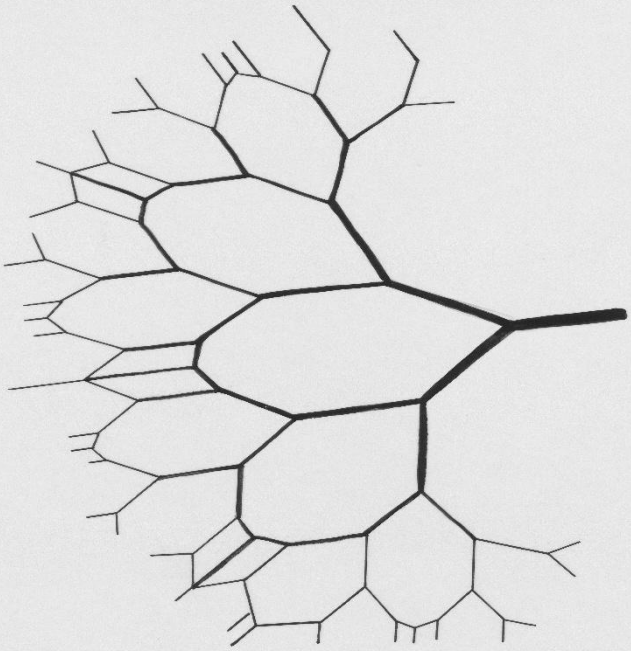
CHIMIE



CONFORME
AU PROGRAMME
NATIONAL

3ème Année

DES
HUMANITÉS

EDITION
2025



TABLE DE MATIERE

PRÉLIMINAIRES 1

1. Objectifs généraux du cours 1
   - 1.1. Maîtrise approfondie des théories contemporaines 1
   - 1.2. Expertise en techniques instrumentales avancées 1
   - 1.3. Préparation aux exigences de l'enseignement supérieur 2
2. Compétences visées 2
   - 2.1. Analyse critique et modélisation moléculaire 2
   - 2.2. Interprétation de données complexes 2
   - 2.3. Conception de protocoles et évaluation de la durabilité 3
3. Rappels essentiels des années précédentes 3
   - 3.1. Thermodynamique chimique et équilibres 3
   - 3.2. Cinétique chimique et mécanismes de base 4
   - 3.3. Structure atomique et liaisons chimiques 4
4. Normes de sécurité et équipement spécialisé 4
   - 4.1. Gestion des risques chimiques spécifiques 5
   - 4.2. Utilisation et protection des instruments de précision 5
   - 4.3. Éthique de la recherche et propriété intellectuelle 5

1. PROMPT MAÎTRE : "Le Laboratoire de Chimie (Sciences Physiques - RDC)" 9

5. Ce qui a été optimisé pour la Chimie : 11

1.2. Termes atomiques et multiplicité 11
   - 1.2.1. Couplage de Russell-Saunders (L-S) 11
   - 1.2.2. Symboles de terme et multiplicité de spin 12
   - 1.2.3. Détermination de l'état fondamental par les règles de Hund 12

Ressources complémentaires 13
   - Question et Réponses 13
   - Erreurs fréquentes 14
   - Scénarios et Exercices 14

Chapitre 1 : Structure électronique avancée 17
1.1. Couplage spin-orbite et nombres quantiques 17
- 1.1.1. Origine physique et interaction magnétique.....17
- 1.1.2. Le nombre quantique de moment cinétique total J.....18
- 1.1.3. La structure fine des spectres atomiques 18

1.2. Termes atomiques et multiplicité 20
- 1.2.1. Couplage de Russell-Saunders (L-S).....20
- 1.2.2. Symboles de terme et multiplicité de spin 20
- 1.2.3. Détermination de l'état fondamental par les règles de Hund .21

Ressources complémentaires 23
- Question et Réponses.....23
- Erreurs fréquentes 24
- Scénarios et Exercices 24

1.3. États excités et spectres d'émission 26
- 1.3.1. Le mécanisme de l'excitation et de la relaxation 26
- 1.3.2. Règles de sélection et transitions permises.....27

1.4. Effet Zeeman et structure fine 29
- 1.4.1. Action du champ magnétique sur les niveaux d'énergie.....29
- 1.4.2. Quantification spatiale et structure fine 29

Ressources complémentaires 32
- Question et Réponses.....32
- Erreurs fréquentes 33
- Scénarios et Exercices 33

Chapitre 2 : Chimie organométallique 36
2.1. Liaisons métal–carbone.....36
- 2.1.1. Nature et diversité des interactions.....36
- 2.1.2. Le modèle de Dewar-Chatt-Duncanson 37

2.2. Complexes de Wilkinson et catalyseurs homogènes 39
- 2.2.1. Structure et propriétés du catalyseur 39

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- 2.2.2. Le cycle catalytique de l'hydrogénation 39

Ressources complémentaires 42

- Question et Réponses.....42
- Erreurs fréquentes 43
- Scénarios et Exercices 43

2.3. Cyclopentadiényle et métallocènes.....45

- 2.3.1. Structure et liaison dans les complexes sandwich 45
- 2.3.2. Aromaticité et réactivité chimique 46

2.4. Applications industrielles 48

- 2.4.1. Le procédé Monsanto pour l'acide acétique 48
- 2.4.2. Catalyseurs de Ziegler-Natta et polymérisation 48

Ressources complémentaires 51

- Question et Reponses.....51
- Erreurs fréquentes 52
- Scénarios et Exercices 52

Chapitre 3 : Résonance magnétique nucléaire (RMN).....56

3.1. Principe et interactions nucléaires.....56

- 3.1.1. Le spin nucléaire et le moment magnétique 56
- 3.1.2. Précession de Larmor et résonance.....56
- 3.1.3. Les processus de relaxation T1 et T2 57

3.2. Spectres ^{1}H et ^{13}C 59

- 3.2.1. Le déplacement chimique et l'environnement électronique ...59
- 3.2.2. Intégration et multiplicité des signaux.....59
- 3.2.3. Spécificités de la RMN du Carbone-13 60

Ressources complémentaires 62

- Question et Réponses.....62
- Erreurs fréquentes 63
- Scénarios et Exercices 63

3.3. Découplage et corrélation bidimensionnelle 65

- 3.3.1. Le découplage de spin 65
- 3.3.2. La spectroscopie bidimensionnelle (RMN 2D).....66

3.4. Interprétation structurale 68

- 3.4.1. Méthodologie systématique de résolution 68
- 3.4.2. Synthèse des données multidimensionnelles.....68

Ressources complémentaires 71

- Question et Reponses.....71
- Erreurs fréquentes 72
- Scénarios et Exercices 72

Chapitre 4 : Réactions péricycliques.....78

4.1. Cycloadditions de Diels-Alder.....78

- 4.1.1. Mécanisme et théorie des orbitales frontières 78
- 4.1.2. Régiosélectivité et stéréosélectivité 79

4.2. Réarrangements sigmatropiques.....79

- 4.2.1. Les réarrangements de Cope et de Claisen.....79
- 4.2.2. Règles de Woodward-Hoffmann 80

Ressources complémentaires 82

- Question et Reponses.....82
- Erreurs fréquentes 83
- Scénarios et Exercices 83

4.3. Réactions électrocycliques.....85

- 4.3.1. Mécanisme de rotation des orbitales p 85
- 4.3.2. Rationalisation par les règles de Woodward-Hoffmann 86

4.4. Sélectivité régio- et stéréochimique 86

- 4.4.1. Facteurs contrôlant la régiosélectivité 86
- 4.4.2. Maîtrise de la stéréochimie.....87

Ressources complémentaires 89

- Question et Reponses.....89
- Erreurs fréquentes 90

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- Scénarios et Exercices 90

Chapitre 5 : Mécanismes réactionnels en chimie organique 93

5.1. Mécanismes SN1 et SN2.....93

- 5.1.1. La substitution nucléophile bimoléculaire (SN2) 93
- 5.1.2. La substitution nucléophile unimoléculaire (SN1) 94

5.2. Éliminations E1 et E2 97

- 5.2.1. Le mécanisme bimoléculaire E2 97
- 5.2.2. Le mécanisme unimoléculaire E1 98

Ressources complémentaires 100

- Question et Reponses.....100
- Erreurs fréquentes 101
- Scénarios et Exercices 101

5.3. Réactions radicalaires concertées.....103

- 5.3.1. Nature et dynamique des radicaux concertés.....103
- 5.3.2. Importance de l'effet de cage et du solvant.....104

5.4. Réactions acido-catalysées 106

- 5.4.1. Principes de l'activation par les acides.....106
- 5.4.2. Catalyse par les acides de Lewis 107

Ressources complémentaires 109

- Questions et Réponses 109
- Erreurs fréquentes 110
- Scénarios et Exercices 110

Chapitre 6 : Photocatalyse et chimie verte 113

6.1. Mécanismes de transfert d'énergie.....113

- 6.1.1. États électroniques et diagramme de Jablonski.....113
- 6.1.2. Transferts intermoléculaires : Énergie et Électrons.....114

6.2. Catalyse hétérogène par semi-conducteurs 115

- 6.2.1. Théorie des bandes et activation du catalyseur.....115
- 6.2.2. Génération d'espèces radicalaires hautement oxydantes 116

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Ressources complémentaires 118
- Question et Reponses.....118
- Erreurs fréquentes 119
- Scénarios et Exercices 119

6.3. Synthèses photochimiques 121
- 6.3.1. Cycloadditions [2+2] photochimiques 121
- 6.3.2. Réactions de clivage et réarrangements 122

6.4. Principes de la chimie durable 122
- 6.4.1. Analyse des douze principes de la chimie verte.....122
- 6.4.2. Enjeux de l'industrialisation responsable en RDC 123

Ressources complémentaires 125
- Question et Reponses.....125
- Erreurs fréquentes 126
- Scénarios et Exercices 126

Chapitre 7 : Polymères conducteurs et matériaux intelligents 129

7.1. Conjugaison et conduction électrique 129
- 7.1.1. Le fondement structural de la conductivité 129
- 7.1.2. Le processus de dopage.....130
- 7.1.3. Les porteurs de charge : Polarons et bipolarons 130

7.2. Polythiophènes et polyanilines 130
- 7.2.1. La polyaniline (PANI) : Versatilité et synthèse.....131
- 7.2.2. Les polythiophènes (PT) : Stabilité et optoélectronique 131
- 7.2.3. Applications technologiques et matériaux intelligents 132

Ressources complémentaires 134
- Question et Reponses.....134
- Erreurs fréquentes 135
- Scénarios et Exercices 135

Chapitre 8 : Chimie supramoléculaire.....140

8.1. Liaisons non covalentes et auto-assemblage.....140

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- 8.1.1. Émergence de la chimie au-delà de la molécule 140
- 8.1.2. Typologie des interactions intermoléculaires 141
- 8.1.3. Dynamique de l'auto-assemblage 141

8.2. Cyclodextrines et calix[n]arènes 144

- 8.2.1. Les cyclodextrines : des hôtes issus de l'amidon 144
- 8.2.2. Les calix[n]arènes : des coupes moléculaires synthétiques .144

Ressources complémentaires 147

- Question et Reponses.....147
- Erreurs fréquentes 148
- Scénarios et Exercices 148

8.3. Récepteurs et capteurs chimiques.....150

- 8.3.1. Structure et fonctionnement d'un capteur moléculaire.....150

8.4. Systèmes hôtes-invités.....151

- 8.4.1. Complémentarité stérique et électronique 151
- 8.4.2. Le principe de pré-organisation 152

Ressources complémentaires 154

- Question et Reponses.....154
- Erreurs fréquentes 155
- Scénarios et Exercices 155

Chapitre 9 : Chimie des surfaces et matériaux nanoporeux 158

9.1. Adsorption et isothermes 158

- 9.1.1. Physisorption et chimisorption 158
- 9.1.2. Modèles d'isothermes d'adsorption 159

9.2. Zéolithes et MOFs.....159

- 9.2.1. Les zéolithes : tamis moléculaires minéraux 160
- 9.2.2. Les MOFs (Metal-Organic Frameworks) 160

Ressources complémentaires 162

- Question et Reponses.....162
- Erreurs fréquentes 163

- Scénarios et Exercices 163

9.3. Catalyse hétérogène sur surface 165

- 9.3.1. Le rôle des sites actifs et adsorption chimique 165
- 9.3.2. Sélectivité de forme dans les zéolithes 166
- 9.3.3. Conception de sites catalytiques dans les MOFs 166

9.4. Applications en séparation et stockage 166

- 9.4.1. Séparation des gaz et tamisage moléculaire 167
- 9.4.2. Purification de l'eau et décontamination 167
- 9.4.3. Stockage de l'hydrogène et du méthane au lac Kivu 167

Ressources complémentaires 170

- Question et Reponses 170
- Erreurs fréquentes 171
- Scénarios et Exercices 171

Chapitre 10 : Électrochimie avancée 174

10.1. Techniques voltamétriques 174

- 10.1.1. Principes de la voltammétrie cyclique 174
- 10.1.2. Cinétique des transferts d'électrons 174

10.2. Capteurs électrochimiques 175

- 10.2.1. Capteurs ampérométriques et biosenseurs 175
- 10.2.2. Capteurs potentiométriques et électrodes sélectives 176

Ressources complémentaires 178

- Question et Reponses 178
- Erreurs fréquentes 179
- Scénarios et Exercices 179

10.3. Supercondensateurs 181

- 10.3.1. Le mécanisme de la double couche électrique 181
- 10.3.2. Avantages et limites opérationnelles 182

10.4. Batteries à l'état solide 182

- 10.4.1. Architecture et sécurité accrue 182

- 10.4.2. Enjeux pour la filière minérale congolaise 183

Ressources complémentaires 185

- Question et Reponses 185
- Erreurs fréquentes 186
- Scénarios et Exercices 186

ANNEXES ..... a

ANNEXES ..... a

A. Tableaux de constantes et données spectrales i

- A.1. Données de résonance magnétique nucléaire (RMN) i
- A.2. Spectroscopie Infrarouge (IR) ii
- A.3. Constantes physiques fondamentales iii

B. Protocoles expérimentaux standardisés iii

- B.1. Manipulation sous atmosphère inerte iv
- B.2. Protocole de photocatalyse solaire au TiO2 iv
- B.3. Analyse voltamptérométrique d'un effluent minier v

C. Glossaire et abréviations spécialisées vi

- C.1. Acronymes et terminologie de la structure moléculaire vi
- C.2. Lexique des mécanismes et de la réactivité viii
- C.3. Matériaux avancés et chimie durable ix



Conforme au Programme national

PRÉLIMINAIRES

1. Objectifs généraux du cours

Le cours de chimie de la troisième chimie de la troisième année de l'enseignement secondaire, correspondant à la classe de sixième des humanités scientifiques en République Démocratique du Congo, constitue le sommet de la formation scientifique pré-universitaire. Ce programme finalise le parcours de l'élève en lui offrant une vision intégrée de la matière, allant de la mécanique quantique de l'atome à la complexité des systèmes moléculaires industriels. L'ambition est claire : transformer l'apprenant en un analyste capable de comprendre et d'influencer les transformations chimiques qui soutiennent l'économie et le développement technologique du pays.

1.1. Maîtrise approfondie des théories contemporaines

L'enseignement s'éloigne des descriptions simplistes pour introduire les modèles de la chimie moderne. L'élève explore la structure électronique avancée et les interactions intermoléculaires fines. L'objectif consiste à fournir les clés de lecture nécessaires pour interpréter la réactivité chimique non plus comme une liste de recettes, mais comme une conséquence logique des propriétés électroniques et thermodynamiques des molécules. Cette base théorique est indispensable pour aborder les chapitres sur la chimie organométallique ou la chimie supramoléculaire avec l'assurance d'un futur ingénieur ou chercheur.

1.2. Expertise en techniques instrumentales avancées

Le curriculum met un accent particulier sur la chimie analytique moderne. Le passage de la chimie "humide" (éprouvettes et réactifs colorés) vers la chimie instrumentale est un objectif majeur. L'élève apprend à décoder les messages envoyés par les noyaux atomiques ou les liaisons chimiques à travers la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) et la spectroscopie Infrarouge (IR). Cette maîtrise technique prépare les futurs cadres de l'Office Congolais de Contrôle (OCC) ou des laboratoires miniers du Lualaba à garantir la pureté des produits et la conformité des exportations congolaises.

1.3. Préparation aux exigences de l'enseignement supérieur

Ce cours sert de passerelle directe vers les facultés des sciences, de médecine, de polytechnique et d'agronomie. Il impose une rigueur méthodologique et une autonomie de réflexion qui sont les standards des universités de Kinshasa, de Lubumbashi ou de Kisangani. À l'issue de cette année, l'élève doit posséder une maturité scientifique lui permettant de traiter des problèmes complexes sans assistance constante, simulant ainsi l'environnement de recherche et d'études supérieures.

---

2. Compétences visées

Le développement des compétences au cours de cette année terminale se concentre sur l'opérabilité des savoirs. Il ne s'agit plus de mémoriser des définitions, mais de mobiliser des concepts pour résoudre des situations-problèmes concrètes liées aux réalités industrielles et environnementales de la RDC.

2.1. Analyse critique et modélisation moléculaire

L'élève développe la capacité d'analyser des mécanismes réactionnels complexes en décomposant chaque étape du mouvement électronique. Il apprend à utiliser la théorie des orbitales frontières pour prédire si une réaction se produira ou non. Cette compétence de modélisation permet d'anticiper les résultats expérimentaux et de comprendre la sélectivité des réactions chimiques, une aptitude vitale pour la conception de nouveaux matériaux ou de médicaments plus efficaces contre les pathologies locales.

2.2. Interprétation de données complexes

La compétence d'interprétation exige une synthèse intellectuelle de haut niveau. Face à un spectre RMN ou IR, l'élève doit extraire des informations atomiques pour reconstruire mentalement l'architecture d'une molécule inconnue. Cette démarche déductive renforce la pensée logique et la capacité à traiter des données brutes pour en tirer une conclusion scientifique irréfutable. L'élève devient un véritable détective moléculaire, capable

d'identifier un principe actif dans une plante médicinale ou un polluant dans une nappe phréatique.

2.3. Conception de protocoles et évaluation de la durabilité

Le cours vise à rendre l'élève apte à concevoir ses propres démarches expérimentales. Il doit savoir choisir le bon catalyseur, le solvant approprié et les conditions de température idéales pour optimiser une synthèse. Surtout, une nouvelle compétence critique est introduite : l'évaluation de l'impact environnemental. L'apprenant doit être capable d'analyser un procédé chimique sous l'angle de la chimie verte, en privilégiant l'économie d'atomes et l'utilisation de ressources renouvelables, garantissant ainsi que le développement industriel de la RDC ne sacrifie pas son patrimoine naturel unique.

---

3. Rappels essentiels des années précédentes

L'accès aux concepts avancés de la troisième année nécessite une fondation solide sur les acquis des classes de première et deuxième années des humanités scientifiques. Une révision systématique des points suivants est impérative pour éviter toute rupture dans la progression cognitive.

3.1. Thermodynamique chimique et équilibres

La maîtrise des fonctions d'état est un préalable non négociable. L'élève doit se remémorer les concepts suivants :

- **L'Enthalpie (H)** : Elle définit si une réaction dégage de la chaleur (exothermique) ou en absorbe (endothermique).
- **L'Entropie (S)** : Elle mesure le degré de désordre d'un système.
- **L'Énergie libre de Gibbs (G)** : Le signe de ΔG détermine la spontanéité d'une réaction chimique ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$).
- **Les équilibres chimiques** : La loi de Guldberg et Waage et le principe de Le Chatelier permettent de prédire le déplacement d'un équilibre sous l'influence de la pression, de la température ou de la concentration.

3.2. Cinétique chimique et mécanismes de base

La compréhension de la vitesse de réaction est la base sur laquelle s'appuiera l'étude des mécanismes réactionnels plus complexes.

- **L'équation de vitesse** : La forme $v = k[A]^a[B]^b$ doit être parfaitement comprise, incluant la notion d'ordre de réaction.
- **L'énergie d'activation (E_a)** : Le concept de barrière énergétique que les réactifs doivent franchir pour se transformer est essentiel pour aborder la catalyse.
- **Mécanismes de base** : Les notions d'intermédiaires réactionnels et d'étapes limitantes sont des prérequis pour l'étude approfondie des substitutions et éliminations.

3.3. Structure atomique et liaisons chimiques

Une vision claire de l'atome est indispensable pour comprendre la chimie quantique avancée.

- **Configurations électroniques** : La maîtrise des orbitales s, p, d, f et des règles de remplissage (Klechkowski, Pauli, Hund) est fondamentale.
- **Hybridation des orbitales** : L'élève doit savoir identifier les types d'hybridation (sp, sp^2, sp^3) pour prédire la géométrie des molécules organiques.
- **Polarité et forces intermoléculaires** : La compréhension des liaisons hydrogène et des forces de Van der Waals est le socle de la chimie supramoléculaire.

---

4. Normes de sécurité et équipement spécialisé

Le niveau technique des manipulations cette année exige une discipline de laboratoire absolue. L'utilisation de réactifs de haute réactivité et d'instruments sophistiqués ne laisse aucune place à l'improvisation. La sécurité est ici traitée comme une composante intégrante de la compétence scientifique.

4.1. Gestion des risques chimiques spécifiques

L'introduction de la chimie organométallique expose l'élève à des réactifs pyrophoriques ou extrêmement sensibles à l'humidité.

- **Manipulation des organométalliques** : Ces substances peuvent s'enflammer spontanément à l'air. Leur manipulation impose l'utilisation de verrerie spécifique (Schlenk) et de gaz inertes comme l'azote ou l'argon.
- **Solvants anhydres** : L'utilisation de solvants totalement exempts d'eau est requise. L'élève apprend les techniques de distillation sous atmosphère contrôlée et l'utilisation de desséchants puissants.
- **Équipement de Protection Individuelle (EPI)** : Le port de la blouse en coton, des lunettes de protection et de gants adaptés à la nature des solvants est obligatoire et contrôlé rigoureusement.

4.2. Utilisation et protection des instruments de précision

Le laboratoire moderne utilise des appareils dont le coût et la sensibilité exigent un soin particulier.

- **Spectromètres RMN et IR** : Ces appareils utilisent des aimants supraconducteurs ou des sources laser. L'élève doit respecter les zones de sécurité magnétique (interdiction d'objets métalliques à proximité) et les protocoles de nettoyage des cellules de mesure pour éviter toute contamination des spectres.
- **Cellules électrochimiques** : La manipulation des électrodes de travail, de référence et auxiliaire nécessite une attention constante pour éviter les chocs électriques ou la dégradation des surfaces actives par des dépôts irréversibles.

4.3. Éthique de la recherche et propriété intellectuelle

La formation du futur scientifique congolais inclut une dimension éthique forte.

- **Gestion des données** : L'honnêteté scientifique impose de rapporter les résultats tels qu'ils sont observés, sans modification pour les faire correspondre à la théorie. Le carnet de laboratoire est un document juridique et scientifique qui doit être tenu avec une précision chronologique stricte.

- **Propriété intellectuelle** : Dans un pays doté d'une biodiversité immense, l'élève est sensibilisé à la protection des découvertes. La connaissance des brevets et du respect des savoirs traditionnels lors de l'étude des substances naturelles est un enjeu de souveraineté pour la République Démocratique du Congo.
- **Élimination des déchets** : Le respect de l'environnement immédiat passe par un tri sélectif des résidus chimiques. Les métaux lourds, les solvants chlorés et les acides doivent être neutralisés ou stockés selon les normes environnementales, proscrivant tout rejet direct dans les éviers du laboratoire.

À la fin de ces préliminaires, l'élève est prêt à aborder le premier chapitre sur la structure électronique avancée. Souhaitez-vous que je développe les fiches de sécurité spécifiques pour les métaux de transition couramment utilisés dans nos laboratoires ?

Éditions Donel C.
Direction Éditoriale et Conception Générale :
MURHULA BAZIKANGE M.
Pour contacts, mon site web :
https://murhulabazikange.com/

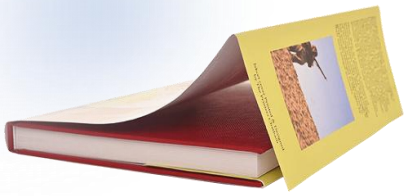
© 2025, Donel Consulting, Kin. RDC
Tous droits réservés.

Pour l'excellence de l'éducation en RDC,
Tous les manuels scolaires en un seul endroit,
sur ce site web :
https://manuels-scolaires-rdc.com/

Pour plus de détails, scannez ceci :

PARTIE I

CHIMIE THÉORIQUE ET STRUCTURALE



C'est noté. En tant qu'**OPTIMISEER**, je vais transformer cette structure "Économique" en une architecture robuste pour la **Chimie**.
Ici, on remplace les flux monétaires par les **réactions chimiques** et les agents économiques par des **atomes et de la verrerie**. On garde la rigueur pédagogique pour les élèves du secondaire en RDC, mais avec une précision moléculaire.

---

1. PROMPT MAÎTRE : "Le Laboratoire de Chimie (Sciences Physiques - RDC)"

RÔLE ET OBJECTIF :
Agis en tant qu'Illustrateur Scientifique et Designer d'Information pour les manuels scolaires de Chimie (Secondaire et Humanités Scientifiques) en RDC. Ta mission est de générer une planche pédagogique au format A4 Vertical. Tu dois synthétiser trois niveaux de lecture :

2. **Le Système Chimique** (Montages de laboratoire, réacteurs, solutions, mélanges).
3. **L'Abstraction Moléculaire** (Équations équilibrées, structures atomiques, modèles de Lewis, orbitales).
4. **L'Identité Minérale Congolaise** (Cuivre, Cobalt, Or, traitement des minerais locaux, raffinage).

STYLE VISUEL : "INFOGRAPHIE SCIENTIFIQUE ÉPURÉE"

- **Le Rendu :** Style "Labo Pro & Minimaliste". Utilise des lignes claires pour la verrerie (béchers, éprouvettes) avec un effet de transparence. Les molécules doivent utiliser le style "Ball-and-Stick" (boules et bâtonnets) pour une lecture structurelle parfaite.
- **Gestion de l'Abstraction (CRITIQUE) :** On visualise la transformation de la matière. Tu dois distinguer :
  - **Le Niveau Macroscopique :** Ce que l'on voit (un précipité bleu, une effervescence, un changement de couleur).
  - **Le Niveau Microscopique :** Ce qui se passe (ions qui s'entrechoquent, liaisons qui se cassent, échange d'électrons).
- **Le Fond :** STRICTEMENT BLANC (#FFFFFF). Aucun décor parasite. L'aspect doit être celui d'une planche d'encyclopédie moderne.

PALETTE DE COULEURS (Conventions Internationales CPK) :

- **Atomes :** Carbone (Gris/Noir), Oxygène (Rouge), Hydrogène (Blanc), Azote (Bleu), Soufre (Jaune).
- **Métaux RDC :** Cuivre (Orange métallique), Cobalt (Bleu profond), Or (Jaune brillant).
- **Indicateurs :** Utilise les couleurs réelles des tests chimiques (ex: Bleu de méthylène, Rose pour la phénolphtaléine en milieu basique).

COMPOSITION ET CONTENU (Hiérarchie Visuelle) :

1. **LE SUJET CENTRAL (La Réaction ou la Structure)**
   - Au centre, représente l'élément moteur.

- *Cas "Électrolyse" :* Une cuve avec deux électrodes, des ions Cu^{2+} migrant vers la cathode.
- *Cas "Synthèse Organique" :* Un montage à reflux (chauffe-ballon, colonne de Vigreux) avec des flèches indiquant le cycle de vaporisation/condensation.
- *Cas "Tableau Périodique" :* Un focus sur une famille chimique avec les électrons de valence mis en évidence.

2. **LE FACTEUR HUMAIN (L'Élève-Chimiste RDC)**
   - Intègre un(e) élève (15-19 ans) en posture de manipulation précise.
   - **Code Vestimentaire (SÉCURITÉ STRICTE) :**
     - **Base :** Blouse blanche de laboratoire, propre, boutonnée.
     - **Accessoires :** Lunettes de protection transparentes sur les yeux.
   - **Gestuelle de Précision :**
     - L'élève manipule une pipette avec une poire aspirante.
     - L'élève observe une burette graduée au niveau des yeux pour lire le ménisque.
   - **Visage :** Traits congolais authentiques. Expression de concentration, de rigueur et de respect du protocole sécuritaire.
3. **LES SATELLITES PÉDAGOGIQUES (Formules et Symboles)**
   - **Symboles de Danger :** Utilise les pictogrammes SGH (Corrosif, Inflammable, Toxique) si nécessaire.
   - **Équations Chimiques :** Affiche des équations parfaitement équilibrées (ex: $Cu + 2AgNO_3 \rightarrow Cu(NO_3)_2 + 2Ag$) en typographie scientifique.
   - **Flèches de Transfert :** Flèches courbes pour les mécanismes réactionnels (déplacement d'électrons).

TEXTE ET LÉGENDES (Vocabulaire Technique) :

- Le titre est formel (ex: "Oxydoréduction du Cuivre", "Liaisons Covalentes", "La Mole et les Quantités de Matière").
- **Labels :** Termes précis ("Réactif", "Produit", "Catalyseur", "Stœchiométrie").
- **Typographie :** Police sans-serif mathématique (type CMU Sans ou Helvetica), style "Publication de Recherche".

DIRECTIVES DE GÉNÉRATION (Réalisme Contextuel) :

- **Contexte RDC :** Priorise les exemples de la métallurgie du Katanga ou de la chimie des produits naturels locaux (ex: extraction d'huiles essentielles, savonnerie artisanale).
- **Logique Moléculaire :** Ne génère pas de molécules "fantaisistes". Si c'est du méthane, c'est un tétraèdre CH_4.

- **Propreté :** Pas de fumées épaisses cartoon ou de potions magiques. C'est de la science exacte.

---

5. Ce qui a été optimisé pour la Chimie :

- **Sécurité Laborantine :** Contrairement à l'économie, ici la tenue est cruciale (Blouse + Lunettes). L'IA est forcée de respecter les normes de sécurité.
- **Standard CPK :** Les couleurs des atomes respectent les conventions mondiales pour éviter les erreurs d'apprentissage.
- **Double Échelle :** Le prompt force l'IA à montrer simultanément le bécher (macro) et la molécule (micro), clé de la compréhension en chimie.
- **Contextualisation Minière :** On utilise le patrimoine minéral de la RDC pour illustrer les réactions de réduction et d'oxydation.

Souhaites-tu que je décline cette structure pour un cours de **Biologie Cellulaire** ou de **Physique-Mécanique** ?

1.2. Termes atomiques et multiplicité

Dans un atome polyélectronique, les interactions entre les différents électrons rendent la description de la structure électronique complexe. Les électrons interagissent par répulsion électrostatique et par couplage de leurs moments cinétiques respectifs. Pour caractériser globalement l'état énergétique de l'atome, les chimistes utilisent des symboles de terme atomique. Cette notation synthétise les informations relatives au moment cinétique orbital total, à la multiplicité de spin et au moment cinétique total du système.

1.2.1. Couplage de Russell-Saunders (L-S)

Le couplage de Russell-Saunders est le modèle dominant pour les atomes légers et les éléments de la première série de transition, comme le cuivre extrait dans le Haut-Katanga. Ce modèle suppose que les moments cinétiques orbitaux individuels se couplent pour former un moment orbital total L, et que les spins individuels se couplent pour former un spin total S. Le moment cinétique total J est ensuite dérivé de l'interaction entre L et S.

1.2.1.1. Calcul des nombres quantiques totaux

La détermination des états possibles nécessite de sommer les contributions de chaque électron de la couche de valence. Les électrons des couches internes complètes ont une contribution nulle aux moments cinétiques totaux.

- $L = \sum l_i$: définit la lettre du terme (0=S, 1=P, 2=D, 3=F).
- $S = \sum s_i$: définit la multiplicité de spin ($2S + 1$).

- J : varie de $|L - S|$ à $L + S$.

1.2.2. Symboles de terme et multiplicité de spin

Le symbole de terme atomique s'écrit sous la forme `^{2S+1}L_J`. L'exposant $2S + 1$ représente la multiplicité de spin. Elle indique le nombre d'orientations possibles du spin total dans un champ magnétique. Un état avec une multiplicité de 1 est appelé singulet, 2 est un doublet, et 3 est un triplet. La multiplicité est un indicateur clé de la stabilité et des propriétés magnétiques de l'élément chimique.

1.2.2.1. Signification physique de la multiplicité

La multiplicité de spin influence directement l'énergie de l'atome à cause de l'échange électronique. Les électrons de même spin ont tendance à s'éviter davantage que ceux de spins opposés, ce qui réduit la répulsion coulombienne. Par conséquent, un état de haute multiplicité possède généralement une énergie plus basse.

1.2.3. Détermination de l'état fondamental par les règles de Hund

Friedrich Hund a établi des règles empiriques permettant de classer les termes atomiques par ordre d'énergie croissante. Ces règles sont essentielles pour les ingénieurs métallurgistes qui étudient les propriétés électroniques du cobalt ou du germanium, car elles définissent l'état le plus stable de l'atome, appelé état fondamental.

1.2.3.1. Application séquentielle des règles de Hund

L'application de ces règles doit suivre un ordre précis pour garantir l'exactitude du résultat.

1. **Règle de la multiplicité maximale** : Le terme possédant la plus grande valeur de S (la plus grande multiplicité) possède l'énergie la plus basse.
2. **Règle du moment orbital maximal** : Pour une multiplicité donnée, le terme ayant la plus grande valeur de L est le plus stable.
3. **Règle du moment cinétique total** : Pour les sous-couches moins qu'à moitié remplies, la valeur de J la plus petite est la plus stable. Pour les sous-couches plus qu'à moitié remplies, la valeur de J la plus grande est la plus stable.

1.2.3.2. Exemple de l'atome de carbone

L'atome de carbone possède une configuration de valence $2p^2$. L'analyse des micro-états permet de trouver plusieurs termes possibles, tels que `^1D`, `^3P` et `^1S`. En appliquant la première règle de Hund, le terme triplet `^3P` est identifié comme le plus stable car sa multiplicité est supérieure à celle des singulets. Comme la sous-couche $2p$ est moins qu'à moitié remplie (2 électrons sur 6 possibles), la troisième règle désigne le niveau `^3P_0` comme l'état fondamental absolu.

Ressources complémentaires

Question et Réponses

Quelle est la différence fondamentale entre le moment cinétique orbital et le spin de l'électron ?

Le moment cinétique orbital résulte du mouvement de l'électron dans l'espace autour du noyau, dépendant de la forme de l'orbitale. Le spin est une propriété intrinsèque de l'électron, comparable à une rotation interne, dont la valeur est fixe et indépendante du mouvement spatial de la particule.

Pourquoi le couplage spin-orbite est-il plus important pour les éléments lourds comme l'uranium que pour l'oxygène ?

L'intensité du couplage spin-orbite dépend de la force du champ électrique nucléaire. Les éléments lourds possèdent un noyau très chargé qui attire fortement les électrons et augmente leur vitesse relativiste, ce qui amplifie l'interaction magnétique entre le spin et le mouvement orbital.

Comment la multiplicité de spin influence-t-elle les propriétés magnétiques d'un matériau ?

La multiplicité de spin est directement liée au nombre d'électrons non appariés dans l'atome. Un matériau composé d'atomes ayant une multiplicité élevée, comme certains sels de manganèse, présente un paramagnétisme marqué, car les spins non appariés s'orientent en présence d'un champ magnétique externe.

À quoi sert la notation des termes atomiques dans la pratique industrielle ?

Cette notation permet de prédire les transitions électroniques autorisées lors d'analyses par spectroscopie d'absorption ou d'émission. Dans les industries minières, elle est indispensable pour calibrer les appareils qui mesurent la concentration des métaux précieux en analysant la lumière qu'ils émettent.

Erreurs fréquentes

1. Confondre le nombre quantique secondaire l avec le moment cinétique orbital total L. Le premier concerne un seul électron tandis que le second représente la somme vectorielle de tous les électrons de valence.
2. Additionner les valeurs de J de manière arithmétique simple. La détermination de J doit toujours respecter la règle des vecteurs, en considérant toutes les valeurs entières entre la différence et la somme de L et S.
3. Oublier l'influence du remplissage de la sous-couche lors de l'application de la troisième règle de Hund. L'état de stabilité de J s'inverse selon que la sous-couche est remplie à moins ou plus de 50 %.
4. Appliquer le couplage de Russell-Saunders aux atomes très lourds. Pour ces derniers, le couplage $j-j$ est plus approprié car l'interaction spin-orbite individuelle devient supérieure aux interactions électrostatiques entre électrons.

Scénarios et Exercices

Calcul du terme fondamental de l'azote

L'azote ($Z=7$) possède la configuration électronique $1s^2 2s^2 2p^3$. Les trois électrons de la sous-couche $2p$ occupent chacun une orbitale différente avec des spins parallèles pour minimiser les répulsions.

1. Calculez le spin total S et la multiplicité $2S+1$.
2. Déterminez le moment cinétique orbital total L.
3. Déduisez le symbole de terme atomique fondamental en incluant la valeur de J.

Corrigé détaillé :