

# RÉFORME DU LYCÉE

## SEPTEMBRE 2012 – CLASSE DE TERMINALE S

### OBJECTIFS DU PROGRAMME ; LES 5 GRANDES COMPÉTENCES

#### INTRODUCTION : VERS L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ; ENJEUX ET OBJECTIFS DE FORMATION

La formation initiale des élèves et des étudiants s'inscrit désormais dans deux ensembles cohérents :

- l'école primaire et le collège constituent le temps de la scolarité obligatoire dont la colonne vertébrale est le socle commun, défini comme le corpus de connaissances, de capacités et d'attitudes indispensables à maîtriser pour réussir sa vie d'adulte ;
- le lycée et l'enseignement supérieur prolongent la scolarité obligatoire pour plus de 70 % des élèves s'agissant du lycée (objectif de la loi d'orientation de 1989 : 80 % d'une tranche d'âge au niveau du baccalauréat) et pour près de 50 % d'entre eux si l'on se réfère à l'objectif de la loi de 2005 (un élève sur deux au niveau Bac + 3). C'est l'enjeu de la formation désormais connue sous l'appellation Bac – 3, Bac + 3.

Les échecs au niveau Bac + 1 sont aujourd'hui trop nombreux, tout particulièrement en première année de licence, à l'université. Comment y remédier ? Poser cette question, c'est se demander quelles sont les compétences qu'un étudiant doit être en capacité de mobiliser pour réussir.

Interrogés à ce sujet, les universitaires répondent assez systématiquement : ils (les étudiants) ne savent pas travailler seuls ; ils ne savent pas s'organiser en présence d'une situation nouvelle ; ils sont incapables d'apprendre par eux-mêmes à l'occasion d'une recherche documentaire, etc. Il faut pouvoir répondre à ces arguments. Les nouveaux programmes ont la volonté de travailler les grandes compétences que sont l'exploration documentaire, la résolution de problèmes, la mise en œuvre de raisonnements qualitatifs, etc. comme nous le détaillerons dans la suite de ce paragraphe.

S'agissant de la classe de terminale, cet aspect de la formation des élèves prend une importance toute particulière ; elle doit permettre aux plus curieux, à ceux qui envisagent des études supérieures scientifiques longues et ambitieuses de trouver des temps d'approfondissement pour « aller plus loin dans leur curiosité » : nous verrons que cette dimension sera présente, tout particulièrement, dans une des déclinaisons de l'accompagnement personnalisé. Elle doit aussi consolider les bases de la démarche scientifique, largement abordée en Première S, mais qu'il conviendra en Terminale de rendre plus exigeante en soignant la réflexion sur les limites des modèles (la relativité restreinte et les éléments de mécanique quantique introduits pourront y contribuer), la précision des résultats et l'analyse des dispositifs étudiés, etc.

Il faut aussi évoquer la volonté de placer les élèves en activité et de rompre, aussi souvent que possible, avec la pratique d'un discours frontal dont on sait depuis longtemps qu'il ne convient qu'à un nombre limité d'élèves. On peut à cet égard, reparler de la « résolution de problèmes » mais aussi, les activités gravitant autour de la compétence « extraire et exploiter des informations », et d'une façon générale, toutes celles qui relèvent des démarches de pédagogie active.

Nous ne terminerons pas cette introduction sans évoquer l'outil mathématique dont on entend souvent dire qu'il n'est plus aussi mobilisé qu'auparavant. C'est vrai que les équations différentielles disparaissant des programmes de Mathématiques, il n'était plus possible de traiter en Physique la Mécanique de Newton comme par le passé ; cela ne signifie pas pour autant que notre discipline fasse l'impasse du quantitatif : les documents d'accompagnement disponibles sur EDUSCOL ou sur le site académique vous en donneront la preuve que ce soit vis-à-vis du programme spécifique ou du programme de spécialité. L'importance rappelée de l'analyse critique des résultats, nous y reviendrons, nécessite une exploitation mathématique : ordres de grandeur, détermination des incertitudes sur une mesure ou analyses statistiques. Les modèles introduits par le professeur ou construits par l'élève lors des activités documentaires seront exprimés, la plupart du temps, par des formules mathématiques.

## 1. TRANSFORMER L'INFORMATION EN CONNAISSANCE

Dans un livre paru en 1990, *Les nouveaux pouvoirs*, Alvin TOFFLER montrait que la nature du pouvoir était en train de se modifier et que son moteur serait désormais principalement fondé sur le savoir et la communication ; vingt ans plus tard, avec l'explosion des médias au premier rang desquels il convient de citer l'Internet, nous sommes submergés *par des informations de tous ordres qui nous arrivent dans l'immédiateté et de toutes parts*. Concernant l'adolescent, l'école n'est plus le vecteur unique de ces informations, loin s'en faut : il y a cinquante ans, on estimait que le contenu du cerveau d'un jeune de 15 ans provenait à 75% de l'école et à 25% de « l'extérieur » ; aujourd'hui, c'est l'inverse.

Mais toutes les informations ne se valent pas : si l'on peut considérer que celle provenant des bancs de l'école est structurée, rigoureuse et argumentée, celle présente sur la toile ne l'est généralement pas, du moins si l'on ne met pas de vigilance dans la recherche de ses sources. Doit-on pour autant ne pas la prendre en compte ? Peut-on accepter de mettre de côté 75% d'un adolescent ? Non, bien sûr et c'est pourquoi l'une des missions des enseignants d'aujourd'hui est d'accompagner les élèves dans le chemin qui sépare une information brute en une connaissance stabilisée. Nous avons bien conscience de l'évolution qui est en train de s'opérer, tant en ce qui concerne l'Ecole, en tant qu'institution, que pour les professeurs. L'Ecole ne peut plus définir un corpus « lire, écrire, compter », accompagné d'un cours de morale républicaine pour assurer l'insertion des enfants dans une société complexe et ouverte comme la nôtre. Elle doit accepter qu'elle ne sache pas, avec certitude, ce que seront les besoins, en termes de connaissances et de compétences, de nos élèves dans 10 ou 20 ans. Cette absence de certitude est vraie qu'il s'agisse de l'emploi exercé comme des besoins du citoyen.

Pour le professeur la tâche est, bien entendu, beaucoup plus complexe. L'impression de savoirs stables qui pouvait se dégager de la lecture des précédents programmes scolaires ne peut être maintenue en l'état. Est-ce que l'on peut exclure des programmes des pans de la physique moderne qui ne sont connus des élèves qu'à travers de la vulgarisation scientifique voire de la science fiction (relativité restreinte, particules de haute énergie, nanotechnologie). Et l'avènement du numérique, dans les objets courants comme dans les pratiques des scientifiques (méthode des éléments finis, numérisation) n'invite-t-il pas à reconsidérer la place du traitement mathématique dans les équations ?

Les inspecteurs (IA-IPR comme IGEN) savent bien que l'on n'est pas spécialiste de tout et qu'une des évolutions à mener, dans le domaine de la didactique, est de passer d'une physique simple voire simpliste mais complètement maîtrisée par le professeur, à un enseignement scientifique sur des objets complexes sur lesquels le professeur ne possède pas l'ensemble des connaissances. Cette difficulté est pourtant celle que rencontre le scientifique dans sa pratique quotidienne en mettant en lien des connaissances et des techniques. Pour réussir, il a besoin de porter un regard critique sur les outils utilisés tout en ayant une base structurée suffisante pour être certain des choix qu'il opère.

Les recommandations pédagogiques associées à cette compétence sont bien connues :

- Faire émerger les représentations initiales des élèves par des évaluations diagnostiques qui permettent aux professeurs d'identifier leurs points forts et leurs lacunes sur un nouveau sujet
- Prendre appui, autant que faire se peut, sur des exemples concrets issus de « la vie ordinaire » et rapprocher ainsi la Physique enseignée de celle présente dans l'environnement
- Varier les supports d'information en n'en négligeant aucun et, puisqu'on est en classe terminale scientifique, ne pas négliger les revues scientifiques, les articles de la presse spécialisée, les sites institutionnels scientifiques nationaux ou régionaux (CEA, CNRS, ENS Lyon, BRGM, etc.)
- Structurer la connaissance en sachant la hiérarchiser (distinguer l'essentiel du secondaire), la corrélérer (mise en relation de phénomènes apparemment distincts mais régis par de mêmes lois), la mettre en application (une connaissance non mobilisée finit par s'évanouir), etc.

Comme on l'indiquait précédemment, la phase de structuration est la plus importante. Dans un monde ouvert sur l'information, la question n'est pas d'y avoir accès mais de l'organiser. Une information ne vient pas se surajouter à ce que l'on sait déjà mais modifie ses connaissances.

Il est primordial d'objectiver, de faire comprendre aux élèves ce qu'ils ont appris, notamment à l'issue d'une séance où les activités et les expériences ont pu être riches. Faute de temps, cette dernière partie est parfois minimisée voire reportée à une autre séance. D'un point de vue pédagogique, on aura toujours intérêt à souligner ce qui a été appris, le faire reformuler par les élèves, l'opérationnaliser.

Loin de nous l'idée d'opposer connaissances à compétences ou de vous inviter à multiplier des activités scientifiques qui confinaient à l'activisme. Plus que jamais, le mot de Montaigne « il vaut mieux avoir une tête bien faite que bien pleine » (*je voudrais aussi qu'on fût soigneux de lui choisir un conducteur qui eût plutôt la tête bien faite que bien pleine*, Montaigne, les Essais, chapitre XXVI) oblige à porter une attention sur ce que l'élève sait et la façon dont il sait utiliser ce qu'il sait.

## 2. FORMER À LA DÉMARCHE SCIENTIFIQUE DANS LE PROLONGEMENT DE LA CLASSE DE PREMIÈRE S

Comme nous l'avons cité régulièrement dans nos lettres de rentrée, l'enseignement des sciences physiques comporte trois axes : donner une culture générale scientifique, construire des concepts modélisables, former à la démarche scientifique. Ces trois axes ne prennent pas la même valeur selon les classes ou la série. Dans notre esprit, ils sont complémentaires, liés et ne s'opposent pas les uns aux autres. Si ces trois objectifs sont admis par les professeurs de sciences physiques, force est de constater que dans le cadre de la certification, en série scientifique, la vérification de l'acquisition de concepts, leur opérationnalisation, était bien plus ambitieuse que l'évaluation de la capacité à mener une démarche scientifique. Ce qui s'en rapprochait le plus était l'épreuve d'ECE dont le « C » change de nom pour devenir « compétences ».

L'une des plus importantes évolutions de ces nouveaux programmes porte sur la nouvelle épreuve d'ECE. Il va de soi, qu'en amont, il est impérieux de modifier les pratiques pédagogiques. Ceci peut-être effectué en classe entière, autour d'une expérience et, bien entendu, en TP. Une des difficultés légitimes porte sur le manque de connaissance des élèves pour pratiquer ce type de démarche. Et pourtant dès l'école primaire, elle est susceptible d'être mise en œuvre comme en témoignent certaines pratiques.

Quelques remarques, conseils, pour terminer :

- Il ne s'agit, bien évidemment, pas de transformer l'ensemble des TP pour mettre les élèves en situation de pratiquer une démarche scientifique.
- On objecte que parfois les élèves sont démunis voire rechignent à chercher par eux-mêmes. Ceci est vrai ; plus encore, nous sommes régulièrement surpris de voir des élèves se lancer dans la réalisation d'expériences, de mesures, sans connaître le sens de ce qu'ils sont en train de faire : par exemple relever pendant une heure la température d'une eau tiède qui se refroidit.
- Il convient d'expliquer aux élèves qu'ils seront évalués sur leur capacité à mener une démarche scientifique et qu'il convient de les y entraîner. En AP, en seconde, en première S, il est possible de les faire travailler sur des items de PISA, sur l'exemple du thermomètre, afin de leur montrer ce que l'on entend par « pratiquer une démarche scientifique ». A cette occasion, on pourra naturellement présenter la grille de l'IGEN, un exemple de sujet de baccalauréat.
- Ce type d'activité peut donner des résultats surprenants. Dans un lycée où il a été mis en place, certains « bons » élèves ont été décontenancés. D'autres plus moyens voire faibles ont très bien réussi l'exercice. Soyons optimistes et considérons que des élèves scolaires ont besoin d'un temps d'adaptation, alors que les autres, à travers la valorisation de leurs compétences scientifiques, se remotiveront pour la discipline.
- La pratique d'une démarche scientifique n'induit pas nécessairement des gestes techniques complexes. Il sera sans doute nécessaire de passer moins de temps à réaliser des mesures répétitives, à maîtriser un nouvel appareil. En revanche, on pourra placer les élèves en situation de proposer un protocole, de valider, de reformuler, de synthétiser. On aura intérêt, quand c'est possible, à partager les tâches entre les différents groupes. Par exemple, au lieu de faire étudier à tous les élèves la façon dont un paramètre modifie une grandeur, on pourra ne faire étudier qu'un seul paramètre à chaque groupe. En conséquence, les élèves passeront davantage de temps à proposer le protocole, valider le modèle ou présenter les résultats à l'écrit ou à l'oral.

### 3. EXTRAIRE ET EXPLOITER DES INFORMATIONS

Rappelons tout d'abord que cette compétence étant celle que l'académie d'Orléans-Tours doit travailler dans le cadre de sa contribution aux documents d'accompagnement nationaux, nous disposons d'ores et déjà d'un certain nombre d'exemples concrets illustrant diverses manières de la mettre en œuvre dans la classe et qu'un atelier y sera consacré cet après-midi. Aussi, dans cette présentation matinale, nous contenterons-nous d'en tracer les contours et de justifier sa présence dans le programme.

Remarquons sans plus tarder que cette compétence est celle que mobilise un enseignant qui prépare son cours en s'entourant de diverses sources (manuels scolaires, encyclopédies, ouvrages spécialisés, articles scientifiques, etc.) et en en dégagant un contenu scientifique à transmettre aux élèves, des activités (documentaires, expérimentales) à leur proposer, etc. C'est aussi la pratique habituelle du chercheur ou de l'étudiant qui se lance dans une thèse et qui commence par « faire de la bibliographie » en recherchant ce qui a déjà été publié sur le sujet, en identifiant les conclusions qui ont déjà été tirées et en repérant les domaines non fouillés ou les problématiques incomplètement résolues.

C'est l'attitude que l'on aimerait développer chez nos élèves afin qu'ils manifestent, de temps à autre, la curiosité, en achetant une revue scientifique, un livre, etc. d'acquérir ou de fortifier une connaissance dans un domaine mis en exergue par les médias ou sur tel sujet dont ils auraient entendu parler et sur lequel ils aimeraient en savoir plus.

C'est enfin ce que l'on pratique soi-même, dans sa vie de citoyen : je veux acheter un bien immobilier : vais-je voir un notaire, un conseiller fiscal ou bien, est-ce que je cherche l'information seul, dans un premier temps ? Un proche est touché par une maladie qui l'oblige à suivre un traitement lourd : quelles informations rechercher pour faire face à la situation ? Je suis étudiant, comment choisir une université pour un an à l'étranger ? Quels sont les avantages d'un site par rapport à un autre ? Un homme politique propose de prendre une mesure en arguant qu'elle existe dans un autre pays sous cette forme.

Comment le vérifier, comment prendre en compte la situation étrangère et nécessairement différente ? Quels sont les arguments pour ou contre ?

Cette compétence est citée dans le corps du programme de Terminale S une vingtaine de fois ; cela témoigne de l'importance qui lui est accordée. Éliminons immédiatement une critique parfois entendue et qui consiste à dire qu'elle aurait vocation à se substituer aux activités expérimentales : tout d'abord, les alinéas figurant en italique dans le programme et qui relèvent d'une pratique de laboratoire sont au nombre d'une trentaine ; cela prouve qu'il n'y a, en Terminale S, aucun problème pour mettre en œuvre une séance de travaux pratiques hebdomadaire surtout si l'on souhaite garder deux séances pour confronter les élèves à l'évaluation telle qu'ils la connaîtront en fin d'année. Ensuite, comme nous le verrons dans certains exemples qui vous seront proposés, *Extraire et exploiter des informations* (en abrégé EEI) peut déboucher, entre autres, sur une activité expérimentale afin de valider une hypothèse dégagée de l'étude préalable effectuée.

Mais reprenons le préambule du programme pour découvrir les principaux objectifs associés à cette compétence et la façon de la mettre en œuvre en classe.

*Les activités proposées aux élèves au sujet de la compétence « extraire » et leurs connaissances acquises doivent les conduire à s'interroger de manière critique sur la valeur scientifique des informations, sur la pertinence de leur prise en compte, et à choisir de façon argumentée ce qui est à retenir dans des ensembles où l'information est souvent surabondante et parfois erronée, où la connaissance objective et rationnelle doit être distinguée de l'opinion et de la croyance.*

Voilà pour les objectifs : s'interroger de manière critique sur la valeur scientifique des informations, choisir de façon argumentée ce qui est à retenir, distinguer connaissance objective et opinion. Nous avons déjà souligné le fait que nous baignons dans un monde où les informations sont partout et que ces informations n'étaient pas toujours empruntées de rigueur.

Un exemple parmi d'autres : devant un groupe de professeurs stagiaires, voici quelques années, nous avons travaillé sur le système solaire et en particulier sur l'éventuelle corrélation entre les coefficients de marée et l'alignement de la Lune avec des planètes (amplification des attractions) ; pour disposer de données numériques, certains avaient cherché sur la toile et en tapant « alignement Lune Planètes », les premiers sites qui étaient remontés dans le moteur de recherche étaient des sites d'astrologie ! Aussi, ne faudra-t-il pas s'étonner de voir, dans certains exemples des documents non pertinents côtoyer d'autres documents plus utiles pour résoudre un problème posé. Le choix à opérer n'est jamais gratuit ou fortuit ; il doit être argumenté. Les activités proposées aux élèves ne doivent pas être abordées comme des activités documentaires uniquement culturelles (même si cet aspect ne doit pas être exclu) ou journalistiques avec un caractère superficiel mais, *a contrario*, être ambitieuses, diversifiées, attractives.

*Les supports d'informations proposés aux élèves seront multiples et diversifiés : textes de vulgarisation et textes scientifiques en français et éventuellement en langue étrangère, tableaux de données, constructions graphiques, vidéos, signaux délivrés par des capteurs, spectres, modèles moléculaires, expériences réalisées ou simulées...*

Pas de commentaire particulier sur ce paragraphe qui rappelle l'importance de varier les sources (en ne se contentant pas de la littérature scolaire mais, bien au contraire, en allant aussi souvent que possible, chercher l'information à son origine : sites scientifiques, données en ligne actualisées, etc.) ; là encore, des exemples vous seront présentés. Et puis, même s'il ne s'agit pas de « piéger » les élèves, il ne faut pas s'interdire de citer ou d'utiliser un document en langue étrangère (tout particulièrement, en anglais) à condition que cela ne soit pas artificiel (comme ces exercices des manuels où l'on sent que l'auteur les a d'abord rédigés en français avant de les traduire).

*L'exploitation sera conduite en passant par l'étape d'identification des grandeurs physiques ou chimiques pertinentes et par celle de modélisation. Cette formalisation pourra conduire à l'établissement des équations du modèle puis à leur traitement mathématique, numérique ou graphique.*

Ce point est essentiel : notre discipline se construit sur les va et vient incessants entre situations réelles et modèles ; l'observation précède l'interprétation qui s'opère en confrontant des résultats qualitatifs ou quantitatifs à des représentations théoriques pré-établies ou élaborées à l'occasion. Les activités associées à la compétence EEI ont pour vocation à déboucher sur un modèle, déjà rencontré ou que l'élève se construira au cours de la résolution de l'activité ; là encore, des exemples vous seront fournis cet après-midi. On pourrait résumer ce paragraphe en disant qu'une fois l'activité terminée, l'élève a appris et que sa connaissance scientifique sur le sujet traité a augmenté. On est bien loin de l'activité qui se résume à une mise en application d'une connaissance préalable !

*L'élève est ainsi amené à raisonner avec méthode et à mettre en œuvre avec rigueur l'ensemble des étapes qui lui permettent de trouver la ou les solutions au problème posé.*

L'ensemble des étapes qui permettent à l'élève de trouver la solution au problème posé sont bien évidemment présentes dans la grille de compétences associée à la démarche scientifique ; cette grille, dont nous avons déjà parlé les années précédentes et que nous reprendrons quand nous évoquerons les questions d'évaluation, est la colonne vertébrale de notre enseignement.

Elle doit aussi constituer le guide du professeur qui cherchera à en développer tous les aspects en cours d'année en variant les situations-problème offertes aux élèves. Cela a déjà été dit précédemment « extraire et exploiter de l'information » nécessite de resituer cette connaissance au sein de connaissances déjà établies.

Il paraît important de mettre en exergue cette nouvelle connaissance :

- Est-elle dans la continuité de ce que l'on savait déjà, est-ce un exemple, un contre exemple ?
- Oblige-t-elle à revoir sa façon de se représenter un modèle, une théorie ?
- Quelles nouvelles classes de problèmes cette information permettra-t-elle d'aborder ? ...

#### 4. FAMILIARISER L'ÉLÈVE À LA PRATIQUE DE RAISONNEMENTS QUALITATIFS

*Le professeur aura à l'esprit que le recours à des outils mathématiques n'est pas le but premier de la formation des élèves en Physique-Chimie* peut-on lire dans le préambule au programme. Il vient sans doute un temps où la modélisation nécessite l'utilisation d'une mise en équation et où la relation entre des grandeurs physiques fixe les rapports qu'elles entretiennent entre elles. Mais il ne faut pas que cette quête mathématique détourne du sens physique du phénomène étudié et en gêne sa compréhension.

Le professeur Richard FEYNMAN est sans doute considéré comme l'un des plus grands pédagogues du XX<sup>ème</sup> siècle et son cours de Physique a constitué et reste encore une référence universitaire. Savez-vous que le premier tome de son cours, intitulé Mécanique I, est dépourvu de toute formule mathématique jusqu'à la 50<sup>ème</sup> page ? Et encore, la formule s'y trouvant n'est-elle que celle de l'énergie cinétique d'un objet, écrite d'une façon inhabituelle pour nous ( $E_c = P v^2 / 2g$ ). Et pourtant que de Physique avant, dont le concept d'énergie, LA grandeur conservative par excellence !

Les exploitations et les raisonnements qualitatifs auxquels invite le programme ne dispensent pas de la rigueur apportée à toute résolution mathématique ; bien au contraire, la vigilance doit être renforcée, les signaux d'erreur risquant d'être absents au terme du raisonnement (quand on effectue des calculs, on peut parfois s'apercevoir d'une erreur commise en tombant sur un résultat impossible comme une énergie cinétique négative, une quantité d'électricité inférieure à  $e$ , etc.).

*Familiariser l'élève à pratiquer des raisonnements qualitatifs, c'est l'habituer à savoir communiquer avec des non-scientifiques* : cette nouvelle phrase extraite du BO renvoie à la question toujours débattue de la vulgarisation scientifique. Comment expliquer que telle conférence nous ait enthousiasmés si ce n'est par son charisme, sa rigueur et l'excellence des raisonnements qu'elle contenait ? Et pourtant, elle était dépourvue de tout formalisme mathématique. La vulgarisation scientifique de qualité est exigeante et bien peu la maîtrisent ! Et c'est dommage car elle conditionne la circulation de la connaissance et nous préserve de l'appropriation de la science par un petit groupe d'initiés.

Repérer dans des spectres, des régularités nous permettant d'émettre une hypothèse sur la présence de groupements fonctionnels identiques dans deux espèces chimiques, observer une tache de diffraction et en déduire que l'on est en présence d'un phénomène ondulatoire, etc. : les exemples ne manquent pas dans le programme pour initier l'élève aux raisonnements qualitatifs ; ne nous en privons pas !

#### 5. DÉVELOPPER L'ANALYSE CRITIQUE DU RÉSULTAT OBTENU À L'ISSUE D'UNE DÉMARCHE DE RÉOLUTION

Cette compétence constitue le quatrième domaine de la grille déjà évoquée : VALIDER. On y trouve, en effet, de façon non exhaustive, les items suivants :

- Extraire des informations des données expérimentales et les exploiter ;
- Estimer l'incertitude d'une mesure, faire un traitement statistique d'une série de mesures ;
- Confronter un modèle à des résultats expérimentaux : vérifier la cohérence des résultats obtenus avec ceux attendus ;
- Analyser l'ensemble des résultats de façon critique et faire des propositions pour améliorer la démarche ou le modèle.

Le texte du BOEN précise que cette analyse suit une *démarche de résolution* ; derrière cette expression, figurent des stratégies variées : cela peut être une démarche expérimentale bien sûr, mais aussi une résolution d'exercice écrit ; ainsi, une dernière question, au terme d'un exercice qui a produit plusieurs résultats, visant à vérifier la cohérence entre l'un de ces résultats et une valeur tabulée ou connue des élèves, est-elle productrice de sens. Et puis, bien entendu, l'enseignement de spécialité, qui fera l'objet d'un développement en fin de matinée et qui est fondé sur la *résolution de problèmes*, est au cœur de cette logique comme nous le verrons.

Après avoir rappelé la ressource essentielle pour cette grille de compétences (le document de l'IGEN, *Former et évaluer par compétences...* disponible sur EDUSCOL), reprenons rapidement les quatre items cités et voyons en quoi, sur un exemple, une analyse critique peut être produite.

#### Extraire des informations des données expérimentales et les exploiter :

Au terme d'une activité ayant conduit à placer dans une représentation  $y = f(x)$  un nuage de points, une modélisation par régression linéaire produit une équation  $y = a.x$  ; il convient alors de s'interroger sur la tendance à la linéarité du processus étudié : le modèle linéaire est-il acceptable ?

#### Estimer l'incertitude d'une mesure, faire un traitement statistique d'une série de mesures :

Rappelons l'existence d'un document de cadrage, lui aussi rédigé par l'IGEN et disponible sur EDUSCOL : *Nombres, mesures et incertitudes*. On y trouvera une présentation très complète du sujet ; aujourd'hui, nous nous contenterons du préambule du programme pour souligner que cette préoccupation n'a non seulement pas disparu mais qu'elle est même réaffirmée.

Quelques remarques à ce sujet :

- un résultat n'est acceptable qu'au regard de la précision attendue : pour des nombres écrits en notation scientifique, si une décimale est ce que l'on peut espérer de mieux pour un pH, il en faut au moins 5 pour les masses des noyaux utilisées dans les calculs de défaut de masse ;
- le vocabulaire associé aux incertitudes de mesure est mal maîtrisé ; ainsi, le terme précision est-il trop souvent utilisé en lieu et place du terme « sensibilité » (cette balance est précise au dg) ;
- les outils de calculs utilisés aujourd'hui (calculatrices scientifiques, tableurs, etc.) proposent les fonctions statistiques nécessaires aux traitements associés et les élèves n'ont pas besoin de les programmer : cette facilité, fort appréciable, ne doit pas occulter le sens de ces fonctions qu'il convient d'explicitier aux élèves sur des exemples simples (il est ainsi facile de montrer qu'un faible écart-type est associé à une distribution « ramassée ») ;
- le fait de travailler avec un nombre fini de valeurs conduit à majorer les intervalles que fournissent les mathématiques statistiques quand on cherche à établir un intervalle dans lequel on aura x % de chances de trouver la valeur « vraie » ; c'est l'origine des coefficients de Student dans les expressions consacrées. Il n'est pas prévu développer ces mathématiques compliquées en Terminale S. Chaque fois que les élèves devront effectuer des calculs de ce type, la formule ad hoc leur sera fournie ;
- les aspects mathématiques ne doivent pas, là encore, faire de l'ombre à la Physique : ainsi, par exemple, une étude statistique peut-elle aider à déclarer une mesure non recevable (si elle s'écarte de façon notoire du nuage des autres mesures).

#### Confronter un modèle à des résultats expérimentaux :

Le protocole mis en œuvre avait-il pour but de valider un modèle ? Si oui, comment analyser les résultats obtenus ? Bien entendu, on note un écart entre les prédictions du modèle et les valeurs mesurées ; mais cet écart est-il inférieur à l'incertitude associée à la mesure (cas d'un écart absolu) ou inférieur à la précision de la mesure (cas d'un écart relatif) ? Si l'on répond par l'affirmative, le modèle est validé ; dans le cas contraire, il faut le rejeter et aller en chercher un autre plus élaboré.

#### Analyser l'ensemble des résultats de façon critique et faire des propositions pour améliorer la démarche ou le modèle :

Ce dernier item résume en quelque sorte les trois précédents pour aller plus loin ; si l'analyse produite a révélé des imperfections dans le dispositif expérimental, dans les approximations effectuées, etc. il est parfois possible de trouver une autre façon d'opérer qui améliorera les résultats.

Si l'on se rend compte, après avoir évalué les sources d'erreurs, que le facteur limitant est l'incertitude associée à la mesure d'un volume, on pourra peut-être proposer de remplacer la verrerie graduée par une verrerie jaugée ou de peser le liquide si l'on en connaît la densité avec précision. De même, pour reprendre l'exemple du point précédent, soit un son complexe que l'on suppose dans un premier temps, composé de trois harmoniques ; si sa restitution par synthèse numérique laisse apparaître une trop grande différence d'allure à l'oscilloscope, alors sera-t-il sans doute nécessaire d'améliorer le modèle en y ajoutant une ou deux composantes (harmoniques de rang 4 et 5) même si elles sont de très faible amplitude ce qui justifie qu'on les avait négligées au départ.

Bien entendu, toutes ces remarques et préconisations ne doivent pas faire l'objet d'un développement spécifique déconnecté de tout contenu : il ne s'agit pas de philosopher autour des sources d'erreur ! Mais de donner du sens à ce qui est mesuré, écrit, réalisé, afin d'avoir un rapport objectif et rationnel avec le monde (ce qui, nous l'avons vu, distingue une connaissance scientifique d'une croyance).

### **EN GUISE DE CONCLUSION SUR CES GRANDES COMPÉTENCES...**

Comme vous l'avez compris, ce nouveau programme est en nette évolution par rapport aux précédents. La culture scientifique est renforcée, la démarche expérimentale est une composante fondamentale de la formation, les concepts scientifiques sont abordés parfois à partir de systèmes complexes. Dans ces conditions, la lecture que l'on doit faire du programme, dans le BOEN, est modifiée et oblige à reprogrammer son enseignement au-delà d'une simple déclinaison du programme que l'on suit.

Il est en effet nécessaire : de clarifier jusqu'où l'on va creuser un concept ; de déterminer, lorsque l'on programme une séance, les compétences qui seront travaillées. Cette programmation s'inscrit dans une vision annuelle des compétences à développer. La liberté pédagogique n'est pas un vain mot. C'était déjà le cas pour l'AP, c'est vrai pour la partie commune de TS, comme pour la spécialité. Des choix locaux devront être opérés. Pour être pertinents, ces choix sont à déterminer à l'échelle de l'établissement. Les visites des lycées que nous souhaitons programmer en 2012-2013 viseront notamment à vous (r)assurer et vous faire connaître ceux qui ont été faits dans d'autres établissements.



## LES NOUVEAUTÉS LES PLUS MARQUANTES

Comme c'était déjà le cas en Première S, le programme de Terminale est structuré autour des trois verbes d'action : observer, comprendre et agir. Le premier module prend appui sur les ondes et, après en avoir découvert plusieurs exemples, en présente les caractéristiques et quelques propriétés dont la diffraction et les interférences ; il s'achève par l'étude des spectres qui s'enrichissent dans le cadre de ce nouveau programme des spectres RMN : c'est une première nouveauté sur laquelle nous reviendrons dans quelques minutes.

Le deuxième module introduit différents modèles associés à trois domaines différents de la Physique et de la Chimie : le temps et les évolutions temporelles des systèmes ; la structure et la transformation de la matière ; l'énergie, la matière et le rayonnement. C'est dans ce module qu'on trouve deux des plus importantes nouveautés introduites par le programme : quelques éléments de relativité restreinte (caractère relatif du temps) et la dualité onde-particule (introduction aux phénomènes quantiques).

Enfin, le troisième module, qui vise à faire découvrir aux élèves quelques défis du XXI<sup>ème</sup> siècle, parcourt trois domaines (les ressources et l'environnement, l'élaboration de nouveaux matériaux, le transport et le stockage de l'information) avant de poser la question des rapports qu'entretient la science avec la société. Dans ce module, c'est le transport et le stockage de l'information que nous avons choisi de vous présenter en tant qu'innovation par rapport aux anciens programmes.

Le groupe d'experts a prévu un certain nombre de documents prochainement en ligne sur EDUSCOL qui assureront aussi bien une remise à niveau des professeurs (apports théoriques) qu'une présentation d'activités susceptibles d'être proposées à un élève de Terminale S. C'est particulièrement le cas pour les deux plus importantes nouveautés : la relativité restreinte et la dualité onde-corpuscule.

### 1. LA RELATIVITÉ RESTREINTE

#### 1.1. Un peu d'histoire

À la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, deux domaines de la Physique semblaient achevés et donnaient satisfaction chacun pris indépendamment : la mécanique « classique » et l'électromagnétisme.

La mécanique classique reposait sur le principe de relativité que l'on peut exprimer ainsi : *aucune expérience de mécanique n'est en mesure de distinguer le repos du mouvement rectiligne uniforme*. De nombreuses expériences l'ont vérifié. Pour mémoire, nous citerons l'expérience (de pensée) due à Galilée (et vérifiée par la suite par Gassendi) : soit un bateau naviguant sur une mer calme ; un marin lâche une pierre du haut du mât ; que le bateau soit immobile ou animé d'un mouvement de translation rectiligne uniforme, la pierre tombe toujours au pied du mât. Si le bateau est plongé dans un brouillard épais et qu'aucun repère extérieur ne soit accessible aux marins, ceux-ci ne pourront pas savoir si leur bateau est immobile ou s'il se déplace à vitesse constante à l'aide de cette expérience !

Les lois de Newton permettaient de résoudre les problèmes de mécanique comme le montraient les programmes de Terminale dans quelques cas simples ces dernières années. Enfin, cette mécanique énonçait le principe de l'universalité du temps : *le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule indéfiniment et s'appelle durée*<sup>1</sup>.

Les équations de Maxwell permettaient quant à elles de traiter les problèmes d'électromagnétisme pour ce qui concernait la connaissance des champs (électrique et magnétique) dus à la présence de charges et de courants (il faut y ajouter la force de Lorentz pour connaître les forces). Ces équations montraient que les champs **E** et **B** se comportaient comme des grandeurs vibratoires. Par analogie avec les ondes mécaniques (dont on sait qu'elles ont besoin d'un milieu matériel pour se propager, comme le montre l'expérience de la cloche à vide), on avait imaginé que les ondes électromagnétiques se propageaient dans un milieu hypothétique, appelé éther<sup>2</sup> ; la vitesse fournie par les équations de Maxwell étant  $c$ .

---

<sup>1</sup> Newton in Principes mathématiques de Philosophie naturelle

<sup>2</sup> L'onde électromagnétique est une vibration de l'éther ; puisque la lumière nous parvient des plus lointaines étoiles, cet éther emplit nécessairement tout l'espace et constitue donc le milieu ultime de l'univers (H. Poincaré).

Mais toutes les tentatives pour rapprocher les deux domaines se heurtaient à de vraies difficultés :

- les propriétés contradictoires de l'éther (faible densité, grande rigidité) faisaient qu'il échappait aux représentations habituelles des milieux mécaniques ;
- la transformation des vitesses de Galilée ( $\mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{u}$ ) appliquée à la lumière devrait donner un résultat différent de  $c$  pour la vitesse de la lumière dans un référentiel où l'éther serait en mouvement (avec la vitesse  $\mathbf{u}$ ), ce que de nombreuses expériences ont infirmé<sup>3</sup>.

Einstein refuse à la fois de se départir du principe de relativité de la mécanique et d'indépendance de la vitesse de la lumière par rapport au référentiel. Il en fait même ses postulats fondamentaux.

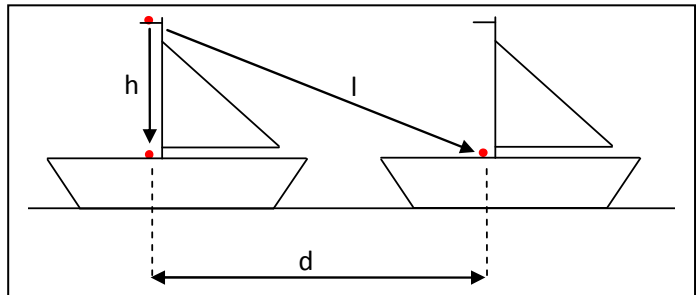
### 1.2. Les principes de la relativité restreinte

Premier principe ou principe de relativité : *dans les référentiels galiléens, toutes les lois de la Physique prennent la même forme et se traduisent par des équations invariantes par changement de référentiel.* À noter qu'Einstein étend le principe de Galilée à tous les domaines de la Physique et non plus seulement à celui de la mécanique.

Second principe ou principe de la constance de la vitesse de la lumière : *la vitesse de propagation de la lumière dans le vide a la même valeur  $c^4$  dans tous les référentiels galiléens et ne dépend donc pas, en particulier, du mouvement de la source qui l'émet.*

### 1.3. Une conséquence importante parmi d'autres : le phénomène de dilatation des durées

Reprenons l'exemple du bateau déjà décrit mais remplaçons le lâcher de la pierre par l'émission d'un flash de laser ; supposons que le bateau se déplace par rapport au quai avec la vitesse  $v$ . Dans le référentiel du bateau, la lumière parcourt la distance  $h = ct_0$  où l'on a utilisé l'indice  $0$  pour le « temps propre » du bateau. Pour l'observateur à quai, le chemin parcouru par la lumière est  $l$  en raison de la dérive  $d$  du bateau. Si l'on applique le second principe (la vitesse de la lumière est égale à  $c$  dans tous les référentiels galiléens), la longueur  $l$  vaut  $l = ct$  (où l'on a omis l'indice  $0$  puisque, bien évidemment, le rapprochement des deux formules ( $h = ct_0$  et  $l = ct$ ) impose que les temps du bateau et de l'observateur ne soient plus les mêmes. On peut facilement exprimer  $t_0$  en fonction de  $t$  (en appliquant le théorème de Pythagore) :  $l^2 = h^2 + d^2$  soit  $c^2 t^2 = c^2 t_0^2 + v^2 t^2$  d'où :



$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Cette formule nous apprend que  $t$  est toujours plus grand que  $t_0$ , autrement dit que, mesurée dans le référentiel du quai, la durée du phénomène apparaît plus longue que dans le référentiel du bateau. Ce phénomène est connu sous le nom de dilatation des durées. C'est là une différence essentielle avec la mécanique classique : le temps n'est plus un absolu et il faut donc toujours préciser par rapport à quel référentiel sa mesure est effectuée (à l'image de la trajectoire ou de la vitesse en mécanique classique qui doivent être rapportées au référentiel choisi). Deux observateurs en mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre ne mesurent donc pas la même durée pour un phénomène physique donné ; c'est dans le référentiel lié au phénomène étudié que la durée apparaît toujours la plus courte.

Le mot « éther » provient des propriétés supposées de ce milieu : une très faible densité et une très grande rigidité (la rigidité d'un milieu est égal au produit de sa masse volumique par le carré de la vitesse des ondes qu'il propage)

<sup>3</sup> La plus célèbre de ces expériences est celle de Michelson et Morley (1881 puis 1887) : les deux scientifiques ont tenté de mettre en évidence le vent d'éther au voisinage du sol terrestre ; ils utilisaient pour cela la Terre comme référentiel en mouvement autour du Soleil et comparaient la vitesse de la lumière dans le sens du trajet de la Terre et dans le sens perpendiculaire ; le résultat était que la vitesse de la lumière était toujours égale à  $c$

<sup>4</sup> Rappelons que cette vitesse est désormais fixée à  $299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Cette dilatation des durées que l'on peut aussi appeler « ralentissement des horloges » est d'autant plus importante que la vitesse de déplacement  $v$  est grande comme le montre la formule établie.

Il en existe de nombreuses vérifications expérimentales ; la désintégration des muons cosmiques en est un exemple assez accessible. Les muons cosmiques sont des particules instables qui sont produites dans la haute atmosphère et se désintègrent selon un processus tel que :  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$  expression dans laquelle  $\mu$  est le muon,  $e^-$  un électron et  $\nu$  des neutrinos. La durée de vie moyenne<sup>5</sup> d'un muon (mesurée dans son référentiel propre) est de l'ordre de  $2,2 \cdot 10^{-6}$  s. Sachant que leur vitesse par rapport à la Terre est proche de la vitesse de la lumière ( $v \approx 0,995 c$ ), si l'on adopte un point de vue classique, ils ne devraient pouvoir parcourir que 650 m en moyenne avant de désintégrer et on aurait aucune chance d'en détecter au sol (à plus de 5 km de leur lieu de production) ce que l'expérience dément. C'est qu'en effet, en utilisant la formule ci-dessus, vue d'un référentiel terrestre, la durée de vie moyenne des muons est augmentée d'un facteur proche de 10 : lié à la Terre, je considère que leur temps de vie moyenne sera environ de  $22 \cdot 10^{-6}$  s et qu'ils pourront alors parcourir 6,5 km avant de se désintégrer. Une autre façon d'analyser la situation est la suivante : l'horloge associée au muon fonctionne moins rapidement que la mienne (le temps s'y écoule moins vite) ; ou encore, le muon qui se dirige vers la Terre a grande vitesse « vieillit moins vite » et a le temps de parcourir une plus grande distance.

Remarque : à la dilatation des durées, est associée la contraction des longueurs et l'expérience du muon peut être analysée ainsi : en se plaçant dans le référentiel propre du muon, un observateur sera à l'arrêt et verra la Terre se rapprocher de lui à la vitesse  $v$  (nous appliquons ici le principe de relativité, tous les référentiels galiléens se valant pour étudier les mouvements). Si cet observateur a le temps d'assister à la collision de la Terre avec le muon, c'est que l'atmosphère qu'un terrien évalue à quelques kilomètres, ne vaut que 650 m pour le muon !

#### 1.4. Quelques autres aspects de la relativité restreinte

Les phénomènes de dilatation des durées et de contraction des longueurs sont des effets réciproques. Nous voulons dire par là, en reprenant l'exemple du bateau, que si pour l'observateur à quai, l'horloge du bateau apparaît tourner moins vite que la sienne, réciproquement, pour le marin à bord du bateau, c'est l'horloge située à quai qui tourne moins vite que la sienne. Il suffit de considérer que le flash du laser est désormais émis d'un lampadaire sur le quai et l'analyse du problème fournira une solution à l'opposé du cas précédent : vue du bateau, la trajectoire de la lumière apparaîtra plus longue que vue du quai et pour une même vitesse de propagation  $c$ , le marin en déduira que la lumière a disposé de plus de temps pour se déplacer que l'observateur fixe par rapport au quai. Ainsi, c'est toujours l'horloge en mouvement qui tourne le moins vite.

Plusieurs auteurs (VALENTIN, VIGOUREUX, etc.) proposent une explication en termes de perspective. Suivons l'un d'entre eux<sup>6</sup> : si j'observe une personne éloignée de moi, elle m'apparaît plus petite que si elle est à côté de moi et réciproquement, je lui apparais plus petit que si j'étais à côté d'elle : *cela est dû au caractère relatif et réciproque de la notion d'éloignement*. On parlera de perspective statique. De même, si j'observe une personne en mouvement par rapport à moi, je constate que son horloge tourne moins vite que la mienne ; pour elle, c'est mon horloge qui tourne plus lentement. Cette fois, *c'est le caractère relatif et réciproque de la vitesse qui est en cause* ; on parlera alors de perspective dynamique. Cette approche facilite la compréhension de certains phénomènes. Prenons l'exemple de la fusée au bord de laquelle ont pris place des astronautes. On entend parfois dire que, dans une fusée se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière, le temps ne s'écoulerait pratiquement plus<sup>7</sup> : c'est faux !

- une personne que je vois de très loin garde sa taille « normale » même si je la vois toute petite (c'est un effet de perspective statique) ;

<sup>5</sup> La durée de vie moyenne  $\tau$  est égale à l'inverse de la constante radioactive  $\lambda$  et ne doit pas être confondue avec le temps de demi-vie  $t_{1/2}$  qui est égal à  $\ln 2 / \lambda$

<sup>6</sup> Jean-Marie VIGOUREUX in L'Univers en perspective (Ellipses)

<sup>7</sup> Dans le film 2001, Odyssée de l'espace, on voit au moment où le vaisseau spatial atteint une vitesse très élevée que les aiguilles de l'horloge affichant son temps propre finissent par s'arrêter de tourner

- dans une fusée que je vois passer à très grande vitesse, le temps des astronautes continue de s'écouler comme si elle était à l'arrêt : c'est moi qui a l'impression que leur horloge ralentit (ici, il s'agit de la perspective dynamique) ;
- mais parce que ces effets sont réciproques, les astronautes auraient à leur tour, l'impression que la vie sur Terre se ralentirait et que le terrien moyen que je suis mettrait un temps « infini » à prendre son repas.

Nous laisserons aux lecteurs de ce document le loisir de se tourner vers les sources citées pour aller plus loin et découvrir la richesse de ce raisonnement et les conclusions auxquelles il permet d'aboutir.

### 1.5. Les attendus du programme de Terminale

Venons-en au programme de Terminale S. Le sujet concerné s'intitule *Temps et relativité restreinte*. Il intègre donc le module *Temps, mouvement et évolution* du thème COMPRENDRE, Lois et modèles. Avant de l'aborder, on a vu que la mesure du temps reposait sur l'existence de phénomènes périodiques (procédés ancestraux, mouvements de satellites et de planètes, oscillateurs mécaniques, horloges atomiques) ; la quête d'une précision toujours plus grande dans la mesure du temps révèle alors les limites de la mécanique classique qui postule que le temps est un absolu universel indépendant de tout référentiel. C'est pour s'affranchir de ces limites qu'Einstein élabore (en 1905) la théorie de la relativité restreinte qu'il fonde sur deux principes (seul le second est inscrit au programme). Une conséquence immédiate de la constance de la vitesse de la lumière dans tous les référentiels galiléens est la perte du caractère absolu du temps (d'où le nom de relativité) ; il faut donc référer le temps au référentiel choisi (dans le référentiel ou le système étudié est au repos, on parle de temps propre). Comme on peut le calculer dans quelques exemples simples, cela conduit au phénomène de dilatation des durées dont il existe de nombreuses vérifications expérimentales.

Ce sujet est prévu pour être traité en 5 h de cours et d'activités documentaires.

### 1.6. Quelques exemples d'activités

Le document rédigé par le groupe d'experts intitulé « Temps en relativité restreinte dans le nouveau programme de terminale S » disponible sur EDUSCOL décrit de façon détaillée plusieurs expériences qui sont citées par le préambule du programme comme autant de confirmations de l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide : prisme mobile d'Arago (difficile pour un élève de Terminale en raison du contexte scientifique de l'époque), expérience de Michelson et Morley (la plus connue, mais dont on devra limiter la présentation à son principe), expérience d'Alväger (utilisant des pions neutres  $\pi^0$  dans l'accélérateur de particules du CERN, sorte de reproduction de la désintégration des muons cosmiques). Il n'est évidemment pas question de les présenter toutes, d'autant plus que l'on peut en citer d'autres.

Le programme prévoit donc d'aborder aussi, en tant que dispositifs modernes et précis de la mesure du temps, les horloges atomiques ; là encore, le professeur choisira de traiter l'exemple de son choix sachant qu'il semble peu raisonnable de passer sous silence le système GPS présent aujourd'hui dans de nombreux objets comme les smartphones.

Enfin, les textes originaux datant d'un siècle seulement, leur lecture n'est pas un handicap pour ce qui concerne les tournures de phrases, le vocabulaire commun ; elle peut en revanche être d'un niveau scientifique trop élevé pour un élève de Terminale.

En résumé, on peut *a minima* proposer aux élèves les activités suivantes :

- l'analyse du flash laser émis sur un bateau : la situation est simple à comprendre, l'analyse mathématique est élémentaire et la conclusion est facile à obtenir ;
- l'analyse d'une vraie expérience (celle du bateau étant évidemment non réaliste eu égard aux vitesses qui permettraient de détecter une différence entre  $t$  et  $t_0$ ) : les muons cosmiques ou les pions du CERN semblent deux situations accessibles aux élèves ;

- la présentation du principe du système GPS en se limitant à une étude détaillée à une dimension (pour éviter d'avoir recours à la géométrie dans l'espace) : il faut alors 2 balises pour effectuer la localisation (il y a 2 variables à considérer en relativité :  $s$ , l'abscisse et  $t$  le temps) ; le passage à l'espace à 3 dimensions nécessite donc de disposer de 4 balises, donc 4 satellites. Il faudra bien entendu montrer en quoi la correction relativiste est indispensable en prenant en compte la vitesse des satellites (un peu moins de  $4 \text{ km.s}^{-1}$ ) et l'incidence sur la localisation (dérive de plus d'un kilomètre sur une journée pour l'effet dû à la dilatation du temps<sup>8</sup>) ;
- on peut enfin faire travailler un extrait abordable d'un écrit d'Einstein ; on en trouvera sans difficultés sur Internet ou dans des publications de poche<sup>9</sup> à des prix très abordables.

## 2. LA DUALITÉ ONDE-PARTICULE

### 2.1. Introduction

Au moment d'aborder ce sujet, les élèves ont déjà rencontré l'aspect corpusculaire de la lumière (le photon a été introduit en classe de Première S dans le module *Sources de lumière colorée* ; ils ont vu, en particulier, les relations  $\lambda = c/v$  et  $\Delta E = h\nu$ ). Ils ont vu aussi (si l'on suppose que le programme de Terminale S a été traité dans l'ordre publié au BOEN) la nature ondulatoire de la lumière (thème OBSERVER) ; ils ont alors mémorisé que le phénomène de diffraction apparaît quand la longueur d'onde du rayonnement est de l'ordre de grandeur de la « dimension caractéristique de l'obstacle rencontré par l'onde ». Ainsi, en lumière visible, pour une longueur d'onde de  $0.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ , la largeur de la fente avoisinera le micromètre<sup>10</sup>.

### 2.2. Un peu d'histoire

Depuis Von Laue et Bragg, on sait que la longueur d'onde des rayons X étant de l'ordre de grandeur des distances interatomiques, un phénomène de diffraction peut être observé quand un faisceau de photons X tombe sur un réseau cristallin.

En 1923, Louis de Broglie écrit : *Le fait que, depuis l'introduction par Einstein des photons dans l'onde lumineuse, l'on savait que la lumière contient des particules qui sont des concentrations d'énergie incorporée dans l'onde, suggère que toute particule, comme l'électron, doit être transportée par une onde dans laquelle elle est incorporée. À toute particule matérielle de masse  $m$  et de vitesse  $v$  doit être "associée" une onde réelle reliée à la quantité de mouvement par la relation :  $\lambda = h/p$ .*

Dans cette expression,  $h$  est la constante de Planck,  $p$  la quantité de mouvement de la particule matérielle et  $\lambda$  représente la longueur d'onde associée à l'onde de matière.

En 1927, Davisson et Germer bombardent une cible constituée d'un réseau cristallin d'atomes de nickel avec des électrons dont l'énergie cinétique vaut 54 eV (ce qui correspond à une vitesse de l'ordre de  $4 \cdot 10^6 \text{ m/s}$  : les électrons sont donc non relativistes) ; ils observent une figure de diffraction à l'image de celle utilisant des rayons X. Comprenons ce résultat : en utilisant les relations  $Ec = \frac{1}{2} mv^2$  et  $p = mv$ , il vient :  $p = (2m.Ec)^{1/2}$ . L'application numérique donne  $p = 4 \cdot 10^{-24} \text{ kg.m.s}^{-1}$ . En utilisant la relation  $\lambda = h/p$ , on trouve  $\lambda = 1,68 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  ou 0,168 nm, valeur tout à fait compatible avec le paramètre cristallin du nickel (0,215 nm).

<sup>8</sup> En réalité, la correction due à la dilatation du temps liée à la vitesse du satellite (relativité restreinte) ne suffit pas ; il faut aussi tenir compte de l'effet gravitationnel prévu par la relativité générale : l'écoulement du temps est perturbé par la présence de corps massifs ; en raison de l'altitude du satellite (voisine de 20 000 km), le champ gravitationnel est plus faible qu'au sol et les horloges embarquées prennent quelques dizaines de microsecondes d'avance par jour sur celles au sol et cette seconde correction est la plus importante

<sup>9</sup> L'évolution des idées en Physique d'Albert Einstein et Léopold Infeld (PBP)

La théorie de la relativité restreinte et générale d'Albert Einstein (Dunod)

<sup>10</sup> On peut, à cette occasion, rappeler quelques ordres de grandeur liés au phénomène de diffraction obtenu avec d'autres types d'ondes : avec des ultrasons ( $f = 40 \text{ kHz}$ ,  $\lambda \approx 8,5 \text{ mm}$  et  $a \approx 1 \text{ cm}$ ) ; avec des sons ( $f = 440 \text{ Hz}$  pour le La<sub>3</sub>,  $\lambda \approx 0,75 \text{ m}$  : c'est pour cela qu'on entend la voix d'une personne parlant dans la pièce d'à côté de soi par la diffraction du son par la porte dont la largeur est comparable à la longueur d'onde du son émis)

### 2.3. Le microscope électronique

Le microscope optique (encore appelé photonique) utilise des photons dont la longueur d'onde est de l'ordre de 500 nm ; sa limite de résolution  $d$  est donnée par la formule d'Abbe :  $d = \lambda/2n \cdot \sin \alpha$ , expression dans laquelle  $n \cdot \sin \alpha$  est l'ouverture numérique de l'objectif (nombre voisin de l'unité). On voit que  $d \# \lambda$ . La limite de résolution d'un microscope photonique classique est d'environ 0,2  $\mu\text{m}$ .

Dans un microscope électronique, les photons sont remplacés par un faisceau d'électrons accélérés par un canon à électrons ; pour une tension accélératrice  $U$  de 100 kV, les électrons acquièrent une vitesse  $v$  de l'ordre de 0,5  $c$ . On peut donc, si l'on se contente de trouver des ordres de grandeur, les considérer comme non relativistes. Dans ces conditions, leur énergie cinétique vaudra  $\frac{1}{2}mv^2 = eU$  et leur quantité de mouvement  $p$  sera :  $p = (2meU)^{1/2}$ . On peut alors en tirer la longueur de De Broglie  $\lambda$ .

L'application numérique donne<sup>11</sup> :  $p = 1,7 \cdot 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $\lambda \# 4 \text{ pm}$ .

Si sa limite de résolution était due, comme pour le microscope optique, au terme de diffraction, on devrait donc pouvoir observer des détails de l'ordre du picomètre ; tel n'est pas le cas. Il faut en effet tenir compte des aberrations liées à l'optique électronique :

- des aberrations géométriques, tout particulièrement sphériques ;
- des aberrations chromatiques, dues aux variations de l'énergie du faisceau d'électrons ;
- des aberrations de charge d'espace, dues aux répulsions coulombiennes entre électrons.

Les deux premières sont très comparables aux aberrations rencontrées en optique photonique ; la troisième est spécifique des optiques électroniques. C'est régulièrement l'aberration sphérique qui est la plus importante et qui impose la limite de résolution à quelques dixièmes de nanomètre<sup>12</sup>. On voit ainsi que *les particules qui explorent la matière ont une longueur d'onde associée nettement plus petite que la taille des objets observés.*

### 2.4. Interférences et mécanique quantique

Nous ne ferons qu'énoncer quelques résultats essentiels ; pour de plus amples informations à ce sujet, nous invitons les professeurs à se reporter à deux cours en ligne dans lesquels ils trouveront les éléments ayant permis de rédiger ce paragraphe<sup>13</sup>.

#### a) Interférences avec des photons

Considérons l'expérience des trous (ou fentes) d'Young.  $S$  est une source monochromatique éclairant 2 fentes  $S_1$  et  $S_2$  proches l'une de l'autre qui jouent le rôle de sources secondaires cohérentes et qui diffractent la lumière. Dans la région de l'espace où les 2 faisceaux se superposent, on peut observer des franges d'interférences non localisées.

#### b) Interférences avec des atomes de néon

Remplaçons maintenant les photons de l'onde lumineuse précédente par des particules matérielles telles que des électrons, des neutrons, des atomes, etc. Une telle expérience a été réalisée en 1992<sup>14</sup> avec un nuage d'atomes de néon refroidis par un « piège laser » à une température de l'ordre du mK et lâchés sans vitesse initiale au dessus d'un écran percé de deux fentes parallèles de largeur 2  $\mu\text{m}$  et séparées de  $a = 6 \mu\text{m}$ . Les atomes sont détectés au moment où ils frappent une plaque située à un mètre environ de l'écran percé (distance  $D$ ). On observe que les impacts se distribuent suivant un système de franges tout à fait analogue à celui obtenu dans l'expérience des interférences lumineuses avec des franges sombres (beaucoup d'impacts) et des franges claires (très peu d'impacts). L'interfrange mesuré vaut  $i = \lambda D/a$  ; on peut en déduire  $\lambda$  et vérifier que  $\lambda = h/p$ .

<sup>11</sup> En réalité, un calcul tenant compte des effets relativistes conduit à une longueur d'onde de 3,7 pm.

<sup>12</sup> En réalité, à l'aide de dispositifs dits de correction de l'aberration sphérique, on a pu améliorer la limite de résolution et l'abaisser à une cinquantaine de picomètres

<sup>13</sup> Il s'agit du cours de l'école polytechnique (<http://catalogue.polytechnique.fr/site.php?id=87&fileid=474>) et de celui de l'ENS (<http://www.phys.ens.fr/~sinatra/cours.pdf>)

<sup>14</sup> F. Shimizu, K. Shimizu, H. Takuma - Physical Review A 46, R17

### c) Aspects quantiques des interférences

Le phénomène d'interférences observé avec les atomes de néon se différencie cependant d'un phénomène ondulatoire ordinaire : la dimension des atomes, de l'ordre de quelques dixièmes de nm, est ainsi très inférieure aux grandeurs caractéristiques du dispositif (largeur des fentes, par exemple).

Pour en savoir plus, imaginons que nous envoyons les atomes un à un<sup>15</sup> de façon indépendante. On obtient alors les résultats suivants :

- chaque atome est détecté en un point précis de l'écran : les atomes révèlent ainsi leur caractère corpusculaire ;
- leur point d'impact est aléatoire : deux atomes préparés à l'identique auront des points d'impact différents (à l'image des noyaux radioactifs qui se désintègrent) ;
- la distribution d'un grand nombre d'impacts révèle l'existence d'interférences : les atomes manifestent alors un caractère ondulatoire.

C'est la conjonction des deux aspects, corpusculaire et ondulatoire, qui fait que l'atome apparaît sous un jour nouveau, non classique ; c'est un objet quantique, appelé quanton<sup>16</sup>.

Pour aller encore plus loin, cherchons à savoir par quelle fente chaque atome est passé (en plaçant un compteur derrière chaque fente) ; mais si on procède ainsi, alors les franges disparaissent : la mesure que l'on a faite a perturbé le système au point d'en changer le résultat ! Si l'on veut savoir par quelle fente l'atome est passé, on supprime le phénomène d'interférences ; et quand celui-ci se manifeste, il est impossible de déterminer par laquelle des fentes est passé un atome particulier.

Une dernière remarque : on connaît le point de départ des atomes et leurs impacts caractérisent les « points d'arrivée » mais on ignore le chemin qu'ils ont emprunté<sup>17</sup> ; la notion de trajectoire au sens classique n'existe pas en physique quantique.

## 2.5. Quelques exemples d'activités d'élèves

À l'image de ce qui est fait pour la relativité restreinte, le groupe d'experts a prévu la rédaction d'un document sur la dualité onde-particule publié sur EDUSCOL. On y trouvera entre autres la description de plusieurs expériences ; il n'est évidemment pas question de les présenter toutes aux élèves. L'expérience des fentes d'Young semble intéressante, car très probablement vue en début d'année lors de l'étude des interférences lumineuses ; le dispositif utilisé pour l'expérience réalisée avec des atomes de néon peut s'en déduire sans trop de difficultés et les similitudes observées entre les figures d'interférences seront d'un accès assez simple.

Il faut ensuite introduire la relation de De Broglie ( $\lambda = h/p$ ) et la faire utiliser par les élèves ; afin que cette mise en œuvre n'apparaisse pas comme « un calcul gratuit », il semble opportun de le faire dans le cadre de l'objectif suivant du programme qui consiste à identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la lumière est significatif, c'est-à-dire quand la longueur d'onde calculée est de l'ordre de grandeur d'une « dimension pertinente » du dispositif.

Le dernier item du programme est sans doute le plus délicat ; les élèves doivent comprendre que les phénomènes quantiques ont un aspect probabiliste :

- toute mesure perturbe le système ;
- la prédiction concernant une grandeur physique associée à une particule prise isolément ne peut être faite qu'en termes de probabilités ;
- les mathématiques des probabilités appliquées à des grands nombres d'entités permettent de prévoir le comportement de ces ensembles.

---

<sup>15</sup> Pour autant qu'elle puisse paraître curieuse, cette expérience est tout à fait réalisable sur le plan pratique ; on peut aussi, en classe, la simuler avec un logiciel adapté

<sup>16</sup> Les quantons montrent du discontinu quant à leur quantité (on peut les compter) et du continu quant à leur spatialité (on ne peut pas les localiser en un point) in Wiktionnaire

<sup>17</sup> L'affirmation « l'atome est passé par les deux trous à la fois » est en ce sens, parfaitement licite

Les textes originaux traitant des aspects quantiques des phénomènes physiques sont souvent très compliqués en raison d'un formalisme mathématique hors de la portée des élèves. Il faudra donc être vigilant dans les choix opérés à cet égard<sup>18</sup> (pour satisfaire l'objectif *extraire et exploiter des informations sur...*).

En résumé, on peut *a minima* proposer aux élèves les activités suivantes :

- l'analyse d'un phénomène révélant l'existence des ondes de matière et/ou la dualité onde-particule ; par exemple, les fentes d'Young qui permettent d'aborder les deux sujets
- l'utilisation de la relation de De Broglie dans deux ou trois cas tels que :
  - un grain de poussière de diamètre 1  $\mu\text{m}$ , de masse  $10^{-15}$  kg et de vitesse 1 mm/s sera caractérisé par une onde de matière de longueur d'onde  $6,6 \cdot 10^{-16}$  m sans interaction possible sur « son environnement » : seul l'aspect corpusculaire sera présent
  - un neutron thermique de masse  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg à la température 300 K<sup>19</sup> aura une longueur d'onde associée de  $1,4 \cdot 10^{-10}$  m ; il pourra donc interférer avec un réseau cristallin : l'aspect ondulatoire sera présent
  - un électron d'énergie cinétique 54 eV a une longueur d'onde associée de 0,168 nm (voir calcul détaillé au point précédent) ; on comprend l'expérience de Davisson en Germer et l'aspect ondulatoire manifesté par les électrons.
- L'analyse/exploitation d'un document montrant le caractère probabiliste des phénomènes quantiques ; le choix est important : orbitales atomiques ou moléculaires, interférences avec des particules envoyées une à une, le chat de Schrödinger, etc.

### 3. L'ANALYSE SPECTRALE

Un bloc, à traiter en deux semaines, environ, porte sur l' « Analyse spectrale ». Il est inséré dans la partie « Observer ». Comme l'indique le nom de cette partie, il s'agit essentiellement de montrer comment l'interaction entre des ondes électromagnétiques et la matière permet de renseigner sur sa structure. Cette connaissance est fondamentale, qu'il s'agisse de dosage, de l'analyse d'une substance chimique ou biochimique ou encore de caractériser des produits d'une synthèse.

Trois types de dispositifs sont étudiés. Ils fournissent des informations de nature distincte. On les passera tous en revue, afin de donner une idée de la cohérence de cette partie du programme et pour faire les liens entre des techniques très différentes. On approfondira un peu plus ce qui concerne le spectre RMN du proton puisque ce thème n'a jamais fait partie des programmes de la série S.

L'objectif de cette partie est double :

- Montrer que l'interaction lumière matière permet d'avoir accès à certains éléments de la structure d'une molécule
- Aborder la nomenclature des molécules à partir de l'analyse de différents spectres.

#### 3.1. Spectres UV-visible

<http://semsci.u-strasbg.fr/rouedes.htm>

##### 3.1.1 Principe

Les molécules sont susceptibles d'absorber les rayonnements électromagnétiques auxquels elles sont soumises : les énergies nécessaires pour modifier les distributions des électrons dans les molécules sont de l'ordre de plusieurs électronvolts, de sorte que les photons absorbés lors de ce type de modifications se situent par conséquent dans les régions visible et ultraviolette du spectre. On interprète la couleur des composés organiques par une absorption sélective des longueurs d'onde.

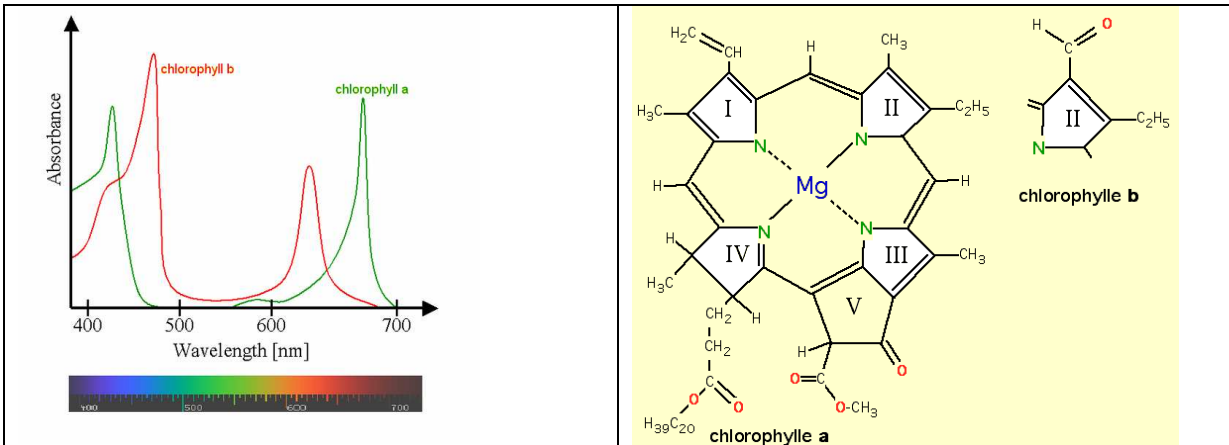
---

<sup>18</sup> À cet égard, le petit ouvrage « Lumière et matière » de R Feynman est abordable pour un élève de Terminale

<sup>19</sup> La résolution de cet exercice suppose l'utilisation de la relation  $1/2 mv^2 = 3/2 kT$  ; si l'on ne veut pas la faire utiliser par les élèves, il faudra alors leur donner l'énergie cinétique des neutrons



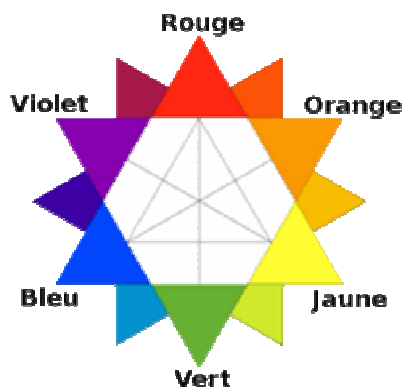
### 3.1.2 Exemple de spectres



On voit sur le graphique d'absorption, ci-dessus, que l'absorption de la chlorophylle a et b n'est pas la même selon la longueur d'onde. Des liaisons chimiques sont plus particulièrement concernées par cette absorption dans le domaine visible-UV. Il s'agit des noyaux et des doubles liaisons.

### 3.1.3. Interprétation

Il est facile de justifier la couleur perçue d'une molécule, si l'on connaît son spectre d'absorption.



La couleur d'un mélange résulte d'une synthèse soustractive des couleurs des matières colorées ayant servi à sa réalisation. Dans le cercle chromatique simplifié chaque couleur a pour couleur complémentaire celle qui lui est diamétralement opposée. Pour une couleur donnée, ce sont les radiations correspondant à la couleur complémentaire qui sont majoritairement absorbées.

La chlorophylle (a et b), absorbe dans le violet et le rouge. La couleur complémentaire est celle qui sera perçue, c'est-à-dire le vert-jaune.

### 3.1.4. Conclusion et prolongements.

Cette technique permet de justifier la couleur perçue par l'œil en fonction de l'absorbance de la solution. Elle ne permet pas de repérer des fonctions précises. Cette technique est utilisée pour les dosages et sera étudiée dans la partie « Agir » concernant le contrôle de qualité par dosage et la loi de Beer-Lambert.

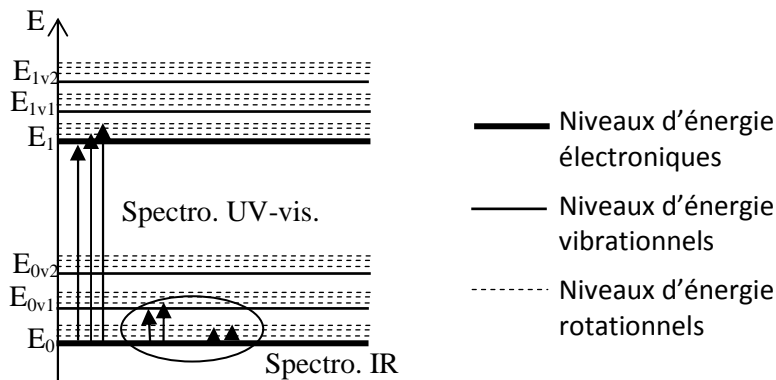
Cette technique peut aussi être associée au dichroïsme circulaire : un échantillon possédant un centre chiral peut absorber différemment la lumière polarisée circulairement droite et la lumière polarisée circulairement gauche. Le spectre dichroïque correspond à la différence d'absorbance entre ces deux types de lumière, pour chaque longueur d'onde. Les spectres de dichroïsme circulaire permettent de donner des informations importantes sur la configuration de molécules chirales.

### 3.2. Les spectres infrarouges

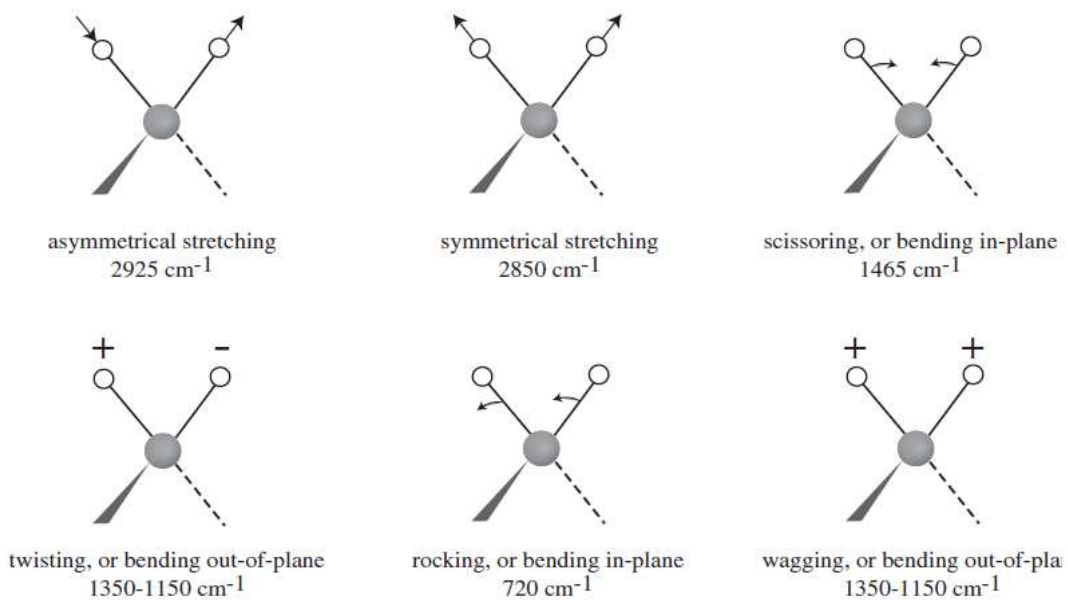
#### 3.2.1. Principe

La couleur des molécules permet d'être interprétée par le spectre d'absorbance qui est dû à des transitions électroniques de la molécule soumise à un rayonnement électromagnétique dans le domaine du visible et de l'UV.

En plus de ces transitions électroniques, l'énergie de la molécule est susceptible de varier à cause de transitions rotationnelles et vibrationnelles. La spectroscopie infrarouge exploite ainsi le fait que les molécules possèdent des fréquences spécifiques pour lesquelles elles « tournent ou vibrent » en correspondance avec des niveaux d'énergie discrets. Les fréquences de résonance peuvent être dans une première approche liées à la force de la liaison, et aux masses atomiques de terminaison. Par conséquent, la fréquence des vibrations peut être associée à une liaison particulière. Ces transitions nécessitent des énergies beaucoup plus faibles. Elles se situent dans l'infrarouge :

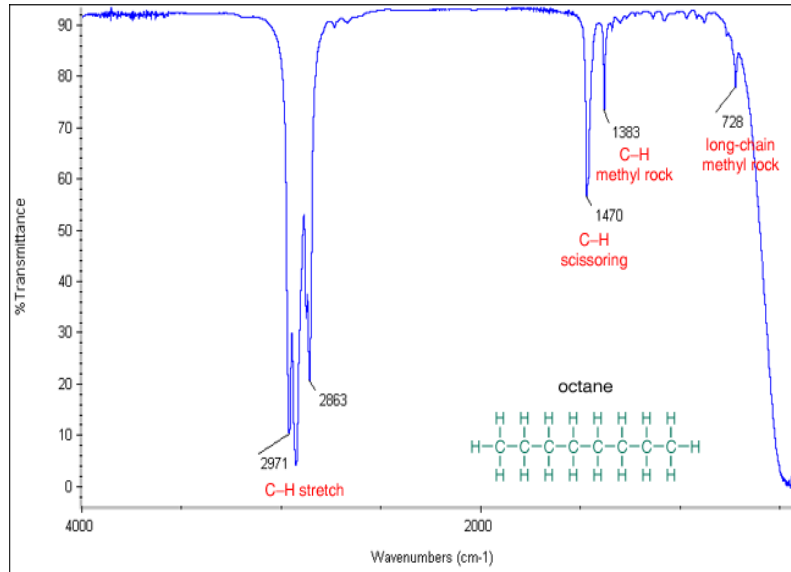


#### 3.2.2. Exemple du groupe CH<sub>2</sub>



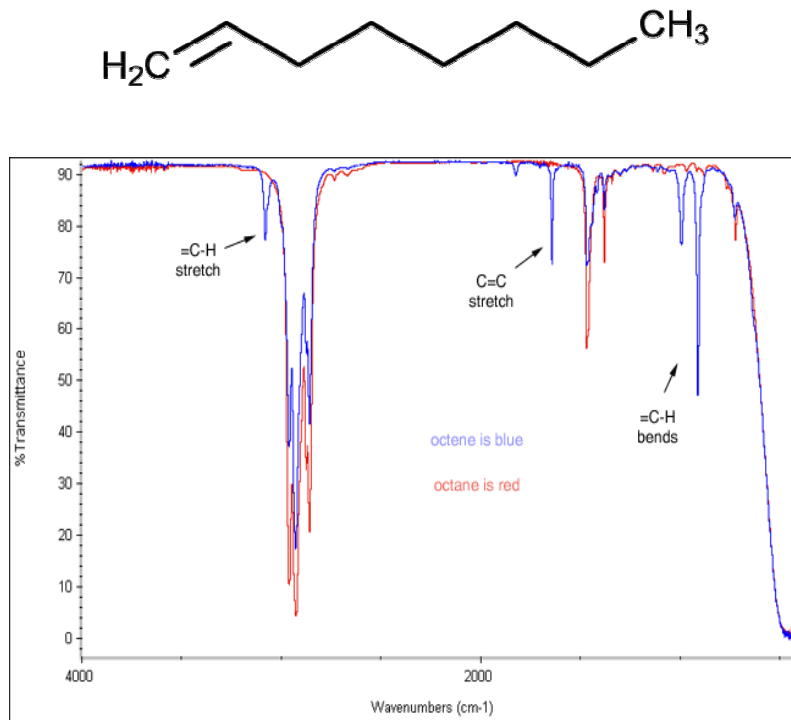
Étirements (*stretching*) symétriques et antisymétriques, cisaillement (*scissoring*), bascule (*rocking*), agitation hors du plan (*wagging*) et torsion (*twisting*).

### 3.2.3 Exemples de courbes d'absorption.



La courbe d'absorption de l'octane permet de retrouver la signature de la liaison CH<sub>2</sub> (2971 cm<sup>-1</sup>, 2863 cm<sup>-1</sup> et 1470 cm<sup>-1</sup>). Des tables donneraient le pic à 1383 cm<sup>-1</sup> du groupement méthyl. On voit également apparaître la signature d'une longue chaîne carbonée.

Il est intéressant de superposer à la courbe de l'octane celle du 1-octène :



On retrouve naturellement les signatures des groupes CH<sub>3</sub> et CH<sub>2</sub>. S'y ajoutent celles de la double liaison carbone et alcène.

### 3.3.3 Conclusion

La spectrométrie infrarouge permet d'avoir accès aux fonctions d'une molécule en comparant les bandes d'absorption observées aux nombres d'onde caractéristiques donnés dans les tables. Néanmoins, les spectres IR ne donnent pas accès au nombre ni à l'emplacement des fonctions organiques dans la molécule.

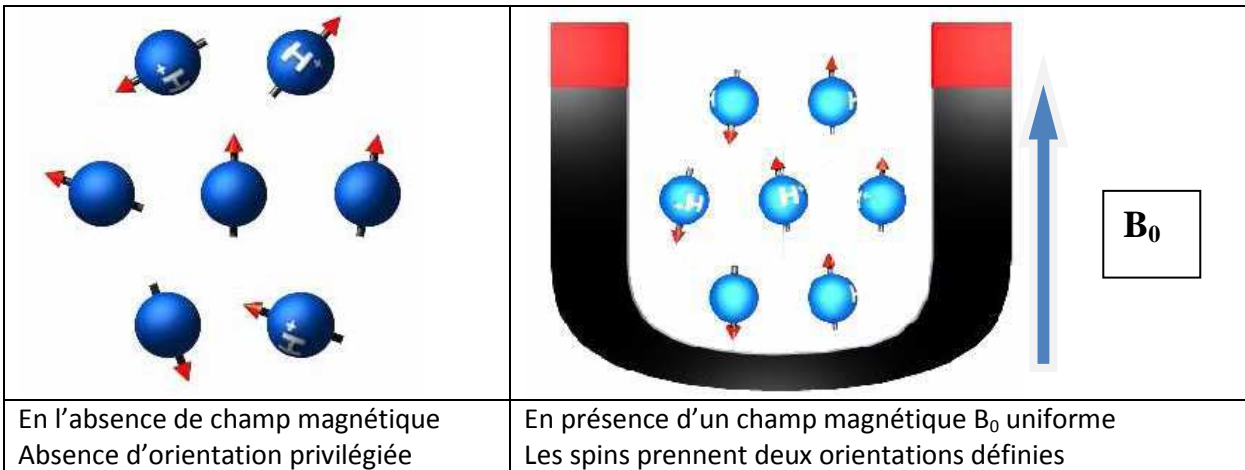
### 3.3. Les spectres RMN du proton

<http://gsite.univ-provence.fr/gsite/Local/lcp-ira/dir/Etienne/Cours%20RMN.pdf>

#### 3.3.1 Principe

Le principe repose sur l'interaction entre l'atome d'hydrogène et un champ magnétique. C'est une interaction à l'échelle du noyau et non plus des liaisons comme précédemment.

Le proton possède un spin (contrairement aux isotopes les plus courants de l'oxygène, du carbone, de l'azote). A ce titre, les protons placés dans un champ magnétique s'orientent dans la direction du champ constant qui est imposé.



Les deux états de spin ont des énergies différentes. Les deux états d'énergie dépendent et du champ  $B_0$  imposé et de la structure du noyau.

$$E_{\alpha} = -\frac{1}{2} \frac{h \gamma B_0}{2\pi} \quad \text{et} \quad E_{\beta} = +\frac{1}{2} \frac{h \gamma B_0}{2\pi}$$

Soit un écart entre les deux états  $\Delta E = \frac{h \gamma B_0}{2\pi}$

$E \rightarrow$  Energie (J)

$h \rightarrow$  constante de Planck ( $6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s)

$\gamma \rightarrow$  rapport gyromagnétique (dépend du noyau) ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$ )  $^1\text{H} : \gamma = 26,75 \cdot 10^7 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$ .

$B_0 \rightarrow$  champ magnétique (Tesla, T).

Par conséquent, un proton, placé dans un champ  $B_0$ , peut occuper deux états d'énergie. Les transitions d'un état d'énergie à l'autre entraînent l'émission d'une onde électromagnétique de fréquence  $\nu_0$ , tel que  $\Delta E = h\nu_0$ .

En rapprochant les deux expressions, on trouve que la fréquence  $\nu_0$  vaut :  $\nu_0 = \frac{\gamma B_0}{2\pi}$ .

(Formule de Larmor)

Cette fréquence dépend du champ  $B_0$  et des caractéristiques du proton, pour un proton.

Par exemple, pour  $B_0 = 2,35$  T (champ très important, 10 000 fois le champ magnétique terrestre), on obtient une fréquence de 100 MHz, dans le domaine des fréquences radio.

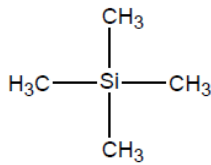
En résumé, un proton placé dans un champ magnétique  $B_0$  possède deux niveaux d'énergie liés aux propriétés du noyau de l'hydrogène. Il pourra s'effectuer des transitions entre ces différents niveaux d'énergie, à la fréquence  $\nu_0$ .

### 3.3.2. Déplacement chimique et blindage électronique

Le principe de la spectroscopie RMN repose sur le fait que le champ  $B_0$  appliqué n'est pas strictement le même que le champ vu par le proton. En effet, le proton n'est pas seul mais placé dans un environnement électronique. Le mouvement des électrons crée un champ, les liaisons créent un champ. Le caractère diamagnétique ou paramagnétique induit également des effets magnétiques.

On parle de « blindage » car le champ vu par le proton est plus petit que ce que serait celui vu par un proton isolé. Ce qui est intéressant, c'est que la fréquence de Larmor des protons des molécules dépendra donc de son environnement électronique.

On va donc distinguer les protons d'une molécule puisque la fréquence de Larmor est très sensible à leur environnement. Pour cela, on compare la fréquence de Larmor des protons avec un « proton référence ». On choisit, pour ce faire, la molécule TMS :



Tétraméthylsilane (TMS)

Cette molécule possède 12 protons, tous identiques, avec un blindage minimum. Pour ces protons, on a :  $\nu_{\text{ref}} = \frac{\gamma B_{\text{TMS}}}{2\pi}$ , où  $B_{\text{TMS}}$  est le champ vu par les protons, tous identiques, de la molécule de TMS.

Pour un proton, d'une autre molécule, par exemple du benzène, on a  $\nu_{\text{C}_6\text{H}_6} = \frac{\gamma B_{\text{C}_6\text{H}_6}}{2\pi}$  où  $B_{\text{C}_6\text{H}_6}$  est le champ vu par les protons, tous identiques, de la molécule de benzène.

On peut alors définir un déplacement standardisé :  $\delta = \frac{\nu_{\text{ref}} - \nu_{\text{C}_6\text{H}_6}}{\nu_{\text{ref}}} \cdot 10^6 = \frac{B_{\text{TMS}} - B_{\text{C}_6\text{H}_6}}{B_{\text{TMS}}}$ .

Ce déplacement est donc caractéristique du champ local entourant un proton donné.  $\delta$  est un facteur sans unité que l'on exprime en ppm.

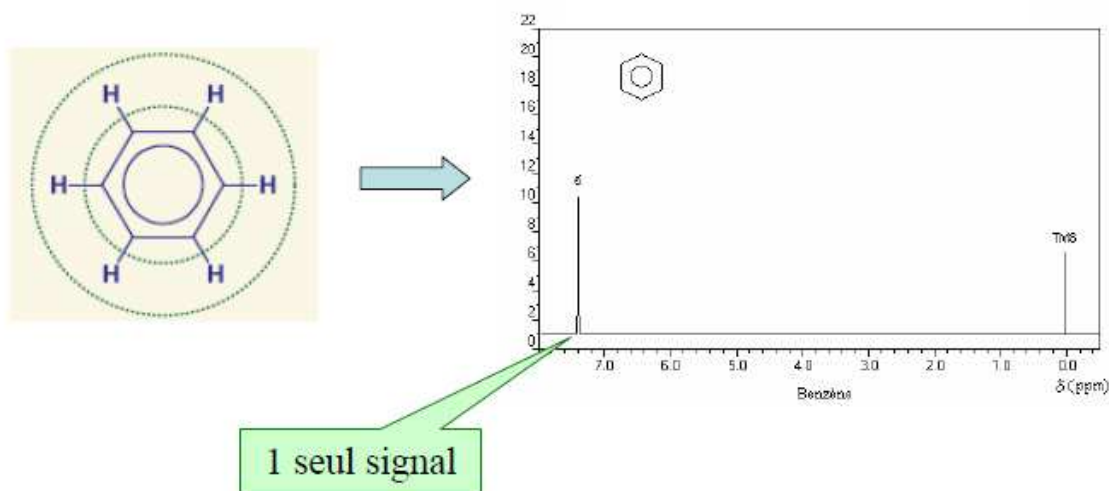
On place donc les molécules de TMS et de l'échantillon considéré dans un champ magnétique constant  $B_0$  produit généralement par un électroaimant (de l'ordre d'une dizaine de Teslas par exemple). Puis, grâce à un émetteur, on envoie un champ de radiofréquence  $B_1$  perpendiculaire à  $B_0$  et on balaie alors les fréquences proches de la fréquence de Larmor,  $\nu_0 = \frac{\gamma B_0}{2\pi}$ , afin d'enregistrer les pics d'absorption des différents noyaux qui rentrent successivement en résonance.

Plus le champ  $B_0$  est grand, plus l'écart entre les niveaux d'énergie est important on plus la résolution du spectre est grande.

Une autre technique plus récente et de plus en plus utilisée est d'envoyer une brève impulsion magnétique qui contient toutes les fréquences du domaine spectral considéré : tous les spins oscillent simultanément et le signal émis lors de la relaxation est alors analysé par transformée de Fourier.

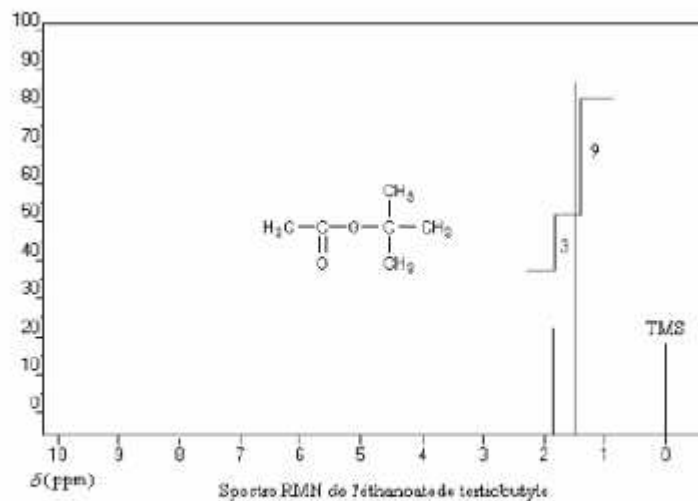
Remarque : l'article « le principe de la RMN illustré par une expérience de cours » écrit par Patrick Chaquin et publié dans le BUP de février 2012 explique une expérience simple permettant l'analogie avec une aiguille aimantée soumise à un champ électromagnétique créé par un agitateur magnétique. Il la montre dans une vidéo en deux minutes (à partir de la minute 22-23) :

[http://www.canal-u.tv/producteurs/universite\\_de\\_tous\\_les\\_savoirs/dossier\\_programmes/les\\_conferences\\_de\\_l\\_annee\\_2000/la\\_chimie\\_science\\_des\\_transformations/localiser\\_et\\_identifier\\_une\\_molecule](http://www.canal-u.tv/producteurs/universite_de_tous_les_savoirs/dossier_programmes/les_conferences_de_l_annee_2000/la_chimie_science_des_transformations/localiser_et_identifier_une_molecule)



### 3.3.3. Intensité des pics

Tous les protons étant équivalents, pour une fonction donnée. Ils absorbent la même quantité d'énergie. Les pics sont proportionnels au nombre de protons de la fonction considérée.



Courbe en paliers → hauteur de palier proportionnelle à la surface et donc au nombre de protons de ce signal

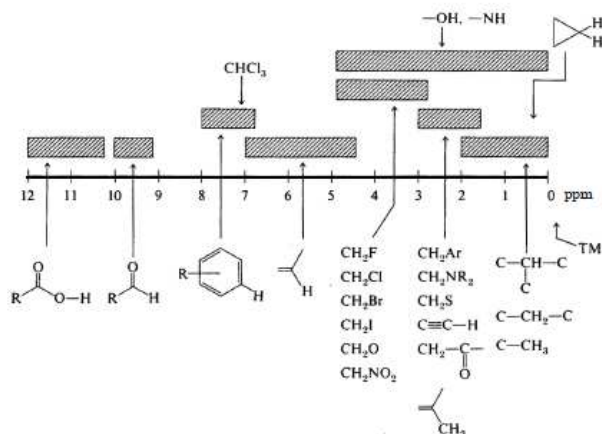
### 3.3.4. Caractéristiques des protons dans une fonction

Le champ magnétique externe peut induire un mouvement de circulation des électrons dans la molécule qui donne lieu à un petit champ magnétique supplémentaire  $\delta B = -\sigma B$  où  $\sigma$  est la constante d'écran, qui peut être positive ou négative suivant que le champ induit soit dans une direction similaire ou opposée à celui du champ externe. Ainsi, au sein d'une fonction, la fréquence d'absorption des protons dépend de son environnement électronique immédiat. Des tables sont construites en référence aux protons du TMS.

Pour un proton donné, l'influence principale sera le groupement chimique auquel il est attaché

→ déplacement chimique  $\delta$  = « idée » du groupement chimique

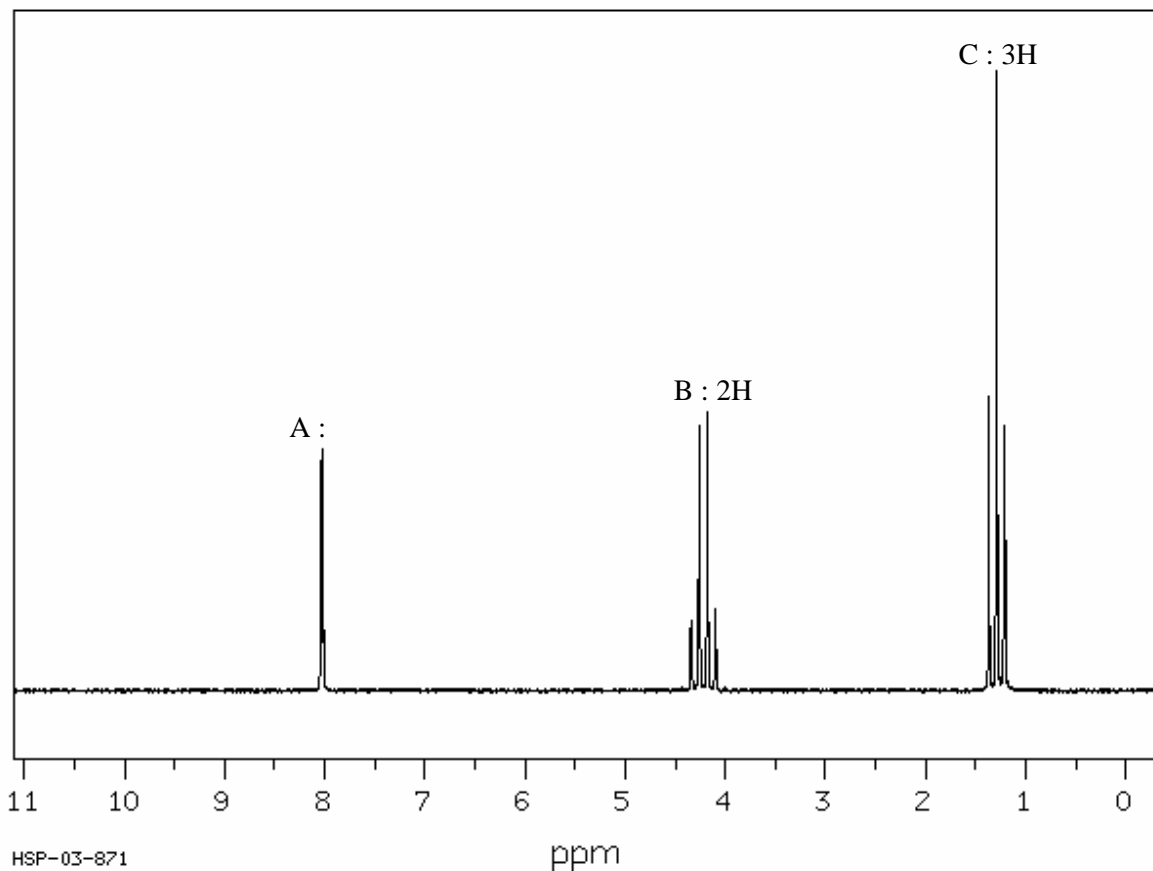
**Table des déplacements chimiques des protons**



Plus l'hydrogène est proche d'un atome électronégatif ou d'un groupe électroattracteur, plus son déplacement chimique sera important : on dit que le proton est « déblindé ». Inversement, lorsque le déplacement chimique est faible, on dit que le proton est « blindé ».

### 3.3.5. Couplage spin-spin

Lorsque l'on effectue un enregistrement d'une molécule plus complexe, on observe des raies multiples. Par exemple, pour une molécule de formule brute C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>, on obtient un spectre RMN :



Une table, comme celle présentée en 3.3.4 permet de justifier les pics qui correspondent aux hydrogènes placés dans trois environnements électroniques distincts.

On note, cependant, des raies multiples autour d'un décalage lié à une fonction. Ceci s'interprète par un couplage spin-spin entre les protons appartenant à des fonctions voisines. En effet, un noyau a une influence sur son voisin et dédouble le signal.

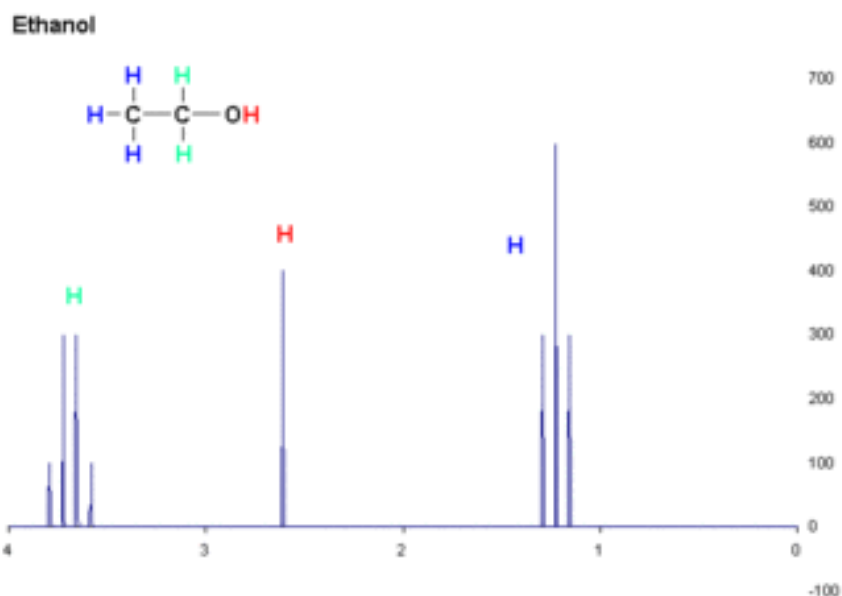
En spectroscopie RMN du proton, un noyau de proton décompose les raies de résonance de ses voisins en 2 raies de transition. Si le noyau est couplé avec n noyaux voisins équivalents, on aura n+1 raies.

Sur cette molécule, trois types de protons sont présents :

- Le pic A correspond à 1H. Son déplacement chimique est de 8 ppm environ (il est très déblindé). D'après les tables, cela correspond à un hydrogène porté par le groupe C=O d'un ester. C'est un singulet donc cela confirme qu'il n'a pas de voisin.
- Le pic B correspond à 2H. Son déplacement est centré sur 4,2 ppm environ : cela correspond à un H lié à un O : CH<sub>2</sub>-O. C'est un quadruplet donc il a 3 H voisins : le groupe CH<sub>2</sub> est lié à un CH<sub>3</sub>.
- Le pic C correspond à 3H (le CH<sub>3</sub> précédent). C'est un triplet donc on retrouve qu'il est lié à un CH<sub>2</sub>. Son déplacement chimique est centré sur 1,2 ppm environ (il est peu déblindé) : cela correspond bien à des H lié à des carbonnes.

La formule développée de la molécule est donc CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-O-COH : c'est le méthanoate d'éthyle.

Les protons des groupes hydroxyles ont un comportement « à part » dans la mesure où ils sont très mobiles et sont de ce fait échangés avec le solvant. Prenons l'exemple du spectre de l'éthanol à 95% :



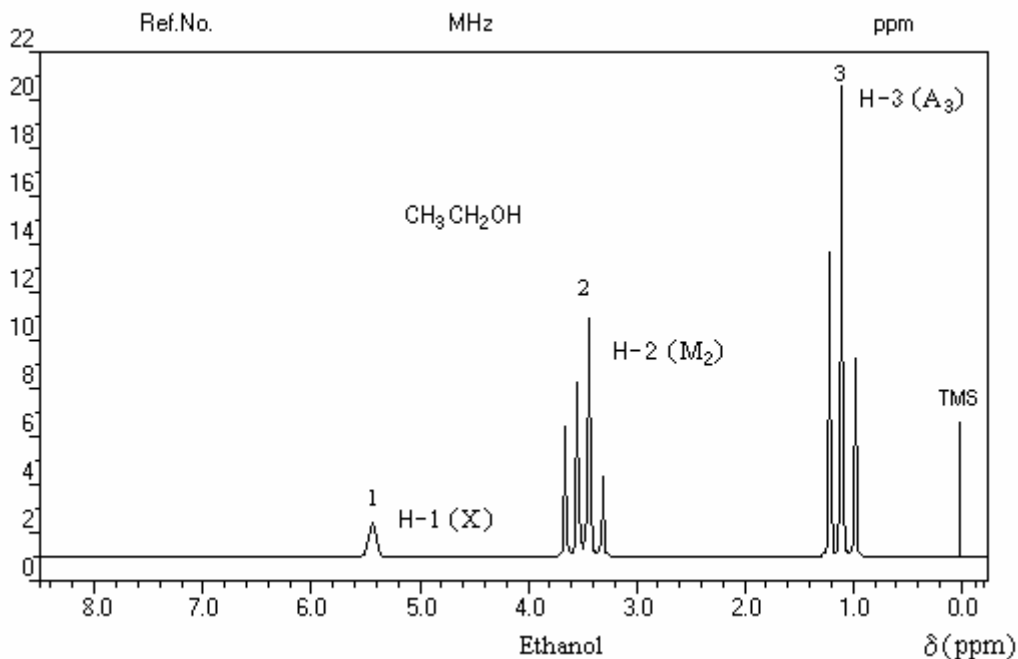
Le proton de la fonction alcool a 2 protons voisins (CH<sub>2</sub>) : on devrait voir 3 raies (un triplet). Or, on ne voit qu'une seule raie car les protons des fonctions hydroxyles sont très mobiles avec le solvant (il y a des échanges avec l'eau), de sorte qu'on ne voit pas ce couplage.

Les protons du groupe CH<sub>2</sub> ont quatre protons voisins (CH<sub>3</sub> et OH) : on devrait voir un signal multiple : un quadruplet dû au CH<sub>3</sub>, dédoublé à cause du proton de l'hydroxyde (ce couplage est plus petit). Or, on n'observe que quatre raies car le couplage dû au proton de l'hydroxyde est mobile.

Les protons du groupe CH<sub>3</sub> ont deux protons voisins : trois raies.

Remarque : si on fait le spectre de l'éthanol absolu on obtient ce spectre :





On peut vérifier que les hauteurs des pics cumulés, par fonction, sont 35 mm, 70 mm, 104 mm. Ils sont des multiples entiers de 35, en référence à l'absorption d'un seul proton.

### 3.3.5. Conclusion

La spectroscopie RMN est un moyen puissant permettant de déterminer ou de justifier la structure d'une molécule. Cela est basé sur une interaction électromagnétique avec le proton.

- Ceux-ci absorbent sélectivement de l'énergie, en fonction de leur environnement électronique, c'est-à-dire à la fonction chimique à laquelle ils appartiennent.
- La hauteur des pics est proportionnelle au nombre de protons identiques dans une fonction.
- Le couplage spin-spin décompose les raies en fonction du nombre de protons voisins. Cette décomposition nous permet d'aller plus loin dans la recherche de la structure de la molécule.

On peut donner l'adresse d'une base de données de spectres RMN et IR :

[http://riodb01.ibase.aist.go.jp/sdbs/cgi-bin/cre\\_index.cgi](http://riodb01.ibase.aist.go.jp/sdbs/cgi-bin/cre_index.cgi)

### 3.4. Recommandations didactiques et pédagogiques

L'analyse spectrale constitue un bloc cohérent inséré dans la partie « Observer ». C'est en ce sens que ce module aura intérêt à être abordé.

Il ne s'agit pas, en terminale scientifique, d'enseigner les techniques pour elles mêmes. En revanche, il est primordial d'expliquer dans quels cadres on fait appel à ces techniques. En sortant d'une classe de terminale les élèves doivent, tout autant, savoir retrouver une fonction chimique, à l'aide d'un spectre RMN, que justifier l'importance de connaître la composition d'une molécule chimique. Les lycéens sont amenés à formuler un choix d'orientation. Les techniques doivent pouvoir être mises en relation avec des gestes effectués dans des laboratoires industriels, des métiers, des champs connexes à la chimie.

Dans la partie « Observer », au-delà de l'analyse spectrale, on trouve également : les ondes et les particules. On aura intérêt, à la fin de cette partie, à redonner les échelles des objets observés (des galaxies avec *le red shift* aux particules élémentaires). Au-delà de ces échelles, les détecteurs captent des rayonnements électromagnétiques, transformés en signaux analogiques puis numériques traités. Des liens évidents peuvent être réalisés avec la partie « Agir ». A ces rayonnements sont associés des énergies, des longueurs d'onde.

Là encore, une conclusion doit pouvoir dresser un panorama complet des objets manipulés. Cette conclusion doit permettre de montrer que les théories et les modèles permettent de réduire l'observation d'objets disparates de la nature à des phénomènes communs, appuyés sur les mêmes entités physiques, ici essentiellement les ondes électromagnétiques.

Les supports pédagogiques utilisés seront essentiellement documentaires. On n'a pas la possibilité d'analyser directement des molécules à l'aide de leur spectre infrarouge ou des spectres RMN du proton. La compétence « extraire et exploiter l'information » sera donc mobilisée. Il va de soi, qu'en terminale scientifique, on attend davantage d'un élève que de mettre en relation directement une valeur relevée sur un graphique et une fonction chimique dans un tableau.

On n'hésitera pas, une fois les principes d'analyse présentés, placer les lycéens en situation de recherches plus complexes, ne débouchant pas directement sur un résultat. Si cela est possible, on s'appuiera sur des documents et des mesures issus de laboratoires industriels ou de recherche, avec toutes les incertitudes liées à des mesures brutes. Dans ces conditions, l'élève pourra être amené à proposer différents types de molécules mais aussi d'autres tests, éliminer des hypothèses à l'aide de documents complémentaires.

On l'aura compris, ce ne sont pas les techniques, pour elles-mêmes, que l'on cherche à enseigner. On souhaite montrer comment la connaissance de théories physico-chimiques tend à développer des appareils de mesure permettant de produire de nouvelles molécules ou d'analyser des échantillons inconnus ou encore de pratiquer des diagnostics médicaux fiables. Au-delà, la recherche scientifique, le travail d'un ingénieur procèdent par tâtonnement, questions, essais. Bref, ils nécessitent, tout à la fois, des connaissances et des compétences pour progresser.

#### **4. LE TRANSPORT ET LE STOCKAGE DE L'INFORMATION**

Un bloc de la partie « Agir » s'intitule « transmettre et stocker de l'information ». Elle représente environ un tiers de la dernière et troisième partie du programme. On peut donc la programmer sur environ quatre semaines.

Il ne s'agit pas de faire un cours sur cette question, ni de vous donner une bibliographie ou encore un plan de la séquence à proposer aux élèves.

Pour un sujet radicalement nouveau, pour un programme de terminale scientifique, nous aimerions montrer comment aborder cette partie du programme et notamment :

- Pourquoi enseigner cette partie du programme ?
- Quels sont les concepts à enseigner ?
- Jusqu'où aller ?
- Que doivent savoir les élèves, que doivent savoir-t-ils faire ?
- Avec quels supports se former, jusqu'où aller ?

##### **4.1. Pourquoi enseigner cette partie du programme ?**

Il va de soi que le numérique a modifié notre environnement technologique. Depuis le premier lecteur de CD dans les années 80, aux tablettes numériques, et aux smart-phones, que d'évolutions ! L'avènement du numérique a permis, pour un coût modeste, de faire converger des supports d'information disparates (textes, vidéos, sons, fichiers de données) en permettant un stockage plus facile et des transmissions rapides et sûres. L'internet, le téléphone mobile, la puissance de calcul des ordinateurs qui permettent de concevoir de nouveaux matériaux, de nouveaux objets, sont les preuves quotidiennes et tangibles de la révolution numérique.

L'objectif de ce programme n'est pas de tomber dans le catalogue. Il n'est pas possible non plus d'expliquer le fonctionnement d'un système électronique, tant les modèles mathématiques, les technologies, les principes utilisés vont bien au-delà de ce qu'il est possible d'aborder en classe de terminale et qui de toute façon ne pourraient être enseignés que par plusieurs dizaines de spécialistes.

La raison d'enseigner cette partie du programme est de construire des concepts qui, s'ils ne permettent pas de tout expliquer ou modéliser, donnent l'occasion de porter un regard scientifique sur des systèmes numériques.

L'idée est qu'à partir de deux ou trois exemples, les élèves soient capables de différencier un signal numérique d'un système analogique, de justifier l'intérêt du numérique sur l'analogique, de décrire la façon de passer de l'un à l'autre, de connaître des paramètres qui permettent de décrire un système numérique en termes de complexité, de lourdeur de l'information, de débit d'information... L'élève pourra également identifier des chaînes numériques et justifier la valeur de certains paramètres qui y sont liés. Bref, il s'agit de construire un regard scientifique sur l'environnement qui nous entoure, au même titre que l'on peut se poser des questions sur le bâton cassé ou sur la « disparition » apparente de la matière lors d'une combustion.

#### **4.2. Quels sont les concepts à enseigner ?**

Ces concepts sont inscrits dans le programme. On rappelle que si le programme est construit linéairement, à travers une succession de notions, il n'est pas souhaitable, ni même possible, de les présenter les unes après les autres, surtout lorsque l'on travaille sur des systèmes. Il va de soi que lorsque le début de cette partie de programme est « chaîne de transmission », on ne pourra pas isoler cette chaîne du type d'informations transmises, des conversions d'un signal en « 0 » et « 1 », de leur acheminement, de leur stockage.

Davantage que les concepts, impossibles à isoler, ce sont des systèmes qu'il faut présenter. On aura tout intérêt à partir d'exemples familiers pour les élèves.

« Je pars en vacances et je compte bien faire de nombreuses photographies. On me propose un appareil de 12,2 millions de pixels. Que signifie ce terme ? Quelles différences avec un appareil photographique de 2 millions de pixels ? Combien de cartes mémoire de 32 Go vais-je prendre avec moi ? Combien de photographies vais-je pouvoir « mettre sur ma carte » ? »

« Lorsque je suis à l'étranger, j'aime mettre des photos sur mon blog ou encore en envoyer par courriel à ma famille. Ces photos pèsent couramment 4 Mo. Pourquoi est-il plus long d'envoyer ces photographies par courriel que de les transférer sur un disque dur via un câble USB ? Que signifie USB ? Combien de temps faut-il pour envoyer 20 photographies par mail ? Est-ce possible ? On peut les compresser, pourquoi faire ? L'image, les sons sont dégradés lors des compressions ? Pourquoi, dans quelles limites ? Peut-on, après traitement, retrouver la qualité d'origine ? Une fois rentré chez moi, quels sont les avantages et inconvénients liés au stockage de mes données : impression papier, enregistrement sur DVD, conservation sur une clé USB, un ordinateur ? »

« Est-ce que l'écran de mon ordinateur, la carte vidéo, ont une influence sur mes images. Si j'utilise un vidéo projecteur, est-ce que je conserve la qualité de l'image ? »

A partir de ces questions, que les élèves peuvent se poser ou se sont posées, tout le programme se déroule (presque) naturellement. Davantage qu'une lecture linéaire, c'est d'une lecture globale dont on a besoin afin de comprendre le sens de ce qui est à enseigner. Ce choix est à faire, de préférence au sein des équipes disciplinaires. Dans le cas contraire, il ne sera pas possible de faire le lien avec l'environnement technologique ce qui rendra l'approche parcellaire et artificielle.

#### **4.3. Jusqu'où aller ?**

N'importe quel mot clé de ce chapitre tapé sur un moteur de recherche renvoie à des contenus théoriques, clairement inaccessibles aux élèves, aux professeurs comme aux inspecteurs... Il convient donc, à partir du sens que l'on donne à son enseignement, de définir les limites, en faisant preuve de bon sens.

Concept	Jusqu'ou aller ou quels supports choisir
Chaîne de transmission	A partir d'une chaîne simple : envoi d'un fichier son par courriel, écoute d'un CD de musique, envoi d'un texto : identifier : les CAN / CNA, les types de transmission. Mettre en relation le débit, la capacité de stockage avec des données du constructeur.
Images numériques. Caractéristiques d'une image numérique : pixellisation, codage RVB et niveaux de gris	Quantifier la complexité d'une image, comparer deux images, appliquer un algorithme de compression d'images. Passer d'une image à une série de chiffres.
Signal analogique et signal numérique	Indiquer dans une chaîne de données les signaux de type numérique et ceux de type analogique. Identifier les convertisseurs. A partir d'un convertisseur donné et de son « mode d'emploi », déterminer le signal de sortie, qualifier la qualité du signal.
Procédés physiques de transmission : transmission Procédés physiques de transmission : débit linéaire, atténuation.	Citer les procédés les plus connus, connaître leurs avantages et leurs inconvénients, citer les paramètres qui les décrivent, identifier sur une notice ces paramètres. Comparer une performance réelle et celle donnée par un constructeur. Identifier dans une chaîne la partie qui va limiter le système. Quantifier la dégradation d'un signal analogique, interpréter son impact sur la fidélité de la transmission
Stockage optique	Comparer les modes de stockage, avantages et inconvénients. Expliquer, justifier, le mode de stockage de l'information d'un DVD. Justifier le terme de « blue » dans blue-ray. Quantifier la place nécessaire pour stocker des informations : d'une bibliothèque à une cinémathèque, par exemple...

On ne pourra qu'illustrer le « mode de fonctionnement », tant les objets manipulés sont complexes. Par exemple, les convertisseurs CAN et CNA que l'on verra en TS, sont dans leur principe (échantillonnage, quantification, vitesse, dégradation) du même type que ceux que l'on trouvera dans un appareil numérique. La technologie n'est pas de même nature. Ce sont donc les paramètres qui les décrivent qui sont intéressants et non pas les modes de fonctionnement de dispositifs didactiques.

#### 4.4. Que doivent savoir les élèves, que doivent savoir-t-ils faire ?

Que doivent savoir les élèves devient plus complexe à identifier. On cherche à donner une culture générale scientifique, rendre un élève capable d'être autonome devant une situation inconnue, dans un cadre dont tous les éléments scientifiques ne sont pas connus par les professeurs.

Il va de soi, dans ce contexte, que l'on n'attend pas que l'élève soit capable de répondre à la question : quelle est la différence entre une quantification et un échantillonnage ? En revanche, on veut que l'élève soit capable de faire face à des données ou des situations contextualisées. Par exemple, comment choisir un câble de transmission pour un type de transmission donné ? Quel taux de compression choisir pour une qualité vidéo donnée ? Comment justifier la perte d'information d'une image ou comment comparer deux modes d'échantillonnage d'un signal ? Dans tous les cas, l'évolution à opérer est de passer de l'évaluation de l'acquisition de connaissance à travers des définitions et des exercices standard, à l'utilisation de ces connaissances dans un contexte, *a priori*, nouveau.

C'est clairement en ce sens que sont évalués les acquis des élèves dans le programme PISA. Les concepteurs des items cherchent à répondre à la question : que savent faire les élèves de ce qu'ils ont appris à l'école et non pas qu'ont-ils appris à l'école ? Pour prendre un exemple en langue vivante, la parfaite connaissance du vocabulaire, de la syntaxe, d'éléments culturels, ne disent rien de la capacité d'un individu à interagir dans cette langue.

#### **4.5. Avec quels supports se former ?**

La tentation d'Internet est grande mais frustrante. Les premiers éléments qui nous parviennent, lorsque l'on tape des mots clés sur Google, sont trop difficiles et décourageants. Ils renvoient à des cours de l'enseignement supérieur voire des formations pour des ingénieurs. Afin d'accompagner les professeurs, des documents seront produits et mis en ligne sur Eduscol. Tous ces documents seront relus et validés comme conformes avec l'esprit des programmes. Sans vouloir commettre de procès d'intention, nous vous demandons d'être bien plus vigilants en ce qui concerne les manuels scolaires.

Il nous semble enfin que plutôt que de partir de documents issus de l'enseignement supérieur voire du monde du travail, on aura intérêt à partir des mots clés, à les mettre en regard des situations auxquelles on souhaite exposer les élèves, à se poser la question de savoir ce que l'on cherche à enseigner. En prenant un peu de temps, on trouve des explications bien faites, sur le fonctionnement des appareils qui transmettent de l'information. Et puis, il convient de conserver un peu de bon sens et de confiance. Si vous n'arrivez pas à comprendre un document, il y a de bonne chance que ce soit aussi le cas des élèves.

# L'ENSEIGNEMENT DE SPÉCIALITÉ

## 1. Objectifs

Un enseignement de spécialité est offert aux élèves de terminale S. Ils peuvent choisir parmi : Sciences de la Vie et de la Terre, Mathématiques, Physique-Chimie, Informatique et Sciences du Numérique (ISN). L'enseignement de spécialité de Sciences Physiques prépare l'élève à une poursuite d'études scientifiques dans ce domaine en consolidant son choix d'orientation. Il permet aux lycéens d'affirmer leur maîtrise de la démarche scientifique ainsi que celle des pratiques expérimentales et leur offre le moyen de tester leurs goûts et leurs compétences.

En plaçant l'élève en situation de recherche et d'action, cet enseignement lui permet de consolider les compétences associées à une démarche scientifique. L'élève est ainsi amené à développer trois activités essentielles chez un scientifique :

- la pratique expérimentale ;
- l'analyse et la synthèse de documents scientifiques ;
- la résolution de problèmes scientifiques.

On retrouve donc de grands objectifs de l'enseignement des sciences au sein du cycle terminal.

Le programme est rédigé sous forme de mots clés au sein de trois domaines d'étude : l'eau, son et musique, matériaux. Il ne s'agit pas de traiter tous les mots clés, plus d'une trentaine, mais d'en choisir certains en fonction du parcours scientifique du professeur voire des goûts ou des demandes des élèves. Ces développements pourront largement s'appuyer sur des éléments étudiés dans le cadre du programme d'enseignement spécifique.

## 2. Modalités pédagogiques

Une très grande liberté pédagogique est laissée au professeur. L'objectif est de mettre en relation les élèves avec des thèmes, souvent liés à des domaines scientifiques d'actualité. Comme pour le programme spécifique, on ne demande pas des développements irréalistes.

Ce sera le principal écueil à éviter, comme nous le verrons dans le cas des semi-conducteurs. De même, mais est-il nécessaire de le rappeler, il ne s'agit pas de proposer une vulgarisation scientifique, sans ambition, mais de confronter les lycéens à des modèles, les mettre en situation d'analyser ou de synthétiser des sources documentaires ou encore de résoudre des problèmes scientifiques. L'un de ces trois critères permet d'être certain que l'enseignement sera réellement formateur. D'autres sont possibles.

## 3. Illustrations (non limitatives) à travers quelques exemples

Plusieurs modalités peuvent être proposées.

### 3.1. Production d'un article scientifique

En s'appuyant sur le programme de première et de terminale, expliquer le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, leurs applications, leur principales caractéristiques. On peut s'appuyer sur des documents trouvés sur Internet de difficultés inégales. Une aide des professeurs est à prévoir pour certains d'entre eux.

[http://optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI\\_fr\\_M05\\_C02/co/OPI\\_fr\\_M05\\_C02\\_web.html](http://optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/OPI_fr_M05_C02_web.html)

<http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23e/RM23e01.html>

### 3.2 Caractérisation d'une cellule photovoltaïque

Un site d'installateur de panneaux solaires indique que le rendement d'une cellule d'un panneau de silicium polycristallin est de 11,5 %.

(<http://www.ideesmaison.com/Energies/Solaire/Photovoltaique/Rendement-photovoltaique.html>)

A partir d'une cellule fournie aux élèves :

- Mettre en place un protocole expérimental pour mesurer ce rendement.
- Déterminer quelques paramètres qui influent sur ce rendement. Ces paramètres sont liés à une utilisation en situation des cellules.
- Est-ce que dans les conditions d'utilisation de votre lieu d'habitation, le rendement donné est une moyenne, un rendement optimal voire « un rendement marketing » ?

Une étude très complète a été réalisée dans les cadres des Olympiades de la physique :

<http://www.odpf.org/antérieures/xi/gr-9/memoire.pdf>

### 3.3. Exploitation de documents

Vous voulez équiper votre maison de cellules photovoltaïques afin de générer votre propre électricité ?

Est-ce que cet investissement est financièrement intéressant ? On pourra s'appuyer sur le site :

[http://www.economie-denergie.wikibis.com/module\\_solaire\\_photovoltaique.php](http://www.economie-denergie.wikibis.com/module_solaire_photovoltaique.php)

## **4. Modalités d'évaluation, certification au baccalauréat**

Comme jusqu'à la session 2012, les élèves qui auront fait le choix de la spécialité seront évalués lors de l'épreuve écrite du baccalauréat ou bien en ECE.

Comme nous l'avons indiqué dans les modalités d'enseignement, tous les mots clés n'ont pas à être abordés puisqu'il n'y a aucune connaissance exigible. L'élève sera confronté à une situation inédite. On veillera à ce qu'il ne soit pas déstabilisé en fournissant, au cours de l'année, les connaissances minimales dans les trois thèmes proposés, sachant que ce ne sont pas ces connaissances qui seront évaluées.

## L'ÉVALUATION ET LES ÉPREUVES DE BACCALAURÉAT

La question de l'évaluation en classe Terminale est trop importante pour l'expédier en quelques minutes et, comme cela a été annoncé en début de matinée, nous y consacrerons une journée entière en début d'année scolaire prochaine afin que vous puissiez en intégrer les différents aspects sans délais. Nous prendrons alors le temps d'analyser des sujets d'annales 0, tant pour ce qui relève des épreuves écrites que pour les nouvelles épreuves d'ECE, le C signifiant désormais compétences. Ce sera aussi l'occasion d'évoquer, de façon plus générale, l'évaluation en Physique-Chimie, de la classe de Seconde jusqu'à la fin de la scolarité en lycée à travers les diverses modalités pouvant être proposées (fréquence, durée, nature), de l'intérêt des épreuves communes, etc.

Aujourd'hui, nous nous contenterons de souligner les nouveautés de l'évaluation finale du baccalauréat et les conséquences qu'elles imposent en amont. Nous commencerons par l'épreuve écrite. Aucun changement notoire n'apparaît dans le texte cadrant cette épreuve tel qu'il figure au BO du 06.10.2011. On a toujours trois exercices dont les deux premiers sont communs à tous les candidats et un troisième différent selon que les élèves ont choisi ou non la spécialité Physique-Chimie. Mais, à y regarder de plus près, on ne voit plus la référence à la partie qui relève de la Physique et celle qui concerne la Chimie ; c'est naturellement dû à l'approche thématique qui structure différemment le programme. On peut lire aussi, dès la première ligne du texte : *cette épreuve a pour objectif d'évaluer des compétences...* : ce mot de compétences n'apparaissait pas dans la version précédente où il n'était question que de *notions*. Et cela se retrouve dans plusieurs sujets d'annales 0.

Considérons ainsi l'exercice 1 du sujet n°1 des annales 0 : le satellite Planck. La première question est la suivante : *À l'aide des documents et en utilisant vos connaissances, rédiger, en 30 lignes maximum, une synthèse argumentée répondant à la problématique suivante : « Comment les informations recueillies par le satellite Planck permettent-elles de cartographier "l'Univers fossile" ? »*

Suit un paragraphe visant à aider les élèves et comportant quelques verbes d'action destinés à fixer les composantes de l'argumentation attendue : présenter, préciser, indiquer, expliquer. On voit que les candidats seraient évalués sur la compétence « extraire et exploiter des informations ».

D'une façon générale, les sujets 0 affichent un nombre de documents scientifiques à exploiter plus important que les sujets auxquels nous sommes actuellement habitués et parmi ces documents, les courbes et graphiques occupent une place importante. Voir les nombreux spectres dans le sujet n°1.

Venons-en à l'exercice de spécialité. Comme cela vient d'être rappelé, l'enseignement de spécialité est organisé autour de trois activités essentielles : la pratique expérimentale, l'analyse et la synthèse de documents scientifiques, et la résolution de problèmes scientifiques. Il est donc logique que l'évaluation qui lui soit attachée prenne appui sur ces mêmes activités. Si la première nous renvoie à l'épreuve d'ECE dont nous parlerons dans quelques minutes, les deux suivantes seront évaluées dans l'exercice écrit. Plusieurs remarques s'imposent :

- L'analyse de documents peut comporter un tri et un choix des textes à retenir et, *a contrario*, d'autres à éliminer (*les documents fournis peuvent contenir des informations supplémentaires non explicitement utiles mais intrinsèquement pertinentes*) ; la synthèse de documents évoque quant à elle, la complémentarité des informations contenues dans des documents différents qui doivent être considérées conjointement pour répondre à une question donnée ;
- La démarche de résolution de problèmes renvoie à ce qu'en d'autres endroits, on appelle une tâche complexe ; l'élève découvre une situation nouvelle (non travaillée en classe) qu'il doit résoudre en mobilisant plusieurs compétences qu'il a construites en phase d'apprentissage ;
- En dehors des connaissances qui relèvent de la culture générale ou qui intègrent le programme d'enseignement spécifique, toutes les données nécessaires à la résolution de l'exercice seront fournies à l'élève, *aucune connaissance nouvelle complétant l'enseignement spécifique n'étant exigible au baccalauréat*.

Ainsi, dans l'exercice 1 des annales de spécialité, la question « Comment sont positionnées les frettes sur le manche d'une guitare ? » constitue un problème à résoudre qui n'a pas été étudié en classe ; les élèves doivent utiliser les documents qui leur sont fournis et la compétence acquise en cours d'année sur d'autres situations pour y parvenir.



Nous terminerons ce rapide survol des épreuves de baccalauréat en parlant des nouvelles ECE. Le cahier des charges transmis aux professeurs auteurs de sujets est à cet égard le document de référence. Nous en reprendrons rapidement les points essentiels :

- l'évaluation portera désormais sur des compétences et non plus sur des capacités : ce distinguo est essentiel dans la mesure où l'on ne se focalisera plus sur des gestes techniques pointus mais sur une maîtrise plus globale des différentes étapes d'une démarche expérimentale ;
- l'outil de référence pour cette évaluation est bien entendu la grille de compétences qui comporte 6 domaines ; si l'on met de côté le dernier (être autonome, faire preuve d'initiative) qui ne sera jamais évalué spécifiquement mais dont les différents aspects seront intégrés dans les autres, ce sont donc 5 domaines qu'il est possible d'évaluer ; comme l'épreuve ne durera qu'une heure, seuls 2 ou 3 d'entre eux seront évalués ;
- pour chaque compétence évaluée, le professeur devra positionner l'élève sur un niveau parmi 4 au choix (A, B, C ou D) qui correspondent à des maîtrises plus ou moins importantes de la compétence considérée (de A, réussite en autonomie à D, échec malgré l'aide apportée) ;
- en fonction de la durée estimée pour satisfaire les tâches associées aux compétences évaluées, des coefficients leur seront attribués à raison d'un point de coefficient pour 10 min de travail (la somme des coefficients sera donc égale à 6) ;
- une feuille EXCEL permettra de fournir automatiquement une note sur 20 à partir des étoiles qu'auront mises les professeurs évaluateurs ;
- la fiche 4 du sujet (repères pour l'évaluation) fournira toutes les informations nécessaires aux évaluateurs pour apporter l'aide nécessaire aux élèves en difficulté (solutions partielles ou totales) et pour positionner les élèves sur les niveaux de maîtrise.