

SCIENCES PHYSIQUES ET CHIMIQUES EN LABORATOIRE

Classe terminale de la série technologique STL Enseignement de spécialité

Les objectifs de l'enseignement de spécialité de sciences physiques et chimiques en laboratoire sont identiques à ceux affichés dans le préambule du programme de physique-chimie des séries STI2D et STL :

- pratiquer une démarche scientifique et développer la culture scientifique dans sa dimension historique et contemporaine;
- poursuivre l'initiation à la conduite de projet ;
- développer l'approche par compétences de l'enseignement.

Pratiquer une démarche scientifique et développer la culture scientifique

L'enseignement de spécialité de sciences physiques et chimiques en laboratoire de la classe terminale de la série STL prolonge celui de la classe de première.

La démarche scientifique, à laquelle les élèves sont progressivement initiés depuis le collège, organise la pratique et les modalités de cet enseignement. Elle naît d'un questionnement qui, dans la série STL, s'appuie sur des "objets" scientifiques et technologiques construits par l'Homme. Ce questionnement engendre une démarche réflexive et active mobilisant les connaissances acquises ou les représentations initiales pour formuler des hypothèses, explorer les possibles, et les confronter au réel à travers l'expérience. Dans cette démarche, la construction de modèles, la découverte ou la nécessaire introduction de nouveaux concepts et de nouvelles lois accroissent progressivement les savoirs et les capacités scientifiques expérimentales et théoriques des élèves. L'expérience, qui joue un rôle capital, acquiert ainsi un statut qui la distingue fondamentalement de celui d'un protocole fourni à un exécutant qui doit le respecter sans percevoir l'objectif et les finalités de ses actions. La pratique expérimentale dans sa plus large acception - c'est à dire n'excluant pas la simulation - permet à l'élève de la série technologique d'aborder très concrètement les différentes notions scientifiques du programme.

L'exercice de l'esprit critique est inhérent à la pratique de la démarche scientifique. La confrontation d'un résultat d'expérience aux hypothèses formulées ou celle d'un modèle construit au rendu du réel, impose le choix de critères de validation et, très souvent, la délimitation d'un champ ou d'un domaine de validité et d'application. Ce sont les allers-retours entre l'activité expérimentale, ses résultats, et l'activité réflexive sur les concepts et les modèles qui précisent, affinent, stabilisent la connaissance ou la font évoluer.

Dans l'accomplissement de la démarche scientifique, l'élève doit ainsi être capable de prélever des informations pertinentes, de les mettre en relation entre elles et avec son propre savoir et de les exploiter. Il doit aussi être en mesure de communiquer les résultats d'une recherche dans un langage rigoureux et adapté au public auquel il s'adresse.

Dans cet enseignement de spécialité, l'exercice de l'activité scientifique sur des objets technologiques ne donne pas lieu cependant à une analyse complète et détaillée du fonctionnement des supports d'étude. L'objectif est bien ici de se saisir de ces objets pour dégager ou appliquer des principes, des lois ou des méthodes fondamentales des sciences physiques et chimiques, ce qui n'exclut pas, bien au contraire, de montrer l'évolution historique des solutions adoptées pour effectuer telle observation, telle action ou réaliser telle analyse ou telle synthèse. Ce qui n'exclut pas non plus d'interroger la pérennité des solutions actuelles notamment au regard du développement de certaines technologies : la science et la technologie sont évolutives dans le temps.

« La grande différence entre le mythe et la théorie scientifique, c'est que le mythe se fige. » (François JACOB)

Cette démarche permet d'identifier des phénomènes et propriétés relevant du champ des sciences physiques et chimiques dans des réalisations technologiques, de préciser les problèmes qu'elles ont permis de résoudre, de mettre en évidence le rôle qu'elles ont joué dans l'élaboration des objets ou des systèmes simples, complexes ou innovants actuels, de souligner la place qu'elles peuvent et doivent tenir pour faire face aux grands défis de société.

Poursuivre l'initiation à la conduite de projet

Le projet est défini comme un ensemble planifié d'activités d'investigation scientifique menées par un groupe de 2 à 4 élèves et se rapportant à un même objet. Il vise à répondre à une ou plusieurs questions issues d'une éventuelle thématique générale proposée à toute ou partie de la classe.

Les élèves devront réinvestir leurs connaissances et capacités dans une démarche scientifique menée en autonomie dans son intégralité, avec l'appui du professeur mais aussi de ressources extérieures à la classe ou à l'établissement. La thématique du projet peut déborder du champ de l'enseignement de spécialité de

sciences physiques et chimiques en laboratoire vers, par exemple, le domaine des sciences du vivant sans toutefois exiger de la part des élèves l'acquisition de compléments scientifiques hors des programmes de la série STL suivie. On peut, dans ce cadre, envisager toute ouverture sur le monde de la recherche et de l'activité de laboratoire qu'elle soit ou non liée à l'industrie. Le projet peut ainsi être l'occasion de rencontres avec des chercheurs des domaines publics ou privés.

On attend des élèves qu'ils soient capables :

- de s'approprier une problématique ;
- d'effectuer une recherche bibliographique sur le sujet traité ;
- de proposer une procédure de résolution pour y apporter une réponse ;
- de proposer une ou des pistes de recherche visant à valider une ou des hypothèses formulées ;
- de mettre en œuvre des activités expérimentales qualitatives et quantitatives incluant éventuellement la simulation, une recherche ou une activité hors de l'établissement pour valider les possibles proposés ;
- de produire un document de communication sur leur démarche et sur les résultats obtenus, ce document pouvant faire appel à différents formats ;
- de préparer et de soutenir une présentation orale sur le sujet traité.

Les élèves ont été initiés en classe de première STL aux différentes phases de conduite d'un projet. En terminale, une plus large autonomie leur sera accordée mais aussi une plus grande responsabilité leur sera demandée.

Les professeurs encadrent les activités liées au projet sur les horaires habituels de physique – chimie en laboratoire.

Le projet sera conduit sur une durée de trente six heures et sera l'occasion de promouvoir chez les élèves des compétences liées à :

- La conduite d'un projet
Un projet répond à une problématique par une démarche bien spécifique dont les étapes sont planifiées dans le temps. De la découverte de la problématique – sujet du projet – à la communication des propositions de réponses, l'élève accomplit un cheminement à travers une recherche d'information sur le sujet via une bibliographie ou une sitographie, la formulation d'hypothèses ensuite vérifiées – ou infirmées - par des activités expérimentales et d'éventuelles visites de laboratoire ou d'entreprises.
Le projet se conclut par une réponse argumentée, non dépourvue d'un regard critique, liant à la fois la problématique initiale, les choix effectués et les éléments de réponse apportés. Il offre aussi aux élèves la possibilité de réinvestir concrètement, dans une étude s'inscrivant sur une durée raisonnable, des connaissances et des capacités de physique et de chimie.
- La rédaction d'un rapport de projet
Les élèves développeront la capacité à rédiger de façon claire et concise la démarche adoptée en faisant apparaître les différentes phases du projet, les choix effectués, les recherches conduites et les activités (bibliographiques, interviews, visites, expériences, ...), les résultats des activités expérimentales réalisées, leur analyse et une synthèse en réponse à la problématique posée par le projet.
- Une présentation orale du projet
Le développement des capacités langagières orales des élèves est une composante essentielle de formation des élèves de STL. Liées à la maîtrise de la langue et à celle des technologies de l'information et de la communication, ces compétences placent l'élève dans la position de celui qui informe, explique et doit convaincre. Les capacités langagières de production orale sont une composante essentielle de la réussite tout au long de la vie et, entre autres, dans l'enseignement supérieur.

Développer l'approche par compétences de l'enseignement

Comme le programme de première, celui de terminale se présente sous la forme d'un tableau à deux colonnes : les notions et contenus qui sont abordés et les capacités dont la maîtrise est exigible des élèves en fin d'année scolaire.

Les capacités exigibles des élèves regroupent les connaissances et les capacités notamment expérimentales - des élèves, exprimées pour le professeur sous la forme de verbes d'actions : exprimer, citer, définir, relier, réaliser, déterminer expérimentalement ... Ces capacités bornent les savoirs et les savoir-faire qui sont attendus à la fin de la classe terminale. Elles ne constituent ni une progression, ni un plan de cours et ne résument pas la construction de séquences pédagogiques. Dans le cadre de son

MENJVA - Direction générale de l'enseignement scolaire

Programme de l'enseignement de sciences physiques et chimiques en laboratoire en classe terminale de la série STL -

enseignement, le professeur, libre de ses choix pédagogiques, distingue les objectifs plaçant les élèves dans une démarche scientifique de ceux de nature cognitive construits ou appliqués lors de la séquence. L'acquisition de connaissances et le développement de capacités sont logiquement évalués sous la forme de niveaux de compétences atteints.

Cet enseignement de spécialité doit contribuer à la réussite des études dans l'enseignement supérieur. Aussi, le professeur doit-il être sensible à développer, chez les élèves, **l'autonomie, la responsabilité et la prise d'initiative**. La démarche scientifique et la conduite de projet participent à un tel développement par les choix qu'elles imposent lors de leur mise en œuvre, par les méthodes de travail qui y sont développées, par les contraintes qui doivent être prises en comptes et par l'indispensable respect d'autrui et de l'environnement.

Claude BERNARD, médecin qui a posé les premières bases de la démarche scientifique ne disait-il pas au sujet de cette dernière :

« Pour être digne de ce nom, l'expérimentateur doit être à la fois théoricien et praticien. [...] Une main habile sans la tête qui la dirige est un instrument aveugle; la tête sans la main qui réalise reste impuissante. »

Contenu du programme

Cet enseignement, qui doit être étroitement coordonné avec celui de physique-chimie, comprend trois modules :

- un module de physique portant sur l'étude des applications des **ondes** ;
- un module de chimie portant sur **chimie et développement durable** ;
- un module consacré à **l'étude des systèmes et des procédés**.

Le projet est une modalité pédagogique trouvant sa place dans chacun des modules en prenant appui sur des « objets technologiques » présents dans l'établissement.

La pratique d'activités de laboratoire et le projet mettent l'accent sur les capacités spécifiques aux activités expérimentales et permettent plus particulièrement de renforcer les compétences acquises dans l'enseignement « MESURES ET INSTRUMENTATION ». En faisant prendre conscience à l'élève des causes de limitation de la précision, des sources d'erreurs et de leurs implications sur la qualité de la mesure pour finalement aboutir à la validation d'une loi ou d'un modèle, on développe l'esprit critique, la capacité d'analyse et l'attitude citoyenne. L'informatique peut jouer un rôle tout à fait particulier en fournissant aux élèves les outils nécessaires à l'évaluation des incertitudes sans qu'ils soient conduits à entrer dans le détail des outils mathématiques utilisés.

Le tableau suivant résume les notions et capacités spécifiques relatives aux mesures et à leurs incertitudes que les élèves doivent **maîtriser** à la fin de la formation du lycée général et technologique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Erreurs et notions associées	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier les différentes sources d'erreur (de limites à la précision) lors d'une mesure : variabilité du phénomène et de l'acte de mesure (facteur liés à l'opérateur, aux instruments,...).
Incertitudes et notions associées	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluer les incertitudes associées à chaque source d'erreur. • Comparer le poids des différentes sources d'erreur, • Évaluer l'incertitude de répétabilité à l'aide d'une formule d'évaluation fournie. • Évaluer l'incertitude d'une mesure unique obtenue à l'aide d'un instrument de mesure. • Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude d'une mesure obtenue lors de la réalisation d'un protocole dans lequel interviennent plusieurs sources d'erreurs.
Expression et acceptabilité du résultat	<ul style="list-style-type: none"> • Maîtriser l'usage des chiffres significatifs et l'écriture scientifique. Associer l'incertitude à cette écriture. • Exprimer le résultat d'une opération de mesure par une valeur issue éventuellement d'une moyenne, et une incertitude de mesure associée à un niveau de confiance. • Évaluer la précision relative. • Déterminer les mesures à conserver en fonction d'un critère donné. • Commenter le résultat d'une opération de mesure en le comparant à une valeur de référence. • Faire des propositions pour améliorer la démarche.

ONDES

En classe de première, le module « IMAGE » de l'enseignement de sciences physiques et chimiques en laboratoire a permis de faire percevoir aux élèves la place des images et de leurs usages dans de nombreux domaines, de les faire accéder à la connaissance des concepts et des modèles scientifiques qui sont au cœur des systèmes technologiques producteurs d'images et de les initier aux démarches et aux outils d'investigation qu'ils pourront utiliser dans leurs études supérieures et dans leurs vies personnelle et professionnelle.

L'obtention de ces images amène tout naturellement à s'interroger sur les modèles et les concepts associés à la lumière, plus généralement, aux ondes. Celles-ci sont maintenant indissociables des activités humaines, que ce soit dans le domaine industriel (communication, santé, espace, ...) ou dans la vie quotidienne (téléphonie, WIFI, domotique, ...). Il est donc tout à fait légitime et nécessaire de former les futurs scientifiques (que ce soit au niveau technicien, ingénieur ou chercheur) à ces concepts et d'inscrire l'étude « des ondes » dans le parcours des lycéens, quelle que soit leur voie.

Pour des raisons d'efficacité pédagogique, le questionnement scientifique, prélude à la construction des notions et des concepts, se déploiera à partir d'objets techniques, professionnels, familiers ou à partir de procédés simples ou complexes, emblématiques du monde contemporain. Cette approche crée un contexte d'apprentissage stimulant, susceptible de mobiliser les élèves autour d'activités pratiques, et permettant de développer des compétences variées. C'est aussi l'occasion de montrer comment les sciences physiques et chimiques peuvent contribuer à une meilleure prise de conscience des enjeux environnementaux et à l'éducation au développement durable.

Les concepts concernant « les ondes » sont introduits à travers deux thèmes :

1. Des ondes pour observer et mesurer.

L'étude de dispositifs permettant l'observation d'objets millimétriques, micrométriques, nanométriques ou l'observation d'objets lointains non ou difficilement observables à l'œil nu permet d'installer les notions de base concernant les ondes (propagation, réflexion, réfraction, diffusion, polarisation, diffraction, interférences...).

2. Des ondes pour agir.

Ce thème aborde l'étude des dispositifs permettant de concentrer et de guider les ondes. Il s'agit aussi d'étudier l'utilisation de l'énergie ou de l'information transportées par les ondes.

La partie "**les ondes qui nous environnent**" fait référence à une première approche des notions et des concepts qui seront développés dans les deux thèmes décrits ci-dessus. Elle vise à poser le lexique, à montrer expérimentalement que des ondes sont générées par des oscillations, que les ondes peuvent être détectées et qu'elles possèdent des propriétés spécifiques qui seront utilisées par la suite pour observer, mesurer et agir. Il s'agit donc d'un balayage initial du champ concerné par le programme, sans développement excessif et sans approfondissement.

Les ondes qui nous environnent

Notions et contenus	Capacités exigibles
Perturbation d'un système physique ; réponse du système. Phénomènes vibratoires ; grandeurs vibratoires. Systèmes oscillants en mécanique et en électricité. Exemples dans différents domaines de fréquences. Analogies électromécaniques. Aspects énergétiques ; effets dissipatifs ; amortissement Oscillations forcées. Notion de	<ul style="list-style-type: none">• Caractériser la réponse temporelle de différents systèmes physiques soumis à une perturbation en utilisant les capteurs appropriés.• Identifier la ou les grandeur(s) vibratoire(s).• Qualifier les oscillations libres d'un système : oscillations pseudo périodiques, quasi sinusoïdales, amorties.• Modéliser analytiquement, à partir d'enregistrements, les réponses correspondant aux différents régimes d'oscillations d'un système à un degré de liberté : harmonique, apériodique, pseudo périodique.• Comparer deux oscillateurs dans deux domaines différents de la physique ; indiquer les analogies.• Identifier les formes d'énergie mises en jeu dans un phénomène oscillatoire en mécanique et en électricité.• Mettre en évidence expérimentalement un phénomène de

résonance. Oscillations auto-entretenues : source de signal.	résonance en électricité et en mécanique ; mesurer une fréquence de résonance et déterminer un facteur de qualité. <ul style="list-style-type: none"> Analyser le rôle d'un dispositif d'entretien d'oscillations. Visualiser et exploiter le spectre en amplitude d'un signal temporel représentatif d'oscillations en régime permanent.
Notion d'onde. Propagation d'une perturbation dans un milieu élastique. Ondes progressives; retard, célérité.	<ul style="list-style-type: none"> Analyser la propagation d'une perturbation dans un milieu élastique unidimensionnel. Représenter les évolutions temporelle et spatiale du phénomène observé. Mesurer un retard, une célérité. Distinguer onde transversale et onde longitudinale, ondes planes et ondes sphériques.
Ondes progressives périodiques ; ondes sinusoïdales : fréquence, période, longueur d'onde, célérité, amplitude, intensité. Périodicités temporelle et spatiale.	<ul style="list-style-type: none"> Expliciter la signification des différentes grandeurs physiques intervenant dans le modèle d'une onde progressive sinusoïdale, unidimensionnelle et leur lien avec le sens de propagation. Citer et exploiter la relation entre fréquence, longueur d'onde et célérité. Citer le lien entre l'amplitude d'une grandeur vibratoire et la puissance moyenne transportée par une onde.
Propagation libre, guidée. Réflexion, réfraction, transmission, atténuation.	<ul style="list-style-type: none"> Distinguer propagation libre et propagation guidée. Expliciter les phénomènes se produisant lorsqu'une onde change de milieu de propagation ; caractériser simplement ces phénomènes.
Représentation fréquentielle des ondes. Spectre des ondes électromagnétiques. Modèle ondulatoire et corpusculaire.	<ul style="list-style-type: none"> Repérer et identifier les différents domaines du spectre des ondes électromagnétiques utilisées. Extraire et exploiter des informations sur les différentes catégories d'ondes et sur leurs effets sur la matière inerte ou vivante. Relier la fréquence d'une onde électromagnétique monochromatique à l'énergie des corpuscules la constituant. Détecter la présence de micro-ondes par une mesure adaptée.
Sources d'ondes (acoustiques et électromagnétiques) et capteurs (transducteurs piézo-électriques, composants optoélectroniques, antennes).	<ul style="list-style-type: none"> Tracer le diagramme de rayonnement d'un transducteur ultrasonore. Mesurer et interpréter les caractéristiques d'un photorécepteur.

Des ondes pour observer et mesurer

Observer : voir plus grand

Notions et contenus	Capacités exigibles
Du millimètre au micromètre Faisceaux de lumière ; objectifs et oculaires ; diffraction de la lumière par un diaphragme circulaire, résolution d'un instrument d'optique. Grossissement.	<ul style="list-style-type: none"> Extraire d'une documentation les caractéristiques utiles d'un microscope commercial pour le choisir et le mettre en œuvre. Mettre en évidence expérimentalement le phénomène de diffraction. Prévoir les conséquences de la modification de la taille de l'objet diffractant et de la longueur d'onde sur une figure de diffraction. Définir le grossissement et le pouvoir de résolution d'un microscope optique. Modéliser un microscope optique par un système optique simple. Réaliser et exploiter le tracé d'un faisceau de lumière pour décrire le principe du microscope. Exploiter les relations de conjugaison pour déterminer la position et la taille d'une image fournie par l'objectif d'un microscope. Associer le pouvoir de résolution d'un instrument au phénomène de diffraction et aux propriétés du capteur. Déterminer expérimentalement quelques caractéristiques d'un appareil commercial.

Effet piézoélectrique. Réflexion, absorption et transmission d'une onde. Coefficients de transmission, d'absorption et de réflexion énergétiques.	<ul style="list-style-type: none"> • Mettre en œuvre une source et un capteur piézoélectriques. • Illustrer expérimentalement le principe d'un échographe unidimensionnel. • Mesurer les coefficients de transmission et de réflexion énergétiques des ondes lumineuses ou ultrasonores d'une interface en incidence normale. • Mesurer le coefficient d'absorption des ondes lumineuses ou ultrasonores dans un milieu. • Tracer expérimentalement le diagramme de directivité d'un émetteur ultrasonore. • Utiliser les coefficients énergétiques dans l'étude de cas concrets simples.
Du micromètre au nanomètre Nanosciences	<ul style="list-style-type: none"> • Décrire le principe d'un microscope à force atomique. • Associer les différents types de microscopes à leurs domaines d'observation.

Observer : voir plus loin

Notions et contenus	Capacités exigibles
Miroirs sphériques, miroirs plans. Télescope. Grossissement.	<ul style="list-style-type: none"> • Extraire d'une documentation les caractéristiques utiles d'un appareil commercial pour son choix ou sa mise en œuvre. • Réaliser et exploiter le tracé d'un faisceau de lumière pour décrire le principe de fonctionnement du télescope. • Illustrer expérimentalement le principe d'un télescope et déterminer ses caractéristiques. • Déterminer expérimentalement quelques caractéristiques d'un appareil commercial. • Montrer expérimentalement les effets limitatifs de l'objectif et de l'oculaire sur le champ et la luminosité d'un télescope.

Mesurer

Notions et contenus	Capacités exigibles
Propagation.	<ul style="list-style-type: none"> • Relier durée de parcours, distance parcourue et célérité. • Mesurer la célérité du son, de la lumière, le protocole expérimental étant fourni. • Mesurer une distance par télémétrie laser ou ultrasonore.
Réfraction, réfraction limite et réflexion totale. Réfractomètre.	<ul style="list-style-type: none"> • Relier les indices optiques des milieux à l'angle limite de réfraction. • Déterminer la concentration en sucre ou en alcool d'une solution par une méthode réfractométrique.
Diffusion.	<ul style="list-style-type: none"> • Décrire le principe de détection à distance de particules en suspension dans l'atmosphère.
Structure d'une onde électromagnétique. Ondes polarisées ou non polarisées ; polariseur, analyseur.	<ul style="list-style-type: none"> • Produire et analyser une lumière polarisée. • Associer la polarisation d'une onde électromagnétique à la direction du champ électrique. • Déterminer une concentration à partir de la mesure de la déviation du plan de polarisation de la lumière dans une solution.
Diffraction.	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser un capteur d'intensité lumineuse pour visualiser une figure de diffraction d'une fente rectangulaire, d'un fil. • Citer et utiliser l'expression de l'angle d'ouverture d'un faisceau monochromatique diffracté par une fente. • Réaliser une mesure dimensionnelle en utilisant le phénomène de diffraction. • Associer la capacité de stockage d'un support numérique optique à la longueur d'onde du laser utilisé et à l'ouverture numérique de l'optique de focalisation.
Interférences, différence de marche entre deux chemins.	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier les différents chemins optiques entre une ou plusieurs sources ponctuelles et un détecteur.

Réseaux, pas d'un réseau.	<ul style="list-style-type: none"> • Exprimer la différence de marche entre deux chemins optiques. • Relier l'intensité reçue par un capteur à la différence de marche de deux ondes. • Utiliser un capteur d'intensité lumineuse pour visualiser une figure d'interférences, le protocole étant donné. • Exploiter les interférences créées par un dispositif à deux ondes et par un réseau. • Choisir et utiliser un réseau adapté pour mesurer une longueur d'onde. • Effectuer une mesure dimensionnelle avec un dispositif interférométrique, le protocole étant fourni. • Décrire le principe de la mesure de distances entre plans cristallins par une méthode interférométrique.
Absorption ; spectrophotométrie.	<ul style="list-style-type: none"> • Exploiter des spectres d'absorption dans différents domaines de longueurs d'onde. • Déterminer la concentration d'un soluté par spectrophotométrie.
Effet Doppler	<ul style="list-style-type: none"> • Relier le décalage en fréquence d'une onde émise par une source en mouvement à la vitesse de la source. • Illustrer expérimentalement le principe d'un vélocimètre à effet Doppler.
Rayonnement et température	<ul style="list-style-type: none"> • Expliciter la dépendance entre la puissance totale rayonnée d'un corps et sa température. • Effectuer une mesure de température à l'aide d'une thermopile (capteur bolométrique), le protocole étant fourni.

Des ondes pour agir

Concentrer et diriger les ondes

Notions et contenus	Capacités exigibles
Faisceaux cylindriques et coniques. Focalisation, foyer, distance focale. Stigmatisme. Réfraction. Réflexion.	<ul style="list-style-type: none"> • Mettre en évidence que l'énergie transportée par les ondes lumineuses ou sonores peut être dirigée ou concentrée. • Associer la concentration d'énergie d'un faisceau à sa géométrie. • Tracer le trajet du faisceau de lumière dans un système qui dirige ou concentre la lumière. • Comparer expérimentalement quelques caractéristiques de différents systèmes de focalisation réels et de leurs modèles simplifiés. • Déterminer expérimentalement un angle d'incidence limite.

Utiliser l'énergie transportée par les ondes

Notions et contenus	Capacités exigibles
Transport d'énergie. Grandeurs radiométriques : flux énergétique, éclairement énergétique. Laser. Effet sur la matière inerte et vivante	<ul style="list-style-type: none"> • Citer les unités des grandeurs radiométriques : flux énergétique, éclairement énergétique. • Déterminer expérimentalement un ordre de grandeur du flux énergétique d'un faisceau laser. • Mesurer un éclairement. • Relier l'énergie transportée par un rayonnement au flux énergétique et à la durée d'exposition. • Exploiter une norme pour déterminer une durée maximale d'exposition. • Énoncer et exploiter que le diamètre de la zone de focalisation du faisceau laser varie dans le même sens que la longueur d'onde. • Justifier l'utilisation d'un laser pour effectuer la découpe d'un matériau.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Interférences constructives et destructives.	<ul style="list-style-type: none"> • Exprimer et exploiter une différence de marche pour en déduire les conditions d'obtention d'interférences constructives ou

<p>Ondes stationnaires.</p> <p>Cavité résonante, modes propres.</p>	<p>d'interférences destructives.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mettre en évidence expérimentalement le phénomène d'interférence pour différents types d'ondes : sonores, lumineuses, mécaniques. • Distinguer les ondes stationnaires des ondes progressives. • Interpréter le phénomène d'ondes stationnaires en termes d'interférences. • Relier les fréquences de résonance des ondes stationnaires unidimensionnelles à la longueur d'une cavité.
<p>Polarisation.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Associer la polarisation d'une onde électromagnétique à la direction du champ électrique. • Différencier expérimentalement une lumière polarisée rectilignement d'une lumière non polarisée à l'aide d'un polariseur. • Illustrer expérimentalement le principe d'un afficheur à cristaux liquides. • Décrire le principe d'un interrupteur ou d'un modulateur optique.

Communiquer avec des ondes

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Ondes guidées, non guidées, transmission. Guide d'onde, câble.</p> <p>Absorption, diffusion, atténuation des ondes.</p> <p>Spectre d'une onde.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Illustrer expérimentalement différentes transmissions guidées d'ondes dans plusieurs domaines de longueur d'onde. • Analyser l'effet de la résistance de charge sur la réflexion d'une onde à l'extrémité d'une ligne sans perte. • Représenter le schéma de principe d'un système de transmission par ondes. • Visualiser et exploiter le spectre d'une onde modulée par un signal informatif. • Associer l'absorption d'une onde électromagnétique à la nature de la matière exposée. • Distinguer la diminution de la puissance surfacique d'une onde divergente et son absorption par un milieu.

Chimie et développement durable

Dans la continuité de la classe de première, le module « CHIMIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE » prolonge et renforce, en classe terminale, l'acquisition par les élèves de connaissances et de capacités, tout à la fois dans le champ théorique et dans le champ expérimental, pour réaliser et comprendre **les synthèses chimiques et les analyses physico-chimiques**.

Les notions et les lois classiquement étudiées en thermodynamique, en cinétique, en chimie organique, en chimie générale sont introduites ici pour résoudre des problématiques sociétales et pour répondre à des objectifs d'optimisation des techniques et des procédés en termes de rendement, de fiabilité, de sécurité, de seuil de détection, d'impact environnemental et de coût.

Le programme de la classe terminale comporte, comme en classe de première, **deux parties synthèses chimiques et analyses physico-chimiques** qui sont enrichies en s'appuyant sur les notions d'équilibre chimique et d'évolution d'un système étudiées dans l'enseignement « CHIMIE-BIOCHIMIE-SCIENCE DU VIVANT ». Tout en conservant comme fil conducteur la recherche de procédés durables, il est souhaitable de partir d'exemples concrets de techniques et de procédés mis en œuvre dans les laboratoires et dans l'industrie, tout à la fois pour engager la réflexion et pour réinvestir les nouvelles connaissances et capacités acquises.

Objectifs visés par le programme de terminale

À l'issue de la classe terminale, le programme du module « CHIMIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE » vise à ce que l'élève fasse preuve de réelles compétences :

- en synthèse chimique pour analyser ou choisir un protocole de synthèse et de séparation, en utilisant les capacités acquises en thermodynamique et en cinétique des transformations physico-chimiques,
- en analyse physico-chimique pour effectuer un choix raisonné de techniques de dosages, pour proposer et mettre en œuvre en autonomie un protocole et pour fournir des résultats de mesure les plus précis possibles, assortis d'incertitudes,
- dans l'utilisation des modèles pour prévoir, confronter les prévisions aux résultats expérimentaux et interpréter les écarts.

Articulation des programmes de première et de classe terminale

Synthèses chimiques

En classe de première, après une sensibilisation à l'impact environnemental de la chimie, des synthèses organiques sont réalisées et mises en relation avec la réactivité de quelques composés organiques. La problématique des rendements de synthèse et de la qualité des produits obtenus amène à étudier les principales techniques de séparation et de contrôle de pureté. Enfin l'amélioration des synthèses est abordée à travers les aspects cinétiques des transformations.

En classe terminale, l'étude de l'optimisation des synthèses conduit à s'interroger sur les différentes méthodes permettant de dépasser les limitations thermodynamiques : modification des états d'équilibre par excès de réactif ou soutirage d'un produit, éloignement de l'équilibre par les transformations forcées, amélioration des rendements de synthèse par changement de réactifs ou par utilisation de catalyseurs sélectifs. Quelques synthèses inorganiques sont proposées, au cours desquelles les complexes sont introduits. Les techniques de séparation et de purification portent sur les extractions (extraction par solvant et précipitation sélective) ; les modèles thermodynamiques y sont mis en œuvre dans le cadre de prévisions. Un passage au niveau microscopique permet d'initier les élèves à la modélisation des réactions par des mécanismes réactionnels afin de leur en donner des clés de lecture et de renforcer les notions de donneur et d'accepteur d'électrons.

Analyses physico-chimiques

En classe de première, l'analyse aborde des aspects qualitatifs relatifs aux tests d'identification et à l'analyse structurale, mais aussi des aspects plus quantitatifs avec la réalisation de dosages par étalonnage et une première approche des titrages, directs et indirects, avec des suivis colorimétrique, conductimétrique et pHmétrique.

En classe terminale, ces thématiques sont prolongées et d'autres sont introduites. La préparation des solutions complète la description de la composition des solutions ainsi que les problèmes liés à leur conservation. Les dosages par étalonnage permettent d'étudier de manière plus approfondie les mesures conductimétriques. Les dosages par titrage, quant à eux, sont enrichis par des titrages mettant en jeu des réactions de précipitation et des indicateurs colorés. Les capteurs électrochimiques

constituent une nouvelle thématique qui permet d'aborder la notion d'électrode spécifique et d'analyse en temps réel.

Modalités

La structure du programme ne doit pas être perçue comme une entrave à la liberté pédagogique du professeur. Par exemple, l'optimisation du rendement d'une synthèse peut être étudiée en mettant en œuvre simultanément un dosage d'un type nouveau ; un temps étant consacré ensuite pour structurer les différentes notions étudiées.

Le professeur proposera un rythme et des activités d'apprentissages en articulation avec les enseignements obligatoires spécifiques « PHYSIQUE-CHIMIE » et « CHIMIE-BIOCHIMIE-SCIENCE DU VIVANT ».

La présentation d'une chimie moderne au service des grandes causes sociétales et soucieuse de s'engager dans des démarches éco-compatibles peut permettre à la chimie de changer positivement et durablement la perception qu'en a la société, et en tout premier lieu les élèves.

Rendre les élèves acteurs de leurs apprentissages à travers questionnements et résolutions de problèmes en lien avec l'avenir de l'Homme apparaît de nature à éveiller leur curiosité, dynamiser leurs capacités inventives, solliciter leur imaginaire et leur donner envie de poursuivre plus avant leur formation scientifique en s'engageant dans des filières supérieures scientifiques.

Ainsi une approche la plus concrète possible des différentes thématiques constitue-t-elle un atout pour développer l'intérêt des élèves, mais aussi le développement progressif d'autonomie et d'initiatives dans la mise en œuvre des démarches scientifiques au laboratoire. Ceci est souhaité et souhaitable afin de garantir la réussite des élèves dans l'enseignement supérieur.

Des capacités techniques, mais aussi des capacités cognitives et des attitudes spécifiques à cette pratique doivent être acquises au laboratoire.

SYNTHÈSES CHIMIQUES

Du macroscopique au microscopique dans les synthèses

Notions et contenus	Capacités exigibles
Échelle d'électronégativité et polarité des liaisons. Nucléophilie, électrophilie et réactivité. Mécanismes réactionnels : – étapes d'un mécanisme, – intermédiaires réactionnels, – catalyseurs.	<ul style="list-style-type: none">• Écrire les formules de Lewis des entités chimiques en faisant apparaître les charges et les charges partielles.• Prévoir les déplacements électroniques possibles des sites nucléophiles vers les sites électrophiles.• Relier le formalisme des flèches représentant le déplacement de doublets électroniques à la formation ou à la rupture de liaisons dans les étapes d'un mécanisme fourni.• Repérer, dans une étape du mécanisme, les réactifs nucléophile et électrophile à l'aide des déplacements des doublets électroniques.• Reconnaître dans un mécanisme une addition, une substitution, une élimination et une réaction acide-base.• Retrouver l'équation d'une réaction à partir d'un mécanisme la modélisant au niveau microscopique.• Identifier un catalyseur dans un mécanisme fourni.• Montrer qu'un catalyseur renforce le caractère nucléophile ou électrophile d'un site.
Profils réactionnels.	<ul style="list-style-type: none">• Relier mécanisme et profil réactionnel : nombre d'étapes, intermédiaires réactionnels, étape cinétiquement déterminante, en comparant les énergies d'activation des différentes étapes.

Des synthèses avec de meilleurs rendements

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Transformation spontanée et évolution d'un système vers un état d'équilibre.</p> <p>Augmentation du rendement de la synthèse d'un produit :</p> <ul style="list-style-type: none"> pour une réaction de synthèse donnée par : <ul style="list-style-type: none"> élimination d'un produit, ajout d'un excès de réactif, modification de la température, par changement d'un des réactifs, par limitation des réactions concurrentes : <ul style="list-style-type: none"> chimiosélectivité, régiosélectivité, stéréosélectivité. 	<ul style="list-style-type: none"> Justifier le caractère spontané d'une transformation en comparant le quotient de réaction Q_r et la constante d'équilibre K. Déterminer un rendement de synthèse. Inventorier les paramètres qui permettent d'améliorer le rendement d'une synthèse. Reconnaître, entre deux protocoles, le paramètre qui a été modifié et justifier son rôle sur l'évolution du rendement. Proposer et mettre en œuvre un protocole pour illustrer une amélioration du rendement d'une synthèse. Comparer des protocoles de synthèse et choisir le plus performant (rendement, coût, respect de l'environnement).

Des synthèses forcées

Notions et contenus	Capacités exigibles
Électrolyse, électrosynthèse, photosynthèse.	<ul style="list-style-type: none"> Réaliser expérimentalement et interpréter quelques électrolyses, dont celle de l'eau. Identifier expérimentalement ou à partir du schéma du circuit électrique, la cathode et l'anode d'un électrolyseur. Prévoir les réactions possibles aux électrodes les couples mis en jeu étant donnés. Identifier et/ou caractériser expérimentalement les espèces chimiques formées aux électrodes. Écrire les équations des réactions aux électrodes connaissant les produits formés.
Transformation forcée : apport d'énergie et évolution hors équilibre du système.	<ul style="list-style-type: none"> Distinguer le caractère forcé des électrolyses et des photosynthèses, du caractère spontané d'autres transformations, en comparant l'évolution du quotient de réaction par rapport à la constante d'équilibre. Repérer la source d'énergie mise en œuvre dans une transformation forcée.
<p>Bilan de matière lors d'une électrolyse.</p> <p>Applications courantes des électrolyses à la synthèse.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Prévoir les quantités de produits formés dans des cas simples et confronter les prévisions du modèle aux mesures. Déterminer le rendement d'une électrosynthèse. Citer quelques applications courantes des électrolyses : synthèse de métaux, de produits minéraux et organiques, stockage d'énergie, analyse et traitement de polluants. Analyser différentes voies de synthèses et montrer que l'électrolyse peut permettre de respecter quelques principes de la chimie verte (matières premières renouvelables, non consommation de ressources fossiles, absence de sous-produits carbonés).

Des synthèses inorganiques

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Synthèses inorganiques industrielles : aspects cinétiques, thermodynamiques, environnementaux.</p> <p>Un exemple de synthèse inorganique au laboratoire : la synthèse des complexes Complexe, ion ou atome central, ligand, liaison.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Analyser un ou plusieurs procédés industriels de synthèse d'une même espèce chimique en s'appuyant sur les principes de la chimie verte : <ul style="list-style-type: none"> matières premières, sous-produits, énergie, catalyseur, sécurité. Reconnaître dans un complexe : l'ion ou l'atome central, le ou les ligands, le caractère monodenté ou polydenté du ligand. Décrire l'établissement de la liaison entre l'ion ou l'atome central et le ou les ligands selon le modèle accepteur-donneur de doublet électronique. Écrire l'équation de la réaction associée à la synthèse d'un complexe.
<p>Réaction de formation d'un complexe :</p> <ul style="list-style-type: none"> constante de formation globale d'un complexe, synthèse et analyse d'un complexe. 	<ul style="list-style-type: none"> Suivre un protocole de synthèse d'un complexe. Déterminer, à l'aide d'un tableau d'avancement, le réactif limitant dans la synthèse d'un complexe et en déduire le rendement de la synthèse. Proposer ou suivre un protocole mettant en œuvre l'analyse qualitative et quantitative d'un complexe.
Complexes inorganiques, bio-inorganiques.	<ul style="list-style-type: none"> Extraire des informations pour illustrer des applications des complexes inorganiques et bio-inorganiques.

Séparation et purification

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Réaction de dissolution d'une espèce chimique dans l'eau.</p> <p>Solution saturée et notion de solubilité.</p> <p>Quotient de réaction et constante d'équilibre de dissolution.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Illustrer expérimentalement la notion de solubilité. Montrer que lors d'une dissolution le quotient de réaction Q_r évolue vers la constante d'équilibre K et qu'il ne peut l'atteindre que si la quantité d'espèce apportée est suffisante. Associer solution saturée et système chimique à l'équilibre.
Solubilité d'une espèce chimique dans l'eau.	<ul style="list-style-type: none"> Comparer et interpréter les solubilités de différentes espèces chimiques dans l'eau en termes d'interactions intermoléculaires et d'éventuelles réactions chimiques qu'elles engagent avec l'eau.
<p>Paramètres influençant la solubilité d'une espèce chimique en solution aqueuse :</p> <ul style="list-style-type: none"> température, composition de la solution. 	<ul style="list-style-type: none"> À partir des caractéristiques de la réaction de dissolution d'une espèce chimique dans une solution aqueuse, prévoir les paramètres influençant sa solubilité (température, pH, ions communs).
<p>Extraction d'une espèce chimique d'une phase aqueuse :</p> <ul style="list-style-type: none"> par dégazage, par solvant, par précipitation. 	<ul style="list-style-type: none"> Proposer un protocole pour extraire une espèce chimique dissoute dans l'eau. Choisir un solvant pour extraire une espèce chimique et réaliser une extraction par solvant. Proposer ou suivre un protocole pour extraire sélectivement des ions d'un mélange par précipitation.
Prévision de l'état final lors de la	<ul style="list-style-type: none"> Prédire si la solution obtenue par dissolution d'une espèce

dissolution d'une espèce chimique dans l'eau.	chimique est saturée ou non en comparant Q_r et K . Confronter les prévisions du modèle de la transformation avec les observations expérimentales.
Séparation et développement durable.	<ul style="list-style-type: none"> Extraire des informations pour justifier l'évolution des techniques de séparation et repérer celles qui s'inscrivent davantage dans le cadre du développement durable.

ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

Préparation de solutions

Notions et contenus	Capacités exigibles
<ul style="list-style-type: none"> - solvant : eau distillée, eau permutée. - soluté : densité, titre massique, concentrations massique et molaire, toxicité. <ul style="list-style-type: none"> - solution : stockage, rejet, recyclage. 	<ul style="list-style-type: none"> Justifier la nécessité d'utiliser de l'eau distillée ou permutée dans le cadre des analyses en solution. Analyser l'eau avant et après distillation, avant et après passage sur une résine échangeuse d'ions. Préparer une solution aqueuse de concentration donnée à partir d'un solide ou d'une solution de concentration connue ou d'une solution de titre massique et de densité connus. Déterminer la concentration d'une espèce chimique à partir du protocole de fabrication de la solution. Adapter le mode d'élimination d'une solution à la tolérance admise dans les eaux de rejet. Citer les paramètres d'influence sur le stockage de solutions : matériau du flacon, température, lumière.

Analyses qualitative et structurale

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Analyse qualitative : tests de reconnaissance, témoin.</p> <p>Analyse structurale : spectroscopie UV-visible, IR, RMN.</p>	<p>À l'aide de tables de données, de spectres ou de logiciels :</p> <ul style="list-style-type: none"> Proposer un protocole d'analyse qualitative pour valider une hypothèse émise sur la présence d'une espèce chimique. Exploiter des spectres UV-visible pour caractériser une espèce chimique et choisir une longueur d'onde d'analyse quantitative. Identifier des groupes fonctionnels par analyse d'un spectre IR. Relier un spectre de RMN à une molécule donnée.

Dosage par étalonnage

Notions et contenus	Capacités exigibles
Conductimétrie : conductance, conductivité, conductivité ionique molaire.	<ul style="list-style-type: none"> Proposer un protocole pour identifier les paramètres d'influence sur la conductance Utiliser un conductimètre pour mesurer la conductivité d'une solution. Concevoir un protocole et le mettre en œuvre pour comparer qualitativement des conductivités ioniques molaires d'anions et de cations : confronter les classements expérimentaux obtenus à ceux issus des tables de données. Concevoir un protocole et le mettre en œuvre pour déterminer la concentration d'une solution inconnue par comparaison à une gamme d'étalonnage.
Dosage rapide par confrontation à une échelle de teintes : bandelettes et pastilles commerciales.	<ul style="list-style-type: none"> Mettre en œuvre un protocole de dosage rapide et comparer ses avantages et ses inconvénients en termes d'efficacité et de justesse.

Dosage par titrage

Notions et contenus	Capacités exigibles
Réactions support de titrage : précipitation (suivi par conductimétrie).	<ul style="list-style-type: none"> Proposer et réaliser un protocole de titrage mettant en jeu une réaction de précipitation suivie par conductimétrie. Interpréter qualitativement l'allure de la courbe de titrage par suivi conductimétrique en utilisant des tables de conductivités ioniques molaires et en déduire le volume à l'équivalence du titrage.
Titration avec indicateurs colorés Indicateur coloré acido-basique ; zone de virage. Choix d'un indicateur pour un titrage donné. Indicateur coloré de précipitation.	<ul style="list-style-type: none"> Reconnaître expérimentalement et dans la description d'un protocole un indicateur coloré acido-basique. Tracer le diagramme de prédominance des deux formes d'un indicateur coloré pour en déduire la zone de virage. Justifier le choix d'un indicateur coloré pour un titrage donné à partir de la courbe de titrage pHmétrique et/ou des diagrammes de prédominance. Proposer et réaliser un protocole de titrage mettant en œuvre un indicateur coloré. Repérer expérimentalement l'équivalence. Interpréter le comportement de l'indicateur dans le cas du titrage d'ions halogénure selon la méthode de Mohr. Réaliser et exploiter un titrage d'ions halogénure selon la méthode de Mohr.

Capteurs électrochimiques

Notions et contenus	Capacités exigibles
Électrode. Potentiel d'électrode : électrode standard à hydrogène, électrode de référence, relation de Nernst, potentiel standard. Le potentiel d'électrode, un outil de prévision : - polarité et tension à vide (E_{fem}) des piles, - sens spontané d'évolution d'un système, siège d'une réaction d'oxydo-réduction.	<ul style="list-style-type: none"> Identifier, dans une pile, une électrode comme un système constitué par les deux membres d'un couple oxydant/réducteur et éventuellement d'un conducteur. Relier le potentiel d'électrode à la tension à vide de la pile constituée par l'électrode et l'électrode standard à hydrogène (ESH). Concevoir et mettre en œuvre un protocole pour déterminer un potentiel d'électrode à l'aide d'électrodes de référence. Déterminer expérimentalement les paramètres d'influence sur un potentiel d'électrode. Concevoir et mettre en œuvre un protocole pour déterminer ou vérifier la relation entre le potentiel d'électrode et les concentrations des constituants du couple.
Classement des oxydants et des réducteurs : échelles de potentiels, échelles de potentiels standards, relation entre différence des potentiels standards et caractère plus ou moins favorisé d'une transformation. Électrode spécifique, dosages par capteurs électrochimiques. Analyse en temps réel pour prévenir toutes pollutions et limiter les risques.	<ul style="list-style-type: none"> Écrire la relation de Nernst pour un couple donné. Utiliser la relation de Nernst pour déterminer un potentiel d'électrode. Prévoir, à l'aide des potentiels d'électrode, la polarité d'une pile, sa tension à vide (E_{fem}) et son évolution lors de son fonctionnement et valider expérimentalement ces prévisions. Prévoir le sens spontané d'évolution lors d'une transformation rédox à l'aide des potentiels d'électrode des couples mis en jeu et confronter expérimentalement le modèle. Interpréter l'absence de l'évolution prévue pour un système en termes de blocage cinétique. Comparer les pouvoirs oxydants (les pouvoirs réducteurs) d'espèces chimiques à l'aide d'une échelle de potentiels d'électrode. Prévoir le caractère favorisé d'une transformation à l'aide d'une échelle de potentiels standards.

	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier une électrode à un « capteur électrochimique » spécifique d'une espèce chimique. • Relier le potentiel d'une électrode spécifique d'une espèce chimique à sa concentration. • Concevoir et mettre en œuvre un protocole de dosage par étalonnage d'une espèce chimique à l'aide d'un capteur électrochimique. • Extraire des informations pour illustrer des applications historiques, actuelles et en développement des capteurs électrochimiques, notamment dans le cadre de mesures environnementales : mesures de traces d'éléments, dosage de gaz (polluants, sonde lambda), analyse en temps réel et transmission des données pour contrôle et régulation.
--	--

Choix d'une technique d'analyse

Notions et contenus	Capacités exigibles
Critères de choix : <ul style="list-style-type: none"> - coût, - durée, - justesse et fidélité, - seuil de détection, - discrimination de plusieurs espèces dans le cas d'un mélange. 	Choisir, parmi plusieurs techniques, la plus performante pour un critère donné (coût, durée, justesse et fidélité, seuil, discrimination de plusieurs espèces) en s'appuyant sur son principe, sa mise en œuvre et ses résultats expérimentaux pour une analyse donnée.

SYSTÈMES ET PROCÉDÉS

La complexité du monde actuel est une évidence ; elle apparaît distinctement aussi bien dans les phénomènes naturels, dont l'évolution est déterminée par des facteurs multiples et interdépendants, qu'à travers les réalisations technologiques contemporaines. Celles-ci résultent de la synergie de disciplines variées, de la contribution et du croisement de différents points de vue intégrant même les grands enjeux sociaux et économiques. Cette complexité exige que la formation scientifique des jeunes ne s'enferme pas dans des démarches analytiques et encyclopédiques attachées principalement à des objets et à des modèles standardisés ainsi qu'à des domaines de savoirs compartimentés. Cette formation doit s'ouvrir à des approches plus globales, plus synthétiques et plus intégratives, en se référant en permanence aux réalités constitutives de l'environnement immédiat. C'est assurément l'une des clefs pédagogiques pour susciter chez les élèves l'intérêt, la curiosité et le désir d'apprendre mais aussi pour leur permettre de développer les compétences transversales dont ils auront besoin dans leurs vies professionnelle et personnelle.

À cet égard, l'organisation en thématiques des contenus des enseignements de tronc commun et de spécialité est destinée à favoriser une telle évolution dans le transfert des connaissances.

L'enseignement « systèmes et procédés » en classe terminale doit largement accompagner cette mutation. Il est conçu principalement pour répondre aux objectifs suivants :

- faire acquérir aux élèves des méthodes d'analyse permettant de mobiliser et d'organiser leurs connaissances afin d'appréhender les procédés physico chimiques industriels et de laboratoire actuels et à venir, de façon à en garantir la pratique maîtrisée et optimale ;
- leur faire percevoir que les concepts et les modèles des sciences de la matière permettent de décrire le fonctionnement des réalisations technologiques contemporaines simples ou complexes et que leur connaissance a été essentielle pour les concevoir, les réaliser ou pour envisager des innovations ;
- leur montrer que la conception et la réalisation des systèmes et procédés ont le plus souvent impliqué des démarches de résolution de problèmes scientifiques, faisant ainsi progresser les savoirs ;
- leur donner une vision moins parcellisée et moins dispersée du savoir, les systèmes actuels et à venir, nécessitant, de par leur complexité, une culture scientifique pluridisciplinaire beaucoup plus large et plus globale ;
- développer leurs compétences pour élaborer des modèles pour expliquer, pour comprendre, pour prévoir et pour agir efficacement ;
- favoriser, à travers l'approche de la complexité du réel, des attitudes et des usages personnels et professionnels plus attentifs à la préservation de l'environnement, à la pluralité des points de vue, à la coopération et à la pluridisciplinarité.

Les **systèmes supports de cet enseignement** sont des dispositifs matériels **réels** d'usage public ou privé, ou **didactisés**, caractérisés par leur fonction globale impliquant un ou plusieurs phénomènes physico-chimiques « internes ». Ils sont constitués d'éléments ou de parties en interaction concourant à la mise en œuvre optimisée de la fonction globale opérant sur la grandeur d'entrée (matière, énergie ou information) pour donner la grandeur de sortie. Les relations fonctionnelles d'entrée-sortie peuvent être des transformations qualitatives, des transformations quantitatives, des opérations de stockage, de transport, de tri, ... On s'intéressera tout particulièrement aux performances et aux solutions scientifiques ayant favorisé des perfectionnements du système ou susceptibles d'amener des innovations, en croisant différents points de vue : coût, rendement, protection de l'environnement, acceptabilité sociale ... Des comparaisons entre systèmes remplissant la même fonction peuvent être très fécondes pour remobiliser les compétences et exercer l'esprit critique.

Pour atteindre les objectifs visés par cet enseignement , les élèves sont mis en présence de **systèmes réels ou didactisés**, finalisés et conçus pour assurer une ou des fonction(s) déterminée(s) à travers la mise en œuvre d'un ou de plusieurs procédés physico chimiques ; leur conception a, le plus souvent, obligé à résoudre un (ou des problèmes), scientifique(s) et technologique(s) spécifiques. Ils sont utilisés dans la « vie réelle » : dans les laboratoires, dans les industries de procédés, dans les activités personnelles ou de services ... Ils doivent donner lieu, au laboratoire du lycée, à des activités expérimentales de physique et de chimie réalisées par les élèves et à des synthèses collectives permettant la structuration des connaissances.

Organisation de l'enseignement :

L'enseignement est développé à partir de quelques systèmes en usage dans l'espace public ou dans la sphère privée, choisis en début d'année scolaire par l'équipe pédagogique comme supports d'apprentissage.

Tout en cherchant prioritairement à exploiter les ressources matérielles de l'établissement, l'équipe ne devra pas aller au-delà d'un nombre de six systèmes différents étudiés dans l'année scolaire. De plus, les interactions avec l'environnement socio-économique de l'établissement doivent permettre de disposer de supports matériels pertinents, récents et bien documentés.

Néanmoins il pourra se faire que, pour de multiples raisons, les systèmes envisagés ne puissent être physiquement disponibles au laboratoire ; le dossier scientifique remis aux élèves, fil directeur de l'étude, devra, dans ce cas, être suffisamment documenté, notamment sur le plan scientifique et technologique pour les aider à se construire une représentation aussi proche que possible de la réalité tout en ouvrant sur des activités concrètes de laboratoire. Des visites de laboratoires et d'entreprises viendront compléter utilement la formation.

Le système :

Quand le système est présent dans l'établissement sous sa forme réelle – industrielle ou de laboratoire ou didactisée–, une première approche globale sera envisagée afin de définir dans un premier temps les principales caractéristiques du système:

- fonction(s) globale(s) réalisée(s) ;
- grandeurs ou flux d'entrée et de sortie ;
- principales performances attendues ;
- dimensions économique et sociétale.

Si le système le permet, une analyse progressive de son fonctionnement, en s'appuyant sur le système lui-même, pourra être conduite parallèlement à des études sur maquettes ou sur montages.

Quand le système n'est pas présent dans l'établissement, un travail préliminaire sur le dossier scientifique permettra de dégager ses principales caractéristiques.

Une analyse progressive du fonctionnement sur le système lui-même pourra être conduite parallèlement à des études sur maquettes ou sur des montages.

Du système aux procédés :

À partir des éléments constitutifs du système, on dégagera progressivement les concepts et les modèles physiques ou chimiques correspondant aux opérations mises en œuvre dans le système étudié en se gardant de tout développement théorique qui ne se justifierait pas. Les notions seront apportées au fur et à mesure de leurs besoins. Dans certains cas l'analyse ne pourra donc être prolongée jusqu'au niveau le plus fin.

Ce sera l'occasion de réinvestir des notions déjà rencontrées dans les autres parties des programmes de la série STL, tant au niveau de la classe de première qu'au niveau de la terminale. Ce sera aussi l'occasion d'introduire de nouvelles notions nécessaires à la compréhension du fonctionnement du système.

L'usage d'outils mathématiques qui ne seraient pas au programme de cette série est proscrit.

L'équipe pédagogique de sciences physiques et chimiques devra s'efforcer de trouver un juste équilibre entre plusieurs critères :

- la disponibilité locale de systèmes et leur pertinence ;
- la diversité des procédés ;
- la diversité des domaines scientifiques explorés au travers des systèmes étudiés : pré-requis et compléments scientifiques compatibles avec les contraintes (durée à consacrer, adaptation au niveau de la classe terminale, outils et matériels nécessaires,...).

L'ensemble des notions et contenus nouveaux et des capacités complémentaires à faire acquérir lors de cet enseignement est précisé dans le tableau « **Capacités complémentaires à celles des autres programmes** ». Ce tableau définit les limites qu'il faut donner à la formation en termes de capacités à maîtriser par les élèves à la fin de la scolarité.

Le programme propose cinq exemples en annexe. Ils donnent des indications sur le choix des systèmes étudiés et sur l'articulation avec les différentes notions du programme.

Ils sont structurés de la manière suivante :

- une brève description du procédé étudié ;
- les notions déjà étudiées dans les différents programmes de la série STL (« physique-chimie » en première et en terminale (1^{ère} PC et T^{ale} PC), « mesures et instrumentation » (MI),

« sciences physiques et chimiques en laboratoire » en première et en terminale (1^{ère} PCL et T^{ale} PCL), ...);

- les nouvelles notions nécessaires pour l'étude du procédé.

Tout autre système et tout autre procédé permettant d'aborder les capacités complémentaires à celles des autres programmes et revêtant une réalité dans les espaces public ou privé peuvent être choisis par les équipes pédagogiques.

Si l'ensemble des notions à introduire doit être couvert, il est par ailleurs souhaitable qu'elles soient communes à plusieurs procédés afin de permettre aux élèves de les réinvestir dans des contextes différents.

Capacités exigibles complémentaires à celles du tronc commun.

Thermodynamique

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Transfert d'énergie d'une source froide à une source chaude.</p> <p>Transfert d'énergie sous forme de travail et de chaleur.</p> <p>Modèle du gaz parfait.</p> <p>Premier principe et second principe de la thermodynamique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pour une pompe à chaleur, un climatiseur ou un réfrigérateur : décrire le principe de fonctionnement ; identifier les transferts d'énergie mis en jeu et réaliser le bilan énergétique. • Citer l'influence de la différence de température des deux sources sur le coefficient de performance d'une pompe à chaleur ou d'un climatiseur. • Distinguer un échange d'énergie par travail et par transfert thermique. • Expliquer comment une compression ou une détente augmente ou abaisse la température d'un gaz. • Appliquer le principe de conservation de l'énergie à une machine ditherme. • Énoncer le second principe de la thermodynamique comme l'impossibilité d'un transfert thermique spontané d'une source froide vers une source chaude. • Énoncer et exploiter, dans le cadre du second principe, la relation entre les énergies échangées par transferts thermiques et les températures des sources pour une machine ditherme. • Définir, exprimer et calculer le rendement ou l'efficacité d'une machine thermique. • Distinguer le coefficient de performance d'une machine thermique de son efficacité thermodynamique.
Irréversibilité.	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier des causes d'irréversibilité.
<p>Flux thermique en régime permanent.</p> <p>Échangeur thermique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Déterminer expérimentalement le flux thermique échangé par les fluides dans un échangeur liquide – liquide. • Évaluer à partir de données expérimentales le coefficient global d'échange.
Phénomènes de transport.	<ul style="list-style-type: none"> • Mettre en évidence expérimentalement le phénomène de diffusion. • Mettre en évidence expérimentalement l'influence de la température sur la diffusion. • Mettre en évidence expérimentalement l'effet de la masse molaire moléculaire des espèces sur la diffusion.
<p>Diagrammes binaires.</p> <p>Distillation.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Réaliser et légender le tracé d'un diagramme isobare d'équilibre liquide-vapeur d'un mélange binaire à partir des courbes d'analyse thermique et de la composition des phases liquide et gaz. • Exploiter un diagramme isobare d'équilibre liquide-vapeur pour identifier le composé le plus volatil et reconnaître la présence d'un azéotrope. • Dédire d'un diagramme isobare d'équilibre liquide-vapeur, la composition des premières bulles de vapeur formées.

	<ul style="list-style-type: none"> • Prévoir la nature du distillat et du résidu d'une distillation fractionnée avec ou sans azéotrope. • Analyser par réfractométrie la composition d'un mélange à partir d'une courbe d'étalonnage. • Identifier les paramètres agissant sur le pouvoir séparateur des colonnes. • Expliquer l'intérêt à réaliser une distillation sous pression réduite. • Identifier dans un système complexe les éléments constituant la distillation.
--	--

Mécanique des fluides

Notions et contenus	Capacités exigibles
Conservation de l'énergie. Fluide incompressible en mouvement. Puissance hydraulique. Pertes de charge.	<ul style="list-style-type: none"> • Énoncer et exploiter la loi de conservation de l'énergie d'un fluide incompressible en mouvement. • Déterminer expérimentalement l'influence de quelques paramètres sur les pertes de charge : vitesse d'écoulement, longueur et section de la canalisation, singularités.

Énergie électrique

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modèle d'un dipôle actif, limitation du modèle. Caractéristique d'un générateur. Caractérisation physique des grandeurs liées au transport de l'énergie électrique.	<ul style="list-style-type: none"> • Déterminer expérimentalement la caractéristique d'un générateur. • Visualiser une représentation temporelle d'une tension électrique, d'une intensité électrique en régime périodique et en analyser les caractéristiques. • Visualiser une représentation temporelle de la puissance instantanée consommée ou fournie par un dipôle en régime périodique et mesurer sa valeur moyenne. • Distinguer puissance moyenne et puissance instantanée. • Interpréter les données fournies par un analyseur d'énergie électrique industriel.
Conversion statique de l'énergie électrique.	<ul style="list-style-type: none"> • Énoncer et exploiter la loi de conservation de l'énergie pour un convertisseur statique idéal. • Associer l'onduleur à un convertisseur continu-alternatif • Associer le redresseur à un convertisseur alternatif-continu

Traitement du signal

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modèle d'un dipôle actif, limitation du modèle. Caractéristique de transfert statique d'un capteur. Conditionneur de capteur.	<ul style="list-style-type: none"> • Déterminer expérimentalement la caractéristique de transfert statique d'un capteur. • Visualiser la réponse temporelle d'un capteur. • Déterminer le temps de réponse d'un capteur. • Visualiser et exploiter la caractéristique de transfert d'un ensemble capteur – conditionneur.
Filtrage et amplification de tension. Gabarit.	<ul style="list-style-type: none"> • Exploiter la courbe du coefficient d'amplification en fonction de la fréquence d'un amplificateur pour déterminer ses limites d'utilisation. • Dédire les propriétés d'un filtre de la courbe représentant le coefficient d'amplification en fonction de la fréquence. • Proposer un gabarit de filtre pour répondre à un cahier des charges.
Numérisation d'une tension.	<ul style="list-style-type: none"> • Citer les caractéristiques utiles d'un CAN : nombre de bits, quantum, fréquence de conversion.

Contrôle et régulation

Notions et contenus	Capacités exigibles
Aspect fonctionnel Boucle de régulation. Schéma fonctionnel, chaînes d'action et de retour, correcteur.	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier, nommer et connaître la fonction des éléments constitutifs d'une boucle de régulation. • Établir le schéma fonctionnel d'une boucle de régulation. • Citer la nature des signaux d'interconnexion des éléments constitutifs des chaînes d'action et de retour ainsi que les valeurs normalisées les plus courantes.
Grandeurs fonctionnelles : grandeurs réglées, réglantes et perturbatrices.	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier les grandeurs fonctionnelles d'une boucle de régulation. • Placer les grandeurs fonctionnelles sur un schéma fonctionnel.
Caractéristiques statiques et dynamiques Systèmes stable et instable.	<ul style="list-style-type: none"> • Citer les définitions d'un système stable ou instable.
Caractéristique statique : gain statique ; point de fonctionnement.	<ul style="list-style-type: none"> • Tracer et exploiter la caractéristique statique d'un procédé stable. Calculer, au point de fonctionnement, le gain statique. • Mettre en évidence expérimentalement le déplacement du point de fonctionnement quand la perturbation varie.
Caractérisation des modèles comportementaux : caractéristiques dynamiques des procédés, comportement autour d'un point de fonctionnement.	<ul style="list-style-type: none"> • Différencier le comportement des systèmes par leur réponse à un échelon de commande. • Déterminer les paramètres intrinsèques des procédés : <ul style="list-style-type: none"> • pour un système stable : le gain statique, la constante de temps, le temps mort ; • pour un système instable ou intégrateur : le gain dynamique et le temps mort.
Régulation à action discontinue (TOR).	<ul style="list-style-type: none"> • Tracer et exploiter l'évolution des grandeurs à partir d'une consigne fixe pour les régulations TOR à un seuil et à deux seuils de basculement.
Régulation à action continue (PI) : critères de performance d'une boucle d'asservissement ou de régulation : <ul style="list-style-type: none"> • Précision ; • rapidité ; • amortissement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesurer les critères de performance en boucle fermée, autour d'un point de fonctionnement, suite à un échelon de consigne : <ul style="list-style-type: none"> • l'écart statique ; • le temps de réponse à 5% ; • la valeur du 1^{er} dépassement. • En asservissement et en régulation, pour un échelon de consigne ou de la perturbation : <ul style="list-style-type: none"> • Mettre en évidence expérimentalement l'influence du gain sur l'écart statique, le temps de réponse à 5% et le dépassement pour une correction proportionnelle. • Mettre en évidence expérimentalement l'influence d'une correction intégrale sur l'écart statique, le temps de réponse à 5% et le dépassement. • Comparer l'intérêt relatif d'une régulation à action discontinue et d'une régulation à action continue (avec correcteur PID) dans un contexte donné.

Matériaux

Notions et contenus	Capacités exigibles
Familles de matériaux.	<ul style="list-style-type: none"> • Différencier les grandes familles de matériaux (céramiques, métaux et alliages, verres, matières plastiques, composite, matériaux naturels ...).
Propriétés physico-chimiques des matériaux.	<ul style="list-style-type: none"> • Citer quelques propriétés physiques et chimiques d'un matériau utilisé dans un système : résistance mécanique, tenue en température et inertie chimique, densité, dureté, conductivités, porosité et état de surface, perméabilité, propriétés optiques.
Choix du matériau.	<ul style="list-style-type: none"> • Proposer, en argumentant à partir d'une documentation, un matériau adapté à une partie d'un système donné, en fonction

	d'un cahier des charges (propriétés d'usage, capacités de durabilité, durée de vie, recyclage, impact économique, impact environnemental et sociétal).
--	--

Exemple 1 : production autonome d'électricité

Système étudié : installation photovoltaïque

Entrée :	Sortie :
Rayonnement solaire	Puissance électrique
Besoins : alimentation autonome en électricité	

Fonctions	Notions et contenus des programmes	Notions et contenus complémentaires
Capture de l'énergie solaire	Coefficient de transmission énergétique (T^{ale} PCL)	Matériaux
Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique	Spectre de la lumière du soleil, longueur d'onde ($1^{\text{ère}}$ PCL + $1^{\text{ère}}$ PC) Énergie et puissance électriques ($1^{\text{ère}}$ PC)	Caractéristique d'un générateur
	Effet photovoltaïque Interaction rayonnement matière ($1^{\text{ère}}$ PCL). Énergie d'un photon ($1^{\text{ère}}$ PCL + T^{ale} PC) Conversion photovoltaïque (T^{ale} PC) Mesure de flux lumineux ($1^{\text{ère}}$ PC et $1^{\text{ère}}$ PCL) Photo détecteurs ($1^{\text{ère}}$ PCL)	
Stockage de l'énergie	Transformations chimiques et transformation d'énergie électrique (T^{ale} PC) Piles, accumulateurs, piles à combustibles (T^{ale} PC)	
Régulation de la puissance fournie à la batterie par la cellule	Loi des nœuds et lois des mailles ($1^{\text{ère}}$ PC)	Régulation
Conversion statique de l'énergie électrique (continu alternatif)	Énergie et puissance électrique ($1^{\text{ère}}$ PC) Bilan énergétique ($1^{\text{ère}}$ et T^{ale} PC)	Convertisseurs statiques
Surveillance et mise en sécurité de la batterie	Chaîne de mesure (MI)	

Exemple 2 : chauffage

Système étudié : installation domestique utilisant une pompe à chaleur. Exemple de la pompe à chaleur air/eau, technologie « fluides intermédiaires »

Entrée :	Sortie :
énergie interne de l'air extérieur et énergie électrique	énergie interne de l'air intérieur
Besoin : maintien de la température dans un espace de volume donné	

Fonction	Notions et contenus des programmes	Notions et contenus complémentaires
Transfert thermique entre deux fluides Stockage d'énergie	Énergie interne et température, capacité thermique massique (1 ^{ère} PC) Mesure de pression (MI) Mesure de température (MI) Transformations physiques et effets thermiques associés : Transfert thermique et changement d'état (T ^{ale} PC) Changements d'états d'un fluide (T ^{ale} PC).	Transfert d'énergie d'une source froide à une source chaude Transfert d'énergie sous forme de travail et de chaleur, cycle, efficacité Premier principe et second principe de la thermodynamique Modèle du gaz parfait Irréversibilité
Échange thermique Ventilation	Mesure de température (MI) Convection et conduction (1 ^{ère} PC)	Flux thermique en régime permanent Échangeur thermique
Circulation d'un fluide	Écoulement stationnaire Loi de conservation de la masse, fluide parfait et incompressible (T ^{ale} PC) Mesures de débit (MI)	Fluide incompressible en mouvement Puissance hydraulique Pertes de charge
Maintien en température d'une enceinte	Bilan thermique expérimental d'une enceinte (1 ^{ère} PC)	
Conversion de l'énergie électrique	Moteur et compresseur (T ^{ale} PC) Puissance absorbée, puissance utile, rendement (T ^{ale} PC) Convertisseur électromécanique (T ^{ale} PC)	
Régulation de température	Mesure de température, capteur de température (MI) Chaîne de traitement (MI)	Système bouclé TOR

Exemple 3 : séparation de constituants chimiques

Système étudié : distillateur

Entrée :	Sortie :
liquide(s) à distiller	distillat purifié et résidu de distillation
Besoin : obtention d'un ou plusieurs composés chimiques	

Fonctions	Notions et contenus des programmes	Notions et contenus complémentaires
Chauffage d'un mélange	Énergie et puissance électrique (1 ^{ère} PC) Énergie électrique et effet Joule (1 ^{ère} PC) Solvant, soluté, concentration (2 ^{de} , 1 ^{ère} PCL) Changement d'état (liquide-vapeur) (T ^{ale} PC) Bilan thermique d'une enceinte en régime stationnaire (1 ^{ère} PC)	
Séparation de constituants	Distillation (1 ^{ère} PCL)	Diagrammes binaires
Refroidissement du distillat	Transferts thermiques (PC) Changement d'état (vapeur-liquide) (T ^{ale} PC) Puissance thermique (1 ^{ère} PC) Rendement thermique (T ^{ale} PC)	
Contrôle et régulation de la température	Énergie interne Température (1 ^{ère} PC) Mesure de température (MI)	Boucle de régulation Régulation à action discontinue (TOR)
Contrôle et régulation des débits d'eau de refroidissement et de distillat	Écoulement stationnaire (T ^{ale} PC) Débit volumique et massique (T ^{ale} PC)	Boucle de régulation Régulation à action continue

Exemple 4 : production autonome d'électricité avec une pile à combustible.

Système étudié : pile à combustible

Entrée :	Sortie :
Réactifs - Hydrogène et oxygène (air) ou - Méthanol et oxygène (air)	Énergie électrique
Besoin : fournir une puissance électrique sous une tension donnée	

Fonction	Notions et contenus des programmes	Notions et contenus complémentaires
Stockage des réactifs - Stockage de l'hydrogène - Stockage du méthanol	Mesure de pression (MI ; T ^{alé} PC) Mesure de volume (MI) Analyse des risques (1 ^{ère} PC)	Modèle du gaz parfait
Humidification des gaz à l'entrée	États de la matière. Transfert thermiques et changements d'état. Transformations physiques et effets thermiques (T ^{alé} PC).	Régulation
Détente et compression des gaz	Mesure de pression (MI) Mesure de débit (MI ; T ^{alé} PC) Débit volumique (T ^{alé} PC)	Régulation de pression et de débit (continue et discontinue)
Conversion d'énergie chimique en énergie électrique	Transformation chimique et transfert d'énergie sous forme électrique (T ^{alé} PC) Piles à combustible (T ^{alé} PC) Catalyseurs (T ^{alé} PC)	Propriétés physico-chimiques des matériaux Puissance moyenne et puissance instantanée
Régulation de la température de l'empilement des modules	Bilan thermique expérimental d'une enceinte (1 ^{ère} PC) Mesure de température (MI; 1 ^{ère} PC)	Régulation
Régulation de tension	Mesure de tension, capteur de courant (MI) Tension et intensité électriques dans un circuit en régime continu (1 ^{er} PC) Conditions d'utilisation optimales d'une batterie (T ^{alé} PC) Chaîne de traitement (MI)	Caractéristique d'un générateur Système bouclé Régulation

Exemple 5 : obtention d'eau douce

Système réel étudié : osmoseur pour la plaisance

Entrée :	Sortie :
- eau de mer	- eau douce
Besoin : quantité quotidienne d'eau douce	

Fonction	Notions et contenus des programmes	Notions et contenus complémentaires
Pompage et mise sous pression de l'eau de mer	Énergie et puissance électrique (1 ^{ère} PC) Puissance absorbée, puissance utile, rendement d'un convertisseur électromécanique (T ^{ale} PC) Rendement, débit volumique (T ^{ale} PC)	Fluide incompressible en mouvement Conservation de l'énergie d'un fluide incompressible en mouvement Puissance hydraulique Conservation de l'énergie Pertes de charge
Prétraitements de l'eau (réduction du colmatage de la membrane et de la formation de précipités)	Nanomatériaux (1 ^{ère} et T ^{ale} PC) Filtration (1 ^{ère} PCL) Réactions de précipitation (T ^{ale} PCL) Polymères (1 ^{ère} PC) Solubilité, polarité (T ^{ale} PC)	Matériaux : propriétés physicochimiques, choix
Diffusion au travers d'une membrane semi-perméable	Solvant, soluté, dissolution, concentration, dilution (2 ^{de} , 1 ^{ère} PCL) Séparation et purification (1 ^{ère} PCL) Pression dans un fluide (2 ^{de} , T ^{ale} PC) Polymères (1 ^{ère} PC) Pression dans un fluide (2 ^{de} , T ^{ale} PC) Écoulement d'un fluide, débit (T ^{ale} PC)	Phénomènes de transport
Contrôle en ligne des concentrations dans le perméat Récupération de l'énergie hydraulique du concentrat (turbopompes, turbines, échangeurs de pression)	Conductimétrie (1 ^{ère} et T ^{ale} PCL) Écoulement d'un fluide, débit (T ^{ale} PC)	Fluide incompressible en mouvement. Puissance hydraulique Conservation de l'énergie Pertes de charge