ; références de performance ; documentation et réception ; remplacement des composants et gestion de la fin de vie.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Élaborer une liste de contrôle de mise en service couvrant les étapes mécaniques, électriques, fonctionnelles et de vérification des performances.
- Interpréter un court jeu de données de surveillance et distinguer la variation due à la ressource d'une sous-performance d'exploitation.
- Élaborer un calendrier de maintenance préventive pour les modules, les structures, les systèmes DC, les onduleurs et les équipements de surveillance.

- Réaliser en salle une séquence de sécurité au poste de travail / de consignation (LOTO) avant une activité simulée de maintenance PV.
- Utiliser un cas de recherche de pannes et de priorisation de la maintenance pour relier les éléments de diagnostic, la sécurité, l'action corrective et la documentation.

Approche d'évaluation

Cas d'exploitation-maintenance, complété par une tâche de calendrier de maintenance, une interprétation de mise en service/de performance, un scénario de recherche de pannes et une vérification des connaissances en sécurité.

Progression et articulation

Module de synthèse intégrant les connaissances de ressource, de mécanique, d'électricité, d'électronique de puissance, de commande, de planification et de diagnostic en vue d'une exploitation sûre des centrales PV solaires sur l'ensemble de leur cycle de vie.

6. Lignes directrices d'enseignement, d'apprentissage et de formation pratique

6.1 Modèle de dispensation

Le programme repose sur une approche VET hybride associant l'apprentissage en ligne pour les concepts théoriques à des explications encadrées par un formateur et à un apprentissage pratique supervisé. Il intègre également des éléments d'apprentissage dual par le biais de stages et de formation en situation de travail lorsque cela est réalisable. La dispensation doit faire progresser les apprenants du concept à la démonstration, à la pratique guidée, à l'application, au retour d'expérience et à la réflexion.

Modalité d'apprentissage	Finalité	Exemples
Apprentissage en ligne / théorie numérique	Introduire les concepts de manière efficace et offrir un accès flexible.	Courtes vidéos de cours, illustrations techniques, schémas interactifs, lectures, quiz et démonstrations enregistrées.
Apprentissage encadré par un formateur	Clarifier les concepts techniques difficiles et relier les modules entre eux.	Exemples résolus, discussion guidée, schémas de systèmes PV, calculs, briefings sécurité et débriefings.
Simulation / activité sur données	S'exercer à l'interprétation et à la prise de décision sans risque inutile.	Jeux de données de ressource solaire, exercices de course du soleil/d'ombrage, courbes I-V/P-V, schémas d'onduleurs et de commande, données SCADA/d'alarmes, scénarios de défaut et de maintenance.
Atelier / démonstration pratique	Développer la reconnaissance des composants, les procédures de sécurité et le raisonnement pratique.	Exemples de modules PV et de montages, composants DC, démonstrations d'onduleurs et de commande, instruments de mesure, exercices d'inspection et de diagnostic.
Apprentissage par cas	Relier l'ingénierie aux décisions réelles de projet et d'exploitation.	Applications PV ouest-africaines, choix de site, contraintes de réseau, ombrage, défauts, exploitation-maintenance, arbitrages environnementaux et économiques.
Apprentissage en milieu professionnel (WBL) / exposition sur le terrain	Renforcer le contexte professionnel et la pratique professionnelle.	Visites de site supervisées, stages, observation en situation de travail, mentorat par l'industrie et travaux en mode projet lorsque cela est possible.

6.2 Déroulé de séance recommandé

Étape	Ligne directrice
1. Cadrage	Énoncer les acquis d'apprentissage, la pertinence, les attentes en matière de sécurité et les liens avec les modules antérieurs.
2. Apport conceptuel	Utiliser des supports de cours/en ligne concis, des schémas et des exemples résolus.
3. Application guidée	Les apprenants réalisent des calculs, des tracés de systèmes, des tâches d'interprétation ou de décision.
4. Activité pratique/sur cas	Appliquer les concepts au moyen d'une simulation, d'un travail sur composants, d'un jeu de données, d'une tâche de conception, d'un scénario de défaut ou d'un cas de projet.
5. Évaluation et retour	Utiliser des éléments probants d'évaluation, de connaissances et appliqués, alignés sur les acquis du module

Étape	Ligne directrice
d'expérience	et adaptés au temps disponible.
6. Réflexion et transfert	Synthétiser la compétence acquise et la relier au module suivant ou à une tâche en milieu professionnel.

6.3 Principes de la formation pratique

- L'activité pratique doit être directement reliée aux acquis d'apprentissage énoncés et produire des preuves observables de compétence.
- Les tâches à risque élevé doivent d'abord être enseignées au moyen de schémas, de maquettes, de simulations ou de démonstrations supervisées avant toute exposition à des équipements sous tension.
- Lorsque des installations PV à l'échelle réelle ne sont pas disponibles, utiliser des exemples de modules et de composants PV, des maquettes de montage, des bancs de formation basse tension sûrs, des simulations d'onduleurs et de commande, des données SCADA d'exemple, des exemples I-V/thermiques et des cas structurés.
- L'apprentissage en milieu professionnel doit être planifié avec des objectifs d'apprentissage clairs, des dispositions d'encadrement, des exigences de sécurité et une réflexion documentée de l'apprenant.
- Les activités pratiques doivent être contextualisées en fonction des technologies PV solaires disponibles et des conditions d'exploitation des pays partenaires, sans réduire les attentes en matière de compétences fondamentales.

6.4 Orientations pour la formation de formateurs

Les formateurs doivent être informés de l'architecture complète du curriculum, de la progression du niveau Base au niveau Avancé, des attentes en matière d'évaluation, des exigences de sécurité et de l'articulation entre ce curriculum et les supports Solaire détaillés du D3.3. Le développement des formateurs doit comprendre des occasions d'examiner les modules PV et configurations de champs actuels, les pratiques de montage, la protection électrique, les technologies d'onduleurs et de MPPT, la commande/SCADA, les outils de diagnostic, la planification et les pratiques d'exploitation-maintenance. Un enseignement en équipe pluridisciplinaire est recommandé pour les sujets avancés d'électricité, d'électronique de puissance, de commande/SCADA, de planification, de diagnostic et d'exploitation-maintenance lorsqu'un seul formateur ne peut couvrir de manière crédible l'ensemble de l'étendue technique.

7. Évaluation et alignement sur la certification

7.1 Principes d'évaluation

- L'évaluation doit être alignée sur les acquis d'apprentissage de chaque module.
- La compréhension théorique comme la compétence pratique et analytique doivent être attestées lorsque cela est pertinent.
- L'évaluation doit progresser des connaissances, de l'identification et du calcul élémentaire au niveau Base vers le raisonnement de conception, l'analyse, l'interprétation de données, le diagnostic, l'évaluation et la planification au niveau Avancé.
- Les apprenants doivent recevoir un retour d'expérience en temps utile, identifiant les erreurs de compréhension technique et orientant la poursuite de la pratique.
- Les tâches d'évaluation doivent s'appuyer sur des contextes PV solaires réalistes et éviter de porter sur des contenus non enseignés ou non couverts par les supports de cours.
- Aucune tâche électrique à risque élevé sous tension ne doit être utilisée comme évaluation, à moins que l'environnement de formation, les équipements, un encadrement compétent et les procédures de sécurité ne rendent l'activité appropriée.

7.2 Méthodes d'évaluation

Méthode	Utilisation dans le programme
Quiz à choix multiples / à réponses courtes	Terminologie, concepts, fonctions des composants, règles de sécurité et compréhension technique élémentaire.
Calculs / exercices techniques	Rayonnement solaire, relations électriques série/parallèle, dimensionnement des chaînes, calculs de pertes/productible/ratio de performance, espacement des rangées et dimensionnement préliminaire du système.

Méthode	Utilisation dans le programme
Analyse d'études de cas	Planification des centrales PV, contraintes de réseau, ombrage, enjeux environnementaux, défauts, décisions d'exploitation-maintenance et arbitrages de projet.
Mini-tâches d'évaluation de systèmes	Retracer les chemins d'énergie et de commande, interpréter des courbes I-V/P-V ou des indicateurs SCADA, analyser les interactions entre sous-systèmes et évaluer les choix de conception et d'exploitation.
Travaux pratiques	Identification de composants, inspection du montage et du cheminement des charges, schémas de systèmes DC, interprétation de données, listes de contrôle de mise en service et planification de la maintenance.
Scénarios de recherche de pannes	Identifier les symptômes, les causes plausibles, les étapes de diagnostic, les mesures de sécurité et les actions correctives ou d'escalade appropriées à partir d'éléments électriques, thermiques ou de surveillance.

7.3 Réussite et certification

Alignement sur le WP4 requis

Aucune note de réussite chiffrée, aucun seuil d'assiduité ni aucune règle de certification finale ne sont fixés dans le présent curriculum. Les seuils de réussite, les critères d'évaluation et les procédures de certification seront appliqués conformément au référentiel de certification fondé sur les compétences de PRISTINE VET relevant du WP4 et aux exigences nationales VET applicables.

7.4 Contrôles qualité de l'évaluation

- Utiliser une matrice d'évaluation reliant chaque item ou tâche aux acquis d'apprentissage du module.
- Vérifier les questions et les tâches pratiques du point de vue de l'exactitude technique, de la clarté, du niveau de difficulté, de l'accessibilité linguistique et du réalisme du contexte PV.
- Utiliser des consignes de correction ou des grilles d'évaluation cohérentes pour les calculs, les tâches pratiques, d'analyse de données et sur cas.
- Consigner les résultats et le retour d'expérience des participants conformément aux exigences du projet en matière d'archivage et de protection des données.
- Examiner les résultats d'évaluation lors de l'expérimentation des cours et réviser les items faibles ou ambigus au moyen d'une gestion maîtrisée des versions.

8. Ressources de formation, santé et sécurité, environnement et inclusion

8.1 Ressources de formation recommandées

Domaine de ressources	Dotation recommandée
Apprentissage numérique	Plateforme d'apprentissage (LMS) ou plateforme partagée, appareils connectés à Internet, vidéoprojecteur/écran, vidéos courtes, schémas interactifs, quiz et fichiers de cours numériques.
Ressource solaire et conception de centrales	Jeux de données d'irradiance d'exemple, informations de course du soleil, exemples GHI/DNI/DHI/plan des modules, fiches d'ombrage et d'implantation, cartes et données de site, et outils appropriés de conception/simulation lorsqu'ils sont disponibles.
Apprentissage mécanique	Échantillons ou maquettes de modules PV, cadres, rails, pinces, fixations, exemples de montage en toiture et au sol, schémas de fondations et de cheminement des charges, et outils/démonstrations d'installation en sécurité.
Apprentissage électrique	Exemples de modules et de chaînes PV, câbles et connecteurs DC, exemples de boîtes de jonction et de protections, schémas électriques, bancs basse tension sûrs, multimètres et démonstrations d'isolement et de polarité.
Électronique de puissance / commande / SCADA	Schémas d'onduleurs et de convertisseurs DC/DC ou équipements de formation sûrs, simulations de MPPT/de commande, capteurs et compteurs, captures d'écran ou jeux de données SCADA, exemples d'alarmes et d'événements et schémas d'interface réseau.
Diagnostic / exploitation-maintenance / sécurité	Exemples de courbes I-V ou accès à un traceur lorsque cela est possible, images thermiques et exemples de thermographie, listes de contrôle de maintenance et de mise en service, PPE, dispositifs de démonstration LOTO et modèles d'analyse de sécurité au poste de travail et d'évaluation des risques.

8.2 Exigences de santé et de sécurité

La sécurité est une compétence transversale et doit être intégrée à chaque module impliquant des modules PV, des circuits électriques, des structures de montage, des toitures, l'installation, la mise en service, le diagnostic ou la maintenance. Les prestataires de formation doivent appliquer les exigences légales locales et les procédures de site et ne doivent pas autoriser d'activité à risque élevé sans supervision.

Domaine de danger	Ligne directrice de formation
Risques électriques DC du PV	Considérer les circuits DC du PV comme potentiellement sous tension dès qu'ils sont exposés à la lumière. Recourir à la consignation, à la vérification, aux contrôles de polarité et d'isolement, à des outils appropriés et à un encadrement compétent ; éviter les exercices dangereux sous tension.
Risques AC / réseau / moyenne tension	Appliquer les règles de consignation, de vérification, de mise à la terre et de personne compétente. Une formation sur réseau ou en moyenne tension sous tension n'est pas appropriée à une pratique non supervisée des apprenants.
Consignation (LOTO) et remise sous tension	Enseigner la consignation maîtrisée, le verrouillage/étiquetage lorsqu'il est applicable, la vérification de l'état de sécurité, la communication et la remise en service maîtrisée avant tout scénario de maintenance.
Risques d'arc, de connecteurs et risques thermiques	Enseigner le raccordement, l'inspection et la reconnaissance des défauts corrects ; éviter d'intervenir sur des connecteurs ou circuits endommagés ou suspects sans consignation en sécurité et encadrement compétent.
Risques liés aux toitures et au travail en hauteur	Recourir à des moyens d'accès appropriés, à une protection antichute, à des zones d'exclusion, à une sensibilisation au sauvetage et à un encadrement compétent pour toute exposition réelle à la hauteur.
Installation mécanique et levage	Traiter la manutention des modules, les arêtes vives, la manutention manuelle, les zones de levage, la stabilité des montages, l'usage des outils, la fixation et les conditions météorologiques.
PPE et intervention d'urgence	Choisir les PPE en fonction des dangers de la tâche ; présenter la consignation d'urgence, la première intervention, la déclaration d'incident et les dispositions d'évacuation.
Conditions météorologiques et de site	Prendre en compte la chaleur, la foudre, la pluie, les poussières, le vent et les autres conditions de site lors des activités extérieures d'installation, d'inspection ou d'exploitation-maintenance.

8.3 Considérations environnementales et de durabilité

- Situer le PV solaire dans les objectifs d'atténuation du changement climatique, d'accès à l'énergie et d'énergie durable, tout en reconnaissant les impacts environnementaux sur le cycle de vie.
- Traiter l'occupation des sols, les contraintes d'ombrage et de terrain, la présélection environnementale et sociale, les autorisations et les considérations relatives aux communautés et aux parties prenantes dans la planification des centrales.
- Relier la salissure, le nettoyage, l'état des composants et la qualité de la maintenance au productible et à une exploitation économe en ressources.
- Introduire une approche par cycle de vie pour le remplacement des modules, onduleurs et composants, les pièces de rechange, les déchets et la gestion de la fin de vie, lorsque cela est pertinent pour l'exploitation-maintenance.
- Utiliser des cas aidant les apprenants à concilier productible, fiabilité, coût, responsabilité environnementale, sécurité et acceptabilité sociale.

8.4 Inclusion, genre et accessibilité

La dispensation de la formation doit favoriser l'égalité des chances et la non-discrimination. PRISTINE VET met explicitement l'accent sur l'augmentation de la participation des femmes à la formation professionnelle aux énergies vertes et sur un accès inclusif pour les groupes sous-représentés. Le recrutement, les exemples, le travail de groupe, les travaux pratiques, le mentorat et les environnements de formation doivent donc être conçus de manière à éviter l'exclusion et à favoriser une participation équitable.

- Utiliser une communication et des visuels sensibles à la dimension de genre et inclusifs.
- Planifier les activités pratiques de sorte que chaque apprenant bénéficie d'une participation pratique ou analytique effective.

- Prévoir des adaptations d'accessibilité raisonnables lorsque cela est réalisable et éviter les obstacles inutiles dans l'apprentissage numérique.
- Suivre la participation et le retour d'expérience des apprenants conformément aux exigences du projet et aux règles de confidentialité.
- Recourir à un appui en anglais/français et en langues locales lorsque cela est nécessaire pour améliorer la compréhension, sans modifier le niveau de compétence technique attendu.

8.5 Protection des données et dossiers des apprenants

Lorsque les activités de formation collectent des données à caractère personnel, des résultats d'évaluation, des registres de participation, des retours d'expérience ou des images, les prestataires doivent respecter les exigences applicables en matière de protection des données ainsi que les procédures du projet, notamment un traitement licite et transparent, la minimisation des données, un stockage sécurisé, un accès restreint et une information et un consentement appropriés des participants.

9. Lignes directrices pour les formateurs et les apprenants

9.1 Lignes directrices pour les formateurs

- Utiliser les acquis d'apprentissage du curriculum et les spécifications des modules comme plan d'enseignement de référence ; utiliser les supports pédagogiques S1/S2 comme source de contenu détaillé.
- Vérifier les connaissances prérequis au début de chaque niveau et fournir les explications de mise à niveau nécessaires.
- Relier explicitement les notions de niveau Base sur la ressource solaire, la mécanique, l'électricité et les onduleurs aux applications avancées de conception, de commande, de planification, de diagnostic et d'exploitation-maintenance, plutôt que de répéter des contenus sans progression.
- Utiliser des schémas, des calculs, des exemples résolus, des jeux de données PV, des courbes I-V/P-V, des données SCADA, des cas et des activités pratiques afin de rendre les concepts d'ingénierie observables et pertinents.
- Adapter les exemples et les jeux de données aux ressources solaires locales, aux conditions de réseau, aux technologies PV disponibles, aux contextes bâtis et fonciers et aux besoins du marché du travail, après validation par les parties prenantes.
- Réaliser un briefing sécurité avant toute activité pratique ou de terrain et interrompre toute activité qui ne peut être menée en sécurité avec l'encadrement et les équipements disponibles.
- Utiliser les résultats d'évaluation et le retour d'expérience des apprenants pour identifier les sujets nécessitant une reprise d'enseignement ou une révision du curriculum ou des supports.
- Tenir à jour, dans le référentiel institutionnel partagé du projet, les registres de cours, les éléments probants d'évaluation et les supports versionnés.

9.2 Lignes directrices pour les apprenants

- Suivre les modules dans la séquence recommandée, sauf si le formateur confirme une compétence antérieure équivalente.
- Participer aux activités d'apprentissage théoriques, numériques, pratiques et sur cas, et demander des clarifications lorsque des notions techniques ou de sécurité ne sont pas claires.
- Respecter l'ensemble des consignes de sécurité en laboratoire, en atelier, en toiture et sur le terrain, ainsi qu'en matière électrique et mécanique, et utiliser les PPE requis.
- Organiser les notes techniques, calculs, schémas, fiches de conception et éléments probants d'évaluation dans un portfolio d'apprentissage, lorsque le prestataire en utilise un.
- Utiliser les exercices SCADA, sur données et de simulation de manière responsable et distinguer les simulations de formation de l'exploitation autorisée de systèmes réels.
- Adopter une conduite professionnelle, le travail en équipe, une communication respectueuse et une responsabilité environnementale pendant la formation et l'exposition au milieu professionnel.

9.3 Éléments probants suggérés pour le portfolio d'apprentissage

Niveau	Exemples d'éléments probants du portfolio
Niveau Base	Carte de système énergie solaire/PV, tâche de ressource solaire/de productible, exercice de montage et de cheminement

Niveau	Exemples d'éléments probants du portfolio
	des charges, schéma électrique PV/exercice de dimensionnement de chaînes, schéma-bloc onduleur/MPPT et quiz de module.
Niveau Avancé	Carte intégrée d'une centrale PV, cas avancé de chaînes/de protection, analyse commande/SCADA, exercice de topologie d'onduleur/de soutien au réseau, cas de planification de centrale, éléments de diagnostic de défauts, calendrier de mise en service/d'exploitation-maintenance et tâche de sécurité.

10. Assurance qualité, suivi et révision du curriculum

10.1 Objectifs de l'assurance qualité

L'assurance qualité doit garantir que le curriculum demeure techniquement exact, pédagogiquement cohérent, pertinent pour l'industrie, inclusif, évaluable et conforme aux exigences du projet. Les contrôles qualité doivent porter à la fois sur le curriculum et sur les supports pédagogiques Solaire détaillés utilisés pour le dispenser.

10.2 Cycle d'assurance qualité du curriculum

Étape	Action requise
1. Revue préalable à la dispensation	Confirmer les codes et intitulés des modules, les durées, les acquis d'apprentissage, les supports, les activités, les tâches d'évaluation, les exigences de sécurité et la préparation des formateurs.
2. Validation par les parties prenantes	Recueillir des contributions structurées des établissements VET, des entreprises et experts de l'industrie et des autorités compétentes sur les besoins en main-d'œuvre, la pertinence technologique et les contraintes locales.
3. Expérimentation des cours	Expérimenter les modules avec les formateurs et les prestataires VET partenaires ; consigner les difficultés de mise en œuvre, les questions des apprenants, la gestion du temps et les manques de ressources.
4. Analyse du retour d'expérience	Examiner le retour d'expérience des apprenants et des formateurs, les résultats d'évaluation, la faisabilité pratique et les questions d'inclusion et d'accès.
5. Révision technique et pédagogique	Corriger les inexactitudes, réduire les redondances, améliorer la progression et actualiser les activités et l'évaluation, tout en préservant les acquis approuvés et la maîtrise documentaire.
6. Gestion des versions et approbation	Émettre une nouvelle version maîtrisée, archiver les versions remplacées et conserver les preuves de revue et d'approbation.

10.3 Indicateurs de suivi de la dispensation de la formation

- Achèvement des modules et des évaluations prévus dans le calendrier de dispensation convenu.
- Participation et achèvement des apprenants, y compris le suivi de la participation par genre et de l'accès inclusif.
- Résultats d'évaluation par acquis d'apprentissage et identification des lacunes récurrentes de connaissances ou de compétences.
- Retour d'expérience des apprenants et des formateurs sur la clarté, la pertinence, la valeur pratique et l'accessibilité numérique.
- Disponibilité et adéquation des composants PV solaires, des instruments, des ressources numériques et des possibilités d'apprentissage pratique en sécurité.
- Nombre et qualité des contributions des parties prenantes de l'industrie et du secteur VET à la revue du curriculum et aux possibilités d'apprentissage en milieu professionnel.
- Application correcte des procédures de visibilité du projet, de maîtrise documentaire, de protection des données et d'archivage.

10.4 Éléments déclencheurs d'une révision du curriculum

- Nouvelles technologies de modules PV, d'onduleurs, de stockage, de surveillance, de diagnostic ou de montage modifiant sensiblement les pratiques de l'industrie.
- Évolutions des exigences de réseau, des politiques nationales, des règles de sécurité électrique ou structurale ou des référentiels de certification.

- Retours répétés des apprenants ou des formateurs signalant un séquençement peu clair, des redondances ou une application pratique insuffisante.
- Éléments d'évaluation indiquant que les acquis d'apprentissage ne sont pas atteints de manière fiable.
- Évolutions des infrastructures VET disponibles, des outils numériques ou des possibilités de partenariat avec l'industrie.
- Retour d'expérience formel issu de l'expérimentation des cours du WP3, du développement de la certification du WP4 ou d'une revue d'assurance qualité du projet.

11. Mise en œuvre, maîtrise documentaire et articulation avec les supports pédagogiques

11.1 Séquence de mise en œuvre recommandée

Phase	Orientations de mise en œuvre
Phase 1 – Préparer	Confirmer les formateurs, la cohorte d'apprenants, les installations, l'accès numérique, les mesures de sécurité, les besoins linguistiques et les versions actuelles des fichiers de cours Solaire.
Phase 2 – Dispenser le niveau Base	Réaliser les modules S1-01 à S1-05, en utilisant l'évaluation formative pour confirmer la préparation au niveau Avancé.
Phase 3 – Dispenser le niveau Avancé	Réaliser les modules S2-01 à S2-07 dans l'ordre, en accentuant progressivement la conception intégrée, l'interprétation des données, la planification, le diagnostic, la mise en service et l'exploitation-maintenance sur le cycle de vie.
Phase 4 – Consolidation pratique / WBL	Lorsque cela est réalisable, recourir à des ateliers, à une exposition supervisée sur le terrain, au mentorat par l'industrie ou à des projets appliqués pour consolider les compétences.
Phase 5 – Évaluation et retour d'expérience	Rassembler les éléments probants des modules, recueillir le retour d'expérience des apprenants et des formateurs et identifier les lacunes ou les révisions nécessaires.
Phase 6 – Alignement sur la certification / reporting	Appliquer les procédures de certification approuvées du WP4 lorsqu'elles seront disponibles et conserver les éléments probants requis pour le reporting du projet et l'assurance qualité.

11.2 Articulation entre le curriculum et les supports de cours détaillés

Curriculum / lignes directrices (le présent document)	Supports pédagogiques Solaire détaillés (D3.3)
Définit la finalité du programme, les niveaux, la séquence des modules, les heures et les acquis d'apprentissage.	Fournit les explications techniques complètes, les figures, les équations, les exemples et le contenu d'enseignement détaillé.
Définit les domaines de compétences et les éléments probants attendus.	Fournit la matière permettant de construire la compréhension et la pratique des apprenants.
Définit les principes de dispensation, de formation pratique, d'évaluation, de sécurité et d'assurance qualité.	Fournit le contenu propre à chaque module, que les formateurs adaptent en séances, ressources numériques et activités.
Garantit la cohérence et la progression du niveau Base au niveau Avancé.	Soutient la mise en œuvre mais ne doit pas modifier de manière autonome les acquis approuvés du curriculum ni la structure des modules.

11.3 Gestion documentaire et gestion des versions

- Conserver la version DOCX de référence approuvée et la copie PDF de soumission dans le référentiel de projet partagé PRISTINE VET, avec des noms de fichiers clairement versionnés.
- Utiliser la version PDF comme copie de soumission et de diffusion à mise en page figée, et conserver le fichier DOCX comme version de référence modifiable et maîtrisée.
- Archiver les versions remplacées afin que seuls les fichiers approuvés en vigueur restent actifs pour la dispensation et le reporting.
- Maintenir sur les versions officielles et publiques les éléments de visibilité de l'UE requis, la mention de financement et la clause de non-responsabilité.
- Conserver les enregistrements relatifs au curriculum, à la dispensation, à l'évaluation, au retour d'expérience et à l'approbation, conformément aux exigences d'archivage du projet.

CURRICULUM ET LIGNES DIRECTRICES POUR LA FORMATION AUX SOLUTIONS D'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Volet Énergie éolienne du livrable D3.1

**PRISTINE VET – Renforcement des capacités Erasmus+ dans l'enseignement et la formation
professionnels**

Lot de travaux 3 : Élaboration des contenus de formation et apprentissage

Bénéficiaire chef de file **NOWOCERT LIMITED (NWC)**

Acronyme du projet PRISTINE VET

Mois d'échéance M8

Niveau de diffusion PUBLIC

Version **1.0**

Date Août 2026

Contrôle du document

Référence du livrable	D3.1
Titre du livrable	Curriculum et lignes directrices pour la formation aux solutions d'énergie solaire, éolienne et biomasse
Volet technologique	Solutions d'énergie éolienne
Lot de travaux	WP3 – Élaboration des contenus de formation et apprentissage
Bénéficiaire chef de file / partenaire responsable	NOWOCERT LIMITED (NWC)
Partenaires contributeurs du WP3	UNIN, AAMUSTED et ITU (élaboration des contenus et expérimentation)
Début du projet / durée	01 janvier 2026 / 24 mois
Mois d'échéance	M8
Niveau de diffusion	PUBLIC
Type de document	Curriculum et lignes directrices de mise en œuvre de la formation
Version / date	v1.0 / août 2026

Historique des révisions

Version	Date	Statut	Description
1.0	Août 2026	Version finale pour soumission	Version finale du curriculum et des lignes directrices de formation Énergie éolienne, intégrant les plans de cours détaillés de W1-01 à W2-07.

Statut du document

Le présent document constitue le volet Énergie éolienne du livrable D3.1 ; il fournit le curriculum de référence et le guide de mise en œuvre du programme de formation Énergie éolienne de PRISTINE VET. Les supports pédagogiques et d'apprentissage détaillés sont gérés séparément au sein du paquet de formation Éolien.

Structure du programme

Le programme Énergie éolienne comprend 12 modules – 5 de niveau Base et 7 de niveau Avancé – pour un temps d'apprentissage total recommandé de 43,5 heures. La séquence des modules et les durées figurant à la section 3.3 constituent le calendrier de référence de ce curriculum.

Table des matières

Résumé exécutif

1. Contexte du projet et du curriculum

2. Finalité, périmètre et principes de conception

3. Profil et structure du programme

4. Acquis d'apprentissage du programme et référentiel de compétences

5. Plans de cours détaillés et spécifications des modules

W1-01 Histoire et introduction à l'énergie éolienne

W1-02 Règles aérodynamiques fondamentales dans la conversion d'énergie éolienne et la conception des parcs

W1-03 Structure mécanique et mécanismes des éoliennes – Partie I

W1-04 Structure électrique des éoliennes – Partie I

W1-05 Électronique de puissance dans la production d'énergie éolienne

W2-01 Introduction aux mécanismes avancés des éoliennes

W2-02 Structure mécanique et mécanismes des éoliennes – Partie II

W2-03 Structure électrique des éoliennes – Partie II

W2-04 Mécanismes de commande des éoliennes et leurs règles

W2-05 Technologies d'électronique de puissance dans les éoliennes – Niveau avancé

W2-06 Planification et implantation des parcs de production d'énergie éolienne

W2-07 Programme de maintenance des parcs et des éoliennes

6. Lignes directrices d'enseignement, d'apprentissage et de formation pratique

7. Évaluation et alignement sur la certification

8. Ressources de formation, santé et sécurité, environnement et inclusion

9. Lignes directrices pour les formateurs et les apprenants

10. Assurance qualité, suivi et révision du curriculum

11. Mise en œuvre, contrôle documentaire et articulation avec les supports pédagogiques

Acronymes et abréviations

Acronyme	Signification
AEP	Production annuelle d'énergie
CAPEX	Dépenses d'investissement
CFD	Mécanique des fluides numérique
DFIG	Génératrice asynchrone à double alimentation
EACEA	Agence exécutive européenne pour l'éducation et la culture
FRT	Tenue aux défauts du réseau
HMI	Interface homme-machine
HV	Haute tension
LCOE	Coût actualisé de l'énergie
LOTO	Consignation / déconsignation
LVRT	Tenue aux creux de tension
NWC	NOWOCERT LIMITED
O&M	Exploitation et maintenance
PANER	Plan d'action national stratégique pour les énergies renouvelables
PE	Électronique de puissance
PMSG	Génératrice synchrone à aimants permanents
PPE	Équipements de protection individuelle
PWM	Modulation de largeur d'impulsion

Acronyme	Signification
SCADA	Contrôle-commande et acquisition de données
VET	Enseignement et formation professionnels
WBL	Apprentissage en milieu professionnel
WP	Lot de travaux
WRA	Évaluation du gisement éolien

Résumé exécutif

PRISTINE VET est une initiative Erasmus+ de renforcement des capacités dans le domaine de la formation professionnelle (VET), d'une durée de 24 mois, qui vise à moderniser la formation professionnelle aux énergies renouvelables en Afrique de l'Ouest par des curricula alignés sur les besoins de l'industrie, une formation technique pratique, l'apprentissage numérique, le développement de la certification, une coopération renforcée entre l'industrie et le monde académique et une participation inclusive. Le WP3 est piloté par NOWOCERT LIMITED et couvre la conception et l'élaboration de contenus de formation actualisés pour les solutions d'énergie solaire, éolienne, biomasse et hydrogène.

Le présent document, Curriculum et lignes directrices de formation Énergie éolienne, définit la structure de référence du programme de formation Énergie éolienne. Il traduit les supports de cours Éolien de niveau Base et Avancé disponibles en un curriculum VET cohérent et fondé sur les compétences, et précise les objectifs du programme, les acquis d'apprentissage, le séquençage des modules, la méthodologie de dispensation, les orientations de formation pratique, les approches d'évaluation, les attentes envers les formateurs et les apprenants, les besoins en ressources, les dispositions de sécurité, l'assurance qualité et les mécanismes de révision du curriculum.

Le curriculum comprend 12 modules : cinq modules de niveau Base et sept modules de niveau Avancé. Le niveau Base établit une compréhension fondamentale du développement de l'énergie éolienne, des caractéristiques de la ressource, de l'aérodynamique, des systèmes mécaniques, des systèmes électriques et de l'électronique de puissance. Le niveau Avancé intègre ces fondations dans une analyse au niveau système, les mécanismes de chaîne cinématique et d'actionneurs, la performance électrique avancée, la commande et le SCADA, les technologies de convertisseurs, la planification des parcs éoliens, l'intégration au réseau, l'installation, la mise en service, l'exploitation-maintenance, la recherche de pannes, la sécurité et la performance sur le cycle de vie.

Le temps d'apprentissage total recommandé est de 43,5 heures. La dispensation suit un modèle VET hybride associant apprentissage en ligne et enseignement en salle à des exercices techniques, des simulations, des études de cas, des travaux pratiques, des démonstrations et, lorsque les capacités des partenaires le permettent, un apprentissage en milieu professionnel ou une exposition supervisée sur le terrain. L'évaluation est alignée sur les acquis d'apprentissage des modules et recourt à des quiz, des exercices techniques, des analyses d'études de cas, des tâches d'évaluation de systèmes et des scénarios pratiques de recherche de pannes. Les seuils de certification finale et les règles formelles de qualification devront être alignés sur le référentiel de certification fondé sur les compétences élaboré dans le cadre du WP4.

Principe du curriculum

Le curriculum définit ce qui doit être appris, les compétences à développer, la manière dont l'apprentissage est organisé et dispensé, ainsi que la manière dont les acquis sont attestés. Les supports pédagogiques détaillés du D3.5 fournissent le contenu d'enseignement permettant de mettre en œuvre ce curriculum.

1. Contexte du projet et du curriculum

1.1 Contexte de PRISTINE VET

Le projet PRISTINE VET répond au déficit de compétences dans les énergies vertes en Afrique de l'Ouest en renforçant la collaboration entre les établissements VET, l'industrie et les parties prenantes publiques, en modernisant les curricula et en élargissant l'accès à l'apprentissage pratique et numérique. Le projet accorde une attention particulière aux compétences vertes, à l'employabilité, à la pertinence pour le secteur privé, à l'inclusion de genre et à la participation des groupes sous-représentés.

Le WP3 – Élaboration des contenus de formation et apprentissage – vise à moderniser les curricula VET des énergies renouvelables au moyen de contenus actualisés et alignés sur les besoins de l'industrie pour le solaire, l'éolien, la biomasse et l'hydrogène. Le manuel du projet prévoit une conception du curriculum fondée sur des consultations des parties prenantes afin de définir les modules, les compétences et les lignes directrices, suivie de l'élaboration des supports de formation, des ressources numériques et des outils d'évaluation, de l'adaptation linguistique et de l'expérimentation des cours avec les formateurs et les partenaires VET ouest-africains.

1.2 Positionnement du livrable

Production du WP3	Finalité	Lien avec l'Énergie éolienne
D3.1	Curriculum et lignes directrices pour la formation aux solutions d'énergie solaire, éolienne et biomasse	Le présent document constitue le volet Énergie éolienne : architecture du programme, compétences, lignes directrices de dispensation et de mise en œuvre.
D3.5	Supports pédagogiques pour la formation aux solutions d'énergie éolienne, en anglais et en français	Contenus de cours détaillés et supports pédagogiques utilisés par les formateurs et les apprenants pour mettre en œuvre ce curriculum.
D3.6	Rapport sur l'organisation des cours de formation (formateurs) pour les solutions d'énergie éolienne	Éléments probants relatifs à l'organisation des cours de formateurs, à l'expérimentation, au retour d'expérience et à l'amélioration à la suite de l'élaboration du curriculum et des supports.

1.3 Exigences du projet couvertes par le curriculum

Exigence du projet	Réponse du curriculum
Curriculum fondé sur les compétences et aligné sur les besoins de l'industrie	Acquis d'apprentissage du programme, domaines de compétences, spécifications des modules et éléments probants orientés vers le milieu professionnel.
Au moins 10 cours en ligne par spécialité	Les 12 modules Éolien sont structurés et séquencés ; 43,5 heures au total.
Conception du curriculum éclairée par les parties prenantes	La contextualisation locale et une revue structurée par les établissements VET, les entreprises et les autorités sont intégrées à la mise en œuvre et à l'assurance qualité.
Formation technique pratique	Des travaux pratiques, des simulations, des exercices de recherche de pannes, des cas d'exploitation-maintenance et d'installation/mise en service ainsi que des orientations relatives au WBL sont intégrés.
Apprentissage numérique	La dispensation hybride, de courtes séquences numériques, des schémas, des simulations, des quiz, des jeux de données numériques et un apprentissage orienté SCADA sont inclus.
Accessibilité en anglais/français et en langues locales	Le curriculum permet l'adaptation des supports d'apprentissage dans les langues du projet et, si nécessaire, dans les langues locales.
Expérimentation des cours et retour d'expérience	La dispensation pilote, le retour d'expérience des formateurs et des partenaires, celui des apprenants et la révision maîtrisée du curriculum sont intégrés au cycle d'assurance qualité.
Inclusion et intégration de la dimension de genre	La participation dans des conditions d'égalité des chances, la non-discrimination et une dispensation de la formation sensible à la dimension de genre sont explicitement prévues.
Visibilité de l'UE et conformité du projet	Des orientations relatives à la maîtrise documentaire, à la mention de visibilité, à l'archivage, à la protection des données et à la gestion des versions sont intégrées.

2. Finalité, périmètre et principes de conception

2.1 Finalité

Le présent document a pour finalité de fournir un cadre unique et cohérent de curriculum et de mise en œuvre pour la formation à l'énergie éolienne dans le cadre de PRISTINE VET. Il s'adresse aux prestataires VET, aux formateurs, aux experts techniques, aux responsables de curricula et aux partenaires du projet chargés de planifier, de dispenser, d'évaluer, d'assurer la qualité et d'actualiser la formation à l'énergie éolienne.

2.2 Périmètre

Le curriculum couvre les connaissances et compétences fondamentales et avancées de l'énergie éolienne : ressources éoliennes et conversion d'énergie ; aérodynamique des éoliennes ; systèmes mécaniques et électriques ; électronique de puissance ; commande et SCADA ; raccordement au réseau et qualité de l'énergie ; planification des parcs éoliens et évaluation du gisement ; installation et mise en service ; exploitation et suivi des performances ; maintenance et recherche de pannes ; sécurité ; considérations environnementales ; et principes de développement de projet.

Le présent document ne remplace pas les supports pédagogiques détaillés. Les formateurs doivent utiliser les supports de cours W1/W2 correspondants pour les explications techniques complètes, les illustrations, les équations, les exemples et le contenu d'enseignement propre à chaque sujet.

2.3 Principes de conception du curriculum

Principe	Application
Fondé sur les compétences	Les acquis d'apprentissage décrivent des connaissances, une analyse et une capacité pratique démontrables, et non la seule exposition à des sujets.
Progressif	Les modules de niveau Base établissent les fondations ; les modules de niveau Avancé exigent une intégration, une analyse, un diagnostic, une planification et une approche par cycle de vie.
Aligné sur l'industrie	Le contenu est organisé autour de systèmes d'éoliennes réels, du développement des parcs éoliens, de l'exploitation, de la maintenance, de l'intégration au réseau et de la fiabilité.
Orienté vers la pratique	La théorie est reliée à des calculs, des schémas, l'interprétation de données, la simulation, des scénarios de défaut et des cas de maintenance et de projet.
Hybride et outillé par le numérique	L'apprentissage en ligne et les ressources numériques sont combinés à un apprentissage encadré par un formateur et à une pratique concrète.
Adapté au contexte	Les exemples, les cas, les choix d'équipements et les modalités de mise en œuvre doivent être adaptés aux systèmes énergétiques ouest-africains et aux priorités des pays partenaires.
Inclusif	La formation doit favoriser l'égalité des chances, l'intégration de la dimension de genre et une participation accessible.
Sûr et responsable	La santé, la sécurité, la responsabilité environnementale, la protection des données et la conduite professionnelle sont intégrées à l'ensemble du dispositif.
Assuré en qualité	La dispensation, l'évaluation et les supports font l'objet de revues fondées sur le retour d'expérience des participants, l'examen par les formateurs, les contributions des parties prenantes et une gestion maîtrisée des versions.

2.4 Contextualisation locale et normes

Le noyau technique du curriculum doit rester homogène entre les établissements partenaires, tandis que la mise en œuvre doit être contextualisée en fonction des priorités pertinentes du PANER, des politiques énergétiques locales, régionales et nationales, des exigences de réseau des pays partenaires, des technologies d'éoliennes disponibles, des règles de sécurité, des infrastructures VET et des besoins du marché du travail. Les normes nationales spécifiques ou les références aux codes de réseau doivent être insérées ou actualisées par le partenaire ou le prestataire VET responsable lors de l'adaptation locale et de la revue par les parties prenantes, plutôt que présumées de manière centralisée.

3. Profil et structure du programme

3.1 Profil du programme

Intitulé du programme	Cours certifiants PRISTINE VET sur les solutions d'énergie éolienne – Curriculum et lignes directrices de formation
Structure du programme	12 modules de cours : 5 de niveau Base + 7 de niveau Avancé
Temps d'apprentissage total recommandé	43,5 heures
Modalité de dispensation	VET hybride : théorie en ligne/en salle + activités pratiques, démonstrations, simulations, études de cas et apprentissage en milieu professionnel (WBL)/exposition sur le terrain lorsque cela est réalisable
Public cible	Étudiants des établissements VET d'Afrique de l'Ouest ; techniciens des énergies renouvelables ; stagiaires et assistants techniques du secteur de l'énergie ; ingénieurs recherchant des connaissances en énergie éolienne ; professionnels intéressés par les technologies d'énergie propre

Prérequis recommandés	Mathématiques de base ; notions élémentaires d'électricité/électronique et de mécanique ; physique de base ; familiarité avec les technologies d'énergie renouvelable. Ces prérequis sont recommandés et non obligatoires.
Profil du formateur	Ingénieurs en énergies renouvelables, spécialistes de l'énergie éolienne et formateurs techniques expérimentés. Les modules de niveau Avancé doivent, selon les cas, faire intervenir des spécialistes des systèmes mécaniques, des systèmes électriques et de puissance, de l'électronique de puissance, de la commande/SCADA, de la planification des parcs éoliens et de l'exploitation-maintenance.
Niveaux du programme	Base (W1) et Avancé (W2). Il s'agit de niveaux internes au programme ; le positionnement formel en matière de qualification/accréditation doit être aligné sur le WP4 et sur les cadres nationaux applicables.
Langue/accessibilité	Curriculum de référence en anglais ; les supports d'accompagnement doivent être disponibles/adaptés en anglais et en français et, si nécessaire, dans les langues locales, conformément aux dispositions du WP3.
Base d'évaluation	Quiz alignés sur les acquis d'apprentissage, exercices techniques, analyses de cas, mini-tâches d'évaluation de systèmes, travaux pratiques et scénarios de recherche de pannes ; 5 à 10 items d'évaluation par cours/module.

3.2 Objectifs du programme

- Doter les apprenants d'une compréhension structurée de l'énergie éolienne, depuis les fondamentaux de la ressource jusqu'à l'exploitation des éoliennes et des parcs éoliens.
- Développer une compétence pratique et analytique sur les systèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques, d'électronique de puissance et de commande des éoliennes.
- Préparer les apprenants à interpréter les données d'exploitation, à identifier les défauts, à contribuer à la recherche de pannes et à participer à des activités de maintenance en sécurité.
- Développer la compétence en planification de parcs éoliens, évaluation du gisement éolien, raccordement au réseau, considérations environnementales et approche par cycle de vie du projet.
- Relier la théorie à la pratique technique réelle au moyen de simulations, d'études de cas, de travaux pratiques et de possibilités d'apprentissage en milieu professionnel.
- Soutenir les compétences vertes utiles à l'industrie et les parcours d'insertion professionnelle au sein des systèmes d'énergie renouvelable ouest-africains.
- Fournir une base curriculaire cohérente pour le développement des formateurs, l'expérimentation des cours, l'alignement sur la certification et l'actualisation future du curriculum.

3.3 Structure du programme et séquence recommandée

Code	Cours / module	Niveau	Durée
W1-01	Histoire et introduction à l'énergie éolienne	Base	3,0 h
W1-02	Règles aérodynamiques fondamentales dans la conversion d'énergie éolienne et la conception des parcs	Base	4,0 h
W1-03	Structure mécanique et mécanismes des éoliennes – Partie I	Base	4,0 h
W1-04	Structure électrique des éoliennes – Partie I	Base	3,5 h
W1-05	Électronique de puissance dans la production d'énergie éolienne	Base	2,5 h
W2-01	Introduction aux mécanismes avancés des éoliennes	Avancé	3,0 h
W2-02	Structure mécanique et mécanismes des éoliennes – Partie II	Avancé	3,0 h
W2-03	Structure électrique des éoliennes – Partie II	Avancé	4,0 h
W2-04	Mécanismes de commande des éoliennes et leurs règles	Avancé	3,0 h
W2-05	Technologies d'électronique de puissance dans les éoliennes – Niveau avancé	Avancé	3,5 h
W2-06	Planification et implantation des parcs de production d'énergie éolienne	Avancé	5,0 h
W2-07	Programme de maintenance des parcs et des éoliennes	Avancé	5,0 h

Total du niveau Base : 17,0 heures. Total du niveau Avancé : 26,5 heures. Total du programme : 43,5 heures.

3.4 Progression du niveau Base au niveau Avancé

Domaine	Attendu au niveau Base	Attendu au niveau Avancé
Ressource éolienne et contexte	Reconnaître les propriétés du vent, les applications et le rôle dans la transition énergétique.	Interpréter les implications en matière de ressource, de site, de projet et de cycle de vie.
Aérodynamique	Expliquer la puissance éolienne, la portance et la traînée, les types d'éoliennes et la performance des pales.	Appliquer la compréhension aérodynamique aux régions de fonctionnement, à la commande, à la planification et à la performance du système.
Systèmes mécaniques	Identifier les structures d'éoliennes, les composants de la chaîne cinématique et les cheminements de charge.	Analyser la transmission couple/vitesse, les multiplicateurs, les accouplements, les actionneurs, les défauts et la maintenance.
Systèmes électriques	Expliquer la production, les types de génératrices, les transformateurs, les câbles et la protection.	Analyser les défauts, la qualité de l'énergie, la protection, la tenue aux défauts (FRT/LVRT), le diagnostic et la fiabilité.
Électronique de puissance	Comprendre la conversion, les composants et la commande élémentaire.	Analyser les topologies de convertisseurs, la modulation, les puissances active et réactive, les pertes, la gestion thermique et le soutien au réseau.
Commande / SCADA	Comprendre l'interaction élémentaire entre systèmes et le contexte de commande.	Analyser la commande en boucle fermée, la commande de calage (pitch), d'orientation (yaw) et de couple, le SCADA, les alarmes, la commande coordonnée et le fonctionnement à sécurité intrinsèque.
Projets / exploitation-maintenance	Introduction par le contexte des composants et du système énergétique.	Planifier les sites et les parcs éoliens ; comprendre l'installation et la mise en service ; interpréter les indicateurs clés ; planifier la maintenance et la recherche de pannes.

4. Acquis d'apprentissage du programme et référentiel de compétences

4.1 Acquis d'apprentissage du programme

Code	Acquis d'apprentissage du programme
PLO1	Expliquer le rôle historique, environnemental et systémique de l'énergie éolienne et décrire les principales caractéristiques du gisement éolien.
PLO2	Appliquer les concepts aérodynamiques fondamentaux et les relations de puissance éolienne pour expliquer la performance des éoliennes, les limites de fonctionnement et les arbitrages de conception.
PLO3	Identifier et expliquer les structures mécaniques des éoliennes, les composants de la chaîne cinématique, les cheminements de charge, le freinage, l'orientation et les mécanismes d'actionnement.
PLO4	Expliquer la conversion d'énergie électrique, les configurations de génératrices, l'infrastructure électrique, la protection et les interfaces d'électronique de puissance.
PLO5	Analyser la commande des éoliennes, l'instrumentation, le SCADA, la commande par électronique de puissance, le raccordement au réseau et les exigences de qualité de l'énergie.
PLO6	Reconnaître et analyser les défauts courants mécaniques, électriques, de commande et de convertisseurs et sélectionner les approches appropriées de surveillance ou de recherche de pannes.
PLO7	Interpréter les informations élémentaires de gisement éolien, de site, d'implantation, de réseau, d'environnement et d'économie pour la planification et la faisabilité d'un parc éolien.
PLO8	Décrire et soutenir les principales activités d'installation, de mise en service, d'exploitation et de suivi des performances des systèmes d'énergie éolienne.
PLO9	Différencier les approches de maintenance préventive, corrective et prédictive et contribuer à la planification de la maintenance et à la fiabilité sur le cycle de vie.
PLO10	Appliquer les principes appropriés de santé, de sécurité, d'environnement et de maîtrise des risques à la formation et aux activités techniques liées à l'énergie éolienne.

Code	Acquis d'apprentissage du programme
PLO11	Utiliser des schémas techniques, des simulations, des jeux de données, des informations de surveillance et des outils d'apprentissage numérique pour résoudre des problèmes structurés d'énergie éolienne.
PLO12	Communiquer des résultats techniques, travailler en collaboration et faire preuve de responsabilité professionnelle dans des contextes d'apprentissage VET et orientés vers l'industrie.

4.2 Domaines de compétences

Code	Domaine de compétences	Périmètre
C1	Ressource éolienne, fondamentaux énergétiques et contexte sectoriel	Formation et caractéristiques du vent, rôle de l'énergie éolienne, interprétation de la ressource, contexte terrestre et en mer.
C2	Aérodynamique et performance des éoliennes	Conversion d'énergie, portance et traînée, coefficient de puissance, types d'éoliennes, régions de fonctionnement, effets de pale et de sillage.
C3	Systèmes mécaniques et chaîne cinématique	Rotor, nacelle, mât, arbres, roulements, multiplicateurs, accouplements, freinage, mécanismes d'orientation et de calage et charges structurales.
C4	Systèmes électriques et électronique de puissance	Génératrices, conversion, transformateurs, câbles, appareillages, protection, composants et topologies de convertisseurs.
C5	Commande, SCADA, intégration au réseau et qualité de l'énergie	Capteurs, contrôleurs, actionneurs, commande de calage (pitch), d'orientation (yaw) et de couple, SCADA, synchronisation, qualité de l'énergie et soutien au réseau.
C6	Planification, installation et mise en service des parcs éoliens	Évaluation du gisement éolien (WRA), choix de site, micro-implantation, raccordement au réseau, autorisations, cycle de vie du projet, installation et mise en service.
C7	Exploitation, maintenance, diagnostic et performance	Modes de fonctionnement, indicateurs clés, surveillance de l'état, stratégies de maintenance, défauts, recherche de pannes et fiabilité sur le cycle de vie.
C8	Sécurité, durabilité et pratique professionnelle	PPE, LOTO, travail en hauteur, sécurité électrique et des équipements tournants, considérations environnementales et sociales, inclusion et conduite professionnelle.

4.3 Correspondance entre modules et compétences

Module	Domaines de compétences principaux	Accent mis sur
W1-01	C1, C8	Compréhension fondamentale du secteur et de la ressource et contexte de durabilité
W1-02	C1, C2	Fondamentaux aérodynamiques, performance et conception
W1-03	C2, C3, C8	Structure mécanique, cheminements de charge et conception en sécurité
W1-04	C4, C5, C8	Conversion électrique, protection et conception intégrant les contraintes de réseau
W1-05	C4, C5	Conversion de puissance et concepts élémentaires de commande et d'interface
W2-01	C2-C7	Approche systémique intégrée couvrant le cycle de vie de l'éolienne et du parc éolien
W2-02	C3, C7, C8	Chaîne cinématique avancée, actionneurs, fiabilité et maintenance
W2-03	C4, C5, C7, C8	Défauts électriques, qualité de l'énergie, conformité au réseau et diagnostic
W2-04	C5, C7, C8	Commande, SCADA, fonctionnement coordonné et réponse à sécurité intrinsèque
W2-05	C4, C5, C7	Convertisseurs avancés, commande, soutien au réseau, pertes et fiabilité
W2-06	C1, C6, C8	Évaluation de la ressource et du site, planification de projet, intégration au réseau et à l'environnement
W2-07	C3-C8	Installation, mise en service, exploitation, maintenance, recherche de pannes, sécurité et performance

5. Plans de cours détaillés et spécifications des modules

Les 12 plans de cours suivants définissent les acquis d'apprentissage, la séquence d'enseignement, les activités appliquées, l'approche d'évaluation et la progression de chaque module Énergie éolienne. Ces plans constituent la feuille de route de dispensation au niveau du curriculum ; les supports de cours détaillés fournissent l'intégralité du contenu d'enseignement technique.

5.1 W1-01 – Histoire et introduction à l'énergie éolienne

Code du cours	W1-01
Niveau	Base
Durée recommandée	3,0 heures
Description du cours	Établir une base commune sur l'évolution, les caractéristiques de la ressource, les applications et le rôle stratégique de l'énergie éolienne avant que les apprenants n'abordent les sujets d'ingénierie des éoliennes.

Acquis d'apprentissage

- Décrire le développement historique de l'énergie éolienne, des moulins à vent traditionnels aux éoliennes modernes à l'échelle du réseau.
- Expliquer comment les mouvements atmosphériques créent le vent en tant que ressource énergétique exploitable.
- Identifier la vitesse du vent, sa direction, sa variabilité et la masse volumique de l'air, et expliquer leur effet sur la production d'énergie.
- Distinguer les applications éoliennes terrestres et en mer et leur rôle dans les systèmes électriques.
- Analyser les grandes tendances de l'énergie éolienne et reconnaître les défis techniques, environnementaux et économiques actuels.
- Évaluer la contribution de l'énergie éolienne à la décarbonation, à la sécurité énergétique et à des systèmes électriques durables.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Développement historique de l'énergie éolienne	Usages traditionnels du vent ; passage des moulins mécaniques aux éoliennes productrices d'électricité ; grandes étapes technologiques et essor de l'éolien moderne.
2. Le vent en tant que ressource énergétique	Mouvements atmosphériques et énergie cinétique ; vitesse, direction et variabilité du vent et masse volumique de l'air ; implications pour la production d'énergie et le choix de site.
3. L'énergie éolienne dans les systèmes électriques modernes	Rôle dans la production d'électricité ; applications centralisées et décentralisées ; systèmes éoliens terrestres et en mer.
4. Énergie éolienne et transition vers une énergie propre	Décarbonation, sécurité énergétique, accès à l'électricité renouvelable, avantages et limites de l'énergie éolienne.
5. Défis et perspectives d'avenir	Intermittence, choix de site, intégration au réseau, considérations environnementales et économiques ; innovation technologique, surveillance numérique et perspectives de développement.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Interpréter un jeu de données simple sur les propriétés du vent et en discuter les implications pour la production d'énergie.
- Comparer une application éolienne terrestre et une application en mer à l'aide d'un court modèle d'étude de cas.
- Cartographier les opportunités et les défis techniques, environnementaux et économiques d'une application éolienne ouest-africaine.

Approche d'évaluation

- Quiz de connaissances, complété par une courte étude de cas ou une tâche de comparaison structurée.

Progression et articulation

- Fournit le contexte et les notions de ressource nécessaires au module W1-02 et, ultérieurement, à la planification des parcs éoliens du W2-06.

5.2 W1-02 – Règles aérodynamiques fondamentales dans la conversion d'énergie éolienne et la conception des parcs

Code du cours	W1-02
Niveau	Base
Durée recommandée	4,0 heures
Description du cours	Développer la compréhension aérodynamique nécessaire pour expliquer comment les éoliennes captent l'énergie, comment les pales et les conditions de fonctionnement influent sur la performance, et pourquoi la conception des éoliennes et des parcs doit gérer des arbitrages aérodynamiques.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer les principes aérodynamiques qui sous-tendent la conversion d'énergie éolienne.
- Appliquer la relation fondamentale de puissance éolienne et interpréter l'influence de la masse volumique de l'air, de la surface balayée et de la vitesse du vent.
- Expliquer la portance, la traînée, le comportement des profils, l'angle d'attaque, le décrochage, la vitesse spécifique et le coefficient de puissance.
- Analyser l'influence de l'aérodynamique sur la conception des pales, du rotor et de l'éolienne et sur les limites de fonctionnement.
- Comparer les principaux types d'éoliennes et reconnaître les effets de sillage, de terrain et d'espacement.
- Identifier les arbitrages entre rendement aérodynamique, sollicitation structurale, durabilité et fonctionnement en sécurité.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Introduction à l'aérodynamique éolienne	Rôle de l'aérodynamique dans la chaîne de conversion d'énergie éolienne ; chaîne vent-rotor-génératrice ; concepts d'éoliennes à axe horizontal, à axe vertical et de petit éolien.
2. Principes de conversion de l'énergie éolienne	Énergie cinétique du vent ; relation fondamentale de puissance éolienne ; masse volumique de l'air, surface balayée et vitesse du vent ; coefficient de puissance ; limite de Betz ; courbe de puissance de l'éolienne et régions de fonctionnement.
3. Forces aérodynamiques fondamentales	Portance et traînée ; forme du profil et répartition des pressions ; angle d'attaque ; comportement au décrochage et pertinence pour le fonctionnement de l'éolienne.
4. Aérodynamique du rotor	Conception et géométrie des pales ; vitesse spécifique ; surface balayée par le rotor ; relation entre la vitesse spécifique, la captation d'énergie et le rendement de l'éolienne.
5. Mécanismes de régulation aérodynamique	Régulation par calage (pitch) ; concepts de décrochage et de décrochage actif ; régulation d'orientation (yaw) et alignement sur le vent ; influence sur un fonctionnement sûr et efficace.
6. Interaction entre aérodynamique et conception structurale	Charges aérodynamiques sur les pales et le mât ; fatigue et charges extrêmes ; arbitrages entre rendement, intégrité structurale, durabilité et sécurité.
7. Aérodynamique des parcs éoliens	Effets de sillage et pertes d'énergie ; espacement des éoliennes ; influence du terrain et de l'atmosphère sur la performance du parc.
8. Optimisation de la conception et rendement	Maximisation de la captation d'énergie ; réduction des pertes aérodynamiques et mécaniques ; notions introductives de simulation et de mécanique des fluides numérique (CFD) pour l'évaluation de la conception.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Calculer et comparer la puissance éolienne disponible à différentes vitesses de vent à l'aide des équations du cours.
- Interpréter une courbe de puissance d'éolienne et identifier les régions de démarrage, de puissance nominale et d'arrêt.

- Utiliser un exercice d'implantation simplifié pour discuter des effets de sillage et d'espacement.

Approche d'évaluation

- Quiz complété par un exercice technique de calcul/d'interprétation et une courte tâche d'arbitrage de conception.

Progression et articulation

- Soutient la compréhension mécanique du W1-03 ainsi que la commande avancée, la planification et l'analyse de performance des modules W2.

5.3 W1-03 – Structure mécanique et mécanismes des éoliennes – Partie I

Code du cours	W1-03
Niveau	Base
Durée recommandée	4,0 heures
Description du cours	Présenter la structure physique d'une éolienne et expliquer comment les composants mécaniques soutiennent la captation d'énergie, la transmission du couple, la maîtrise des charges, la sécurité de fonctionnement et la fiabilité à long terme.

Acquis d'apprentissage

- Identifier le rotor, la nacelle, la chaîne cinématique, le mât, le moyeu, l'arbre, les roulements, le multiplicateur, le système de freinage et le système d'orientation.
- Expliquer la fonction des principaux sous-systèmes mécaniques et leur interaction avec les systèmes aérodynamiques et électriques.
- Décrire l'agencement mécanique d'une éolienne à axe horizontal, du rotor jusqu'à l'interface avec la génératrice.
- Retracer les charges mécaniques et structurales depuis les pales et le moyeu jusqu'à la chaîne cinématique, la nacelle, le mât et la fondation.
- Reconnaître les considérations de conception, notamment la résistance, la fatigue, les vibrations, la protection contre la corrosion, la sécurité, la fiabilité et l'accès pour la maintenance.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Introduction aux systèmes mécaniques d'une éolienne	Structure globale d'une éolienne ; interaction entre les systèmes aérodynamiques, mécaniques et électriques ; importance de la conception mécanique pour la performance et la fiabilité.
2. Principales sections structurales	Rotor, nacelle, mât et interface avec la fondation ; fonctions de support structural et agencement du système.
3. Composants du rotor	Pales, moyeu et cône avant (spinner) ; rôles mécaniques, fixation des pales et fonctions de transfert des charges.
4. Composants de la chaîne cinématique	Arbre principal, roulements, multiplicateur et accouplements ; transmission du couple du rotor, conversion de vitesse, réduction des frottements et liaison mécanique.
5. Freinage et mécanismes liés à la sécurité	Frein mécanique, systèmes de verrouillage du rotor et concepts d'arrêt d'urgence.
6. Mécanismes d'orientation	Finalité du système d'orientation ; couronne, entraînements et moteurs d'orientation ; alignement de l'éolienne sur la direction du vent.
7. Nacelle et structure porteuse	Châssis/embase de la nacelle ; montage des composants de la chaîne cinématique ; répartition des charges et rigidité structurale.
8. Le mât en tant que structure mécanique	Finalité et types de mâts ; support de l'ensemble nacelle-rotor ; principales charges mécaniques appliquées au mât.
9. Cheminement des charges mécaniques	Transfert des charges des pales vers le moyeu, l'arbre et les roulements ; cheminements nacelle-mât et mât-fondation.
10. Considérations de conception mécanique	Charges statiques et dynamiques ; fatigue, vibrations et corrosion ; fiabilité, accès pour la maintenance, sécurité et durabilité en exploitation.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Légender un schéma en coupe/de composants d'une éolienne et expliquer la fonction de chaque élément.
- Retracer un cheminement de charge aérodynamique de la pale jusqu'à la fondation.
- Examiner un scénario simple de défaut mécanique et identifier les composants concernés et les points d'inspection.

Approche d'évaluation

- Quiz d'identification de composants, complété par une tâche d'explication du cheminement des charges/du système et un exercice pratique sur schéma.

Progression et articulation

- Fournit les bases nécessaires à l'analyse avancée de la chaîne cinématique, du multiplicateur, des accouplements et des actionneurs du W2-02.

5.4 W1-04 – Structure électrique des éoliennes – Partie I

Code du cours	W1-04
Niveau	Base
Durée recommandée	3,5 heures
Description du cours	Acquérir les compétences fondamentales en conversion d'énergie électrique, en configurations de génératrices et sur l'infrastructure électrique qui relie une éolienne au réseau ou à une charge locale.

Acquis d'apprentissage

- Identifier les génératrices, convertisseurs, transformateurs, câbles, appareillages, systèmes de protection et unités de commande.
- Expliquer l'induction électromagnétique et la conversion de la rotation mécanique en énergie électrique.
- Distinguer les configurations de génératrices synchrones, asynchrones (à induction), DFIG et à aimants permanents.
- Retracer le flux d'énergie électrique de la génératrice jusqu'à une sortie compatible avec le réseau.
- Expliquer l'importance de la tension, du courant, de la fréquence, de l'électronique de puissance, de la protection, de l'isolement, du refroidissement et de la fiabilité.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Introduction aux systèmes électriques des éoliennes	Architecture du sous-système électrique ; interaction avec les systèmes mécaniques et de commande ; rôle de la conception électrique dans la production d'énergie.
2. Fondamentaux de la production d'électricité	Électromagnétisme, flux magnétique et induction de Faraday ; conversion de la rotation mécanique en énergie électrique.
3. Génératrices d'éoliennes	Génératrices asynchrones (à induction) et synchrones ; caractéristiques de vitesse, de couple et de rendement.
4. Configurations courantes de génératrices	Systèmes DFIG et PMSG ; configurations avec multiplicateur et à entraînement direct ; avantages et limites.
5. Caractéristiques de la puissance électrique	Tension, courant et fréquence ; notions AC/DC ; synchronisation élémentaire et exigences de compatibilité avec le réseau.
6. Bases de la conversion de puissance	Nécessité des convertisseurs et des onduleurs ; rôle de l'électronique de puissance dans le fonctionnement des éoliennes à vitesse variable.
7. Infrastructure électrique et protection	Transformateurs, câbles, appareillages et mise à la terre ; notions de protection contre les surintensités et les défauts ; chaîne énergétique de la génératrice au réseau.
8. Refroidissement et isolement	Gestion thermique des génératrices et des convertisseurs ; exigences d'isolement ; effet sur la fiabilité et la durée de service.
9. Fonctionnement à vitesse fixe et à vitesse variable	Différences d'exploitation ; incidence sur la captation d'énergie, la production électrique et la compatibilité avec le réseau.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Retracer la chaîne d'énergie électrique sur un schéma-bloc d'éolienne.
- Comparer les configurations de génératrices au regard d'un petit ensemble de critères de fonctionnement.
- Traiter un scénario élémentaire de protection contre les surintensités ou de mise à la terre.

Approche d'évaluation

- Quiz complété par des exercices de comparaison de génératrices et de chaîne électrique/de protection.

Progression et articulation

- Fournit les bases électriques nécessaires au W1-05 ainsi qu'aux défauts électriques avancés et à l'intégration au réseau du W2-03.

5.5 W1-05 – Électronique de puissance dans la production d'énergie éolienne

Code du cours	W1-05
Niveau	Base
Durée recommandée	2,5 heures
Description du cours	Présenter les dispositifs d'électronique de puissance et les étages de conversion qui permettent une conversion d'énergie éolienne à vitesse variable et pilotable ainsi qu'une production électrique compatible avec le réseau.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer le rôle de l'électronique de puissance dans la conversion d'énergie, la commande de puissance et le raccordement au réseau.
- Identifier les redresseurs, onduleurs, convertisseurs, composants de commutation et éléments du bus DC, et expliquer leurs fonctions.
- Décrire la conversion AC-DC-AC et l'interface de flux d'énergie entre la génératrice et le réseau.
- Expliquer les notions élémentaires de commutation/modulation, de régulation de tension et de régulation de fréquence.
- Reconnaître les architectures d'éoliennes courantes utilisant des interfaces d'électronique de puissance partielles ou totales.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Introduction à l'électronique de puissance en énergie éolienne	Définition et rôle de l'électronique de puissance ; pourquoi la conversion électronique est essentielle pour les éoliennes modernes à vitesse variable et pour le raccordement au réseau.
2. Conversion élémentaire d'énergie électrique	Fondamentaux AC et DC ; redressement AC-DC ; ondulation DC-AC ; flux d'énergie de la génératrice au réseau.
3. Principaux composants d'électronique de puissance	Diodes, redresseurs, onduleurs, composants de commutation, convertisseurs de puissance et condensateurs/inductances de bus DC.
4. Architectures de conversion de puissance dans les éoliennes	Interface génératrice-réseau ; contexte à vitesse fixe et à vitesse variable ; introduction aux systèmes DFIG et à convertisseur pleine puissance.
5. Notions élémentaires de commande	Principes de commutation ; introduction à la modulation de largeur d'impulsion (PWM) ; régulation conceptuelle de la tension et de la fréquence.
6. Rôle pratique dans le fonctionnement de l'éolienne	Régulation de puissance, compatibilité avec le réseau, rendement et amélioration des performances.
7. Introduction aux concepts avancés	Pertes et rendement ; refroidissement et considérations thermiques ; fonctions élémentaires de soutien au réseau, convertisseurs intelligents et tendances futures.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Construire ou annoter un schéma-bloc de conversion AC-DC-AC.

- Associer les composants d'électronique de puissance à leurs fonctions et aux enjeux typiques de défaillance et de comportement thermique.
- Comparer les architectures électriques élémentaires d'éoliennes à l'aide d'une fiche structurée.

Approche d'évaluation

- Quiz de connaissances, complété par des exercices de schéma-bloc et de fonctions des composants.

Progression et articulation

- Prépare les apprenants aux topologies de convertisseurs, à la modulation avancée, au soutien au réseau et à la fiabilité du W2-05.

5.6 W2-01 – Introduction aux mécanismes avancés des éoliennes

Code du cours	W2-01
Niveau	Avancé
Durée recommandée	3,0 heures
Description du cours	Faire passer les apprenants d'une connaissance au niveau des composants à une vision système intégrée du cycle de vie de l'éolienne et du parc éolien, en établissant la feuille de route des modules de niveau Avancé.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer pourquoi l'étude avancée des éoliennes exige l'intégration des systèmes mécaniques, électriques, de commande et d'électronique de puissance.
- Décrire comment la performance, la sécurité, la fiabilité, la planification et la maintenance interagissent tout au long du cycle de vie de l'éolienne.
- Relier les séances avancées de mécanique, d'électricité, de commande, d'électronique de puissance, de planification et de maintenance en un parcours cohérent de gestion de l'énergie et des actifs.
- Reconnaître comment des défauts ou des faiblesses dans un sous-système peuvent affecter la performance globale de l'éolienne.
- Expliquer la progression allant des mécanismes des composants à la performance au niveau système et à l'exploitation du parc éolien.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Introduction au programme Éolien de niveau Avancé	Vision intégrée des éoliennes modernes en tant que systèmes mécaniques, électriques, de commande et d'électronique de puissance fonctionnant dans le cycle de vie d'un parc éolien.
2. Pourquoi les mécanismes avancés sont importants	Évolution des conditions de vent et de charge ; transmission du couple, vibrations, alignement, perturbations électriques, exigences de réseau, protection, sécurité et fiabilité.
3. Parcours mécanique avancé	Feuille de route vers la chaîne cinématique, le multiplicateur, les accouplements, les mécanismes de calage et d'orientation, les actionneurs, la lubrification, le refroidissement, les vibrations et les défaillances mécaniques du W2-02.
4. Parcours électrique, commande et électronique de puissance	Feuille de route vers les défauts électriques et l'intégration au réseau du W2-03 ; la commande/SCADA du W2-04 ; les convertisseurs avancés et le soutien au réseau du W2-05.
5. Parcours de planification des parcs éoliens et de cycle de vie	Feuille de route vers l'évaluation du site et de la ressource, l'implantation et le développement de projet du W2-06 ; l'exploitation, la maintenance, le diagnostic et la fiabilité sur le cycle de vie du W2-07.
6. Articulation entre les séances et approche d'apprentissage	Progression selon la chaîne énergétique et le cycle de vie ; interactions entre sous-systèmes ; propagation des défauts ; raisonnement d'ingénierie pratique axé sur la sécurité, l'efficacité, la fiabilité et un fonctionnement compatible avec le réseau.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Élaborer une carte du système reliant les sous-systèmes aérodynamique, mécanique, électrique, de commande et de réseau.
- Analyser un court cas de propagation de défaut entre systèmes.

- Élaborer une feuille de route de l'apprenant montrant l'articulation des modules de niveau Avancé, des organes internes de l'éolienne au cycle de vie du parc éolien.

Approche d'évaluation

- Court quiz d'intégration système, complété par une tâche de cartographie du système intégré ou d'analyse de cas.

Progression et articulation

- Constitue la passerelle vers les modules W2-02 à W2-07 et doit être suivi avant les modules spécialisés de niveau Avancé.

5.7 W2-02 – Structure mécanique et mécanismes des éoliennes – Partie II

Code du cours	W2-02
Niveau	Avancé
Durée recommandée	3,0 heures
Description du cours	Approfondir la compétence mécanique par l'analyse de la transmission couple/vitesse, des systèmes de multiplicateurs, des accouplements, de l'actionnement du calage et de l'orientation, de la fiabilité, de la surveillance de l'état et de la maintenance.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer le fonctionnement avancé de la chaîne cinématique, y compris la transmission du couple et la conversion de vitesse.
- Décrire les configurations de multiplicateurs, les rapports de transmission, la lubrification, le refroidissement et les mécanismes de défaillance courants.
- Expliquer comment les accouplements contribuent à l'alignement, à la maîtrise des vibrations et à la transmission du couple.
- Décrire les mécanismes d'actionnement électriques et hydrauliques du calage et de l'orientation et leurs rôles de commande et de sécurité.
- Analyser les défauts courants et les besoins de maintenance des multiplicateurs, roulements, accouplements et actionneurs.
- Relier la surveillance de l'état et la maintenance prédictive à la fiabilité de la chaîne cinématique et à la performance sur le cycle de vie.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Vue d'ensemble avancée de la chaîne cinématique	Rappel des composants de la chaîne cinématique ; transformation du couple et de la vitesse ; flux d'énergie mécanique dans la nacelle et à l'interface avec la génératrice.
2. Systèmes de multiplicateurs	Finalité des multiplicateurs ; configurations planétaires/épicycloïdales, à arbres parallèles et hybrides ; rapports de transmission et conversion de vitesse.
3. Fiabilité des multiplicateurs et systèmes auxiliaires	Usure et piqûres des engrenages et défaillances de roulements ; lubrification et refroidissement ; fiabilité et solutions alternatives de chaîne cinématique.
4. Accouplements mécaniques	Accouplements rigides, flexibles et à amortissement de torsion ; transmission du couple, compensation des désalignements, amortissement des vibrations et critères de sélection.
5. Mécanismes de régulation du calage	Roulements de calage et entraînements de calage électriques/hydrauliques ; concepts actifs et passifs ; régulation de la puissance et fonctions de sécurité.
6. Systèmes d'actionnement de l'orientation	Moteurs et entraînements d'orientation ; freins et verrouillage d'orientation ; optimisation de l'alignement et maîtrise des charges.
7. Technologies d'actionneurs	Actionneurs hydrauliques et électriques ; principes de fonctionnement, atouts, limites et rôles dans la commande et la sécurité de l'éolienne.
8. Intégration des systèmes mécaniques et de commande	Capteurs et retour d'information ; automatisation et ajustement en temps réel ; interaction entre les mécanismes mécaniques et la commande de l'éolienne.
9. Fiabilité, maintenance et arbitrages de conception	Surveillance de l'état par analyse vibratoire et analyse d'huile ; maintenance préventive et prédictive ; arbitrages rendement-fiabilité, masse-résistance, coût-performance et maintenabilité.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Réaliser un exercice conceptuel de rapport de multiplication et de transformation de vitesse.
- Interpréter un scénario de défaut de chaîne cinématique à partir de symptômes vibratoires et de lubrification.
- Comparer les options d'actionneurs hydrauliques et électriques pour les fonctions de calage et d'orientation.

Approche d'évaluation

- Exercice technique, complété par un cas de diagnostic de défaut/de maintenance et un quiz ciblé.

Progression et articulation

- Soutient la commande avancée du W2-04 ainsi que la maintenance et la recherche de pannes du W2-07.

5.8 W2-03 – Structure électrique des éoliennes – Partie II

Code du cours	W2-03
Niveau	Avancé
Durée recommandée	4,0 heures
Description du cours	Développer la compétence sur les problèmes électriques réels d'exploitation, la qualité de l'énergie, la protection, la conformité au réseau, la surveillance et la fiabilité des éoliennes modernes.

Acquis d'apprentissage

- Analyser les défauts courants de génératrices, de convertisseurs, de câbles, de transformateurs et de systèmes de protection.
- Évaluer les harmoniques, le papillotement (flicker), les fluctuations de tension et les variations de fréquence, ainsi que leur incidence sur les équipements et les réseaux.
- Expliquer les solutions avancées faisant appel aux convertisseurs, à la commande de la puissance réactive, à la régulation de tension et au filtrage des harmoniques.
- Expliquer la synchronisation, les exigences des codes de réseau et les notions de tenue aux défauts (FRT) et de tenue aux creux de tension (LVRT).
- Utiliser les informations de surveillance, de SCADA et de diagnostic pour appuyer la détection des défauts et la planification de la maintenance.
- Évaluer les stratégies de protection et de fiabilité des systèmes électriques d'éoliennes.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Architecture avancée du système électrique	Rappel de l'architecture électrique ; complexité croissante du système ; rôle de la commande et de la surveillance avancées.
2. Problèmes électriques courants	Échauffement des génératrices, dégradation de l'isolement et courants de roulements ; défaillances de composants de convertisseurs ; défauts de câbles et de connexions ; contraintes thermiques et liées au réseau.
3. Enjeux de qualité de l'énergie	Fluctuations de tension, papillotement, harmoniques, variations de fréquence et incidences sur les équipements et le réseau.
4. Solutions d'électronique de puissance et de commande	Concepts de convertisseurs pleine puissance et dos-à-dos ; régulation de tension et de fréquence ; compensation de puissance réactive ; filtrage des harmoniques.
5. Intégration au réseau et conformité	Exigences de réseau ; synchronisation ; notions de tenue aux défauts et de tenue aux creux de tension ; contribution à une interaction stable avec le réseau.
6. Systèmes de protection électrique	Protection contre les surintensités, les courts-circuits et les défauts à la terre ; protection contre les surtensions et la foudre ; coordination des relais et fonctions des disjoncteurs.
7. Surveillance et diagnostic	SCADA, capteurs et systèmes de mesure ; surveillance thermique ; analyse des signaux électriques ; alarmes et surveillance de l'état.
8. Stratégies de maintenance et de fiabilité	Maintenance préventive et prédictive ; recherche de pannes électriques ; remplacement de composants et gestion du cycle de vie.

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
9. Cas pratiques de défauts	Scénarios réels de défaillance électrique ; analyse des causes racines ; solutions d'ingénierie et enseignements tirés.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Interpréter un scénario de défaut électrique ou d'alarme et identifier les causes probables et les vérifications à effectuer.
- Évaluer un cas de qualité de l'énergie et choisir une approche d'atténuation appropriée.
- Élaborer une séquence simple de réponse en protection et surveillance face à une condition anormale.

Approche d'évaluation

- Diagnostic électrique sur cas, exercice de qualité de l'énergie/de réseau et quiz.

Progression et articulation

- Alimente directement la commande/SCADA du W2-04, l'électronique de puissance avancée du W2-05 et l'exploitation-maintenance du W2-07.

5.9 W2-04 – Mécanismes de commande des éoliennes et leurs règles

Code du cours	W2-04
Niveau	Avancé
Durée recommandée	3,0 heures
Description du cours	Développer une compréhension au niveau système de la commande des éoliennes, de l'instrumentation, de l'actionnement, des régions de fonctionnement, du SCADA, de la commande coordonnée des parcs éoliens, de la fiabilité et de la protection à sécurité intrinsèque.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer la commande en boucle ouverte et en boucle fermée, les mécanismes de retour d'information et les objectifs de commande.
- Identifier les capteurs, contrôleurs, actionneurs et réseaux de communication utilisés dans la commande des éoliennes.
- Analyser les stratégies de commande de calage, d'orientation, de couple et de vitesse et leur effet sur la captation d'énergie et les charges.
- Expliquer la commande de l'éolienne dans les régions de démarrage, en dessous de la puissance nominale, à la puissance nominale et à l'arrêt.
- Expliquer l'architecture SCADA, la surveillance, les alarmes, l'acquisition de données et la conduite à distance.
- Évaluer la commande coordonnée dans les parcs éoliens et les micro-réseaux ainsi que les fonctions de soutien au réseau.
- Évaluer les défaillances courantes de capteurs, de communication, d'actionneurs et de commande et les réponses appropriées de diagnostic et de mise en sécurité.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Fondamentaux des systèmes de commande	Finalité de la commande des éoliennes ; architectures en boucle ouverte et en boucle fermée ; retour d'information et notions élémentaires de stabilité.
2. Composants du système de commande	Anémomètres, girouettes et capteurs d'état ; automates programmables et contrôleurs embarqués ; actionneurs de calage et d'orientation et systèmes de communication.
3. Régions de fonctionnement de l'éolienne	Régions de démarrage, en dessous de la puissance nominale, à la puissance nominale et d'arrêt ; interprétation de la courbe de puissance ; comportement au démarrage et à l'arrêt.
4. Stratégies de commande des éoliennes	Régulation par calage, par décrochage passif/actif et par orientation ; commande du couple et de la vitesse de la génératrice ; contexte du MPPT ; régulation de puissance et réduction des charges.
5. SCADA et surveillance	Architecture SCADA ; acquisition de données ; alarmes et signalement des défauts ; conduite et

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
	diagnostic à distance.
6. Commande des parcs éoliens et des micro-réseaux	Commande coordonnée des éoliennes ; lissage de puissance et équilibrage des charges ; intégration en micro-réseau et en système hybride ; soutien en fréquence et en tension.
7. Détection des défauts et recherche de pannes	Défauts de capteurs et de communication ; dysfonctionnements des actionneurs et du système de commande ; approches de diagnostic et réponse sûre aux défauts.
8. Sécurité et protection par la commande	Arrêt d'urgence, protection contre la survitesse, redondance et fonctionnement à sécurité intrinsèque.
9. Concepts de commande avancée – vue d'ensemble	Commande adaptative et prédictive ; commande numérique et intelligente ; rôle introductif de l'IA et de l'analyse de données dans la commande des éoliennes.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Tracer et expliquer une boucle de commande fermée d'une éolienne.
- Interpréter une séquence simplifiée d'alarmes et d'événements SCADA.
- Analyser un cas de défaillance de calage, d'orientation ou de capteur et proposer une réponse sûre.

Approche d'évaluation

- Exercice de schéma de système de commande, cas SCADA/de défaut et quiz de connaissances.

Progression et articulation

- S'intègre à la commande réseau/convertisseur du W2-05 et au suivi opérationnel et à la recherche de pannes du W2-07.

5.10 W2-05 – Technologies d'électronique de puissance dans les éoliennes – Niveau avancé

Code du cours	W2-05
Niveau	Avancé
Durée recommandée	3,5 heures
Description du cours	Renforcer la compétence des apprenants sur les composants et topologies de convertisseurs modernes, les méthodes de commande, le soutien au réseau, les pertes, la gestion thermique, la protection et les technologies émergentes d'électronique de puissance.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer comment l'électronique de puissance avancée permet le fonctionnement à vitesse variable, la conversion d'énergie et l'intégration au réseau.
- Identifier les composants semi-conducteurs, redresseurs, onduleurs, éléments du bus DC et éléments de filtrage, et décrire leurs fonctions.
- Analyser les structures de convertisseurs dos-à-dos, les convertisseurs partiels des systèmes DFIG et les systèmes à convertisseur pleine puissance.
- Expliquer les concepts de PWM et de commande vectorielle ainsi que la régulation des puissances active et réactive, de la tension et de la fréquence.
- Évaluer la synchronisation, les harmoniques et le papillotement, le facteur de puissance, le soutien en tension et les fonctions de tenue aux défauts.
- Évaluer les pertes par commutation et par conduction, les contraintes thermiques, le refroidissement et les exigences de protection des convertisseurs.
- Reconnaître les technologies émergentes, notamment les convertisseurs multiniveaux et les composants semi-conducteurs à large bande interdite.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
-------	----------------------------------

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Électronique de puissance avancée en énergie éolienne	Rôle de l'électronique de puissance dans les éoliennes modernes ; évolution du fonctionnement à vitesse fixe vers le fonctionnement à vitesse variable et une interface réseau flexible.
2. Fondamentaux et composants d'électronique de puissance	Conversion AC/DC et DC/AC ; principes de commutation ; diodes, IGBT, MOSFET, condensateurs et inductances.
3. Topologies de convertisseurs	Redresseurs et onduleurs ; convertisseurs dos-à-dos ; étages côté génératrice et côté réseau ; configurations PMSG à convertisseur pleine puissance et DFIG à convertisseur partiel.
4. Bus DC et chaîne de conversion d'énergie	Fonction du bus DC ; maîtrise du flux d'énergie ; stabilisation de la tension et filtrage.
5. Techniques de commande des convertisseurs	Concepts de PWM et de commande vectorielle/à vecteurs spatiaux ; commande des puissances active et réactive ; régulation de la fréquence et de la tension.
6. Intégration au réseau et qualité de l'énergie	Synchronisation au réseau ; génération et atténuation des harmoniques ; papillotement ; facteur de puissance ; soutien en tension et fonctions de tenue aux défauts et de soutien au réseau.
7. Pertes et gestion thermique	Pertes par conduction et par commutation ; optimisation du rendement ; approches de refroidissement par air et par liquide.
8. Fiabilité et protection	Modes de défaillance courants des convertisseurs ; protection contre les surtensions, les surintensités et les échauffements ; détection et atténuation des défauts.
9. Technologies avancées et émergentes	Convertisseurs multiniveaux ; composants à large bande interdite tels que le SiC et le GaN ; convertisseurs intelligents et numériques et intégration du stockage d'énergie.
10. Applications industrielles et cas	Comparaison des architectures de convertisseurs d'éoliennes et des choix technologiques ; enseignements tirés des performances en exploitation et arbitrages d'ingénierie.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Comparer les chaînes à convertisseur partiel DFIG et à convertisseur pleine puissance PMSG.
- Retracer les objectifs de commande à travers les étages de convertisseur côté génératrice et côté réseau.
- Analyser un scénario simplifié thermique/de pertes ou de protection d'un convertisseur.

Approche d'évaluation

- Comparaison de topologies de convertisseurs, cas de commande/de réseau et quiz technique.

Progression et articulation

- Soutient l'intégration avancée au réseau, la recherche de pannes électriques et la performance sur le cycle de vie des modules W2-06 et W2-07.

5.11 W2-06 – Planification et implantation des parcs de production d'énergie éolienne

Code du cours	W2-06
Niveau	Avancé
Durée recommandée	5,0 heures
Description du cours	Élargir l'apprentissage de la technologie des éoliennes au développement des parcs éoliens, en combinant évaluation de la ressource, choix de site, implantation, raccordement au réseau, exigences environnementales et réglementaires, économie et décisions de cycle de vie du projet.

Acquis d'apprentissage

- Décrire le cycle de vie de développement d'un parc éolien, de l'identification du site à la construction, à la mise en service et à l'exploitation.
- Expliquer l'évaluation du gisement éolien, la présélection par critères d'exclusion et l'évaluation préliminaire du site.
- Analyser la faisabilité technique et économique à partir des données de vent, des considérations de productible, des effets de sillage, des contraintes de site et de la viabilité du projet.
- Évaluer la topographie, la technologie des éoliennes, l'occupation des sols, la logistique, le raccordement au réseau et les considérations d'implantation.

- Expliquer le rôle de la présélection environnementale, des autorisations, des droits fonciers et de la conformité réglementaire.
- Appliquer les principes élémentaires de planification de projet relatifs à l'ingénierie, au financement, au risque et à la coordination des parties prenantes.
- Identifier les difficultés techniques, environnementales, économiques et administratives courantes et les approches d'atténuation possibles.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Cycle de vie de développement d'un parc éolien	Identification du site, présélection préliminaire, faisabilité, conception/autorisations/financement, approvisionnement, construction, mise en service et exploitation.
2. Évaluation du gisement éolien	Anémomètres et mâts de mesure ; LiDAR/SoDAR et télédétection ; distributions de vitesse du vent, notions de loi de Weibull, roses des vents et évaluation à long terme.
3. Critères de choix de site	Disponibilité et régularité du vent ; terrain et topographie ; occupation des sols, accès et logistique ; contraintes environnementales et sociales.
4. Implantation du parc éolien et micro-implantation	Positionnement des éoliennes ; espacement et alignement ; effets de sillage et pertes ; optimisation de l'implantation et notions d'outils logiciels.
5. Infrastructure électrique et raccordement au réseau	Réseaux de collecte, postes et transformateurs ; lignes de transport ; points de raccordement au réseau et exigences d'interconnexion.
6. Contraintes de réseau et intégration au système	Capacité et congestion du réseau ; stabilité en tension et en fréquence ; intermittence et variabilité ; écrêtement et limitations d'appel de puissance.
7. Applications industrielles et décentralisées	Usage industriel direct ; contrats d'achat d'électricité (PPA) ; systèmes hybrides éolien-stockage et renouvelables ; applications hors réseau et autoproduction.
8. Considérations économiques	Notions de CAPEX, d'OPEX et de LCOE ; viabilité du projet ; considérations de financement et de dispositifs publics de soutien.
9. Aspects environnementaux et réglementaires	Présélection et étude d'impact environnemental ; effets sonores, visuels et écologiques ; considérations foncières et d'autorisation/conformité.
10. Cas de planification, parties prenantes et risques	Cas de planification d'un parc éolien ; coordination des parties prenantes ; risques du projet, mesures d'atténuation et enseignements tirés d'applications pratiques.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Traiter un cas structuré de présélection de site et de faisabilité.
- Interpréter un exemple de rose des vents ou un jeu de données simplifié de type Weibull/de ressource.
- Élaborer une justification élémentaire de micro-implantation et d'agencement tenant compte des sillages, de l'accès et du raccordement au réseau.
- Cartographier le cycle de vie du projet et identifier les points d'approbation, de parties prenantes et de maîtrise des risques.

Approche d'évaluation

- Exercice d'interprétation de la ressource et du site, complété par un cas de planification de parc éolien et un court quiz technique.

Progression et articulation

- Prépare les apprenants à relier les décisions de conception technique à la mise en œuvre, à la mise en service et à l'exploitation-maintenance sur le cycle de vie du W2-07.

5.12 W2-07 – Programme de maintenance des parcs et des éoliennes

Code du cours	W2-07
Niveau	Avancé
Durée recommandée	5,0 heures

Description du cours	Intégrer l'installation, la mise en service, l'exploitation, le suivi des performances, la maintenance, la recherche de pannes, la sécurité et la fiabilité sur le cycle de vie dans un cadre pratique d'exploitation - maintenance.
----------------------	--

Acquis d'apprentissage

- Décrire les principales étapes d'installation et de mise en service d'une éolienne et les mesures de sécurité associées.
- Expliquer les modes de fonctionnement des éoliennes et l'utilisation du SCADA pour le suivi de l'exploitation.
- Interpréter les principaux indicateurs de performance, notamment la puissance produite, la disponibilité et le facteur de charge.
- Différencier la maintenance préventive, corrective et prédictive et élaborer un calendrier de maintenance élémentaire.
- Reconnaître les besoins de maintenance mécanique, électrique et du système de commande ainsi que les symptômes de défauts courants.
- Appliquer une approche systématique de recherche de pannes à partir des données de surveillance et des outils de diagnostic.
- Appliquer les principes appropriés de travail en hauteur, de sécurité électrique, de consignation (LOTO), d'urgence et de PPE.
- Expliquer l'incidence de la stratégie de maintenance sur la production annuelle d'énergie, la disponibilité, la fiabilité, l'indisponibilité et le coût sur le cycle de vie.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
1. Introduction à l'exploitation-maintenance des éoliennes	Rôle de l'exploitation-maintenance dans la performance, la fiabilité et le coût ; effet sur la disponibilité, la production annuelle d'énergie et la valeur sur le cycle de vie.
2. Bases de l'installation et de la mise en service	Préparation du site et des fondations ; levage du mât ; installation de la nacelle et du rotor ; vérifications du système, essais et mise en service.
3. Exploitation et surveillance	Modes de fonctionnement de l'éolienne ; surveillance et conduite par SCADA ; indicateurs clés de performance, notamment la puissance produite, la disponibilité et le facteur de charge.
4. Stratégies de maintenance	Maintenance préventive et planifiée ; réparation corrective et remplacement de composants ; maintenance prédictive et conditionnelle.
5. Maintenance mécanique	Inspection et lubrification du multiplicateur ; surveillance des roulements ; inspection des pales ; maintenance des systèmes d'orientation et de calage.
6. Maintenance électrique	Inspection et essais de la génératrice ; vérifications du convertisseur et de l'électronique de puissance ; inspection des câbles et des connexions ; maintenance des transformateurs et des appareillages.
7. Techniques de recherche de pannes	Diagnostic systématique des défauts ; vibrations mécaniques, défauts électriques et de commande ; utilisation des outils de diagnostic, des données de surveillance et des logiciels.
8. Procédures de sécurité en exploitation-maintenance	Sécurité du travail en hauteur ; sécurité électrique et consignation (verrouillage/étiquetage) ; procédures d'urgence ; PPE et travail supervisé en sécurité.
9. Fiabilité et gestion du cycle de vie	Modes de défaillance et analyse des causes racines ; maintenance basée sur la fiabilité ; gestion des pièces de rechange et réduction des indisponibilités.
10. Cas pratiques et applications de terrain	Scénarios réels de maintenance ; exercices de recherche de pannes ; prise de décision en sécurité et exemples de bonnes pratiques de l'industrie.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Élaborer un calendrier simplifié de maintenance préventive pour un sous-système d'éolienne.
- Interpréter un instantané SCADA/d'indicateurs clés et identifier les points d'attention en exploitation.
- Utiliser un arbre de décision de recherche de pannes pour un défaut mécanique, électrique ou de commande.
- Réaliser en salle un exercice de sécurité au poste de travail (analyse de risques) et de séquence de consignation (LOTO) avant toute activité pratique de maintenance.

Approche d'évaluation

- Cas d'exploitation-maintenance, tâche de calendrier de maintenance, scénario de recherche de pannes et vérification des connaissances en sécurité.

Progression et articulation

- Module de synthèse intégrant les connaissances issues des modules de mécanique, d'électricité, de commande, d'électronique de puissance et de planification.

6. Lignes directrices d'enseignement, d'apprentissage et de formation pratique

6.1 Modèle de dispensation

Le programme repose sur une approche VET hybride associant l'apprentissage en ligne pour les concepts théoriques à des explications encadrées par un formateur et à un apprentissage pratique supervisé. Il intègre également des éléments d'apprentissage dual par le biais de stages et de formation en situation de travail lorsque cela est réalisable. La dispensation doit faire progresser les apprenants du concept à la démonstration, à la pratique guidée, à l'application, au retour d'expérience et à la réflexion.

Modalité d'apprentissage	Finalité	Exemples
Apprentissage en ligne / théorie numérique	Introduire les concepts de manière efficace et offrir un accès flexible.	Courtes vidéos de cours, illustrations techniques, schémas interactifs, lectures, quiz et démonstrations enregistrées.
Apprentissage encadré par un formateur	Clarifier les concepts techniques difficiles et relier les modules entre eux.	Exemples résolus, discussion guidée, schémas de systèmes, calculs, briefings sécurité et débriefings.
Simulation / activité sur données	S'exercer à l'interprétation et à la prise de décision sans exposition à un risque inutile.	Courbes de puissance, jeux de données de vent, notions simples de CFD, schémas de convertisseurs et de commande, jeux de données SCADA/d'alarmes et scénarios de maintenance.
Atelier / démonstration pratique	Développer la reconnaissance des composants, les procédures de sécurité et le raisonnement pratique.	Maquettes de composants d'éoliennes, démonstrations électriques et mécaniques, instruments de mesure, exercices de diagnostic et planification de la maintenance.
Apprentissage par cas	Relier l'ingénierie aux décisions réelles de projet et d'exploitation.	Cas de systèmes énergétiques ouest-africains, choix de site, contraintes de réseau, défauts, exploitation-maintenance, arbitrages environnementaux et économiques.
Apprentissage en milieu professionnel (WBL) / exposition sur le terrain	Renforcer le contexte professionnel et la pratique professionnelle.	Visites supervisées, stages, observation en situation de travail, mentorat par l'industrie et travaux en mode projet lorsque cela est possible.

6.2 Déroulé de séance recommandé

Étape	Ligne directrice
1. Cadrage	Énoncer les acquis d'apprentissage, la pertinence, les attentes en matière de sécurité et les liens avec les modules antérieurs.
2. Apport conceptuel	Utiliser des supports de cours/en ligne concis, des schémas et des exemples résolus.
3. Application guidée	Les apprenants réalisent des calculs, des tracés de systèmes, des tâches d'interprétation ou de décision.
4. Activité pratique/sur cas	Appliquer les concepts au moyen d'une simulation, d'un travail sur composants, d'un scénario de défaut, d'un jeu de données ou d'un cas de projet.
5. Évaluation et retour d'expérience	Utiliser 5 à 10 items d'évaluation alignés, complétés le cas échéant par des éléments probants pratiques.
6. Réflexion et transfert	Synthétiser la compétence acquise et la relier au module suivant ou à une tâche en milieu professionnel.

6.3 Principes de la formation pratique

- L'activité pratique doit être directement reliée aux acquis d'apprentissage énoncés et produire des preuves observables de compétence.
- Les tâches à risque élevé doivent d'abord être enseignées au moyen de schémas, de maquettes, de simulations ou de démonstrations supervisées avant toute exposition à des équipements sous tension.
- Lorsque des installations éoliennes à l'échelle réelle ne sont pas disponibles, utiliser des maquettes de composants, des écorchés, des bancs de formation, des jumeaux numériques/simulations, des jeux de données SCADA d'exemple et des études de cas structurées.
- L'apprentissage en milieu professionnel doit être planifié avec des objectifs d'apprentissage clairs, des dispositions d'encadrement, des exigences de sécurité et une réflexion documentée de l'apprenant.
- Les activités pratiques doivent être contextualisées en fonction des technologies disponibles et des conditions d'exploitation des systèmes énergétiques des pays partenaires, sans réduire les attentes en matière de compétences fondamentales.

6.4 Orientations pour la formation de formateurs

Les formateurs doivent être informés de l'architecture complète du curriculum, de la progression du niveau Base au niveau Avancé, des attentes en matière d'évaluation, des exigences de sécurité et de l'articulation entre ce curriculum et les supports détaillés du D3.5. Le développement des formateurs doit comprendre des occasions d'examiner les technologies éoliennes émergentes, les exigences des systèmes électriques, les outils numériques, les pratiques d'exploitation-maintenance et des études de cas pertinentes au niveau local. Un enseignement en équipe pluridisciplinaire est recommandé pour les sujets avancés de mécanique, d'électricité, de commande, d'électronique de puissance et de planification des parcs éoliens lorsqu'un seul formateur ne peut couvrir de manière crédible l'ensemble de l'étendue technique.

7. Évaluation et alignement sur la certification

7.1 Principes d'évaluation

- L'évaluation doit être alignée sur les acquis d'apprentissage de chaque module.
- La compréhension théorique comme la compétence pratique et analytique doivent être attestées lorsque cela est pertinent.
- L'évaluation doit progresser des connaissances et de l'interprétation au niveau Base vers l'analyse, le diagnostic, l'évaluation et la planification au niveau Avancé.
- Les apprenants doivent recevoir un retour d'expérience en temps utile, identifiant les erreurs de compréhension technique et orientant la poursuite de la pratique.
- Les tâches d'évaluation doivent s'appuyer sur des contextes réalistes d'énergie éolienne et éviter de porter sur des éléments ne faisant pas partie des contenus enseignés.

7.2 Méthodes d'évaluation

Méthode	Utilisation dans le programme
Quiz à choix multiples / à réponses courtes	Terminologie, concepts, fonctions des composants, règles de sécurité et compréhension technique élémentaire.
Exercices techniques	Calculs de puissance éolienne, schémas-blocs, sélection et comparaison de composants, interprétation des régions de fonctionnement et raisonnement sur la performance.
Analyse d'études de cas	Planification de parcs éoliens, enjeux de réseau, contraintes environnementales, défauts, décisions de maintenance et arbitrages de projet.
Mini-tâches d'évaluation de systèmes	Retracer les chemins d'énergie et de commande, analyser les interactions entre sous-systèmes et évaluer les choix d'exploitation ou de conception.
Travaux pratiques	Identification de composants, interprétation de données, analyse de surveillance/SCADA, planification de la maintenance et exercices de procédures en sécurité.
Scénarios de recherche de pannes	Identifier les symptômes, les causes plausibles, les étapes de diagnostic, les mesures de sécurité et les actions correctives ou d'escalade appropriées.

7.3 Volume d'évaluation par module

Chaque cours ou module doit comporter 5 à 10 items d'évaluation alignés sur ses acquis d'apprentissage. Les formateurs peuvent combiner de courts items de connaissances avec une ou plusieurs tâches appliquées, de sorte que l'ensemble des éléments probants couvre à la fois la compréhension et l'application dans le temps disponible pour le module.

7.4 Réussite et certification

Alignement sur le WP4 requis

Aucune note de réussite chiffrée, aucun seuil d'assiduité ni aucune règle de certification finale ne sont fixés dans le présent curriculum. Les seuils de réussite, les critères d'évaluation et les procédures de certification seront appliqués conformément au référentiel de certification fondé sur les compétences de PRISTINE VET relevant du WP4 et aux exigences nationales VET applicables.

7.5 Contrôles qualité de l'évaluation

- Utiliser une matrice d'évaluation reliant chaque item ou tâche aux acquis d'apprentissage du module.
- Vérifier les questions et les tâches pratiques du point de vue de l'exactitude technique, de la clarté, du niveau de difficulté et de l'accessibilité linguistique.
- Utiliser des consignes de correction ou des grilles d'évaluation cohérentes pour les tâches pratiques et sur cas.
- Consigner les résultats et le retour d'expérience des participants conformément aux exigences du projet en matière d'archivage et de protection des données.
- Examiner les résultats d'évaluation lors de l'expérimentation des cours et réviser les items faibles ou ambigus au moyen d'une gestion maîtrisée des versions.

8. Ressources de formation, santé et sécurité, environnement et inclusion

8.1 Ressources de formation recommandées

Domaine de ressources	Dotation recommandée
Apprentissage numérique	Plateforme d'apprentissage (LMS) ou plateforme partagée, appareils connectés à Internet, vidéoprojecteur/écran, vidéos courtes, schémas interactifs, quiz et fichiers de cours numériques.
Ressource éolienne et planification	Jeux de données de vent d'exemple, roses des vents, exemples de loi de Weibull, cartes, données de terrain et de site, fiches d'implantation et accès à des outils appropriés de simulation/planification lorsqu'ils sont disponibles.
Apprentissage mécanique	Schémas, écorchés ou maquettes de composants d'éoliennes ; exemples ou bancs de formation de roulements, accouplements, multiplicateurs et systèmes de calage/orientation lorsqu'ils sont disponibles ; démonstrations d'analyse vibratoire et d'analyse d'huile.
Apprentissage électrique et d'électronique de puissance	Schémas électriques, schémas de génératrices et de convertisseurs, bancs de formation basse tension sûrs, multimètres et instruments de mesure, exemples de protection et simulations de convertisseurs et de commande.
Apprentissage de la commande et du SCADA	Exemples de capteurs et d'actionneurs, démonstrations d'automates et d'interfaces homme-machine, captures d'écran ou jeux de données SCADA, scénarios d'alarmes et de défauts et schémas de boucles de commande.
Exploitation-maintenance et sécurité	Listes de contrôle de maintenance, formulaires d'inspection, scénarios de diagnostic, exemples de PPE, dispositifs de démonstration LOTO et modèles d'analyse de sécurité au poste de travail et d'évaluation des risques.

8.2 Exigences de santé et de sécurité

La sécurité est une compétence transversale et doit être intégrée à chaque module impliquant des équipements, des systèmes électriques, des machines en mouvement, l'installation ou la maintenance. Les prestataires de formation

doivent appliquer les exigences légales locales et les procédures de site et ne doivent pas autoriser d'activité à risque élevé sans supervision.

Domaine de danger	Ligne directrice de formation
Travail en hauteur	Appliquer les principes appropriés de protection antichute, de contrôle des accès, de sensibilisation au sauvetage et d'encadrement compétent pour toute exposition réelle à la hauteur.
Risques électriques / haute tension	Appliquer les règles de consignation, de vérification, de mise à la terre et de personne compétente. Une formation en haute tension sous tension n'est pas appropriée à une pratique non supervisée des apprenants.
LOTO	Enseigner la consignation, le verrouillage/étiquetage, la vérification de l'absence d'énergie et la remise sous tension maîtrisée avant tout scénario de maintenance.
Systèmes tournants et mécaniques	Maîtriser l'énergie accumulée, les zones de cisaillement, les pièces en rotation, les mécanismes de freinage et de verrouillage et les distances d'approche sûres.
Levage et installation	Traiter les zones de grutage et de levage, les charges suspendues, la logistique de transport, les limites météorologiques et les responsabilités en matière de communication.
PPE et intervention d'urgence	Choisir les PPE en fonction des dangers de la tâche ; présenter l'arrêt d'urgence, la première intervention, la déclaration et les dispositions d'évacuation.
Conditions météorologiques et de site	Prendre en compte les vents forts, la foudre, la chaleur, l'accès en zone isolée et les autres conditions environnementales lors des activités de terrain ou d'exploitation-maintenance.

8.3 Considérations environnementales et de durabilité

- Intégrer l'énergie éolienne dans les objectifs d'atténuation du changement climatique et de systèmes énergétiques durables, tout en reconnaissant les impacts environnementaux sur le cycle de vie.
- Traiter le choix de site, la biodiversité, les impacts sur les oiseaux et les chauves-souris, le bruit, les effets visuels, l'occupation des sols et l'acceptation par les populations dans la planification des parcs éoliens.
- Introduire les notions de présélection environnementale et sociale, d'étude d'impact et d'autorisation dans le cadre du W2-06.
- Encourager une approche par cycle de vie pour les matériaux, le remplacement des composants, les déchets, la fin de vie des pales et les opportunités d'économie circulaire, lorsque cela est pertinent.
- Utiliser des cas aidant les apprenants à concilier productible, fiabilité, coût, responsabilité environnementale et acceptabilité sociale.

8.4 Inclusion, genre et accessibilité

La dispensation de la formation doit favoriser l'égalité des chances et la non-discrimination. PRISTINE VET met explicitement l'accent sur l'augmentation de la participation des femmes à la formation professionnelle aux énergies vertes et sur un accès inclusif pour les groupes sous-représentés. Le recrutement, les exemples, le travail de groupe, les travaux pratiques, le mentorat et les environnements de formation doivent donc être conçus de manière à éviter l'exclusion et à favoriser une participation équitable.

- Utiliser une communication et des visuels sensibles à la dimension de genre et inclusifs.
- Planifier les activités pratiques de sorte que chaque apprenant bénéficie d'une participation pratique ou analytique effective.
- Prévoir des adaptations d'accessibilité raisonnables lorsque cela est réalisable et éviter les obstacles inutiles dans l'apprentissage numérique.
- Suivre les données de participation et le retour d'expérience des apprenants conformément aux exigences du projet et aux règles de confidentialité.
- Recourir à un appui en anglais/français et en langues locales lorsque cela est nécessaire pour améliorer la compréhension, sans modifier le niveau de compétence technique attendu.

8.5 Protection des données et dossiers des apprenants

Lorsque les activités de formation collectent des données à caractère personnel, des résultats d'évaluation, des registres de participation, des retours d'expérience ou des images, les prestataires doivent respecter les exigences applicables en matière de protection des données ainsi que les procédures du projet, notamment un traitement

licite et transparent, la minimisation des données, un stockage sécurisé, un accès restreint et une information et un consentement appropriés des participants.

9. Lignes directrices pour les formateurs et les apprenants

9.1 Lignes directrices pour les formateurs

- Utiliser les acquis d'apprentissage du curriculum et les spécifications des modules comme plan d'enseignement de référence ; utiliser les supports pédagogiques W1/W2 comme source de contenu détaillé.
- Vérifier les connaissances prérequis au début de chaque niveau et fournir les explications de mise à niveau nécessaires.
- Relier explicitement les notions de niveau Base aux applications de niveau Avancé, plutôt que de répéter des contenus sans progression.
- Utiliser des schémas, des exemples résolus, des cas et des activités pratiques afin de rendre les concepts d'ingénierie abstraits observables et pertinents.
- Adapter les exemples et les jeux de données aux ressources éoliennes locales, aux conditions de réseau, aux technologies disponibles et au contexte du marché du travail, après validation par les parties prenantes.
- Réaliser un briefing sécurité avant toute activité pratique ou de terrain et interrompre toute activité qui ne peut être menée en sécurité avec l'encadrement et les équipements disponibles.
- Utiliser les résultats d'évaluation et le retour d'expérience des apprenants pour identifier les sujets nécessitant une reprise d'enseignement ou une révision des supports du curriculum.
- Tenir à jour, dans le référentiel institutionnel partagé du projet, les registres de cours, les éléments probants d'évaluation et les supports versionnés.

9.2 Lignes directrices pour les apprenants

- Suivre les modules dans la séquence recommandée, sauf si le formateur confirme une compétence antérieure équivalente.
- Participer aux activités d'apprentissage théoriques, numériques, pratiques et sur cas, et demander des clarifications lorsque des notions techniques ou de sécurité ne sont pas claires.
- Respecter l'ensemble des consignes de sécurité en laboratoire, en atelier, sur le terrain ainsi qu'en matière électrique et mécanique, et utiliser les PPE requis.
- Organiser les notes techniques, calculs, schémas et éléments probants d'évaluation dans un portfolio d'apprentissage, lorsque le prestataire en utilise un.
- Utiliser les exercices SCADA, sur données et de simulation de manière responsable et distinguer les simulations de formation de l'exploitation autorisée de systèmes réels.
- Adopter une conduite professionnelle, le travail en équipe, une communication respectueuse et une responsabilité environnementale pendant la formation et l'exposition au milieu professionnel.

9.3 Éléments probants suggérés pour le portfolio d'apprentissage

Niveau	Exemples d'éléments probants du portfolio
Niveau Base	Interprétation de la ressource éolienne, tâche de calcul aérodynamique/de courbe de puissance, schémas mécaniques et électriques d'éolienne, exercice de conversion par électronique de puissance et quiz de module.
Niveau Avancé	Carte de système intégrée, analyse de défaut de chaîne cinématique, cas électrique/de qualité de l'énergie, cas de commande/SCADA, comparaison de convertisseurs, exercice de planification de parc éolien, calendrier de maintenance et éléments de recherche de pannes et tâche de sécurité.

10. Assurance qualité, suivi et révision du curriculum

10.1 Objectifs de l'assurance qualité

L'assurance qualité doit garantir que le curriculum demeure techniquement exact, pédagogiquement cohérent, pertinent pour l'industrie, inclusif, évaluable et conforme aux exigences du projet. Les contrôles qualité doivent porter à la fois sur le curriculum et sur les supports pédagogiques détaillés utilisés pour le dispenser.

10.2 Cycle d'assurance qualité du curriculum

Étape	Action requise
1. Revue préalable à la dispensation	Confirmer les codes et intitulés des modules, les durées, les acquis d'apprentissage, les supports, les activités, les items d'évaluation, les exigences de sécurité et la préparation des formateurs.
2. Validation par les parties prenantes	Recueillir des contributions structurées des établissements VET, des entreprises et experts de l'industrie et des autorités compétentes sur les besoins en main-d'œuvre, la pertinence technologique et les contraintes locales.
3. Expérimentation des cours	Expérimenter les modules avec les formateurs et les prestataires VET partenaires ; consigner les difficultés de mise en œuvre, les questions des apprenants, la gestion du temps et les manques de ressources.
4. Analyse du retour d'expérience	Examiner le retour d'expérience des apprenants et des formateurs, les résultats d'évaluation, la faisabilité pratique et les questions d'inclusion et d'accès.
5. Révision technique et pédagogique	Corriger les inexactitudes, réduire les redondances, améliorer la progression et actualiser les activités et l'évaluation, tout en préservant les acquis approuvés.
6. Gestion des versions et approbation	Émettre une nouvelle version maîtrisée, archiver les versions remplacées et conserver les preuves de revue et d'approbation.

10.3 Indicateurs de suivi de la dispensation de la formation

- Achèvement des modules et des évaluations prévus dans le calendrier de dispensation convenu.
- Participation et achèvement des apprenants, y compris le suivi de la participation par genre et de l'accès inclusif.
- Résultats d'évaluation par acquis d'apprentissage et identification des lacunes récurrentes de connaissances ou de compétences.
- Satisfaction et retour d'expérience des apprenants et des formateurs sur la clarté, la pertinence, la valeur pratique et l'accessibilité numérique.
- Disponibilité et adéquation des équipements, des ressources numériques et des possibilités d'apprentissage pratique en sécurité.
- Nombre et qualité des contributions des parties prenantes de l'industrie et du secteur VET à la revue du curriculum et aux possibilités d'apprentissage en milieu professionnel.
- Application correcte des procédures de visibilité du projet, de maîtrise documentaire, de protection des données et d'archivage.

10.4 Éléments déclencheurs d'une révision du curriculum

- Nouvelles technologies d'éoliennes ou évolutions substantielles des pratiques de l'industrie.
- Évolutions des exigences de réseau, des politiques nationales, des règles de sécurité ou des référentiels de certification.
- Retours répétés des apprenants ou des formateurs signalant un séquençage peu clair, des redondances ou une pratique insuffisante.
- Éléments d'évaluation indiquant que les acquis d'apprentissage ne sont pas atteints de manière fiable.
- Évolutions des infrastructures VET disponibles, des outils numériques ou des possibilités de partenariat avec l'industrie.
- Retour d'expérience formel issu de l'expérimentation des cours du WP3, du développement de la certification du WP4 ou d'une revue d'assurance qualité du projet.

Mise en œuvre, maîtrise documentaire et articulation avec les supports pédagogiques

11.1 Séquence de mise en œuvre recommandée

Phase	Orientations de mise en œuvre
Phase 1 – Préparer	Confirmer les formateurs, la cohorte d'apprenants, les installations, l'accès numérique, les mesures de sécurité, les besoins linguistiques et les versions actuelles des fichiers de cours.
Phase 2 – Dispenser le niveau	Réaliser les modules W1-01 à W1-05, en utilisant l'évaluation formative pour confirmer la préparation

Phase	Orientations de mise en œuvre
Base	au niveau Avancé.
Phase 3 – Dispenser le niveau Avancé	Réaliser les modules W2-01 à W2-07 dans l'ordre, en accentuant progressivement l'intégration système, les cas, le diagnostic et la planification.
Phase 4 – Consolidation pratique / WBL	Lorsque cela est réalisable, recourir à des ateliers, à une exposition supervisée sur le terrain, au mentorat par l'industrie ou à des projets appliqués pour consolider les compétences.
Phase 5 – Évaluation et retour d'expérience	Rassembler les éléments probants des modules, recueillir le retour d'expérience des apprenants et des formateurs et identifier les lacunes ou les révisions nécessaires.
Phase 6 – Alignement sur la certification / reporting	Appliquer les procédures de certification approuvées du WP4 lorsqu'elles seront disponibles et conserver les éléments probants requis pour le reporting du projet et l'assurance qualité.

11.2 Articulation entre le curriculum et les supports de cours détaillés

Curriculum / lignes directrices (le présent document)	Supports pédagogiques Éolien détaillés (D3.5)
Définit la finalité du programme, les niveaux, la séquence des modules, les heures et les acquis d'apprentissage.	Fournit les explications techniques complètes, les figures, les équations, les exemples, les lectures et le contenu d'enseignement détaillé.
Définit les domaines de compétences et les éléments probants attendus.	Fournit la matière permettant de construire la compréhension et la pratique des apprenants.
Définit les principes de dispensation, de formation pratique, d'évaluation, de sécurité et d'assurance qualité.	Fournit le contenu propre à chaque module, que les formateurs adaptent en séances, ressources numériques et activités.
Garantit la cohérence et la progression du niveau Base au niveau Avancé.	Soutient la mise en œuvre mais ne doit pas modifier de manière autonome les acquis approuvés du curriculum ni la structure des modules.

11.3 Gestion documentaire et gestion des versions

- Conserver la version DOCX de référence approuvée et la copie PDF de soumission dans le référentiel de projet partagé PRISTINE VET, avec des noms de fichiers clairement versionnés.
- Archiver les versions remplacées afin que seuls les fichiers approuvés en vigueur restent actifs pour la dispensation et le reporting.
- Maintenir sur les versions officielles et publiques les éléments de visibilité de l'UE requis, la mention de financement et la clause de non-responsabilité.
- Conserver les enregistrements relatifs au curriculum, à la dispensation, à l'évaluation et au retour d'expérience, conformément aux exigences d'archivage du projet.

CURRICULUM ET LIGNES DIRECTRICES POUR LA FORMATION AUX SOLUTIONS D'ÉNERGIE BIOMASSE

Volet Énergie biomasse du livrable D3.1

**PRISTINE VET – Renforcement des capacités Erasmus+ dans l'enseignement et la formation
professionnels**

Lot de travaux 3 : Élaboration des contenus de formation et apprentissage

Bénéficiaire chef de file **NOWOCERT LIMITED (NWC)**

Acronyme du projet PRISTINE VET

Mois d'échéance M8

Niveau de diffusion PUBLIC

Version **1.0**

Date Août 2026

Contrôle du document

Référence du livrable	D3.1
Titre du livrable	Curriculum et lignes directrices pour la formation aux solutions d'énergie solaire, éolienne et biomasse
Volet technologique	Solutions d'énergie biomasse
Lot de travaux	WP3 – Élaboration des contenus de formation et apprentissage
Bénéficiaire chef de file / partenaire responsable	NOWOCERT LIMITED (NWC)
Partenaires contributeurs du WP3	UNIN, AAMUSTED et ITU (élaboration des contenus et expérimentation)
Début du projet / durée	01 janvier 2026 / 24 mois
Mois d'échéance	M8
Niveau de diffusion	PUBLIC
Type de document	Curriculum et lignes directrices de mise en œuvre de la formation
Version / date	v1.0 / août 2026

Historique des révisions

Version	Date	Statut	Description
1.0	Août 2026	Version finale pour soumission	Version finale du curriculum et des lignes directrices de formation Énergie biomasse, intégrant les plans de cours détaillés de BM-B1 à BM-B5 et de BM-A1 à BM-A5.

Statut du document

Le présent document constitue le volet Énergie biomasse du livrable D3.1 ; il fournit le curriculum de référence et le guide de mise en œuvre du programme de formation Énergie biomasse de PRISTINE VET. Les supports pédagogiques et d'apprentissage détaillés sont gérés séparément au sein du paquet de formation Biomasse relevant du D3.7.

Structure du programme

Le programme Énergie biomasse comprend 10 modules de cours de premier niveau – 5 de niveau Base et 5 de niveau Avancé – appuyés par 50 unités d'apprentissage codées au niveau des chapitres (24 de niveau Base et 26 de niveau Avancé). Les supports Biomasse fournis ne prescrivent pas de volumes horaires ; le temps de dispensation doit donc être défini par la planification des formateurs et validé lors de la dispensation pilote, plutôt qu'inventé dans le présent curriculum.

Table des matières

Résumé exécutif

1. Contexte du projet et du curriculum

2. Finalité, périmètre et principes de conception

3. Profil et structure du programme

4. Acquis d'apprentissage du programme et référentiel de compétences

5. Plans de cours détaillés et spécifications des modules

BM-B1 Introduction à l'énergie biomasse et aux ressources énergétiques

BM-B2 Fondamentaux des technologies de conversion de la biomasse

BM-B3 Fondamentaux de la technologie du biogaz

BM-B4 Fondamentaux de la gazéification de la biomasse et des biocarburants

BM-B5 Installation, exploitation, maintenance et sécurité des systèmes biomasse – Niveau de base

BM-A1 Conception, exploitation et optimisation avancées des systèmes de biogaz

BM-A2 Conception et analyse de performance des systèmes de gazéification de la biomasse

BM-A3 Technologies de production de biocarburants et gestion de la qualité

BM-A4 Production d'électricité à partir de biomasse et conception de systèmes énergétiques ruraux

BM-A5 Installation, exploitation, maintenance et sécurité des systèmes biomasse – Niveau avancé

6. Lignes directrices d'enseignement, d'apprentissage et de formation pratique

7. Évaluation et alignement sur la certification

8. Ressources de formation, santé et sécurité, environnement et inclusion

9. Lignes directrices pour les formateurs et les apprenants

10. Assurance qualité, suivi et révision du curriculum

11. Mise en œuvre, contrôle documentaire et articulation avec les supports pédagogiques

Acronymes et abréviations

Acronyme	Signification
AD	Digestion anaérobie
AFR	Rapport air-combustible
BCR	Rapport bénéfice-coût
CBET	Éducation et formation fondées sur les compétences
CHP	Cogénération (production combinée de chaleur et d'électricité)
C/N	Rapport carbone/azote
CSTR	Réacteur parfaitement agité continu
EACEA	Agence exécutive européenne pour l'éducation et la culture
HRT	Temps de séjour hydraulique
IRR	Taux de rentabilité interne
LCOE	Coût actualisé de l'énergie
LOTO	Consignation / déconsignation
NPV	Valeur actuelle nette
O&M	Exploitation et maintenance
OHSE	Santé et sécurité au travail et environnement
OLR	Charge organique appliquée
PANER	Plan d'action national stratégique pour les énergies renouvelables
PPE	Équipements de protection individuelle
RES	Source d'énergie renouvelable

Acronyme	Signification
TS	Matières sèches totales
VET	Enseignement et formation professionnels
VS	Matières volatiles
WBL	Apprentissage en milieu professionnel
WP	Lot de travaux

Résumé exécutif

PRISTINE VET est un projet Erasmus+ de renforcement des capacités dans le domaine de la formation professionnelle (VET), d'une durée de 24 mois, destiné à moderniser la formation professionnelle aux énergies renouvelables en Afrique de l'Ouest. Dans le cadre du WP3 – Élaboration des contenus de formation et apprentissage –, le projet développe des curricula alignés sur les besoins de l'industrie, des supports de formation, des ressources numériques et des approches d'évaluation pour les solutions d'énergie solaire, éolienne, biomasse et hydrogène, NOWOCERT LIMITED (NWC) assurant la conduite du lot de travaux.

Le présent document, Curriculum et lignes directrices de formation Énergie biomasse, convertit les supports de cours Biomasse de niveau Base et Avancé fournis en un curriculum VET cohérent et fondé sur les compétences. Il définit les acquis d'apprentissage du programme, la progression du niveau Base au niveau Avancé, les plans de cours détaillés, la méthodologie de dispensation, l'apprentissage pratique, l'évaluation, les attentes en matière de sécurité et d'environnement, les responsabilités des formateurs et des apprenants, l'assurance qualité et les modalités de mise en œuvre.

Le curriculum comprend 10 modules de premier niveau : cinq de niveau Base et cinq de niveau Avancé. Le niveau Base établit les ressources de biomasse et la durabilité, les caractéristiques et la gestion des matières premières, les filières de conversion, les fondamentaux du biogaz, la gazéification et les applications rurales de l'énergie biomasse, ainsi que les pratiques fondamentales d'installation et d'exploitation-maintenance. Le niveau Avancé développe la compétence d'ingénierie en conception et optimisation des installations de biogaz, en conception de la gazéification et qualité du gaz de synthèse, en production de biodiesel et de bioéthanol et gestion de leur qualité, en production d'électricité à partir de biomasse et cogénération et conception de systèmes énergétiques ruraux, ainsi qu'en installation, surveillance, maintenance, recherche de pannes et pratiques OHSE avancées.

Sur l'ensemble des 10 modules, le matériel source comporte 50 unités d'apprentissage codées. La dispensation doit suivre un modèle VET hybride associant apprentissage en ligne et enseignement encadré par un formateur à des calculs, des schémas de procédés, l'évaluation des matières premières, des démonstrations en laboratoire et en atelier, des tâches de conception d'installations, des études de cas, l'interprétation de données d'exploitation et un apprentissage supervisé sur le terrain ou en milieu professionnel lorsque cela est réalisable et sûr. Les volumes horaires formels ne sont pas précisés dans les supports source et devront être validés lors de la dispensation pilote.

Principe du curriculum

Le curriculum définit ce qui doit être appris, les compétences à développer, la manière dont l'apprentissage est organisé et dispensé, ainsi que la manière dont les acquis sont attestés. Les supports pédagogiques Biomasse détaillés du D3.7 fournissent le contenu d'enseignement technique permettant de mettre en œuvre ce curriculum.

1. Contexte du projet et du curriculum

1.1 Contexte de PRISTINE VET

PRISTINE VET répond au développement des compétences dans les énergies vertes en Afrique de l'Ouest par la modernisation des curricula, la formation technique pratique, l'apprentissage numérique et le renforcement des liens entre les prestataires VET, l'industrie et les parties prenantes publiques. La biomasse revêt une pertinence particulière pour les contextes agricoles, d'élevage, forestiers, d'agroalimentaire, de déchets municipaux et d'énergie rurale de la région partenaire.

Le WP3 – Élaboration des contenus de formation et apprentissage – est piloté par NOWOCERT LIMITED (NWC) durant les mois 1 à 12. Le lot de travaux exige des curricula actualisés et alignés sur les besoins de l'industrie, comportant au moins 10 cours en ligne par spécialité, un alignement sur le PANER et sur les priorités locales, régionales et nationales, une conception des modules et des compétences éclairée par les parties prenantes, des ressources numériques et des outils d'évaluation, des versions linguistiques accessibles, ainsi que l'expérimentation des cours avec les formateurs et les prestataires VET partenaires.

1.2 Positionnement du livrable

Production du WP3	Finalité	Lien avec l'Énergie biomasse
D3.1	Curriculum et lignes directrices pour la formation aux solutions d'énergie solaire, éolienne et biomasse	Le présent document constitue le volet Énergie biomasse : architecture du programme, compétences, plans de cours détaillés, lignes directrices de dispensation et de mise en œuvre.
D3.7	Supports pédagogiques pour la formation aux solutions d'énergie biomasse, en anglais et en français	Contenus de cours Biomasse détaillés et supports pédagogiques utilisés par les formateurs et les apprenants pour mettre en œuvre ce curriculum.
D3.8	Rapport sur l'organisation des cours de formation (formateurs) pour les solutions d'énergie biomasse	Éléments probants relatifs à l'organisation des cours de formateurs, à l'expérimentation, au retour d'expérience et à l'amélioration à la suite de l'élaboration du curriculum et des supports.

1.3 Exigences du projet couvertes par le curriculum

Exigence du projet	Réponse du curriculum
Curriculum fondé sur les compétences et aligné sur les besoins de l'industrie	Acquis d'apprentissage du programme, domaines de compétences, spécifications détaillées des modules, éléments probants pratiques et tâches orientées vers le milieu professionnel.
Au moins 10 cours en ligne par spécialité	Les 10 modules de cours Biomasse sont structurés sur les niveaux Base et Avancé et appuyés par 50 unités d'apprentissage codées.
Conception du curriculum éclairée par les parties prenantes	La contextualisation locale et une revue structurée par les établissements VET, les entreprises du secteur de la biomasse, les agro-industries, les acteurs de la gestion des déchets et les autorités compétentes sont intégrées à la mise en œuvre et à l'assurance qualité.
Formation technique pratique	L'évaluation des matières premières, les calculs de procédés, les schémas de systèmes, la conception et le dimensionnement, la surveillance, la recherche de pannes, la maintenance, la sécurité et les activités d'évaluation de projet sont intégrés.
Apprentissage numérique	La dispensation hybride, les fichiers de cours numériques, les schémas de procédés, les exercices de calcul, les quiz, les jeux de données d'exploitation et les tâches de simulation et sur cas sont pris en charge.
Accessibilité en anglais/français et en langues locales	Le curriculum permet la dispensation et l'adaptation dans les langues du projet et, si nécessaire, dans les langues locales, sans réduire le niveau de compétence technique.
Expérimentation des cours et retour d'expérience	La dispensation pilote, le retour d'expérience des formateurs et des partenaires, celui des apprenants et la révision maîtrisée du curriculum sont intégrés au cycle d'assurance qualité.
Alignement sur la certification	Les éléments probants d'évaluation sont conçus pour être ultérieurement alignés sur le référentiel de certification fondé sur les compétences du WP4 et sur les exigences nationales VET applicables.

2. Finalité, périmètre et principes de conception

2.1 Finalité

Le présent document a pour finalité de fournir un cadre unique et cohérent de curriculum et de mise en œuvre pour la formation à l'énergie biomasse dans le cadre de PRISTINE VET. Il s'adresse aux prestataires VET, aux formateurs, aux experts techniques, aux concepteurs de curricula et aux partenaires du projet chargés d'organiser, de dispenser, d'évaluer et d'améliorer la formation à l'énergie biomasse.

2.2 Périmètre

Le curriculum couvre les ressources de biomasse et la durabilité ; les propriétés, la collecte, le stockage et le prétraitement des matières premières ; les filières de conversion ; la digestion anaérobie et le biogaz ; la gazéification et le gaz de synthèse ; le biodiesel et le bioéthanol ; la production d'électricité à partir de biomasse et la cogénération ; les systèmes énergétiques décentralisés et ruraux ; l'évaluation des ressources et le

dimensionnement ; l'évaluation technico-économique et socio-économique ; l'installation, la mise en service, l'exploitation, la surveillance, la maintenance, la recherche de pannes, la sécurité et les pratiques environnementales.

Le présent document ne remplace pas les supports pédagogiques détaillés. Les formateurs doivent utiliser les supports de cours BM-B et BM-A correspondants pour les explications techniques complètes, les figures, les équations, les exemples résolus, les études de cas et les activités pratiques propres à chaque chapitre. Le curriculum régit la séquence d'apprentissage, les acquis d'apprentissage, les attentes en matière de compétences, la logique de dispensation et les preuves d'apprentissage.

2.3 Principes de conception du curriculum

Principe	Application
Fondé sur les compétences	Les acquis d'apprentissage décrivent une compréhension, des calculs, une analyse, une sélection de technologies, un raisonnement de conception et une capacité pratique démontrables.
Progressif	Les modules de niveau Base établissent les ressources, les procédés et les bases d'une exploitation en sécurité ; les modules de niveau Avancé exigent la conception, l'optimisation, la gestion de la qualité, le diagnostic et la prise de décision à l'échelle du projet.
Aligné sur l'industrie	Le contenu est organisé autour de chaînes d'approvisionnement en biomasse réelles, de digesteurs, de gazéificateurs, de procédés de biocarburants, de chaudières et de cogénération, de mini-réseaux, d'installation et d'exploitation-maintenance.
Orienté vers la pratique	La théorie est reliée à des essais sur matières premières, des calculs, des schémas de procédés, des fiches de conception, des données d'exploitation, des cas de défaut, des plans de maintenance et des cas de projet.
Hybride et outillé par le numérique	L'apprentissage en ligne et les ressources numériques sont combinés à des explications encadrées par un formateur, à des simulations, au travail sur cas et à un apprentissage pratique supervisé.
Adapté au contexte	Les matières premières, les exemples, les échelles de projet et les modalités de mise en œuvre doivent refléter les conditions agricoles, industrielles, municipales et d'énergie rurale ouest-africaines.
Inclusif	La formation doit favoriser l'égalité des chances, l'intégration de la dimension de genre, une participation accessible et des environnements d'apprentissage respectueux.
Guidé par la sécurité	Les dangers biologiques, chimiques, d'incendie, de gaz, de pression, thermiques, liés aux poussières, mécaniques et électriques sont intégrés à la conception des activités pratiques.
Soumis au contrôle qualité	Le curriculum et les supports font l'objet d'une revue par les parties prenantes, d'expérimentations de cours, de retours d'expérience, de révisions et d'une gestion des versions.

2.4 Contextualisation locale et normes

Le noyau technique du curriculum doit rester homogène entre les établissements partenaires, tandis que les exemples, les matières premières, les échelles d'installation, les jeux de données, les méthodes de dispensation et les modalités pratiques doivent être contextualisés en fonction de la disponibilité locale des ressources, du climat, des pratiques agricoles et industrielles, des conditions de réseau et d'énergie rurale, des équipements disponibles et des besoins du marché du travail. Les exigences nationales et locales applicables en matière de gestion des déchets, de protection de l'environnement, d'équipements sous pression et de gaz, de manipulation de produits chimiques, de sécurité incendie, de sécurité électrique, de sécurité au travail, d'émissions, d'autorisations et de dispensation de la formation professionnelle doivent être appliquées lors de la localisation et de la validation par les parties prenantes.

3. Profil et structure du programme

3.1 Profil du programme

Intitulé du programme	Cours certifiants PRISTINE VET sur les solutions d'énergie biomasse – Curriculum et lignes directrices de formation
Structure du programme	10 modules de cours de premier niveau : 5 de niveau Base + 5 de niveau Avancé

Structure des unités d'apprentissage	50 unités d'apprentissage codées : 24 de niveau Base + 26 de niveau Avancé
Volumes horaires	Non prescrits dans les supports de cours Biomasse fournis ; à définir par la planification des formateurs et à valider lors de la dispensation pilote
Modalité de dispensation	VET hybride : théorie en ligne/en salle + activités pratiques, calculs, démonstrations, simulations, études de cas et apprentissage en milieu professionnel (WBL)/exposition sur le terrain lorsque cela est réalisable
Public cible	Étudiants VET d'Afrique de l'Ouest ; techniciens biomasse/bioénergie ; stagiaires de l'agrotransformation et de la gestion des déchets ; assistants techniques du secteur de l'énergie ; ingénieurs ; entrepreneurs et professionnels souhaitant acquérir des compétences en énergie biomasse
Prérequis recommandés	Mathématiques et sciences de base ; notions introductives de chimie et de biologie ; concepts élémentaires de mécanique et d'électricité ; familiarité avec les énergies renouvelables. Recommandés plutôt qu'obligatoires.
Profil du formateur	Ingénieurs biomasse/bioénergie, spécialistes des énergies renouvelables et formateurs techniques expérimentés. Les modules de niveau Avancé doivent, selon les cas, faire intervenir des spécialistes de la digestion anaérobie, de la gazéification, des biocarburants, de la production d'électricité et de la cogénération, de l'évaluation de projets, de l'exploitation-maintenance et de l'OHSE.

Niveaux du programme	Base (BM-B) et Avancé (BM-A). Il s'agit de niveaux internes au programme ; le positionnement formel en matière de qualification/accréditation doit s'aligner sur le WP4 et sur les cadres nationaux applicables.
Langue/accessibilité	Curriculum de référence en anglais ; les supports d'accompagnement doivent être disponibles/adaptés en anglais et en français et, si nécessaire, dans les langues locales, conformément aux dispositions du WP3.
Base d'évaluation	Quiz alignés sur les acquis d'apprentissage, calculs, exercices sur les matières premières et les ressources, tâches de conception et de dimensionnement, schémas de procédés, analyses de cas, travaux pratiques, tâches de surveillance et de diagnostic et scénarios de maintenance et de sécurité.

3.2 Objectifs du programme

- Doter les apprenants d'une compréhension structurée de l'énergie biomasse, depuis la disponibilité de la ressource et la gestion des matières premières jusqu'à la conversion, à la valorisation et à l'exploitation sur le cycle de vie.
- Développer une compétence pratique et analytique en caractérisation des matières premières de biomasse, digestion anaérobie, gazéification, production de biocarburants, production d'électricité à partir de biomasse et systèmes énergétiques décentralisés.
- Préparer les apprenants à sélectionner les technologies de conversion appropriées en fonction des propriétés des matières premières, de la demande énergétique, de l'échelle et des considérations de sécurité, d'environnement et d'économie.
- Développer la compétence en conception de systèmes, dimensionnement, suivi des performances, optimisation, diagnostic de défauts, maintenance et exploitation en sécurité.
- Intégrer la gestion durable des ressources de biomasse, les principes de valorisation énergétique des déchets, la protection de l'environnement, la participation des communautés et l'évaluation socio-économique.
- Relier la théorie au travail pratique au moyen d'activités de laboratoire et d'atelier, de calculs, de schémas de procédés, d'études de cas et de possibilités d'apprentissage en milieu professionnel.
- Soutenir les compétences vertes utiles à l'industrie, l'entrepreneuriat et les parcours d'insertion professionnelle au sein des systèmes biomasse et d'énergie renouvelable ouest-africains.
- Fournir une base curriculaire cohérente pour le développement des formateurs, l'expérimentation des cours, l'alignement sur la certification et l'actualisation future du curriculum.

3.3 Structure du programme et séquence recommandée

Code	Cours / module	Niveau	Unités d'apprentissage
BM-B1	Introduction à l'énergie biomasse et aux ressources énergétiques	Base	5
BM-B2	Fondamentaux des technologies de conversion de la biomasse	Base	3
BM-B3	Fondamentaux de la technologie du biogaz	Base	5
BM-B4	Fondamentaux de la gazéification de la biomasse et des biocarburants	Base	6

Code	Cours / module	Niveau	Unités d'apprentissage
BM-B5	Installation, exploitation, maintenance et sécurité des systèmes biomasse	Base	5
BM-A1	Conception, exploitation et optimisation avancées des systèmes de biogaz	Avancé	5
BM-A2	Conception et analyse de performance des systèmes de gazéification de la biomasse	Avancé	5
BM-A3	Technologies de production de biocarburants et gestion de la qualité	Avancé	5
BM-A4	Production d'électricité à partir de biomasse et conception de systèmes énergétiques ruraux	Avancé	6
BM-A5	Installation, exploitation, maintenance et sécurité des systèmes biomasse	Avancé	5

Niveau Base : 5 modules et 24 unités d'apprentissage codées. Niveau Avancé : 5 modules et 26 unités d'apprentissage codées. Total du programme : 10 modules et 50 unités d'apprentissage codées.

Note sur la codification source

Le fichier Biomasse de niveau Base fourni définit BM-Bx-y comme convention du parcours Base. Dans le dernier cours d'exploitation-maintenance de niveau Base, le cours d'ouverture et le premier chapitre sont étiquetés BM-A5 / BM-A5-1, après quoi le fichier se poursuit de BM-B5-2 à BM-B5-5. Pour une maîtrise cohérente du curriculum, le présent document normalise ce cours de niveau Base en BM-B5, tout en conservant le cours distinct BM-A5 de niveau Avancé tel que fourni.

3.4 Progression du niveau Base au niveau Avancé

Domaine	Attendu au niveau Base	Attendu au niveau Avancé
Ressources et matières premières	Identifier les ressources de biomasse ; expliquer l'humidité, le pouvoir calorifique, la masse volumique apparente et les cendres ; gérer la collecte, le stockage et le prétraitement.	Caractériser quantitativement les matières premières ; sélectionner et préparer les substrats et combustibles ; évaluer la co-digestion, le prétraitement, la disponibilité de la ressource et la fiabilité de l'approvisionnement.
Filières de conversion	Comparer les filières thermochimiques, biochimiques, mécaniques et chimiques et les associer à des applications simples.	Concevoir et optimiser les procédés de biogaz, de gazéification, de biocarburants et de production d'électricité à l'aide de calculs d'ingénierie et d'indicateurs de performance.
Biogaz	Expliquer la digestion anaérobie, les composants, les facteurs d'exploitation et les usages finaux.	Concevoir et dimensionner les digesteurs ; calculer le temps de séjour hydraulique et la charge organique appliquée ainsi que le rendement en gaz ; diagnostiquer l'instabilité du procédé ; optimiser et sélectionner les options de valorisation et d'épuration.
Gazéification et gaz de synthèse	Expliquer les types de gazéificateurs, les étapes de séchage, pyrolyse, oxydation et réduction, la formation du gaz de synthèse et la surveillance élémentaire.	Sélectionner les conceptions de réacteurs ; maîtriser la température, la pression et le rapport air-combustible ; évaluer les contaminants et l'épuration ; réaliser des analyses de bilan énergétique et de rendement.
Biocarburants	Reconnaître les filières chimiques et mécaniques élémentaires, l'extraction d'huile, la transestérification et les concepts de densification.	Appliquer les principes de production, de purification et d'épuration, de contrôle qualité, de stockage, de manipulation et de distribution du biodiesel et du bioéthanol.
Production d'électricité et systèmes énergétiques ruraux	Reconnaître les notions de mini-réseau, d'énergie communautaire, de cartographie des ressources, de dimensionnement des systèmes et de faisabilité élémentaire.	Concevoir des installations de production d'électricité et de cogénération à partir de biomasse et des systèmes ruraux ; évaluer la demande, l'approvisionnement en combustible, le rendement et la viabilité financière et socio-économique.
Installation, exploitation-maintenance et sécurité	Appliquer les procédures élémentaires d'installation, de démarrage et d'arrêt, de surveillance, de maintenance, de recherche de pannes et de sécurité.	Planifier la mise en service, le suivi des performances, la maintenance préventive et corrective, le diagnostic des défauts et les mesures OHSE au niveau du système.

4. Acquis d'apprentissage du programme et référentiel de compétences

4.1 Acquis d'apprentissage du programme

Code	Acquis d'apprentissage du programme
PLO1	Expliquer le rôle de l'énergie biomasse dans les systèmes d'énergie renouvelable et identifier les principales ressources de biomasse agricoles, forestières, d'élevage, municipales et industrielles pertinentes pour l'Afrique de l'Ouest.
PLO2	Caractériser les matières premières de biomasse à partir de l'humidité, du pouvoir calorifique, de la masse volumique apparente, des cendres, des matières solides, du rapport C/N et des propriétés connexes, et appliquer les pratiques appropriées de collecte, de stockage, de prétraitement et de durabilité.
PLO3	Comparer les filières de conversion de la biomasse thermochimiques, biochimiques, mécaniques et chimiques et sélectionner les technologies adaptées à des matières premières et des besoins énergétiques définis.
PLO4	Expliquer, concevoir et évaluer les systèmes de digestion anaérobie et de biogaz, y compris la sélection des matières premières, la configuration des digesteurs, le dimensionnement, le temps de séjour hydraulique et la charge organique appliquée, la conduite du procédé, l'optimisation et la valorisation.
PLO5	Expliquer et analyser les systèmes de gazéification de la biomasse, y compris les types de réacteurs, les étapes du procédé, les paramètres d'exploitation, la composition et l'épuration du gaz de synthèse, la performance et les applications.
PLO6	Expliquer et appliquer les principes de production, de transformation, d'épuration, de contrôle qualité, de stockage et de manipulation du biodiesel et du bioéthanol.
PLO7	Expliquer et analyser la combustion de la biomasse, la production de vapeur et d'électricité, la cogénération, les systèmes décentralisés, les mini-réseaux et les applications à usage productif.
PLO8	Réaliser des évaluations structurées des ressources de biomasse, de la demande, du dimensionnement des systèmes, technico-économiques, socio-économiques et de participation des communautés en vue de la planification de projets.
PLO9	Contribuer à la sécurité de l'installation, de l'inspection, des essais, de la mise en service, du démarrage, de l'arrêt, de l'exploitation et de la surveillance des systèmes d'énergie biomasse.
PLO10	Différencier la maintenance préventive et corrective, utiliser les informations de diagnostic pour rechercher les pannes et contribuer à la planification de la maintenance et à la fiabilité sur le cycle de vie.
PLO11	Appliquer les principes de maîtrise des risques en matière de santé au travail, d'incendie et de gaz, de risques chimiques, biologiques, thermiques, mécaniques, électriques et environnementaux à la formation et aux activités techniques liées à la biomasse.
PLO12	Utiliser des schémas de procédés, des calculs, des données techniques, des enregistrements de surveillance et des rapports structurés pour communiquer des résultats, travailler en collaboration et faire preuve de responsabilité professionnelle.

4.2 Domaines de compétences

Code	Domaine de compétences	Périmètre
C1	Ressources de biomasse, durabilité et contexte sectoriel	Rôle de la biomasse, types de ressources, disponibilité, récolte durable, contexte environnemental et social et applications ouest-africaines.
C2	Caractérisation, préparation et gestion des matières premières	Humidité, pouvoir calorifique, masse volumique, cendres, matières sèches totales et matières volatiles, rapport C/N, collecte, stockage, transport, prétraitement, co-digestion et traitement préalable.
C3	Conversion de la biomasse et génie des procédés	Conversion thermochimique, biochimique, mécanique et chimique ; raisonnement sur les flux de procédés ; sélection et optimisation des technologies.
C4	Biogaz et digestion anaérobie	Digesteurs, sélection des matières premières, étapes anaérobies, temps de séjour hydraulique et charge organique appliquée, rendement en gaz, surveillance du procédé, optimisation, valorisation et épuration du gaz.
C5	Systèmes de gazéification et gaz de synthèse	Conception des gazéificateurs, séchage/pyrolyse/oxydation/réduction, paramètres d'exploitation, qualité et épuration du gaz de synthèse, performance et applications.
C6	Production de biocarburants et gestion de la qualité	Biodiesel, bioéthanol, purification et épuration, sous-produits, essais et normes de qualité, stockage, sécurité et distribution.

Code	Domaine de compétences	Périmètre
C7	Production d'électricité à partir de biomasse, énergie rurale et développement de projets	Combustion, vapeur, cogénération, groupes électrogènes, mini-réseaux, évaluation de la ressource et de la demande, dimensionnement, économie et modèles d'énergie communautaire.
C8	Installation, exploitation-maintenance, sécurité, environnement et pratique professionnelle	Installation, mise en service, surveillance, maintenance, diagnostic, PPE/LOTO, sécurité incendie, gaz et produits chimiques, gestion des émissions et des déchets, inclusion et conduite professionnelle.

4.3 Correspondance entre modules et compétences

Module	Domaines de compétences principaux	Accent mis sur
BM-B1	C1, C2, C8	Contexte de la biomasse, ressources, propriétés et gestion des matières premières et usage durable.
BM-B2	C2, C3	Filières de conversion, transformation mécanique et chimique et sélection des technologies.
BM-B3	C2, C4, C8	Fondamentaux du biogaz, digestion anaérobie, composants des installations, facteurs d'exploitation et usages.
BM-B4	C1, C3, C5, C7, C8	Fondamentaux de la gazéification, gaz de synthèse, surveillance, systèmes ruraux, dimensionnement et faisabilité.
BM-B5	C3-C8	Bases de l'installation, de l'exploitation, de la surveillance, de la maintenance, de la recherche de pannes et de la sécurité.
BM-A1	C2, C3, C4, C8	Conception et dimensionnement des installations de biogaz, préparation des matières premières, analyse de performance, optimisation et valorisation.
BM-A2	C3, C5, C8	Conception des gazéificateurs et réacteurs, conduite du procédé, épuration du gaz de synthèse, rendement et applications.
BM-A3	C2, C3, C6, C8	Production de biodiesel et de bioéthanol, transformation, qualité du carburant, stockage et manipulation.
BM-A4	C1, C3, C7, C8	Production d'électricité et cogénération à partir de biomasse, composants d'installation, performance, systèmes ruraux, dimensionnement et évaluation de projet.
BM-A5	C3-C8	Installation et mise en service avancées, surveillance, maintenance, diagnostic de défauts et gestion OHSE.

5. Plans de cours détaillés et spécifications des modules

Les 10 plans de cours suivants traduisent les supports Biomasse de niveau Base et Avancé fournis en spécifications au niveau du curriculum. Chaque plan préserve la séquence des cours et chapitres source, consolide les principaux thèmes et sous-thèmes techniques et ajoute des acquis d'apprentissage, des activités appliquées, une évaluation et une progression au niveau de la mise en œuvre, sans reproduire l'intégralité des supports pédagogiques.

5.1 BM-B1 – Introduction à l'énergie biomasse et aux ressources énergétiques

Code du cours	BM-B1
Niveau	Base
Unités d'apprentissage codées	5 (BM-B1-1 à BM-B1-5)
Description du cours	Établir les fondations de l'énergie biomasse : rôle du secteur, ressources locales, caractéristiques des matières premières, gestion de la chaîne d'approvisionnement et usage durable des ressources dans les contextes ouest-africains.

Acquis d'apprentissage

- Définir l'énergie biomasse et expliquer son rôle dans les systèmes d'énergie renouvelable, l'accès à l'énergie, la gestion des déchets et les moyens de subsistance en milieu rural.
- Identifier les principales ressources de biomasse agricoles, forestières, animales, municipales et agro-industrielles et leurs usages énergétiques potentiels.
- Expliquer comment la teneur en humidité, le pouvoir calorifique, la masse volumique apparente et la teneur en cendres influent sur la qualité du combustible, sa manutention et la performance de conversion.
- Décrire les bonnes pratiques de collecte, de transport, de stockage, de séchage, de réduction granulométrique, de briquetage/granulation et de maîtrise des contaminations des matières premières.
- Évaluer la disponibilité élémentaire de la ressource de biomasse et reconnaître les considérations de récolte durable, de protection de l'environnement et d'usages concurrents.
- Relier les ressources locales de biomasse à des produits énergétiques réalistes et à des applications communautaires et industrielles.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
BM-B1-1 Introduction à l'énergie biomasse	Définition et importance de la biomasse ; produits énergétiques (chaleur, électricité, biogaz et biocarburants) ; la biomasse dans la transition vers les énergies renouvelables ; accès et sécurité énergétiques ; tendances mondiales et ouest-africaines ; politiques, opportunités et freins au développement.
BM-B1-2 Ressources et matières premières de biomasse	Résidus agricoles ; résidus forestiers et de transformation du bois ; déjections animales ; déchets organiques municipaux et industriels ; options de conversion énergétique ; disponibilité, collecte et considérations de durabilité pour les matières premières courantes en Afrique de l'Ouest.
BM-B1-3 Caractéristiques des matières premières	Teneur en humidité et implications pour le séchage ; pouvoir calorifique et potentiel énergétique ; masse volumique apparente, transport et stockage ; teneur en cendres, implications pour la combustion et la maintenance et sélection comparative des matières premières.
BM-B1-4 Gestion des matières premières	Logistique de collecte et de transport ; méthodes de stockage, ventilation et protection contre l'humidité ; pratique du premier entré, premier sorti ; prétraitement par séchage, déchiquetage, broyage, briquetage et granulation ; préservation de la qualité des matières premières.
BM-B1-5 Gestion durable de la ressource de biomasse	Évaluation de la disponibilité de la ressource ; approvisionnement saisonnier ; récolte durable ; considérations environnementales ; prévention de la déforestation, de l'appauvrissement des sols et en nutriments et du prélèvement excessif de résidus ; équilibre entre usage énergétique, agriculture, écosystèmes et moyens de subsistance locaux.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Réaliser un inventaire des ressources locales de biomasse et classer chaque matière première par source, saisonnalité et produit énergétique possible.
- Comparer des matières premières types à l'aide d'une matrice de décision simple humidité/pouvoir calorifique/masse volumique apparente/cendres, à partir des données fournies ou de démonstrations réalisées en sécurité.
- Élaborer un plan de collecte, de stockage et de prétraitement pour une matière première disponible localement et identifier les mesures de protection de l'environnement.

Approche d'évaluation

Quiz de connaissances, complété par une évaluation des matières premières et des ressources locales, une tâche d'interprétation des caractéristiques des matières premières et un court cas de gestion durable.

Progression et articulation

Fournit les bases de ressource et de matières premières nécessaires à la sélection des conversions du BM-B2, au biogaz du BM-B3, à la gazéification et aux systèmes ruraux du BM-B4 et à l'ensemble des modules de niveau Avancé.

5.2 BM-B2 – Fondamentaux des technologies de conversion de la biomasse

Code du cours	BM-B2
---------------	-------

Niveau	Base
Unités d'apprentissage codées	3 (BM-B2-1 à BM-B2-3)
Description du cours	Présenter les principales filières de conversion de la biomasse brute en chaleur, en gaz, en combustibles solides et en carburants liquides utiles, en insistant sur l'adéquation entre la matière première, le besoin énergétique et la technologie appropriée.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer pourquoi la biomasse nécessite souvent une conversion préalable à un usage énergétique efficace.
- Distinguer les filières de conversion thermochimiques, biochimiques, mécaniques et chimiques et identifier leurs produits types.
- Expliquer, à un niveau introductif, les notions d'extraction d'huile, de transestérification, de briquetage et de densification.
- Comparer les principaux avantages, limites, exigences en matière première et échelles d'application des technologies de conversion courantes.
- Sélectionner une filière de conversion plausible pour une matière première et une demande énergétique définies, à partir de critères techniques, pratiques et de durabilité.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
BM-B2-1 Vue d'ensemble des filières de conversion de la biomasse	Notions de conversion d'énergie ; combustion directe, gazéification et filières thermochimiques connexes ; digestion anaérobie et autres filières biochimiques ; densification mécanique et extraction d'huile ; conversion chimique élémentaire ; facteurs de sélection technologique tels que l'état de la matière première, l'échelle, le produit et les capacités locales.
BM-B2-2 Procédés de conversion mécanique et chimique	Bases et méthodes d'extraction d'huile ; principes introductifs de la transestérification et étapes du procédé ; briquetage et densification ; matières premières courantes, concepts d'équipements, avantages, limites et applications.
BM-B2-3 Comparaison des technologies de conversion	Comparaison des conversions thermochimique, biochimique, mécanique et chimique ; avantages et limites ; applications adaptées ; critères de sélection technologique fondés sur l'humidité, l'échelle, le vecteur énergétique recherché, le coût, la maintenance, les compétences et l'impact environnemental.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Construire une carte des filières de conversion reliant des matières premières ouest-africaines représentatives à des produits de chaleur, d'électricité, de biogaz, de briquettes/granulés et de carburants liquides.
- Utiliser une matrice de sélection structurée pour choisir une technologie adaptée aux balles de riz, aux épluchures de manioc, au fumier, à la sciure ou aux déchets d'agrotransformation.
- Réaliser ou simuler une opération de densification/prétraitement et comparer les implications de manutention de la biomasse en vrac et densifiée.

Approche d'évaluation

Quiz complété par un tableau de comparaison des filières de conversion et un court cas de sélection technologique exigeant de justifier la matière première, le procédé et l'usage final.

Progression et articulation

Prépare les apprenants aux modules dédiés au biogaz et à la gazéification ainsi qu'aux cours avancés de conception de procédés BM-A1 à BM-A4.

5.3 BM-B3 – Fondamentaux de la technologie du biogaz

Code du cours	BM-B3
Niveau	Base
Unités d'apprentissage codées	5 (BM-B3-1 à BM-B3-5)

Description du cours

Développer une compréhension fondamentale de la digestion anaérobie, des composants d'une installation de biogaz, des conditions d'exploitation et des usages finaux pratiques, avant que les apprenants n'abordent la conception d'ingénierie et l'optimisation.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer ce qu'est le biogaz, sa composition principale et l'importance de la digestion anaérobie pour les applications de valorisation énergétique des déchets.
- Décrire les principales étapes biologiques de la digestion anaérobie et les conditions requises pour une digestion stable.
- Identifier les digesteurs, les systèmes d'alimentation et de soutirage, le stockage du gaz, les canalisations et les appareils d'utilisation, et expliquer leurs fonctions.
- Expliquer comment la température, le pH, le temps de séjour et la qualité de la matière première influent sur la production de gaz.
- Reconnaître les applications courantes du biogaz pour la cuisson, le chauffage, l'éclairage, l'agriculture et la production d'électricité à petite échelle.
- Faire preuve d'une vigilance élémentaire en matière de sécurité et de maintenance lors de l'étude des composants et de la valorisation du biogaz.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
BM-B3-1 Introduction à la technologie du biogaz	Définition et importance ; matières premières courantes ; biogaz et digestat ; composition et propriétés élémentaires ; bénéfices énergétiques et de gestion des déchets ; avantages et limites.
BM-B3-2 Procédé de digestion anaérobie	Hydrolyse, acidogenèse, acétogenèse et méthanogenèse ; rôles microbiens ; enchaînement des conversions ; température, pH, humidité et nutriments et autres conditions d'une digestion efficace.
BM-B3-3 Composants d'une installation de biogaz	Fonction du digesteur ; ouvrages d'alimentation et de soutirage ; systèmes de stockage du gaz ; canalisations, vannes et appareils d'utilisation ; gestion du bio-lisier et du digestat ; vigilance en matière d'inspection et de maintenance courantes.
BM-B3-4 Facteurs influant sur la production de biogaz	Plages de température psychrophile, mésophile et thermophile ; maîtrise du pH ; temps de séjour ; qualité et charge de la matière première ; causes de faible performance et mesures élémentaires d'amélioration.
BM-B3-5 Applications du biogaz	Cuisson, éclairage et chauffage ; usages agricoles et séchage des récoltes ; production d'électricité à petite échelle ; digestat comme fertilisant ; bénéfices pratiques et limites de la valorisation du biogaz.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Élaborer une carte du procédé de digestion anaérobie présentant les quatre étapes biologiques et les conditions d'exploitation requises.
- Légender un schéma d'installation de biogaz et retracer les flux de matière première, de gaz et de digestat de l'entrée jusqu'à l'usage final.
- Interpréter des scénarios simples de température, de pH et de temps de séjour et identifier leurs effets probables sur la production de gaz.

Approche d'évaluation

Quiz de connaissances, complété par une tâche de schéma de procédé/d'identification des composants et un court cas portant sur les conditions d'exploitation de la production de biogaz.

Progression et articulation

Fournit les bases directes de la conception, du dimensionnement, de l'analyse de performance et de l'optimisation avancés des installations de biogaz du BM-A1.

5.4 BM-B4 – Fondamentaux de la gazéification de la biomasse et des biocarburants

Code du cours	BM-B4
Niveau	Base
Unités d'apprentissage codées	6 (BM-B4-1 à BM-B4-6)
Description du cours	Établir les notions élémentaires de gazéification et de gaz de synthèse, tout en étendant l'apprentissage au suivi des performances, aux systèmes d'énergie biomasse décentralisés, aux décisions de ressource et de dimensionnement et à une introduction à la faisabilité de projet.

Acquis d'apprentissage

- Définir la gazéification de la biomasse et expliquer comment une conversion en atmosphère pauvre en oxygène produit du gaz de synthèse.
- Identifier les concepts de gazéificateurs à tirage ascendant, descendant, transversal et à lit fluidisé et comparer leurs avantages et limites élémentaires.
- Décrire les étapes de séchage, de pyrolyse, d'oxydation et de réduction et leur relation avec la formation du gaz de synthèse.
- Interpréter les indicateurs élémentaires de performance d'une installation et expliquer le rôle de la collecte de données, de l'optimisation de l'exploitation et des considérations de réseau et de système énergétique.
- Expliquer les mini-réseaux biomasse décentralisés, les systèmes communautaires et les applications à usage productif pertinents pour l'Afrique de l'Ouest.
- Réaliser une évaluation élémentaire de la ressource et de la demande et reconnaître les considérations de dimensionnement, de coût-bénéfice, financières et socio-économiques.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
BM-B4-1 Introduction à la gazéification de la biomasse	Principes et objectifs de la gazéification ; gazéification et combustion ; produits et gaz de synthèse ; types de gazéificateurs, notamment à tirage ascendant, descendant, transversal et à lit fluidisé ; critères de sélection élémentaires.
BM-B4-2 Étapes du procédé de gazéification	Séchage, pyrolyse, oxydation et réduction ; relation entre les étapes ; formation et finalité du gaz de synthèse ; compréhension du procédé pour une exploitation sûre et efficace.
BM-B4-3 Suivi des performances et analyse de rendement	Indicateurs de rendement de l'installation ; efficacité d'utilisation de la matière première et facteur de charge ; collecte des données d'exploitation ; tendances de performance ; optimisation et considérations élémentaires d'intégration au réseau.
BM-B4-4 Systèmes d'énergie biomasse décentralisés et ruraux	Applications en mini-réseau et à l'échelle communautaire ; usage productif de l'énergie dans l'agrotransformation ; fiabilité et qualité du service local ; participation économique des femmes ; difficultés de mise en œuvre et stratégies de pérennisation.
BM-B4-5 Évaluation de la ressource et dimensionnement des systèmes	Évaluation et cartographie de la ressource de biomasse ; approvisionnement saisonnier ; évaluation de la demande ; sélection des technologies ; logique de dimensionnement des systèmes ; facteurs influant sur la capacité ; analyse de cas d'énergie rurale en Afrique de l'Ouest.
BM-B4-6 Évaluation technico-économique et socio-économique	Coûts et bénéfices du projet ; notions de valeur actuelle nette, de taux de rentabilité interne, de délai de récupération et de LCOE ; effets sur l'emploi et les moyens de subsistance ; bénéfices en matière d'éducation, de santé et de genre ; comités villageois, coopératives, partenariats public-privé et modèles d'entreprise communautaire ; durabilité et gouvernance.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Élaborer un schéma des étapes de gazéification et comparer les types de gazéificateurs pour au moins deux matières premières.
- Interpréter un jeu de données simple de surveillance d'une installation biomasse et identifier les problèmes de rendement ou d'exploitation.
- Traiter un cas de mini-réseau/de dimensionnement de la ressource à partir de la disponibilité en matière première et de la demande énergétique de la communauté.

- Préparer une évaluation élémentaire coût-bénéfice et socio-économique pour une option d'énergie biomasse communautaire.

Approche d'évaluation

Quiz complété par une interprétation du gazéifieur et du procédé, une tâche de ressource et de dimensionnement et un court cas de faisabilité de projet rural.

Progression et articulation

Construit les bases nécessaires à la gazéification avancée du BM-A2, aux biocarburants du BM-A3 et à la conception de la production d'électricité et des systèmes ruraux du BM-A4.

5.5 BM-B5 – Installation, exploitation, maintenance et sécurité des systèmes biomasse

Code du cours	BM-B5
Niveau	Base
Unités d'apprentissage codées	5 (BM-B5-1 à BM-B5-5, codification normalisée)
Description du cours	Développer les bases pratiques permettant d'installer, de mettre en service, d'exploiter, de surveiller, de maintenir et de dépanner les systèmes biomasse en sécurité, dans les conditions locales d'infrastructure et d'environnement.

Acquis d'apprentissage

- Décrire les principales étapes de préparation du site, d'installation des équipements, d'essais, de mise en service et de réception d'un système biomasse.
- Appliquer les procédures élémentaires de démarrage, de fonctionnement normal, de surveillance et d'arrêt, à l'aide de listes de contrôle et de registres d'exploitation.
- Distinguer la maintenance préventive et corrective et décrire les pratiques d'inspection, de remplacement de composants et de documentation.
- Utiliser un processus structuré de recherche de pannes pour identifier les symptômes, les causes possibles, les vérifications de diagnostic et les actions correctives.
- Identifier les principaux dangers professionnels, d'incendie, de gaz, thermiques, mécaniques, électriques, biologiques et environnementaux et les mesures de maîtrise appropriées.
- Expliquer comment les infrastructures, le climat, la disponibilité des pièces de rechange et les capacités techniques locales influent sur l'exploitation-maintenance dans les projets ouest-africains.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
BM-B5-1 Procédures d'installation et mise en service	Choix et préparation du site ; disponibilité de la biomasse, accès et proximité des usagers ; travaux de génie civil, fondations, drainage et stockage ; installation mécanique, électrique et d'instrumentation ; inspection préalable à la mise en service ; mise en service à froid et à chaud ; vérification des performances, documentation et transfert à l'exploitant.
BM-B5-2 Exploitation et surveillance du système	Inspections avant démarrage ; vérifications de la matière première, des équipements et de la sécurité ; démarrage, fonctionnement normal et arrêt ; instrumentation et paramètres surveillés ; registres d'exploitation, relevés de performance, interprétation des données et réponse aux anomalies.
BM-B5-3 Maintenance préventive et corrective	Maintenance préventive et maintenance corrective ; planification et programmation de la maintenance ; routines d'inspection ; lubrification, nettoyage et réglage ; remplacement de composants ; pièces de rechange ; documentation de maintenance et contraintes en milieu décentralisé.
BM-B5-4 Recherche de pannes et diagnostic des défauts	Principes de recherche de pannes ; problèmes d'exploitation courants ; méthodes de diagnostic visuelles, mécaniques, électriques et de procédé ; raisonnement sur les causes racines ; action corrective ; signalement des défauts et vérification après réparation.
BM-B5-5 Pratiques de santé et sécurité au travail et de protection de	Identification des dangers et maîtrise des risques ; sécurité incendie et gaz ; ventilation et réponse aux fuites ; PPE ; procédures de travail en sécurité ; déchets de biomasse, cendres et digestat et

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
l'environnement	conformité environnementale ; santé des communautés et culture de sécurité.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Élaborer une liste de contrôle d'installation et de pré-mise en service pour un petit système biomasse.
- Renseigner un registre de démarrage/arrêt et de surveillance quotidienne à partir d'un scénario d'exploitation simulé.
- Préparer un calendrier de maintenance préventive et diagnostiquer un ensemble de défauts d'installation courants à partir de leurs symptômes.
- Réaliser une évaluation des dangers en salle ou en atelier et préciser les mesures de maîtrise et les PPE requis.

Approche d'évaluation

Éléments probants de liste de contrôle pratique et de registre, cas de maintenance/de recherche de pannes, évaluation des risques de sécurité et quiz ciblé.

Progression et articulation

Fournit les bases opérationnelles nécessaires à l'installation et à l'exploitation-maintenance avancées du BM-A5 et soutient un travail pratique en sécurité dans l'ensemble des modules BM-A1 à BM-A4.

5.6 BM-A1 – Conception, exploitation et optimisation avancées des systèmes de biogaz

Code du cours	BM-A1
Niveau	Avancé
Unités d'apprentissage codées	5 (BM-A1-1 à BM-A1-5)
Description du cours	Développer la compétence d'ingénierie en conception d'installations de biogaz, préparation des matières premières, dimensionnement des digesteurs, analyse de performance, optimisation des procédés et choix des usages finaux pour des applications domestiques, institutionnelles, agricoles et de petite industrie.

Acquis d'apprentissage

- Sélectionner les technologies de digesteur adaptées à partir de critères de matière première, de climat, d'échelle, de maintenance et d'usage final.
- Caractériser les matières premières à l'aide des matières sèches totales et volatiles, du rapport C/N, du pH, de l'humidité, des cendres et de la lignine et du potentiel biogaz, et évaluer les options de co-digestion et de prétraitement.
- Calculer et interpréter le volume du digesteur, le temps de séjour hydraulique, la charge organique appliquée, la production et le rendement en gaz et les autres indicateurs de performance à l'aide des méthodes du cours.
- Diagnostiquer l'instabilité du procédé à partir des tendances de production de gaz, de teneur en méthane, de pH, de charge et de conditions d'exploitation.
- Appliquer des mesures d'optimisation portant sur l'équilibre des matières premières, le prétraitement, le brassage, la maîtrise de la température et du procédé et les considérations nutritionnelles.
- Évaluer les options de cuisson et de chauffage, de production d'électricité, d'épuration et de stockage du gaz pour des applications de biogaz définies.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
BM-A1-1 Principes de conception des installations de biogaz	Critères de conception et exigences d'étanchéité, de structure, de résistance à la corrosion et de maintenance ; considérations climatiques ouest-africaines ; sélection des matières premières ; concepts de digesteurs à dôme fixe, à cloche mobile, à écoulement piston et de type CSTR ; alimentation en lisier, dimensionnement du digesteur fondé sur le temps de séjour hydraulique et estimation de la production de gaz.
BM-A1-2 Évaluation et préparation des matières premières	Humidité, matières sèches totales, matières volatiles, rapport C/N, pH, cendres et lignine ; disponibilité des matières premières et inhibiteurs ; co-digestion et ratios de mélange ; prétraitement mécanique, thermique, chimique et biologique ; tri, nettoyage et préparation du

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
	lisier.
BM-A1-3 Analyse de performance de la digestion anaérobie	Charge organique appliquée, temps de séjour hydraulique, production de gaz, teneur en méthane, pression et débit de gaz et rendement en gaz ; tendances de performance ; faible production de gaz, acidification et odeurs et moussage ; cycle de surveillance et réponse corrective.
BM-A1-4 Techniques d'optimisation du procédé	Paramètres critiques du procédé ; température, pH, acides gras volatils, charge organique appliquée et temps de séjour hydraulique ; stratégies de co-digestion, de prétraitement, de brassage, de régulation de température et de nutriments ; traitement des faibles rendements, de l'acidification, des mousses et des fuites de gaz.
BM-A1-5 Systèmes de valorisation du biogaz	Cuisson et chauffage au biogaz, production d'eau chaude et séchage des récoltes ; production d'électricité par groupe électrogène ; notions d'épuration du gaz et d'enrichissement en méthane ; options de stockage ; adéquation entre qualité du gaz, demande et exigences de sécurité et usage final.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Concevoir et dimensionner une installation de biogaz communautaire ou d'agrotransformation à partir d'un scénario de matière première et de temps de séjour hydraulique fourni.
- Caractériser au moins deux matières premières et élaborer un plan justifié de co-digestion et de prétraitement.
- Calculer les indicateurs de charge organique appliquée, de temps de séjour hydraulique et de rendement en gaz et diagnostiquer un jeu de données de performance en baisse.
- Comparer les options de valorisation du biogaz et formuler une recommandation d'optimisation et de sécurité.

Approche d'évaluation

Tâche d'ingénierie de conception et de dimensionnement, exercice d'évaluation des matières premières, cas d'analyse de performance et de recherche de pannes et quiz technique.

Progression et articulation

Intègre les compétences de base en biogaz et soutient la conception avancée de systèmes d'énergie rurale du BM-A4 ainsi que l'exploitation et la maintenance sur le cycle de vie du BM-A5.

5.7 BM-A2 – Conception et analyse de performance des systèmes de gazéification de la biomasse

Code du cours	BM-A2
Niveau	Avancé
Unités d'apprentissage codées	5 (BM-A2-1 à BM-A2-5)
Description du cours	Développer une compétence avancée en sélection de gazéificateurs et de réacteurs, conduite du procédé, épuration et qualité du gaz de synthèse, analyse de rendement et de bilan énergétique, recherche de pannes et évaluation des applications.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer les réactions et les étapes de la gazéification ainsi que les propriétés du gaz de synthèse, et sélectionner les types de réacteurs adaptés à des matières premières et applications définies.
- Analyser les effets de la température, de la pression, du rapport air-combustible et des propriétés de la matière première sur la performance de la gazéification.
- Identifier les principaux contaminants du gaz de synthèse et sélectionner, au niveau du curriculum, les approches appropriées d'épuration des goudrons, des particules et du gaz.
- Calculer et interpréter le rendement de gazéification, les bilans énergétiques, les pertes thermiques et les indicateurs de performance à l'aide des méthodes du cours.
- Diagnostiquer les problèmes de performance courants et recommander des réponses en matière de conduite du procédé ou de maintenance.

- Évaluer les applications thermiques, de production d'électricité et de chaleur industrielle de procédé à partir de critères techniques, environnementaux et technico-économiques.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
BM-A2-1 Fondamentaux de la gazéification et conception des réacteurs	Principes thermochimiques et réactions ; séchage/pyrolyse/oxydation/réduction ; composition et propriétés du gaz de synthèse ; gazéificateurs à lit fixe et à lit fluidisé ; sélection du réacteur selon la matière première, l'échelle, la qualité de gaz, la complexité et l'application.
BM-A2-2 Paramètres d'exploitation et conduite du procédé	Effets de la température et de la pression ; rapport air-combustible ; humidité, granulométrie, cendres et régularité de la matière première ; capteurs et systèmes de conduite du procédé ; maintien d'une conversion stable et réduction des goudrons et des problèmes d'exploitation.
BM-A2-3 Production et épuration du gaz de synthèse	Composition du gaz de synthèse ; particules, goudrons, humidité et autres contaminants ; notions d'élimination des goudrons ; cyclones, filtres, lavage ou autres étapes d'épuration décrites dans le matériel source ; évaluation de la qualité du gaz au regard de l'usage final.
BM-A2-4 Évaluation de la performance du système	Rendement de gazéification ; calculs de bilan énergétique ; analyse des pertes thermiques ; indicateurs de performance de la matière première et du gaz de synthèse ; traitement des cas de faible rendement, d'instabilité de température et de mauvaise qualité de gaz.
BM-A2-5 Applications de la gazéification	Usage thermique, production d'électricité et chaleur industrielle de procédé ; bénéfices et contraintes environnementaux ; substitution de combustible ; adéquation aux applications ; évaluation technico-économique élémentaire et arbitrages d'exploitation.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Comparer les gazéificateurs à lit fixe et à lit fluidisé pour des matières premières et des échelles d'exploitation sélectionnées.
- Analyser des scénarios de température, de rapport air-combustible et de matière première et identifier les effets attendus sur le gaz de synthèse et la stabilité du procédé.
- Concevoir une chaîne conceptuelle d'épuration du gaz de synthèse pour un usage final défini et justifier chaque étape.
- Traiter un cas simplifié de bilan énergétique et de rendement et diagnostiquer un scénario de performance dégradée.

Approche d'évaluation

Exercice de sélection et de conception de réacteur, cas de conduite du procédé et de qualité du gaz de synthèse, calcul de rendement et quiz technique ciblé.

Progression et articulation

S'appuie directement sur le BM-B4 et soutient la production d'électricité par gazéification et la conception de projet du BM-A4 ainsi que l'exploitation-maintenance avancée du BM-A5.

5.8 BM-A3 – Technologies de production de biocarburants et gestion de la qualité

Code du cours	BM-A3
Niveau	Avancé
Unités d'apprentissage codées	5 (BM-A3-1 à BM-A3-5)
Description du cours	Développer une compréhension avancée des filières de production du biodiesel et du bioéthanol, des équipements et de la conduite des procédés, de la purification et de l'épuration, de la gestion de la qualité des carburants et de la sécurité du stockage, de la manipulation et de la distribution.

Acquis d'apprentissage

- Évaluer les huiles et graisses et autres matières premières adaptées à la production de biodiesel et expliquer le procédé de transestérification et les équipements requis.
- Expliquer la préparation des matières premières du bioéthanol, la maîtrise de la fermentation et les étapes de distillation et de déshydratation.

- Décrire les principes de purification, d'épuration, de récupération et de valorisation des sous-produits et d'optimisation des procédés pour les biocarburants liquides.
- Interpréter les principaux paramètres de qualité des carburants et expliquer la finalité des essais de laboratoire et des normes carburants applicables.
- Appliquer les principes de stockage, de manipulation et de transport en sécurité, y compris la maîtrise des contaminations, les dangers d'incendie et chimiques et la préservation de la qualité.
- Évaluer le rendement du procédé, l'efficacité, la qualité et les arbitrages d'exploitation à l'aide des calculs issus du matériel source et de données de cas.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
BM-A3-1 Technologies de production du biodiesel	Sélection des matières premières huiles et graisses ; considérations relatives aux triglycérides et aux acides gras libres ; principe de la transestérification ; rôles de l'alcool et du catalyseur au niveau conceptuel de l'ingénierie ; équipements de procédé, séparation et récupération ; calculs de rendement et de performance du procédé.
BM-A3-2 Technologies de production du bioéthanol	Préparation des matières premières sucrières, amylacées et lignocellulosiques telle que traitée dans le matériel source ; procédé de fermentation et sa maîtrise ; problèmes de contamination, de température et de pH ; recherche de pannes en contexte industriel ; distillation et déshydratation pour atteindre la concentration en éthanol requise.
BM-A3-3 Transformation et épuration des biocarburants	Techniques de purification ; élimination de l'eau résiduelle et des impuretés ; valorisation des sous-produits ; optimisation du procédé, rendement et efficacité énergétique et matière ; intégration des étapes de récupération et d'amélioration de la qualité.
BM-A3-4 Contrôle qualité des carburants et normes	Masse volumique et autres paramètres de qualité des carburants traités dans le matériel source ; procédures d'échantillonnage et d'essai ; interprétation des résultats de laboratoire ; acceptation qualité ; rôle des normes carburants nationales et internationales et de la documentation.
BM-A3-5 Stockage, manipulation et distribution	Choix et capacité des systèmes de stockage ; compatibilité des matériaux et préservation de la qualité ; sécurité incendie et chimique ; procédures de transfert et de manipulation ; efficacité du transport, prévention des contaminations et planification de la distribution.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Préparer des schémas de procédé pour la production de biodiesel et de bioéthanol et identifier les points critiques de maîtrise et de qualité.
- Interpréter un ensemble de données de rendement de procédé ou de qualité de carburant et déterminer si une investigation corrective est nécessaire.
- Élaborer une liste de contrôle de stockage et de manipulation en sécurité pour une petite installation de biocarburants, sans réaliser de production chimique non supervisée.
- Comparer les options de matières premières locales pour le biodiesel ou le bioéthanol à partir de critères de disponibilité, de qualité, de durabilité et de coût.

Approche d'évaluation

Tâche de schéma de procédé et de sélection des matières premières, interprétation de données de contrôle qualité, cas de stockage et de sécurité et quiz technique ou exercice de calcul.

Progression et articulation

S'appuie sur les notions élémentaires de conversion des modules BM-B2 et BM-B4 et se relie à la production d'électricité intégrée à partir de biomasse, à la logistique des carburants et à la gestion du cycle de vie des modules BM-A4 et BM-A5.

5.9 BM-A4 – Production d'électricité à partir de biomasse et conception de systèmes énergétiques ruraux

Code du cours	BM-A4
Niveau	Avancé
Unités d'apprentissage	6 (BM-A4-1 à BM-A4-6)

codées	
Description du cours	Intégrer la conversion de la biomasse à l'ingénierie des centrales électriques et de cogénération, à la conception de services énergétiques décentralisés, à l'évaluation de la ressource et de la demande, au dimensionnement, à la faisabilité financière et à la mise en œuvre communautaire.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer la production d'électricité par combustion de biomasse, les systèmes vapeur et les configurations de cogénération (CHP).
- Identifier la manutention du combustible, les chaudières, les turbines, les alternateurs et les systèmes électriques et expliquer leur interaction au sein d'une centrale biomasse.
- Calculer et interpréter les indicateurs élémentaires de rendement d'installation, de consommation de combustible et de disponibilité et de performance à l'aide des méthodes du matériel source.
- Concevoir une solution conceptuelle d'énergie biomasse décentralisée ou en mini-réseau reliant un approvisionnement fiable en matière première à une demande communautaire ou à usage productif.
- Réaliser une évaluation de la ressource de biomasse et de la demande et sélectionner et dimensionner la capacité et la technologie du système pour un site défini.
- Appliquer les notions d'évaluation coût-bénéfice, financière et socio-économique et proposer des modalités appropriées de participation et de propriété communautaires.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
BM-A4-1 Technologies de production d'électricité à partir de biomasse	Production d'électricité par combustion ; préparation de la biomasse et étapes de combustion ; production de vapeur ; concepts de turbines à vapeur ; cogénération ; adéquation entre électricité et chaleur utile et demande industrielle ou communautaire.
BM-A4-2 Composants et exploitation d'une centrale biomasse	Réception, manutention et alimentation du combustible ; chaudières et systèmes vapeur ; turbines et alternateurs ; production et distribution électriques ; interactions entre composants, vérifications d'exploitation et considérations de rendement.
BM-A4-3 Suivi des performances et analyse de rendement	Indicateurs de rendement de l'installation ; performance électrique et thermique ; consommation de matière première et production d'énergie ; disponibilité et registres d'exploitation ; identification des pertes et optimisation de l'exploitation.
BM-A4-4 Systèmes d'énergie biomasse décentralisés et ruraux	Mini-réseaux, systèmes à l'échelle communautaire et usage productif ; applications agricoles et d'agrotransformation ; fiabilité du service, entreprises locales et moyens de subsistance ; disponibilité des systèmes, gouvernance et enjeux de mise en œuvre en milieu rural.
BM-A4-5 Évaluation de la ressource et dimensionnement des systèmes	Estimation de la biomasse disponible et approvisionnement saisonnier ; évaluation de la demande et de la charge ; sélection des technologies ; dimensionnement adapté à la ressource et à la demande énergétique ; considérations de logistique, de stockage, de redondance et d'évolutivité.
BM-A4-6 Évaluation technico-économique et socio-économique	Analyse coût-bénéfice ; coûts d'investissement et d'exploitation et recettes ou économies ; notions de valeur actuelle nette, de taux de rentabilité interne, de délai de récupération et de LCOE ; création d'emplois et entreprises locales ; modèles de participation et de propriété communautaires ; décisions de faisabilité et de pérennité.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Tracer un schéma des flux d'énergie d'une centrale biomasse ou de cogénération et identifier les principaux composants et points de pertes.
- Traiter un cas simple de consommation de combustible et de rendement à l'aide des formules et des structures de données fournies dans le support de cours.
- Concevoir un projet de mini-réseau biomasse rural à partir d'un inventaire de ressources et d'un profil de demande fournis.
- Préparer une comparaison de faisabilité technique, financière et socio-économique concise pour deux options technologiques.

Approche d'évaluation

Analyse de système de production d'électricité et de cogénération, exercice de ressource et de dimensionnement, calcul de rendement et cas intégré de faisabilité et de conception de projet de mini-réseau.

Progression et articulation

Intègre les apprentissages de l'ensemble du programme et fournit le contexte de projet et de conception système nécessaire à la mise en service avancée, à l'exploitation-maintenance et à la gestion du cycle de vie du BM-A5.

5.10 BM-A5 – Installation, exploitation, maintenance et sécurité des systèmes biomasse

Code du cours	BM-A5
Niveau	Avancé
Unités d'apprentissage codées	5 (BM-A5-1 à BM-A5-5)
Description du cours	Consolider une compétence pratique avancée en installation et mise en service, conduite d'exploitation, suivi des performances, planification de la maintenance, diagnostic des défauts et gestion des risques professionnels et environnementaux, pour l'ensemble des technologies biomasse.

Acquis d'apprentissage

- Planifier et vérifier la préparation du site, l'installation mécanique et électrique, l'inspection du système, les essais, la mise en service et la réception au regard des exigences techniques.
- Appliquer des procédures d'exploitation structurées et utiliser l'instrumentation, les registres et les indicateurs de performance pour surveiller l'état et la production de l'installation.
- Élaborer des plans de maintenance préventive et corrective à partir des routines d'inspection, de la criticité des composants, des besoins en pièces de rechange et des registres de maintenance.
- Utiliser un diagnostic systématique des défauts pour relier les symptômes à des causes de procédé, mécaniques, électriques ou de commande, et vérifier l'action corrective.
- Appliquer l'évaluation et la maîtrise des risques OHSE pour l'incendie, les gaz combustibles ou toxiques, la pression, les surfaces chaudes, les produits chimiques, les matières biologiques, les machines tournantes et l'électricité.
- Intégrer la conformité environnementale, la gestion des déchets et des émissions, la documentation et l'amélioration continue de la sécurité dans la gestion du cycle de vie d'une installation biomasse.

Plan de cours détaillé

Thème	Thèmes et sous-thèmes principaux
BM-A5-1 Procédures d'installation et mise en service	Préparation du site et implantation des équipements ; installation mécanique et électrique ; contrôles d'alignement et de raccordement ; instrumentation ; essais du système ; séquence de mise en service ; vérification des performances ; documentation et réception.
BM-A5-2 Exploitation et surveillance du système	Procédures d'exploitation et démarrage/arrêt en sécurité ; maîtrise de la matière première et du procédé ; instrumentation et surveillance ; enregistrement des performances, disponibilité de l'installation et interprétation des tendances ; réponse aux conditions anormales.
BM-A5-3 Maintenance préventive et corrective	Planification et programmation de la maintenance ; routines d'inspection ; lubrification, nettoyage, étalonnage et contrôles d'usure ; remplacement de composants ; pièces de rechange ; maintenance corrective et documentation au service de la fiabilité.
BM-A5-4 Recherche de pannes et diagnostic des défauts	Problèmes courants de procédé, mécaniques, électriques et de commande ; outils et méthodes de diagnostic ; analyse des causes racines ; action corrective et vérification après réparation ; efficacité de la maintenance et documentation des défauts.
BM-A5-5 Pratiques de santé et sécurité au travail et de protection de l'environnement	Identification des dangers et évaluation des risques ; sécurité incendie et gaz ; PPE et procédures de travail en sécurité ; mesures de maîtrise des risques chimiques, biologiques, thermiques et électriques ; gestion des émissions, des cendres, du digestat et des déchets ; conformité environnementale et culture de sécurité.

Activités pratiques / de simulation recommandées

- Préparer un plan de mise en service et de réception pour une technologie biomasse sélectionnée, comprenant le séquençage des essais en sécurité et la documentation.
- Interpréter des registres d'exploitation et des indicateurs clés et identifier les problèmes émergents de performance ou de maintenance.
- Élaborer un plan de maintenance préventive fondé sur les risques et diagnostiquer un scénario intégré de défaut de procédé, mécanique et électrique.
- Réaliser une évaluation des risques OHSE pour une installation biomasse et définir les mesures de maîtrise techniques, organisationnelles et de PPE.

Approche d'évaluation

Portfolio intégré de mise en service et d'exploitation-maintenance, cas de suivi des performances, exercice de diagnostic de défauts, évaluation des risques OHSE et quiz technique.

Progression et articulation

Module opérationnel de synthèse qui consolide le programme et prépare les apprenants à une application supervisée en milieu professionnel, aux expérimentations menées par les formateurs et à l'évaluation ultérieure en vue de la certification dans le cadre du WP4.

6. Lignes directrices d'enseignement, d'apprentissage et de formation pratique

6.1 Modèle de dispensation

La dispensation doit reposer sur un modèle VET mixte dans lequel l'apprentissage numérique en autonomie et les séances encadrées par un formateur sont associés à des calculs, à la cartographie visuelle des procédés, à des démonstrations en laboratoire et en atelier, à la résolution de problèmes sur cas et à un apprentissage supervisé sur le terrain ou en milieu professionnel. La profondeur pratique doit augmenter, de l'identification et du respect des procédures en sécurité au niveau Base jusqu'à la conception, l'optimisation, le diagnostic et la prise de décision de projet au niveau Avancé.

6.2 Séquence d'apprentissage recommandée au sein d'un module

Étape	Orientations pour le formateur
1. Mobiliser les connaissances antérieures	Relier le sujet à une matière première, une installation, un flux de déchets, un besoin énergétique ou un problème professionnel local.
2. Expliquer le noyau technique	Recourir à un enseignement concis, à des schémas et au matériel de cours source pour poser les concepts, la terminologie, les relations entre procédés et les conditions de sécurité.
3. Démontrer ou modéliser	Utiliser des démonstrations en sécurité, des échantillons, des schémas de procédés, des calculs, des données ou des simulations pour rendre le procédé observable.
4. Application guidée	Les apprenants réalisent des tâches structurées de matière première, de conception, de dimensionnement, de surveillance, de maintenance ou de recherche de pannes, avec le retour du formateur.
5. Éléments probants autonomes	Les apprenants réalisent un quiz, un calcul, un cas, un relevé pratique ou une tâche de conception ou d'évaluation aligné sur les acquis d'apprentissage.
6. Réfléchir et relier	Relier le module au cours suivant, à la pratique professionnelle, à la responsabilité environnementale et au portfolio de l'apprenant.

6.3 Catégories de formation pratique

Catégorie pratique	Exemples dans le programme Biomasse
Travail sur la matière première et la ressource	Inventaire des ressources ; interprétation de l'humidité, de la masse volumique apparente et des cendres ; caractérisation des matières premières ; planification de la collecte et du stockage ; décisions de co-digestion et de prétraitement.
Travail sur les procédés et la	Cartographie du procédé de digestion anaérobie ; schémas des étapes de gazéification ; sélection de

Catégorie pratique	Exemples dans le programme Biomasse
conversion	convertisseurs et de procédés ; cartographie des flux de procédés de biocarburants ; calculs d'énergie et de matière à partir des données du cours.
Conception et dimensionnement	Dimensionnement de digesteurs de biogaz ; calculs de charge organique appliquée et de temps de séjour hydraulique ; sélection de gazéificateurs ; adéquation ressource/demande ; dimensionnement d'un mini-réseau ou d'une centrale biomasse ; agencement conceptuel d'installation.
Surveillance et diagnostic	Tendances de performance du gaz et de l'installation ; scénarios de pH et de charge ; cas de qualité du gaz de synthèse ; rendement de l'installation ; registres ; symptômes de défauts ; exercices de causes racines et d'actions correctives.
Installation et exploitation-maintenance	Listes de contrôle de site et d'installation ; séquences de mise en service ; démarrage et arrêt ; parcours d'inspection ; calendriers de maintenance préventive ; planification des pièces de rechange ; recherche de pannes en sécurité.
Projet et durabilité	Matrices de sélection technologique ; cas coût-bénéfice et socio-économiques ; participation communautaire ; gestion durable des matières premières ; évaluation des risques environnementaux et OHSE.

6.4 Apprentissage en milieu professionnel et sur le terrain

Lorsque les capacités des partenaires et les dispositions de sécurité le permettent, les apprenants devraient observer ou réaliser des tâches supervisées dans des exploitations agricoles, des élevages, des sites d'agrotransformation du riz, du manioc, de l'huile de palme ou autres, des scieries, des installations municipales de déchets organiques, des installations de biogaz, des unités de briquetage, des systèmes de gazéification, des chaudières biomasse ou installations de cogénération ou des projets d'énergie rurale. Les activités de terrain doivent comporter des acquis d'apprentissage définis, un encadrement responsable, une évaluation préalable des dangers et un carnet d'observation ou de travail structuré.

6.5 Apprentissage numérique et assisté par simulation

- Utiliser de courtes séquences numériques et des schémas pour expliquer les chaînes d'approvisionnement en biomasse et les filières de conversion avant l'application pratique.
- Utiliser des exercices sur tableur ou calculatrice pour les estimations de ressource, le dimensionnement des digesteurs, le temps de séjour hydraulique et la charge organique appliquée, le rendement en gaz, le rendement de gazéification, le rendement de l'installation, la demande énergétique et les calculs d'évaluation de projet contenus dans les supports de cours.
- Utiliser des outils de schématisation de procédés et d'agencement de systèmes pour représenter les digesteurs, gazéificateurs, procédés de biocarburants, chaudières et installations de cogénération, mini-réseaux et flux de travail d'installation et d'exploitation-maintenance.
- Utiliser des jeux de données d'exploitation simulés lorsque des données réelles d'installation ou des installations de laboratoire ne sont pas disponibles, en identifiant clairement ces données comme du matériel de formation.
- Utiliser des quiz et de courtes tâches sur cas comme vérifications formatives avant que les apprenants n'abordent des travaux pratiques présentant un risque plus élevé.

6.6 Limites de la dispensation pratique

L'apprentissage pratique doit être adapté aux équipements, aux installations, à l'encadrement et aux exigences légales de chaque prestataire. La gazéification à haute température, les systèmes de gaz sous pression ou combustibles, les équipements électriques sous tension, les machines tournantes, la transformation chimique des biocarburants, les acides et bases concentrés ou les alcools, la manipulation de déchets biologiques et le travail en espace confiné ne doivent être réalisés que dans des installations correctement équipées et sous encadrement compétent. En l'absence de ces mesures de maîtrise, les formateurs doivent recourir à des démonstrations, des simulations de procédés, des échantillons, des vidéos, des calculs et des solutions de remplacement fondées sur des cas.

7. Évaluation et alignement sur la certification

7.1 Principes d'évaluation

- Évaluer les acquis d'apprentissage et les domaines de compétences énoncés plutôt que la seule restitution de définitions isolées.
- Combiner des vérifications formatives avec des éléments probants appliqués tels que des évaluations de matières premières et de ressources, des calculs, des schémas, des tâches de conception, des registres, des plans de maintenance et des cas de diagnostic.
- Exiger un comportement sûr et des mesures de maîtrise des risques correctes dans le cadre de la compétence pratique ; un acte pratique dangereux ne doit pas être considéré comme une performance satisfaisante.
- Accroître la complexité de l'évaluation, de l'identification et de l'explication au niveau Base jusqu'à la conception, l'optimisation, l'interprétation de données, le diagnostic et l'évaluation de projet au niveau Avancé.
- Utiliser des critères de correction clairs et conserver les éléments probants d'évaluation en vue de la revue par les formateurs, de l'assurance qualité et de l'alignement ultérieur sur la certification.

7.2 Méthodes d'évaluation recommandées

Méthode d'évaluation	Éléments probants appropriés
Quiz de connaissances / réponses courtes	Terminologie, étapes des procédés, fonctions des composants, propriétés des matières premières, principes de sécurité et comparaisons technologiques.
Calcul technique	Humidité et matières solides, dimensionnement de digesteurs, temps de séjour hydraulique et charge organique appliquée, rendement en gaz, rendement, dimensionnement ressource/demande ou indicateurs économiques, à l'aide des formules fournies dans les supports de cours.
Schéma de procédé ou de système	Filière de conversion de la biomasse, digestion anaérobie, étapes de gazéification, flux de procédé de biocarburants, flux de production d'électricité et de cogénération, flux de mise en service ou d'exploitation-maintenance.
Tâche de conception / de sélection	Sélection d'un digesteur, d'un gazéifieur ou d'une technologie, plan de matières premières et de préparation, projet de mini-réseau, agencement d'installation ou plan de stockage et de manipulation.
Cas de données / de défaut	Tendances d'exploitation, qualité du gaz, rendement de l'installation, alarmes et symptômes, analyse des causes racines, action corrective et réponse de maintenance.
Observation pratique	Manipulation sûre des matières premières, mesure ou démonstration, inspection, utilisation d'une liste de contrôle, procédure de maintenance ou familiarisation supervisée avec les équipements.
Cas de projet / de faisabilité	Évaluation de la ressource, dimensionnement, coût-bénéfice, modèle socio-économique et communautaire et recommandations de durabilité.

7.3 Alignement sur la certification

Le WP4 établit le référentiel de certification fondé sur les compétences, les outils et les procédures d'évaluation pour le domaine de l'énergie biomasse. Le présent curriculum D3.1 définit donc des acquis d'apprentissage et des types d'éléments probants susceptibles d'être mis en correspondance avec le WP4 une fois le référentiel de certification finalisé. Les supports de cours Biomasse fournis ne définissent ni note de réussite formelle du programme, ni niveau d'accréditation, ni seuil de certification ; ceux-ci ne doivent pas être inventés au stade du D3.1.

7.4 Enregistrements d'évaluation

Les prestataires doivent conserver les sujets d'évaluation, les critères de correction, les productions des apprenants, les relevés d'observation pratique, les informations d'assiduité et d'achèvement et les retours d'expérience dans un système d'archivage projet ou institutionnel organisé. Lorsque l'apprentissage numérique est utilisé, les preuves d'achèvement et de quiz doivent être conservées sous une forme adaptée à la revue qualité et au reporting du projet.

8. Ressources de formation, santé et sécurité, environnement et inclusion

8.1 Ressources de formation indicatives

Catégorie de ressources	Ressources indicatives
Numérique / salle de cours	Vidéoprojecteur/écran, accès Internet ou plateforme LMS hors ligne, fichiers de cours Biomasse, schémas de procédés, calculatrices et tableurs, jeux de données de cas et fiches de travail.
Échantillons de matières premières et essais élémentaires	Échantillons de biomasse représentatifs et sûrs ; instruments de pesée et de mesure de volume ; équipements de démonstration de mesure d'humidité lorsqu'ils sont disponibles ; récipients et PPE pour une manipulation propre des matières premières.
Apprentissage du biogaz	Maquettes de digesteurs et de composants ou unité pilote lorsqu'elle est disponible ; instruments de démonstration de pH, de température et de débit de gaz ; exemples sûrs de canalisations et de vannes ; jeux de données de procédé et de performance.
Apprentissage de la gazéification et du thermique	Maquettes, schémas ou bancs de formation supervisés de gazéificateurs et de chaudières ; mesures de température et de procédé et jeux de données de gaz de synthèse et de rendement. Les systèmes réels à haute température exigent des installations spécialisées et un encadrement.
Apprentissage des biocarburants	Schémas de procédés, récipients d'échantillonnage sûrs, verrerie et instruments de laboratoire et données de qualité lorsque cela est autorisé. Les activités de production chimique exigent des moyens de maîtrise adaptés en laboratoire et un encadrement compétent.
Apprentissage de la production d'électricité et de l'exploitation-maintenance	Schémas de composants d'installation ou composants de formation hors tension ; registres, listes de contrôle, outils de maintenance, instruments de diagnostic et scénarios de mise en service et de défaut.
Terrain / apprentissage en milieu professionnel	Site d'accueil agréé, superviseur, accueil sécurité, PPE, évaluation des risques, carnet d'observation ou de travail et tâches définies pour l'apprenant.

8.2 Exigences de santé et de sécurité

- Réaliser une évaluation des risques et un briefing sécurité avant chaque activité en laboratoire, en atelier, en installation ou sur le terrain.
- Traiter le biogaz et le gaz de synthèse comme des gaz combustibles ; prévenir les fuites et les sources d'inflammation, assurer la ventilation et utiliser une détection ou une surveillance de gaz appropriée lorsque l'installation l'exige.
- Reconnaître les dangers liés au monoxyde de carbone et aux autres gaz dans les environnements de gazéification et de combustion ; ne jamais utiliser d'équipements produisant réellement du gaz dans des locaux de formation insuffisamment ventilés.
- Maîtriser les dangers d'incendie, de surfaces chaudes, de pression, de vapeur et de brûlures aux abords des digesteurs, gazéificateurs, chaudières, moteurs et équipements de cogénération.
- Appliquer des procédures sûres pour les produits chimiques de transformation des biocarburants ainsi que pour les acides, bases ou alcools ; seules des activités de laboratoire autorisées doivent être menées, avec une ventilation, un stockage, des moyens de rétention des déversements et des PPE appropriés.
- Maîtriser l'exposition biologique liée au fumier, aux eaux usées, aux déchets alimentaires et au digestat par l'hygiène, des PPE adaptés et des pratiques sûres de manipulation et de nettoyage.
- Appliquer les principes de protection, de consignation et de verrouillage/étiquetage pour les machines tournantes et les tâches de maintenance électrique et mécanique.
- Prévoir des procédures d'urgence, des dispositions de premiers secours et d'intervention incendie, un encadrement clair et un droit d'arrêt des travaux pendant la formation pratique.

8.3 Exigences environnementales et de durabilité

- Privilégier les résidus, les déchets et la biomasse disponible de manière durable et éviter tout message de formation encourageant la déforestation, une récolte non durable ou le prélèvement de résidus nécessaires à la santé des sols et à d'autres usages essentiels.
- Prendre en compte la disponibilité saisonnière, les usages concurrents, la distance de transport, les pertes d'humidité et de qualité et la sécurité d'approvisionnement à long terme lors de l'évaluation des projets.

- Gérer le digestat, les cendres, les eaux usées, les goudrons et condensats, les matériaux de procédé usagés et les autres résidus conformément aux exigences environnementales applicables et aux pratiques sûres d'élimination ou de réemploi.
- Prendre en compte les émissions atmosphériques, les fumées et particules, les odeurs, le bruit, la protection des eaux, les impacts sur les sols, les implications en gaz à effet de serre et la santé des communautés dans les décisions technologiques et de site.
- Intégrer les bénéfices d'économie circulaire tels que la réduction des déchets, la récupération des nutriments, l'usage productif des résidus et la création de valeur locale, lorsque cela est techniquement et environnementalement approprié.

8.4 Inclusion et accessibilité

La formation doit offrir l'égalité des chances aux femmes et aux apprenants sous-représentés, recourir à un langage et à des méthodes de participation inclusifs et éviter d'attribuer les rôles pratiques en fonction du genre. Les formateurs doivent adapter l'accès numérique, l'appui linguistique et l'organisation des tâches pratiques afin que les apprenants puissent participer en sécurité et de manière effective, tout en préservant les mêmes attentes en matière de compétence technique.

9. Lignes directrices pour les formateurs et les apprenants

9.1 Lignes directrices pour les formateurs

- Utiliser le présent curriculum comme plan d'enseignement de référence et les supports pédagogiques BM-B/BM-A comme source de contenu technique détaillé.
- Vérifier les connaissances prérequis au début de chaque niveau et fournir, si nécessaire, des explications de mise à niveau en sciences de base, chimie, biologie, mathématiques, électricité ou mécanique.
- Relier explicitement les notions de ressource et de procédé du niveau Base aux applications avancées de conception, d'optimisation, de systèmes électriques, de diagnostic et de cycle de vie, plutôt que de répéter des contenus sans progression.
- Utiliser des matières premières locales et des cas ouest-africains réalistes, tout en préservant l'exactitude technique et les garde-fous de durabilité.
- Utiliser des calculs, des schémas de procédés, des fiches de conception, des jeux de données d'exploitation, des registres de maintenance et des cas de sécurité pour développer un raisonnement d'ingénierie appliqué.
- Réaliser un briefing sécurité avant toute activité pratique ou de terrain et interrompre toute activité qui ne peut être menée en sécurité avec les installations, les mesures de maîtrise et l'encadrement compétent disponibles.
- Utiliser les résultats d'évaluation et le retour d'expérience des apprenants pour identifier les sujets nécessitant une reprise d'enseignement ou une révision du curriculum ou des supports.
- Tenir à jour, dans le référentiel institutionnel partagé du projet, les registres de cours, les éléments probants d'évaluation et les supports versionnés.

9.2 Lignes directrices pour les apprenants

- Suivre les modules dans la séquence recommandée, sauf si le formateur confirme une compétence antérieure équivalente.
- Participer aux activités d'apprentissage théoriques, numériques, pratiques et sur cas et demander des clarifications lorsque des notions techniques ou de sécurité ne sont pas claires.
- Respecter l'ensemble des consignes de sécurité relatives aux matières premières, aux risques biologiques, chimiques, d'incendie et de gaz, aux procédés chauds ainsi qu'aux risques mécaniques et électriques, et utiliser les PPE requis.
- Organiser les calculs, schémas de procédés, fiches de conception, relevés de surveillance et éléments probants d'évaluation dans un portfolio d'apprentissage, lorsque le prestataire en utilise un.
- Ne pas manœuvrer ni modifier d'équipements biomasse, gaz, thermiques, chimiques ou électriques en service sans autorisation et supervision explicites du formateur ou du site.
- Adopter une conduite professionnelle, le travail en équipe, une communication respectueuse, une responsabilité environnementale et de bonnes pratiques de rangement pendant la formation et l'exposition au milieu professionnel.

9.3 Éléments probants suggérés pour le portfolio d'apprentissage

Niveau	Exemples d'éléments probants du portfolio
--------	---

Niveau	Exemples d'éléments probants du portfolio
Niveau Base	Carte des ressources locales de biomasse, tâche de caractéristiques et de gestion des matières premières, matrice de sélection des conversions, exercice de procédé et de composants de biogaz, cas de gazéification et de système rural, liste de contrôle d'installation et d'exploitation-maintenance et tâche de sécurité.
Niveau Avancé	Conception, dimensionnement et analyse de performance d'installations de biogaz, cas de conduite de gazéifieur et de qualité du gaz de synthèse, tâche de procédé et de qualité des biocarburants, étude de faisabilité de production d'électricité biomasse ou de mini-réseau, portfolio de mise en service et de maintenance et évaluation des risques OHSE.

10. Assurance qualité, suivi et révision du curriculum

10.1 Objectifs de l'assurance qualité

L'assurance qualité doit garantir que le curriculum demeure techniquement exact, pédagogiquement cohérent, pertinent pour l'industrie, inclusif, évaluable et conforme aux exigences du projet. Les contrôles qualité doivent porter à la fois sur le présent curriculum et sur les supports pédagogiques Biomasse détaillés utilisés pour le dispenser.

10.2 Cycle d'assurance qualité du curriculum

Étape	Action requise
1. Revue préalable à la dispensation	Confirmer les codes et intitulés des modules, la séquence des unités d'apprentissage, les acquis d'apprentissage, les supports de cours en vigueur, les activités, les tâches d'évaluation, les exigences de sécurité et la préparation des formateurs.
2. Validation par les parties prenantes	Recueillir des contributions structurées des établissements VET, des entreprises de la biomasse et de l'énergie, des agro-industries, des acteurs de la gestion des déchets et des autorités compétentes sur les besoins en main-d'œuvre, la pertinence technologique et les contraintes locales.
3. Expérimentation des cours	Expérimenter les modules avec les formateurs et les prestataires VET partenaires ; consigner les difficultés de mise en œuvre, les questions des apprenants, la gestion du temps, la faisabilité pratique et les manques de ressources.
4. Analyse du retour d'expérience	Examiner le retour d'expérience des apprenants et des formateurs, les résultats d'évaluation, la faisabilité pratique, les observations de sécurité et les questions d'inclusion et d'accès.
5. Révision technique et pédagogique	Corriger les inexactitudes, réduire les redondances, améliorer la progression du niveau Base au niveau Avancé et actualiser les activités et l'évaluation, tout en préservant la maîtrise documentaire.
6. Gestion des versions et approbation	Émettre une nouvelle version maîtrisée, archiver les versions remplacées et conserver les preuves de revue et d'approbation.

10.3 Indicateurs de suivi de la dispensation de la formation

- Achèvement des modules et des unités d'apprentissage prévus dans le calendrier de dispensation convenu.
- Participation et achèvement des apprenants, y compris le suivi de la participation par genre et de l'accès inclusif.
- Résultats d'évaluation par acquis d'apprentissage et identification des lacunes récurrentes de connaissances ou de compétences.
- Retour d'expérience des apprenants et des formateurs sur la clarté, la pertinence, la valeur pratique et l'accessibilité numérique.
- Disponibilité et adéquation des échantillons de matières premières, des équipements de formation, des instruments, des ressources numériques et des possibilités d'apprentissage pratique en sécurité.
- Nombre et qualité des contributions des parties prenantes de l'industrie et du secteur VET à la revue du curriculum et aux possibilités d'apprentissage en milieu professionnel.
- Application correcte des procédures de visibilité du projet, de maîtrise documentaire, de protection des données et d'archivage.

10.4 Éléments déclencheurs d'une révision du curriculum

- Évolutions substantielles de la disponibilité des matières premières de biomasse, des technologies de conversion, des équipements de digestion, de gazéification, de chaudières ou de biocarburants, des méthodes de surveillance ou des pratiques de l'industrie.
- Évolutions des exigences environnementales, de gestion des déchets, d'incendie et de gaz, chimiques, électriques, de sécurité au travail, énergétiques ou de certification.
- Retours répétés des apprenants ou des formateurs signalant un séquençement peu clair, des redondances ou une application pratique insuffisante.
- Éléments d'évaluation indiquant que les acquis d'apprentissage ne sont pas atteints de manière fiable.
- Évolutions des infrastructures VET, des capacités de laboratoire et d'atelier, des outils numériques ou des possibilités de partenariat avec l'industrie.
- Retour d'expérience formel issu de l'expérimentation des cours du WP3, du développement de la certification du WP4 ou d'une revue d'assurance qualité du projet.

11. Mise en œuvre, maîtrise documentaire et articulation avec les supports pédagogiques

11.1 Séquence de mise en œuvre recommandée

Phase	Orientations de mise en œuvre
Phase 1 – Préparer	Confirmer les formateurs, la cohorte d'apprenants, les installations, l'accès numérique, les mesures de sécurité, les besoins linguistiques et les versions actuelles des fichiers de cours Biomasse.
Phase 2 – Dispenser le niveau Base	Réaliser les modules BM-B1 à BM-B5 dans l'ordre, en utilisant l'évaluation formative et les éléments probants pratiques pour confirmer la préparation au niveau Avancé.
Phase 3 – Dispenser le niveau Avancé	Réaliser les modules BM-A1 à BM-A5 dans l'ordre, en accentuant progressivement la conception d'ingénierie, l'optimisation, l'interprétation des données, l'évaluation des systèmes électriques et des projets, le diagnostic et l'exploitation-maintenance sur le cycle de vie.
Phase 4 – Consolidation pratique / WBL	Lorsque cela est réalisable, recourir à des laboratoires et ateliers, à une exposition supervisée sur le terrain, au mentorat par l'industrie ou à des projets appliqués pour consolider les compétences.
Phase 5 – Évaluation et retour d'expérience	Rassembler les éléments probants des modules, recueillir le retour d'expérience des apprenants et des formateurs et identifier les lacunes ou les révisions nécessaires.
Phase 6 – Alignement sur la certification / reporting	Appliquer les procédures de certification approuvées du WP4 lorsqu'elles seront disponibles et conserver les éléments probants requis pour le reporting du projet et l'assurance qualité.

11.2 Articulation entre le curriculum et les supports de cours détaillés

Curriculum / lignes directrices (le présent document)	Supports pédagogiques Biomasse détaillés (D3.7)
Définit la finalité du programme, les niveaux, la séquence des modules, la structure des unités d'apprentissage et les acquis d'apprentissage.	Fournit les explications techniques complètes, les figures, les équations, les exemples résolus, les questions de révision, les cas et le contenu d'enseignement détaillé.
Définit les domaines de compétences et les éléments probants attendus.	Fournit la matière permettant de construire la compréhension et la pratique des apprenants.
Définit les principes de dispensation, de formation pratique, d'évaluation, de sécurité et d'assurance qualité.	Fournit le contenu propre à chaque module et chapitre, que les formateurs adaptent en séances, ressources numériques et activités.
Garantit la cohérence et la progression du niveau Base au niveau Avancé.	Soutient la mise en œuvre mais ne doit pas modifier de manière autonome les acquis approuvés du curriculum ni la structure du programme.

11.3 Gestion documentaire et gestion des versions

- Conserver la version DOCX de référence approuvée et la copie PDF de soumission dans le référentiel de projet partagé PRISTINE VET, avec des noms de fichiers clairement versionnés.
- Utiliser la version PDF comme copie de soumission et de diffusion à mise en page figée, et conserver le fichier DOCX comme version de référence modifiable et maîtrisée.

-
- Archiver les versions remplacées afin que seuls les fichiers approuvés en vigueur restent actifs pour la dispensation et le reporting.
 - Maintenir sur les versions officielles et publiques les éléments de visibilité de l'UE requis, la mention de financement et la clause de non-responsabilité.
 - Conserver les enregistrements relatifs au curriculum, à la dispensation, à l'évaluation, au retour d'expérience et à l'approbation, conformément aux exigences d'archivage du projet.