

FLORE DUNAC • JEAN-FRANÇOIS LE MARÉCHAL

EXPÉRIENCES DE CHIMIE

ASPECTS PÉDAGOGIQUES
ET SÉQUENCES D'ENSEIGNEMENT

CAPES/CAPET/AGRÉGATION
PHYSIQUE/CHIMIE

DUNOD

Remerciements

Un grand merci à Laurence Béraud-Schmitt, Clément Courtin, Cyrille Monnereau, Gérard Seurat pour leur précieuse aide à différents titres et leur contribution à notre travail. Merci à Didier Roux d'avoir accepté de préfacer cet ouvrage. Merci à Michel Coz pour ses conseils. Merci à Anne Gaxotte et Émilie Thomas pour leur présence et leur soutien. Merci à nos familles.

À Aurore

Création graphique de la couverture : Hokus Pokus Créations

© Dunod 2019
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-079213-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

● Table des matières

Préface	1
Avant-propos	2
Les règles de sécurité au laboratoire de chimie	5
Notations utilisées dans l'ouvrage	10

Partie 1

Pédagogie 13

Chapitre 1 Construction d'une séquence d'enseignement 14

1. Connaissances pédagogiques sur les contenus scientifiques 14
2. Séquence d'enseignement 15
3. Méthode inductive, méthode déductive 15
4. Ce qu'attend le jury 16
5. Phases d'une séquence d'enseignement 17
6. Construction de la séquence 18
7. Cohérence 19
8. En résumé 19

Chapitre 2 Situations déclenchantes et conceptions 21

1. Qu'est-ce qu'une situation déclenchante ? 21
2. Motiver plutôt qu'enseigner 22
3. Conceptions et idées reçues 22
4. Retour sur les situations déclenchantes 24

Chapitre 3 Construire une démarche d'investigation 27

1. Problématique 28
2. Terminologie 28
3. Une base peut-elle exister en milieu acide ? 29

4. Démarche d'investigation	31
5. Annexe – Note sur les indicateurs colorés	37
Chapitre 4 La modélisation en sciences	39
1. Les différents « mondes » du chimiste	39
2. Activité de modélisation	41
3. Enseignement et modélisation	42
4. Modèle et histoire des sciences	44
Chapitre 5 Savoir définir un concept	46
1. Qu'est-ce que définir ?	46
2. Définir en sciences	48
3. Exemples	48
4. Éléments de correction	49
Chapitre 6 Précision sur les valeurs numériques	51
1. Terminologie	52
2. Première étape : incertitude non explicitée	53
3. Deuxième étape : incertitude explicitée	57
4. Cas des constantes	62
Chapitre 7 Les cartes mentales	64
1. Généralités sur les cartes mentales	64
2. L'apport des cartes mentales	65
3. Construction et utilisation d'une carte mentale	66
4. Conclusion	71
Chapitre 8 Zone Proximale de Développement et différenciation pédagogique	73
1. La ZPD : entre confort et rupture	73
2. Pourquoi rechercher la ZPD d'un apprenant ?	74
3. La différenciation pédagogique	75
4. Conclusion	77

Partie 2

Architecture de la matière 78**Chapitre 9 De l'atome aux molécules** 80

1. Aspect pédagogique 80
2. La technique des fragments 81
3. La notion de liaison covalente 82
4. Le non-respect de la règle de l'octet 84
5. Présentation de la théorie V.S.E.P.R. 86
6. Séquence pédagogique 92
7. Annexes 94

Chapitre 10 Cristaux métalliques 96

1. Aspect pédagogique 96
2. Situation déclenchante 97
3. L'interface VESTA 98
4. Empilements compacts 101
5. Séquence d'enseignement 106

Chapitre 11 Cristal ionique 107

1. Aspect pédagogique 107
2. Structure cubique faces centrées (CFC) 109
3. Autres représentations des cristaux ioniques 113
4. Séquence d'enseignement 117
5. Annexe 118

Chapitre 12 Structures cristallographiques : applications 119

1. La glace et la liaison hydrogène 119
2. Le carbone 120
3. Le sulfure de zinc 125

Chapitre 13	Détermination expérimentale de longueurs de liaisons	129
1.	Aspect pédagogique	129
2.	Analyse du problème	130
3.	Détermination de la longueur de la liaison Cu–Cu	132
4.	Détermination de la distance Ca–F	136
5.	Détermination de la distance Na–Cl	139
6.	Séquence d'enseignement	143
7.	Annexe	145

Partie 3

Solutions aqueuses 146

Chapitre 14	Solvants et solutés	148
1.	L'état liquide	149
2.	Solvant	154
3.	Du solvant à la solution	165
4.	Conclusion	180

Chapitre 15	Déterminer un pH	181
1.	Généralités	181
2.	Déterminations expérimentales du pH	183
3.	Détermination théorique du pH	187
4.	Séquence d'enseignement	193

Chapitre 16	Préparation de solutions	196
1.	Aspect théorique	196
2.	Représentation d'une dissolution	199
3.	Réalisation expérimentale	201

Chapitre 17	Solutions tampons	206
1.	Généralités	206
2.	Propriétés des tampons	207

3. Préparation des tampons	213
4. Utilisation des tampons	216
5. Séquence pédagogique	226
Chapitre 18 Interactions soluté-solvant : une étude conductimétrique	228
1. Aspect pédagogique	228
2. Remarque préliminaire sur les conductivités molaires	231
3. Commentaires sur le graphe et sur les résultats	235
4. Remarques concluantes	235
5. Couches de solvation	236
6. Conclusion	239
7. Séquence d'enseignement	239
Partie 4	
Titrage	242
Chapitre 19 Généralités pédagogiques sur les titrages	244
1. Dosage et titrage	244
2. Réaction unique	245
3. Réaction totale	245
4. Réaction rapide	246
5. Réflexion sur les titrages	247
6. Qu'est-ce que « comprendre un titrage » ?	248
7. Forme des courbes de titrage	249
Chapitre 20 Titrages acide-base	252
1. Aspects pédagogiques	252
2. Situation déclenchante	253
3. Titrage colorimétrique	253

4. Titration pH-métrique	255
5. Traitement des données	259
6. Titration conductimétrique	261
7. Titrations en milieu non aqueux	267
8. Annexe : Obtention d'une courbe simulée	268
Chapitre 21 Titrations d'oxydo-réduction	271
1. Aspects pédagogiques	271
2. Titrations colorimétriques	272
3. Titration manganométrique	272
4. Applications de la manganométrie	278
5. Iodométrie	280
6. Indicateurs d'oxydo-réduction	286
7. Titration potentiométrique	288
8. Annexes	291
Chapitre 22 Titrations par précipitation	296
1. Difficultés des élèves avec la notion de précipitation	296
2. Situation déclenchante	297
3. Généralités	297
4. Utilisation d'un indicateur coloré	298
5. Suivi électrochimique	302
6. Suivi conductimétrique	306
7. Annexes	307
Chapitre 23 Titrations par complexation	311
1. Généralités	311
2. Titration par complexation	312
3. Autres titrages complexométriques	316
4. Annexe : Les formes de l'EDTA	320

Partie 5

Oxydo-réduction et électrochimie 322**Chapitre 24 Les bases de l'oxydo-réduction** 324

1. Généralités 324
2. Notion de couple oxydant/réducteur 325
3. Écriture des équations d'oxydo-réduction 327
4. Piles 334
5. Relation de Nernst 338
6. Sens d'une réaction d'oxydo-réduction 351

Chapitre 25 Électrodes 354

1. Généralités 354
2. Électrodes métalliques 355
3. Électrodes spécifiques 359
4. Électrodes de référence 364

Chapitre 26 Courbes intensité-potentiel 371

1. Généralités 371
2. Tracé manuel d'une courbe i/E 376
3. Tracé automatique 383
4. Tracé avec peu de matériel 389
5. Annexe : Utilisation de l'alimentation stabilisée 391

Chapitre 27 Application des courbes intensité-potentiel : piles et corrosion 392

1. Pile et courbes i/E 392
2. Corrosion des métaux 396
3. Corrosion galvanique 401
4. Séquence d'enseignement 404

Chapitre 28	Électrolyses	405
1.	Généralités	405
2.	Préparer une électrolyse	406
3.	Approche énergétique de l'électrolyse	407
4.	Électrolyses et applications	411
5.	Électrolyses où la stœchiométrie n'est pas celle attendue	417
6.	Électrolyse de CuBr_2	422
7.	Électrolyse et histoire de la chimie	425
8.	Électrolyse industrielle	425
9.	Séquence d'enseignement	431

Partie 6

Thermodynamique chimique 432

Chapitre 29	La chaîne énergétique	434
1.	Aspect pédagogique	434
2.	Initiation à la chaîne énergétique	435
3.	L'énergie en chimie	439
4.	Application de la chaîne énergétique à la chimie	440
5.	Remarques pédagogiques concluantes	446
6.	Séquence d'enseignement	448

Chapitre 30	Changement d'état du corps pur	450
1.	Aspect pédagogique	451
2.	Étude d'un vase calorimétrique	452
3.	Changement d'état et palier de température	457
4.	Effet thermique lors d'un changement d'état	460
5.	Surfusion	464
6.	Séquence d'enseignement	466

Chapitre 31	Diagrammes binaires	468
1.	Aspect pédagogique	468
2.	Diagramme binaire solide-liquide	469
3.	Utilisation d'un diagramme	472
4.	Comparaison de diagrammes solide-liquide	477
5.	Diagrammes binaires en métallurgie	482
6.	Variance	486
7.	Séquences d'enseignement	487

Partie 7

Questions d'oral	489
-------------------------	-----

Chapitre 32	Questions d'oral aspect théorique	490
1.	Champ cristallin	490
2.	Exprimer la concentration	492
3.	Extraction par solvant	492
4.	Atomistique	495
5.	Dissolution d'un solide ionique	496
6.	Titrage	496
7.	CCM	497
8.	Les structures de Lewis	498
9.	Pédagogie	505

Chapitre 33	Question d'oral aspect expérimental	507
1.	Refroidir	508
2.	Spectrophotométrie	508
3.	Séchage	510
4.	Les eaux du laboratoire	511
5.	Le pH de l'eau	512

Table des matières

6. Test chimique	512
7. Oxydo-réduction	513
8. De quoi est composé...	515
9. Verrerie	518
10. Étiquetage	520
11. Sécurité et incendie au laboratoire	521
Index	523

Préface

Quel plaisir de lire ce livre de Flore Dunac et de Jean-François Le Maréchal. Pertinent, bien écrit et surtout utile : ce livre présente les bases de ce que tout enseignant doit avoir en tête dans son métier. Cet ouvrage présente à la fois des expériences et des notions indispensables à l'enseignement de la chimie, mais surtout insiste sur les méthodes à employer pour intéresser et passionner une classe d'élèves en les amenant, par une démarche scientifique, à développer leur connaissance.

Cet ouvrage montre comment motiver les élèves, comment les amener à raisonner avec justesse et précision pour qu'ils soient eux-mêmes (mais pas seuls) vecteur de leur propre savoir. Les élèves retiendront d'autant mieux les notions à acquérir qu'elles résultent de questionnements qu'ils se poseront à bon escient. C'est un des éléments essentiels de l'enseignement qui consiste moins à enseigner les résultats de la science qu'à faire construire, par les élèves eux-mêmes, le raisonnement scientifique afin d'aboutir à la connaissance. En expliquant clairement les notions ou les présentations de ces notions qui peuvent poser des problèmes, les auteurs mettent le doigt sur les éléments essentiels de la pédagogie permettant une approche fluide et efficace de l'enseignement. Vu de l'élève c'est la découverte de la richesse et de la subtilité des sciences chimiques ; vu par l'enseignant, c'est le plaisir de voir s'échafauder la motivation de l'élève générée par la curiosité, le questionnement et la découverte.

Observer, raisonner, déduire pour construire une abstraction et l'exprimer sont les étapes de la démarche scientifique qui ne sont en rien différentes de celle de l'enseignement. La motivation trouve ses racines dans la curiosité ; quoi de plus efficace alors de construire ce « conflit cognitif » qui, en cultivant ensuite l'observation et le raisonnement, conduit inmanquablement à imprimer chez l'élève une connaissance robuste qui lui restera sa vie durant. Développer l'esprit critique en se basant sur les faits scientifiques plutôt que sur les approximations ou les croyances permet de structurer le raisonnement scientifique et lui donne toute sa pertinence.

Ce livre explicite avec un grand soin et avec des exemples particulièrement bien choisis les étapes à franchir. En mettant en scène de nombreuses expériences et en donnant à la fois les clés scientifiques et pédagogiques, il permettra à l'enseignant ou au futur enseignant de mettre en place sa pédagogie. L'enseignant prendra alors un grand plaisir à maîtriser tous les aspects de son enseignement. C'est un livre que j'aurais aimé avoir, lorsqu'étudiant, je me penchai sur les problématiques de l'enseignement des sciences. J'y aurais appris à la fois des connaissances scientifiques revisitées de façon claires et attrayantes mais aussi comment les enseigner.

Didier Roux

Vice-Président de la fondation La Main à la Pâte

Membre de l'Académie des Sciences et de l'Académie des Technologies

Avant-propos

Cet ouvrage a l'ambition d'aider les candidats aux concours de l'enseignement (CAPES, CAPET, Agrégations interne et externe), ainsi que les enseignants en exercice, à appréhender l'élaboration d'une séance ou d'une séquence d'enseignement.

Il est révolu le temps où le professeur exposait **magistralement** les connaissances, laissant aux élèves la difficile tâche de les comprendre sans explications individuelles. Pour dépasser cette pratique, une possibilité est d'organiser une séquence d'enseignement qui commence par impliquer l'élève dans une activité avec une certaine **autonomie**. C'est le moment où l'élève construit une part des connaissances sur le sujet, par exemple en poursuivant une démarche scientifique. Pendant cette séance, le professeur aide et explique individuellement, c'est surtout l'élève qui manipule les connaissances¹. Puis vient une séance de débriefing de l'activité qui sert à structurer **et à institutionnaliser** les connaissances que l'élève a déjà manipulées, parfois de façon approximative pendant l'activité. C'est alors au tour de l'enseignant de manipuler le savoir.

Une telle pratique pédagogique a fait ses preuves, mais elle nécessite que l'enseignant d'une part adopte une attitude non traditionnelle² vis-à-vis de son enseignement et que, d'autre part, il soit en mesure d'adapter (voire de créer), des activités qui correspondent à l'objectif de la séance, au niveau de ses élèves, et en accord avec sa propre envie. Il n'existe pas de séquence d'enseignement universelle, bonne pour tout type d'élèves et d'enseignants. L'enseignant doit donc être capable d'adapter l'activité qu'il propose à ses élèves³.

1 Comment créer ou adapter des activités ?

Cet ouvrage répond à cette question en fournissant des exemples commentés. Il se place entre les ouvrages de pédagogie théorique et les ouvrages de ressources (mode opératoire d'expériences, fiches d'activités, etc.). Le point de vue adopté ici est de fournir des

1. L'élève est largement autonome, mais il n'est pas « abandonné ». La démarche scientifique dans laquelle l'élève s'implique requiert des coups de pouce plus ou moins fréquents suivant les élèves.

2. Nous appelons « attitude traditionnelle » pour un enseignant le fait d'enseigner (c'est-à-dire de parler). En effet, ce n'est pas au moment où l'enseignant enseigne que l'élève apprend. Le moment de l'enseignement et le moment de l'apprentissage ne sont pas simultanés. Si l'enseignant ne fait qu'enseigner, il laisse l'élève apprendre chez lui, en son absence. En revanche, si l'enseignant consacre une part du temps de la classe à ne pas enseigner (enseignement par activité), alors il est présent pour aider l'élève à apprendre, en répondant à des questions individuelles, en rebondissant sur ce que l'élève dit, en « titillant » l'élève brillant et curieux pour le faire se dépasser et l'intéresser, ou en permettant à l'élève faible de prendre du temps quitte à ne pas faire tout le travail prescrit.

3. Dans de nombreux établissements, les séances de TP sont communes à toutes les classes d'un même niveau. De notre point de vue, cela signifie que le même matériel va être sorti pour les élèves. Cela n'implique pas que le questionnement proposé aux élèves en accompagnement du travail expérimental envisagé soit le même.

ressources en justifiant les choix qui ont prévalu à leur conception. Nous pensons que, de cette façon, l'enseignant prendra conscience qu'il peut faire ses propres choix en fonction de ses besoins et adapter ainsi nos ressources, mais aussi, d'autres. Cet ouvrage a donc l'ambition de former l'enseignant à une autonomie pédagogique dans le domaine de l'adaptation, voire de la création des textes d'activités qu'il propose à ses élèves. C'est utile pour son métier et c'est ce qui est demandé aux concours d'enseignement.

- Ces activités peuvent prendre place autour d'une d'expérience dont l'exploitation permet d'introduire de nouvelles connaissances ; cet ouvrage en fournit certaines, bien connues mais qui sont enrichies d'une réflexion pédagogique détaillée, et d'autres qui n'ont jamais été publiées pour l'enseignement.
- Certaines des activités que nous proposons utilisent abondamment un ordinateur. De nombreux logiciels gratuits, et de grande qualité, existent maintenant ; ils permettent un travail en profondeur dans de nombreux domaines. Nous proposons par exemple quelques activités non classiques en cristallographie avec VESTA®, utilisable dès le lycée, ou sur les formules de Lewis et la nomenclature en chimie organique avec CHEMSKETCH®, deux logiciels du domaine public.
- Nous proposons également des activités qui ne nécessitent qu'une feuille de papier, un crayon et une calculatrice, convaincus qu'un travail simple peut être efficace pour l'apprentissage¹.

Le lecteur constatera que la part que nous donnons à l'exploitation d'une expérience est beaucoup plus détaillée que ce qui se fait habituellement dans des ouvrages comparables. Cela est conforme au fait que cet ouvrage ne fournit pas que des modes opératoires, mais qu'il permet aussi de réfléchir à la façon d'utiliser les expériences pour construire des séquences d'enseignement.

2 Une pratique de tous les dangers

Avec une telle pratique, l'enseignant se met « en danger » en permanence. En effet, pendant les deux heures en demi-groupe, il faut que les élèves puissent travailler sur un domaine sans avoir eu le cours correspondant. L'activité doit donc introduire le savoir par petites touches. L'enseignant va de binômes en binômes pour répondre à des questions individuelles (c'est pédagogiquement performant) sur ce que les élèves ne comprennent pas. L'enseignant doit être prêt à répondre à des questions parfois déstabilisantes. Quand l'activité est bien faite, les questions des élèves sont différentes d'un élève à l'autre. Quand l'activité ne fonctionne pas bien, les élèves butent tous sur les mêmes points. Il faudra améliorer ces derniers pour l'année suivante.

L'enseignant se met également en danger pendant l'heure de classe entière car les élèves sont désormais en mesure de poser beaucoup de questions. Il faut pouvoir gérer une classe particulièrement « vivante ».

1. Apprentissage est ici employé au sens de « l'acte d'apprendre ».

3 Un bon texte d'activité

Bien que « dangereux », ce type de séquences d'enseignement est réalisé par de nombreux enseignants depuis des décennies, dans de nombreux pays et à tous les niveaux scolaires. Ce qui est compliqué est d'avoir de bons textes d'activités. Qu'est-ce qu'un bon texte d'activité ? C'est un texte :

- qui est en lien avec une situation concrète du point de vue de l'élève, par exemple à partir d'une situation déclenchante (contextualisation) ;
- qui organise le travail des élèves en relative autonomie ;
- qui introduit les connaissances par petites touches ;
- qui mobilise le plus de connaissances possibles des élèves : connaissances de mathématiques, connaissances des chapitres précédents, connaissances utiles pour les chapitres suivants, culture générale. Plus une notion est largement couverte, plus elle risque de « faire sens », d'intéresser et de motiver son apprentissage.

De plus, l'idéal est que le texte ait été enrichi de commentaires qui justifient les choix faits par le rédacteur du texte, et qui décrivent ce que des élèves font avec un tel texte d'activité. Ces deux points aident beaucoup un autre enseignant qui souhaiterait s'appropriier le texte.

Les activités proposées par les manuels scolaires répondent rarement à ces critères par manque de place. Pour trouver de bons textes, vous pouvez vous rendre sur internet (par exemple les travaux du groupe SESAMES). Cet ouvrage en propose, en espérant qu'ils rencontreront leur public.

Les règles de sécurité au laboratoire de chimie

Introduction

Le travail en laboratoire de chimie requiert parfois le montage de dispositifs complexes, l'exécution d'opérations délicates ainsi que la manipulation de produits dangereux. L'accomplissement de travaux peut alors être à l'origine d'incidents ou d'accidents avec des effets instantanés ou plus insidieux. Chacun, élève, étudiant, enseignant, personnel de laboratoire, doit avoir conscience des risques encourus par sa seule présence dans le laboratoire, dans le but de protéger les autres et soi-même.

Mots-clés

Risque/Hazard, Sécurité/Prudence, règles de sécurité, ports de gants ou pas, règle CLP, système SGH, classes de dangers, INRS, CMR, étiquette, pictogrammes.

Plan

- 1 Une affaire de bon sens
- 2 S'informer
- 3 Pictogrammes de danger

1 Une affaire de bon sens

La sécurité au laboratoire est une affaire de bon sens dans la plupart des situations.

Pour toute manipulation de chimie, il est obligatoire de porter une **blouse en coton, boutonnée et à manches longues** ainsi, qu'à tout instant, **des lunettes de sécurité**. Le port de gants n'est pas automatique : c'est à l'expérimentateur de les utiliser à bon escient en regardant notamment les pictogrammes de sécurité. Les **cheveux longs** doivent être **attachés** et le port de shorts, jupes et sandales est proscrit. Il est enfin formellement interdit de boire, manger ou fumer dans les zones de manipulation du laboratoire.

Les indications portées ici peuvent être compliquées à faire appliquer dans certains établissements. Il faut se rappeler que l'enseignant engage sa responsabilité personnelle si ses élèves ont un accident. Cela ne signifie pas qu'il faut proscrire les manipulations de chimie, mais qu'il faut intégrer la sécurité dans ses choix pédagogiques. La philosophie générale qui doit prévaloir à toute mise en œuvre expérimentale est l'étude du

rapport « gain pédagogique/risque encouru ». Ce rapport est grand avec de nombreuses expériences simples, mais souvent petit avec des expériences spectaculaires.

Les principales règles de sécurité sont :

- ne pas courir, se presser inutilement et se bousculer ;
- respecter l'organisation du laboratoire et n'encombrer ni les paillasses, ni les zones de circulation, en particulier avec les manteaux et les sacs ;
- ne pas accéder à une zone réglementée sans autorisation (armoire électrique, zone de stockage de produits chimiques, etc.) ;
- ne pas porter de lentilles de contact. Si une projection dans l'œil se produit, la solution migrera par capillarité entre l'œil et la lentille et l'œil ne pourra être lavé efficacement. Douleur garantie ;
- porter des gants de sécurité adaptés à la manipulation à effectuer : gants fins en latex¹ ou en vinyle pour l'usage de solutions aqueuses concentrées, gants en nitrile pour l'usage de solvants organiques, gants anti-chaleur pour toucher la verrerie chaude (dès 45 °C). Aucune règle générale ne définit la concentration limite pour le port des gants. Chaque établissement fixe ses règles. Une règle simple telle que : « à partir de 1 mol/L, le port des gants est obligatoire », se mémorise bien.
- ne pas toucher des objets tels que poignées de portes, clavier d'ordinateur... avec des gants, qu'ils soient propres, contaminés ou susceptibles de l'être ;
- ne pas porter les mêmes gants du début à la fin d'une longue séance expérimentale afin de laisser respirer la peau ; par ailleurs, les gants souillés doivent être retirés et changés.
- ne pas porter de gants, à part les gants anti-chaleur, à proximité d'une source de chaleur importante (flamme, plaque chaude) ;
- ne pas pipeter directement à la bouche. Utiliser des systèmes mécaniques de pipetage (après avoir versé au préalable un échantillon du produit commercial dans un bécher dit de transfert) ;
- ne pas utiliser de verrerie fendue ou ébréchée ;
- ne pas procéder à l'examen olfactif d'un produit ;
- les tubes à essais destinés à être chauffés doivent être remplis au plus au tiers, tenus avec une pince en bois, et non à la main, et dirigés vers un mur pour éviter qu'une éventuelle projection n'ait de conséquences fâcheuses.
- ne chauffer que la verrerie prévue à cet effet (pyrex...) ; en particulier ne pas chauffer le verre ordinaire, le verre épais ou les cellules de spectrophotométrie dont les faces sont collées ;

1. Attention, certains élèves ou étudiants peuvent être allergiques au latex. Parfois, de jeunes collégiens le découvrent en TP (démangeaisons, rougeurs, papules sur la peau, gonflements...). Cela reste toutefois rare car le latex est contenu dans bien des objets de la vie quotidienne (tétines, ballons, palmes, lunettes de natation, grips de raquettes de tennis...).

- décontaminer les surfaces de travail après chaque manipulation de produits dangereux ou après un renversement accidentel ;
- n'entreposer que les produits nécessaires à la manipulation sur le plan de travail ;
- se laver les mains après une manipulation ;
- connaître et respecter les filières de déchets.

Des **équipements collectifs** sont également mis à disposition dans un laboratoire de chimie :

- des hottes et des sorbonnes permettent de manipuler des produits nocifs ou toxiques par inhalation ; c'est notamment le cas de tous les produits organiques, de l'acide chlorhydrique et de l'ammoniac concentrés et des réactions occasionnant des dégagements gazeux (métal + HNO_3 , sulfure + acide, chlorure + permanganate, etc.) ;
- la hotte n'est pas un dispositif d'élimination qui dispense de gérer la destruction des gaz produits. Tout gaz abondamment produit doit être piégé ou détruit par l'expérimentateur ;
- un rince-œil, voire une douche, peuvent être utilisés en cas de projections importantes / étendues ou ponctuelles. Une fois sous l'eau, il est recommandé d'ôter les habits souillés ; en cas de projection localisée, rincer abondamment la zone atteinte à l'eau pendant au moins 15 minutes. Si l'œil est atteint (c'est une urgence absolue, d'où la nécessité du port de lunettes pour toute manipulation), rincer au moins 15 minutes à l'eau ou avec un liquide de rinçage en maintenant l'œil ouvert dans l'attente d'être secouru ;
- une couverture anti-feu et un extincteur permettent d'étouffer un feu, sur une personne et sur des supports matériels respectivement ;
- un téléphone permet d'appeler les secours (15 pour un avis médical, 18 pour les pompiers) avec lesquels il faut dans l'ordre (1) s'identifier, (2) expliquer où vous êtes et comment vous retrouver, (3) décrire l'accident, (4) préciser le nombre et l'état des victimes, leur âge et autres informations utiles, (5) informer sur la possible persistance du risque, (6) ne pas raccrocher en premier.

2 S'informer

Il est essentiel de s'informer sur les dangers potentiellement encourus avant toute manipulation nouvelle.

2.1 Règlement CLP et système SGH

Le règlement CLP (*Classification, Labelling, Packaging*) définit les règles européennes en matière de classification, d'étiquetage et d'emballage des produits chimiques¹.

1. <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206207>

Applicable aux substances pures depuis 2010 et aux mélanges depuis 2015, il permet la mise en application du SGH (Système Généralisé Harmonisé). Celui-ci définit 28 classes de dangers et 5 familles de conseils de prudence.

2.2 Classes de dangers

Le règlement CLP définit 28 classes de dangers (H : *Hazard*, ce sont les anciennes phrases R) répertoriées en trois grandes familles : (1) dangers physiques (explosible, inflammable, gaz sous pression, matière pyrophorique, mélange auto-échauffant...), (2) dangers pour la santé (toxicité aiguë, irritation cutanée, mutagénicité sur les cellules germinales, danger par aspiration...) et (3) dangers pour l'environnement (danger pour le milieu aquatique, danger pour la couche d'ozone). Les familles (1), (2) et (3) sont respectivement codifiées sur les étiquettes par des mentions de danger H1XX, H2XX et H3XX, les X représentent des chiffres précisant la sous-famille de dangers.

2.3 Familles de conseils de prudence

Cinq grandes familles de conseils de prudence sont également repérées : famille (1) des conseils de prudence généraux (P1XX), famille (2) des conseils de prévention (P2XX), famille (3) des conseils d'intervention (P3XX), famille (4) des conseils de stockage (P4XX) et famille (5) des conseils d'élimination (P5XX).

2.4 Étiquettes des produits chimiques

L'étiquetage des produits chimiques dangereux doit, dans le cadre du règlement CLP, comporter :

- le nom du produit chimique ;
- le nom commercial de la substance ;
- le ou les pictogramme(s) de danger associé(s) ;
- la mention principale d'avertissement « Attention » ou « Danger » ;
- les mentions de dangers (H : *Hazard* anciennes phrases R) et conseils de prudence (P : *Prudence*, anciennes phrases S) ;
- la mention « index n° » s'il s'agit d'une substance ;
- des mentions complémentaires codifiées de la façon suivante : « EUH » + « 0 » + 2 chiffres ;
- le nom et les coordonnées du fabricant ou du distributeur.

La taille des étiquettes sur les conditionnements est fonction du volume du contenant. Les fabricants respectent ces règles qui doivent également être appliquées au sein d'un laboratoire quand des produits sont reconditionnés.

Exemple

Le site de l'INRS fournit un exemple de classification selon le règlement CLP dans un extrait de Fiche de Données de Sécurité (FDS) d'un produit chimique.

Tableau 1 Exemple de données de sécurité et signification de certaines informations.

Information	Signification
Flam. Liq.2 ; H225	Flam. signifie très inflammable, et Liq.2 signifie que ce liquide a les caractéristiques suivantes : point d'éclair inférieur à 23 °C et température d'ébullition supérieure à 35 °C.
Carc. 1B ; H350	Carc. signifie cancérogène et 1B précise « supposé cancérogène ».
STOT RE 2 ; H373	2 signifie : toxique pour certains organes spécifiques en cas d'expositions répétées.

Les codes HXXX présents dans le tableau 1 sont largement redondants avec les informations qui les précèdent dans l'étiquetage. Ces fiches FDS sont reçues à chaque commande de produit chimique passée auprès d'un fournisseur.

3 Pictogrammes de danger

Prescrits par le règlement CLP et issus du SGH, les pictogrammes de danger sont au nombre de 9 (tableau 2). Ils font apparaître un symbole en noir sur fond blanc dans un cadre rouge suffisamment épais pour être clairement visible. Chaque pictogramme est répertorié sous un code dont le type est : « SGH » + « 0 » + 1 chiffre.

<http://www.inrs.fr/risques/classification-etiquetage-produits-chimiques/comprendre-systemes-etiquetage-produits-chimiques.html>

				
Explosif SGH01	Inflammable SGH02	Comburant SGH03	Gaz sous pression SGH04	Corrosif SGH05
				
Toxique SGH06	Toxique, irritant, sensibilisant, narcotique SGH07	Sensibilisant, CMR SGH08	Dangereux pour l'environ- nement SGH09	

Tableau 2 Tableau des CMR : <http://www.inrs.fr/actualites/tableau-cmr.html>

Notations utilisées dans l'ouvrage

Introduction

Les enseignants utilisent à juste titre des notations précises. L'impact pédagogique d'une notation peut en effet être déterminant. Ces notations évoluent souvent dans le sens de l'allègement avec le niveau scolaire. Cet ouvrage couvrant les niveaux secondaires et universitaires tout en se souciant de la pédagogie, il a fallu prendre des décisions sur les notations utilisées. Ce chapitre le précise et le justifie.

1 Écriture des valeurs numériques

Nous avons apporté une attention particulière à l'écriture des valeurs numériques, en particulier au nombre de chiffres significatifs. Les règles générales ci-dessous ont été appliquées.

Les nombres entiers peuvent :

- indiquer une précision infinie, par exemple s'il s'agit de nombres stœchiométriques ;
- signifier une valeur approximative. Par exemple, une solution tampon de $pH = 9$ indique que la solution doit être un tampon, mais que sa valeur importe peu si elle est proche de 9. Dans le cas où la valeur approximative ne peut être exprimée avec un nombre entier, le signe $\approx$ est utilisé. C'est le cas de la concentration d'un acide à titrer. La valeur n'est pas connue, puisqu'il faut la trouver, mais l'expérimentateur a besoin d'en avoir une idée pour choisir la concentration du réactif titrant. Nous le notons alors : $C_A \approx 5.10^{-2} \text{ mol/L}$;
- être utilisés pour nommer de la verrerie : bécher de 150 mL, pipette de 5 mL. Cela ne signifie pas que le volume du bécher est connu avec trois chiffres significatifs et que celui de la pipette est connu avec un seul. La précision sur ces valeurs est donnée par le constructeur.

Pour les autres valeurs numériques, la précision sur une valeur numérique est d'une demi-unité du dernier chiffre exprimé, comme cela a été détaillé dans le chapitre 6 dévolu à la précision.

2 Notations

2.1 Constantes

Sauf mention contraire, les constantes d'équilibre (K , K_A , K_s et donc les solubilités) sont données à 25 °C. Ce n'est pas rappelé en permanence dans l'ouvrage.

Les potentiels d'électrodes sont donnés par rapport à l'électrode normale à hydrogène, sauf si c'est précisé, par exemple $E^\circ(\text{H}^+(\text{aq})/\text{H}_2) = -0,24 \text{ V/ECS}$.

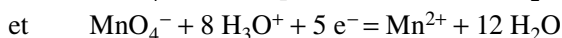
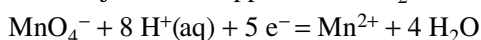
Les valeurs numériques des constantes d'équilibre sont données avec un nombre variable de chiffres après la virgule (voir le chapitre 6 Précision sur les valeurs numériques). Il arrive également que seul l'ordre de grandeur soit donné, en particulier pour une discussion qualitative.

2.2 États de la matière

Les états de la matière : (s), (l), (g) et (aq) ne sont précisés que si c'est essentiel (par exemple dans les chapitres de thermodynamique), ou pour donner une information utile à la compréhension.

Nous assimilons toujours l'activité à la concentration. Tant que les concentrations sont inférieures à 10^{-2} mol/L , l'erreur est infime. Ce n'est pas le cas pour les valeurs plus grande ; par exemple, autour de $0,1 \text{ mol/L}$, une expression comme $E = E^\circ + 0,03 \log[\text{Cu}^{2+}]$ ne permet pas de rendre compte de la valeur expérimentale.

Nous utilisons indifféremment $\text{H}^+(\text{aq})$ ou H_3O^+ pour désigner la forme hydratée de H^+ en solution aqueuse. L'usage veut qu'on ne le note pas H^+ . La notation $\text{H}^+(\text{aq})$ est préférable à H_3O^+ pour ajuster la stœchiométrie des équations d'oxydo-réduction ; cela évite d'avoir à ajouter un supplément de H_2O . Par exemple, comparez :



2.3 Graphe

Nous notons, dans les graphes et les tableaux, les unités de la façon suivante, par exemple pour le temps : t / s pour indiquer que la variable t est en seconde. L'origine de cette notation est la suivante :

$$t = 10 \text{ s soit en "divisant par s"} \frac{t}{\text{s}} = 10$$

2.4 L'indice éq

Nous réservons l'indice éq pour signifier une grandeur à l'équivalence d'un titrage. Les grandeurs à l'équilibre sont indicées par f (comme final) quand cela est nécessaire pour la compréhension. Les calculs de concentration en solution aqueuse étant toujours faits à l'équilibre, nous avons souvent supprimé cet indice pour alléger l'écriture. Avec des élèves de Terminale, il est recommandé de ne pas se permettre cette suppression.

2.5 Concentration

En Première S, l'introduction de la notion de concentration en soluté apporté distincte de la notion de concentration des ions en solution conduit à noter C ou C_{CaCl_2} la concentration en soluté apporté, à la différence de $[\text{Ca}^{2+}]$ et de $[\text{Cl}^-]$. Cela distingue bien les deux notions. Une fois que cette notion est en place, il est possible, comme nous le faisons dans cet ouvrage, de noter indifféremment $[\text{H}_3\text{O}^+]$ ou C_A la concentration en ions $\text{H}^+(\text{aq})$.

3 Expérimental

3.1 Utilisation du matériel

Nous n'avons pas consacré de chapitre sur l'utilisation du matériel de chimie, ce type d'information étant réparti expérience après expérience.

3.2 pH-mètre

Nous parlons souvent du pH-mètre et de ses électrodes, alors que dans de nombreux lycées, les laboratoires sont équipés d'une électrode combinée. Celle-ci, souvent appelée pudiquement « sonde de *pH* » est en fait constituée de deux électrodes au sens électrochimique du terme.

3.3 Complexes

La formation des aminocomplexes, par exemple $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ ou $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$, se déroule toujours par étapes et les complexes avec 1, 2, 3... ligands NH_3 se forment en fonction de la quantité de ligands ajoutée. Nous ne les évoquerons pas sauf si c'est l'objet de l'expérience. En effet, en présence d'un excès d'ammoniac, il se forme toujours le complexe avec un maximum de ligands.

L'écriture des symboles des complexes est normalisée, le métal et ses ligands doivent être entre crochets comme ci-dessus : $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$; la concentration d'un tel complexe devrait donc être écrite $[[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}]$. Quand il n'y a pas d'ambiguïté, nous avons pris la liberté de supprimer un niveau de crochet.

3.4 Ammoniac ou Ammoniaque ?

Traditionnellement, le terme ammoniac est utilisé pour NH_3 et ammoniaque pour sa solution aqueuse. Nous avons préféré le terme solution aqueuse d'ammoniac au terme ammoniaque, afin de n'avoir qu'un seul terme. Cela est en accord avec l'appellation habituelle des solutions : solution de glucose, solution de chlorure de sodium etc.

4 Références

Nous évoquons régulièrement des difficultés ou des erreurs classiques d'élèves. Il s'agit souvent d'erreurs qui ont été publiées dans les travaux de didactique. Nous n'alourdissons pas l'ouvrage en mentionnant les références de ces travaux comme nous ferions dans un article de recherche.

Partie 1

Pédagogie

Introduction

L'une des originalités de cet ouvrage est de proposer, en même temps qu'une approche expérimentale de la chimie, une réflexion pédagogique utile pour les enseignants en exercice et les candidats aux concours d'enseignement. Des commentaires pédagogiques sont répartis dans les différents chapitres, mais des notions générales ont aussi été regroupées dans cette partie. Elles sont de natures différentes. Les trois premières traitent de l'organisation de l'enseignement : comment construire une séquence d'enseignement, une situation déclenchante, une démarche d'investigation. L'institution attend désormais que l'enseignement soit structuré autour de ces notions. Le quatrième chapitre présente un point de vue sur la modélisation en chimie. Expliciter la notion de modèle est important en chimie car cette discipline n'est pas faite que de réactions chimiques et de structure de la matière, mais également de modèles. Les utiliser sans jamais en parler est dommage. Le cinquième chapitre traite de la définition des concepts. Le sixième détaille une notion de plus en plus importante dans l'enseignement : la précision des données numériques. Le septième présente la notion de carte mentale. Il en sera largement question dans cet ouvrage. Finalement, le huitième et dernier chapitre de cette partie présente la notion de zone proximale de développement qui est utile pour comprendre le fonctionnement cognitif des élèves et pour mieux organiser son enseignement.

Construction d'une séquence d'enseignement

Introduction

La notion de séquence d'enseignement est analysée dans ce chapitre, avec les différentes phases qui la structurent. Une telle séquence (aussi appelée séquence pédagogique ou séquence didactique) enchaîne un ensemble d'activités sur plusieurs séances. Le professeur l'organise pour sa classe dans le but d'atteindre un objectif préalablement défini. Des critères de qualité d'une séquence d'enseignement sont fournis dans ce chapitre, ils donnent des repères à l'enseignant soucieux de la bonne organisation de sa démarche pédagogique.

Mots-clés

Séquencement, organisation de classe, enseignement inductif/déductif, enseignement spiralaire, phases de l'enseignement, choix pédagogiques et cohérence.

Plan

- 1 Connaissances pédagogiques sur les contenus scientifiques
- 2 Séquence d'enseignement
- 3 Méthode inductive, méthode déductive
- 4 Ce qu'attend le jury
- 5 Phases d'une séquence d'enseignement
- 6 Construction de la séquence
- 7 Cohérence
- 8 En résumé

1 Connaissances pédagogiques sur les contenus scientifiques

Avant d'aborder la notion de séquence d'enseignement, il nous semble important de prendre conscience que l'enseignant doit avoir des connaissances pédagogiques spécifiques aux contenus qu'il enseigne. Pour comprendre ce que cela signifie, comparons, par exemple, dans le cas de la chimie organique, la différence entre ce que sait un professeur, par rapport à un ingénieur chimiste ou un chercheur dans ce domaine. Le contenu disciplinaire de référence (la chimie organique dans notre exemple) est le même, plus ou

moins poussé suivant le métier. En revanche, le professeur doit avoir des connaissances pédagogiques concernant ce contenu, comme par exemple :

- les notions de chimie organique des programmes des différentes classes ;
- les difficultés des élèves dans ce domaine ;
- les bons exemples, qui permettent de mieux comprendre et ceux qu'il faut éviter car ils embrouillent les élèves ;
- le temps qu'il faut passer sur chaque notion pour que les élèves ne soient ni submergés par un enseignement trop rapide, ni ennuyés par un enseignement trop lent ;
- les possibilités de séquençement dans l'introduction des contenus ;
- etc.

Autant d'informations qui ne sont utiles ni à l'ingénieur, ni au chercheur.

Lorsqu'un candidat passe un concours d'enseignement, le jury vérifie qu'il a les deux types de connaissances : celles sur le contenu disciplinaire et les connaissances pédagogiques sur ce contenu. Cet ouvrage tente d'articuler les deux.

2 Séquence d'enseignement

Le savoir scientifique peut être vu comme un réseau cohérent de connaissances qui forment un tout. L'enseignant n'aborde pas l'ensemble de ce savoir avec ses élèves ; par nature, il segmente son enseignement heure de cours après heure de cours. Construire une séquence d'enseignement, c'est passer de l'ensemble du savoir à la suite des segments. Pour cela, le professeur de physique-chimie utilise les connaissances pédagogiques qu'il possède sur ce savoir. Il peut jouer sur plusieurs paramètres d'organisation de sa classe :

- classe entière ou en demi-classe,
- séance avec des objets de laboratoire (burette, ballon tricol, pH-mètre...), au tableau, avec un ordinateur, etc.

Le professeur dispose aussi de nombreuses méthodes pédagogiques : TP, cours, TP-cours, démarche d'investigation, démarche scientifique, activités documentaires, exercices simples, tâches complexes, résolution de problèmes scientifiques... Réformes après réformes, ces méthodes s'empilent. Elles servent de repères pour décrire une séquence d'enseignement. Le candidat au concours doit donc connaître ces termes et avoir une idée de ce à quoi ils correspondent.

3 Méthode inductive, méthode déductive

Il convient également de choisir parmi les deux possibilités d'introduction de la connaissance : la méthode déductive ou la méthode inductive.