



ÉLECTROCHIMIE

DES CONCEPTS AUX APPLICATIONS

UNE FORMATION AU COEUR D'UN ÉCOSYSTÈME RICHE

Établissement composante de l'Université PSL, l'ESPCI Paris – PSL est à la fois une Grande École d'ingénieurs originale, un centre de recherche de renommée internationale et un puissant générateur d'innovation pour l'industrie. Elle recrute sur un concours sélectif une centaine d'étudiants pour les former à devenir les ingénieurs et les scientifiques de demain. Sa formation est résolument interdisciplinaire, au croisement de la Physique, de la Chimie et de la Biologie, et vise à donner à ses élèves-ingénieurs un socle unique et solide de connaissances et de compétences scientifiques dans une approche holistique et originale. L'ADN de la formation à l'école réside dans la mise en situation et les travaux pratiques en mode projet.

Dans le prolongement de cette mission, la formation continue de l'ESPCI Paris – PSL s'appuie sur une expertise scientifique et une approche interdisciplinaire, pratique et innovante. Elle propose aux professionnels des modules de perfectionnement et des parcours sur mesure, couvrant un large éventail de domaines en pleine évolution.

PUBLIC CONCERNÉ :

Techniciens, ingénieurs, chercheurs ou enseignants **souhaitant acquérir ou renforcer leurs connaissances en électrochimie.**

OBJECTIFS

Durée de la formation : Module 1 : ~21 heures (3 jours)

Modules 2, 3 et 4 : ~12 heures (2 jours) par module

Nombre de places : 2 à 12 par session

L'électrochimie joue un rôle central dans de nombreux enjeux sociétaux et constitue une discipline stratégique au cœur de nombreuses applications industrielles actuelles. Elle intervient notamment dans le développement des technologies liées à la décarbonation et à l'énergie (production par conversion électrochimique (piles, électrolyseurs, filière hydrogène, valorisation du CO₂), stockage dans les batteries et supercondensateurs), la catalyse électrochimique, la prévention de la corrosion, les traitements de surface, ou encore l'analyse et le contrôle dans les bioprocédés. Elle permet la compréhension et la maîtrise des réactions électrochimiques via l'analyse de phénomènes complexes tels que les transferts d'électrons, les processus de transport ionique, ainsi que les équilibres thermodynamiques et les aspects cinétiques associés aux interfaces électrode/électrolyte. Cette formation vise à fournir aux professionnels les connaissances théoriques et pratiques nécessaires pour exploiter les outils électrochimiques dans un contexte industriel, en lien direct avec les besoins en performance, contrôle qualité et innovation technologique.

UNE FORMATION ORIENTÉE VERS LES APPLICATIONS ET L'EXPÉRIMENTATION

La formation continue « Électrochimie : des fondamentaux aux technologies de la transition énergétique » adopte une approche résolument tournée vers les applications industrielles et l'expérimentation. Chaque module combine ainsi des enseignements théoriques, des études de cas issues de problématiques réelles et des travaux pratiques permettant aux participants de mettre en œuvre les concepts abordés.

Une part importante de la formation s'appuie sur les infrastructures et les équipements de la plateforme d'électrochimie de l'ESPCI Paris – PSL. Les participants sont amenés à manipuler des instruments de recherche et de caractérisation de pointe tels que les potentiostats/galvanostats, les

cellules électrochimiques dédiées à l'étude des batteries, des électrolyseurs ou des dispositifs de conversion électrochimique du CO_2 , ainsi que les outils de caractérisation électrochimique avancée (voltamétrie, spectroscopie d'impédance électrochimique, techniques stationnaires et transitoires).

Cette immersion expérimentale permet non seulement d'acquérir une maîtrise opérationnelle des techniques électrochimiques, mais également de développer une compréhension concrète des verrous technologiques rencontrés dans les secteurs du stockage de l'énergie, de la filière hydrogène et des procédés électrochimiques pour la transition énergétique.

UNE FORMATION EN 4 MODULES

La formation propose quatre modules pouvant être suivis séparément, d'une durée de 3 jours chacun. Elle permet d'acquérir les fondamentaux de l'électrochimie, de maîtriser les techniques expérimentales de caractérisation, puis d'approfondir trois domaines stratégiques de la transition énergétique : la filière hydrogène, la valorisation électrochimique du CO_2 et le stockage électrochimique de l'énergie.

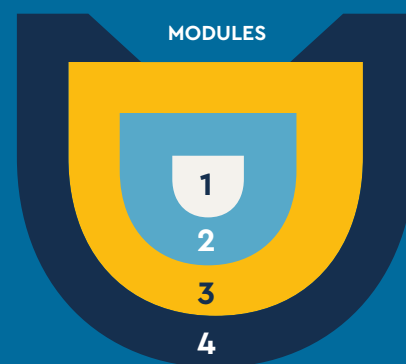
UNE FORMATION MODULAIRE ET ADAPTABLE

Les quatre modules de la formation sont conçus pour être proposés selon différents niveaux de maîtrise :

Niveau débutant : acquisition des concepts fondamentaux et découverte des outils expérimentaux ;

Niveau intermédiaire : approfondissement des mécanismes physico-chimiques et maîtrise des principales techniques de caractérisation ;

Niveau expert : analyse avancée des phénomènes, interprétation critique des données, étude des verrous technologiques et applications industrielles de pointe.



Module 1 : Fondamentaux et techniques de l'électrochimie

Module 2 : Hydrogène : électrolyse, piles à combustible et filière industrielle

Module 3 : CO_2 : électroréduction et électrosynthèse durable

Module 4 : Batteries et stockage électrochimique de l'énergie

FONDAMENTAUX ET TECHNIQUES DE L'ÉLECTROCHIMIE

🕒 3 JOURS

Ce module propose une introduction complète à l'électrochimie. Les participants acquerront les bases théoriques nécessaires à la compréhension des phénomènes aux interfaces électrode/électrolyte ainsi que les méthodes expérimentales indispensables à leur étude. Il constitue le socle commun permettant d'aborder les applications énergétiques développées dans les modules suivants.

✎ DÉTAILS DES COURS

- Réactions d'oxydoréduction et potentiels électrochimiques
- Thermodynamique électrochimique et équation de Nernst
- Cinétique des transferts de charge et équation de Butler-Volmer
- Transport de matière et phénomènes diffusifs
- Double couche électrochimique et interfaces
- Cellules galvaniques et électrolytiques
- Potentiométrie, conductimétrie et coulométrie
- Voltamétrie cyclique et techniques voltamétriques avancées
- Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS)
- Instrumentation et utilisation du potentiostat
- Travaux pratiques de caractérisation électrochimique

À L'ISSUE DE CE MODULE

Les participants développeront des compétences clés :

- Maîtrise des fondements thermodynamiques et cinétiques de l'électrochimie.
- Compréhension des phénomènes de transport ionique et des interfaces électrode/électrolyte.
- Capacité à concevoir et réaliser une expérience électrochimique.
- Interprétation des courbes de voltamétrie cyclique et des diagrammes d'impédance.
- Utilisation autonome d'un potentiostat et des principales techniques de caractérisation.
- Analyse critique des résultats expérimentaux.

HYDROGÈNE : ÉLECTROLYSE, PILES À COMBUSTIBLE ET FILIÈRE INDUSTRIELLE

🕒 2 JOURS

Ce module est consacré à l'ensemble de la chaîne de valeur hydrogène. Il permet de comprendre les principes électrochimiques gouvernant la production, la conversion et l'utilisation de l'hydrogène, ainsi que les enjeux technologiques et industriels associés.

📖 DÉTAILS DES COURS

- Panorama de la filière hydrogène et enjeux énergétiques
- Thermodynamique de l'électrolyse de l'eau
- Réactions HER et OER : mécanismes et catalyseurs
- Électrolyseurs alcalins, PEM et haute température
- Matériaux d'électrodes et membranes échangeuses d'ions
- Piles à combustible PEMFC, SOFC et AFC
- Dégradation, durabilité et diagnostics
- Couplage aux énergies renouvelables
- Sécurité, stockage et transport de l'hydrogène
- Travaux pratiques sur électrolyseurs et piles à combustible

À L'ISSUE DE CE MODULE

Les participants développeront des compétences clés :

- Compréhension des mécanismes électrochimiques de production et de conversion de l'hydrogène.
- Analyse comparative des technologies d'électrolyse et de piles à combustible.
- Évaluation des performances énergétiques et des rendements.
- Compréhension des phénomènes de vieillissement des systèmes.
- Capacité à identifier les verrous technologiques et industriels de la filière.
- Lecture critique des données de performance et de durabilité.

CO₂ : ÉLECTRORÉDUCTION ET ÉLECTROSYNTHÈSE DURABLE

🕒 2 JOURS

Ce module est consacré à l'ensemble de la chaîne de valeur hydrogène. Il permet de comprendre les principes électrochimiques gouvernant la production, la conversion et l'utilisation de l'hydrogène, ainsi que les enjeux technologiques et industriels associés.

📖 DÉTAILS DES COURS

- Cycle du carbone et enjeux climatiques
- Thermodynamique de la réduction électrochimique du CO₂
- Électrocatalyse et sélectivité réactionnelle
- Production de CO, formiate, méthanol et hydrocarbures
- Catalyseurs métalliques, moléculaires et hybrides
- Réacteurs électrochimiques et électrolyseurs de CO₂
- Couplage CO₂-énergies renouvelables
- Électrosynthèse organique et chimie durable
- Analyse des produits et rendement faradique
- Études de cas industriels et travaux pratiques

À L'ISSUE DE CE MODULE

Les participants développeront des compétences clés :

- Compréhension des mécanismes de réduction du CO₂.
- Maîtrise des notions de sélectivité, activité et stabilité catalytique.
- Capacité à comparer différentes stratégies de valorisation du carbone.
- Analyse des performances d'un électrolyseur de CO₂.
- Évaluation des perspectives industrielles de l'électrosynthèse.
- Compréhension des défis liés au passage à l'échelle.

BATTERIES ET STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE DE L'ÉNERGIE

🕒 2 JOURS

Ce module est dédié aux technologies de stockage électrochimique. Il couvre les principes fondamentaux des batteries, leurs matériaux constitutifs, leurs performances et leurs perspectives d'évolution dans les secteurs de la mobilité, du stationnaire et de l'électronique.

✎ DÉTAILS DES COURS

- Principes de fonctionnement des batteries rechargeables
- Thermodynamique et cinétique dans les accumulateurs
- Batteries lithium-ion : matériaux d'électrode et électrolytes
- Formation et rôle de l'interface Solid Electrolyte Interphase (SEI)
- Technologies sodium-ion, lithium métal et batteries solides
- Supercondensateurs et systèmes hybrides
- Méthodes de caractérisation électrochimique des batteries
- Vieillessement, sécurité et emballage thermique
- Recyclage et analyse du cycle de vie
- Travaux pratiques : cyclage, spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) et diagnostic d'état de santé

À L'ISSUE DE CE MODULE

Les participants développeront des compétences clés :

- Compréhension approfondie du fonctionnement des batteries modernes.
- Maîtrise des mécanismes de stockage et de transport ionique.
- Analyse des performances électrochimiques et énergétiques.
- Utilisation des techniques de diagnostic et de suivi du vieillissement.
- Évaluation des nouvelles générations de batteries.
- Compréhension des enjeux industriels, économiques et environnementaux du stockage de l'énergie.

ADMISSION

- **Le module 1** permet d'appréhender les bases et prérequis en électrochimie. Il s'adresse aux techniciens, ingénieurs, chercheurs ou enseignants. Il requiert des notions de bases en chimie et en physique.
- **Les modules 2, 3 et 4** permettent d'approfondir les concepts d'électrochimie et d'appréhender différents domaines d'applications. Avoir suivi le module 1 au préalable est fortement recommandé.



contact-fc@espci.fr

COÛT

Notre programme de formation continue est structuré en 4 modules, conçus pour offrir une montée en compétences progressive, approfondie et directement applicable dans votre environnement professionnel.

- Module 1 (3 jours) : 3 000 €
- Modules 2, 3 et 4 (2 jours par module) : 2 000 € par module

Chaque module peut être suivi indépendamment selon les besoins. Afin de compléter au mieux leur formation, les participants peuvent donc choisir de suivre l'ensemble des modules pour un total de 9 000 €, ou bien un ou plusieurs modules de leur choix (montant variable en fonction du nombre de modules).

Il est conseillé aux apprenants de suivre le module 1 qui est un pré-requis aux modules 2, 3 et 4. À noter que chaque module peut-être adapté au niveau de connaissances de départ et au niveau souhaité en fin de formation (débutant, avancé ou expert).



CALENDRIER

Une première session est organisée sur la période juin-juillet et une seconde sur la période novembre-décembre. Veuillez nous contacter pour connaître les dates exactes de chaque module.

MODULE

1

Fondamentaux et techniques de l'électrochimie

■ 3 jours

JOUR 1**Fondamentaux**

Réactions redox et potentiels électrochimiques • Thermodynamique et équation de Nernst • Cellules électrochimiques • Double couche et interfaces • Introduction à la cinétique électrochimique

JOUR 2**Cinétique et techniques expérimentales**

Butler-Volmer et transfert de charge • Transport de matière et diffusion • Potentiométrie, conductimétrie et coulométrie • Prise en main du potentiostat • Voltamétrie cyclique • Travaux pratiques

JOUR 3**Caractérisation avancée**

Techniques voltamétriques avancées • Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) • Interprétation et modélisation des données • Travaux pratiques de caractérisation • Analyse critique et optimisation des expériences

MODULE

2

Hydrogène : électrolyse, piles à combustible et filière industrielle

■ 2 jours

JOUR 1**Production d'hydrogène**

Panorama de la filière H₂ et enjeux énergétiques • Thermodynamique de l'électrolyse • HER/OER et électrocatalyse • Électrolyseurs alcalins, PEM et haute température • Matériaux, électrodes et membranes • Travaux pratiques sur électrolyseur

JOUR 2**Conversion et intégration**

Principes et technologies des piles à combustible PEMFC, SOFC et AFC • Performances, rendement et diagnostics • Dégradation et durabilité • Couplage aux énergies renouvelables • Stockage, transport et sécurité • Travaux pratiques et analyse de performances

MODULE

3

CO₂ : électroréduction et électrosynthèse durable

■ 2 jours

JOUR 1**Electroréduction du CO₂**

Cycle du carbone et enjeux climatiques • Thermodynamique de la réduction du CO₂ • Électrocatalyse et mécanismes réactionnels • Sélectivité et production de CO, formiate, méthanol et hydrocarbures • Catalyseurs métalliques, moléculaires et hybrides • Analyse des produits et rendement faradique

JOUR 2**Electrosynthèse et mise à l'échelle**

Réacteurs électrochimiques et électrolyseurs de CO₂ • Couplage aux énergies renouvelables • Électrosynthèse organique et chimie durable • Travaux pratiques et études de cas • Performances, stabilité et durabilité • Passage à l'échelle et perspectives industrielles

MODULE

4

Batteries et stockage électrochimique de l'énergie

■ 2 jours

JOUR 1**Principes et technologies des batteries**

Principes de fonctionnement et thermodynamique • Cinétique et transport ionique • Batteries Li-ion : matériaux d'électrodes et électrolytes • Formation et rôle de la SEI • Technologies sodium-ion, lithium métal et batteries solides • Supercondensateurs et systèmes hybrides

JOUR 2**Performances, vieillissement et diagnostic**

Caractérisation électrochimique des batteries • Cyclage et analyse des performances • Spectroscopie d'impédance (EIS) et diagnostic d'état de santé • Vieillessement, sécurité et emballage thermique • Recyclage et analyse du cycle de vie • Travaux pratiques et études de cas

ESPCI PARIS

 UNIVERSITÉ PARIS SCIENCES & LETTRES

 10 rue Vauquelin, 75 005 Paris

 contact-fc@espci.fr

