

CHIMIE ORGANIQUE

Première Scientifique

*Cours complet : Alcanes · Alcènes · Alcynes · Alcools · Acides carboxyliques
Acides aminés · Aldéhydes · Cétones · Aromatiques · Acide-Base · Redox*

By Cyriaque Axel Ambassa PhD in Biochemistry



SOMMAIRE — Plan du Cours

01

Alcanes

02

Alcènes

03

Alcynes

04

Alcools

05

Acides Carboxyliques

06

Acides Aminés

07

Aldéhydes

08

Cétones

09

Composés Aromatiques

10

Acide-Base

11

Alkyles

12

Esters

CH 01

Les Alcanes

Hydrocarbures saturés — Formule, nomenclature, propriétés et réactions

Alcanes — Définition & Formule Générale

- Définition : hydrocarbures saturés composés uniquement de carbone (C) et d'hydrogène (H)
- Liaisons : uniquement des liaisons simples C-C et C-H (pas de double ni triple liaison)
- Formule générale : C_nH_{2n+2} (n = nombre d'atomes de carbone)
- Chaîne carbonée : linéaire (alcanes normaux) ou ramifiée (iso-alcanes)
- Hybridation : le carbone est hybridé sp^3 — géométrie tétraédrique, angles de $109,5^\circ$
- Exemple : méthane CH_4 , éthane C_2H_6 , propane C_3H_8 , butane C_4H_{10}
- Remarque : les alcanes cycliques (cycloalcanes) obéissent à C_nH_{2n}

Alcanes — Noms et Formules des Premiers Termes

Méthane



n=1, gaz naturel, combustible

Éthane



n=2, gaz

Propane



n=3, gaz GPL

Butane



n=4, gaz, briquets

Pentane



n=5, liquide, solvant

Alcanes — Règles de Nomenclature IUPAC

- 1. Identifier la chaîne carbonée principale (la plus longue contenant le maximum de substituants)
- 2. Numéroter les carbones de manière à donner les plus petits locants aux substituants
- 3. Nommer les substituants (groupes alkyle) en préfixe : méthyl-, éthyl-, propyl-...
- 4. Trier les substituants par ordre alphabétique (ignorer les préfixes di, tri, tétra)
- 5. Écrire le nom : [locants-substituants]-[racine alcane] — ex : 2-méthylpropane
- 6. Plusieurs substituants identiques → préfixe di, tri, tétra + locants séparés par virgule
- Exemple : 2,3-diméthylbutane = butane avec deux groupes méthyle en positions 2 et 3

Alcanes — Propriétés Physiques & Chimiques

Propriétés Physiques

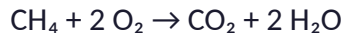
- État à 25°C : gaz (C1–C4), liquides (C5–C17), solides ($\geq$ C18)
- Température d'ébullition croît avec n (forces de van der Waals $\uparrow$)
- Peu solubles dans l'eau (apolaires) — solubles dans solvants organiques
- Densité inférieure à 1 (flottent sur l'eau)
- Point d'ébullition plus bas pour les alcanes ramifiés (moindre contact intermoléculaire)

Propriétés Chimiques

- Très stables chimiquement à température ambiante (liaisons σ robustes)
- Combustion complète : $C_nH_{2n+2} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ (réaction exothermique)
- Combustion incomplète : produit CO et/ou C (suie) si manque d' O_2
- Substitution radicalaire (SR) : remplacement H par halogène sous UV — réaction en chaîne
- Craquage thermique : rupture C–C à haute T $\rightarrow$ alcènes + alcanes plus petits

Alcanes — Réaction de Combustion et Substitution

Combustion Complète



$\Delta H < 0$ (réaction exothermique)

Produits : CO_2 et H_2O uniquement

Combustion Incomplète



Produit CO (toxique) ou C (suie)

Se produit en manque d'oxygène

Substitution Radicalaire



Étapes : initiation, propagation, terminaison

Ex : chloration, bromation du méthane

Craquage (Reformage)



Casse les longues chaînes (pétrole)

Fournit de l'essence et des oléfines

Alcanes — Isomérisation de Chaîne

Principe de l'Isomérisation

- Isomères : molécules de même formule brute mais structures différentes
- Isomérisation de chaîne : disposition différente de la chaîne carbonée
- Le butane (C_4H_{10}) a 2 isomères : n-butane et 2-méthylpropane
- Le pentane (C_5H_{12}) a 3 isomères de chaîne
- Le nombre d'isomères croît très vite avec n

Exemples — C_4H_{10}

- n-Butane : $CH_3-CH_2-CH_2-CH_3$ (chaîne droite, $T_{éb} = -0,5^{\circ}C$)
- 2-Méthylpropane (isobutane) : $(CH_3)_3CH$ ($T_{éb} = -11,7^{\circ}C$)
- Même formule brute, propriétés physiques différentes
- L'isomère ramifié a un point d'ébullition plus bas
- Les isomères ont des réactivités légèrement différentes

Alcanes — Applications et Sources Naturelles

- Sources : pétrole brut, gaz naturel, gaz de houille, biosynthèse animale (cires)
- Méthane : principal composant du gaz naturel, production bioénergie, vaches (méthane entérique)
- Propane / Butane : gaz de pétrole liquéfié (GPL), barbecues, cuisinières portables
- Pentane / Hexane : solvants en industrie, extraction d'huiles végétales
- Octane : référence pour l'indice d'octane des carburants automobiles
- Paraffines (alcanes lourds) : bougies, cosmétiques, lubrifiants, imperméabilisation
- Pétrole : mélange complexe d'alcanes distillé en fractions (GPL, essence, kérosène, gasoil, fuel)
- Enjeux environnementaux : combustion → CO_2 (gaz à effet de serre), méthane = puissant GES

CH 02

Les Alcènes

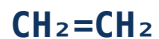
Hydrocarbures à double liaison $C=C$ — Formule, nomenclature, additions électrophiles

Alcènes — Définition, Formule et Structure

- Définition : hydrocarbures comportant une double liaison carbone-carbone $C=C$
- Formule générale : C_nH_{2n} (pour un alcène monocyclique ou une seule double liaison)
- Hybridation : les deux carbones de la double liaison sont hybridés sp^2
- Géométrie autour de $C=C$: plane, angles de liaison $\sim 120^\circ$ (triangulaire plan)
- La double liaison = 1 liaison σ (sigma) + 1 liaison π (pi)
- La liaison π est plus fragile que $\sigma \rightarrow$ réactivité des alcènes > alcanes
- Exemples : éthylène $CH_2=CH_2$, propène $CH_3-CH=CH_2$, butène C_4H_8
- Diènes : deux doubles liaisons (conjuguées, cumulées ou isolées) — ex : buta-1,3-diène

Alcènes — Nomenclature et Formules

Éthylène (éthène)



$n=2$, gaz, mûrissement des fruits

Propène



$n=3$, polypropylène

But-1-ène



double liaison en C1

But-2-ène



double liaison en C2, cis/trans

2-Méthylpropène



isobutylène, ramifié

Alcènes — Règles de Nomenclature IUPAC

- 1. Chaîne principale : la plus longue chaîne carbonée contenant la double liaison C=C
- 2. Suffixe : remplacer '-ane' par '-ène' (deux doubles liaisons : -adiène)
- 3. Numérotation : donner le plus petit locant à la double liaison
- 4. Indiquer la position de la double liaison avant le suffixe : but-2-ène
- 5. Les substituants sont nommés et localisés comme pour les alcanes
- Exemple : 2-méthylbut-2-ène = chaîne principale 5C, double liaison en C2, méthyle en C2
- Stéréoisomérisation Z/E : si les deux carbones sp^2 portent des substituants différents
- Z (zusammen) = substituants prioritaires du même côté ; E (entgegen) = côtés opposés

Alcènes — Isomérisie cis/trans (Z/E)

Définition Z/E

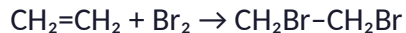
- Possible si chaque C de C=C porte 2 substituants différents
- La rotation autour de C=C est bloquée (liaison π rigide)
- Règle CIP (Cahn-Ingold-Prelog) : classer les substituants par priorité atomique
- Z (gleichseitig / même côté) : substituants prioritaires du même côté
- E (entgegengesetzt / opposé) : substituants prioritaires de côtés opposés
- Isomères Z et E ont des propriétés physiques différentes (Téb, Tf)

Exemple : But-2-ène

- But-2-ène = $\text{CH}_3\text{--CH=CH--CH}_3$
- (Z)-but-2-ène : les deux CH_3 sont du même côté de la double liaison
- (E)-but-2-ène : les deux CH_3 sont de part et d'autre
- (Z) : Téb = 3,7°C ; (E) : Téb = 0,9°C
- Correspond à l'ancienne notation cis/trans
- Pas d'isomère Z/E si un carbone porte 2 substituants identiques

Alcènes — Réactions d'Addition Électrophile

Addition d'Halogènes (Halogénéation)



Débroquérise l'eau de brome (test positif)

Produit : dibromure (addition anti)

Addition d'Acide Halogéné (HX)



Règle de Markovnikov : H s'additionne sur le C le plus hydrogéné

Produit majoritaire = alcane halogéné

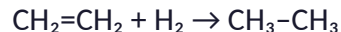
Hydratation (Addition d'eau)



Catalyse acide H^+ ou H_3PO_4

Règle de Markovnikov : OH sur le C le plus substitué

Hydrogénation Catalytique



Catalyseur : Ni, Pd ou Pt

Réduction de la double liaison $\rightarrow$ alcane

Alcènes — Règle de Markovnikov et Applications

- Règle de Markovnikov (1869) : lors de l'addition d' HX sur un alcène asymétrique, H s'additionne sur le carbone le plus riche en H (le moins substitué)
- Explication électronique : le carbocation intermédiaire le plus stable (le plus substitué) est favorisé
- Stabilité des carbocations : $3^\circ > 2^\circ > 1^\circ > \text{méthyle}$
- Addition anti-Markovnikov : possible avec des radicaux libres (en présence de peroxydes)
- Test des alcènes : décoloration de l'eau de brome $\text{Br}_2/\text{H}_2\text{O}$ (orange $\rightarrow$ incolore) $\rightarrow$ liaison $\text{C}=\text{C}$ présente
- Polymérisation : addition répétée d'éthylène $\rightarrow$ polyéthylène (PE) — matériau plastique
- Applications industrielles : éthylène $\rightarrow$ alcool éthylique, acétaldéhyde, polyéthylène (plastique)

Alcènes — Oxydation et Importance Biologique

- Ozonolyse : coupure de $C=C$ par O_3 puis réduction → deux carbonyles (aldéhydes ou cétones)
- Oxydation douce ($KMnO_4$ dilué, froid) : diol (diol-1,2) — test de Baeyer (décolore $KMnO_4$ violet)
- Époxydation : alcène + acide peracétique (mCPBA) → époxyde (triangle à 3 atomes)
- Phéromones : nombreux alcènes servent de phéromones sexuelles chez les insectes
- Caoutchouc naturel : polymère du 2-méthylbuta-1,3-diène (isoprène), enchaînements cis
- Terpènes : composés naturels issus de l'isoprène (huiles essentielles, hormones stéroïdes)
- Vitamines, hormones végétales : éthylène = hormone végétale de maturation des fruits

CH 03

Les Alcynes

Hydrocarbures à triple liaison $C\equiv C$ — Structure, réactivité et synthèse

Alcynes — Définition, Structure et Formule

- Définition : hydrocarbures comportant une triple liaison carbone-carbone $\text{C}\equiv\text{C}$
- Formule générale : $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$ (pour un alcyne à une seule triple liaison)
- Hybridation : les deux carbones impliqués sont hybridés sp (linéaire)
- Triple liaison = 1 liaison σ + 2 liaisons π
- Géométrie : linéaire autour de $\text{C}\equiv\text{C}$, angle de 180°
- Alcyne vrai (alcyne terminal) : $\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-$ $\rightarrow$ H déplaçable (légèrement acide)
- Exemples : acétylène $\text{HC}\equiv\text{CH}$ (éthyne), propyne $\text{CH}_3-\text{C}\equiv\text{CH}$
- Acétyléniure : ion $\text{C}\equiv\text{C}^{2-}$ ou $\text{RC}\equiv\text{C}^-$ (base forte, nucléophile utile en synthèse)

Alcynes — Nomenclature et Exemples

Éthyne (acétylène)



$n=2$, soudure, lampes

Propyne



$n=3$, gaz

But-1-yne



triple liaison terminale

But-2-yne



triple liaison interne

Pent-1-yne



$n=5$, terminal

Alcynes — Réactions Caractéristiques

Additions sur $C\equiv C$

- Hydrogénation complète : $C\equiv C + 2 H_2 \rightarrow$ alcane (Ni, Pd/C)
- Hydrogénation partielle : $C\equiv C + H_2 \rightarrow$ alcène (catalyseur Lindlar, sélectif cis)
- Addition de HX : Markovnikov $\rightarrow$ vinyle halogéné puis gem-dihalogéné
- Hydratation ($H_2O / H_2SO_4 / HgSO_4$) : alcyne $\rightarrow$ cétone (Markovnikov) ou aldéhyde si terminal
- Addition de Cl_2 ou Br_2 : dichloroalcène puis tétrachloroalcane

Propriétés Acide-Base

- L'hydrogène terminal (alcyne vrai) est légèrement acide ($pK_a \approx 25$)
- Réaction avec $NaNH_2 \rightarrow$ acétylénure de sodium $RC\equiv C^-Na^+$
- Les acétylénures sont de bons nucléophiles (allongement de chaîne)
- Test : précipité rouge-brique avec $Cu(NH_3)_2^+$ (acétylure de cuivre I)
- Donne un précipité jaune avec $Ag(NH_3)_2^+$ (acétylure d'argent — ATTENTION explosif)

Alcynes — Applications Industrielles et Biologiques

- Acétylène (éthyne) : chalumeau oxyacétylénique $T > 3000^{\circ}\text{C}$ — soudure et découpe des métaux
- Synthèse organique : les acétylénures $\text{RC}\equiv\text{C}^-$ allongent les chaînes (alkylation C-C)
- Contraceptifs stéroïdiens : progestérone synthétique comporte une fonction alcyne (éthynyloestradiol)
- Polymérisation de l'acétylène $\rightarrow$ polyacétylène (conducteur électrique, Nobel de chimie 2000)
- Propyne : synthèse de la méthyl vinyl cétone (MVK)
- Alcynes internes : stables, moins réactifs que les terminaux
- Nomenclature : suffixe '-yne' ; la position est précisée (but-1-yne, but-2-yne)

CH 04

Les Alcools

Groupe hydroxyle -OH — Nomenclature, classification, réactions clés

Alcools — Définition, Groupe Fonctionnel et Classification

- Définition : composés portant un groupe hydroxyle -OH lié à un carbone saturé (sp^3)
- Formule générale : R-OH (R = chaîne carbonée ou H pour méthanol)
- Groupe fonctionnel : -OH (hydroxyle)
- Classification selon le carbone porteur de -OH :
 - Alcool primaire (1°) : le C portant -OH est lié à 1 seul autre C ($\text{R-CH}_2\text{-OH}$)
 - Alcool secondaire (2°) : le C portant -OH est lié à 2 autres C (R-CHOH-R')
 - Alcool tertiaire (3°) : le C portant -OH est lié à 3 autres C ($\text{R}_3\text{C-OH}$)
- Polyols : plusieurs groupes -OH (ex : éthylèneglycol $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, glycérol $\text{HOCH}_2\text{CHOHCH}_2\text{OH}$)

Alcools — Nomenclature et Formules

Méthanol



1°, solvant, carburant, TOXIQUE

Éthanol



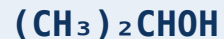
1°, boissons, désinfectant

Propan-1-ol



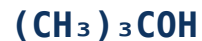
1°, solvant

Propan-2-ol



2°, isopropanol, désinfectant

2-Méthylpropan-2-ol



3°, TBuOH, solvant

Alcools — Propriétés Physiques

- Liaisons hydrogène : -OH forme des liaisons H avec l'eau → très solubles dans l'eau (petits alcools)
- Points d'ébullition élevés comparés aux alcanes de même masse molaire (liaisons H intermoléculaires)
- Méthanol (Téb = 64,7°C) vs éthane MM comparable (Téb = -89°C) : différence énorme
- La solubilité dans l'eau diminue quand la chaîne carbonée s'allonge (partie hydrophobe ↑)
- Les alcools à longue chaîne sont insolubles dans l'eau mais solubles dans les solvants organiques
- Arômes et parfums : de nombreux alcools naturels (linalol, géraniol) sont utilisés en parfumerie
- Viscosité : les polyols (glycérol, éthylèneglycol) sont visqueux (nombreuses liaisons H)

Alcools — Réactions d'Oxydation

Oxydation des Alcools Primaires

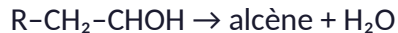
- Oxydant : $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ / H_2SO_4 ou KMnO_4 ou PCC
- Alcool $1^\circ \rightarrow$ Aldéhyde (oxydation douce, PCC)
- Alcool $1^\circ \rightarrow$ Acide carboxylique (oxydation forte, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
- Réaction : $\text{R-CH}_2\text{OH} \rightarrow \text{R-CHO} \rightarrow \text{R-COOH}$
- Bilan : perte de 2 H (déshydrogénation / oxydation)
- Couleur : $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ orange $\rightarrow \text{Cr}^{3+}$ vert (changement de couleur = test)

Oxydation des Alcools Secondaires

- Alcool $2^\circ \rightarrow$ Cétone (avec $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ou KMnO_4)
- Réaction : $\text{R-CHOH-R}' \rightarrow \text{R-CO-R}'$
- Les alcools tertiaires (3°) résistent à l'oxydation douce (pas de H sur le C-OH)
- Test de Lucas : différencie 1° , 2° , 3° par trouble avec ZnCl_2/HCl
- Analyse : la cétone ne se réduit pas davantage par l'oxydant classique
- Les aldéhydes sont oxydables en acides ($\neq$ cétones résistantes)

Alcools — Autres Réactions Importantes

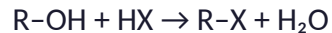
Déshydratation (Élimination)



Catalyse acide (H_2SO_4 conc.) à chaud

Règle de Zaïtsev : alcène le plus substitué

Substitution (→ Halogénure)



Ou SOCl_2 , $\text{PCl}_3 \rightarrow$ chlorure d'alkyle

L'ordre de réactivité : $3^\circ > 2^\circ > 1^\circ$

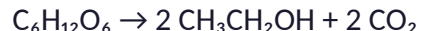
Estérification



Catalyse acide, équilibre — Le Chatelier

Produit : ester + eau

Fermentation & Synthèse



(Fermentation alcoolique, levures)

Ethanol aussi par hydratation de l'éthylène

Alcools — Applications et Importance Biologique

- Éthanol : boissons alcoolisées, carburant (bioéthanol E10/E85), antiseptique, solvant pharmaceutique
- Méthanol : solvant industriel, synthèse de formaldéhyde — EXTRÊMEMENT TOXIQUE (cécité, mort)
- Isopropanol (propan-2-ol) : désinfectant, produit d'entretien, solvant
- Glycérol : cosmétiques, médicaments, lubrifiant, explosif (nitroglycérine), glycémie sanguine
- Éthylèneglycol : antigel pour moteurs (attention : toxique pour animaux)
- Sorbitol, mannitol : polyols utilisés comme édulcorants et en pharmacie
- Cholestérol : alcool stéroïdien essentiel aux membranes cellulaires et précurseur hormonal
- Vitamines A, D, E, K : contiennent des groupes -OH, liposolubles

CH 05

Les Acides Carboxyliques

Groupe -COOH : structure, acidité, réactions et applications

Acides Carboxyliques — Définition et Structure

- Définition : composés possédant le groupe carboxyle -COOH (-C(=O)-OH)
- Le groupe -COOH = carbonyle C=O + hydroxyle -OH sur le même carbone
- Formule générale : R-COOH ($\text{R} = \text{H}$ pour acide formique, ou chaîne alkyle/aryle)
- Le carbone du -COOH est hybridé sp^2 : géométrie plane trigonale
- Acides monocarboxyliques, dicarboxyliques (R(COOH)_2), polycarboxyliques
- Caractère acide : pK_a entre 4 et 5 pour la plupart (acides faibles en solution aqueuse)
- Dissociation : $\text{R-COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{R-COO}^- + \text{H}_3\text{O}^+$
- L'ion carboxylate R-COO^- est la base conjuguée (délocalisation de la charge)

Acides Carboxyliques — Noms et Formules

Acide méthanoïque (formique)



pKa=3,75, fourmis, orties

Acide éthanoïque (acétique)



pKa=4,76, vinaigre

Acide propanoïque



pKa=4,87, conservateur E280

Acide butanoïque (butyrique)



beurre rance, odeur forte

Acide palmitique



acide gras saturé, huile de palme

Acides Carboxyliques — Réactions Caractéristiques

Réactions Acide-Base

- Avec NaOH : $\text{R-COOH} + \text{NaOH} \rightarrow \text{R-COONa} + \text{H}_2\text{O}$ (neutralisation totale)
- Avec Na_2CO_3 : effervescence CO_2 — test de la présence d'un acide carboxylique
- Avec les bases fortes : formation de carboxylate de sodium (savon si chaîne longue)
- Avec NH_3 : sel d'ammonium (précurseur d'amide après déshydratation)
- $\text{pK}_a \approx 4-5$: les acides carboxyliques sont des acides faibles

Estérification et Dérivés

- Estérification : $\text{R-COOH} + \text{R}'\text{-OH} \rightleftharpoons \text{R-COOR}' + \text{H}_2\text{O}$ (équilibre, cat. H^+)
- Formation d'anhydride : $2 \text{R-COOH} \rightarrow \text{R-CO-O-CO-R} + \text{H}_2\text{O}$
- Formation de chlorure d'acyle : $\text{R-COOH} + \text{SOCl}_2 \rightarrow \text{R-COCl} + \text{SO}_2 + \text{HCl}$
- Formation d'amide : $\text{R-COOH} + \text{H}_2\text{NR}' \rightarrow \text{R-CONH-R}' + \text{H}_2\text{O}$ (chaleur)
- Réduction en alcool primaire : $\text{R-COOH} + \text{LiAlH}_4 \rightarrow \text{R-CH}_2\text{OH}$

Acides Carboxyliques — Applications Importantes

- Acide acétique (éthanoïque) : vinaigre (5%), synthèse d'esters, aspirine (acide acétylsalicylique)
- Acide formique (méthanoïque) : sécrété par les fourmis, traitement de la laine, désinfectant
- Acide citrique : conservateur alimentaire E330 dans les agrumes, exhausteur d'acidité
- Acides gras saturés : acide palmitique (C16), stéarique (C18) — composants des graisses animales
- Acides gras insaturés : acide oléique (C18:1), linoléique (C18:2) — huile d'olive, tournesol
- Acides gras oméga-3, oméga-6 : acides gras essentiels (DHA, EPA) importants pour le cerveau
- Savons : sels de sodium ou potassium d'acides gras à longue chaîne (saponification)
- Polymères : acide téréphtalique + éthylèneglycol → PET (bouteilles plastiques, fibres textiles)

CH 06

Les Acides Aminés

Monomères des protéines — Structure, propriétés amphotères et peptides

Acides Aminés — Définition et Structure Générale

- Définition : molécules bifonctionnelles portant un groupe amine -NH_2 et un groupe carboxyle -COOH
- Acides α -aminés : amine et carboxyle sur le même carbone (le carbone α)
- Structure générale : $\text{H}_2\text{N-CH(R)-COOH}$ (R = chaîne latérale variable)
- 20 acides aminés standard codés par le génome humain
- Acides aminés essentiels (8-9) : non synthétisés par l'organisme $\rightarrow$ apport alimentaire obligatoire
- Chiralité : le carbone α est asymétrique (sauf glycine, R=H) $\rightarrow$ deux énantiomères L et D
- Les acides aminés naturels sont tous en configuration L (convention biochimique)
- Masse molaire : de 75 g/mol (glycine) à 204 g/mol (tryptophane)

Acides Aminés — Les 20 Acides Aminés Standard

Glycine (Gly, G)	$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{COOH}$	<i>Le plus simple, R=H, non chiral</i>
Alanine (Ala, A)	$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{COOH}$	<i>R=méthyle, très abondante</i>
Valine (Val, V)	$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}(\text{iPr})-\text{COOH}$	<i>Essentiel, hydrophobe</i>
Sérine (Ser, S)	$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}(\text{CH}_2\text{OH})-\text{COOH}$	<i>R=CH₂OH, polaire, site de phospho.</i>
Cystéine (Cys, C)	$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}(\text{CH}_2\text{SH})-\text{COOH}$	<i>Pont disulfure -S-S-, kératine</i>
Acide glutamique (E)	$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH})-\text{COOH}$	<i>Acide, pKa 4,07, glutamate</i>
Lysine (Lys, K)	$\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}(\text{NH}_2)-\text{COOH}$	<i>Basique, essentiel, pKa 10,5</i>
Phénylalanine (Phe)	$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}(\text{CH}_2\text{Ph})-\text{COOH}$	<i>Aromatique, essentiel, PKU</i>

Acides Aminés — Propriétés Acide-Base et Zwitterion

- Amphotère : un acide aminé est à la fois acide ($-\text{COOH}$) et base ($-\text{NH}_2$)
- À pH neutre, l'acide aminé existe sous forme zwitterionique : $^+\text{H}_3\text{N}-\text{CH}(\text{R})-\text{COO}^-$
- Point isoélectrique pI : pH auquel la molécule est électriquement neutre (charge globale = 0)
- pI d'un acide aminé neutre : $\text{pI} = (\text{pK}_{\text{a}1} + \text{pK}_{\text{a}2}) / 2$
- En milieu acide ($\text{pH} < \text{pI}$) : forme cationique $^+\text{H}_3\text{N}-\text{CH}(\text{R})-\text{COOH}$
- En milieu basique ($\text{pH} > \text{pI}$) : forme anionique $\text{H}_2\text{N}-\text{CH}(\text{R})-\text{COO}^-$
- Cette propriété est exploitée en électrophorèse pour séparer les protéines
- La chromatographie sur résine échangeuse d'ions utilise aussi le pI

Acides Aminés — Liaison Peptidique et Protéines

Formation de la Liaison Peptidique

- Liaison peptidique : entre -COOH d'un AA et -NH_2 d'un autre avec perte d'eau
- $\text{R-COOH} + \text{H}_2\text{N-R}' \rightarrow \text{R-CO-NH-R}' + \text{H}_2\text{O}$
- Dipeptide : 2 AA liés ; tripeptide : 3 AA ; polypeptide : ≥ 10 AA
- La liaison CO-NH est partiellement double (résonance $\rightarrow$ planéité)
- Pas de rotation libre autour de C-N peptidique (rigidité de la chaîne principale)
- Hydrolyse de la liaison peptidique : $\text{H}_2\text{O} + (\text{acide ou enzyme}) \rightarrow \text{AA libres}$

Niveaux de Structure des Protéines

- Structure 1° : séquence des acides aminés (ordre dans la chaîne polypeptidique)
- Structure 2° : hélice α , feuillet β (liaisons hydrogène intramoléculaires)
- Structure 3° : repliement tridimensionnel (interactions diverses, ponts S-S)
- Structure 4° : association de plusieurs chaînes polypeptidiques (ex : hémoglobine)
- Dénaturation : destruction de la structure 3° par chaleur, pH extrême, agents dénaturants
- Enzymes, anticorps, hormones : tous des protéines avec structures spécifiques

Acides Aminés — Rôles Biologiques et Applications

Biosynthèse des Protéines

Transcription ADN → ARNm, puis traduction ARNm → protéine (ribosome). Les AA s'enchaînent selon le code génétique.

Acides Aminés Essentiels

9 AA essentiels : His, Ile, Leu, Lys, Met, Phe, Thr, Trp, Val. Doivent être apportés par l'alimentation (viande, légumineuses).

Neurotransmetteurs

Glu (glutamate) et GABA (de Glu) : excitateur/inhibiteur. Tryptophane → sérotonine. Tyrosine → dopamine, adrénaline.

Industrie & Pharmacie

Aspartame : Asp + Phe (édulcorant). Acide glutamique → glutamate de sodium E621 (exhausteur). Cystéine dans les cosmétiques (cheveux).

Acides Aminés — Chromatographie et Identification

- Réaction ninhydrine : les AA réagissent avec la ninhydrine → couleur violette (proline → jaune)
- Chromatographie sur couche mince (CCM) : sépare les AA par leur R_f (rapport frontal)
- Électrophorèse capillaire : séparation selon la charge (liée au pI) à un pH donné
- HPLC (High Performance Liquid Chromatography) : analyse quantitative et qualitative des AA
- Spectrométrie de masse : détermine la masse exacte des peptides et protéines
- Spectre UV : Trp, Tyr et Phe absorbent à 280 nm — dosage des protéines par UV
- Réaction de Sanger (fluorodinitrobenzène) : identifie le résidu N-terminal d'une protéine

CH 07

Les Aldéhydes

Groupe -CHO : structure, nomenclature et réactivité carbonyle

Aldéhydes — Définition et Groupe Fonctionnel

- Définition : composés portant le groupe aldéhyde -CHO (carbonyle en bout de chaîne)
- Structure du groupe carbonyle C=O : carbone hybridé sp^2 , géométrie plane trigonale
- Le carbone carbonyle porte toujours au moins un H (différence avec les cétones)
- Formule générale : R-CHO ($\text{R} = \text{H}$ pour méthanal ou chaîne carbonée)
- Suffixe IUPAC : '-al' (remplace le '-e' du nom de l'alcane de référence)
- Nomenclature : la chaîne principale doit inclure le carbone du -CHO (locant 1 obligatoire)
- Exemples : méthanal HCHO , éthanal CH_3CHO , propanal $\text{C}_2\text{H}_5\text{CHO}$
- Polarité élevée (C=O polaire) $\rightarrow$ interactions dipôle-dipôle mais pas de liaisons H entre molécules

Aldéhydes — Nomenclature et Formules Clés

Méthanal (formaldéhyde)	HCHO	Formalin 37%, désinfectant, résines
Éthanal (acétaldéhyde)	CH_3CHO	Odeur pomme verte, métabolite alcool
Propanal	$\text{C}_2\text{H}_5\text{CHO}$	Odeur âcre
Butanal	$\text{C}_3\text{H}_7\text{CHO}$	Odeur de beurre rance
Benzaldéhyde	$\text{C}_6\text{H}_5\text{—CHO}$	Odeur amande, cosmétiques
Vanilline	$4\text{—OH—3—OCH}_3\text{—C}_6\text{H}_3\text{CHO}$	Arôme vanille, extrait de vanille
Glucose	$\text{CHO—(CHOH)}_4\text{—CH}_2\text{OH}$	Polyhydroxyaldéhyde (aldose)

Aldéhydes — Réactions Caractéristiques

Réactions d'Oxydation

- Oxydation douce $\rightarrow$ acide carboxylique : $R-CHO + [O] \rightarrow R-COOH$
- Réactif de Tollens ($Ag(NH_3)_2^+$) : miroir d'argent $\rightarrow$ test positif = aldéhyde
- Réactif de Fehling (Cu^{2+} bleu $\rightarrow$ Cu_2O rouge brique) : test positif = aldéhyde
- $KMnO_4$ ou $K_2Cr_2O_7$ oxydent facilement les aldéhydes
- Les cétones NE réduisent PAS Tollens ni Fehling (pas d'H sur le C=O)
- Différence clé aldéhyde/cétone : les aldéhydes sont réducteurs, pas les cétones

Réactions d'Addition Nucléophile

- Le carbone C=O est électrophile $\rightarrow$ attaqué par les nucléophiles
- Addition de HCN : $R-CHO + HCN \rightarrow R-CH(OH)-CN$ (cyanohydrine)
- Addition de $RMgX$ (réactif de Grignard) $\rightarrow$ alcool secondaire
- Réduction par $NaBH_4$: $R-CHO \rightarrow R-CH_2OH$ (alcool primaire)
- Réduction par $LiAlH_4$: $R-CHO \rightarrow R-CH_2OH$ (plus puissant)
- Addition d'alcool $\rightarrow$ hémiacétal puis acétal ($R-CH(OR')_2$)

Aldéhydes — Applications et Rôles Biologiques

- Formaldéhyde (méthanal) : désinfectant (formol 37%), conservation anatomique, résines phénol-formol
- Glutaraldéhyde : stérilisation du matériel médical, fixateur histologique
- Benzaldéhyde : arôme amande amère (noyaux de cerises), cosmétiques
- Vanilline : arôme de vanille (synthétique à 99%), industrie alimentaire et parfumerie
- Cinnamaldéhyde : arôme cannelle, huile essentielle de cannelle
- Glucose : aldose (polyhydroxyaldéhyde), source d'énergie cellulaire (glycolyse)
- Rétinal (forme aldéhyde de la vitamine A) : pigment visuel dans la rétine, vision
- Pyridoxal phosphate (vitamine B6) : cofacteur aldéhyde des transaminases

CH 08

Les Cétones

Carbonyle interne C=O — Nomenclature, propriétés et réactivité comparée

Cétones — Définition, Structure et Nomenclature

- Définition : composés portant un groupe carbonyle $\text{C}=\text{O}$ entre deux carbones (interne)
- Formule générale : $\text{R}-\text{CO}-\text{R}'$ (R et R' = chaînes carbonées, jamais de H sur le $\text{C}=\text{O}$)
- Hybridation du carbone carbonyle : sp^2 , géométrie plane trigonale
- Suffixe IUPAC : '-one' (ex : propanone, butanone, pentan-2-one)
- La position du groupe $\text{C}=\text{O}$ est indiquée par un locant (sauf si unique)
- Exemples : propanone (acétone) CH_3COCH_3 , butanone $\text{CH}_3\text{COC}_2\text{H}_5$
- Cyclohexanone, acétophénone (méthyl phényl cétone) : cétones cycliques et aromatiques
- Différence aldéhyde/cétone : cétone a $\text{C}=\text{O}$ entre deux carbones $\rightarrow$ pas de H directement sur $\text{C}=\text{O}$

Cétones — Réactivité et Tests de Différenciation

Réactions des Cétones

- Addition nucléophile sur $C=O$ (moins réactif que les aldéhydes — encombrement stérique)
- Réduction par $NaBH_4$: $R-CO-R' \rightarrow R-CHOH-R'$ (alcool secondaire)
- Réduction par $LiAlH_4$: $R-CO-R' \rightarrow R-CHOH-R'$ (plus puissant)
- Réaction avec $HCN \rightarrow$ cyanohydrine ($R_2C(OH)CN$)
- Réaction avec réactif de Grignard $\rightarrow$ alcool tertiaire
- Tautomérisme céto-énolique : la forme énol peut participer à des substitutions

Tests de Différenciation Aldéhyde / Cétone

- Tollens (miroir d'argent) : Aldéhyde ✓ POSITIF — Cétone ✗ NÉGATIF
- Fehling (Cu^{2+} bleu $\rightarrow$ Cu_2O rouge) : Aldéhyde ✓ POSITIF — Cétone ✗ NÉGATIF
- Ces tests exploitent le fait que seuls les aldéhydes sont réducteurs
- Réactif de Brady (DNPH) : donne un précipité jaune-orange avec ALDÉHYDES ET CÉTONES
- Iodoforme ($I_2/NaOH$) : précipité jaune CHI_3 si méthylcétone (CH_3CO-R) ou éthanol

Cétones — Propriétés Physiques et Applications

- Acétone (propanone) : solvant universel, dissout résines, vernis, adhésifs, graisses
- Acétone produite dans l'organisme lors de la cétose (jeûne prolongé, diabète non traité)
- Méthyl éthyl cétone (MEK / butanone) : solvant industriel pour peintures et adhésifs
- Cyclohexanone : précurseur du nylon (caprolactame) — industrie textile
- Acétophénone : arôme d'orange, en parfumerie
- Camphre : cétone bicyclique naturelle, effet analgésique et répulsif
- Stéroïdes : nombreuses hormones stéroïdiennes contiennent des groupes cétone (testostérone, cortisone)
- Sucrose, fructose : contiennent des fonctions cétone (cétoses en biochimie)

CH 09

Les Composés Aromatiques

Benzène et dérivés — Aromaticité, réactions de substitution électrophile aromatique

Composés Aromatiques — Le Benzène et l'Aromaticité

- Benzène : C_6H_6 , cycle hexagonal de 6 carbones, formule de Kekulé (alternance simples/doubles liaisons)
- Représentation réelle : système π délocalisé sur les 6 carbones (hexagone avec cercle)
- Règle de Hückel : aromatique si $4n+2$ électrons π (n entier) dans un système cyclique conjugué plan
- Benzène : 6 électrons π ($n=1$) $\rightarrow$ aromatique ; stabilité supplémentaire 150 kJ/mol (énergie de résonance)
- Hybridation : tous les C sont sp^2 , angles de 120° , cycle parfaitement plan
- Les liaisons C-C dans le benzène sont identiques (longueur intermédiaire 1,40 Å)
- Stabilité chimique : préfère la substitution électrophile à l'addition (conservation de l'aromaticité)
- Naphthalène $C_{10}H_8$, anthracène, phénanthrène : hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Composés Aromatiques — Substitution Électrophile Aromatique (SEAr)

Mécanisme Général SEAr

- Étape 1 : activation de l'électrophile E^+ (ex : $Br_2 + FeBr_3 \rightarrow Br^+$)
- Étape 2 : attaque de E^+ sur le cycle $\rightarrow$ complexe de Wheland (carbocation arenium)
- Étape 3 : perte d'un proton H^+ $\rightarrow$ restauration de l'aromaticité
- Bilan : $ArH + E^+ \rightarrow ArE + H^+$ (substitution, aromaticité conservée)
- L'énergie d'activation est la formation du complexe de Wheland

Types de Substitutions Importantes

- Halogénéation : $C_6H_6 + Cl_2/AlCl_3 \rightarrow C_6H_5Cl$ (chlorobenzène) + HCl
- Nitration : $C_6H_6 + HNO_3/H_2SO_4 \rightarrow C_6H_5NO_2$ (nitrobenzène) + H_2O
- Sulfonation : $C_6H_6 + H_2SO_4 \text{ conc.} \rightarrow C_6H_5SO_3H + H_2O$
- Alkylation de Friedel-Crafts : $C_6H_6 + RCl/AlCl_3 \rightarrow C_6H_5R + HCl$
- Acylation de Friedel-Crafts : $C_6H_6 + RCOCl/AlCl_3 \rightarrow C_6H_5COR$

Composés Aromatiques — Effets Directeurs des Substituants

- Les substituants déjà présents sur le cycle orientent le suivant (position ortho/para ou méta)
- Groupes activants (donneurs d'électrons) : $-\text{OH}$, $-\text{OR}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NHR}$, $-\text{CH}_3$ → orientent ortho/para et activent
- Groupes désactivants (attracteurs d'électrons) : $-\text{NO}_2$, $-\text{CN}$, $-\text{CHO}$, $-\text{COOR}$ → orientent méta et désactivent
- $-\text{Cl}$, $-\text{Br}$, $-\text{F}$: désactivants mais directeurs ortho/para (effet inductif attracteur, effet mésomère donneur)
- Règle 1 : les activants orientent en ortho (position 2,6) et para (position 4)
- Règle 2 : les désactivants orientent en méta (position 3,5)
- Disubstitution : les effets des deux substituants peuvent se renforcer ou s'opposer
- Application en synthèse : planifier l'ordre des substitutions pour obtenir l'isomère voulu

Composés Aromatiques — Dérivés Importants

Phénol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$)

Antiseptique (acide phénique). Synthèse de l'aspirine, résines phénol-formol (bakélite), bisphénol A.

Aniline ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$)

Base aromatique faible. Synthèse de colorants azoïques, médicaments (sulfamides, paracétamol). Précurseur polyuréthane.

Acide Benzoïque ($\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$)

Conservateur alimentaire E210. Produit de biosynthèse. Synthèse d'esters benzoates (parfums).

TNT (trinitrotoluène)

$\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$: explosif. Obtenu par triple nitration du toluène. Stabilité thermique élevée.

Composés Aromatiques — Importance Biologique et Industrielle

- Acides aminés aromatiques : phénylalanine, tyrosine, tryptophane — cycles benzéniques dans les protéines
- Nucléotides : les bases azotées de l'ADN/ARN sont des systèmes hétéroaromatiques (pyrimidine, purine)
- Hormones : œstrogènes (stéroïdes aromatiques), adrénaline (catécholamine phénolique)
- Caféine, théine : méthylxanthines, alcaloïdes aromatiques, stimulants du SNC
- Pesticides organochlorés : DDT, lindane (chlorobenzènes) — interdits en Europe
- Polluants HAP : benzo[a]pyrène (cancérigène dans fumée cigarette, viandes grillées)
- Nylon 6,6 : acide adipique + hexaméthylènediamine (dérivé de l'aniline) → polyamide
- Pétrole : contient des fractions aromatiques (BTEX : benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes)

CH 10

Acide-Base en Chimie

Théories de Brønsted-Lowry et Lewis — pH, pKa, équilibres et tampons

Acide-Base — Théories Fondamentales

- Arrhenius (1887) : acide libère H^+ dans l'eau ; base libère OH^- (limité aux solutions aqueuses)
- Brønsted-Lowry (1923) : acide = donneur de proton H^+ ; base = accepteur de proton H^+
- Couple acide/base conjugué : l'acide et sa base conjuguée diffèrent d'un H^+
- Exemple : CH_3COOH / CH_3COO^- ($pK_a = 4,76$)
- Lewis (1923) : acide = accepteur de doublet électronique ; base = donneur de doublet
- Les acides de Lewis peuvent être des acides sans H (ex : BF_3 , $FeCl_3$, Al^{3+})
- La définition de Lewis est la plus générale (englobe Brønsted-Lowry)
- L'eau est amphotère : peut être acide ($\rightarrow OH^-$) ou base ($\rightarrow H_3O^+$) selon le partenaire

Acide-Base — pH, pKa et Constantes d'Acidité

- $\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+] ; [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$
- Autoprotolyse de l'eau : $2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$; $K_e = 10^{-14}$ à $25^\circ\text{C} \rightarrow \text{p}K_e = 14$
- Eau pure : $\text{pH} = 7$ (neutre) ; acide : $\text{pH} < 7$; basique : $\text{pH} > 7$
- K_a : constante d'acidité — $K_a = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{A}^-] / [\text{AH}]$; $\text{p}K_a = -\log K_a$
- Plus $\text{p}K_a$ est faible, plus l'acide est fort (cède facilement H^+)
- Acide fort (HCl , H_2SO_4 , HNO_3) : $\text{p}K_a < 0$ — ionisation totale en solution aqueuse
- Acide faible (CH_3COOH , HF) : $\text{p}K_a$ entre 0 et 14 — ionisation partielle
- pH d'un acide faible : $\text{pH} = \frac{1}{2}(\text{p}K_a - \log C_a)$ (loi approximative)

Acide-Base — Couples Acide/Base Importants

Acide	Base conjuguée	pKa	Exemple d'application
HClO ₄	ClO ₄ ⁻	très négatif	Acide fort de référence
HCl	Cl ⁻	-7	Acide chlorhydrique, estomac
H ₂ SO ₄	HSO ₄ ⁻	-3	Acide sulfurique, batteries
H ₃ O ⁺	H ₂ O	0	Ion oxonium, eau acide
HF	F ⁻	3,2	Acide fluorhydrique, gravure
CH ₃ COOH	CH ₃ COO ⁻	4,76	Acide acétique, vinaigre
H ₂ CO ₃	HCO ₃ ⁻	6,35	Acide carbonique, sang
NH ₄ ⁺	NH ₃	9,25	Ion ammonium / ammoniac
HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	10,33	Bicarbonate / carbonate
H ₂ O	OH ⁻	14	Eau comme acide

Acide-Base — Tampons et Indicateurs

Solutions Tampons

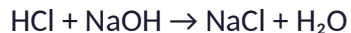
- Solution tampon : résiste à la variation de pH par ajout d'acide ou de base
- Composition : acide faible + sa base conjuguée (en concentrations voisines)
- Équation de Henderson-Hasselbalch : $\text{pH} = \text{pK}_a + \log\left(\frac{[\text{A}^-]}{[\text{AH}]}\right)$
- pH maximal de l'effet tampon : zone $\text{pK}_a \pm 1$
- Tampon sanguin : $\text{H}_2\text{CO}_3 / \text{HCO}_3^-$ ($\text{pK}_a = 6,1$), maintient pH sang à 7,40
- Tampon phosphate : $\text{H}_2\text{PO}_4^- / \text{HPO}_4^{2-}$ ($\text{pK}_a = 7,2$), intracellulaire
- Applications : biologie moléculaire, fermentation, pharmacie

Indicateurs Colorés

- Indicateur coloré : acide faible (HIn) dont la forme acide et basique ont des couleurs différentes
- Changement de couleur autour de son pK_a propre (zone de virage)
- Hélianthine (méthylorange) : rouge ($\text{pH} < 3,1$) → orange → jaune ($\text{pH} > 4,4$)
- BBT (bleu de bromothymol) : jaune ($\text{pH} < 6$) → vert → bleu ($\text{pH} > 7,6$)
- Phénolphtaléine : incolore ($\text{pH} < 8,2$) → rose ($\text{pH} > 10$)
- Papier pH universel : mélange d'indicateurs, mesure approchée
- Titration acide-base : le point d'équivalence est détecté par l'indicateur adéquat

Acide-Base — Titrages et Applications Pratiques

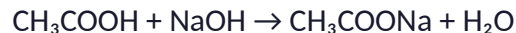
Titration Acide Fort / Base Forte



Point d'équiv. : $\text{pH}=7$. Indicateur : phénolphthaléine ou BBT.

Courbe de titrage en forme de S vertical.

Titration Acide Faible / Base Forte



Point d'équiv. : $\text{pH} > 7$ (sel basique). Indicateur : phénolphthaléine.

Régulation du pH Sanguin

pH normal : 7,35–7,45 (légèrement basique)

Acidose ($\text{pH}<7,35$) : diabète, insuffisance respiratoire

Alcalose ($\text{pH}>7,45$) : hyperventilation, vomissements

Applications Industrielles

Décapage des métaux (HCl , H_2SO_4), traitement des eaux usées (neutralisation), production d'engrais, industrie alimentaire (pH des conserves).

Alcanes — Cycloalcanes et Tension de Cycle

- Cycloalcanes : alcanes dont la chaîne est fermée en cycle (boucle)
- Formule générale des cycloalcanes : C_nH_{2n} (même que les alcènes)
- Cyclopropane C_3H_6 : triangulaire, angle de 60° — très tension de cycle → réactivité accrue
- Cyclobutane C_4H_8 : carré, angle de 90° — tension modérée
- Cyclopentane C_5H_{10} : presque plan, angle $\approx 104^\circ$ — faible tension
- Cyclohexane C_6H_{12} : conformation chaise (idéale) — quasi sans tension (angles $109,5^\circ$)
- Conformation chaise du cyclohexane : positions axiales et équatoriales des substituants
- Cyclohexane : forme la plus stable des cycloalcanes, très répandu en biochimie (stéroïdes)

Alcènes — Polymérisation des Alcènes

- Polymérisation : réaction d'addition répétée de monomères alcènes $\rightarrow$ macromolécule (polymère)
- Polyéthylène (PE) : $n \text{ CH}_2=\text{CH}_2 \rightarrow (-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ — bouteilles, sacs plastiques
- PE haute densité (HDPE) : chaînes linéaires, plus rigide — bidons, tuyaux
- PE basse densité (LDPE) : chaînes ramifiées, plus souple — films d'emballage
- Polypropylène (PP) : $n \text{ CH}_3-\text{CH}=\text{CH}_2 \rightarrow (-\text{CH}_2-\text{CHCH}_3-)_n$ — emballages, fibres, automobiles
- PVC (polychlorure de vinyle) : $n \text{ CH}_2=\text{CHCl} \rightarrow (-\text{CH}_2-\text{CHCl}-)_n$ — tuyaux, revêtements de sol
- Polystyrène (PS) : $n \text{ CH}_2=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5 \rightarrow (-\text{CH}_2-\text{CHPh}-)_n$ — emballages, isolation
- PTFE (Téflon) : polyfluoroéthylène $(\text{CF}_2=\text{CF}_2)_n$ — antiadhésif, tuyaux chimiques

Alcools — Les Sucres comme Polyols Naturels

- Les sucres (glucides) sont des polyhydroxyaldéhydes ou polyhydroxycétones
- Glucose (aldose, $C_6H_{12}O_6$) : polyhydroxyaldéhyde, forme linéaire et cyclique (glucopyranose)
- Fructose (cétose, $C_6H_{12}O_6$) : polyhydroxycétone — plus sucré que le saccharose
- Galactose, mannose : autres aldohexoses, isomères du glucose
- Saccharose (sucre de table) : disaccharide glucose + fructose, liaison osidique $\alpha 1-\beta 2$
- Lactose (sucre du lait) : glucose + galactose, liaison $\beta 1-4$
- Amidon et cellulose : polymères du glucose (liaisons α et β respectivement)
- Cyclisation du glucose : forme un hémiacétal cyclique (pyranose à 6 chaînons ou furanose à 5)

Acides Carboxyliques — Acides Dicarboxyliques

Principaux Acides Dicarboxyliques

- Acide oxalique : HOOC-COOH (rhubarbe, oseille) — forme des calculs rénaux avec Ca^{2+}
- Acide malonique : $\text{HOOC-CH}_2\text{-COOH}$ — synthèse de la malonate (sédatif)
- Acide succinique : $\text{HOOC-(CH}_2)_2\text{-COOH}$ — cycle de Krebs
- Acide fumarique (trans) et maléique (cis) : acides dicarboxyliques insaturés
- Acide glutarique : $\text{HOOC-(CH}_2)_3\text{-COOH}$
- Acide adipique : $\text{HOOC-(CH}_2)_4\text{-COOH}$ — synthèse du nylon 6,6
- Acide téréphtalique : $\text{HOOC-C}_6\text{H}_4\text{-COOH}$ — PET (bouteilles plastiques)

Réactivité et Applications

- Peuvent former deux esters (diester) ou un anhydride cyclique (si géométrie favorable)
- Acide maléique (cis) forme facilement un anhydride cyclique (5 chaînons)
- Acide fumarique (trans) ne forme pas d'anhydride facilement
- Nylon 6,6 : acide adipique + hexaméthylènediamine → polyamide (liaison amide répétée)
- PET : acide téréphtalique + éthylèneglycol → polyester (bouteilles, fibres polyester)
- Cycle de Krebs : succinique, fumarique, maléique, oxaloacétique — métabolisme énergétique

Acides Aminés — Enzymes et Activité Catalytique

- Enzymes : protéines à activité catalytique (accélèrent les réactions sans être consommées)
- Site actif : poche tridimensionnelle où se lie le substrat (géométrie clé-serrure, modèle koshland)
- Constante de Michaelis-Menten K_m : mesure l'affinité enzyme-substrat (faible K_m = forte affinité)
- Vitesse maximale V_{max} : vitesse de réaction quand tous les sites actifs sont occupés
- Inhibition compétitive : un inhibiteur ressemblant au substrat occupe le site actif
- Inhibition non-compétitive : l'inhibiteur se fixe ailleurs et déforme le site actif
- Cofacteurs et coenzymes : petites molécules nécessaires à l'activité (vitamines, ions métalliques)
- Applications : enzymes industrielles (amylase, lipase, protéase), biotechnologies, diagnostics

Aldéhydes — Réactions de Condensation Aldolique

- Condensation aldolique : réaction de deux aldéhydes (ou cétones) catalysée par une base diluée
- L' α C-H est acide ($pK_a \approx 20$) — la base arrache l'H en α pour former un énolate
- L'énolate (nucléophile) attaque le carbonyle d'un second aldéhyde $\rightarrow$ β -hydroxy aldéhyde (aldol)
- Bilan aldol : $2 \text{CH}_3\text{CHO} \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CHO}$ (aldol de l'acétaldéhyde)
- Condensation d'aldol (crotonisation) : l'aldol se déshydrate $\rightarrow$ α,β -énal conjugué
- Condensation aldolique mixte (croisée) : entre deux aldéhydes différents $\rightarrow$ utilité en synthèse
- Réaction de Cannizzaro : aldéhyde sans H en α (HCHO , PhCHO) + base forte $\rightarrow$ alcool + acide
- $2 \text{HCHO} + \text{NaOH} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{HCOONa}$ (dimutation — 1 HCHO s'oxyde, l'autre se réduit)

Cétones et Aldéhydes — Spectroscopie IR et RMN

- Spectroscopie infrarouge (IR) : identification des groupes fonctionnels par absorption IR
- C=O carbonyle : bande d'absorption forte et large entre $1700\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$
- Aldéhyde (C-H de CHO) : doublet caractéristique autour de $2700\text{--}2900\text{ cm}^{-1}$
- O-H alcool : bande large à $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ (liaisons H) ; alcool libre : fin à 3620 cm^{-1}
- C=C alcène : $1620\text{--}1680\text{ cm}^{-1}$; triple liaison C≡C : $2100\text{--}2260\text{ cm}^{-1}$
- RMN ^1H : signal de l'aldéhyde entre 9–10 ppm (très déblindé par le C=O)
- RMN ^1H : signal des H de méthyle -CH_3 voisin de C=O : 2–2,5 ppm
- RMN ^{13}C : carbone de C=O : 190–220 ppm pour cétone/aldéhyde, 160–185 ppm pour ester/acide

Composés Aromatiques — Hétéroaromatiques et HAP

- Hétéroaromatiques : systèmes aromatiques contenant un hétéroatome (N, O, S) dans le cycle
- Pyridine (N) : aromatique, base faible, solvant, vitamines B (nicotinamide/niacine)
- Pyrimidine et purine : bases nucléiques de l'ADN et l'ARN (adénine, guanine, cytosine, thymine, uracile)
- Furane (O) : hétéroaromatique à 5 chaînons, instable, réactivité SEAr
- Thiophène (S) : aromatique soufré, odeur de naphte — réactions SEAr rapides
- Imidazole (2N) : dans l'histidine — site de catalyse acide-base des enzymes (pKa 6,0)
- HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) : naphthalène, anthracène, pyrène
- Benzo[a]pyrène : HAP hautement cancérigène (viandes grillées, fumée cigarette, diesel)

Acide-Base — Équilibres Physiologiques et Médicaux

- pH sanguin normal : 7,35–7,45 (légèrement basique) — tampon bicarbonate/acide carbonique
- Acidose métabolique ($\text{pH} < 7,35$) : diabète décompensé (corps cétoniques acides), insuffisance rénale
- Acidose respiratoire : insuffisance respiratoire, accumulation de $\text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \uparrow$
- Alcalose respiratoire : hyperventilation, baisse de $\text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \downarrow$
- Alcalose métabolique : vomissements répétés (perte HCl), surdosage bicarbonate
- Antiacides : CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, NaHCO_3 — neutralisent l'excès d'acide gastrique
- pH gastrique : 1–2 (HCl , digestion des protéines par pepsine — optimum pH 2)
- pH intestinal : 7–8 (pancréas sécrète NaHCO_3 pour neutraliser le chyme acide)

Oxydoréduction — Piles Rechargeables et Pile à Combustible

- Accumulateur au plomb (batterie voiture) : PbO_2 (cathode) / Pb (anode) / H_2SO_4 — 2 V par cellule
- Rechargeable : l'électrolyse inverse la réaction (recharge lors du fonctionnement du moteur)
- Batterie lithium-ion (Li-ion) : LiCoO_2 cathode / graphite anode / électrolyte Li^+ — 3,6–4,2 V
- Haute densité d'énergie, légère — téléphones, laptops, voitures électriques (Tesla, Renault Zoé)
- Dégradation : cycles charge/décharge dégradent progressivement l'électrode (≈ 500 – 1000 cycles)
- Pile à combustible H_2/O_2 : H_2 (anode) $\rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$; O_2 (cathode) $\rightarrow \text{H}_2\text{O}$; rendement $> 60\%$
- Pile à combustible : émissions zéro (uniquement H_2O) — véhicules à hydrogène (Toyota Mirai)
- Supercondensateurs : stockage électrostatique, recharge ultra-rapide, densité d'énergie faible

Esters — Biocarburants et Transestérification

- Biodiesel : esters méthyliques d'acides gras (EMAG) produits par transestérification
- Transestérification : triglycéride + méthanol $\rightarrow$ 3 EMAG + glycérol (catalyseur NaOH ou KOH)
- Utilisation : mélangé au diesel (B5, B30, B100) — réduction des émissions de particules
- Bioéthanol : fermentation alcoolique des sucres $\rightarrow$ éthanol $\rightarrow$ mélangé à l'essence (E10, E85)
- HVO (Huile Végétale Hydrotraitee) : traitement à H_2 des huiles $\rightarrow$ alcanes (plus stable)
- Huile de palme, colza, tournesol, soja : principales sources de biodiesel
- Controverse : compétition avec cultures alimentaires, déforestation (huile de palme)
- Algues oléagineuses : prometteuses pour biocarburants de 3ème génération

Synthèse Organique — Stratégie Rétrosynthétique

Principe de la Rétrosynthèse

On part du produit cible et on remonte vers des précurseurs plus simples (disponibles commercialement). Flèche rétrosynthétique $\implies$ (double trait).

Déconnexion C-C (Bond Formation)

Identifier les liaisons C-C à former. Méthodes : Grignard, alkylation d'acétylénure, condensation aldolique, Friedel-Crafts.

Interconversion de Groupes Fonctionnels

Alcool $\rightarrow$ aldéhyde $\rightarrow$ acide $\rightarrow$ ester. Alcène $\rightarrow$ alcool (addition eau). Choix de l'oxydant ou réducteur approprié.

Protection des Fonctions

Si plusieurs fonctions réactives $\rightarrow$ protéger les unes avant de modifier les autres. Ex : acétal protège un aldéhyde en milieu réducteur.

Stéréochimie — Chiralité et Énantiomères

- Chiralité : une molécule est chirale si elle ne peut pas se superposer à son image dans un miroir
- Centre stéréogène (carbone asymétrique) : carbone sp^3 lié à 4 substituants différents
- Énantiomères : paire de molécules images miroir l'une de l'autre (comme les deux mains)
- Propriétés identiques sauf : rotation de la lumière polarisée (propriété optique)
- Dextrogyre (+) : fait tourner la lumière polarisée vers la droite
- Lévoxyre (-) : fait tourner la lumière polarisée vers la gauche
- Configuration R/S (règles CIP) : classer les substituants du C^* par priorité, sens de rotation
- Mélanges racémiques : 50% R + 50% S — pas d'activité optique globale
- Importance en pharmacie : un seul énantiomère peut être actif (thalidomide : tragédie R/S)

CH 11

Les Alkyles et Groupes Alkyle

Substituants alkyle — Nomenclature, propriétés et rôle en synthèse

Alkyles — Définition et Classification

- Groupe alkyle : fragment d'alcane auquel on retire un atome d'hydrogène → formule $C_nH_{2n+1}-$
- Notation générale : R- (radical alkyle monovalent)
- Méthyle : $-CH_3$ (de méthane CH_4)
- Éthyle : $-CH_2CH_3$ ou $-C_2H_5$ (de éthane)
- Propyle : $-CH_2CH_2CH_3$ ou $-n-Pr$; isopropyle (iPr) : $-CH(CH_3)_2$ (ramifié)
- Butyle : n-Bu $-(CH_2)_3CH_3$; isobutyle $-CH_2CH(CH_3)_2$; sec-butyle $-CH(CH_3)CH_2CH_3$; tert-butyle (t-Bu) $-C(CH_3)_3$
- Les groupes alkyle sont donneurs d'électrons (effet inductif +I) par rapport au H
- Effet inductif +I : stabilise les carbocations et radicaux (ordre : t > s > p > méthyle)

Alkyles — Nomenclature et Formules des Principaux Radicaux

Méthyle



Abrév. : Me, le plus simple

Éthyle



Abrév. : Et

n-Propyle



chaîne droite

Isopropyle



Abrév. : iPr, ramifié

n-Butyle



Abrév. : n-Bu

tert-Butyle



Abrév. : t-Bu, très encombrant

Benzyle



Abrév. : Bn, aromatique

Allyle



Insaturé, réactif

Alkyles — Rôle en Réactivité et Nomenclature Composée

Effet Inductif des Alkyles

- +I (donneurs) : $\text{CH}_3 < \text{C}_2\text{H}_5 < \text{iPr} < \text{t-Bu}$ (ordre croissant de l'effet)
- Stabilisent les carbocations : C^+ tertiaire > secondaire > primaire
- Stabilisent les radicaux de la même façon
- Destabilisent les carbanions (effet opposé)
- Expliquent la règle de Markovnikov et la stabilité relative des alcènes (Zaïtsev)
- Encombrement stérique : t-Bu très encombrant → bloque les attaques nucléophiles

Nomenclature des Composés Substitués

- Exemple : 2-méthylpropane = isobutane (méthyle en position 2 du propane)
- Toluène = méthylbenzène (méthyle sur benzène)
- Xylènes : diméthylbenzènes (ortho, méta, para)
- Dans les halogénures d'alkyle : chlorure de méthyle CH_3Cl , chlorure de t-butyle $(\text{CH}_3)_3\text{CCl}$
- Chlorure de t-Bu réagit par $\text{S}_\text{N}1$ (ionisation facile → C^+ tertiaire stable)
- Chlorure de méthyle réagit par $\text{S}_\text{N}2$ (peu encombré, attaque directe par face arrière)

Alkyles — Réactions de Substitution SN1 et SN2

- SN2 (Substitution Nucléophile Bimoléculaire) : attaque du nucléophile par derrière pendant que le groupe partant part
- SN2 : réaction en une étape, cinétique du 2ème ordre $v = k[\text{substrat}][\text{Nu}]$
- SN2 favorisée : substrats peu encombrés (méthyle, 1°), bons nucléophiles, solvants aprotiques polaires
- SN2 implique une inversion de configuration (inversion de Walden) — stéréochimie retenue → inversée
- SN1 (Substitution Nucléophile Unimoléculaire) : ionisation du substrat → carbocation puis attaque du Nu
- SN1 : cinétique du 1er ordre $v = k[\text{substrat}]$ — étape lente = formation du carbocation
- SN1 favorisée : substrats encombrés (3°, 2°), bons groupes partants (-Br, -I), solvants polaires protiques
- SN1 donne un mélange de stéréoisomères (racémisation) car le carbocation est plan

CH 12

Les Esters

Groupe -COO- : estérification, saponification et applications des esters

Esters — Définition, Structure et Nomenclature

- Définition : dérivés d'acides carboxyliques où le -OH est remplacé par -OR' (alcoxy)
- Groupe fonctionnel : -COO- ou -C(=O)-O- (ester)
- Formule générale : R-COO-R' (R = chaîne acide, R' = chaîne alcool)
- Nomenclature : nom de l'alcool (radical alkyle '-yle') + nom de l'acide ('-oate')
- Exemples : acétate d'éthyle = éthanoate d'éthyle $\text{CH}_3\text{-COO-C}_2\text{H}_5$
- Propanoate de méthyle = $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{-COO-CH}_3$
- Benzoate d'isopropyle : ester souvent utilisé comme parfum et plastifiant
- Polarité : molécule polaire mais pas de liaison H entre molécules $\rightarrow$ Téb < alcool correspondant

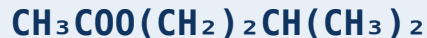
Esters — Exemples et Applications

Acétate d'éthyle



Solvant, vernis à ongles, colle

Acétate d'isoamyle



Arôme de banane

Butyrate d'éthyle



Arôme d'ananas

Salicylate de méthyle



Huile de wintergreen, anti-douleur

Triglycérides



Graisses alimentaires, huiles

Aspirine



Acide acétylsalicylique, AAS

Nitroglycérine



Explosif, vasodilatateur (angine)

Esters — Estérification et Saponification

Réaction d'Estérification

- Acide + Alcool $\rightleftharpoons$ Ester + Eau (équilibre thermodynamique)
- Catalyseur : H^+ (H_2SO_4 dilué ou HCl gazeux)
- Réaction lente à température ambiante, accélérée à chaud
- Constante d'équilibre $K = \frac{[ester][eau]}{[acide][alcool]}$
- Pour les acides simples : $K \approx 4$ (acide + alcool 1°)
- Déplacer l'équilibre (Le Chatelier) : excès d'un réactif, éliminer l'eau, extraire l'ester
- Rendement théorique max. $\approx 67\%$ si proportions stoechiométriques

Saponification (Hydrolyse Basique)

- $R-COO-R' + NaOH \rightarrow R-COONa + R'-OH$
- Hydrolyse basique, totale et irréversible ($\neq$ estérification réversible)
- Produit : sel de carboxylate (carboxylate de sodium) + alcool
- Application historique : fabrication du savon (saponification des triglycérides)
- Savon = sel de sodium d'acide gras (partie hydrophobe + tête hydrophile)
- Hydrolyse acide : réversible, produit l'acide + l'alcool
- Lipase : enzyme biologique qui hydrolyse les esters (digestion des graisses)

Esters — Polyesters et Applications Industrielles

PET (Polytéréphtalate d'éthylène)

Acide téréphtalique + éthylèneglycol → polyester
Bouteilles plastiques, fibres textiles (polyester)
Recyclage : symbole  n°1

Polycarbonates

Polymère ester du CO_3^{2-} avec des diols aromatiques (bisphénol A)
CD, lunettes de protection, équipements optiques
BPA controversé (perturbateur endocrinien)

Cires Naturelles

Esters d'alcools gras à longue chaîne et d'acides gras
Cire d'abeille (myricylpalmitate), cire de carnauba
Cosmétiques, cires de voiture, encaustiques

Parfums et Arômes

Acétate d'isoamyle : banane. Butyrate d'éthyle : ananas.
Octanoate d'éthyle : orange. Lactate : note lactée.
Industrie alimentaire et cosmétique mondiale

Esters — Lipides, Savons et Corps Gras

- Lipides = esters issus du glycérol (triol) et de 3 acides gras (triglycérides)
- Acides gras saturés : chaînes sans double liaison (beurre, lard) → solides à T ambiante
- Acides gras insaturés : une ou plusieurs doubles liaisons C=C (huile d'olive, poisson) → liquides
- Hydrogénation des huiles : rend les acides gras insaturés saturés (margarine)
- Saponification industrielle : $\text{NaOH} + \text{triglycérides} \rightarrow \text{glycérol} + 3 \text{ savons sodiques}$
- Structure du savon : queue hydrophobe (chaîne alkyle) + tête polaire hydrophile ($-\text{COO}^-\text{Na}^+$)
- Action du savon : la queue se glisse dans les graisses, la tête reste dans l'eau → émulsion
- Détergents synthétiques (tensioactifs) : sulfonate d'alkylbenzène (ABS), plus résistants à l'eau dure

CH 13

Oxydoréduction

Transfert d'électrons — Couples rédox, potentiels, piles et électrolyse

Oxydoréduction — Concepts Fondamentaux

- Oxydation : perte d'électrons (un réducteur s'oxyde)
- Réduction : gain d'électrons (un oxydant se réduit)
- Couple oxydant/réducteur (couple rédox) : Ox / Red — liés par $\text{Ox} + n \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Red}$
- Réaction rédox : transfert d'électrons d'un réducteur vers un oxydant
- Équation globale : $\text{Ox}_1 + \text{Red}_2 \rightarrow \text{Red}_1 + \text{Ox}_2$ (les deux demi-équations sont combinées)
- Nombre d'oxydation (n.o.) : état d'oxydation d'un atome dans une molécule ou ion
- Règles de calcul du n.o. : F toujours -1 ; O toujours -2 (sauf peroxydes) ; H +1 (sauf hydrures) ; somme = charge globale
- Oxydation = augmentation du n.o. ; Réduction = diminution du n.o.

Oxydoréduction — Nombre d'Oxydation et Exemples

- C dans CH_4 : n.o.(C) = -4 (4H à +1 chacun, molécule neutre)
- C dans CO_2 : n.o.(C) = +4 (2O à -2 chacun, molécule neutre)
- Mn dans MnO_4^- : n.o.(Mn) = +7 ($4\text{O} \times -2 = -8$; $-8 + \text{Mn} = -1 \rightarrow \text{Mn} = +7$)
- Cr dans $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$: n.o.(Cr) = +6 ($7\text{O} \times -2 = -14$; $2\text{Cr} - 14 = -2 \rightarrow \text{Cr} = +6$)
- Fe dans Fe_2O_3 : n.o.(Fe) = +3
- Combustion : C dans CH_4 passe de -4 à +4 dans $\text{CO}_2 \rightarrow$ oxydation (perte de 8 e^- par C)
- Réduction de Fe_2O_3 par CO : Fe^{3+} (+3) $\rightarrow \text{Fe}^0$ (0) $\rightarrow$ réduction de fer (haut fourneau)
- Équilibrer une équation rédox : égaliser les transferts d'électrons (méthode de l'ion-électron)

Oxydoréduction — Potentiel Électrochimique E°

Potentiel Standard E°

- Potentiel standard E° : mesuré par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH, $E^\circ = 0 \text{ V}$)
- Plus E° est élevé, plus l'oxydant du couple est fort
- Couple avec E° le plus élevé réagit en tant qu'oxydant face au couple de E° plus faible
- Exemples : F_2/F^- ($E^\circ = +2,87 \text{ V}$) ; Cl_2/Cl^- (+1,36 V) ; $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (+0,77 V)
- Zn^{2+}/Zn ($E^\circ = -0,76 \text{ V}$) → le zinc s'oxyde facilement (réducteur fort)
- Cu^{2+}/Cu ($E^\circ = +0,34 \text{ V}$) → le cuivre se réduit facilement (oxydant modéré)

Prévision des Réactions Rédox

- Règle du gamma (ou règle des potentiels) : Ox_1 réagit avec Red_2 si $E^\circ(\text{Ox}_1/\text{Red}_1) > E^\circ(\text{Ox}_2/\text{Red}_2)$
- Force électromotrice (f.é.m.) : $E_{\text{cell}} = E^\circ_{\text{cathode}} - E^\circ_{\text{anode}} > 0 \rightarrow$ réaction spontanée
- Relation énergie-potentiel : $\Delta G^\circ = -n \cdot F \cdot E^\circ_{\text{cell}}$ ($F = 96\,485 \text{ C/mol}$)
- n = nombre d'électrons échangés ; F = constante de Faraday
- Si $E^\circ_{\text{cell}} > 0$: $\Delta G^\circ < 0 \rightarrow$ réaction spontanée
- Équation de Nernst : $E = E^\circ + (0,0592/n) \times \log([\text{Ox}]/[\text{Red}])$ à 25°C

Oxydoréduction — Table des Potentiels Standards (sélection)

Couple Ox/Red	E° (V)	Caractère
F_2 / F^-	+2,87	Oxydant très fort
MnO_4^- / Mn^{2+} (acide)	+1,51	Oxydant fort ($KMnO_4$)
Cl_2 / Cl^-	+1,36	Oxydant fort
$Cr_2O_7^{2-} / Cr^{3+}$ (acide)	+1,33	Oxydant fort (bichromate)
O_2 / H_2O (acide)	+1,23	Oxydant moyen
Fe^{3+} / Fe^{2+}	+0,77	Oxydant moyen
Cu^{2+} / Cu	+0,34	Faiblement oxydant
H^+ / H_2	0,00	Référence (ENH)
Fe^{2+} / Fe	-0,44	Réducteur modéré
Zn^{2+} / Zn	-0,76	Réducteur fort
Al^{3+} / Al	-1,66	Réducteur très fort
Li^+ / Li	-3,04	Réducteur le plus fort

Oxydoréduction — Les Piles Électrochimiques

- Pile : dispositif convertissant l'énergie chimique d'une réaction rédox en énergie électrique
- Anode (-) : électrode où a lieu l'oxydation (le réducteur s'oxyde, libère des e^-)
- Cathode (+) : électrode où a lieu la réduction (l'oxydant accepte des e^-)
- Pont salin : permet le passage des ions entre les deux demi-cellules (neutralité électrique)
- Pile Daniell : $\text{Zn} \mid \text{Zn}^{2+} \parallel \text{Cu}^{2+} \mid \text{Cu}$ — f.é.m. = $0,34 - (-0,76) = 1,10 \text{ V}$
- Anode Zn : $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2e^-$ (oxydation) ; Cathode Cu : $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$ (réduction)
- Pile lithium-ion : Li^+ circule entre anode graphite et cathode LiCoO_2 ($E \approx 3,7 \text{ V}$)
- Pile à combustible : $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ (énergie 100% électrique) — pas de combustion

Oxydoréduction — Électrolyse

Principe de l'Électrolyse

- Électrolyse : forcer une réaction rédox NON spontanée grâce à un courant électrique
- Source de courant externe impose la direction du transfert d'électrons
- Cathode (-) : réduction forcée (les cations se réduisent)
- Anode (+) : oxydation forcée (les anions s'oxydent)
- Inverse d'une pile : on transforme de l'énergie électrique en énergie chimique
- Lois de Faraday : masse déposée $m = (M \times I \times t) / (n \times F)$

Applications Industrielles

- Électrolyse de l'eau : $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ (production d'hydrogène vert)
- Électrolyse NaCl (procédé chlore-soude) : $2\text{NaCl} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2 + 2\text{NaOH}$
- Affinage de l'aluminium : Al_2O_3 fondu $\rightarrow$ Al pur (Hall-Héroult, 5% énergie mondiale)
- Galvanoplastie : dépôt de métal (chrome, or, nickel) sur une pièce
- Rechargement des batteries : réaction inverse de la décharge (électrolyse)
- Production de cuivre pur (99,99%) pour l'industrie électrique

Oxydoréduction — Corrosion et Protection

Corrosion électrochimique

Fe (anode) s'oxyde en $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ (rouille)
 O_2 et H_2O sont nécessaires. Paire galvanique Fe/Cu accélère la corrosion.

Protection par galvanisation

Zinc déposé sur l'acier (galvanisation)
Le Zn ($E^\circ = -0,76\text{V}$) s'oxyde en premier → protection sacrificielle
Armatures pont, tôles voitures

Passivation (Inox / Al)

L'aluminium forme une couche oxyde Al_2O_3 (passivante)
Inox : alliage Fe-Cr-Ni ; couche Cr_2O_3 protectrice
Pas de corrosion si couche intacte

Impressions Biologiques

Respiration cellulaire : oxydation du glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$)
Chaîne respiratoire mitochondriale : transfert e^- vers O_2
Photosynthèse : réduction du CO_2 par l'énergie lumineuse

Oxydoréduction — Rédox en Chimie Organique

- Degré d'oxydation du carbone en chimie organique :
- CH_4 (-4) $\rightarrow$ CH_3OH (-2) $\rightarrow$ H_2CO (0) $\rightarrow$ HCOOH (+2) $\rightarrow$ CO_2 (+4)
- Oxydation d'un alcool primaire : $\text{R-CH}_2\text{OH} \rightarrow \text{R-CHO} \rightarrow \text{R-COOH}$ (gain de n.o. de +2 à chaque étape)
- Oxydation d'un alcool secondaire : $\text{R-CHOH-R}' \rightarrow \text{R-CO-R}'$ (cétone, n.o. +2)
- Réduction de RCHO par NaBH_4 : aldéhyde $\rightarrow$ alcool primaire (réduction +2 $\rightarrow$ -1 pour le C)
- LiAlH_4 : agent réducteur puissant, réduit acides, esters, amides en alcools
- Équilibrer une demi-réaction organique : ajuster O (ajouter H_2O) puis H (ajouter H^+), puis e^-
- Combustion = oxydation complète : $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (n.o. C : -4 $\rightarrow$ +4, gain de 8 e^-)

Oxydoréduction — Méthode d'Équilibrage des Équations Rédox

- Méthode de l'ion-électron (en solution aqueuse acide ou basique) :
- Étape 1 : séparer la réaction globale en deux demi-réactions (oxydation et réduction)
- Étape 2 : équilibrer les atomes autres que O et H dans chaque demi-réaction
- Étape 3 : équilibrer les O en ajoutant des molécules H_2O
- Étape 4 : équilibrer les H en ajoutant des ions H^+ (milieu acide) ou OH^- (milieu basique)
- Étape 5 : équilibrer les charges en ajoutant des e^- du bon côté
- Étape 6 : multiplier les demi-réactions pour que le nombre d' e^- soit identique dans les deux
- Étape 7 : additionner les deux demi-réactions et simplifier

Récapitulatif — Groupes Fonctionnels et Familles

Famille	Groupe Fonctionnel	Suffixe IUPAC	Exemple
Alcane	C–C simple	-ane	Butane C ₄ H ₁₀
Alcène	C=C double	-ène	But-2-ène
Alcyne	C≡C triple	-yne	Propyne
Alcool	–OH	-ol	Éthanol
Aldéhyde	–CHO	-al	Éthanal
Cétone	–C(=O)–	-one	Propanone
Acide carboxylique	–COOH	acide -oïque	Acide acétique
Ester	–COO–	-oate de -yle	Acétate d'éthyle
Acide aminé	–NH ₂ et –COOH	acide -ique	Alanine
Composé arom.	cycle benzène	-benzène/-ène	Toluène

Récapitulatif — Réactions et Tests Caractéristiques

Réactif / Test	Observation	Famille détectée
Eau de brome $\text{Br}_2/\text{H}_2\text{O}$	Décoloration	Alcène ou alcyne (double/triple liaison)
KMnO_4 (violet)	Décoloration	Alcène, alcool primaire ou secondaire, aldéhyde
Réactif de Tollens $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2^+$	Miroir d'argent	Aldéhyde ($\neq$ cétone)
Réactif de Fehling (Cu^{2+} bleu)	Précipité rouge Cu_2O	Aldéhyde ($\neq$ cétone)
DNPH (réactif de Brady)	Précipité jaune-orange	Aldéhyde OU cétone ($\text{C}=\text{O}$)
Iodoforme I_2/NaOH	Précipité jaune CHI_3	Méthylcétone $\text{CH}_3\text{CO}-$ ou éthanol
Ninhydrine	Couleur violette	Acide α -aminé (jaune pour proline)
Na_2CO_3	Effervescence CO_2	Acide carboxylique fort ou acide minéral
$\text{Cu}(\text{NH}_3)_2^+$ (Cuivrique)	Précipité rouge-brique	Alcyne terminal (acétylure de cuivre)

FÉLICITATIONS !

Vous avez parcouru les 13 chapitres du cours de Chimie Organique

Alcanes

Alcènes

Alcynes

Alcools

Ac. Carb.

Ac. Aminés

Aldéhydes

Cétones

Aroma.

Acide-Base

Alkyles

Esters

Redox

Maîtrisez les formules, les groupes fonctionnels, les réactions et les tests de reconnaissance.