

PHYSIQUE-CHIMIE

1STD2A



PHYSIQUE - CHIMIE

1STD2A

Cyrus Zalian-Rahatabad

hilbRt

SOMMAIRE

01

MATÉRIAUX : GÉNÉRALITÉS (P.6)

CLASSES DE MATÉRIAUX / MATÉRIAUX INNOVANTS /
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES / IMPACT ENVIRONNEMENTAL

02

LES MATÉRIAUX ORGANIQUES (P.20)

L'ATOME DE CARBONE / FAMILLES D'HYDROCARBURES ET
GROUPES CARACTÉRISTIQUES / POLYMÈRES

03

LES MÉTAUX (P.46)

OXYDO-RÉDUCTION / CORROSION / PROTECTION
CONTRE LA CORROSION / ALLIAGES

04

LES MINÉRAUX (P.64)

VERRE / SOLIDES CRISTALLINS ET AMORPHES / CÉRA-
MIQUES

05

LA LUMIÈRE (P.76)

ONDE ET ÉNERGIE / INTERACTION MATIÈRE-RAYONNE-
MENT / PHOTOMÉTRIE / SOURCES LUMINEUSES



06

LES COULEURS (P.100)

SYNTHÈSE ADDITIVE ET SOUSTRACTIVE DES COULEURS /
DIAGRAMME DE CHROMATICITÉ / GAMUT

07

LA PEINTURE (P.118)

CONSTITUANTS / SÉCHAGE / FABRICATION

08

LA PHOTOGRAPHIE (P.130)

OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE / ÉLÉMENTS DE L'APPAREIL
PHOTOGRAPHIQUE / RÉGLAGES

09

LA RESTAURATION (P.150)

OBSERVATION GRÂCE AUX ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES
/ ANALYSE PAR INTERACTION MATIÈRE-RAYONNEMENT

PHYSIQUE-CHIMIE 1STD2A PROGRAMME 2019



MATÉRIAUX : GÉNÉRALITÉS

Objectifs du chapitre : Distinguer les grandes classes de matériaux / Définir un matériau composite / Définir un nanomatériau / Connaître les principales propriétés physiques d'un matériau / Estimer l'impact environnemental d'un matériau.

01

MARK FORNES
Minima | Maxima
2017



01. ACTIVITÉ

MINIMA | MAXIMA

Doc 1

Minima | Maxima est une œuvre de Marc Fornes commandée pour l'exposition universelle de 2017 d' Astana au Kazakhstan. Marc Fornes génère informatiquement ses architectures organiques autoportantes. Il utilise alors un matériau baptisé « Structural Stripes », composé de trois couches de pièces d'aluminium. D'après Fornes, « Structural Stripes » est comparable à la fibre de verre ou de carbone à la différence que chaque élément ne nécessite pas d'être en tension et qu'il ne nécessite aucun moule ou échafaudage temporaire.



FIGURE 1.1: *Minima | Maxima*, Marc Fornes, 2017

Doc 2

La fibre de verre est un filament de verre mais désigne le plus souvent un polymère renforcé par cette fibre¹. Les polymères utilisés sont le plus souvent le polyester, le vinylique ou encore l'époxy. Ces matériaux combinent résistance à la traction, grâce à la fibre de verre, et résistance à la compression, grâce à la résine plastique offrant ainsi des propriétés mécaniques améliorées par rapport à chacun de ses composants pris individuellement.

La fibre de carbone est une fibre composée principalement d'atomes de carbone agglomérés dans des cristaux microscopiques. Tout comme la fibre de verre, la fibre de carbone est adjointe à un polymère afin d'offrir des propriétés mécaniques améliorées (résistance élevée à la traction et à la compression, et flexibilité).

Si les fibres de verre et de carbone sont théoriquement recyclables, l'opération est complexe et coûteuse. Les résines thermodurcissables qui composent la plupart des ces matériaux ne sont pas les plus simples à opérer.

Aujourd'hui, deux options existent : le recyclage mécanique, qui consiste à broyer le matériau et à récupérer le résultat de cette opération pour l'intégrer à un nouveau matériau, ou le recyclage par incinération avec production d'énergie.



FIGURE 1.2: À gauche : la construction de l'A380 fait appel à des matrices organiques renforcées de fibre de verre; à droite : carrosserie en fibre de carbone.

¹d'autres métaux peuvent être renforcés par la fibre de verre, comme le béton, le matériau obtenu étant le Glass Fiber Reinforced Concrete ou GFRC

Doc 3

Un matériau composite est un produit issu de la combinaison d'au moins deux matériaux différents et non miscibles. Il comprend :

- un squelette qui assure la rigidité du matériau, appelé renfort,
- et une enveloppe autour de ce renfort, appelée matrice, qui assure la cohésion et la forme du matériau tout en le protégeant.

Le but est ainsi de créer un nouveau matériau aux caractéristiques améliorées, par rapport à ces composants pris séparément, en alliant les qualités de chaque tout en minimisant leurs défauts.

Doc 4

Le calcul de la masse m d'un objet à partir de sa masse volumique ρ et de son volume V est donnée par la formule

$$m = \rho \times V.$$

Ci-dessous sont données les masses volumiques de l'aluminium, de la fibre de verre et de la fibre de carbone.

	Aluminium	Fibre de verre	Fibre de carbone
Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	2700	2600	1800

À partir des documents précédents, répondre aux questions suivantes :

1. Qu'est-ce qu'un matériau composite?
2. À quelle catégorie de matériau appartient la fibre de verre et la fibre de carbone? Justifier.
3. À quelle catégorie de matériau appartient « Structural Stripes »?
4. Quels sont les avantages de « Structural Stripes » comparativement à la fibre de verre ou de carbone.
5. Le volume total de l'œuvre de Marc Fornes étant de 12m³ calculer le poids de cette structure.

02. COURS

LES MATERIAUX

LES FAMILLES DE MATERIAUX

- ▶ Il existe trois grandes familles de matériaux :
 - les **materiaux métalliques**,
 - les **materiaux organiques**
 - et les **materiaux minéraux**.
- ▶ Les matériaux métalliques peuvent être :
 - des métaux purs, c'est-à-dire composés d'un seul élément chimique, comme le fer,
 - ou des alliages, c'est-à-dire composés d'au moins deux éléments chimiques, comme
 - le bronze (alliage de cuivre et d'étain),
 - le laiton (alliage de cuivre et de zinc),
 - ou les aciers inoxydables (alliages de fer, de carbone, de nickel et de chrome).



FIGURE 1.3: Instrument de musique en laiton, un alliage de cuivre et de zinc.

- ▶ Les matériaux métalliques sont de bons conducteurs thermiques et électriques. Ils sont aussi durs, rigides et opaques à la lumière visible.
- ▶ Les matériaux organiques sont essentiellement composés de **carbone**, mais aussi d'hydrogène, d'oxygène, d'azote, de souffre et de phosphore. Ils existent sous forme naturelle (bois, charbon, laine, cuir, caoutchouc), artificielle, c'est-à-dire obtenu par modification chimique d'un matériau naturel (nitrocellulose) ou synthétique, c'est-à-dire issu de la polymérisation d'un monomère (silicone, PVC, élastomères, etc.).



FIGURE 1.4: Matériaux organiques. De gauche à droite : bois, laine, tuyau en PVC.

- ▶ Les matériaux minéraux sont des matériaux qui ne sont ni métalliques, ni organiques. Ils sont principalement composés d'oxydes et de carbures comme le verre, le ciment et les céramiques. Ils résistent à la corrosion, sont de bons isolants thermiques et électriques, et possèdent une température de fusion élevée.

LES MATERIAUX INNOVANTS

- ▶ Les **materiaux composites** sont le produit de la combinaison d'au moins deux matériaux différents non miscibles. Le but est d'obtenir un matériau présentant des caractéristiques dont les composants, seuls, n'avaient pas (très souvent la légèreté et la rigidité).
- ▶ **Exemple :** le béton armé est un matériau composite issu de la combinaison du béton et de l'acier. Il allie légèreté et rigidité, qualités que ses composants seuls n'ont pas.
- ▶ Dans un matériau composite on distingue :
 - **le renfort**, squelette du matériau dont le rôle est d'assurer sa solidité;
 - **la matrice**, enveloppe autour du renfort, qui assure la cohésion et la forme du matériau tout en protégeant le renfort, en répartissant le plus uniformément possible les contraintes mécaniques et en l'isolant des attaques du milieu extérieur.
- ▶ Les renforts peuvent être de plusieurs types :
 - **des particules**, comme des cailloux durs dans le béton, ou des microbilles de verre, de la céramique;
 - **des fibres**, comme des fibres de carbone, de verre ou du kevlar, alliant légèreté et résistance.

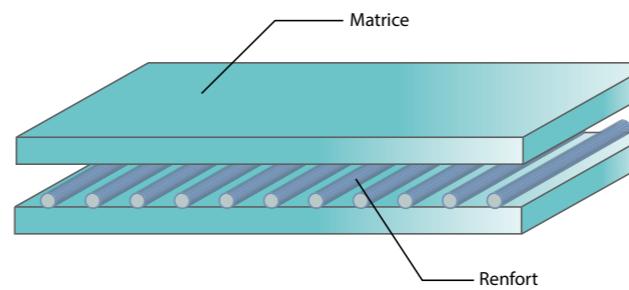


FIGURE 1.5: À gauche : Renfort et matrice d'un matériau composite; à droite : Béton armé (matrice de béton et renfort en acier).

- ▶ Les **nanomatériaux** sont des matériaux dont l'une au moins des dimensions est comprise entre 1 et 100 nanomètres (10^{-9} mètres).
- **Exemples :**
 - ▶ les **nanoparticules**, comme les nanoparticules de dioxyde de zinc, de latex, d'alumine, sont des nanomatériaux dont les trois dimensions sont à l'échelle nanométrique,

- les **nanotubes de carbone**, dont deux dimensions sont à l'échelle nanométriques,
- et les nano-feuillets, comme le **graphène**, dont une seule dimension est à l'échelle nanométrique.
- Le passage de la matière à des dimensions nanométriques fait apparaître des propriétés inattendues et souvent totalement différentes de celles des mêmes matériaux à l'échelle micro ou macroscopique, notamment en terme de résistance mécanique, de réactivité chimique, de conductivité électrique et de fluorescence. Par exemple, l'or est totalement inactif à l'échelle micrométrique alors qu'il devient un excellent catalyseur de réactions chimiques lorsqu'il prend des dimensions nanométriques.

LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX ET LEUR IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

- Afin de répondre à un cahier des charges, qui fixe le plus souvent les contraintes de fabrication, d'usage et de destruction ou de recyclage, le choix d'un matériau se fait suivant des critères chimiques, physiques et mécaniques.
- Parmi les contraintes physiques, on trouve l'exposition à la chaleur, à la lumière, aux courants électriques et/ou magnétiques.
- Les contraintes chimiques sont associées aux transformations subies par le matériau sous l'action d'autres espèces chimique, comme la corrosion due à l'eau.
- Les critères mécaniques correspondent au comportement du matériau lorsqu'il est soumis à des déformations (étirement, compression, choc).

LES MATÉRIAUX ET LE RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT

- Les enjeux environnementaux sont désormais primordiaux dans l'élaboration des cahiers de charges. Respecter l'environnement, être recyclable et réduire son impact environnemental en limitant l'utilisation de matières premières et d'énergie sont également des contraintes à prendre en compte dans le choix d'un matériau.
- **Les matériaux biodégradables** peuvent se dégrader, dans un temps court, au regard du temps humain, en eau, dioxyde de carbone, méthane et biomasse sous l'action de micro-organismes (bactéries, champignons) réduisant ainsi l'impact de ces derniers sur l'environnement.
- **Les matériaux biosourcés** sont issus de la matière organique renouvelable (biomasse), d'origine végétale ou animale : bois, chanvre, paille, ouate de cellulose, textiles recyclés, etc. Ils peuvent être utilisés comme matière première dans des produits de construction et de décoration. Leur impact sur l'environnement est limité lorsque l'on considère leur empreinte carbone (absorbent le plus souvent du CO₂, nécessitent peu d'intermédiaires dans leur fabrication) ou leur cycle de vie (ce sont pour la plupart des matériaux recyclables).



FIGURE 1.6: Plastiques biodégradables en acide polylactique (PLA).

TP 03.

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES MATÉRIAUX

MASSE VOLUMIQUE

- La masse volumique ρ d'un matériau est une grandeur égale au quotient de sa masse m par son volume V :

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Si la masse du matériau est donnée en kg et celle du volume en m³, la densité sera exprimée en kg/m³.

- **Rappel :** le volume d'un pavé droit de longueur L , de largeur l et de hauteur h est donné par

$$V = L \times l \times h.$$

Le volume d'un cylindre de hauteur h , et dont la base circulaire a pour rayon r est donné par

$$V = \pi r^2 \times h.$$

- Dans les cas où l'objet dont on cherche à déterminer le volume est de forme plus complexe, on peut, lorsque cela est possible, l'immerger dans un volume d'eau liquide et noter la variation de volume. La différence avec le volume d'eau initial donnera le volume de l'objet immergé.

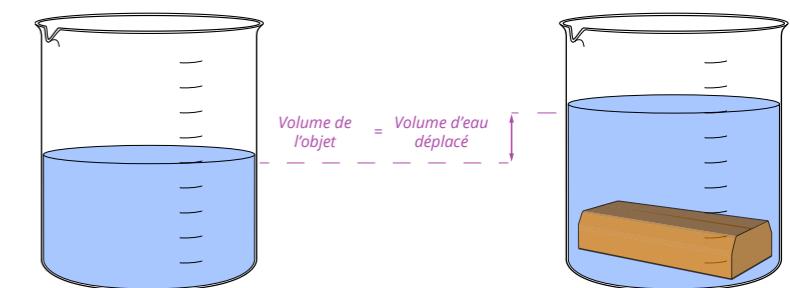


FIGURE 1.7: Détermination du volume d'un objet.

- **Mise en pratique :** Proposer et appliquer un protocole expérimental afin de déterminer la masse volumique du cuivre, du fer et du plomb

Exercice :

1. Déterminer la masse volumique d'un matériau de forme cylindrique pesant 700g et mesurant 10cm de hauteur pour un diamètre de base de 8cm.
2. La fibre de verre a une masse volumique de 1,4g/cm³, le zinc a une masse volumique de 7,134g/cm³, le verre a une masse volumique de 2,5g/cm³. À l'aide de ces données, identifier le matériau présenté à la question précédente.

CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

► La conductivité thermique λ d'un matériau, exprimée en $\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$, caractérise sa capacité à conduire de la chaleur : plus sa valeur sera faible, plus le matériau sera isolant.

► La résistance thermique R_{th} , exprimée en K.W^{-1} , mesure la capacité d'une paroi à limiter un transfert thermique. Plus R_{th} sera grande, plus la paroi sera isolante. La relation entre la conductivité thermique et la résistance thermique est donnée par la relation :

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{S \times \lambda}$$

où S (en m^2) est la surface de la paroi et e son épaisseur (en m).

► On définit la résistance thermique surfacique d'une paroi R_S , exprimée en $\text{K.m}^2.\text{W}^{-1}$ comme la résistance thermique pour une surface de 1m^2 . D'où :

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda}.$$

► Pour mesurer la résistance ou la conductivité thermique d'un matériau, il est nécessaire de connaître les températures de part et d'autre de la paroi (en kelvin), ainsi que le flux thermique ϕ (en watt) traversant la paroi. Ce flux est le quotient entre la quantité de chaleur échangée Q (en joule) et la durée de cet échange Δt (en seconde) :

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t}.$$

► La relation entre résistance thermique surfacique et le flux thermique Φ traversant la paroi de surface S , pour une différence de température ΔT de part et d'autre de la paroi est donnée par :

$$R_S = \frac{S \times \Delta T}{\Phi}.$$

► **Dispositif :** le montage ci-dessous, soumet la paroi d'un matériau à une différence de température constante. D'un côté, la température de la vapeur d'eau produite par le générateur de vapeur est de 100°C , de l'autre, la température du bloc de glace est de 0°C . Pour mesurer le flux thermique ϕ , nous devons connaître la quantité de chaleur échangée Q pendant un intervalle de temps Δt .

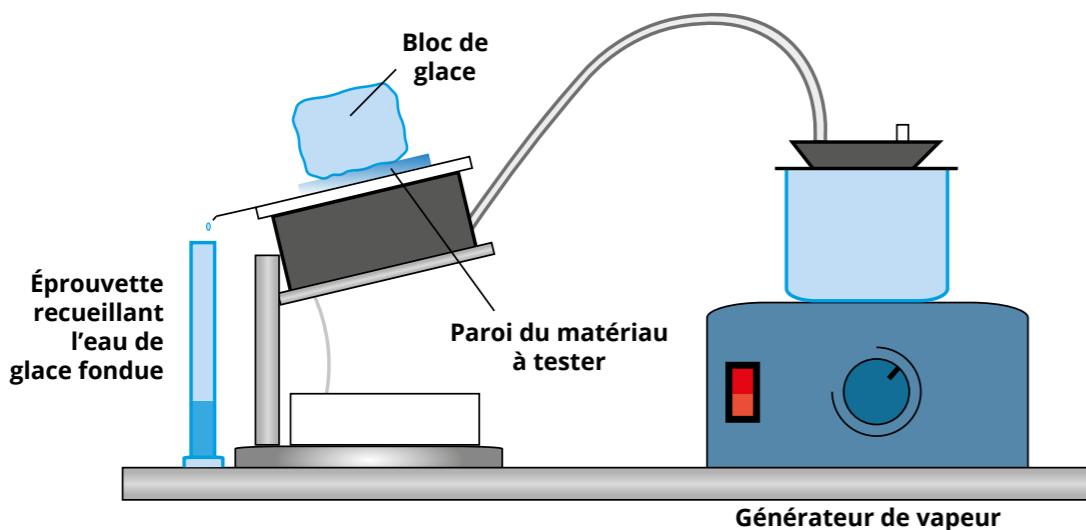


FIGURE 1.8: Dispositif de mesure de la résistance thermique surfacique d'un matériau.

► **Protocole expérimental :** pour déterminer la quantité de chaleur échangée, nous allons mesurer la masse d'eau issue de la fonte de la glace. La quantité de chaleur échangée sera alors donnée par $Q = m_{\text{eau}} \times L_{\text{eau}}$ où m est en gramme et $L_{\text{eau}} = 3,39\text{J.g}^{-1}$ est appelée la chaleur latente de fusion de l'eau.

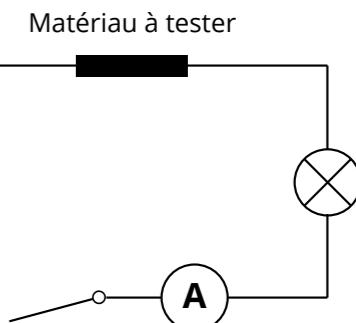
1. Dans un premier temps, nous devons connaître la masse de glace qui fond à température ambiante.
 - a. Mettre en place le dispositif sans brancher le générateur de vapeur et récolter l'eau issue de la fonte du bloc de glace pendant une durée de 5 minutes.
 - b. Mesurer m_{eau} .
 - c. En déduire la quantité de chaleur captée Q_0 par la glace sans le générateur de vapeur.
2. Répéter l'opération mais cette fois-ci en reliant le générateur de vapeur au dispositif.
 - a. Mesure m_{eau} .
 - b. En déduire la quantité de chaleur captée Q_V par la glace avec le générateur de vapeur.
3. En déduire l'énergie réelle captée par la glace $Q_V - Q_0$.
4. En déduire la résistance thermique surfacique du matériau.

CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE

► Matériel :

- 1 générateur
- 1 interrupteur
- 1 lampe dans sa douille
- 1 multimètre
- 2 pinces crocodiles
- fils de connexion
- Matériaux à tester : fer, zinc, cuivre, papier, verre, plastique

► **Montage :** compléter le montage ci-dessous en indiquant les bornes + et - du générateur, le sens du courant en rouge et le sens des électrons libres en bleu :



► Protocole :

- Réaliser le montage sans échantillon et vérifier qu'il fonctionne.
- Réaliser le montage ci-dessus en testant chacun de matériaux donnés et compléter le tableau ci-dessous :

Matériau	Fer	Zinc	Cuivre	Papier	Verre	Plastique
La lampe brille-t-elle ?						
Intensité						

► **Compte-rendu :** à partir des résultats, classer les isolants et les conducteurs électriques.

04. EXERCICES

FAMILLES DE MATERIAUX

01

Rappels de cours :

1. Citer les trois grandes familles de matériaux.
2. Qu'est-ce qu'un alliage ?
3. Quelle est la composition du bronze ?
4. Quel est le principal élément présent dans les matériaux organiques ?
5. Citer un matériau appartenant à la famille des minéraux.

02

Associer chacun des matériaux ci-dessous à une famille de matériaux :

cuivre, verre, bois, bronze, aluminium, nylon, charbon, céramique, PVC, acier, silicone.

03

Le *Cloud Gate* est une sculpture urbaine réalisée par l'artiste britannique Anish Kapoor et exposée au Millennium Park de Chicago. Surnommée *The Bean* (« Le Haricot ») en raison de sa forme, son extérieur consiste en 168 plaques d'acier inoxydable polies soudées entre elles. Elle est haute de 10 mètres, sa base mesure 20 m × 13 m et elle pèse 99,8 tonnes.



1. Qu'est-ce qu'un alliage ?
2. En quoi l'acier inoxydable est-il un alliage ?
3. À quelle famille de matériau appartient l'acier inoxydable ?

04

« The Looking Glass » est le nom donné à la devanture d'un magasin de mode d'Amsterdam conçue par UNStudio, une société d'architecture néerlandaise. La façade en briques est percée de trois plaques de verre, fixées aux panneaux adjacents et à des bords en aciers inoxydables par du silicium. Les ouvertures ainsi créées imite la forme de textiles fluides.



1. Quels sont les matériaux utilisés pour « The Looking Glass » ?
2. À quelle famille de matériau appartient chacun d'entre eux ?

MATERIAUX INNOVANTS

05

Rappels de cours :

1. Qu'est-ce qu'un matériau composite ?
2. Quel est le rôle du renfort dans un matériau composite ?
3. Qu'est-ce que la matrice d'un matériau composite ?
4. Qu'est-ce qu'un nanomatériau ?

06

Les chaises *Santos* du designer Joel Escalona dont la forme suggère celle d'un verre de champagne, sont réalisées à partir d'un plastique renforcé de fibres de verre produit par Grupo HeWi.



1. À quelle catégorie appartient le matériau utilisé pour les chaises *Santos* ?
2. Quel est le renfort et quelle est la matrice du matériau présenté ?

07

L'école maternelle Nová Ruda à Liberec en République tchèque est constituée d'une façade translucide à double peau en fibre de verre et a été conçue par le cabinet d'architecte Petr Stolín Architekt. Le bâtiment intérieur est recouvert d'un cadre en bois revêtu d'un matériau composé d'une résine polymère et de fibre de verre, et toute la structure est ensuite enveloppée par une coque en acier et en fibre de verre.



1. Quels sont les matériaux utilisés pour la structure de l'école maternelle Nová Ruda ?
2. À quelle famille de matériau appartient chacun d'entre eux ?

08

Interchange Pavillon est une œuvre réalisée par le Studio Chris Fox à partir de rails récupérés sur d'anciennes voies ferrées. Exposée à Sydney, l'ouvrage comprend 250 mètres de rails en acier inoxydable, 15 tonnes de béton armé renforcé à la fibre de verre et 1 400 morceaux de bois. Construits en sections, les rails de ce « pavillon d'échange » suivent plusieurs chemins qui convergent en un point central situé au sommet de l'œuvre.



- Quels sont les matériaux utilisés pour la structure de l'*Interchange Pavillon*?
- À quelle famille de matériau appartient chacun d'entre eux?
- Quels sont les composants d'un acier inoxydable?
- Quelle est la matrice du béton armé renforcé à la fibre de verre?
- Quel est le renfort du béton armé renforcé à la fibre de verre?

09

L'entreprise Bühler AG a mis au point un additif baptisé Oxylink, contenant des nanoparticules d'oxydes métalliques conférant aux peintures une meilleure résistance à l'arrachage, une plus grande résistance à l'humidité tout en permettant à la peinture de sécher plus rapidement et de repousser davantage les salissures. Avec ces améliorations, les peintures Bühler sont dans de nombreux cas plus performantes que des peintures à base de solvants organiques et permettent de les remplacer dans de nombreuses applications.

- Définir ce qu'est un nanomatériau.
- Quels sont les nanomatériaux présents dans l'Oxylink?
- Quels rôles jouent-ils dans la composition des peintures Bühler?

PROPRIÉTÉS DES MATERIAUX

10

Rappels de cours :

- Quelles sont les trois principaux critères rentrant dans le choix d'un matériau?
- Qu'est-ce qu'un matériau biodégradable?
- Qu'est-ce qu'un matériau biosourcé?

11

Une société de design travaille sur le packaging d'un parfum de luxe. La forme de l'emballage choisi sera un cylindre de hauteur 10cm et dont la base circulaire aura un rayon de 3cm. Afin de pouvoir y loger le parfum, l'emballage sera usiné en son centre afin de retirer un cylindre de 8cm de hauteur et d'un rayon de 2cm pour les bases.

L'équipe en charge du design de l'emballage a le choix entre trois matériaux : le verre, l'acier et le polycarbonate. Un tableau résume les principales données rassemblées par l'équipe afin de comparer chacun des matériaux.

	Acier	Verre	Polyc.
Prix (€/kg)	0,439	0,053	2,7
Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	7500	2500	1200
Résistance aux chocs	+++	-	+++
Résistance aux rayures	-	+	-
Résistance aux agents chimiques	-	+	-
Longévité coloration	-	++	+

- À quelle famille appartient chacun des matériaux envisagés?
- Représenter par un schéma l'emballage imaginé. On y fera figurer les dimensions de l'objet.
- Calculer le volume de l'emballage.
- Calculer le poids de l'emballage pour chacun des matériaux envisagés.
- En prenant en compte l'impact environnemental, discuter du meilleur choix de matériau dans le contexte posé.

12

La Pontiac Plexiglas Deluxe Six de 1939, surnommée « *Ghost car* », conçue par le designer Norman Bel Geddes, fut la première voiture à avoir une carrosserie entièrement réalisée en Plexiglas fabriquée aux États-Unis. Le Plexiglas est le nom commercial donné au polyméthacrylate de méthyle, ou PMMA, un polymère de très grande transparence, très limpide et avec un aspect brillant.

À l'aide du tableau ci-dessous lister les avantages et inconvénients de l'utilisation de PMMA en lieu et place de l'acier (on inclura une discussion sur l'impact environnemental de chacune des solutions).

	Acier	PMMA
Prix (€/kg)	0,439	3,126
Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	7500	1188
Indice de réfraction n	2,5	1,5
Conductivité thermique λ (W.m ^{-1.K⁻¹)}	50,2	0,18
Résistance aux chocs	Bonne	Faible
Résistance aux rayures	Faible	Excellent
Résistance aux agents chimiques	Faible	Bonne
Recyclable	Oui	Oui

13

Un artiste souhaite réaliser un œuvre comprenant un pavé de dimensions 25cm × 10cm × 7cm et une boule de rayon 7cm. Pour cela il peut faire appel à un maître verrier pour réaliser cette pièce en verre, ou à un artisan ferronnier pour réaliser celle-ci en cuivre.

Calculer le poids des pièces pour chacun des matériaux envisagés.

Données :

- Masse volumique du cuivre = 8,96 g/cm³
- Masse volumique du verre = 2,5 g/cm³

14

Le graphène est un matériau en deux dimensions, composé d'atomes de carbone arrangés selon un motif hexagonal et dont l'épaisseur est celle d'un atome de carbone. La marque londonienne CuteCircuit a conçu une robe capable de changer de couleur en fonction des émotions de la personne qui la porte. Élaborée en polyamide, elle comporte des capteurs de mouvements de respiration qui sont reliés, grâce à des éléments électro-conducteurs en graphène, à un microprocesseur qui va gérer l'activation de micro-LEDs.



- Pourquoi la robe conçue par CuteCircuit peut-elle être considérée comme un textile intelligent?
- Quels sont les matériaux rentrant dans la composition de cette robe?
- À quelle famille appartient chacun de ces matériaux?
- Quelle propriété physique du graphène est exploitée?
- Pourquoi le graphène a-t-il été utilisé plutôt qu'un autre matériau conducteur?

LES MATÉRIAUX ORGANIQUES

Objectifs du chapitre : Décrire la constitution de l'atome de carbone / Connaître les principaux modes de représentation d'une molécule organique / Identifier les grandes familles d'hydrocarbures, de composés oxygénés et azotés / Définir un polymère et identifier son motif élémentaire / Différencier polyaddition et polycondensation / Définir l'indice de polymérisation / Différencier plastiques thermodurcissables et thermoplastiques / Relier la température de transition vitreuse à l'utilisation d'un plastique.

02

QIYUN DENG
Graft
2013

01. ACTIVITÉ

GRAFT - QIYUN DENG

Doc 1

Graft est un ensemble d'ustensiles et de bols en acide polylactique, appelé aussi PLA, un bioplastique dérivé d'amidon d'origine végétale. Issus de l'imagination de la designer Qiyun Deng, ces objets empruntent leur forme aux matériaux biodégradables utilisés pour les créer : une tige de céleri devient un manche pour une fourchette, une tige de fenouil devient un couteau, une carotte élancée une cuillère.



FIGURE 2.1: Graft par Qiyun Deng - Collection d'ustensiles et de bols en PLA.

Doc 2

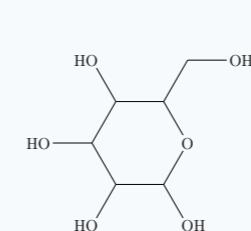
Les plantes stockent une partie de leur énergie sous forme d'amidon, un polymère du glucose. Celui-ci est produit conjointement avec du dioxygène lors de la photosynthèse, un processus biologique chez les plantes faisant intervenir le dioxyde de carbone présent dans l'air et l'eau, déclenché par l'énergie lumineuse.



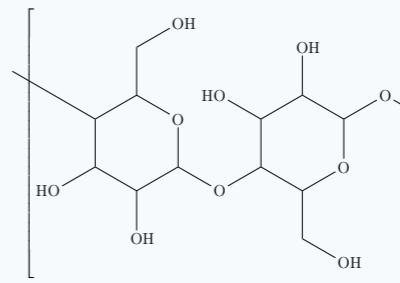
FIGURE 2.2: Réaction de photosynthèse

Doc 3

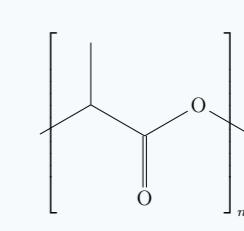
Le PLA est un polymère qui peut être obtenu à partir d'amidon de maïs. Ce dernier est dans un premier temps fermenté pour obtenir de l'acide lactique qui, dans un second temps, sera polymérisé, de nouveau par fermentation, pour devenir de l'acide polylactique.



Glucose



Amidon



Acide polylactique

Il est une des alternatives écologiques au polyéthylène, un plastique abondamment utilisé, issu du pétrole et du gaz naturel, et non-biodégradable, qui tend donc à s'accumuler dans l'environnement. L'acide polylactique est biosourcé et ses caractéristiques végétales font de lui un polymère biodégradable et compostable.

Doc 4

On dit d'un produit qu'il est biodégradable lorsque il est susceptible de se décomposer, dans un environnement favorable (conditions de température, d'humidité, de lumière, d'oxygène, etc.) et sous l'action de micro-organismes (bactéries, champignons, algues) et ce sans effet néfaste sur l'environnement (en émettant principalement de l'eau, du dioxyde de carbone et/ou du méthane (CH₄) le tout dans une durée courte, au regard du temps humain).

Un produit compostable est un produit dont 90 % de sa masse sèche initiale peut être biodégradée en moins de 3 mois. Ce processus se fait par fermentation aérobie via des micro-organismes. Le résultat de cette réaction est appelé compost et est utilisé afin d'améliorer la fertilité des sols.



Il est à noter que tous les produits biosourcés, c'est-à-dire provenant de la biomasse (matière d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique), ne sont pas forcément biodégradables.

À partir des documents précédents, répondre aux questions suivantes :

1. Le PLA est-il biosourcé ? biodégradable ? Justifier.
2. Justifier que l'amidon et l'acide polylactique sont de polymères.
3. Décrire le processus permettant de synthétiser le PLA.
4. Réaliser un poster sur le cycle de vie de l'acide polylactique en y intégrant son bilan carbone.

LES CHAÎNES CARBONÉES

L'ATOME DE CARBONE

► L'atome de carbone possède **six électrons**. À l'état fondamental il adopte une configuration électronique $1s^2 2s^2 2p^2$.

► L'atome de carbone est **tétravalent** : il possède quatre électrons sur sa couche de valence qui lui permettent de former quatre liaisons de covalence pour vérifier la règle de l'octet.

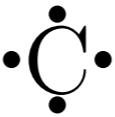


FIGURE 2.3: Diagramme de Lewis de l'atome de carbone.

► On appelle **composé organique** une molécule composée d'un **squelette carboné**.

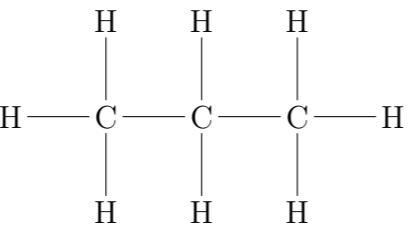


FIGURE 2.4: Exemple de molécule organique (propane).

► Le squelette carboné peut prendre différentes formes selon l'enchaînement des atomes de carbone entre eux.

- **Chaînes saturée et insaturée :**

- une chaîne carbonée n'étant constituée que de **liaisons simples** est dite **saturée**;
- une chaîne carbonée qui est constituée de **liaisons doubles ou triples** est dite **insaturée**.

- **Chaînes linéaire, ramifiée et cyclique :**

- lorsque tous les atomes de carbone d'une chaîne sont **reliés au maximum à deux autres atomes de carbone**, on dit que la chaîne est **linéaire**;
- lorsqu'au moins un des atomes de carbone est lié à **plus de deux autres atomes de carbone**, on dit que la chaîne est **ramifiée**;
- lorsqu'une partie de la chaîne est **fermée**, la chaîne est dite **cyclique**.



FIGURE 2.5: Exemple de chaîne saturée.

MODÉLISATION DES MOLÉCULES

► On peut représenter une molécule organique de plusieurs façons différentes :

- Formule brut : elle indique la nature et le nombre des atomes.
- Formule développée : toutes les liaisons entre atomes sont représentées.
- Formule semi-développée : toutes les liaisons entre atomes sont représentées à l'exception de celles engagées par les atomes d'hydrogène.
- Formule topologique : dans cette représentation deux atomes de carbones liés sont représentés par un segment dont chaque extrémité représente un atome de carbone. Deux segments consécutifs ne sont pas alignés, car les liaisons qu'ils représentent forment entre elles un angle de $109,5^\circ$. Les atomes d'hydrogène directement liés à un atome de carbone ne sont pas représentés. Enfin, les doubles liaisons sont représentées par un double segment, et les triples liaisons par un triple segment.

Modèle moléculaire	Formule brute
	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$
Formule semi-développée	$\text{CH}_3 - \text{COOH}$
Formule topologique	
Formule développée	

TABLE 2.1: Représentations de l'acide éthanoïque.

ALCANES

- Les alcanes sont des hydrocarbures aux chaînes carbonées saturées.
- Leur formule brute est C_nH_{2n+2} .
- Le nom d'un alcane est constitué d'un préfixe indiquant le nombre d'atome de carbone de la chaîne (voir tableau ci-contre), suivi de la terminaison « -ane ».
- Exemples :**
 - Méthane CH_4 .
 - Éthane C_2H_6 .
 - Propane C_3H_8 .
 - etc.

Nombre d'atomes de carbone	Racine
1	méthan-
2	éthan-
3	propan-
4	butan-
5	pentan-
6	hexan-

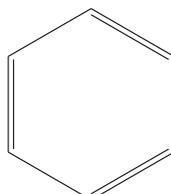
TABLE 2.2: Préfixes.

ALCÈNES

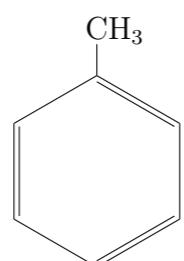
- Les alcènes sont des hydrocarbures aux chaînes carbonées insaturées possédant au moins une double liaison carbone-carbone **C=C**.
- Leur formule brute est C_nH_{2n} .
- Le nom d'un alcène est constitué d'un préfixe indiquant le nombre d'atome de carbone de la chaîne, suivi de la terminaison « -ène ».
- Exemples :**
 - Éthène C_2H_4 ou $CH_2=CH_2$.
 - Propène C_3H_6 ou $CH_3-CH=CH_2$.

COMPOSÉS AROMATIQUES

- Les **composés aromatiques** sont des molécules présentant un ou plusieurs cycles, c'est-à-dire que les atomes sont arrangés de façon à former une **structure cyclique plane**.
- Le modèle des hydrocarbures aromatiques est le benzène C_6H_6 , constitué d'un cycle à 6 atomes de carbone formant un hexagone régulier.



(a) Benzène



(b) Toluène

FIGURE 2.6: Exemples de composés aromatiques.

- Dans une molécule organique, on appelle **groupe caractéristique**, ou **groupe fonctionnel**, un enchaînement particulier d'atomes dont un au moins n'est ni un carbone, ni un hydrogène.
- À un groupe caractéristique donné peut correspondre plusieurs fonctions chimiques. Les composés d'une **même fonction chimique** ont des **propriétés chimiques semblables**.
- Certaines molécules possèdent plusieurs groupes fonctionnels. On les appelle **molécules polyfonctionnelles**.

Groupe caractéristique	Famille de composés	Formule générale	Exemple
$-OH$	Alcool	$R-OH$	butan-1-ol
$\begin{matrix} O \\ \\ -C-OH \end{matrix}$	Acide carboxylique	$\begin{matrix} O \\ \\ R-C-OH \end{matrix}$	acide butanoïque
$\begin{matrix} O \\ \\ -C-O-R' \end{matrix}$	Ester	$R-COOR'$	éthanoate de méthyle
$-NH_2$	Amine primaire	$R-NH_2$	éthanamine
$\begin{matrix} O \\ \\ -C-NH- \end{matrix}$	Amide	$R-CO-NH-R'$	N-méthyléthanamide

TABLE 2.3: Groupes caractéristiques.

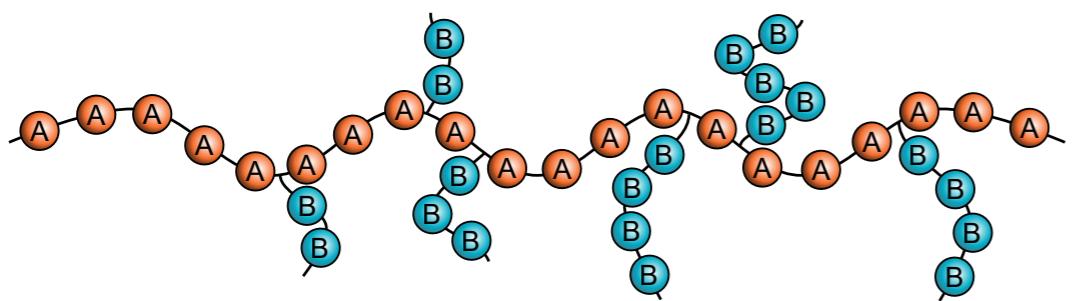
LES POLYMIÈRES

DÉFINITION ET PROPRIÉTÉS

- On appelle **macromolécule**, une molécule de masse molaire élevée.
- Un **polymère** est une macromolécule engendrée par la répétition un grand nombre de fois d'un motif élémentaire appelé **monomère**.
- Soit **M** un monomère, le polymère $-M-M-M-M-M-$ se note $\left[-M\right]_n$



(a) Polymère obtenu à partir d'un seul monomère.



(b) Polymère obtenu par réunion de 2 monomères différents.

FIGURE 2.7: Exemples de chaînes polymériques.

► **Exemple :** Polyéthylène $\left[-CH_2-CH_2\right]_n$

- Pour un polymère, l'**indice de polymérisation** est le nombre de répétitions du motif élémentaire. Il est directement proportionnel à la masse molaire du polymère.
- Plus l'indice de polymérisation est important, plus la viscosité, la température de fusion, la résistance mécanique et la température de transition vitreuse du matériau polymère augmente (jusqu'à une valeur limite).
- Les protéines, l'acide nucléique (ADN et ARN), le caoutchouc ou la cellulose et l'hémicellulose qui sont les principales constituants de la paroi des cellules végétales comme le bois sont des exemples de **polymères naturels**.
- Le PVC, le polycarbonate, le polystyrène sont des exemples de **polymères synthétiques**.

POLYADDITION ET POLYCONDENSATION

- La transformation permettant de passer d'un monomère à un polymère s'appelle la **polymérisation**.

► On appellera :

- polycondensation** : une réaction de polymérisation qui se fait avec **l'élimination** de petites molécules telles que H_2O , HCl ou NH_3 ;
- polyaddition** : une réaction de polymérisation qui se fait sans **aucune élimination** de petites molécules.

► **Exemple :**

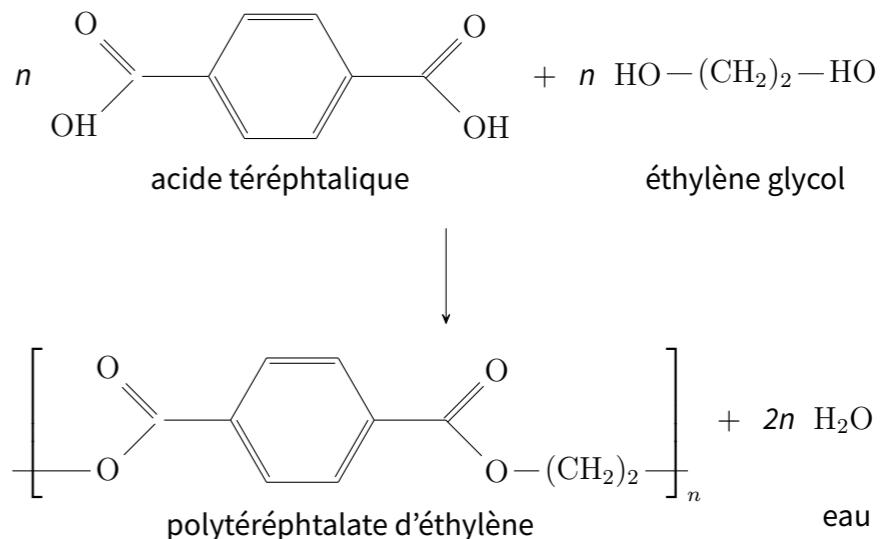


FIGURE 2.8: Exemple de polycondensation – élimination d'eau dans le processus de polymérisation.

PLASTIQUES, ÉLASTOMÈRES ET FIBRES

LES PLASTIQUES

- On désigne par **plastique** toute matière contenant, comme ingrédient essentiel, un **haut polymère** (Norme ISO 472). On appelle haut polymère un polymère résultant d'une polymérisation élevée.
- On distingue deux catégories de polymères :

● **Les thermodurcissables** : constitués de chaînes linéaires **réticulées** entre elles, liées par des liaisons fortes. Leur caractéristique principale est **l'absence de déformation à la chaleur**. Une fois modelée, ils durcissent de manière **irréversible**. Ils présentent une bonne rigidité et une bonne tenue aux températures élevées et aux attaques chimiques. Cependant leur mise en œuvre est lente, et ils sont difficilement recyclables.

► **Exemples :** les phénoplastes (PF), les époxydes (EP), les polyesters (UP), les silicones (SI).

● **Les thermoplastiques** : formés de chaînes linéaires ou ramifiées reliées entre elles par des **liaisons faibles**. Contrairement aux thermodurcissables, ils peuvent être remodelés sous l'effet de la chaleur pour garder la forme donnée une fois refroidis. Moins fragiles, plus faciles à fabriquer, ils peuvent être déclinés sous un grand nombre de formes, rigide, souple, compact ou en faible épaisseur (film), expansé ou allégé, du plus simple au plus complexe.

► **Exemples :** on distingue plusieurs familles de thermoplastiques,

- ceux de **grande diffusion**, qui représentent 70 à 80% des plastiques produits, comme le polystyrène, les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylenes (polyéthylène, polypropylène);

- les thermoplastiques **techniques**, comme les polyamides, proche du nylon textile;
- les thermoplastiques **hautes performances**, comme les résines fluorées (PTFE, PCTFE, PVDF).



FIGURE 2.9: Matériaux en plastique thermodurcissable (à gauche : polyester; à droite : silicium).



FIGURE 2.10: Matériaux thermoplastiques (à gauche : PVC; à droite : polyamide).

LES ÉLASTOMÈRES

- ▶ **Les élastomères** sont une famille supplémentaire de polymères caractérisés par leur très grande **élasticité**, c'est-à-dire par leur capacité à s'allonger sans se rompre à l'image du **caoutchouc**.
- ▶ **Exemples :** le caoutchouc naturel issu du latex (NR), le « naturel synthétique » (IR), le polybutadiène (BR), le copolymère styrène-butadiène (SBR).



FIGURE 2.11: Matériaux élastomères. De gauche à droite : gants en caoutchouc nitrile (NBR), pneus en caoutchouc et combinaisons en néoprène.

LES ADJUVANTS

- ▶ On désigne par **adjuvants** les substances mélangées physiquement aux polymères, destinées à **modifier ou améliorer** leurs caractéristiques. Ce sont des composés organiques ou organomé-

talliques, souvent de faible masse moléculaire par rapport à celle du polymère. Parmi eux on distingue :

- les **plastifiants**, qui rendent un plastique souple et flexible, notamment à basse température,
- les **colorants** qui apportent une couleur à l'objet à teinter,
- les **anti-oxydants** qui empêchent ou ralentissent l'oxydation,
- les **ignifugeants** qui améliorent la tenue au feu,
- les **anti-statiques** qui réduisent ou éliminent l'accumulation d'électricité statique,
- les **agents anti-UV** qui protègent de la dégradation produite par les rayons ultra-violets du soleil,
- les **fongicides** qui évitent la formation des bactéries,
- etc.

TEMPÉRATURE DE TRANSITION VITREUSE

- ▶ On appelle **transition vitreuse** le changement d'état, sous l'action de la température, d'un polymère, entraînant des variations importantes des propriétés mécaniques.
- ▶ Elle est caractérisée par la **température de transition vitreuse T_v** . Au-delà de cette température, le matériau acquiert une plus grande capacité de déformation, on parle d'état **viscoélastique**. En deçà, le matériau est rigide, peu ductile et souvent cassant, on parle d'état **solide**.
- ▶ La T_v d'un polymère peut être diminuée par l'ajout de plastifiants.
- ▶ La température de transition vitreuse conditionne la mise en forme des matériaux : celui-ci peut être modelé à une température correspondant à l'état viscoélastique, pour garder définitivement cette forme une fois la température descendue au-dessous de T_v .

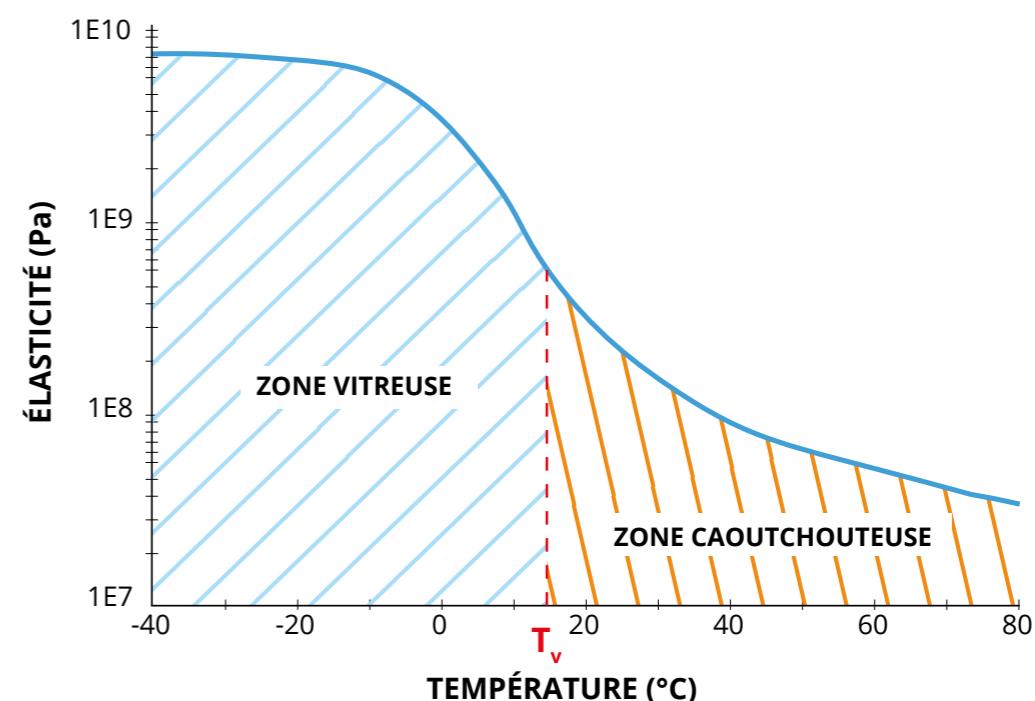


FIGURE 2.12: Illustration de la température de transition vitreuse – Élasticité du polybutadiène en fonction de la température

MODÉLISATION ET VISUALISATION D'UNE MOLÉCULE

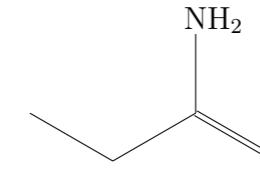
Le logiciel Molview  permet de visualiser la structure spatiale d'une molécule à partir de sa formule développée ou topologique. Cette activité présente les principales fonctionnalités de ce logiciel.

MENUS ET OPTIONS

- ▶ Par défaut l'écran est partagé en deux parties : à gauche la représentation de la molécule sous forme développée ou topologique, à droite sa représentation dans l'espace. Vous pouvez changer la disposition des écrans en allant dans le menu du haut dans l'onglet *Molview*. Dans ce même onglet il vous est possible de passer en mode smartphone / tablette avec l'option *Touch*.
- ▶ L'écran de gauche comprend trois menus :
 - À gauche, les liaisons entre atomes. Nous utiliserons principalement :
 - les liaisons simples 
 - les liaisons doubles 
 - les chaînes carbonées 
 - le cycle benzénique 
 - À droite se trouve les principaux atomes à disposition. Au-delà de ceux proposés par défaut, il est possible d'accéder à l'ensemble des éléments du tableau périodique en cliquant sur les trois petits points.
 - En haut, un menu d'édition qui permet, de gauche à droite :
 - de nettoyer l'écran 
 - d'effacer une partie de l'écran 
 - d'annuler ou de rétablir les précédentes éditions 
 - de déplacer l'écran 
 - de sélectionner une partie d'une formule 
 - d'ajouter des couleurs à la formule en deux dimensions 
 - de passer d'une formule topologique à une formule développée 
 - de recentrer la formule ou de laisser le logiciel s'occuper de la mise en forme 
 - de convertir la formule en une structure spatiale 

NOTRE PREMIÈRE MOLÉCULE : LE PROPANAMIDE

▶ Nous allons représenter la structure spatiale du propanamide de formule $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CONH}_2$ dont la formule topologique est donnée ci-dessous :



- ▶ Effaçons tout d'abord la molécule représentée par défaut .
- ▶ Nous allons pour l'instant travailler sur la formule topologique. Désactivez la représentation en formule développée en cliquant sur .
- ▶ Le nom de la molécule et sa formule topologique nous indique la présence d'une chaîne carbonée comprenant trois carbones. Pour créer celle-ci nous allons sélectionner l'outil *chaîne carbonée*  et créer une chaîne carbonée à trois carbones en cliquant puis en déplaçant la souris, tout en maintenant le bouton de la souris appuyé, jusqu'à obtenir nos trois atomes de carbones (ou, ce qui est équivalent, deux liaisons).
- ▶ Sur le dernier atome de carbone de cette chaîne nous allons rajouter une liaison double avec l'atome d'oxygène : sélectionnez l'outil *liaison double*  et cliquez sur l'extrémité de la chaîne carbonée. Sélectionnez maintenant l'atome d'oxygène dans le menu de droite et placez-le à l'autre bout de cette liaison double.
- ▶ Créez de la même façon une liaison simple avec l'atome d'azote sur ce même atome de carbone.
- ▶ Passez maintenant en mode *formule développée* en activant l'outil .
- ▶ Vous pouvez voir que par défaut, le logiciel a créé les liaisons avec les atomes d'hydrogène dans notre chaîne carbonée. Il nous faut rajouter maintenant les deux atomes d'hydrogènes liés à celui d'azote à l'aide de liaisons simples : créez une liaison simple avec l'atome d'azote, puis sélectionnez l'atome d'hydrogène et remplacez l'atome de carbone qui est apparu par celui-ci. Répétez cette opération pour créer la seconde liaison.
- ▶ Recadrons la structure à l'aide de l'outil .
- ▶ Vous pouvez visualiser les formules topologique et développée en activant / désactivant l'outil .
- ▶ Enfin, pour obtenir la structure spatiale de la molécule, cliquez sur l'outil .
- ▶ Vous pouvez manipuler la structure spatiale en cliquant et déplaçant votre souris. Vous pouvez modifier la représentation spatiale en allant dans le menu du haut, dans l'onglet *Model*.

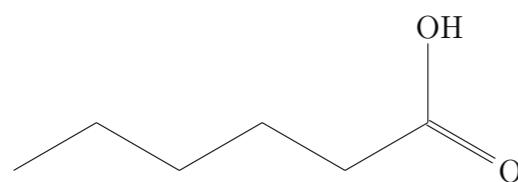
À VOTRE TOUR

Donner la structure spatiale de chacune des molécules suivantes :

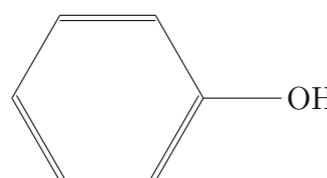
- ▶ Propanol :



► Acide hexanoïque :



► Phénol :



► Benzamide :

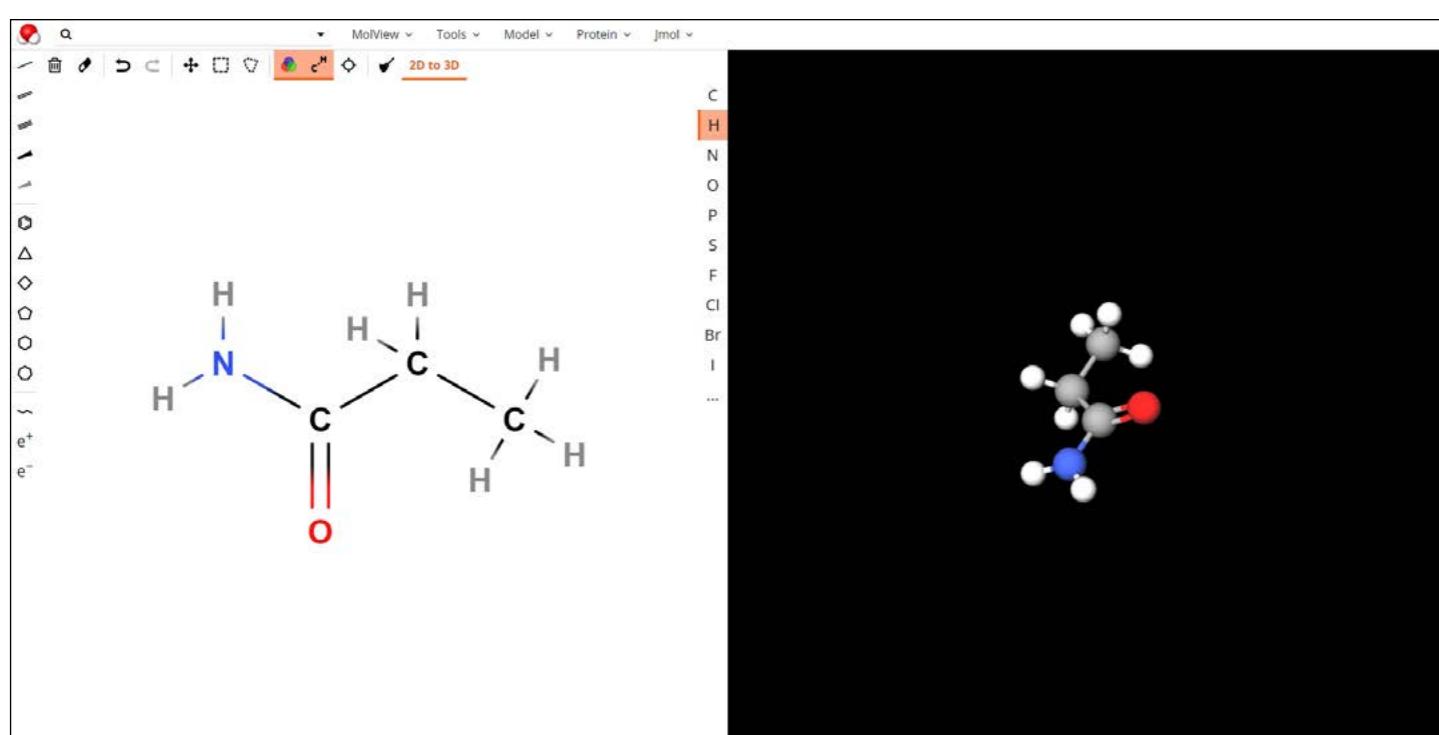
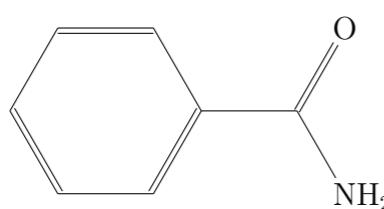


FIGURE 2.13: Le logiciel Molview

SYNTÈSE D'UN POLYMÈRE

Dans cette activité nous allons synthétiser un bioplastique biodégradable à base d'amidon et de maïs.

RÉACTIFS ET MATÉRIEL

► Réactifs :

- 2,5 g amidon de maïs
- Eau distillée
- 2 ml glycérol (solution 50% vol dans de l'eau distillée)
- Colorant alimentaire liquide (quelques gouttes)
- 3 ml d'acide chlorhydrique (HCl) $C = 0.1 \text{ mol.L}^{-1}$.
- 3 ml d'hydroxyde de sodium (NaOH) $C = 1 \text{ mol.L}^{-1}$.

► Matériel :

- 1 bêcher de 250 ml
- 1 bêcher de 100 ml
- 1 balance
- 1 erlenmeyer de 100ml
- Une plaque de verre de $15 \times 15 \text{ cm}$
- Éprouvette graduée de 10 ml
- Pipettes en plastique graduées
- 1 baguette en verre
- Gants et lunettes de protection
- 1 plaque chauffante/agitateur magnétique + 1 thermomètre (110°C)

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

- Les lunettes et les gants sont obligatoires du fait de la manipulation d'acide chlorhydrique et d'hydroxyde de sodium.
- Veillez à toujours verser l'acide dans l'eau pour éviter les projections, et non le contraire.
- Risques et précautions :

- Hydroxyde de sodium (NaOH) : le risque est réduit du fait qu'il soit ici très dilué. Cependant, l'hydroxyde de sodium peut provoquer de graves brûlures. En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
- Acide chlorhydrique (HCl) : de la même façon, bien que le risque soit réduit du fait qu'il soit très dilué, l'acide chlorhydrique peut provoquer des brûlures et irriter les voies respiratoires. En cas de contact avec la peau : laver abondamment à l'eau. En cas de contact avec les yeux : rincer abondamment à l'eau en maintenant les paupières écartées (au moins 10 minutes). Consulter un ophtalmologiste.

PROTOCOLE

1. Remplir à 1/3 environ le petit cristallisoir d'eau distillée, le mettre à chauffer (jusqu'à ébullition) sur la plaque chauffante. Il servira de bain marie.
2. Pesar (directement dans le bécher de 100 ml) 2,5 g d'amidon de maïs.
3. Ajouter dans le bécher 2 ml de glycérol.
4. Ajouter quelques gouttes de colorant alimentaire.
5. Ajouter enfin 20 ml d'eau distillée et 3 ml d'acide chlorhydrique.
6. Mélanger à l'aide de la baguette en verre.
7. ▶ Mettre le barreau aimanté dans la solution.
 - ▶ Fixer le thermomètre pour relever la température.
 - ▶ Faire chauffer en agitant au bain marie.
 - ▶ Surveiller la température avec le thermomètre. Quand la température est de 80°C, continuer le chauffage et l'agitation encore pendant 15 minutes.
8. Ajouter de 1 à 3 ml d'hydroxyde de sodium dilué suivant la viscosité obtenue après le chauffage (l'hydroxyde de sodium sert à diminuer la viscosité).
9. Verser le mélange sur la plaque de verre et bien étaler avec la baguette en verre et laisser sécher à l'étuve à 90-100°C pendant deux heures (ou une semaine).
10. Retirer la plaque de l'étuve lorsque les bords sont secs mais que le centre est encore gélatineux.
11. Séparer le film plastique coloré de la plaque de verre avec les doigts.

REMARQUES

- ▶ À l'étape 3, l'ajout de glycérol permet d'augmenter le volume libre entre deux chaînes de polymères pour en diminuer les interactions et ainsi favoriser le mouvement de l'une par rapport à l'autre. On passe donc d'un matériau rigide à un plastique. De plus, cet ajout rendra le film plastique transparent.
- ▶ À l'étape 5, l'ajout d'acide chlorhydrique sert à favoriser la déstructuration du grain d'amidon.
- ▶ À l'étape 7, le chauffage sert à éliminer l'excès d'eau pour gélifier les polysaccharides.

QUESTIONS

- ▶ D'où peut provenir l'amidon utilisé?
- ▶ Quel est l'aspect de l'amidon en début de synthèse?
- ▶ Quel est le rôle de la glycérine?
- ▶ Quel est l'aspect du mélange après l'étape 3 ? l'étape 6 ?
- ▶ Que se passe-t-il après quelques minutes de chauffage?
- ▶ Quel est l'aspect du mélange après addition de la solution d'hydroxyde de sodium?
- ▶ Observe-t-on un changement de couleur du milieu réactionnel et si oui, à quel(s) moment(s)?
- ▶ Quelle est la différence entre une matière plastique et un bioplastique?
- ▶ Quels sont les avantages des bioplastiques?
- ▶ Quels sont les problèmes que vont engendrer l'utilisation de bioplastiques?
- ▶ Comment pouvons-nous réduire ces problèmes?

TESTS DE RECONNAISSANCE DE MATÉRIAUX PLASTIQUES

MATÉRIEL

- 4 échantillons de matière plastique
- 1 bécher de 250 mL
- 1 bec Bunsen
- 4 bêchers de 100mL
- 1 pince en bois
- 6 tubes à essais
- 1 pince métallique
- eau distillée
- 1 agitateur en verre
- acétone + pipette 2 mL avec pipeteur
- 1 fil de cuivre
- 1 rouleau de papier pH

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

- ▶ Les lunettes de protection sont obligatoires.
- ▶ Risques et précautions :
 - ▶ Acétone (C_3H_6O) : volatile, très inflammable et toxique : on doit éviter de respirer les vapeurs et il doit être utilisé loin de toute flamme.
 - ▶ Les tests du papier pH et de combustion doivent être effectués sous hotte aspirante (éventualité de dégagements gazeux très toxiques).

PROTOCOLE

Pour identifier les différents échantillons de matières plastiques, réaliser les tests décrits ci-dessous en utilisant l'organigramme des essais et en respectant la chronologie des opérations et les consignes de sécurité.

- ▶ **Test de chauffage :** chauffer l'agitateur en verre, tenu avec la pince en bois, dans la flamme du bec Bunsen et le poser sur l'échantillon. Si l'échantillon ramollit (ou garde une empreinte), alors le test est positif.
- ▶ **Test de densité :** plonger l'échantillon dans un bêcher rempli d'eau et le maintenir immergé pendant une vingtaine de secondes, puis le libérer. Si l'échantillon surnage, alors le test est positif (ce test est non valable pour les plastiques armés ou contenant de l'air).
- ▶ **Test de Belstein :**
 1. Chauffer au rouge le fil de cuivre tenu à l'aide d'une pince en bois.
 2. Poser le fil sur l'échantillon et le tourner afin de l'enrober de matière plastique.
 3. Réintroduire le fil de cuivre au sommet de la flamme du bec Bunsen. Si la flamme prend une couleur verte, alors le test est positif.

4. Nettoyer le fil de cuivre en le maintenant dans la flamme jusqu'à disparition de la couleur verte et le décaper à l'aide du papier de verre avant de l'utiliser pour un nouveau test.

► **Test du solvant :** (*à faire loin de toute flamme*)

1. Placer l'échantillon dans un tube à essais.
2. Prélever à l'aide de la pipette environ 2 mL d'acétone et verser le liquide dans le tube à essais.
3. Attendre 10 minutes et verser quelques gouttes d'eau distillée dans le tube à essais. Si un trouble (précipité) apparaît, alors le test est positif.
4. A l'issue du test, récupérer le solvant dans le bêcher prévu à cet effet.

► **Test du papier pH :** (*à faire sous la hotte aspirante*)

1. Placer l'échantillon dans un tube à essais.
2. Placer un morceau de papier pH humidifié à l'eau distillée à l'orifice du tube.
3. Chauffer doucement le tube jusqu'à obtention d'un dégagement gazeux.
4. En comparant la couleur du papier pH à celle de l'échelle de couleurs, déterminer le pH des vapeurs obtenues. Si le pH est supérieur à 8, alors le test est positif.

► **Test de combustion :** (*à faire sous la hotte aspirante*)

1. Placer l'échantillon, tenu à l'aide de la pince métallique, dans la flamme du bec Bunsen.
2. Observer la combustion éventuelle de l'échantillon. Si la combustion est facile (avec ou sans fumées), alors le test est positif.

ORGANIGRAMME DES ESSAIS

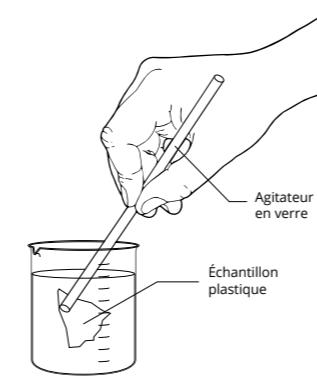
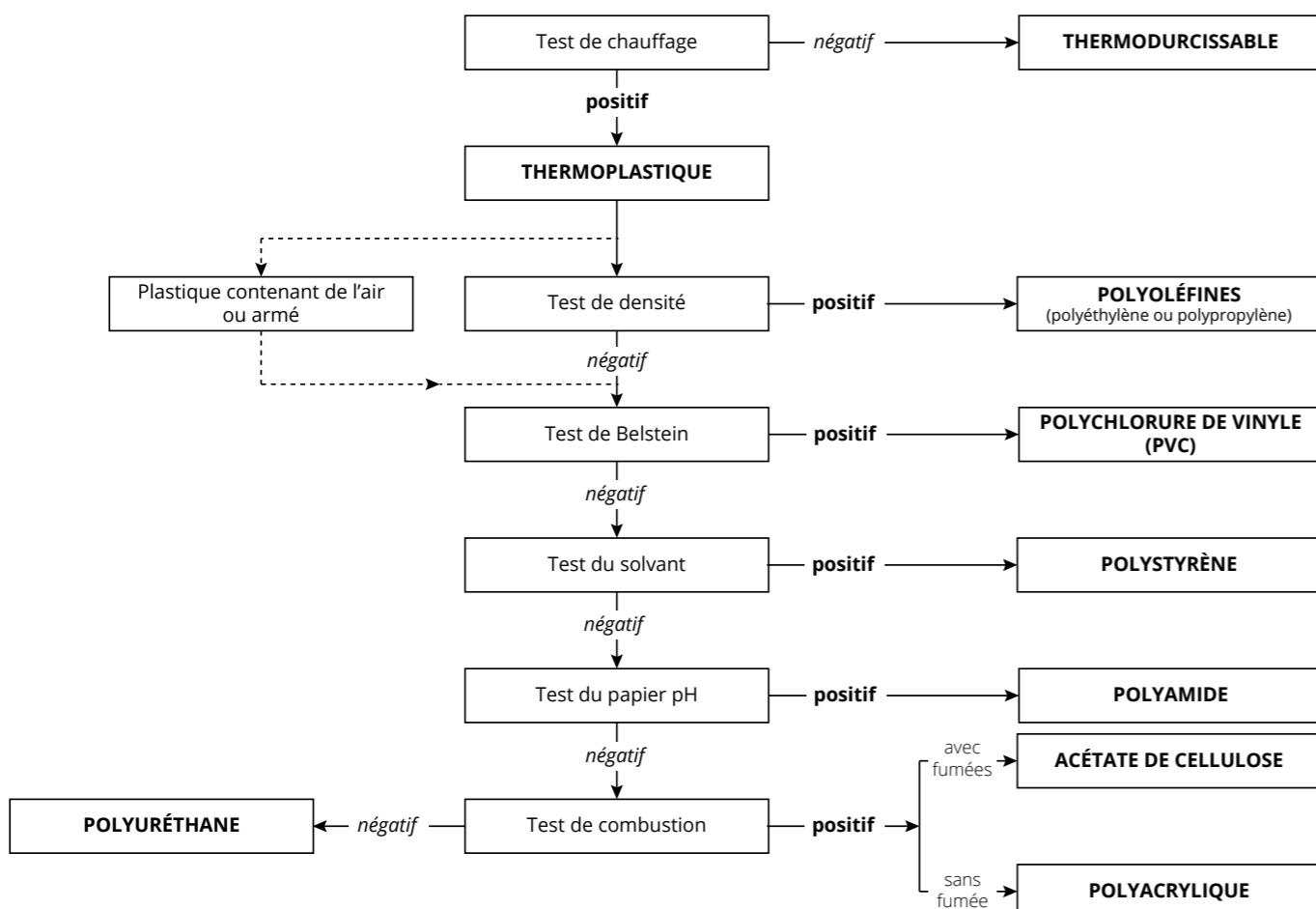


FIGURE 2.14: Test de densité.

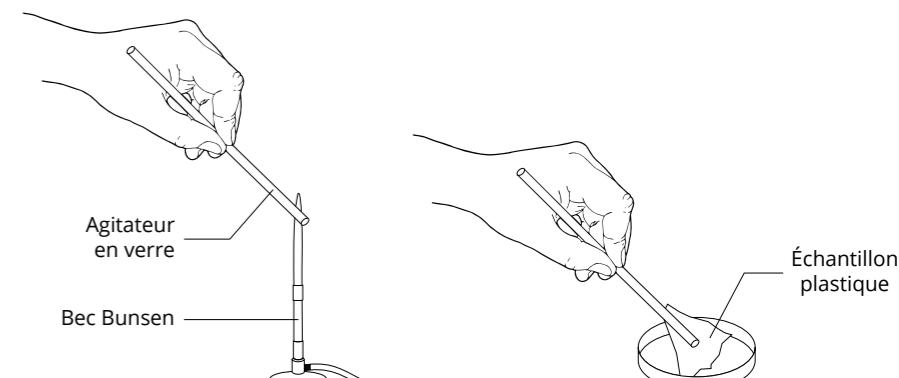


FIGURE 2.15: Test de chauffage.

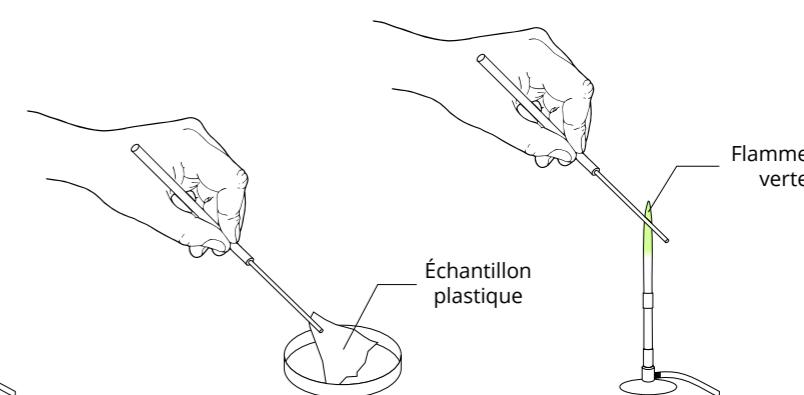
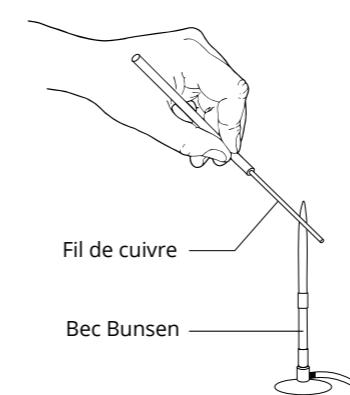


FIGURE 2.16: Test de Belstein.

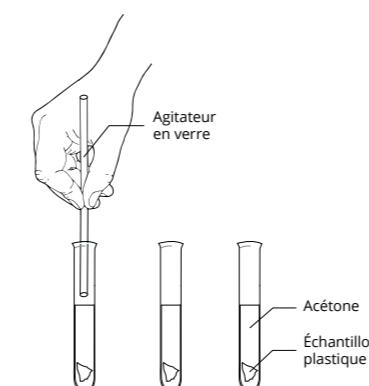


FIGURE 2.17: Test du solvant.

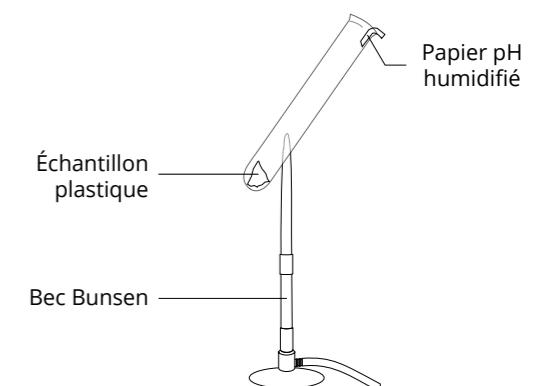


FIGURE 2.18: Test du papier pH.

04. EXERCICES

CHAÎNES CARBONÉES ET MODÉLISATION

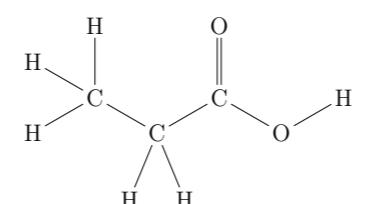
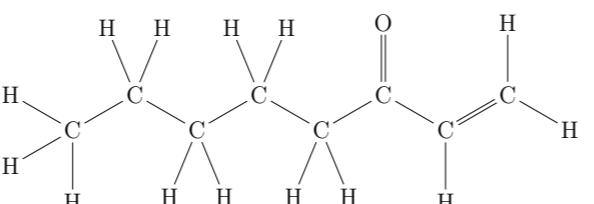
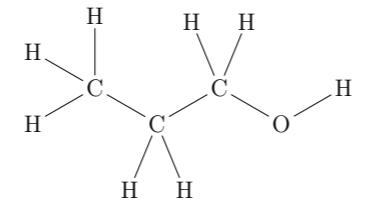
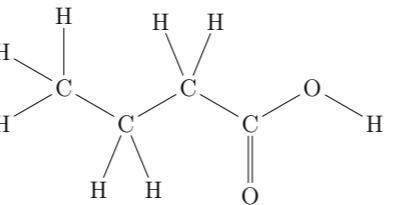
01

L'atome de carbone

- Combien d'électrons possède un atome de carbone?
- Donner le diagramme de Lewis d'un atome de carbone.
- Définir le terme tétravalent.
- Qu'est-ce qu'un composé organique? Donner un exemple.
- Quelle est la différence entre une chaîne carbonée saturée et une chaîne insaturée?

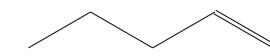
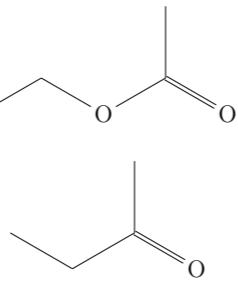
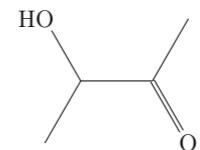
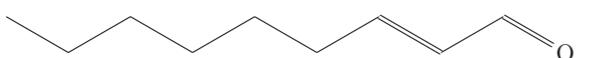
02

Donner les formules topologiques, semi-développées et brutes des molécules suivantes :



03

Donner les formules développées, semi-développées et brutes des molécules suivantes :



05

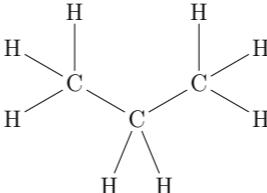
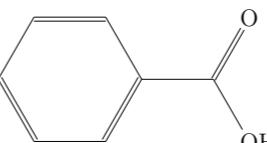
Parmi les formules suivantes quelles sont celles associées à un alcool? À un acide carboxylique? À un amine primaire?

- $CH_3 - CH_2 - CH(OH) - CH_3$
- $CH_3 - CH_2 - CH_2 - NH_2$
- $CH_3 - CH_2 - COOH$
- $C_6H_5 - COOH$
- $NH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - NH_2$
- $CH_3 - CH_2 - CH_2 - OH$

HYDROCARBURES ET GROUPES CARACTÉRISTIQUES

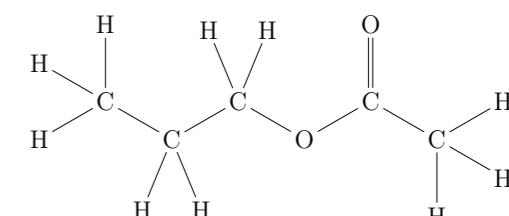
04

Associer chacune des formules ci-dessous à une des familles suivantes : alcane, alcène, composé aromatique.



06

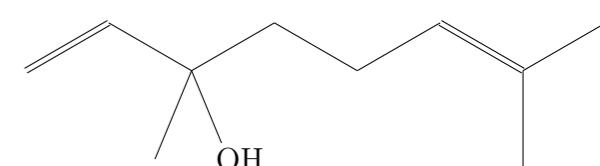
L'acétate de propyle, ou éthanoate de propyle, est un solvant connu pour son odeur de poire. Ce liquide incolore est souvent utilisé comme additif pour son odeur.



- Donner la formule topologique de l'acétate de propyle.
- Repérer le groupe ester dans la formule de l'acétate de propyle.

07

Le linalol est une molécule présente dans la majorité des huiles essentielles (lavande, bergamote, bois de rose) et également extrêmement utilisée dans les cosmétiques. Sa formule topologique est :



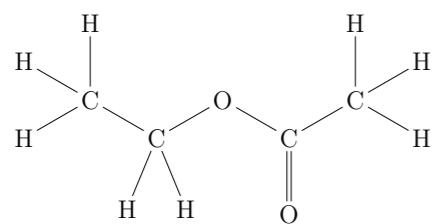
- Donner la formule brute du linalol.

2. Entourer le groupe caractéristique et le nommer.

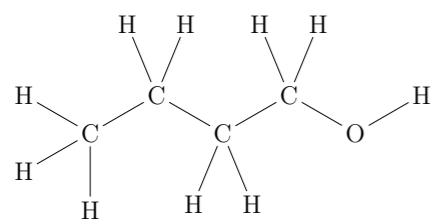


08

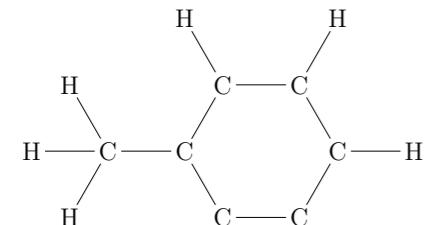
On distingue deux catégories de peinture en fonction du diluant utilisé : les peintures sans solvant, utilisant l'eau comme diluant, et les peintures avec solvants. Parmi les solvants communément utilisés on trouve l'acétate d'éthyle, le butanol et le toluène dont les formules développées sont données ci-dessous.



Acétate d'éthyle



Butanol

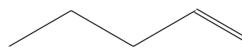
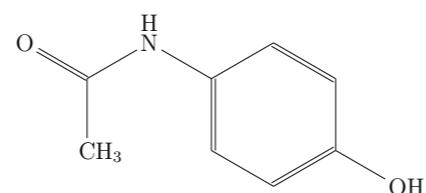
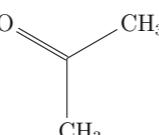
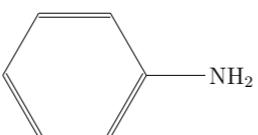
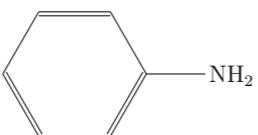
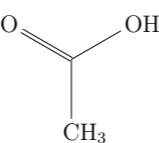
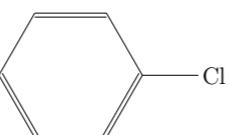


Toluène

- Pour chacun des solvants donner la formule topologique ainsi que la formule brute.
- Lequel de ces solvants est un composé aromatique ?
- Repérer le groupe caractéristique de l'acétate d'éthyle et du butanol, et donner la famille de composés à laquelle chacun appartient.

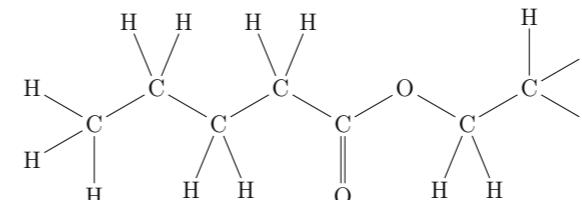
09

Parmi les molécules ci-dessous, lesquelles sont des composés aromatiques ?



10

Le pentanoate d'éthyle ou valérate d'éthyle est fréquemment utilisé pour son odeur fruitée de pomme dans l'industrie alimentaire et dans la parfumerie. Sa formule développée est donnée ci-dessous.



- Donner la formule topologique du pentanoate d'éthyle.
- Repérer le groupe ester dans la formule du pentanoate d'éthyle.

POLYMÈRES

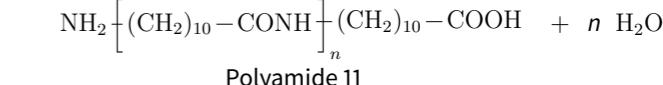
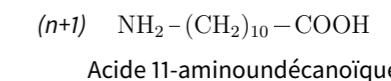
11

Rappels de cours :

- Qu'est-ce qu'un polymère ?
- Quelle est la différence entre une réaction de polyaddition et une réaction de polycondensation ?
- Qu'est-ce qu'un polymère thermoplastique ?
- Qu'est-ce qu'un polymère thermodurcissable ?
- Définir l'indice de polymérisation n d'un polymère.
- Définir la température de transition vitreuse d'un polymère.

12

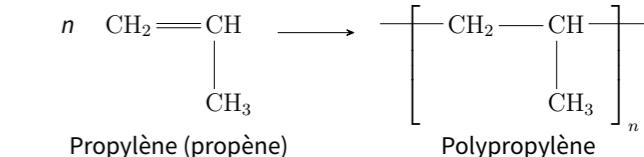
Le polyamide 11, appelé aussi « nylon français » ou nylon 11, est un polymère thermoplastique biosourcé utilisé pour fabriquer des cordes d'instruments de musique ou des conduites flexibles pour les secteurs pétroliers. Sa synthèse est donnée par la réaction ci-dessous :



- Définir le terme biosourcé.
- Repérer le motif du nylon 11.
- Repérer le groupe caractéristique apparaissant dans le motif du nylon français et donner la famille de composés associée.
- Repérer les autres groupes caractéristiques apparaissant dans cette réaction et donner les familles de composés associées.
- Le polyamide 11 est-il synthétisé par polyaddition ou polycondensation ?

13

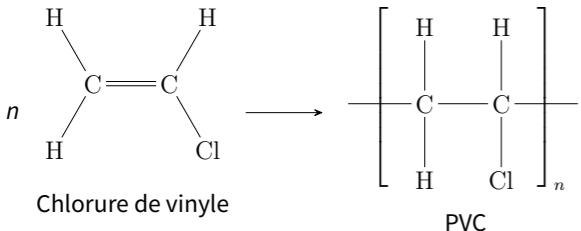
Le polypropylène (ou polypropène) isotactique, de sigle PP, est un polymère courant utilisé notamment dans l'industrie automobile pour la fabrication de pare-chocs, les tableaux de bord, les réservoirs. La réaction de polymérisation conduisant à sa synthèse est donnée ci-dessous.



- À quelle famille d'hydrocarbure appartient le propylène (aussi appelé propène) ?
- Repérer le motif du polymère du polypropylène.
- Définir l'indice de polymérisation n .
- Le PP est-il synthétisé par polyaddition ou polycondensation ?

14

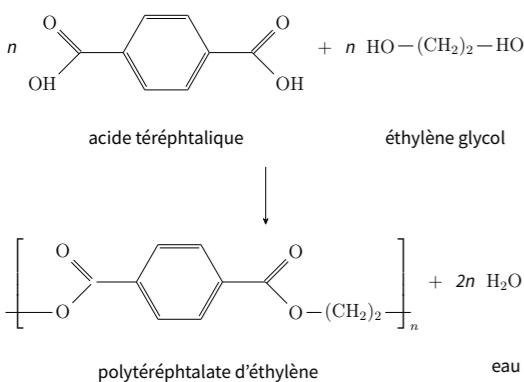
Le poly(chlorure de vinyle) ou PVC est un polymère thermoplastique de grande consommation que l'on retrouve notamment dans les tuyaux de canalisation (40% de la consommation de PVC). Il est obtenu par polymérisation du chlorure de vinyle :



1. Définir ce qu'est un polymère thermoplastique.
2. Le PVC est-il synthétisé par polyaddition ou polycondensation ?

15

Le poly(téréphthalate d'éthylène) ou PET est un polymère couramment utilisé, notamment pour la production de bouteilles mais aussi d'emballages jetables, de rembourrage textile ou de films transparents. Il est obtenu à partir de la réaction de polymérisation donnée ci-dessous entre l'acide téréphthalique et l'éthylène glycol.



1. Repérer et nommer les groupes caractéristiques organiques présents dans la molécule de PET.
2. La réaction menant à la synthèse du poly(téréphthalate d'éthylène) est-elle une polycondensation ou une polyaddition ? Argumenter.
3. Le PET étant un thermoplastique, donner ses principales propriétés physiques.



Pour produire 1kg de PET, 1,9kg de pétrole brut est nécessaire. Le poly(téréphthalate d'éthylène) met 450 ans à se décomposer. Le recyclage du PET consiste le plus souvent en une transformation mécanique durant laquelle le matériau est chauffé. Si en théorie cette transformation peut se répéter à l'infini, en réalité chaque cycle conduit à une dégradation des fibres du plastique nécessitant l'ajout de fibres neuves.

4. Le PET est-il un matériau biosourcé ? biodégradable ?
5. Le bilan carbone du PET est-il nul ?
6. À l'aide d'un schéma, représenter le cycle de vie d'un matériau PET recyclé.
7. Quels impacts la production de PET a sur l'environnement ?

16

Un entreprise de design travaille sur le flacon d'emballage d'un produit cosmétique sous forme de crème. Ce flacon doit être souple afin de délivrer le produit par simple pression. Elle a le choix entre plusieurs polymères. Le tableau ci-dessous donne les températures de transition vitreuse de chacun de ces polymères.

Polymère	T_v (°C)
Polyéthylène (PE)	-110
Polyisobutylène (PIB)	-68
Polypropylène isotactique (PPI)	0
Poly(acétate de vinyle) (PVA)	32
Poly(chlorure de vinyle) (PVC)	80

1. Définir la température de transition vitreuse.
2. Quels polymères peuvent être utilisés en vue de l'application proposée ?

17

Une entreprise alimentaire souhaite remplacer les flacons d'emballage de son produit phare par un produit « vert » dont l'impact sur l'environnement est limité. Ce flacon doit être souple et son impact sur l'environnement réduit. Différents plastiques alternatifs sont proposés :

— **Bio-polyéthylène (Bio-PE)** : identique au polyéthylène mais synthétisé à partir de la canne à sucre, sa température de transition vitreuse est de -110°C. Bien que d'origine végétale, il n'est pas biodégradable, mais, comme le polyéthylène, est recyclable.

— **Polycaprolactone (PCL)** : polyester thermodurcissable sa température de transition vitreuse est de -60°C. Il est biodégradable et obtenu à partir de pétrole brut.

— **Acide polylactique (PLA)** : produit à partir d'amidon d'origine végétale, c'est un thermoplastique biodégradable dont la température de transition vitreuse est de 60°C.

1. Expliquer la différence entre un matériau thermoplastique et un matériau thermodurcissable.
2. Pourquoi les matériaux thermodurcissables ne sont-ils pas recyclables ?
3. Remplir le tableau ci-dessous.

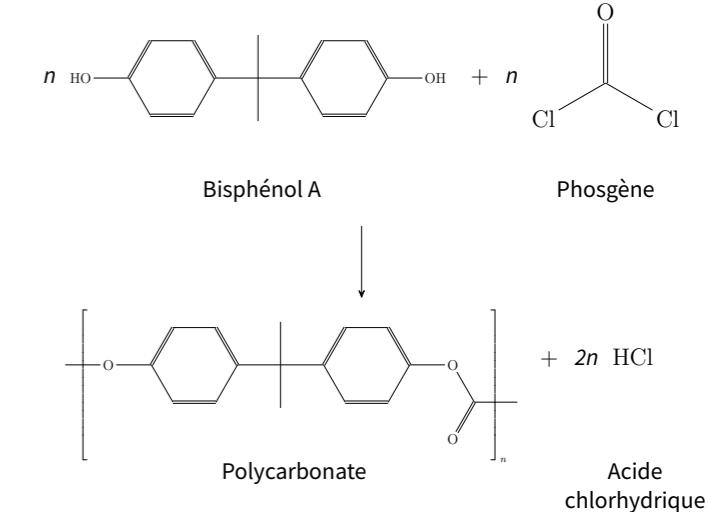
Polymère	Biosourcé	Bio-dégradable	Recyclable
Bio-PE			
PCL			
PLA			

4. Au vu du cahier des charges, discuter des avantages et des inconvénients de chacun des polymères proposés.

18

The Public Collection, lancé en 2015 par l'artiste Rachel M. Simon et l'Indiana Public Library, est un projet de bibliothèques publiques miniatures en milieu urbain où chacun peut déposer ou récupérer des ouvrages gratuitement. Parmi les neuf propositions retenues figure *Monument* du designer Brian McCutcheon, une structure à cinq piliers en aluminium supportant une citation de Marc Twain. À la base de chacune de ces colonnes se situe une étagère circulaire en polycarbonate où sont déposés les livres en libre accès.

Le polycarbonate de la structure a été obtenu par réaction entre le phosgène et le Bisphénol A dont les formules topologiques sont données ci-dessous.



1. À quelle famille appartient le Bisphénol A ?
2. Repérer et nommer les groupes caractéristiques présents dans le Bisphénol A.
3. Donner la formule développée du Bisphénol A et du phosgène.
4. La fonction ester est-elle présente dans la molécule de polycarbonate ?
5. La réaction de synthèse du polycarbonate est-elle une polyaddition ou une polycondensation ?
6. Repérer le motif élémentaire du polycarbonate.
7. Définir l'indice de polymérisation n .
8. Le monomère du polycarbonate a un poids de 254g.mol⁻¹. Sachant que le poids moyen d'une molécule de polycarbonate est de 10130g.mol⁻¹, donner l'indice de polymérisation du polycarbonate.



LES MÉTAUX

Objectifs du chapitre : Identifier une oxydation et une réduction / Identifier oxydant et réducteur / Écrire une équation d'oxydo-réduction / Expliquer l'expression « métaux nobles » / Définir les différents types de corrosion / Citer et décrire des méthodes de protection contre la corrosion / Définir un alliage / Évaluer l'impact environnemental de l'utilisation de matériaux métalliques.

03



HICHAM BERRADA
Masse & Martyr
2017

01. ACTIVITÉ

LES ESCALIERS DU BÂTIMENT DE LA BOURSE DE CHICAGO

Doc 1

Suite au grand incendie de 1871, la ville de Chicago connut un boom immobilier. Durant cette période les architectes de l'école de Chicago, dirigés par Louis Sullivan, inventèrent un nouveau type de bâtiment : le gratte-ciel. L'un des chefs-d'œuvre de cette forme, achevé en 1894, est le bâtiment de la Bourse de Chicago. Les escaliers en fer ont un revêtement en cuivre obtenu par galvanisation, décorés par une combinaison de formes géométriques bidimensionnelles et de formes végétales naturalistes. Sullivan a utilisé des motifs similaires dans tout le bâtiment, les exécutant dans une variété de supports : toile au pochoir, plâtre moulé ou en terre cuite.



FIGURE 3.1: Escalier du bâtiment de la Bourse de Chicago, Chicago, 1893. Un exemplaire de ces escaliers a été conservé au Metropolitan Museum of Art de New-York suite à la démolition du bâtiment de la Bourse en 1972.

Doc 2

Sous l'action conjuguée du dioxygène de l'air, de l'humidité et de l'eau en général, ainsi que des impuretés, qu'elles proviennent du métal ou de l'atmosphère, le fer, et les métaux ferreux comme l'acier, se recouvrent d'une couche de rouille dont l'oxyde de fer (III) (Fe_2O_3) est le constituant principal.

Contrairement à d'autres métaux dont la couche d'oxyde en surface forme une couche de protection (on parle de passivation), la rouille attaque en profondeur le fer jusqu'à sa destruction totale.



FIGURE 3.2: Oxydation du fer menant à la formation de rouille.

Doc 3

Pour protéger un matériau ferreux de la rouille, différents traitements de surface existent.

- **Utilisation d'un revêtement non métallique :** pour isoler le fer du dioxygène de l'air, on peut le recouvrir d'un vernis, d'une peinture ou d'un émail. Cette couche de protection reste fragile. Une simple égratignure expose le matériau ferreux à une attaque par la corrosion.
- **Dépôt d'un revêtement métallique par électrochimie :** le fer peut aussi être recouvert d'une couche métallique par trempage à chaud (le matériau est plongé dans un métal en fusion puis refroidi) ou par électrolyse. On parle alors d'électrodéposition. Par exemple, la galvanisation (voir schéma ci-dessous) consiste à recouvrir la pièce d'une couche métallique dite sacrificielle, le plus souvent du zinc, qui s'oxydera à la place du métal formant une barrière imperméable par passivation.

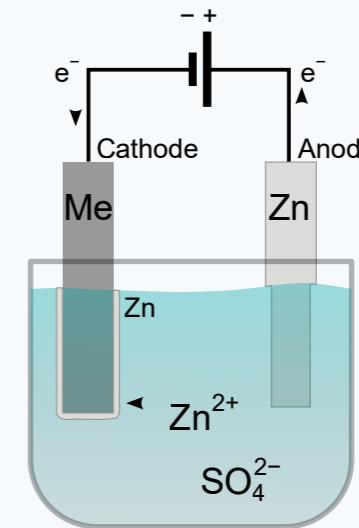


FIGURE 3.3: Galvanisation d'une pièce de métal dans une solution de sulfate de zinc (II) $\text{Zn}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$. Le générateur de courant « amène » un excès d'électrons au métal qui va se combiner avec les ions Zn^{2+} formant un dépôt de zinc sur le métal. La perte d'ions zinc dans la solution est compensée par une transformation de l'électrode de zinc en ions Zn^{2+} .

Doc 4

On estime qu'au rythme de production actuel, les réserves naturelles de fer seront épuisées d'ici 440 ans, un chiffre bien supérieur au cuivre (40 ans) ou à l'étain (17 ans). L'énergie nécessaire à l'extraction du fer et la pollution engendrée par celle-ci (déforestation, pollution des sols) sont cependant loin d'être négligeables. Qui plus est, tout déchet métallique abandonné dans la nature met 5 à 10 ans pour se décomposer intégralement.

Le recyclage de la ferraille est donc un enjeu majeur, tout aussi important que celui du plastique. On désigne par ferraille l'ensemble des déchets de fer et d'acier broyés extraits d'épaves automobiles, d'appareils électroménagers, de boîtes métalliques, etc.

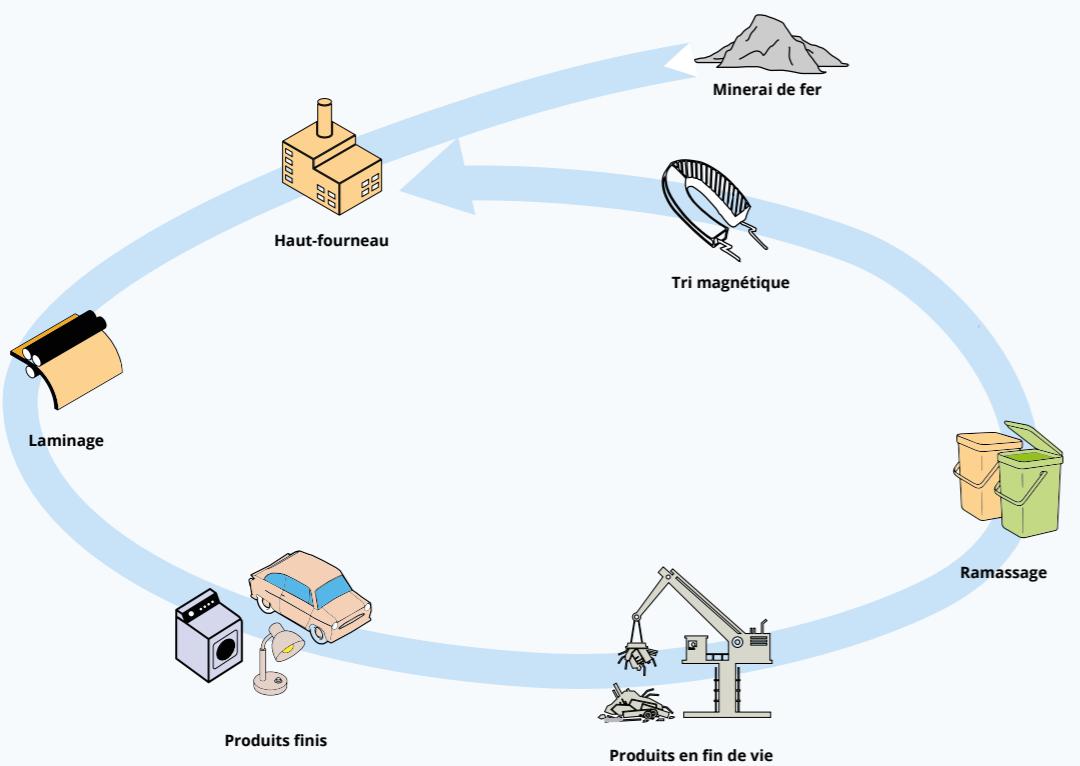


FIGURE 3.4: Cycle de vie du fer et de l'acier

Après plusieurs phases de tri, les métaux récoltés sont broyés, laminés et nettoyés, puis fondus dans des fours à 1 600 °C, avant d'être transformés en matières premières sous forme de bobines de barres ou de fils, qui seront utilisés dans la création de nouveaux produits finis. Les métaux sont ainsi recyclables indéfiniment, quasiment à 100 % et sans perdre de leurs propriétés.

À partir des documents précédents, répondre aux questions suivantes :

1. À quelle catégorie de matériaux appartient l'acier ?
2. Quels sont les facteurs environnementaux provoquant la dégradation du fer ? Nommer cette dégradation.
3. Décrire le processus en jeu dans cette dégradation.
4. Pourquoi l'acier est-il aussi victime de ce processus ?
5. Présenter les différents moyens de protection contre la corrosion en donnant leurs avantages et/ou inconvénients.
6. Expliquer ce qu'est la galvanisation et les raisons pour lesquelles elle a été utilisée pour les escaliers du bâtiment de la Bourse de Chicago.
7. Décrire le processus de recyclage de métaux en donnant ses principales avantages.

02. COURS

OXYDATION ET RÉDUCTION

DÉFINITIONS

- ▶ Un **réducteur** est une espèce chimique pouvant **donner** des électrons. Ainsi, le réducteur sera toujours *oxydé*.
- ▶ Un **oxydant** est une espèce chimique pouvant **capter** des électrons. Un oxydant sera toujours *réduit*.

Oxydant	Réducteur
Cu^{2+} (aq)	Cu (s)
Fe^{2+} (aq)	Fe (s)
Zn^{2+} (aq)	Zn (s)

TABLE 3.1: Oxydants et réducteurs courants. Les cations métalliques sont le plus souvent des oxydants. Les métaux associés sont des réducteurs.

- ▶ On parle d'**oxydation** d'une espèce chimique lorsque celle-ci **perd** un ou des électrons.
- ▶ On parle de **réduction** d'une espèce chimique lorsque celle-ci **gagne** des électrons.
- ▶ L'oxydation d'une espèce chimique s'accompagne toujours de la réduction simultanée d'une autre espèce. L'oxydant et le réducteur intervenant dans cette réaction sont dits **conjugués** et forment un **couple oxydant / réducteur** ou **couple redox**, noté Ox / Red.
- ▶ **Exemple :** L'ion cuivre (II) et l'atome de cuivre Cu(s) est un couple oxydant/réducteur noté :



FIGURE 3.5: Couple oxydant/réducteur : à gauche - ion cuivre (II) ; à droite - cuivre.

- On représente l'échange d'électrons entre un oxydant et son réducteur conjugué par une **demi-équation électronique**. Elle modélise le passage, par transfert d'électrons, de l'oxydant au réducteur conjugué ou du réducteur à l'oxydant conjugué :

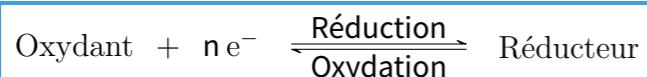
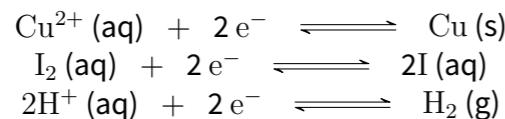


FIGURE 3.6: Demi-réaction électronique.

► **Exemples :**



- L'oxydant est ainsi réduit en son réducteur conjugué et le réducteur est oxydé en son oxydant conjugué.

► **Exemple :**



ÉQUILIBRER UNE DEMI-RÉACTION ÉLECTRONIQUE

- L'écriture d'une demi-équation électronique se fait en plusieurs étapes afin d'assurer la conservation des charges électriques et des éléments.

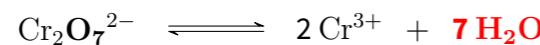
- **Étape 1 :** Assurer la conservation des éléments autres que l'oxygène et l'hydrogène.
- **Étape 2 :** Assurer la conservation de l'élément **oxygène** en ajoutant des **molécules d'eau** H_2O .
- **Étape 3 :** Assurer la conservation de l'élément **hydrogène** en ajoutant des **ions hydrogène** H^+ .
- **Étape 4 :** Assurer la conservation des éléments autres que l'oxygène et l'hydrogène.

- **Exemple :** On considère le couple oxydant-réducteur $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (anion dichromate) / Cr^{3+} (ion chrome (III)). Écrivons la demi-équation électronique associée à ce couple :

Étape 1 : On assure la conservation de l'élément chrome



Étape 2 : On assure la conservation de l'élément oxygène en ajoutant des molécules d'eau H_2O .



Étape 3 : On assure la conservation de l'élément hydrogène en ajoutant des ions hydrogène H^+ .



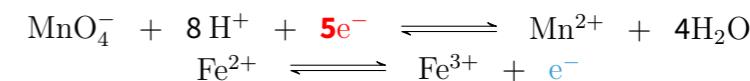
Étape 4 : On assure la conservation des charges en ajoutant des électrons e^- .



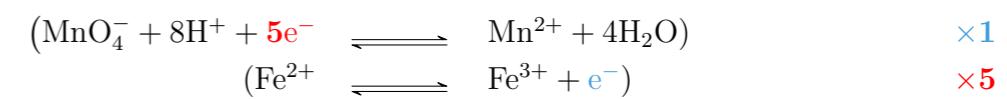
L'OXYDORÉDUCTION

- On appelle **réaction d'oxydoréduction**, une réaction dont les réactifs sont un oxydant et un réducteur de deux couples oxydant / réducteur différents. Durant cette réaction, un transfert d'électrons s'effectue entre les réactifs.
- On représente cette réaction par une équation d'oxydoréduction, obtenue en ajoutant les demi-équations électroniques après avoir équilibré le nombre de charges.
- **Exemple :** Donnons l'équation d'oxydoréduction entre le permanganate de potassium MnO_4^- et l'ion fer (II) Fe^{2+} .

Étape 1 : Écrivons les demi-équations électroniques de chacun des couples $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$ et $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$, en plaçant les réactifs à gauche.



Étape 2 : Additionnons les demi-équations après avoir équilibré le nombre de charges.



Étape 3 : On enlève les électrons pour obtenir l'équation bilan.



- On remarque que l'équation d'oxydoréduction ne doit pas faire apparaître les électrons échangés.



FIGURE 3.7: Réaction d'oxydoréduction entre une solution de permanganate de potassium (ion MnO_4^-) acidifiée et le sel de Mohr (ion Fe^{2+}). La couleur violette caractéristique du permanganate disparaît lorsque ce dernier réagit avec la solution Fe^{2+} .

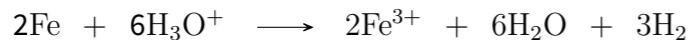
LA CORROSION

- On désigne par le terme **corrosion**, la détérioration des métaux sous l'action principale d'une réaction d'oxydation.
- La corrosion peut être provoquée par l'action d'un **acide**, de dioxygène ou d'eau.
- Exemples :**

- Corrosion du fer en présence de l'oxygène de l'air en hématite :



- Corrosion dans l'eau en milieu acide :



- Certains métaux comme l'aluminium **s'oxydent qu'en surface**. On parle de **passivation**. La couche d'oxyde formée est un film continu qui protège le métal situé en dessous.
- D'autres métaux développent une couche poreuse qui ne protège pas le métal, aboutissant à terme à une destruction totale de celui-ci sous l'effet de l'oxydation. C'est le cas du fer dont la corrosion sous l'action de l'eau et du dioxygène mène à la formation de **rouille**.
- On appelle **métaux nobles**, les métaux résistant à la corrosion : l'or, l'argent, le platine, l'iridium, le ruthénium, le rhodium et l'osmium.
- Il existe également des alliages (combinaison de plusieurs éléments dont un au moins est un métal) conçus pour être très peu sensible à la corrosion. C'est le cas de l'**acier inoxydable**, un alliage de fer, de chrome et de carbone qui ne se dégrade pas en rouille.



FIGURE 3.8: Exemple de fer attaqué par la rouille.

PROTECTION CONTRE LA CORROSION

- Pour protéger un métal de l'action oxydante de l'atmosphère ou de l'eau, on peut recouvrir sa surface de peinture, de vernis, de laque, de résine ou d'email.
- L'électrodéposition** de métaux permet également de protéger de la corrosion :
 - La pièce à protéger ainsi que le métal protecteur sont plongés dans une solution contenant les ions positifs (cations) de ce même métal.
 - On relie la pièce au pôle négatif d'une source de courant continu et le pôle positif au métal protecteur (respectivement la cathode et l'anode).

- Les électrons arrivant à la cathode entraînent une réduction des cations provoquant la formation du métal protecteur à la surface de la pièce.
- L'anode est oxydée, la perte d'électrons allant à la cathode et l'oxydant se retrouvant dans la solution afin de combler la perte d'ions positifs due à la réduction à la cathode.
- Ce processus se poursuit jusqu'à la dissolution de l'anode.

► **Exemples :**

- La galvanisation** consiste à recouvrir la pièce d'une couche de zinc par électrodéposition. Cette couche dite sacrificielle s'oxydera à la place du métal formant une barrière imperméable qui protégera le métal recouvert.

- On peut également protéger une pièce de métal de la corrosion en la recouvrant de chrome par électrodéposition, le chrome possédant une bonne résistance à l'usure et à la corrosion. On appelle ce procédé le **chromage**.

- La galvanisation peut aussi se faire par **trempage à chaud**. La pièce est alors trempée dans un bain de zinc en fusion puis refroidie. On obtient ainsi des épaisseurs de couche protectrice plus importantes que par électrodéposition.

- Suivant le même principe que l'électrodéposition, on peut également protéger un métal de la corrosion en induisant la croissance d'une couche d'oxyde protecteur à la surface du métal. On appelle ce processus **l'anodisation**.

- Elle est principalement utilisée sur de l'aluminium avec la formation d'une couche **d'alumine**.
- La pièce d'aluminium est placée à l'anode d'un générateur de courant continu et baignée dans un milieu acide, comme l'acide sulfurique. À la cathode se situe une pièce inerte au milieu, comme du plomb. L'électrolyse produit alors la couche d'alumine par le processus décrit par les réactions suivantes :
 - à la cathode $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$,
 - à l'anode $\text{Al} = 3\text{e}^- + \text{Al}^{3+}$, puis : $2\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{H}^+$,
 - d'où la réaction bilan $2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2$.

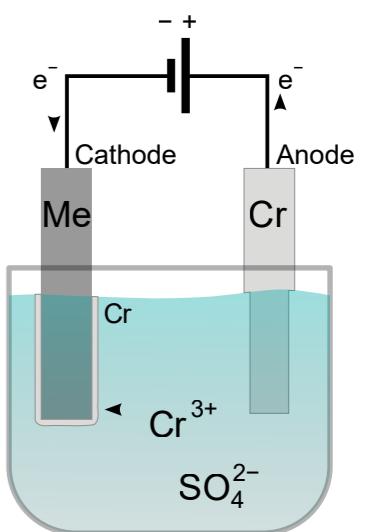


FIGURE 3.9: Chromage d'une pièce de métal dans une solution de sulfate de chrome (III) $\text{Cr}_3(\text{SO}_4)_2$.

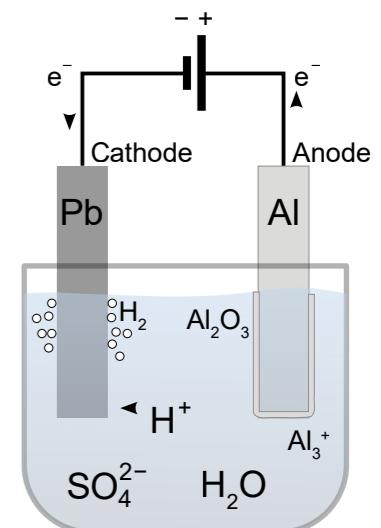


FIGURE 3.10: Anodisation d'une pièce d'aluminium.

TP 03.

RÉACTION D'OXYDORÉDUCTION

MATÉRIEL

- 1 bêcher
- 1 tube à essais
- solution d'hydroxyde de sodium ($\text{Na}^+ + \text{OH}^-$)
- solution aqueuse de nitrate d'argent ($\text{Ag}^+ + \text{NO}_3^-$)
- fil ou lame de cuivre

PROTOCOLE

1. Verser 50 mL de solution de nitrate d'argent dans un bêcher.
2. Plonger un fil de cuivre dans les 50 mL de la solution.
3. Attendre 5 à 10 minutes et observer.
4. Verser environ 2 mL de la solution obtenue dans un tube à essais.
5. Ajouter quelques gouttes de soude dans le tube à essais.

COMPTE-RENDU

1. Décrire la réaction observée lorsque le fil de cuivre est plongé dans la solution de nitrate d'argent.
2. Quelle est la couleur du précipité formé lors de l'ajout de soude. Qu'en déduisez-vous ?
3. Décrire l'état du fil de cuivre après l'expérience.
4. À partir des couples redox Ag^+ / Ag et $\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}$, écrire l'ensemble des équations (demi-équations, équation bilan) en jeu dans cette réaction.
5. Interpréter le dépôt obtenu sur le fil de cuivre.



FIGURE 3.11: Fin de la réaction d'oxydoréduction entre le cuivre et l'ion argent (I) Ag^+ .

TESTS DE RECONNAISSANCE DE CATIONS MÉTALLIQUES

MATÉRIEL

- Lunettes de protection
- Blouse
- 4 tubes à essais
- solution d'hydroxyde de sodium
- solution aqueuse de sulfate de cuivre ($\text{Cu}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$)
- solution aqueuse de sulfate de zinc ($\text{Zn}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$)
- solution aqueuse de sulfate de fer II ($\text{Fe}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$)
- solution aqueuse de chlorure de fer III ($\text{Fe}^{3+} + 3\text{Cl}^-$)

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

- ▶ Les lunettes de protection sont obligatoires.
- ▶ Certaines solutions tâchent, il est donc nécessaire de porter une blouse durant l'intégralité de l'activité.
- ▶ **Risques et précautions :**
 - Hydroxyde de sodium (NaOH) : appelé aussi soude, est un produit très corrosif et donc très dangereux. En cas de contact avec la peau, rincez immédiatement à l'eau.

PROTOCOLE

1. Remplir chaque tube à essais avec 2mL d'une solution d'ions métalliques (sulfate de cuivre, sulfate de zinc, sulfate de fer II ou chlorure de fer III).
2. Ajouter quelques gouttes d'hydroxyde de sodium dans le tube à essais.
3. Noter la couleur du précipité qui apparaît.



FIGURE 3.12: Exemple de précipités obtenus pour différents cations métalliques.

COMPTE-RENDU

1. Réaliser un schéma légendé de l'expérience réalisée.
2. Remplir le tableau ci-dessous.
3. Conclure en décrivant un test de reconnaissance pour chacun des cations étudiés.

Solution	Cu^{2+}	Zn^{2+}	Fe^{2+}	Fe^{3+}
Couleur du précipité				

04. EXERCICES

OXYDORÉDUCTION

01

Rappels de cours :

- Définir ce qu'est un oxydant, un réducteur.
- Qu'est-ce qu'un couple oxydant / réducteur ?
- Définir ce qu'est une oxydation, une réduction.
- Qu'est-ce qu'une réaction d'oxydoréduction ?
- Quel est le lien entre une demi-équation électronique et une réaction d'oxydoréduction ?

02

Identifiez, pour chacun des couples oxydant / réducteur ci-dessous, l'oxydant et le réducteur.

- Pb²⁺ et Pb⁴⁺
- Au³⁺ et Au
- Bi⁺³ et Bi⁵⁺

03

Ranger les espèces chimiques suivantes par couples oxydant / réducteur : Cu, Pt²⁺, Ni²⁺, I₂, Cu²⁺, H₂O₂, I⁻, Pt, O₂, Ni.

04

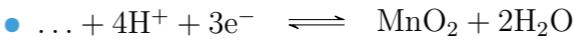
Pour chacune des réactions suivantes, indiquer s'il s'agit d'une réduction ou d'une oxydation :

- Cu²⁺ + 2e⁻ → Cu
- PbO → PbO₂ + H₂O + 2e⁻
- 2I⁻ → I₂ + 2e⁻
- ClO₃⁻ + H₂O + 2e⁻ → ClO₂⁻ + 2OH⁻

05

Compléter les des demi-équations électroniques suivantes, puis indiquer pour chacune l'oxydant et le réducteur :

- Sn⁴⁺ + ... → Sn
- S₄O₆²⁻ + ... → 2S₂O₃²⁻
- PO₄³⁻ + ... + ... → PH₃⁴⁺ + ...
- HClO + ... + ... → Cl₂ + 2H₂O



06

Écrire les demi-équations électroniques des couples redox suivants :

- Co³⁺ / Co²⁺
- NO₂ / N₂
- BrO₄⁻ / BrO₃⁻
- Hg₂Cl₂ / Hg

07

Écrire la réaction d'oxydoréduction qui se produit en milieu acide entre :

- les ions nitrate NO₃⁻ et le zinc métallique Zn ;
- les ions Fer III et le fer métallique.

Les couples redox en jeu sont :

- NO₃⁻ / NO
- Zn²⁺ / Zn
- Zn²⁺ / Zn
- Fe³⁺ / Fe²⁺
- Fe²⁺ / Fe

08

Les techniques d'impression existent depuis l'apparition de l'imprimerie sur tissu au VI^e siècle. La gravure à l'eau forte est une de ces techniques. Le motif est gravé en creux sur une plaque métallique à l'aide d'un mordant, le plus souvent une solution acide, puis passé sous presse.

Un vernis à graver résistant à la solution utilisée est étalé au préalable sur la plaque et sera retiré lors de la gravure du motif. Lorsque la plaque sera plongée dans la solution mordante les zones non protégées seront creusées. Le bain utilisé est plus ou moins dilué et le temps de morsure plus ou moins long, selon la profondeur de taille que l'on veut obtenir.

Dans cet exercice nous considérons une gravure sur plaque de cuivre avec une solution d'acide nitrique (H⁺(aq) / NO₃⁻(aq)) comme mordant.



FIGURE 3.13: La Pièce aux cent florins, gravure à l'eau-forte de Rembrandt.

- Expliquer la couleur bleue prise par la solution.
- Le cuivre a-t-il été oxydé ou réduit ? Quel rôle joue-t-il dans cette réaction ?
- Écrire la demi-équation liée au couple redox Cu²⁺ / Cu.
- Les ions nitrate NO₃⁻ sont-ils oxydés ou réduits ? Quel rôle jouent-ils dans cette réaction ?
- Écrire la demi-équation liée au couple redox NO / NO₃⁻.
- En déduire l'équation bilan de la réaction en jeu dans la gravure à l'eau forte.

09

Né au Proche-Orient, l'art de la céramique atteint en Grèce antique un haut niveau de qualité artistique. Il est un témoignage majeur sur la vie et la culture des anciens Grecs. Considérée par de nombreux spécialistes comme l'invention du peintre d'Andokidès, la céramique à figures rouges s'est développée à partir de 530 avt J.-C. à Athènes et dans sa région. Elle supplante la céramique à figures noires qui la précédait où les figures étaient peintes en noir sur un fond clair qui gardait les couleurs naturelles de l'argile de la céramique utilisée. Sur les vases produits avec cette nouvelle technique, les images de la scène sont représentées en rouge sur fond noir.

Le constituant principal de ces céramiques est un argile riche en oxyde de fer (FeO) caractéristique de la région d'Athènes. Après le façonnage de la poterie et une coloration à l'enduit noir (crème

potassique), venait la cuisson qui se déroulait en trois étapes.



FIGURE 3.14: Scène musicale avec trois femmes. Côté A d'une amphore à figures rouges.

► La première étape de la cuisson de la céramique se faisait à une température de 800°C. Durant cette étape les ions Fe^{2+} présents dans l'oxyde ferreux (FeO) sont transformés en ions Fe^{3+} constituant l'oxyde ferrique (Fe_2O_3).

1. Le couple $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$.

- (a) Indiquer l'oxydant et le réducteur dans le couple redox $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$.
- (b) Écrire la demi-équation électronique associée à ce couple.

2. Le couple $\text{O}_2 / \text{O}^{2-}$.

- (a) Indiquer l'oxydant et le réducteur dans le couple redox $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$.
- (b) Écrire la demi-équation électronique associée à ce couple.

3. Écrire l'équation d'oxydoréduction associée à la première étape de la cuisson de la céramique.

4. Justifier la coloration rouge prise par la céramique à la fin de cette première étape.

► La deuxième étape se faisait dans une atmosphère non plus oxydante, comme à la première étape, mais réductrice. Durant cette étape, l'oxyde ferrique est réduit en oxyde ferreux (Fe_3O_4) ou en magnétite (Fe_3O_4) de couleur noire.

Écrire l'équation d'oxydoréduction de cette deuxième étape.

► Au terme de cette deuxième étape, les parties recouvertes d'enduit noir se « vitrifient », devenant ainsi imperméable. La troisième étape était un refroidissement en atmosphère oxydante où les parties non enduites reprenaient une couleur rouge.

CORROSION

10

Rappels de cours :

1. Définir la corrosion.
2. Définir la passivation.
3. Qu'est-ce qu'un métal noble ?
4. Citer plusieurs moyens de protection contre la corrosion.
5. Quelle réaction mène à la formation de la rouille ?
6. Représenter le montage associé au processus de galvanisation.
7. Quelle différence existe-t-il entre l'anodisation et la galvanisation ?

11

John Bisbee est un sculpteur américain créant des œuvres à partir de clous. Si certaines sont des assemblages de clous en fer rouillés, d'autres utilisent des clous qui n'ont pas encore été attaqués par la corrosion.

1. Expliquer le phénomène de rouille qui se produit lorsque le fer est en présence de dioxygène et d'eau.
2. Décrire la constitution des aciers inoxydables. Sont-ils sensibles à la corrosion ?
3. Écrire la demi-équations associées à la transformation du fer en ions fer (II).

4. Compléter la seconde demi-équation ci-dessous entrant en jeu dans ce processus :



5. Écrire l'équation de la réaction d'oxydoréduction entre le fer et le dioxygène.

6. Dans cette réaction quel est l'oxydant et quel est le réducteur ?

7. On souhaite protéger le fer par galvanisation. On dispose pour cela du matériel suivant :

- solution de chlorure de zinc ($\text{Zn}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{Cl}^- (\text{aq})$)
- plaque de zinc
- source de courant continu
- bêcher
- lunettes de protection
- gants
- blouse

(a) Représenter le montage de passivation à l'aide d'un schéma et décrire son fonctionnement.

(b) Écrire les demi-équations et l'équation bilan associées à ce montage.

8. Citer d'autres méthodes de protection contre la corrosion du fer.



FIGURE 3.15: Ridge, John Bisbee, 1999.

12

Le métal argenté est une technique d'orfèvrerie consistant à déposer une couche d'argent sur un métal constituant l'âme d'un objet, d'abord du

bronze puis du maillechort, un mélange de cuivre (45 % à 65 %), de nickel (5 % à 25 %) et de zinc (20 % à 45 %). Ce dépôt se fait le plus souvent par galvanoplastie comme pour la pièce représentée ci-dessous, une théière réalisée par Paul Follot pour la maison Christofle. Une électrode de titane platiné est plongée dans une solution contenant des ions argent (I) Ag^+ avec la théière. Les deux sont reliés à un générateur de courant continu. La pièce se recouvre alors d'argent.



FIGURE 3.16: Paul Follot pour Christofle, pièce de service à thé, 1903.

1. À quelle catégorie de matériaux appartiennent le bronze et le maillechort ?

2. Compléter l'équation chimique d'oxydation de l'eau ci-dessous :



3. Représenter le montage de galvanoplastie et expliquer son fonctionnement à l'aide, entre autres, de demi-équations électronique et d'une équation bilan.

4. Expliquer le dégagement de dioxygène observé au niveau de l'électrode de titane platiné.

Couples redox : Ag^+ / Ag et $\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$.

13

Un trio d'inventeurs philippins mené par l'ingénieur Lipa Aisa Mijena a développé une lampe portative alimentée à l'eau de mer. Baptisé *SALT*, cette lampe est capable de fournir 8h de lumière pour un verre d'eau de mer.



FIGURE 3.17: Lampe SALt.

Le principe de fonctionnement de cette pile est le suivant : une plaque de cuivre et une autre de zinc sont reliées entre elle par une LED et plongées dans une solution salée. Le zinc va être oxydé et l'excès d'électrons libéré dans le circuit.

Couples redox : $\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}$ et $\text{H}_2\text{O} / \text{H}_2$.

- Quel type de réaction chimique est en jeu dans la lampe *SALT*?
- Écrire la demi-équation associée à la réduction du zinc.
- Écrire la demi-équation associée au couple redox $\text{H}_2\text{O} / \text{H}_2$.
- En déduire l'équation bilan associée au fonctionnement de cette pile.
- Quel est l'oxydant et quel est le réducteur dans cette équation?
- Expliquer la formation de bulles autour de la lame de cuivre.
- Représenter le montage à l'aide d'un schéma sur lequel on fera figurer les bornes positives et négatives ainsi que le sens de circulation des électrons.
- Comment peut-on détecter la présence d'ions zinc (II) dans la solution aqueuse?

14

Le vert-de-gris est le nom donné au produit de la corrosion du cuivre observable sur certaines sculptures, notamment exposées en extérieur. La formation de cette patine verdâtre se fait en deux étapes :

- Une première étape où le cuivre réagit avec le dioxygène pour produire de l'oxyde de cuivre (CuO). Les couples redox en jeu sont $\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}$ et $\text{O}_2 / \text{O}^{2-}$.
- Une deuxième étape au cours de laquelle des ions H^+ sont échangés entre l'oxyde de cuivre CuO et l'acide carbonique (CO_2 , H_2O) pour former de l'hydroxycarbonate de cuivre ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$) de couleur verte.



FIGURE 3.18: The Spirit of Detroit, Marshall Fredericks, 1958.

- Expliquer pourquoi ce phénomène touche les sculptures en bronze.
- Expliquer la couleur verdâtre observée à l'aide de schémas.
- À quel type de réaction chimique appartient le processus correspondant à la première étape?
- Écrire les demi-équations pour chacun des couples redox
- Quelle est l'équation bilan de l'étape 1? Indiquer le réactif jouant le rôle de l'oxydant et celui jouant le rôle du réducteur dans cette réaction.
- Écrire l'équation globale associée à la formation du vert de gris et indiquer la provenance des différents réactifs.
- On parle de passivation lorsque le vert-de-gris est observé sur des sculptures comme la Statue de la Liberté. Expliquer ce qu'est la passivation et en quoi celle-ci protège la sculpture de la corrosion.

15

À la manière d'un peintre, l'artiste Hicham Berrada réalise des œuvres où les réactions chimiques se substituent aux coups de pinceaux.

► *Presage*, est une série de performances où l'artiste déclenche un ensemble de réactions chimiques dans un bocal aboutissant à la création d'un paysage abstrait. L'évolution de ces réactions est alors filmée et projetée simultanément sur un écran.

Dans cette première partie nous allons étudier la création d'un nuage bleuté inspiré par le travail d'Hicham Berrada.

- Proposer une réaction permettant de créer ce nuage bleuté.
- Pour obtenir une solution d'ions Cu^{2+} , on plonge une lame de cuivre dans une solution d'ions argent Ag^+ . On donne les couples redox suivants : Ag^+ / Ag , $\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}$.
 - Identifier pour chacun des couples redox l'oxydant et le réducteur.
 - Écrire la demi-équation électronique associée à chacun de ces couples.
 - En déduire l'équation bilan de la réaction d'oxydoréduction entre les ions Ag^+ et le cuivre.



FIGURE 3.19: Presage, performance, Hicham Berrada, 2007.

► La série *Masse et Martyr* est un ensemble de concréctions artificielles en bronze (Keromanies) réalisées en milieu aqueux traversé par un courant

- Définir ce qu'est un alliage.

- Quel alliage intervient dans *Masse et Martyr*? Quels sont les principaux constituants de cet alliage?
- Quel est le type de réaction en jeu dans cette œuvre?
- On souhaite reproduire l'œuvre de Hicham Berrada en plongeant une lame de cuivre et une lame de graphite, reliées à une source de courant continue, dans une solution de nitrate d'argent ($\text{Ag}^+ + \text{NO}_3^-$).
 - Proposer un montage reproduisant la réaction observée.
 - Écrire la demi-équation électronique du couple redox $\text{Ag}^+ (\text{aq}) / \text{Ag} (\text{s})$
 - Écrire la demi-équation électronique du couple redox $\text{H}^+ (\text{aq}) / \text{H}_2 (\text{g})$
 - En déduire l'équation d'oxydoréduction se produisant dans *Masse et Martyr*.



FIGURE 3.20: Masse et Martyr, Hicham Berrada, 2017.

16

On souhaite réaliser une œuvre d'art en aluminium. Afin de la protéger de toute dégradation, on recouvre chaque pièce d'une couche d'alumine.

- Qu'est-ce que l'alumine et en quoi cette couche diffère-t-elle de la rouille?
- Expliquer les avantages de cette protection.
- On souhaite créer artificiellement cette couche de protection.
 - Représenter un montage conduisant à la formation de cette couche protectrice en décrivant son fonctionnement.
 - Quel est le nom donné à ce procédé?

LES MINÉRAUX

Objectifs du chapitre : Citer le principal constituant du verre / Distinguer solide amorphe et solide cristallin / Distinguer un verre minéral d'un verre organique / Expliquer le rôle d'un fondant / Citer des techniques de coloration d'un verre / Définir un matériau céramique / Donner des exemples de céramiques traditionnelles et techniques / Citer des techniques de coloration des céramiques.

04



DAVID PATCHEN
Resistenza
2006

LE MOUVEMENT STUDIO GLASS

Doc 1

Né aux États-Unis durant les années 1960, avant de se propager à l'Europe puis à l'Asie et l'Australie, le *Studio Glass Movement* est un mouvement composé d'artisans verriers qui soufflent leur verre en dehors des usines de verrerie. Jusque-là, en effet, le verre était principalement produit en usine, même pour les souffleurs indépendants qui devaient alors se déplacer dans ces grands bâtiments. Le mouvement *Studio Glass* opte pour un art d'atelier, loin des grandes structures, produisant des collections petites et originales.



FIGURE 4.1: Sculpture en verre, collection *Resistenza*, David Patchen, 2006

Doc 2

La composition du verre

- Le principal constituant du verre traditionnel est la silice. Il représente environ 70% de la masse du verre. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les sables quartzeux). Le sable de Fontainebleau, du fait de sa qualité, est très recherché pour la fabrication de

verres d'optique et de cristal.

- Afin d'abaisser la température de fusion de la silice, on ajoute des fondants comme l'oxyde de sodium (Na_2O) ou soude, utilisé principalement pour le verre industriel, l'oxyde de potassium (K_2O) ou potasse, utilisé pour le verre soufflé, ou l'oxyde de magnésium (MgO) pour le verre flotté.
- Les fondants augmentent la solubilité à l'eau du verre et sa fragilité. Afin de contrecarrer cet effet, des stabilisants comme l'oxyde de calcium (CaO), l'oxyde de zinc (ZnO), l'oxyde de fer (Fe_2O_3) ou l'oxyde de plomb (PbO) sont ajoutés au mélange.
- Certains de ces oxydes font office également de colorant. Les verres sont le plus souvent teintés dans la masse : on ajoute des oxydes métalliques dans le mélange qui coloreront le verre lors de la fusion. L'oxyde de fer donnera une teinte verte, l'oxyde de cobalt une couleur bleue, l'oxyde de cuivre une couleur rouge, etc.

Doc 3

Les étapes de fabrication du verre

La température de fusion de la silice se situe aux alentours des 1700°C. À cette température le verre peut être façonné à la convenance de l'artiste afin de lui donner sa forme finale. Il peut être soufflé, coulé dans un moule ou flotté sur un bain d'étain. Afin d'abaisser cette température de fusion, il est possible de rajouter des éléments tels que la potasse (oxyde de potassium), de la soude (oxyde de sodium) ou de la chaux.

Après l'avoir laissé refroidir, le verre subit un traitement thermique afin d'améliorer sa résistance. Pour cela, on procède à un recuit constant à chauffer de nouveau le verre à une température approximant les 600°C, suivie d'une trempe, un refroidissement brutal du verre chauffé.



Doc 4

Le verre est un des déchets les plus résistants : sa biodégradation prend environ 4000 ans. Théoriquement, le verre se recycle à 100% et à l'infini sans perdre ses qualités. Le taux de recyclage du verre en France atteint 79,9%.

Le recyclage du verre consiste en une première étape de tri où celui-ci est séparé des éléments métalliques par un tri magnétique, puis des éléments non transparents, comme la céramique, par un tri visuel effectué par une sonde infrarouge. Il est ensuite broyé pour former du calcin, la principale matière première utilisée pour fabriquer du verre. La plupart des verres sont ainsi produits à partir d'un mélange contenant 80% de calcin issu du recyclage.

À partir des documents précédents, répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les principaux éléments entrant dans la composition du verre ? Décrire le rôle de chacun de ces éléments.
- Décrire les principales étapes de fabrication d'un verre.
- Quel est l'avantage lié à l'utilisation d'un fondant en terme d'économie d'énergie ?
- Quels sont les avantages et les inconvénients du verre en terme d'impact environnemental ?

LES VERRES

DÉFINITIONS

- Le verre minéral est un matériau composé principalement de dioxyde de silicium SiO_2 .
- C'est un solide amorphe. Par opposition à un solide cristallin, sa structure n'est pas faite d'un arrangement régulier d'atomes.

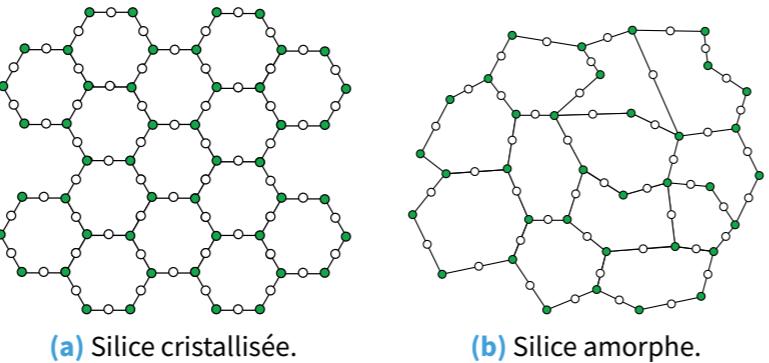


FIGURE 4.2: Représentation schématique de la silice cristallisée et amorphe.

- Le terme générique de verre désigne tout matériau amorphe présentant le phénomène de transition vitreuse (passage d'un état caoutchouteux à un état vitreux, solide). On distingue le verre minéral, à base de SiO_2 , des autres verres dits organiques.

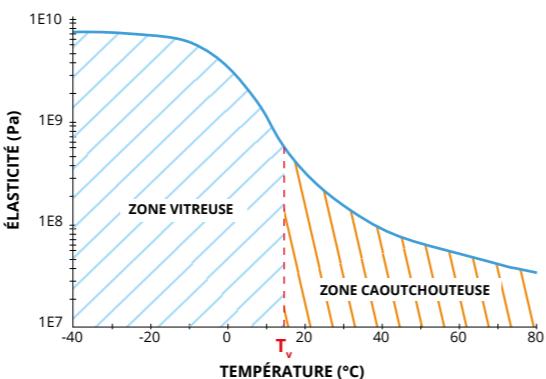


FIGURE 4.3: Illustration de la température de transition vitreuse – Diagramme d'élasticité en fonction de la température.

FONDANTS ET COLORANTS

- Afin d'être transformée, la silice doit être fondu à des températures élevées (1730°C).

On utilise des **fondants**, comme la soude, la potasse ou la chaux, afin d'**abaisser** cette température de fusion et faciliter le travail mise en forme tout en réalisant des économies d'énergie.



FIGURE 4.4: La silice fond à une température de 1730°C . L'ajout de fondants permet d'abaisser cette température afin de faciliter le travail de mise en forme.

- Des métaux et des oxydes métalliques peuvent être rajoutés lors du processus de fabrication du verre pour influer sur sa couleur. On dit alors que le verre est teinté dans la masse.
- **Exemples :**
 - l'oxyde de fer donnera une teinte verte,
 - l'oxyde de cobalt une couleur bleue,
 - l'oxyde de cuivre une couleur rouge,
 - l'oxyde de manganèse une couleur violette ou bleue,
 - le sélénium une teinte allant du jaune orangé au rouge.



FIGURE 4.5: Les oxydes métalliques sont rajoutés durant le processus de fabrication afin de colorer le verre. De gauche à droite : Foglio de David Patchen, Seaforms de Michael Behrens, Wind Song Glass de Peter Newsome.

- Il existe toujours un faible pourcentage d'oxydes métalliques qui teintent le verre d'une couleur verdâtre. Pour obtenir un verre incolore, il est nécessaire de le décolorer soit, par exemple, en ajoutant des oxydes de titane, d'antimoine ou de manganèse qui neutralisent l'effet colorant des ions Fe^{2+} et Fe^{3+} , soit en introduisant la couleur complémentaire à celle de l'oxyde métallique déjà présent pour faire tendre la teinte de la masse vitreuse vers le gris.

LES CÉRAMIQUES

DÉFINITIONS

- Les **céramiques** sont une catégorie de matériaux très vaste. Elle inclut l'ensemble des matériaux inorganiques, non métalliques et qui nécessitent de hautes températures lors de leur fabrication.
- Les céramiques ont généralement une structure cristalline parfois associée à une phase amorphe. Lorsque la majorité est amorphe, on parle de **vitrocéramique**; lorsque la totalité est amorphe, on parle de **verre**.
- On distingue les céramiques en deux catégories selon leur application :
 - les céramiques traditionnelles** utilisées pour l'alimentation, le bâtiment ou l'ornementation, comme la poterie, la vaisselle, la faïence, la porcelaine, le carrelage, les briques et les tuiles;
 - les céramiques techniques ou industrielles** utilisées pour l'électronique, l'électrotechnique (fortes puissances), la mécanique, l'optique ou l'ingénierie thermique.



FIGURE 4.6: La poterie, comme les briques, sont des exemples de céramiques traditionnelles.



FIGURE 4.7: Exemples de céramiques techniques : freins en céramique; plaque en vitrocéramique d'une table de cuisson à induction.

PROPRIÉTÉS

- Les céramiques sont généralement très rigides.
- Elles ont une température de fusion très élevée, supérieure à 2000°C.
- Elles sont insensibles à la corrosion et ont une bonne résistance à l'usure.
- Elles sont inertes chimiquement et sont de bons isolants électriques voir thermiques.

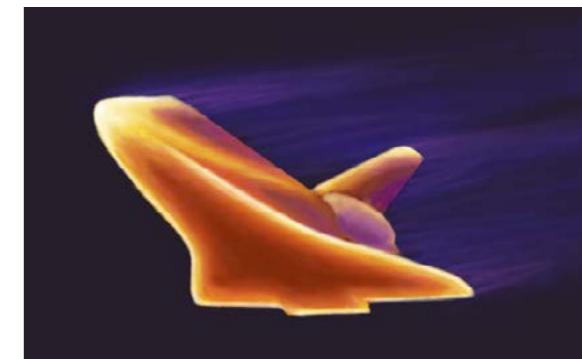


FIGURE 4.8: Le bouclier thermique en céramique protège les véhicules spatiaux lors de leur entrée dans l'atmosphère.

FABRICATION ET COLORATION

- La fabrication d'une céramique part d'une **poudre**. Pour les céramiques traditionnelles, il s'agit de matières premières naturelles (argile, terre glaise, kaolin). Pour les céramiques techniques, ce sont des poudres obtenues par synthèse chimique.
- Après une éventuelle première mise en forme, on procède à la cuisson de la poudre, appelée **frittage**, durant laquelle les grains se soudent entre eux sans qu'il y ait un passage par une phase fondu.
- Comme pour le verre, il est possible de **colorer** une céramique en introduisant un ou des **oxydes métalliques** à la poudre avant frittage. La température et l'atmosphère de cuisson ont une influence sur la couleur donnée par l'oxyde.
- Il est également possible de colorer une céramique en **surface** : le colorant est mélangé à un liquide porteur constitué d'eau et de produits organiques comme la glycérine, la gomme arabique, de l'amidon ou des colles cellulaires. Après la pose, on procède à l'élimination du liquide porteur et des produits organiques par séchage, afin de ne laisser au final qu'une fine couche de colorant.

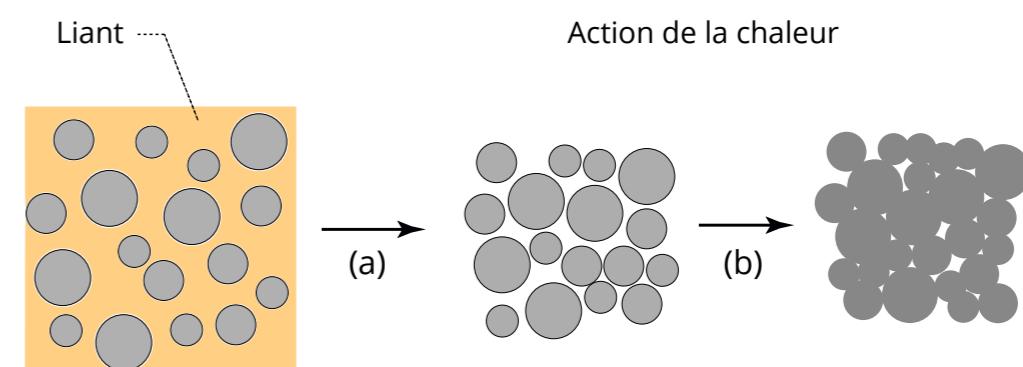


FIGURE 4.9: Frittage d'une céramique - (a) dans le cas d'un frittage avec liant, sous l'action de la chaleur, le liant s'évapore puis, (b) les grains se soudent entre eux donnant sa cohésion au matériau.

EXERCICES

03.

VERRES

01

Rappels de cours :

1. Qu'est-ce qu'un solide amorphe?
2. Rappeler le composant principal du verre.
3. Définir la température de transition vitreuse.
4. Quel est le rôle d'un fondant?
5. Décrire les techniques permettant de teinter un verre.

02

Lors de la visite d'une verrerie traditionnelle, chaque œuvre exposée dispose d'un cartel présentant les éléments entrant dans sa fabrication.

Sous l'une d'entre elle on peut lire :

Vase Améthyste, 2019

- Sable
- Potasse
- Oxyde de manganèse

1. Expliquer le rôle de chacun des éléments donnés dans la fabrication du verre.
2. Quelle est la couleur du verre décrit?

03

Lors de la visite d'une verrerie traditionnelle, un panneau indique les étapes de fabrication du verre. On peut y lire :

Afin de pouvoir travailler le verre, le sable est chauffé dans un four à une température de 1750°C. Une fois sa forme finale obtenue vient l'étape du « recuit » où le verre est refroidi selon un processus strict afin d'éviter des écarts de températures brusques qui fragiliseraient celui-ci.

1. Définir la température de transition vitreuse d'un verre.
2. Par quels moyens peut-on abaisser cette température?

04

Dale Chihuly est un artiste du verre américain. Son travail se distingue par une connaissance approfondie des techniques du verre et de sa coloration. Ses œuvres, souvent monumentales, sont distribuées dans le monde entier, sous la forme d'objets décoratifs, de sculptures ou d'installations. Le langage formel de Chihuly se transmet par des séries où le même élément visuel est répété avec des variantes. Ci-dessous une œuvre de la série Soleil



FIGURE 4.10: Soleil, Dale Chihuly, Jardins botaniques royaux de Kew à Londres.

1. Donner le principal composant du verre.
2. Le verre a une structure amorphe. Qu'est-ce que cela signifie?
3. Comment obtient-on un verre coloré?
4. Quel phénomène physique permet à Dale Chihuly de façonner le verre afin de lui donner sa forme finale?

05

Le polyméthacrylate de méthyle, abrégé PMMA et connu aussi sous le nom de verre acrylique ou plexiglas, est un polymère obtenu par polyaddition du méthacrylate de méthyle. C'est un substitut du verre, car bénéficiant d'une très grande transparence, qui est moins cher à produire que celui-ci. Sa température de transition vitreuse est

comprise entre 46°C et 159°C, alors que celle de la silice est de 1730°C. Enfin, sa masse volumique est de 1,19g.cm⁻³ alors que celle du verre est de 2,4g.cm⁻³.

Subtractive Variability Manipulable 3 est une œuvre cinétique de l'artiste argentin-espagnol Felipe Pantone réalisée en PMMA. Les trois panneaux colorés peuvent être déplacés afin de créer différents gradients de couleurs.



FIGURE 4.11: Subtractive Variability Manipulable 3, Felipe Pantone, 2020.

1. Quelle est la différence fondamentale entre le polycarbonate et le verre?
2. Quelle propriété ont-ils en commun?
3. Quels sont les avantages du PMMA par rapport au verre classique?
4. Classer et interpréter les températures de transition vitreuse données pour chaque matériau.
5. Décrire les différences dans le processus de coloration du PMMA.
6. Comparer chacun des matériaux en terme d'impact sur l'environnement.

CÉRAMIQUES

06

Rappels de cours :

1. Qu'est-ce qu'une céramique?
2. Quel est le composant principal d'une céramique?

- Quelles sont les deux types de structure cristalline qui peuvent co-exister dans une céramique?
- Qu'est-ce qu'une vitrocéramique?
- Quels sont les principales propriétés physiques d'une céramique?
- Donner les différentes méthodes de coloration d'une céramique.

07

Parmi les éléments suivants, lesquels sont des céramiques?



Verre



Cuivre



Plexiglas



Brique



Freins



Nylon

08

L'art de la céramique grecque, hérité du Proche-Orient, a été développé grâce aux échanges commerciaux. Il est également un témoignage majeur sur la vie et la culture des anciens Grecs. Les vases peints étaient principalement utilisés dans la vie quotidienne des familles les plus aisées, voire aristocratiques, dans le cadre du banquet ou pour la toilette. Du style mycénien, XIVe siècle avt. J.-C., aux motifs décoratifs simples peints

à même la surface, à la céramique attique développée au Ve siècle avt. J.-C. dans la région d'Athènes, aux dessins complexes obtenus par oxydoréduction et révélés au terme de plusieurs phases de cuissons, les techniques de fabrication des céramiques grecques n'ont eu cesse de se perfectionner pour atteindre un haut niveau de qualité artistique.

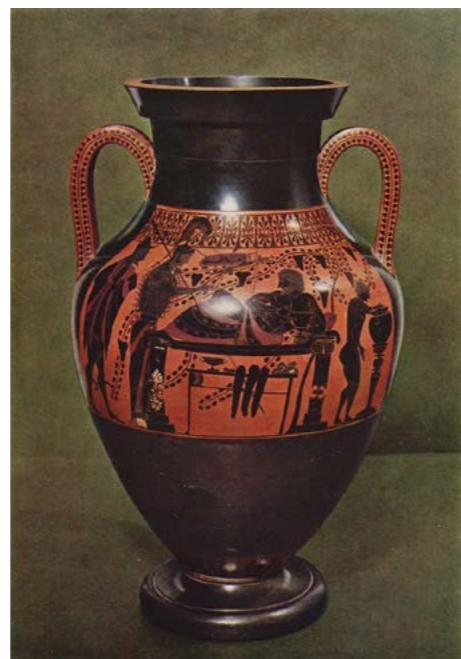


FIGURE 4.12: Héraclès et Athéna, céramique à figures noires, vers 520-510 avt. J.-C.

- Qu'appelle-t-on une céramique?
- À partir de quel matériau de base les céramiques grecques étaient-elles formées?
- Quelles sont les principales propriétés physiques de la céramique qui explique son utilisation notamment pour le transport de liquides.
- Quelles sont les deux techniques de coloration d'une céramique?

09

La faïence est l'une des plus communes et des plus anciennes techniques utilisées en céramique. Après les premières étapes de façonnage et de cuisson, un glaçure, appelée couverte, composée d'oxyde de plomb, de silice et d'oxyde d'étain, est déposée et nappe l'objet. Le fond blanc ainsi obtenu permet d'exécuter une véritable peinture et reproduire des décors élaborés sur la céramique. Avant sa découverte au IXe

siècle en Orient, la peinture posée au pinceau sur les céramiques ne ressortait pas vivement et pouvait s'épancher sur le vernis. Cette technique fut diffusée en Occident à la Renaissance, notamment en Italie, en particulier à Faenza où elle fut rendue célèbre.



FIGURE 4.13: Faïence de Nevers, pose du décor.

- Quelles méthodes permettent de colorer une céramique?
- Quelle est la particularité de la faïence en terme de décoration de céramique?

10

En 1953, S. Donald Stookey a découvert par accident le Pyroceram, un matériau vitrocéramique blanc capable de résister à un choc thermique pouvant aller jusqu'à 450°C. Sa première application fut militaire, puis, la société Corning pour laquelle Stookey travaillait, lança une gamme de produits de cuisine nommée CorningWare. Cette vitrocéramique est basée sur le système ternaire LiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 dit « LAS ».

- Quelle est la différence entre céramiques traditionnelles et céramiques industrielles?
- Quel est le matériau permettant de produire une céramique traditionnelle?
- La collection CorningWare appartient-elle à la catégorie des céramiques industrielles ou traditionnelles?

- Quelle est le matériau permettant de produire la céramique décrite?
- Quelles sont les propriétés physiques de la céramique qui explique son utilisation dans le contexte présenté?
- Expliquer ce qu'est une vitrocéramique.



FIGURE 4.14: Échantillon de la collection CorningWare.

11

Les systèmes de freinage fonctionnent par friction. Ils convertissent l'énergie cinétique d'un objet en mouvement en une énergie thermique, en exerçant une pression sur une structure mobile. Lorsque la chaleur induite devient trop importante, le système de freinage peut subir des dégradations allant jusqu'à la destruction totale. Les disques de frein les plus communément utilisés sont fabriqués en acier. Les freins en céramiques, habituellement produits à partir d'un mélange silice carbone, sont une alternative plus résistante, mais aussi plus onéreuse.

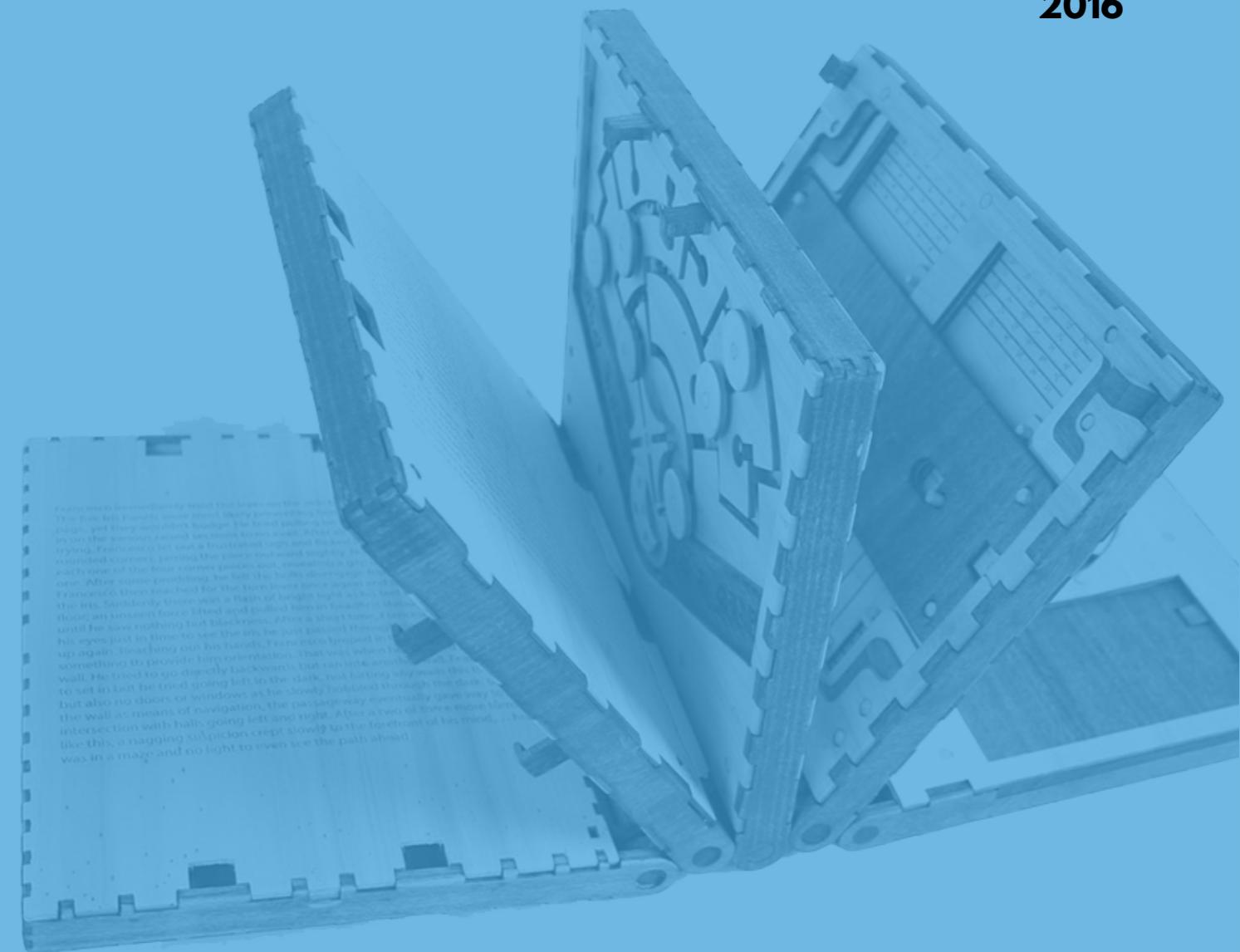
- À quel type de matériau appartient les disques en céramiques présentés?
- Qu'est-ce qu'une céramique technique ou industrielle?
- Qu'est-ce qui différencie la céramique présentée d'une céramique traditionnelle?
- Expliquer, en présentant les principales propriétés physiques des céramiques, les raisons de leur utilisation comme système de freinage.

LA LUMIÈRE

Objectifs du chapitre : Connaître les différents domaines des ondes électromagnétiques / Citer l'intervalle des longueurs d'onde dans le vide des radiations visibles / Lier énergie d'un photon et longueur d'onde d'une onde électromagnétique / Décrire les phénomènes d'interaction matière-rayonnement / Calculer l'énergie d'un photon produit ou absorbé lors d'une interaction matière-rayonnement / Définir le phénomène de luminescence / Calculer un flux lumineux / Calculer un éclairement / Caractériser une source lumineuse par son spectre / Citer les caractéristiques d'un rayonnement laser / Connaître les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation des sources lumineuses / Expliquer le guidage de la lumière dans une fibre optique / Définir la température de couleur d'une source lumineuse / Définir l'indice de rendu des couleurs d'une source lumineuse / Choisir une lampe en fonction de son impact environnemental.

05

BRADY WHITNEY
Codex Silenda
2016



01. ACTIVITÉ

Doc 1

Pour le défilé de Philip Tracey à la Royal Courts of Justice de Londres, le designer Moritz Waldemeyer a imaginé une structure de type panier illuminé descendant de la tête pour envelopper tout le corps de son modèle. Un maillage complexe de fils a été tissé autour d'un noyau en polystyrène, pour être ensuite imbibés de résine et reliés à 6000 lumières LED créant ainsi un manteau de lumière flottant.



FIGURE 5.1: Shroud Hat de Moritz Waldemeyer

Doc 2

Une diode électroluminescente (abrégé en LED en anglais ou DEL en français) est un dispositif capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Ce phénomène est lié à la transition d'un électron d'un niveau d'énergie à un autre dans le sens décroissant, s'accompagnant ainsi d'une libération d'énergie sous la forme d'une onde électromagnétique.

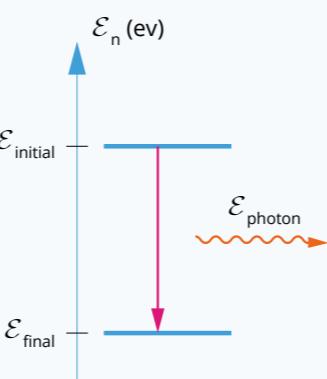


FIGURE 5.2: Émission d'un photon dans une LED.

Doc 3

Le rayonnement du Soleil est composé de toute une gamme d'ondes électromagnétiques. Ces ondes électromagnétiques sont caractérisées par leur longueur d'onde λ . On distingue en fonction de celle-ci plusieurs catégories d'ondes.

La lumière visible est une onde électromagnétique dont la longueur d'onde appartient à l'intervalle [400nm ; 700nm]. Elle est le plus souvent un mélange de plusieurs ondes électromagnétiques de longueurs d'ondes différentes. Le spectre d'une source lumineuse représente la proportion de chaque longueur d'onde dans la lumière produite par celle-ci.

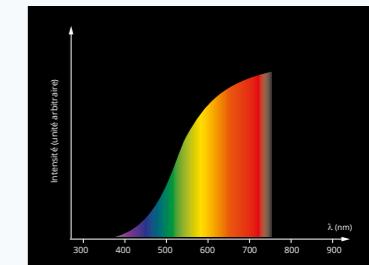
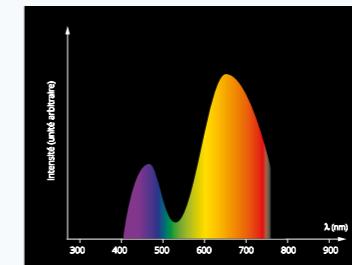
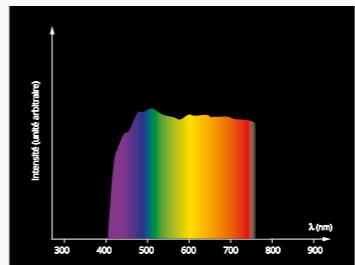


FIGURE 5.3: Spectre du soleil (à gauche), d'une LED (au centre) et d'une lampe incandescente (à droite).

Doc 4

Le tableau ci-dessous compare les caractéristiques techniques d'une LED et d'une lampe à incandescence

Type d'éclairage	LED	Lampe incandescente
Durée de vie (h)	40000	7500
Poids (g)	0,5	150
IRC*	85	95
Puissance (W)	21	100

*L'indice de rendu des couleurs, abrégé IRC, caractérise la capacité d'une source de lumière à assurer une bonne perception de toutes les couleurs d'un objet. Plus le spectre de cette source sera proche de celui du soleil, plus son indice sera élevé. Un indice de 100, la plus haute valeur atteignable, correspondra à la lumière du jour à midi; un indice de 0 sera associé à un éclairage qui ne permet de distinguer aucune couleur.

À partir des documents précédents, répondre aux questions suivantes :

- Qu'appelle-t-on la lumière visible ?
- Décrire le spectre de la LED présentée ? Quelle est la couleur dominante ?
- Expliquer en quoi la LED a un impact sur l'environnement plus faible qu'une lampe à incandescence.
- L'éclairage par LED permet-il une bonne perception de toutes les couleurs d'un objet comparativement à l'éclairage par lampe incandescente ?
- Présenter les avantages et les inconvénients de l'éclairage LED par rapport à l'éclairage par lampe incandescente.

Doc 1

Le Codex Silenda est un livre-puzzle imaginé par le designer industriel Brady Whitney. Fabriqué à partir de bois découpé au laser, il comporte 5 pages comprenant chacune une nouvelle qui ne peut être lue qu'après avoir déverrouillé la page en résolvant une énigme mécanique complexe.



FIGURE 5.4: Codex Silenda de Brady Whitney.

Doc 2

Le laser est un appareil qui produit un rayonnement électromagnétique très dense en énergie. Ses applications industrielles sont variées : soudage, découpe, perçage, etc.

Le faisceau lumineux émis par un laser est :

- directif, les rayons lumineux d'une source laser pouvant être considérés comme tous parallèles, le faisceau lumineux est pratiquement rectiligne;
- monochromatique, c'est-à-dire qu'il n'émet qu'une seule longueur d'onde.

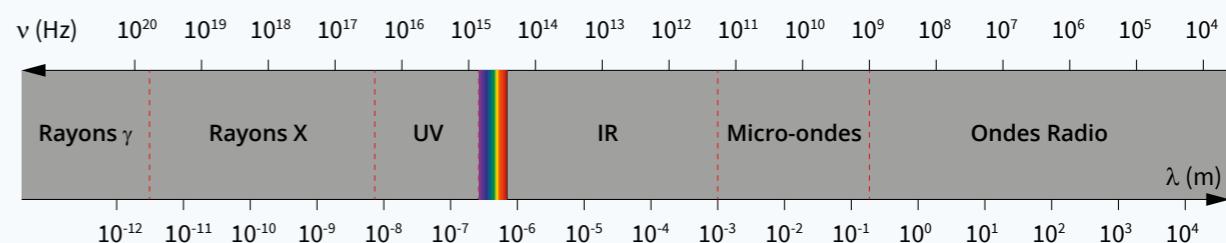
La puissance d'un laser est comprise entre 1mW et 50kW pour les lasers dont le faisceau est continu, et peut aller jusqu'à plusieurs milliards de kilowatts pour les lasers impulsionnels.



FIGURE 5.5: Lumière émise par un laser.

Doc 3

Les ondes électromagnétiques sont classées suivant leur longueur d'onde dans différents domaines :



En 1900, Max Planck affirme que les échanges d'énergie entre une onde électromagnétique et la matière ne peuvent se faire que par « paquets » d'énergie et il nomme ces derniers des quanta. En 1905, Albert Einstein émet l'hypothèse que ces paquets d'énergie sont portés par des particules, que Gilbert Newton Lewis nommera plus tard photons, dont l'énergie est donnée par la formule :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu$$

où $\mathcal{E}_{\text{photon}}$ est l'énergie exprimée en joule (J),
 ν la fréquence exprimée en hertz (Hz),
 h la constante de Planck, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}^{-1}$.

Doc 4

Les caractéristiques techniques du laser utilisé pour la découpe du Codex Silenda sont données dans le tableau ci-dessous :

Longueur d'onde (mm)	0.0106
Puissance	40000
Type	CO ₂
Classe*	IIIb

*Le rayonnement émis par un laser présente des risques pour l'œil, la peau et les tissus. Le niveau de risque encouru est renseigné par la classe du laser, allant de I/II pour les faisceaux non dangereux, à III/IV pour ceux présentant un risque important.

À partir des documents précédents, répondre aux questions suivantes :

1. Donner les principales caractéristiques de la lumière produite par un laser.
2. À quel domaine appartient le rayonnement laser utilisé pour produire le Codex Silenda ?
3. Quelle est l'énergie des photons produits par le laser ?
4. Quelle est la différence entre le rayonnement électromagnétique émis par le Soleil et celui émis par un laser ?
5. L'utilisation de ce laser présente-t-il des risques ? Expliquer pourquoi.

LA LUMIÈRE ET LA DUALITÉ ONDE-PARTICULE

La lumière présente à la fois des propriétés d'onde et des propriétés de particule. Nous allons décrire chacune d'entre elles dans les paragraphes suivants.

LE MODÈLE ONDULATOIRE

- ▶ Une **onde** est la propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible des propriétés physiques locales du milieu.



FIGURE 5.6: Onde propageant une déformation mécanique

- ▶ Une **onde électromagnétique**, contrairement aux ondes mécaniques, peut se propager dans le vide et engendre une variation locale du champ électrique et magnétique.
- ▶ La **lumière** peut être décrite par une onde électromagnétique. On assimile alors la direction de propagation de l'énergie de cette onde au **rayon lumineux**.
- ▶ Une onde est caractérisée par sa **fréquence ν** (en Hertz) ou sa **longueur d'onde λ** (en mètre). Fréquence et longueur d'onde sont reliées par la formule :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

où c représente la **célérité** de l'onde, c'est-à-dire sa vitesse de propagation, en m.s^{-1} .

- ▶ Dans le vide, la célérité des ondes électromagnétiques vaut $3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

SPECTRE DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

- ▶ On appelle **spectre électromagnétique** le classement des rayonnements électromagnétiques par fréquence ou

longueur d'onde dans le vide. Son amplitude va de 10^{-15} m à 10^3 m .

- ▶ On le divise en **sept domaines** aux limites plus ou moins distinctes :

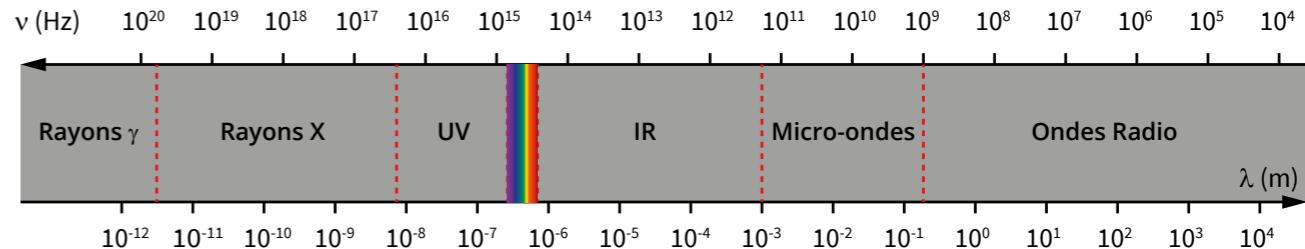


FIGURE 5.7: Spectre électromagnétique.

- ▶ La lumière occupe le domaine compris entre 400 nm et 800 nm, allant du violet au rouge :

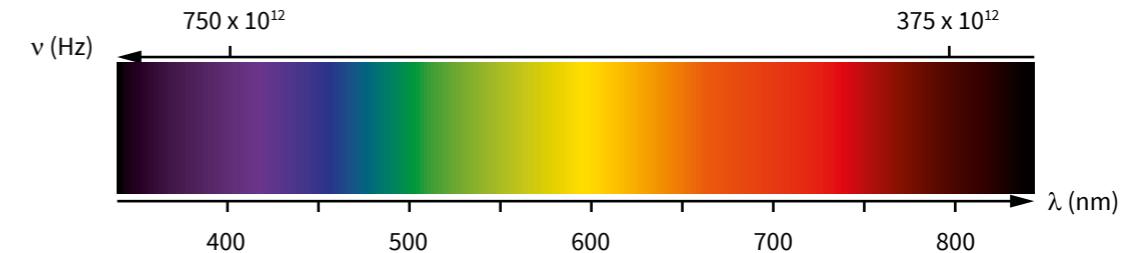


FIGURE 5.8: Domaine de la lumière visible dans le spectre électromagnétique.

Ainsi l'intervalle de longueur d'onde perceptible par l'œil humain constitue une petite fraction du spectre électromagnétique.

- ▶ La lumière blanche issue du rayonnement solaire est une superposition de toutes les ondes du spectre du domaine du visible : on parle de radiation **polychromatique**.
- ▶ Chaque longueur d'onde dans cet intervalle correspond à une couleur de rayonnement. Une onde constituée d'une seule longueur d'onde est dite **monochromatique**.

LE MODÈLE PARTICULAIRE

À partir du début du XX^e siècle, suite, entre autres, aux travaux de Max Planck sur la quantification de l'énergie électromagnétique et d'Albert Einstein sur l'effet photovoltaïque, la lumière est également décrite comme un ensemble de particules appelées **photons**. Un rayon lumineux est alors la trajectoire de propagation de ces particules **de masse nulle** se déplaçant dans la vide à la vitesse c .

La cohésion des deux modèles est en partie assurée par la relation de Planck-Einstein :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$$

Ainsi une onde électromagnétique de fréquence ν ou de longueur d'onde λ peut être décrite par des photons qui transportent chacun un quantum d'énergie $\mathcal{E}_{\text{photon}}$ donné par la relation ci-dessus, où $\mathcal{E}_{\text{photon}}$ est en **joules**, ν en Hertz, c en m.s^{-1} , λ en mètre, et

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

On appelle h la constante de Planck.

La lumière est à la fois de nature ondulatoire et particulaire : on parle de **dualité onde-particule**.

L'INTERACTION LUMIÈRE-MATIÈRE ET LA LUMINESCENCE

QUANTIFICATION DE L'ÉNERGIE DES ATOMES

Niels Bohr propose en 1913 un modèle de la structure de l'atome d'hydrogène en introduisant la notion de niveaux d'énergie **quantifiés**. Ces derniers ne peuvent prendre que certaines valeurs.

Sur un diagramme de niveau d'énergie (cf. ci-dessous), le niveau d'énergie le plus bas correspond à l'état stable de l'atome, appelé **état fondamental**. Les autres niveaux correspondent à des états moins stables, appelés **états excités**.

EXEMPLE : CAS DE L'ATOME D'HYDROGÈNE

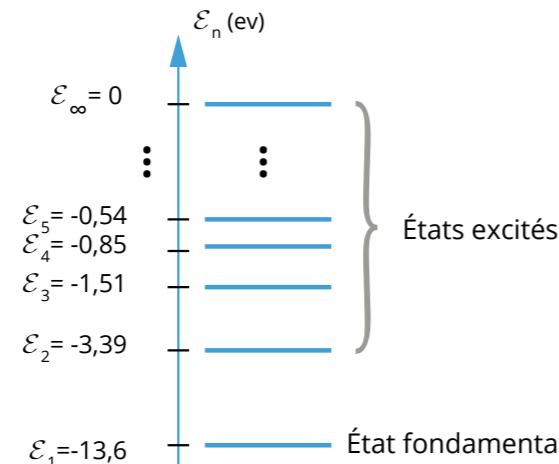


FIGURE 5.10: Diagramme de niveaux d'énergies de l'atome d'hydrogène.

REMARQUES

- L'état de plus haute énergie correspond à la perte d'un électron ; l'atome est alors **ionisé**. Par convention son énergie notée E_∞ est égale à 0.
- Les énergies des autres niveaux sont négatives.
- Ce modèle proposé pour l'atome d'hydrogène peut être généralisé aux autres atomes, mais la représentation des niveaux y sera plus complexe.

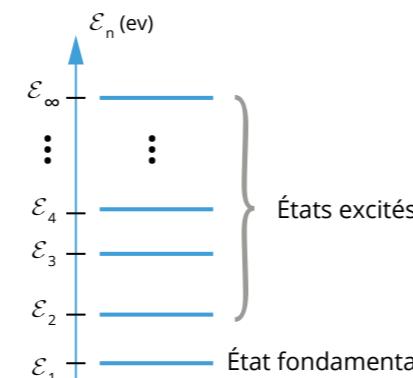


FIGURE 5.9: Diagramme de niveaux d'énergies.

ÉMISSION ET ABSORPTION DE LA LUMIÈRE PAR UN ATOME

La transition d'un niveau d'énergie à un autre dans un atome induit l'émission ou l'absorption d'un photon dont la longueur d'onde dépend de l'écart d'énergie entre les deux niveaux.

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = \mathcal{E}_{\text{final}} - \mathcal{E}_{\text{initial}} = \frac{h \times c}{\lambda}$$

► Si $\mathcal{E}_{\text{final}} < \mathcal{E}_{\text{initial}}$, l'atome perd de l'énergie en émettant un photon. Si la fréquence du photon émis appartient au domaine du visible, la radiation correspondra à une raie colorée dans le spectre d'émission de l'atome.

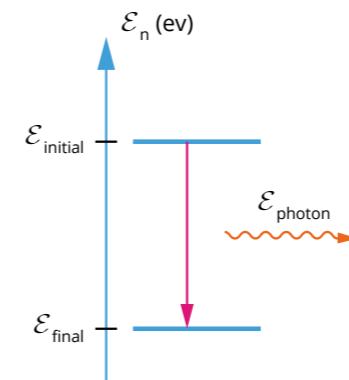


FIGURE 5.11: Émission de lumière par perte d'énergie.

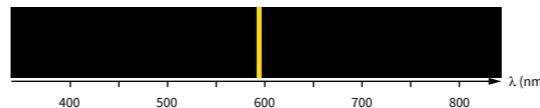


FIGURE 5.12: Spectre d'émission de l'atome de sodium.

► Si $\mathcal{E}_{\text{final}} > \mathcal{E}_{\text{initial}}$, l'atome gagne de l'énergie en absorbant un photon. Si la fréquence du photon absorbé appartient au domaine du visible, la radiation correspondra à une raie noire dans le spectre d'émission de l'atome.

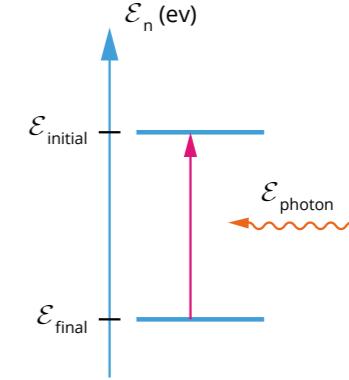


FIGURE 5.13: Absorption de lumière et gain d'énergie.

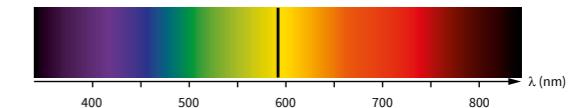


FIGURE 5.14: Spectre d'absorption de l'atome de sodium.

LUMINESCENCE

- La **luminescence** désigne l'émission d'un rayonnement électromagnétique d'origine non thermique, par opposition à l'incandescence.
- Ce sont des transitions électroniques ayant lieu dans des atomes, des molécules ou des cristaux qui provoquent l'émission de photons.
- L'énergie libérée sous forme de lumière lors de la transition peut être initialement fournie sous forme :
 - électrique (électroluminescence) : les diodes électroluminescentes (DEL) ou télévisions,
 - chimique (chimiluminescence) : les lucioles ou les bâtons luminescents,
 - mécanique (mécaluminescence) : les tubes cathodiques,
 - lumineuse (photoluminescence) : les tubes luminescents dits néons.



FIGURE 5.15: Huntington Beach par Barry UNDERWOOD. Installation de LED et de substances luminescentes.

LA PHOTOMÉTRIE

On appelle **photométrie** l'étude de la lumière du point de vue énergétique.

LE FLUX LUMINEUX ET ÉCLAIREMENT

- Le **flux lumineux** ϕ_L caractérise la puissance lumineuse émise par une source lumineuse. Son unité est le **lumen** abrégé *lm*.

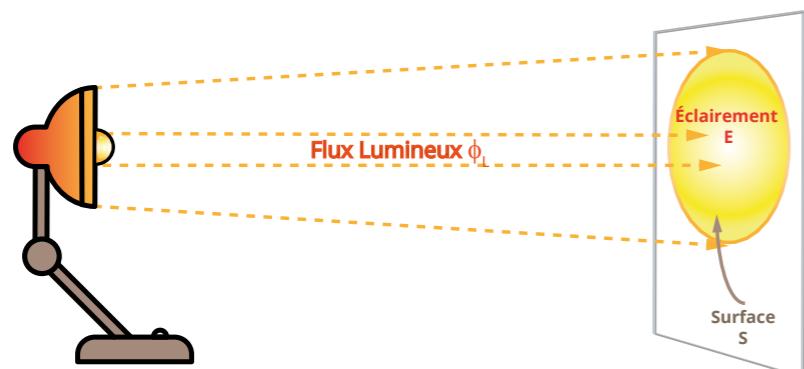


FIGURE 5.16: Illustration d'un montage photométrique.

- L'**éclairage** E d'une surface correspond au flux lumineux reçu par unité de surface :

$$E = \frac{\phi_L}{S}$$

avec E en lux, abrégé *lx*, ϕ_L en lumens et S en mètres carrés.

- L'éclairage se mesure avec un **luxmètre** dont la sonde est constituée d'une cellule photoélectrique.

EXEMPLES

Le tableau ci-dessous contient quelques ordres de grandeurs d'éclairements.

Source	Éclairage en lux
Nuit de pleine lune	0,5
Bougie à 1m	1
Appartement bien éclairé	200 à 400
Stade de nuit	150 à 1500

LES SOURCES DE LUMIÈRE

LE RAYONNEMENT SOLAIRE

- Le **rayonnement solaire** inclus des longueurs d'ondes allant des rayons γ aux ondes radios.
- Le rayonnement visible du Soleil est un spectre continu parsemé de raies noires.
 - Le spectre continu est caractéristique du rayonnement thermique émis par un corps chauffé, ici 5700° C (on parle de **rayonnement du corps noir**).
 - L'interaction lumière-matière dans l'atmosphère du Soleil explique les raies d'absorption noires observées dans le spectre.

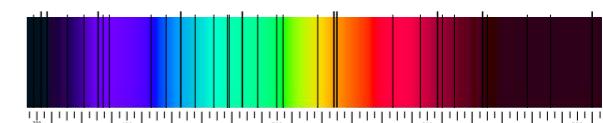


FIGURE 5.17: Spectre d'émission du soleil dans le domaine du visible.

LES LAMPES À INCANDESCENCE

- Un corps chauffé émet un rayonnement polychromatique (c'est-à-dire composé de différentes longueurs d'ondes) continu. Les lampes d'éclairages d'intérieurs reposant sur ce principe sont dites **lampes à incandescence**.
- La **loi de Wien** donne la longueur d'onde d'intensité maximale λ_{max} émise par un corps chauffé à la température T :

$$\lambda_{max} = \frac{2,90 \times 10^{-3}}{T}$$

où λ_{max} est en mètres (m) et T en kelvins (K).

- Ainsi, plus la température sera élevée, plus la longueur d'onde émise sera petite tendant ainsi vers le bleu.
- Cependant, la loi de Wien donne la longueur d'onde d'intensité maximale. Comme le rayonnement est polychromatique, elle ne permet pas de prévoir la couleur du corps chauffé car celle-ci dépend de l'ensemble des longueurs d'ondes visibles émises.

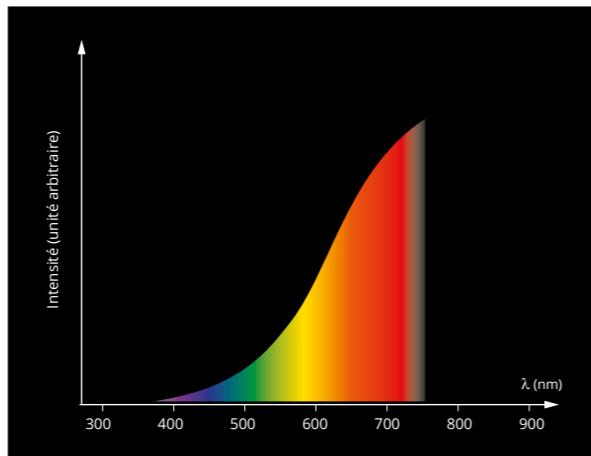


FIGURE 5.18: À gauche - Exemple d'une lampe à incandescence; à droite - Spectre d'une lampe à incandescence. Il présente une courbe régulière avec une forte proportion de rouge. La lampe émet beaucoup de chaleur (rayonnement infrarouge).

LES LAMPES À DÉCHARGE

- ▶ Les lampes à décharge sont constituées d'un tube ou d'une ampoule en verre remplie de gaz ou de vapeur métallique, sous haute ou basse pression, au travers duquel on fait passer un courant électrique. Le rayonnement est produit par électroluminescence, c'est-à-dire par transition énergétique d'atomes entraînant une production de photon.

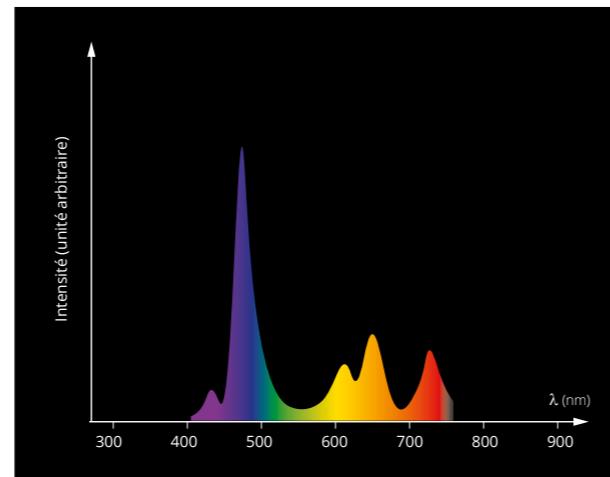


FIGURE 5.19: À gauche - Néons par accident de François MORELLET, 2003; à droite - Spectre d'une lampe à décharge. Il est peu homogène et montre des pics qui correspondent à l'émission des atomes d'azote lors des décharges lumineuses.

- ▶ La couleur de la lumière émise par ces lampes dépend du gaz utilisé :
 - le néon donne une couleur rouge,
 - le mercure s'approche du bleu tout en produisant une quantité d'ultraviolets importante,
 - le sodium rayonne dans le jaune (souvent on le mélange avec du néon pour rendre la lumière orangée),
 - et le xénon (récemment employé pour l'éclairage des automobiles) est le gaz qui permet de s'approcher le plus possible du blanc pur.

LE RAYONNEMENT LASER

- ▶ L'acronyme L.A.S.E.R. signifie *light amplification by stimulated emission of radiation*.

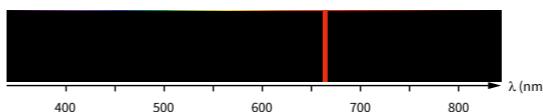


FIGURE 5.20: Spectre d'un laser rouge (660 nm).

- ▶ Le faisceau lumineux issu d'un laser est **monochromatique** (une seule longueur d'onde), **directionnel** (tous les rayons sont parallèles) et **cohérent** (les rayonnements sont en phase). L'énergie émise est ainsi dense.

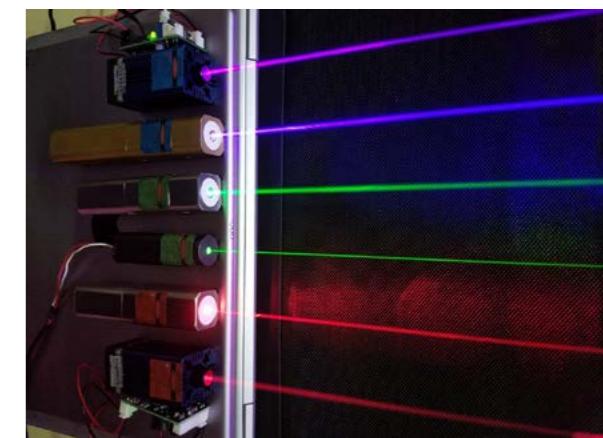


FIGURE 5.21: Lasers rouges (660 et 635 nm), verts (532 et 520 nm) et bleus (445 et 405 nm).

LES RÈGLES DE SÉCURITÉ

- ▶ Le rayonnement émis par un laser présente des risques pour l'œil, la peau et les tissus. Ce risque dépend :
 - de la puissance du laser (dès 1mW),
 - du temps d'exposition,
 - de la dimension du faisceau et
 - de la longueur d'onde émise.
- ▶ Le niveau de risque encouru est renseigné par la classe du laser :

Classe I	Non dangereux
Classe II et IIIa	Normalement non dangereux à moins de regarder dans le faisceau de manière intentionnelle
Classe IIIb et IV	Dangereux



FIGURE 5.22: Lunettes de protection Laser.

- Le rayonnement bleu, de longueur d'onde comprise entre 350 et 500 nm, présente également des risques en cas d'exposition trop importante. Ce type de rayonnement très énergétique peut provoquer des lésions de la rétine voire des cataractes précoces. Il est donc nécessaire de ne pas placer le faisceau lumineux dans la direction du regard ou porter, le cas échéant, des lunettes de protection. À noter, parmi les sources lumineuses émettant ce rayonnement, on trouve les écrans de télévision, d'ordinateur et de téléphone. Ces derniers peuvent entraîner des difficultés à s'endormir. Il est donc conseillé de ne plus regarder d'écran au moins une heure avant le coucher.

UN GUIDE D'ONDE LUMINEUSE : LA FIBRE OPTIQUE

- Une fibre optique est constituée d'un cœur (en silice) qui propage un signal lumineux et d'une gaine à faible indice de réfraction qui confine l'énergie lumineuse. L'onde lumineuse, généralement émise par une diode laser, est ainsi guidée par confinement grâce aux **propriétés réfractrices** de la lumière.
- Outre ses propriétés directionnelles, la fibre optique est légère, insensible aux interférences électromagnétiques et permet des débits bien plus importants dans les télécommunications.

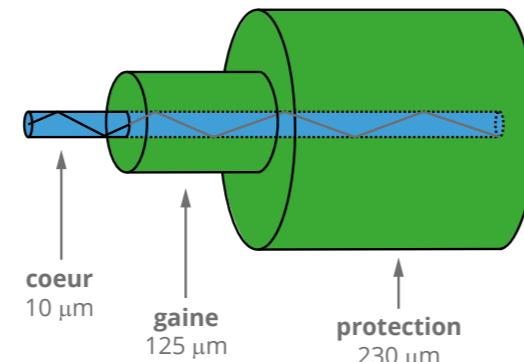


FIGURE 5.23: Principe d'une fibre optique.

CARACTÉRISTIQUES D'UNE SOURCE D'ÉCLAIRAGE

CLASSE ÉNERGÉTIQUE DES LAMPES

- L'**efficacité énergétique** d'une lampe est évaluée en termes de **classes d'efficacité énergétique** notées de A (très économique) à G (peu économique). Celles-ci sont définies par l'annexe IV de la Directive 98/11/CE
- L'efficacité énergétique est liée au flux lumineux émis et donc à la puissance consommée par la lampe.

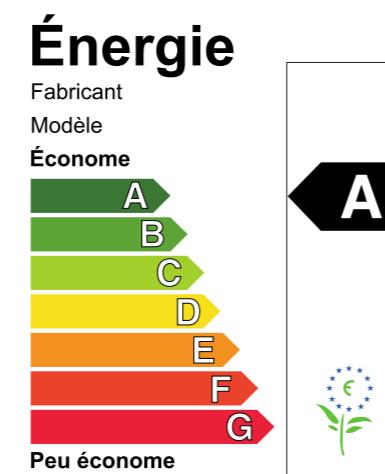


FIGURE 5.24: Exemple d'étiquette-énergie.

IRC : INDICE DE RENDU DES COULEURS

- L'**indice de rendu de couleur**, abrégé IRC, indique la capacité d'un flux lumineux à restituer la couleur des objets. Il est compris entre 0 et 100, où 100 correspond à la lumière solaire en milieu de journée.
- L'IRC sera d'autant plus proche de 100 que son **profil spectral** sera complet.

TEMPÉRATURE DE COULEUR

- La couleur d'une source de lumière dépend de sa température.
- À une couleur donnée de la source, on fait correspondre la température de cette source, appelée **température de couleur** et mesurée en Kelvins (K).
- La température de couleur permet de caractériser **l'ambiance lumineuse** : chaude, froide ou intermédiaire.

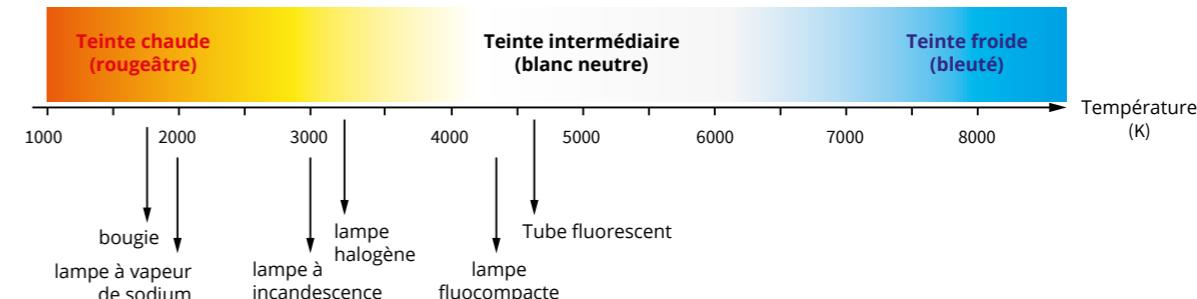


FIGURE 5.25: Températures de couleur.

TP 03.

MESURE D'ÉCLAIREMENT AVEC UN LUXMÈTRE

Afin de savoir si une pièce est bien éclairée, il faut mesurer son **éclairement**, exprimé en *lux*. Pour cela on utilise un luxmètre.

MATÉRIEL

- ▶ Un luxmètre
- ▶ Une pièce éclairée
- ▶ Deux ampoules de même type (LED, incandescente) et de puissances différentes.



FIGURE 5.26: Un luxmètre.

PROTOCOLE

- ▶ Dans un premier temps nous allons comparer l'éclairement des deux ampoules.
 - ▶ Mesurer l'éclairement de la première ampoule, en tenant le luxmètre à une distance fixe de celle-ci.
 - ▶ Recalibrer le luxmètre si celui-ci n'affiche pas de résultat.
 - ▶ Mesure l'éclairement de la seconde ampoule en tenant le luxmètre à la même distance que lors de la première mesure.
 - ▶ Répéter l'opération en modifiant la distance de mesure.
- ▶ Relever maintenant l'éclairement dans votre salle de classe, dans le couloir, dans les escaliers et au niveau du tableau de la salle de classe.

QUESTIONS

1. Interpréter la différence d'éclairement entre les deux ampoules.
2. Note-t-on une différence entre les mesures d'éclairement faites sur une ampoule à deux distances différentes ? Expliquer vos résultats.
3. L'éclairement optimal d'une salle de classe doit être de 300 lux, celui au tableau de 500 lux, dans les couloirs et les escaliers, respectivement de 100 et 150 lux. Parmi les valeurs mesurées lesquelles dépassent les valeurs optimales ? En cas d'éclairement insuffisant, comment corriger le problème ?

EXERCICES

04.

LONGUEURS D'ONDE ET ÉNERGIE

01

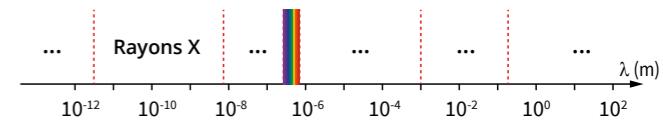
Rappels de cours :

1. Rappeler la relation entre la fréquence d'une onde ν et sa longueur d'onde λ .
2. Plus la longueur d'onde d'une onde électromagnétique sera élevée, plus sa fréquence sera petite ou grande ?
3. Calculer la fréquence d'une onde de longueur d'onde $\lambda = 850 \text{ nm}$.
4. Calculer la longueur d'onde d'une onde de fréquence $\nu = 2,2 \times 10^{12} \text{ MHz}$.
5. Calculer l'énergie en joule d'une onde de fréquence $\nu = 5,4 \times 10^{10} \text{ GHz}$.
6. Quelle est la particule qui transporte cette énergie ?

02

Les radiations électromagnétiques peuvent être regroupées en différentes catégories selon leur fréquence.

1. Sur le schéma ci-dessous compléter les domaines manquants.
2. Compléter les limites fréquentielles de la lumière visible dans le vide.
3. À quel domaine appartiendra une onde de fréquence $\nu = 3 \times 10^{18} \text{ Hz}$.



03

Les rayons infrarouges sont-ils visibles par l'œil humain ? Vous justifierez votre réponse à l'aide d'un schéma répertoriant les différentes catégories d'onde électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde ou de leur fréquence dans le vide.

04

Représenter sur un schéma le domaine des fréquences visibles. Vous ferez apparaître les différentes couleurs de ce domaine, ainsi que les principales fréquences de ces ondes électromagnétiques dans le vide.

05

Basée aux Émirats arabes Unis, l'artiste Julia Ibibi réalise des motifs complexes sur papiers, inspirés de la culture locale. Elle utilise des algorithmes informatiques pour créer des dessins numériques qu'elle découpe au laser sur du papier.



L'énergie des photons du laser utilisé est de $1.87 \times 10^{-20} \text{ J}$.

1. Donner la longueur d'onde et la fréquence du rayonnement laser utilisé.
2. À quel type de rayonnement appartient-il?

06

Calculer la fréquence et la longueur d'onde d'une onde pour laquelle l'énergie transportée par un photon est de $2,36 \times 10^{-220} \text{ J}$.

07

Les rayonnements les plus énergétiques transfèrent assez d'énergie aux électrons de la matière pour les arracher de leur atome. On appelle de tels rayonnements des rayonnements ionisants. Ils possèdent assez d'énergie pour créer des dommages dans la matière qu'il traverse. Un rayonnement ionisant atteignant un organisme vivant peut endommager ses constituants cellulaires (ADN, organites). Pour les organismes vivants, les rayonnements ionisants peuvent ainsi être nocifs, voire mortels en cas de dose élevée et d'exposition prolongée.

1. Classer les rayons X, γ , ultraviolets, infrarouges et la lumière visible par ordre croissant d'énergie, en donnant les énergies délimitant chacun de ces domaines en joule.
2. En déduire pourquoi les rayons γ ou X présentent un danger pour l'être humain.

08

La collection *Syntopia* de la styliste néerlandaise Iris van Herpen explore la convergence entre l'organique et l'inorganique tout en y incorporant un design inspiré d'oiseaux en vol. Certaines robes sont ainsi inspirées par les formes d'ondes caractéristiques du battement d'ailes de certains oiseaux. Des feuilles de mylar, de coton noir, d'organza rouge et d'acrylique noir transparent ont été découpées au laser puis superposées comme des plumes afin d'aboutir à une pièce cohérente.



L'énergie des photons du laser utilisé pour la découpe des matériaux est de $5.59 \times 10^{-19} \text{ J}$.

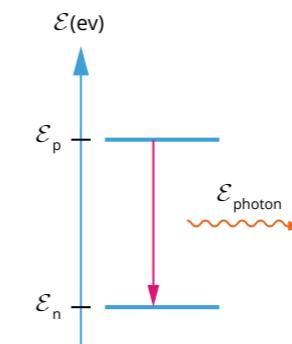
1. Donner la longueur d'onde et la fréquence du rayonnement laser utilisé.
2. À quel type de rayonnement appartient-il?

INTERACTION LUMIÈRE-MATIÈRE ET SOURCE DE LUMIÈRE

09

Rappels de cours :

1. La transition entre deux états d'énergie représentée ci-contre correspond-elle à une absorption ou à une émission de photon ?

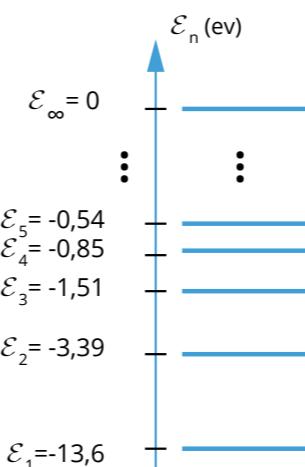


2. Que représente E_p et E_n ?
3. Quelle est l'énergie du photon représenté ?
4. Donner la relation entre h , ν , E_p et E_n .

10

Le diagramme d'énergie de l'atome d'hydrogène a été représenté ci-dessous. On rappelle que $1\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$.

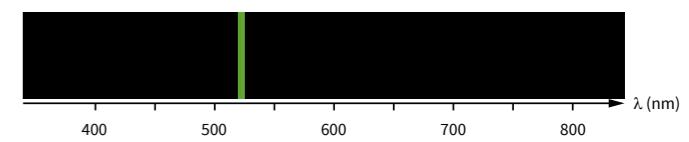
1. Représenter la transition permettant de passer du niveau d'énergie E_1 au niveau E_∞ .
2. Quelle est l'énergie du photon en jeu dans cette transition ?
3. En déduire sa longueur d'onde ?

**11**

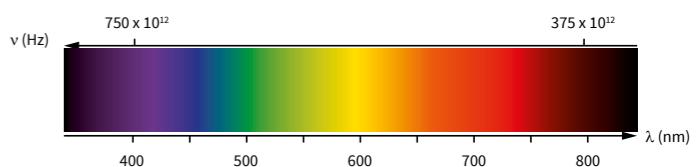
Le spectre d'un atome de néon est représenté ci-dessous.

1. S'agit-il d'un spectre d'émission ou d'absorption ?

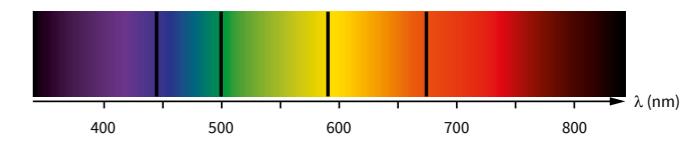
2. Représenter le diagramme d'énergie permettant d'interpréter ce phénomène.

**12**

Une transition entre deux états provoque l'émission d'un photon d'énergie $E = 2.12 \text{ eV}$. À l'aide du spectre ci-dessous, déterminer la couleur du rayonnement émis.

**13**

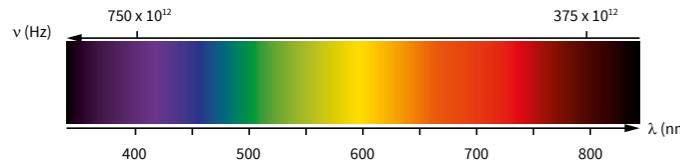
Le spectre d'absorption d'une entité chimique est représenté ci-dessous. Elle comprend quatre raies noires à 445nm, 500 nm, 590nm et 670nm. Calculer pour chacune de ces raies l'énergie de transition en joule.

**14**

Le film *The Element of Crime* (*Forbrydelsens Element* en danois) a été entièrement réalisé avec un éclairage aux lampes de sodium par Lars Von Trier en 1984. Ces lampes contiennent de la vapeur de sodium à très faible pression. Cette vapeur est excitée par un faisceau d'électrons qui traverse le tube. L'énergie perdue par ces derniers lors de collisions est transférée aux électrons des atomes de sodium qui sont excités. Le retour à l'état fondamental de ces électrons restituera l'énergie sous forme d'une radiation électromagnétique. Nous nous intéressons dans cet

exercice à la transition entre l'état $E_1 = -3.03$ eV et $E_0 = -5.14$ eV produisant le rayonnement décrit.

1. Représenter ce phénomène de transition sur un diagramme d'énergie.
2. Quelle est la longueur d'onde du photon émis?
3. Justifier que le rayonnement émis est dans le domaine du visible.
4. Déduire à l'aide du spectre ci-dessous, la couleur de la lumière émise.
5. Représenter le spectre de cette lampe.



15

La designer française Sandra Rey a créé en 2014 la start-up Glowee qui travaille actuellement sur l'implémentation d'un système d'éclairage 100% écologique dans le paysage urbain grâce à la bioluminescence.



La bioluminescence est un terme générique utilisé pour désigner l'émission de lumière par les organismes vivants. C'est au biologiste Raphaël Dubois que l'on doit la première explication de ce phénomène chez le lampyre ou ver luisant commun. Il montra que la lumière émise reposait sur la présence de deux molécules : la luciférase, une enzyme, et la luciférine, son substrat. Sous l'action du dioxygène, la luciférase va catalyser la réaction d'oxydation de la luciférine et produire de l'oxyluciférine qui sera dans un état d'énergie excité. Ceci provoque alors l'émission d'un photon dont la lumière résultante est jaune-vert.

1. Expliquer le mécanisme de transition en jeu dans la bioluminescence.
2. Donner un intervalle pour la longueur d'onde des photons émis.
3. En déduire la différence d'énergie entre l'état fondamental de l'oxyluciférine et son état excité après l'oxydation de la luciférine.
4. Expliquer l'impact environnemental d'un tel projet en le comparant aux systèmes existant d'éclairage urbain.

16

James Nizam est un artiste visuel dont le projet *The Mnemonic Landscape* consiste à mettre en valeur des structures architecturales simples sur d'anciens pavillons de banlieue en les recouvrant de banderoles réfléchissantes.



1. Définir ce qu'est la luminescence.
2. Expliquer en quoi la luminescence intervient dans cette œuvre - décrire le type de luminescence et les principaux mécanismes.

PHOTOMÉTRIE

17

On éclaire un mur situé à une distance de 1m50 à l'aide d'une lampe à incandescence équipée d'une ampoule de 100 W. Le disque formé a un

rayon de 1,4 m de diamètre. L'éclairement mesuré est de 500 lux.

1. Schématiser le problème décrit.
2. Calculer l'intensité lumineuse reçue par la surface dans la direction de la lumière projetée.
3. Calculer l'aire de la surface éclairée.
4. Donner le flux lumineux émis par cette lampe.

18

Pour réaliser une œuvre faite d'ombres, on installe un projecteur dont les caractéristiques techniques sont données ci-dessous. La lumière est projeté sur une surface rectangulaire de 20 cm de largeur et 40 cm de longueur éclairé par le projecteur en lumière blanche à une distance de 2 m.

Caractéristiques techniques de projecteur LUMEX 3000 :

- Projecteur à lampe LED 7W
- IRC : 90
- Température de couleur : 3500 K
- Éclairement à 2 m : 500 lux
- Poids : 1.5 kg
- Durée de vie : 40 000 heures
- Alimentation : CA 100 - 240 V, 50 / 60 Hz.

1. Schématiser le problème décrit.

2. Rappeler la définition de l'IRC et commenter la valeur donnée dans les caractéristiques techniques.
3. Calculer le flux lumineux reçu par l'écran.

19

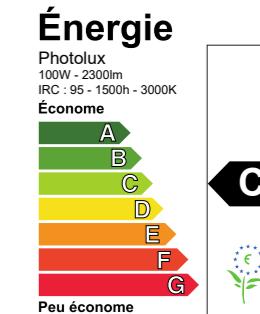
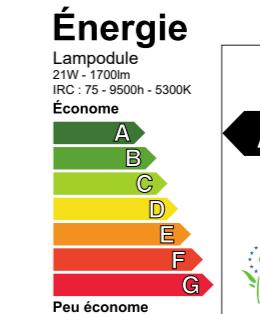
Marc doit choisir un système d'éclairage pour une installation artistique. Après un premier tri, il ne lui reste que deux marques dont les caractéristiques sont données ci-dessous. Son critère principal est que l'éclairage soit d'une teinte froide.

1. Quelle marque va-t-il choisir?
2. Quel sera le désavantage de l'éclairage choisi par rapport à son concurrent?

	Ledlux	ESpot
Type	LED	Incandescent
IRC	80	95
Poids (kg)	0.5	2
T° de couleur	7500K	3000K
Durée de vie (h)	35000	9000

20

En comparant les deux étiquettes d'ampoules ci-dessous, répondre aux questions suivantes.

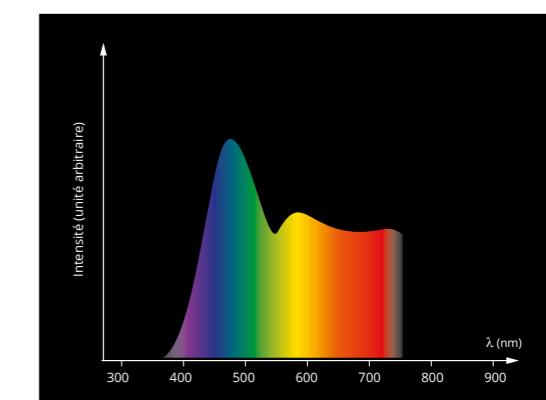


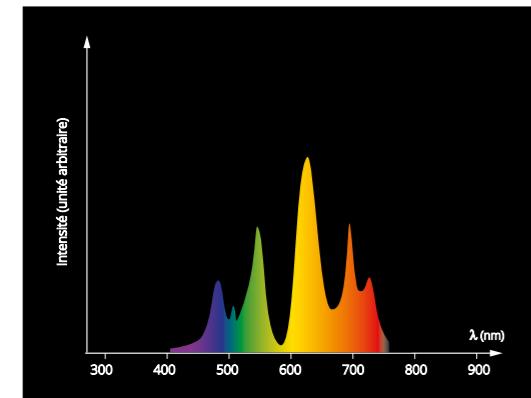
1. Quelle ampoule produit le plus grand flux de lumière?
2. Quelle ampoule possède le meilleur rendement énergétique?
3. Quelle ampoule donne le meilleur rendu des couleurs?
4. Quelle ampoule émet la teinte la plus chaude?

21

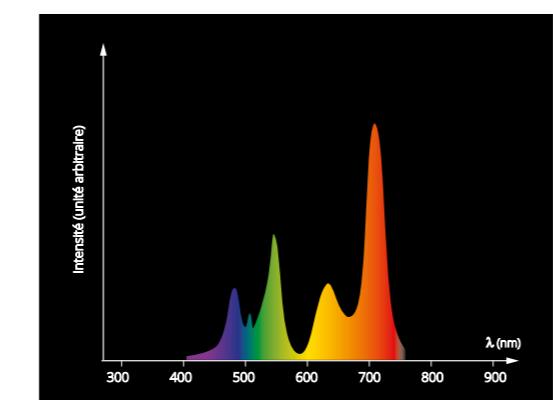
On a représenté ci-dessous le spectre de deux sources lumineuses.

1. Quelle est celle présentant la température de couleur la plus basse?
2. Quelle est celle ayant l'IRC la plus élevée?



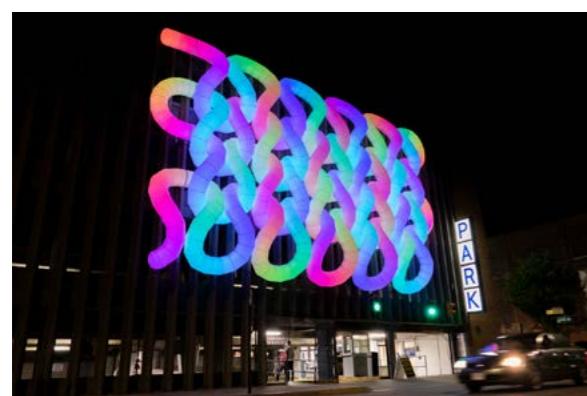


- laser,
- lampe à décharge,
- lampe incandescente.



22

Les artistes de Pneuhaus construisent des structures et des environnements gonflables qui donnent à leur public une nouvelle perspective du monde qui les entoure. Récemment, le collectif de design basé à Rhode Island a honoré l'histoire de la fabrication textile de la ville de Providence avec une pièce intitulée *Pnit*. La pièce à grande échelle est éclairée par des lumières LED. Les tubes gonflables tournent et sortent les uns des autres le long du mur d'un parking en béton alors que leurs couleurs varient lentement à travers différentes nuances de jaunes, verts, violets et roses.

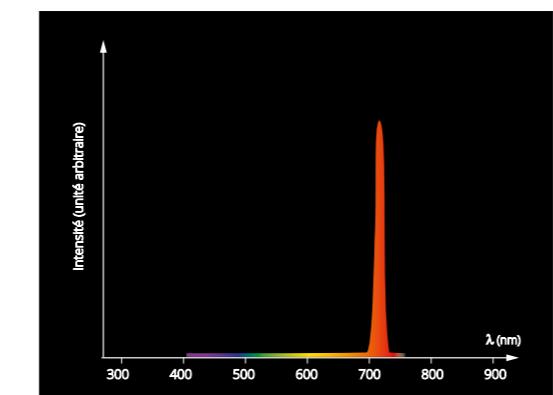
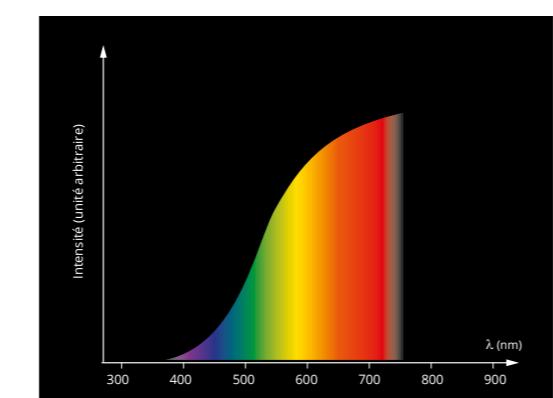


1. Quel type de luminescence entre en jeu dans les LED ?
2. Expliquer, d'un point de vue de la protection de l'environnement, le choix des LED comme système d'éclairage.

SOURCES DE LUMIÈRE

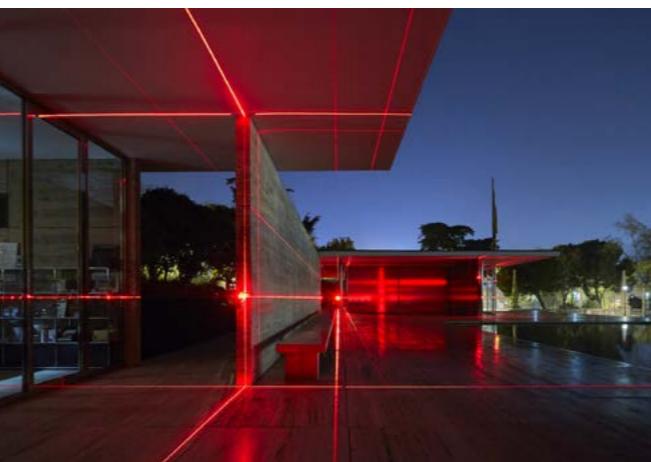
23

Associer chacun des spectres ci-dessous à une des sources de lumière suivantes :



24

Lufwerk (Petra Bachmaier et Sean Gallero) s'est associé à l'architecte Iker Gil et au concepteur sonore Oriol Tarragó pour *Geometries of Light*, deux installations coordonnées célébrant les formes architecturales de Mies van der Rohe. Le duo de designer souhaitait accentuer la clarté de l'architecture avec le niveau laser, un outil principalement utilisé sur les chantiers, zébrant ainsi l'architecture de multiples lignes rouges.



Les caractéristiques techniques du laser utilisé sont données ci-dessous

1. Donner les principales caractéristiques du faisceau lumineux produit par un laser.
2. Représenter le spectre du laser utilisé.
3. Quels sont les risques associés à l'utilisation de ce laser ?
4. Quelles sont les précautions à prendre ?

Caractéristiques du laser BOSCH POWER-TOOLS :

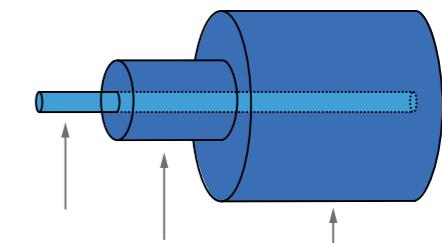
- Diode laser Lignes : 630 - 650 nm, < 10 mW
- Température de service -10 – 40 °C
- Classe laser 2
- Portée sans cellule de réception 30 m (diamètre)
- Étanchéité à l'eau et à la poussière IP 54
- Alimentation : batterie Lithium-Ion 12 V 4 piles 1,5 V LR6 (AA)
- Autonomie, max. 8 h (Li-Ion) et 6 h (4 piles AA) en mode 3 lignes
- Projection 3 lignes à 360°

25

On a représenté ci-dessous une fibre optique sous forme schématique.

1. Compléter le schéma en donnant un ordre de grandeur pour chaque partie de la fibre.
2. Schématiser le trajet d'une onde électromagnétique dans cette fibre.

3. À quel domaine appartient l'onde électromagnétique propagée dans une fibre optique ?



26

L'installation *Field of Light* de Bruce Munro est une œuvre composée de 6000 tiges acryliques alimentées en fibre optique et coiffées de sphères de verre. Installée à l'Eden Project de Cornwall, elle est inspirée par les paysages de bord de route australiens. Onze projecteurs alimentent 24 000 mètres de câbles en fibre optique, qui couvre une surface de 60 × 20 mètres.



1. En appuyant votre argumentaire par un schéma, expliquer comment les fibres optiques transportent la lumière émise par les projecteurs vers les sphères en verre.
2. Expliquer l'avantage, en terme d'impact environnemental, d'une telle installation.

LES COULEURS

Objectifs du chapitre : Définir la synthèse additive de couleurs / Donner le résultat d'une synthèse additive de couleurs / Définir la synthèse soustractive de couleurs / Donner le résultat d'une synthèse soustractive de couleurs / Différencier synthèse additive et soustractive de couleurs / Lier la perception d'une couleur par l'œil humain à la synthèse de couleurs / Déterminer la longueur d'onde d'une couleur à partir du diagramme de chromaticité / Déterminer la saturation d'une couleur à partir du diagramme de chromaticité / Évaluer les performances d'un système d'affichage à partir du gamut.

06



HUSSEIN AL ATTOR
VB X6 Vantablack
2020

ACTIVITÉ

LE VANTABLACK

Doc 1

Le Vantablack est une matière composée d'une « forêt » de nanotubes, c'est-à-dire agencés verticalement et serrés les uns aux autres. Le procédé de fabrication de cette matière a été développé par l'entreprise Surrey Nanosystems au Royaume-Uni en 2012.

La particularité du Vantablack est qu'il a un coefficient d'absorption de la lumière de 99,965% ce qui en faisait jusqu'en 2019 le noir le plus profond jamais obtenu.

En février 2016, le plasticien britannique Anish Kapoor obtint l'exclusivité des droits d'utilisation de cette matière pour un usage artistique.



FIGURE 6.1: SUV recouvert de Vantablack en 2019 lors du salon de Francfort.

Doc 2

La réflectance mesure la portion de lumière réfléchie par la surface d'un matériau. Ce rapport entre le flux lumineux réfléchi et le flux lumineux incident dépend généralement de la longueur d'onde : on parle alors de spectre de réflectance.

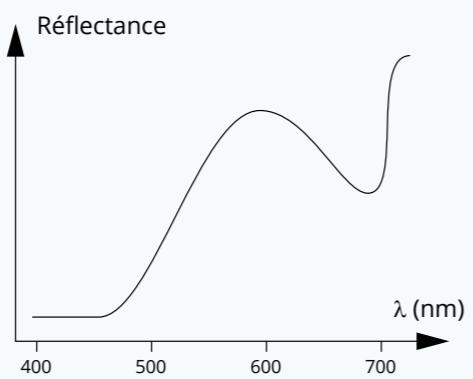
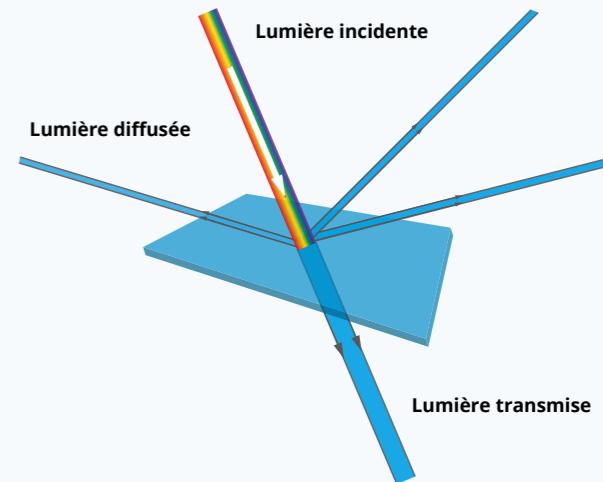


FIGURE 6.2: Spectre de réflectance du jaune de Hansa.

Doc 3

Une surface interagit de différentes façons avec une lumière incidente. Cette interaction non seulement dépend de l'objet mais aussi de la longueur d'onde de la lumière incidente.

- La surface peut absorber une partie de la lumière incidente. On parle d'**absorption**,
- La surface peut renvoyer dans toutes les directions une partie de la lumière incidente. On parle de **diffusion**.
- Une partie de la lumière incidente peut traverser la surface. On parle de **transmission**



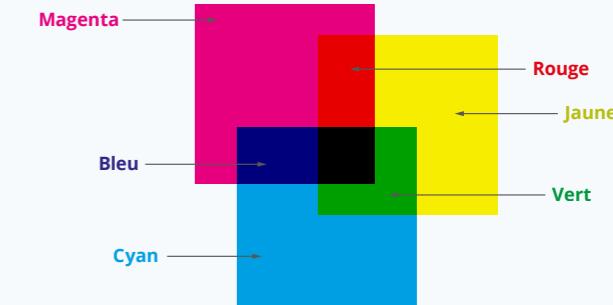
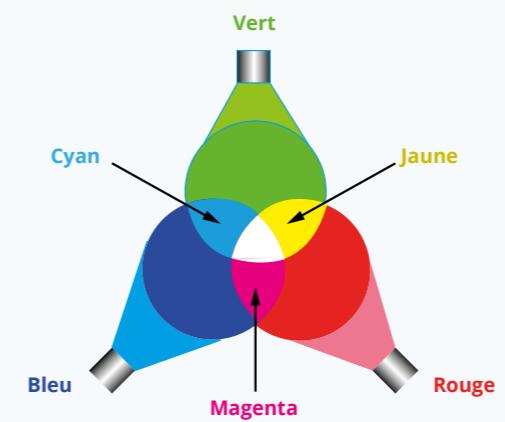
À partir des documents précédents, répondre aux questions suivantes :

1. Quelles sont les couleurs dominantes dans le spectre de réflectance du jaune de Hansa ?
2. En déduire une explication de la couleur du pigment jaune de Hansa.
3. Tracer le spectre de réflectance du Vantablack.
4. Expliquer la couleur du Vantablack.
5. Expliquer pourquoi les lignes du SUV représenté dans le document 1 sont presque indiscernables.

CARNOVSKY

Doc 1

La superposition de plusieurs lumières colorées produit une nouvelle couleur. On parle alors de synthèse additive. On parle de synthèse soustractive lorsqu'un objet absorbe certaines lumières colorées. On peut obtenir une infinité de couleur par synthèse additive du rouge, vert et bleu ou par synthèse soustractive du magenta, cyan et jaune.



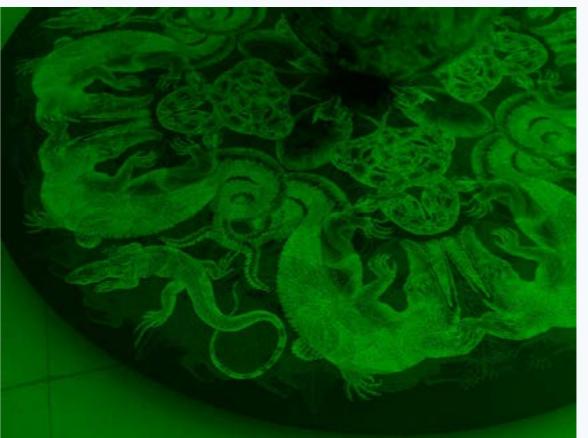
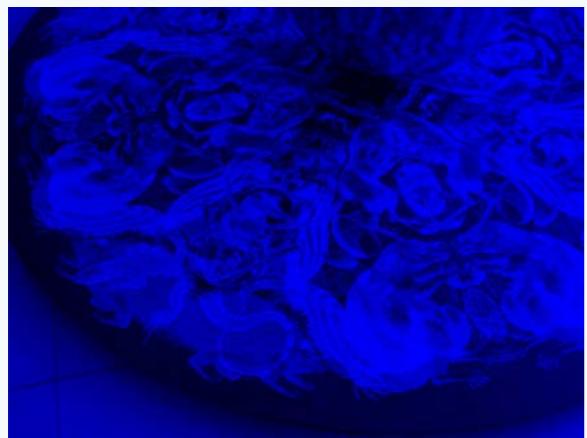
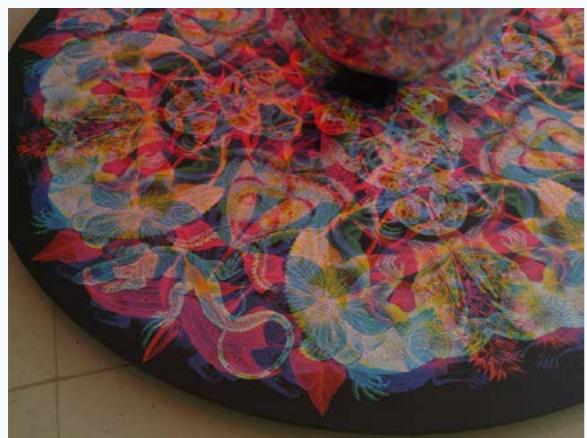
Doc 2

Un filtre est un dispositif optique qui laisse passer une partie du rayonnement lumineux sans affecter son cheminement. Généralement, le filtrage se fait par absorption : une certaine plage du spectre de la lumière incidente est absorbée sans affecter les autres longueurs d'ondes. Il se produit alors un phénomène identique à la synthèse soustractive des couleurs.



Doc 3

Carnovsky est le nom choisi par deux artistes installés à Milan, Francesco Rugi et Silvia Quintanilla, dont le travail se situe à la frontière de l'art et du design. Leurs réalisations sont multiples : fresques murales, papiers peints, meubles, vêtements, habillage de matériel électronique. Elles mêlent les formes et jouent sur les couleurs avant que celles-ci ne se révèlent au travers de filtres colorés.



À partir des documents précédents, répondre aux questions suivantes :

1. Quel type de synthèse est en jeu dans l'observation à travers des filtres des fresques du duo Carnovsky ?
2. À l'aide de schémas illustrés, expliquer la perception des fresques du duo à travers un filtre coloré.
3. Si on superpose un filtre de couleur rouge à un filtre de couleur verte, qu'observe-t-on ?
4. Si on utilise un filtre de couleur jaune, qu'observe-t-on ?

02. COURS

SYNTHÈSE ADDITIVE ET COULEUR PERÇUE

PRINCIPE DE LA SYNTHÈSE ADDITIVE

- ▶ On parle de **synthèse additive** lorsque la superposition de plusieurs lumières colorées produit une nouvelle couleur (voir figure 6.3).
- ▶ On obtient une infinité de couleurs en superposant trois lumières de couleurs **rouge**, **verte** et **bleue** dont on peut régler les intensités. On appelle ce principe la **trichromie**.

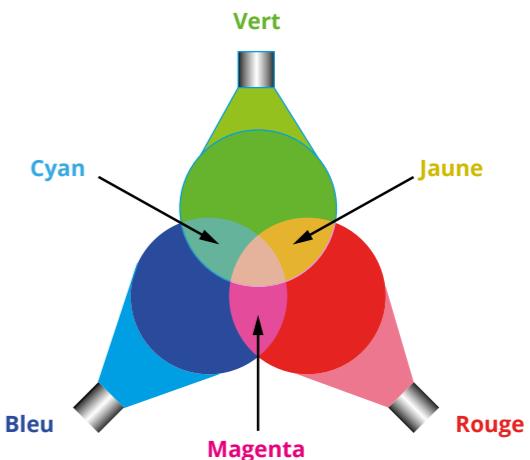


FIGURE 6.3: Principe de la synthèse additive.

- ▶ Sur le schéma ci-dessus, les couleurs se faisant face sont dites **complémentaires**. Par exemple, la couleur complémentaire du bleu est le jaune.

APPLICATION

- ▶ Un écran (moniteur, télévision, smartphone) est composé de cellules appelées pixels. Chaque **pixel** est divisé en trois zones appelées **luminophores**, correspondant chacune à une couleur (rouge, bleue, verte). L'intensité lumineuse délivrée par chacun de ces luminophores produit par synthèse additive la couleur voulue pour un pixel donné.

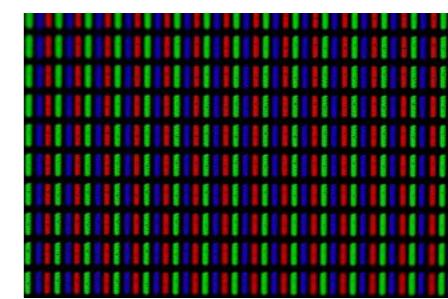


FIGURE 6.4: Luminophores d'un écran.

COULEUR PERÇUE

- ▶ La perception de la couleur par l'œil humain repose également sur le principe de synthèse additive.
- ▶ L'œil est composé de deux types de cellules photoréceptrices :
 - **les bâtonnets**, sensibles à l'intensité lumineuse mais pas aux couleurs (ils sont principalement mobilisés en vision nocturne) ;
 - **les cônes**, qui détectent les couleurs.
- ▶ Il existe trois types de cônes, sensibles chacun à une gamme de fréquence de rayonnement à la manière des pixels d'un écran.
 - Le premier type a un maximum de sensibilité pour des longueurs d'onde centrées autour du bleu.
 - Le second type est plus sensible aux longueurs d'onde centrées autour du vert.
 - Et le troisième type est plus sensible aux couleurs autour du rouge.

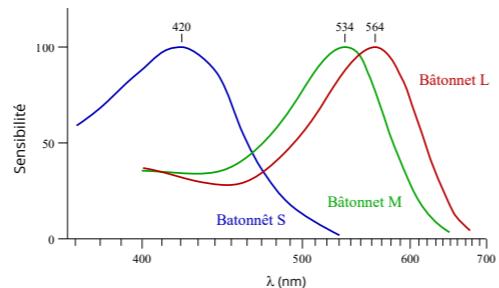


FIGURE 6.5: Sensibilité des bâtonnets S (short), M (medium) et L (long) en fonction de la longueur d'onde.

Exemple : Un filtre cyan, éclairé par une lumière blanche, **diffusera et transmettra** des lumières de couleurs verte et bleue. Les autres couleurs seront **absorbées**. Comme la synthèse additive du vert et du bleu donne du cyan, la couleur perçue sera cyan.

Remarque : La synthèse additive des couleurs absorbées par ce filtre correspond à une lumière colorée rouge, couleur complémentaire du cyan.

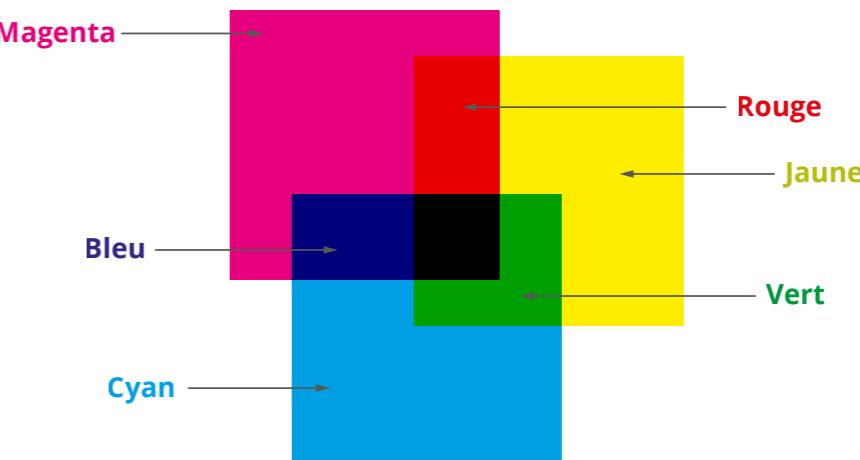


FIGURE 6.7: Principe de la synthèse soustractive.

SYNTHÈSE SOUSTRACTIVE ET COULEUR DES OBJETS

VOCABULAIRE

- ▶ On distingue trois types d'interactions entre un objet et une lumière incidente.
 - L'objet peut absorber une partie de la lumière incidente. On parle d'**absorption**,
 - L'objet peut renvoyer dans toutes les directions une partie de la lumière incidente. On parle de **diffusion**.
 - Une partie de la lumière incidente peut traverser l'objet. On parle de **transmission**
- ▶ Ces trois interactions peuvent avoir lieu simultanément.

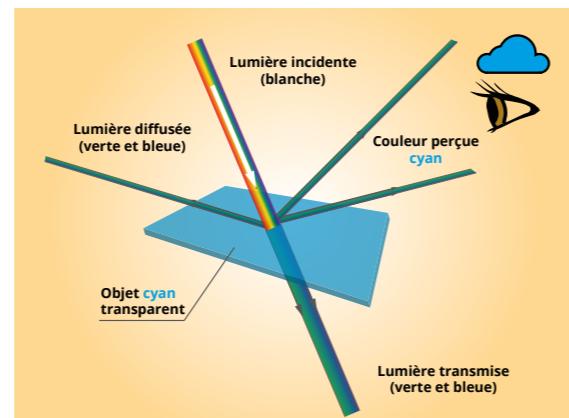


FIGURE 6.6: Diagramme de niveaux d'énergie

PRINCIPE DE LA SYNTHÈSE SOUSTRACTIVE

- ▶ Un objet éclairé peut absorber certaines lumières colorées. On parle de **synthèse soustractive**.
- ▶ Un objet absorbe la lumière de couleur complémentaire à celle qu'il diffuse et transmet.

COULEUR D'UN OBJET

- ▶ La couleur d'un objet dépend :
 - de la lumière qui l'éclaire et
 - des lumières colorées qu'il absorbe, diffuse et transmet.

Exemple : Un objet jaune en lumière blanche apparaîtra noir en lumière bleue et vert en lumière verte (voir 6.7).

▶ Quand on parle de couleur d'un objet sans préciser la nature de la lumière incidente, on sous-entend que celle-ci est blanche.

DIAGRAMME DE CHROMATICITÉ

DÉFINITION

- ▶ Un **espace de couleur** est une représentation des couleurs dans un espace à plusieurs dimensions. Chaque couleur perçue par l'œil humain est alors caractérisée par ses coordonnées dans cet espace.

Exemple : l'espace **RVB** (ou **RGB** en anglais) est un espace de couleur tridimensionnel qui, à la manière de l'œil humain, associe à chaque couleur trois valeurs correspondant aux intensités de rouge, de vert et de bleu.

- ▶ Depuis le début du XX^e siècle, on considère que la couleur est une propriété indépendante de la luminosité, et on la nomme **chromaticité**.
- ▶ On représente ainsi celle-ci à l'aide de non plus trois mais **deux valeurs** dans un graphique en deux dimensions appelé **diagramme de chromaticité**.
- ▶ Le passage d'une description à partir de trois rayonnements primaires à une description à deux coordonnées peut se faire de plusieurs façons différentes. Ainsi il existe plusieurs diagrammes de chromaticité. La Commission internationale de l'éclairage (CIE) en a normalisé plusieurs : **CIE RGB**, **CIE XYZ**, **CIE U'V'W'**. Le second est le plus fréquemment utilisé.

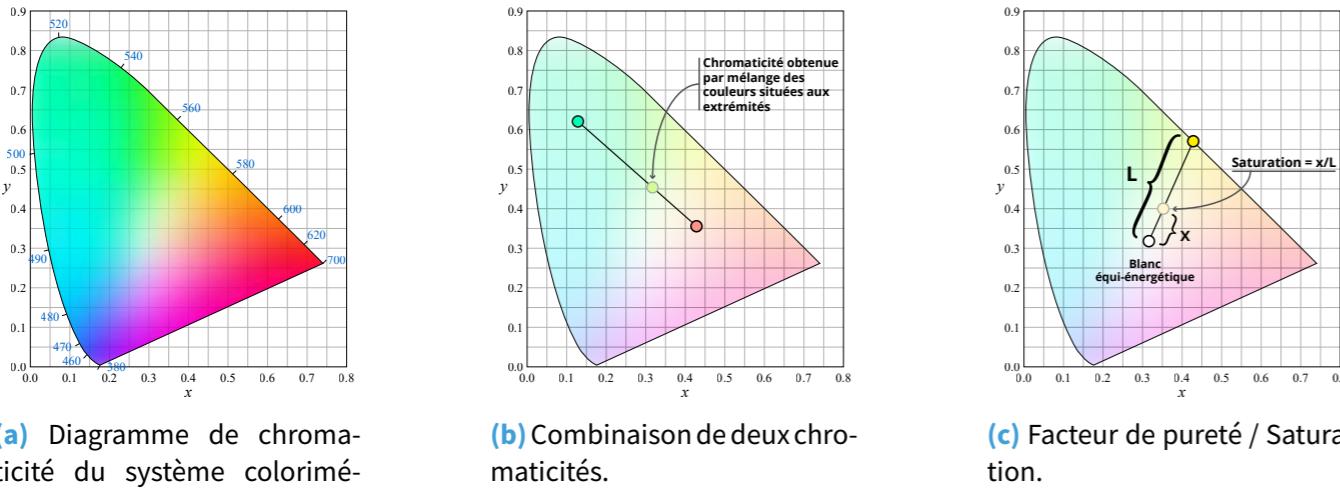


FIGURE 6.8: Diagramme de chromaticité.

PROPRIÉTÉS

- ▶ Les couleurs présentes sur la limite courbe du diagramme, en forme de fer à cheval, appelé *lieu du spectre*, représente l'ensemble des couleurs pures, c'est-à-dire associées à une onde électromagnétique monochromatique.
- ▶ Le segment reliant deux points quelconques du diagramme inclus l'ensemble des couleurs pouvant s'obtenir par mélange des couleurs présentes aux extrémités (il est possible donc d'obtenir une couleur avec différentes combinaisons de chromaticités).
- ▶ Le point de coordonnées $x = 1/3, y = 1/3$ représente le **blanc équi-énergétique** utilisé comme référence dans le système CIE XYZ.
- ▶ Le segment qui relie le blanc équi-énergétique à une couleur pure, sur le lieu spectral, représente toutes les couleurs possédant une même teinte plus ou moins lavées de blanc. Elles ont toutes la **même longueur d'onde dominante**. En divisant la distance d'un point au point blanc par celle du segment entier on obtient le **facteur de pureté**, appelée aussi la **saturation**.

GAMUT

- ▶ On peut étendre la propriété de mélange de chromaticités à trois couleurs. Ainsi, toute couleur située dans le triangle formé par trois chromaticités peut s'obtenir par le mélange de celle-ci. On appelle ce triangle le **gamut**.

- ▶ Le gamut d'un système d'affichage par synthèse additive, tel qu'un écran d'ordinateur, représente l'ensemble des couleurs qui peuvent être reproduites. Plus la surface du gamut est importante, plus les performances d'affichage de l'écran sont élevées.

Remarques :

- Un gamut dont les sommets sont le **rouge**, le **vert** et le **bleu** couvre la plus grande surface possible du diagramme de chromaticité. Cela explique pourquoi les luminophores des écrans sont dans ces trois couleurs.
- Il est difficile de produire des couleurs purement monochromatique. Les vert, rouge et bleu produit par les luminophores d'un pixel varie d'un écran à l'autre expliquant la différence de caractéristiques parmi les moniteurs.

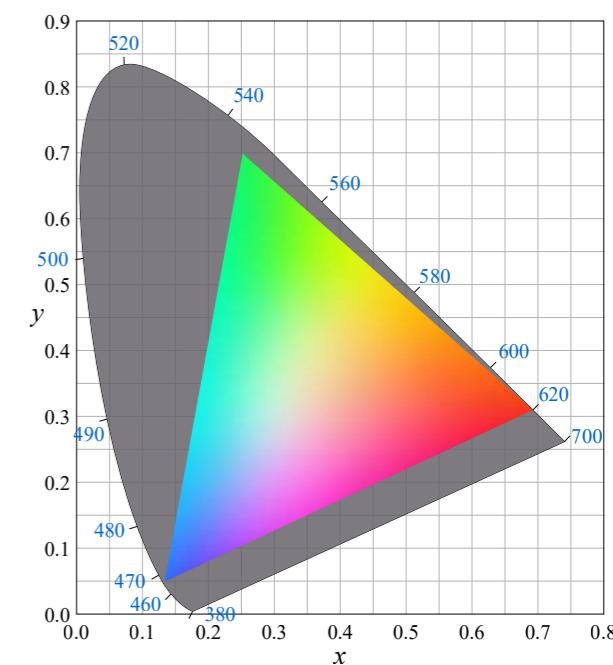
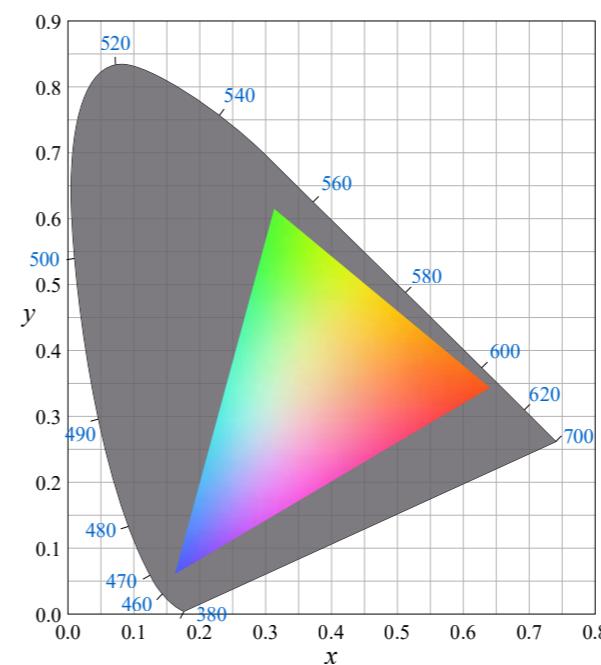


FIGURE 6.9: Exemples de gamut.

SYNTHÈSE DE COULEURS ET FILTRES

La couleur d'une source lumineuse peut être modifiée à l'aide d'un filtre. L'association de lumières colorées quant à elle peut amener à la synthèse d'une nouvelle couleur. De même, la couleur d'un objet dépend de la source lumineuse qui l'éclaire. Nous allons étudier l'ensemble de ces phénomènes dans l'activité qui suit.

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

- ▶ Spectrophotomètre
- ▶ Filtres colorés rouge, bleu, vert, cyan, magenta et jaune
- ▶ Deux sources de lumières blanches
- ▶ Objets de différentes couleurs

QUESTIONS

1. À partir du matériel disponible, proposer un protocole expérimental permettant de déterminer l'effet d'un filtre coloré sur une lumière blanche.
2. Superposer sur un écran blanc deux lumières colorées à l'aide de filtres parmi les trois couleurs suivantes : rouge, vert et bleu. Tester l'ensemble des combinaisons possibles en notant à chaque fois la couleur obtenue. Regrouper ces données dans un tableau.
3. Placer deux filtres parmi le cyan, le magenta et le jaune sur le trajet d'une lumière blanche. Tester l'ensemble des combinaisons possibles et donner la couleur de la lumière obtenue à chaque fois.
4. Observer un objet rouge éclairé par une des 6 lumières colorées. Noter la couleur prise par l'objet dans chacun des cas.
5. Faites de même avec des objets de couleurs vert, bleu, cyan, magenta et jaune en notant à chaque fois la couleur prise par l'objet.



FIGURE 6.10: Matériel (de gauche à droite) : sources de lumières blanches, filtres, spectrophotomètre et objets de couleurs différentes.

04. EXERCICES

SYNTHÈSES DE COULEUR

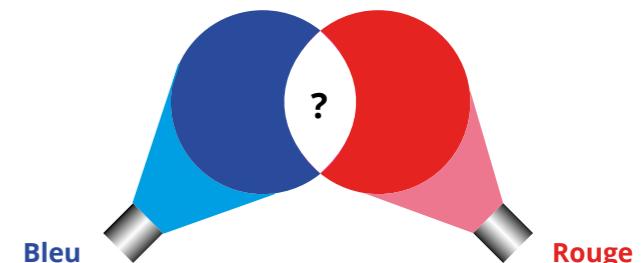
01

Rappels de cours :

1. Expliquer ce qu'est la synthèse additive de couleurs.
2. Expliquer ce qu'est la synthèse soustractive de couleurs.
3. Quels sont les différents types d'interactions entre un objet et une lumière ?
4. Lorsqu'un objet absorbe une partie de la lumière incidente, quel phénomène de synthèse des couleurs est en jeu ?
5. Par quel terme désigne-t-on deux couleurs dont la synthèse soustractive donne du noir? Donner un exemple.

02

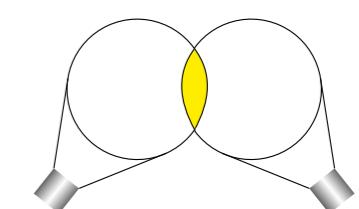
On éclaire un écran blanc à l'aide de deux projecteurs produisant respectivement chacun une lumière colorée bleue et rouge.



1. Préciser le type de synthèse des couleurs en jeu dans cette situation.
2. Quelle sera la couleur obtenue à l'intersection des deux faisceaux?

03

On projette deux lumières colorées sur un écran blanc afin d'obtenir par synthèse additive une couleur jaune. Quelle doit être la couleur de chacune des lumières projetées?



04

L'artiste Carlos Cruz-Diez était un artiste-peintre vénézuélien dont les travaux portaient principalement sur la couleur. Son œuvre *Chromosaturation* est un ensemble de trois pièces séparées chacune par un mur partiel, et éclairée par une lumière colorée : une lumière rouge pour la pièce centrale, une lumière bleue pour la pièce à gauche et une lumière verte pour la pièce à droite.



- À l'aide d'un schéma, expliquer comment, à l'aide d'un projecteur de lumière blanche, peut-on obtenir une lumière colorée.
- À la frontière entre deux pièces, une nouvelle couleur apparaît. Quel type de synthèse de couleur est alors réalisé ?
- Quelle est la couleur visible à la frontière entre la pièce centrale et la pièce de gauche ?
- Une personne habillée en bleu entre dans la pièce de droite. Quelle sera alors la couleur perçue de ses vêtements ?

05

James Turrell est un artiste américain dont les principaux médias d'expression sont la lumière et l'espace. En 2013, dans le cadre d'une rétrospective lui étant dédiée au Guggenheim de New-York, le hall principal a été éclairé à la façon des installations de l'artiste, comme représenté sur la photo ci-dessous.

- La couleur de la lumière projetée, le magenta, a été obtenue à partir de la synthèse de plusieurs couleurs différentes.
 - De quel type de synthèse s'agit-il ?
 - Quelles ont été les lumières colorées utilisées ?

**06**

Le pointillisme est une technique picturale popularisée par le peintre français Georges Seurat et qui devint un mouvement artistique à la fin du XIX^e siècle. L'obtention d'une couleur ne s'y fait plus par un mélange mécanique sur la palette mais par une juxtaposition de petites zones colorées qui laisse à l'œil du spectateur le travail de synthèse colorimétrique.

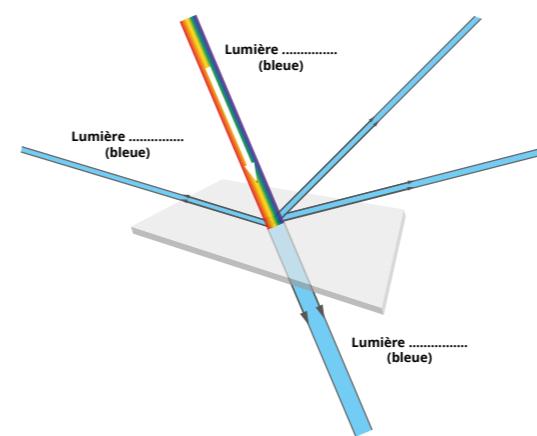
- Quel type de synthèse des couleurs est en jeu dans le mélange sur palette ?
- Quel type de synthèse des couleurs est en jeu dans le pointillisme ?
- Quelle sera la couleur obtenue si un peintre mélange du jaune et du magenta sur sa palette ?
- Quelle sera la couleur perçue si un peintre pointilliste juxtapose une tâche verte et une tâche bleue ?



FIGURE 6.11: Détail de la toile de Maximilien Luce, Matin, Intérieur : le pied.

07

Dans le schéma ci-dessous, un filtre coloré est placé sur le trajet d'une lumière blanche.



- Complétez le schéma.
- Quelle est la couleur du filtre ?
- Quelles sont les couleurs qui ont été absorbées par le filtre ?

08

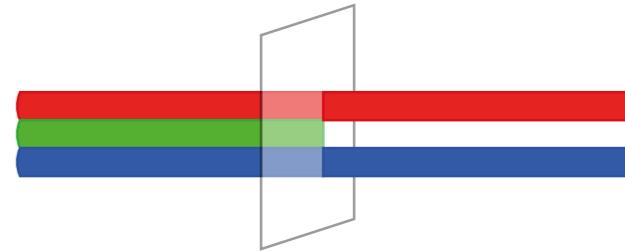
L'artiste Stuart Temple a créé un pigment ultra-noir baptisé « Black 3.0 » qui absorbe 98% à 99% de la lumière visible. La mise sur le marché de ce pigment est une réponse au dépôt de brevet par le plasticien Anish Kapoor sur le Vantablack, le noir le plus noir du monde, dont il dispose du monopole.



Expliquer la couleur du pigment « Black 3.0 ».

09

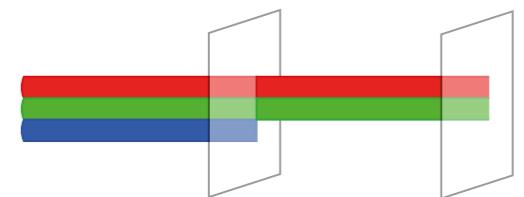
Une lumière blanche constituée de lumières colorées rouge, bleue et verte, passe au travers d'un filtre comme illustré ci-dessous.



- Rappeler l'action d'un filtre coloré sur un faisceau lumineux.
- D'après le schéma ci-dessus, quelle est la couleur du filtre ?

10

Dans le schéma ci-dessous, quelle est la couleur des deux filtres ?

**11**

Le photogramme ci-dessous est tiré du film *Pierrot le fou* de Jean-Luc Godard. Il a été obtenu en plaçant un filtre coloré devant l'objectif de la caméra.



- Quel type de synthèse de couleur est en jeu ?
- Quelle est la couleur du filtre ?
- Schématiser le trajet de la lumière arrivant à l'objectif, en indiquant la couleur de la lumière absorbée et de la lumière transmise.
- Quelle est la couleur possible du costume de Samuel Fueller qui apparaît en noir sur le photogramme ?

12

Une salle de spectacle en construction fait appel à un ingénieur éclairagiste afin d'équiper celle-ci de projecteurs. Il doit pour cela choisir entre deux types de projecteurs.



FIGURE 6.12: Projecteur à lampe (à gauche), et à LED (à droite).

Partie A : Projecteur à lampe à incandescence

Pour obtenir une lumière colorée donnée avec un projecteur à lampe à incandescence, il est nécessaire d'appliquer un filtre de couleur devant celui-ci.

1. Quel type de synthèse est alors réalisé ?
2. À l'aide d'un schéma, expliquer comment le filtre « colore » la lumière blanche issue du projecteur.

Partie B : Projecteur à LED

Ce type de projecteur est composé de LED de trois couleurs différentes : rouge, bleue, verte. L'intensité de chacune de ces LED pouvant être réglée individuellement.

1. Dans ce type de projecteur, quel est le type de synthèse réalisé pour obtenir une couleur donnée ?
2. Comment peut-on obtenir une lumière magenta à l'aide de ce projecteur ?
3. On éclaire une scène peinte en jaune par cette lumière magenta. Quelle sera la couleur perçue ?

13

Une imprimante couleur contient habituellement trois cartouches d'encre colorées (jaune, cyan, magenta) et une cartouche d'encre noire.

1. Quel type de synthèse colorimétrique est réalisée par l'imprimante ?
2. Quels sont les couleurs utilisées pour obtenir la couleur verte ?
3. Lorsque la cartouche d'encre noir est épuisée, comment est-il possible d'obtenir cette couleur à partir des cartouches restantes ?
4. Pour vérifier le bon fonctionnement des buses d'éjection d'encre de l'imprimante, une feuille de test est imprimée (voir ci-dessous). Qu'observerait-on si cette feuille était éclairée par une lumière verte ?

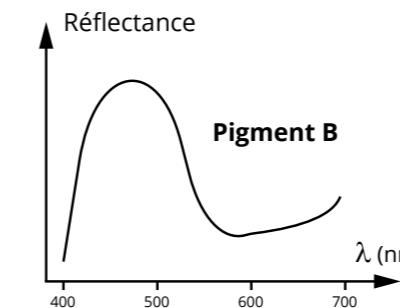
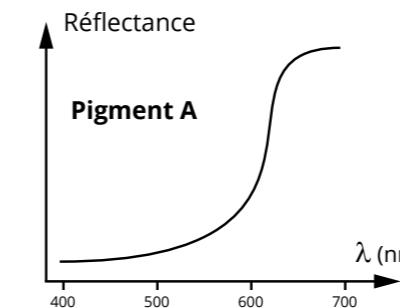
**14**

La garance des teinturiers est une plante, de la famille des rubiacées, dont est extrait un pigment de couleur rouge. Cette extraction étant onéreuse, on souhaite la remplacer par un équivalent synthétique. Deux pigments sont à disposition. Pour chacun un spectre de réflectance est donné ci-dessous. La réflectance, ou facteur de réflexion, est la proportion de lumière réfléchie par la surface d'un matériau, soit le rapport entre le flux lumineux relâché et celui incident.



FIGURE 6.13: Fils teints à la garance naturelle.

En vous appuyant sur les deux diagrammes donnés, quel pigment va être choisi ?

**15**

On observe un parasol au travers de trois lunettes colorées, rouge, verte et bleue. Les images perçues sont données ci-dessous. Quelle est la couleur du parasol ? Quelle est la couleur de l'arrière-plan ?

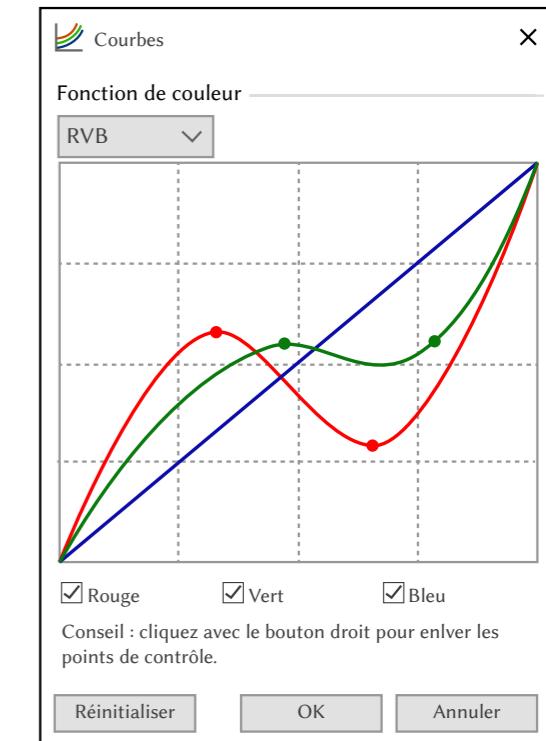


FIGURE 6.14: Courbes RVB sous Paint.NET.

17

Des filtres colorés rouge, vert et bleu ont été appliqués à une photographie de potimarrons à chair orange. Expliquer la couleur prise par ces derniers dans chacune des photos.

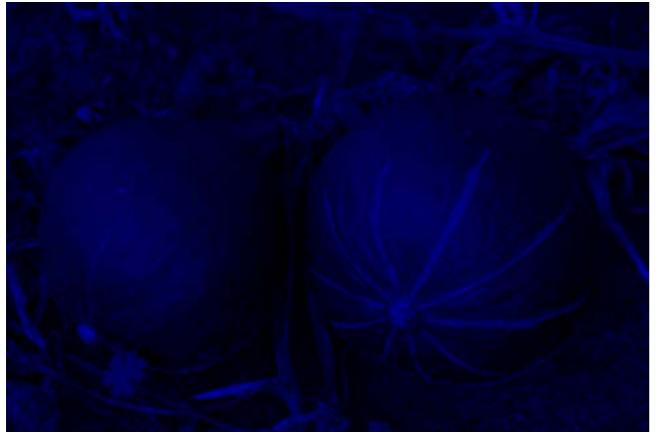


DIAGRAMME DE CHROMATICITÉ

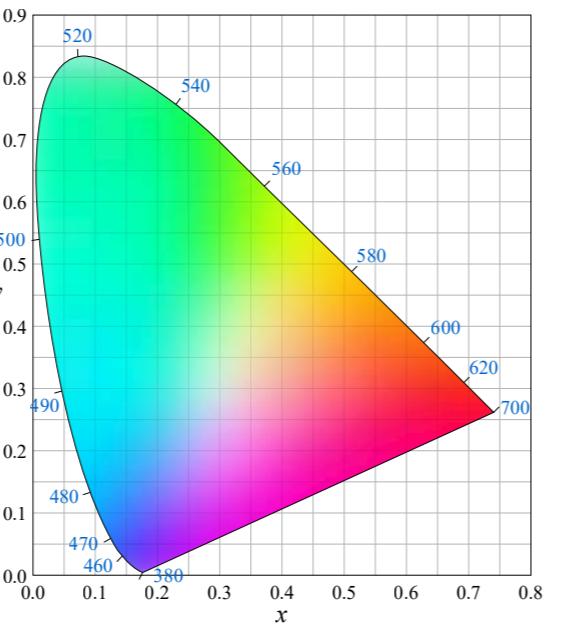
18

Rappels de cours :

1. Définir le lieu du spectre dans un diagramme de chromaticité.
2. Définir le blanc équi-énergétique dans un diagramme de chromaticité.
3. Que représente le gamut d'un système d'affichage?

19

Sur le diagramme de chromaticité ci-dessous :



1. Donner les coordonnées du blanc équi-énergétique.
2. On considère le point de coordonnées $(0,25 ; 0,65)$.
 - Quelle est sa longueur d'onde dominante?
 - Quel est son facteur de pureté?
3. On considère maintenant le point de coordonnées $(0,625 ; 0,375)$.
 - Comment appelle-t-on le lieu où se situe ce point?
 - Quelle est la particularité de ce point?
 - Quel est son facteur de pureté?

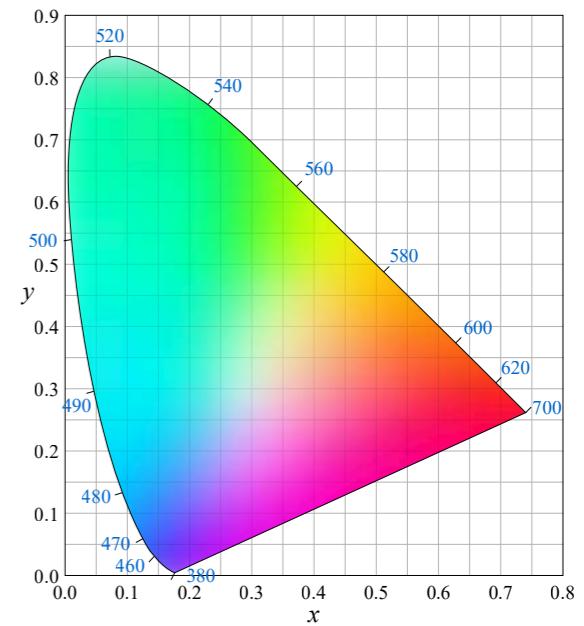
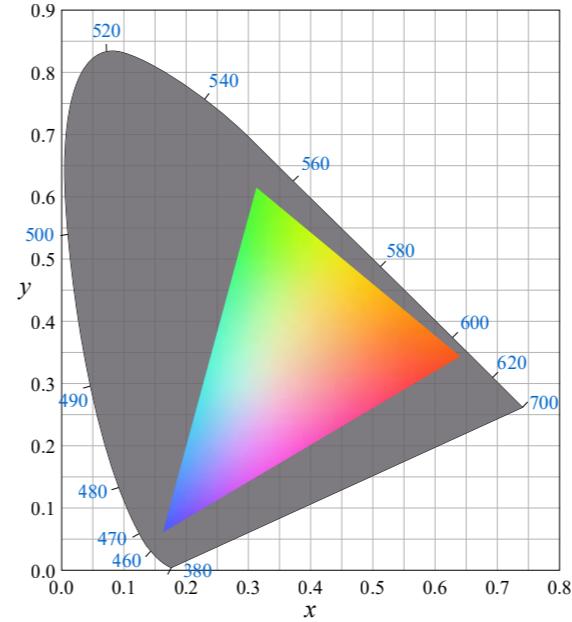
20

Ci-dessous sont représentés les gamuts de deux systèmes d'affichage.

1. Parmi ces deux systèmes d'affichage, lequel est le plus performant?
2. Quel système permet d'afficher une couleur dont la longueur d'onde dominante est 580nm et le facteur de pureté 0,5?
3. Pour chaque système d'affichage, les couleurs sont obtenues à partir de 3 luminophores.

(a) Pourquoi ces 3 luminophores sont les extrémités du gamut?

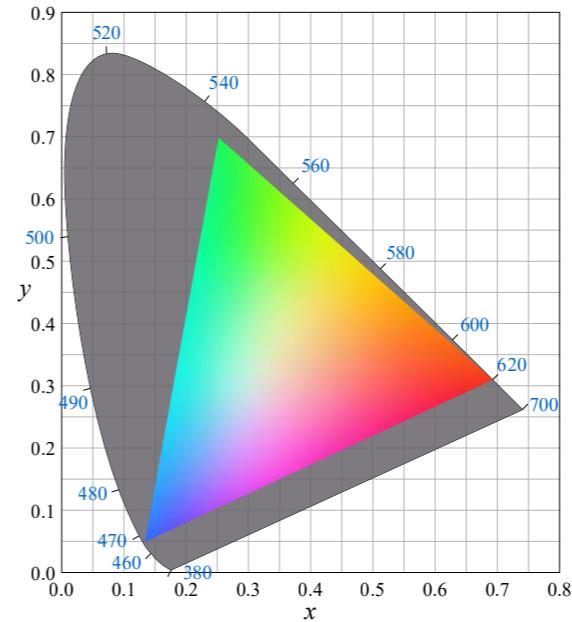
(b) Donner pour chacun les caractéristiques de ces luminophores.



22

On souhaite tracer le gamut d'un système d'affichage optimal.

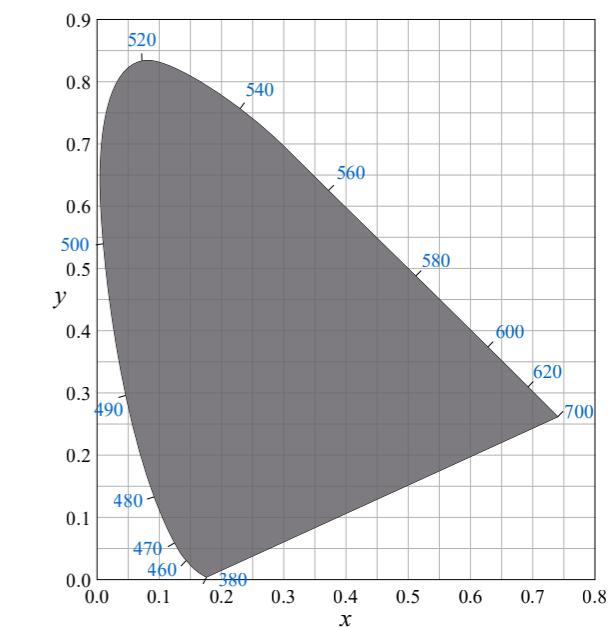
1. Placer sur le diagramme de chromaticité ci-dessous les sommets de ce gamut.
2. Permet-il d'obtenir l'ensemble des couleurs du spectre visible?
3. Quelles sont les caractéristiques des extrémités du gamut?
4. En déduire les couleurs des luminophores du gamut optimal.



21

Une couleur du diagramme de chromaticité a pour longueur d'onde principale 620nm et pour facteur de pureté 0,75.

1. Placer cette couleur sur le diagramme de chromaticité ci-dessous.
2. Décrire cette couleur.



Télécharger le diagramme

LA PEINTURE

Objectifs du chapitre : Donner les constituants d'une peinture / Décrire les mécanismes de séchage d'une peinture / Fabriquer une peinture.

07



**YVES KLEIN
IKB
1960**

ACTIVITÉ

ANALYSE D'UNE PEINTURE

Doc 1

La formule d'une peinture est donnée par l'étiquette ci-dessous.

Composition

Solides	47%
(Pigments, résine, additifs)	
Non Solides	53%
(Eau et glycols)	

Ingrédients	Réf#
Eau	7732-18-5
Polymère styrène-acrylique	Propriétaire
Calcaire	1317-65-3
Dioxyde de titane	13463-67-7
Éthylène glycol	107-21-1
Kaolin	1332-58-7
Talc	14807-96-6
Oxirane	9038-95-3
Nitrite de sodium	7632-00-0
Diisobutyrate de 2,2,4-triméthyl-1,3-pantanediol	25265-77-7

Doc 2

Une peinture est généralement composée :

- d'un liant qui forme le lien entre toutes les substances contenues dans la peinture (huile, cire, résine de synthèse comme le polymère styrène-acrylique);
- d'un pigment, qui donne sa couleur à la peinture (garance pour le rouge, jaune de hansa, dioxyde de titane);
- les charges, qui comme les pigments sont des poudres insolubles dispersées dans le liant. Elles n'ont pas de couleur définie et améliorent les qualités mécaniques de la peinture afin de faciliter son application régulière (talc, blanc de Meudon, mica, craie, etc.);
- les diluants ou solvants, qui rendent le liant plus fluide (eau, hydrocarbures, alcools, esters, acétone);

- les additifs, qui sont des composants ajoutés en petites quantités et qui améliorent les peintures.



FIGURE 7.1: De gauche à droite : pigment Echtorange, huile de lin, talc, essence de thérébenthine.

Doc 3

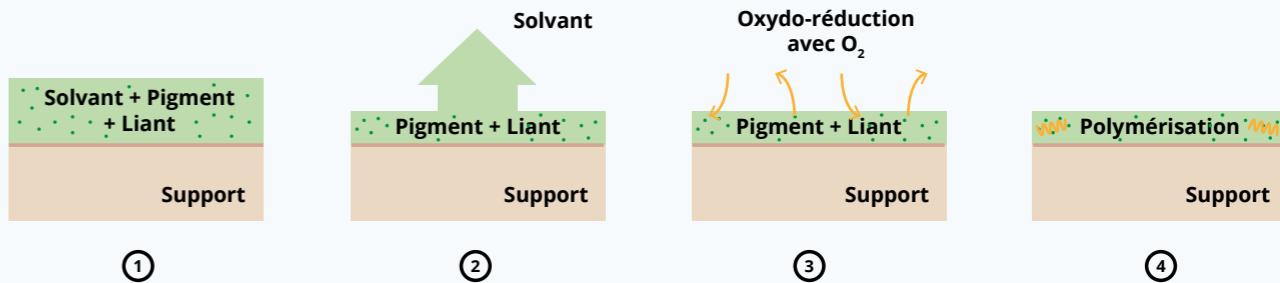
On distingue plusieurs catégories d'additifs dans une peinture :

- les adjuvants, qui protègent la peinture du feu, des champignons ou de la corrosion comme le nitrite de sodium;
- les plastifiants, qui améliorent l'élasticité du mélange, comme le diisobutyrate de 2,2,4-triméthyl-1,3-pantanediol ou l'oxirane;
- les siccatis, qui permettent de réguler la durée de séchage, comme le monoxyde de plomb jaune.

Doc 4

On distingue deux mécanismes de séchage d'une peinture :

- le séchage par évaporation, pour les aquarelles par exemple, qui consiste en une évaporation du solvant;
- le séchage par siccavation, plus long, concerne par exemple les peintures à l'huile, et se déroule en trois étapes :
 - une évaporation du solvant dans un premier temps,
 - suivie d'une réaction d'oxydo-réduction entre l'huile et l'oxygène présent dans l'air,
 - et qui se termine par un durcissement de la peinture par polymérisation.



À partir des documents précédents, répondre aux questions ci-dessous :

1. Identifier : les liant(s), pigment(s), diluant(s), charge(s) et additif(s) de la peinture proposée au document 1.
2. Quel type de mécanisme de séchage est en jeu pour la peinture décrite dans le document 1 ?
3. Décrire les principales étapes du mécanisme de séchage.

PEINTURE

CONSTITUANTS D'UNE PEINTURE

- ▶ La peinture est un liquide contenant des particules solides de 1 à 10 µm appelées pigments. On parle de **milieu dispersé colloïdal**, ou **sol**.
- ▶ Ses principaux constituants sont :
 - **Le liant** : il forme le **lien** entre toutes les substances contenues dans la peinture. Il permet également l'**adhésion** de la peinture au support et assure aussi une fonction de **protection**. C'est lui qui donne son nom à la peinture (peinture glycérophthalique, peinture à l'huile, etc). On emploie aussi le terme de **résine** ou de **medium** pour parler du liant.
 - **Le diluant ou solvant** : ils rendent le liant plus fluide afin de faciliter l'application de la peinture. Ce sont des liquides volatils qui s'évaporent plus ou moins rapidement après application. On appelle « **sans solvant** » les peintures dont le diluant est l'eau. Un solvant dissout le liant alors qu'un diluant ne fera que s'ajouter à une émulsion. L'utilisation des solvants induit de nombreux risques : beaucoup sont nocifs, irritants, toxiques et inflammables.
 - **Les pigments** : ce sont des particules colorées qui **absorbent** certaines parties de la lumière visible et donnent à la peinture sa couleur. Ils peuvent être d'origine naturels, synthétiques, organiques (c'est-à-dire contenant au moins un atome de carbone) ou inorganiques.



FIGURE 7.2: Pigment naturel bleu outremer.

— **Les charges** : comme les pigments, ce sont des poudres insolubles dispersées dans le liant. Sans couleur définie, elles améliorent les qualités mécaniques de la peinture afin de faciliter son application régulière. Elles sont responsables de la texture, de la densité, de la consistance, de la brillance, de l'opacité et de la luminosité du produit final.

Exemple de charges : talc, blanc de Meudon, mica, carbonate de calcium comme la craie, poudre de marbre, les fibres de bois, le chanvre.

- **Les additifs** : ce sont des composants ajoutés en petite quantité pour améliorer les peintures. On distingue parmi eux :
 - les **siccatis**, pour réguler la durée de séchage;
 - les **conservateurs**, pour allonger le délai entre fabrication et mise en œuvre;
 - les **plastifiants**, qui assouplissent et améliorent l'élasticité du mélange et qui l'empêche de cristalliser;
 - des **adjuvants**, qui améliorent la résistance au feu, aux champignons, aux insectes, etc.

MÉCANISMES PHYSICO-CHIMIQUES DE SÉCHAGE

- ▶ On appelle **séchage** la transformation de phase de la peinture après application, passant d'un stade initial liquide à une forme solide (polymère) par exposition à l'air. On distingue deux types de séchage.
- ▶ **Le séchage par évaporation** qui consiste en une évaporation des solvants. Il peut être très rapide du fait que la plupart des solvants sont très volatils. C'est le cas, par exemple, de l'aquarelle.

- ▶ **Le séchage par siccavation** se déroule en trois étapes.

- Dans un premier temps le solvant s'évapore.
- Ensuite, une réaction **d'oxydo-réduction** se produit entre l'huile et l'oxygène présent dans l'air.
- Enfin, la peinture durcit par polymérisation (création de nouvelles liaisons entre les molécules d'huile).

Ce processus est lent et peut durer jusqu'à un an dans le cas des empâtements (couche épaisse de peinture).

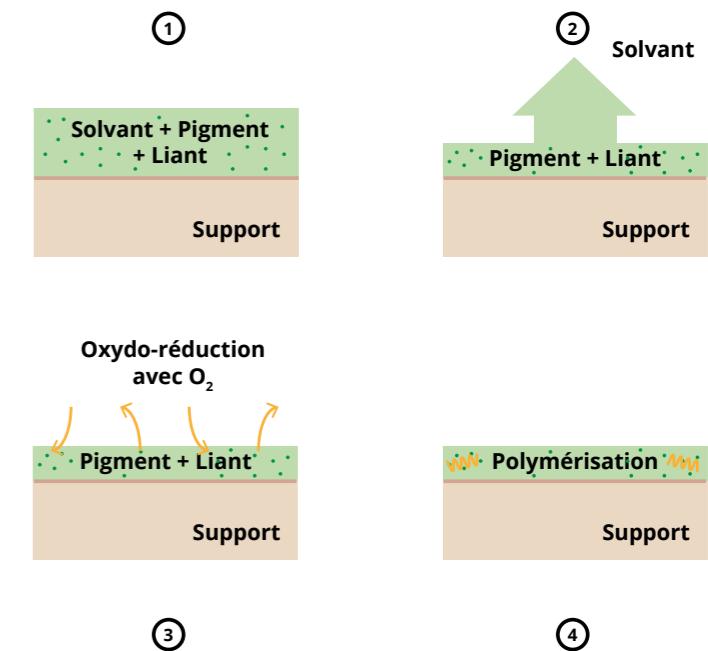


FIGURE 7.3: Illustration du séchage par siccavation.

- ▶ La règle du gras sur maigre en peinture à l'huile consiste à toujours superposer une couche de couleur plus grasse que la précédente pour éviter les craquelures des couches supérieures issues du séchage plus rapide.

TEXTILES ET FIBRES

- ▶ Un textile est un matériau qui peut se diviser en **fibres**. Ces fibres peuvent être :
 - des fibres **naturelles d'origine animale**, comme la laine (issue du mouton), la soie (issue des vers à soie) ou le cuir (issu du bœuf ou du porc);
 - des fibres **naturelles d'origine végétale**, comme le coton, le lin, le jute;
 - des fibres **synthétiques** comme le nylon (polyamide), l'orlon (polyacrylique), tergal (polyes-ter).
- ▶ On désigne par **textile intelligent**, un textile qui a la capacité de sentir une information dans son environnement et d'y répondre avec un comportement spécifique.

TEINTURE DES FIBRES

- ▶ Contrairement aux pigments, une **teinture** est un colorant soluble dans le médium d'application. Ils peuvent être :
 - naturels,
 - comme l'indigo, issu de l'indigotier, un arbuste des régions chaudes,
 - ou la pourpre, d'origine animale, tirée des murex;
 - synthétiques, comme :
 - la mauvéine,
 - l'alizarine
 - ou l'indigotine.
- ▶ Afin de colorer un textile, on prépare tout d'abord celui-ci en le débarrassant de toutes les impuretés qu'il peut contenir. On l'immerge ensuite dans une solution de colorant. Celui-ci se fixe alors sur les fibres par la formation de liaisons entre la fibre et les molécules de colorant.



FIGURE 7.4: Cuves de colorants pour teinture au Mali.

TP
03.

FABRIQUER UNE PEINTURE À L'HUILE

Nous allons décrire dans cette activité les étapes nécessaires pour la fabrication d'une peinture à l'huile de couleur rouge.

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

- ▶ Balance (précision au gramme)
- ▶ Fouet
- ▶ Récipient d'un quart de litre environ
- ▶ 60 g d'huile de lin
- ▶ 15 g d'essence de térébenthine
- ▶ 10 g de calcaire (blanc de meudon, blanc de Troye, blanc d'Espagne)
- ▶ 40 g d'ocre rouge (pour une peinture rouge)
- ▶ Quelques gouttes de siccatif

ÉTAPES DE FABRICATION

- ▶ Verser l'ocre et le calcaire dans le récipient.
- ▶ Mélanger à sec.
- ▶ Ajouter 30 g d'huile de lin et les 15 g d'essence de térében-thine.
- ▶ Mélanger le tout.
- ▶ Compléter en ajoutant à nouveau 30 g d'huile de lin.
- ▶ Verser quelques gouttes de siccatif.
- ▶ Mélanger à nouveau.
- ▶ La peinture est prête à être utilisée.

REMARQUES

- ▶ Sans siccatif, la peinture obtenue peut prendre jusqu'à une semaine pour sécher. Le siccatif réduit ce temps de moitié.
- ▶ Avec le temps, l'huile de lin se transforme en un film de lynoxyne, phénomène qui s'accompagne d'une baisse du pH et de la formation de craquelures. Le calcaire, avec son pH basique, contrecarre cet effet et retarde ainsi les craquelures.

04. EXERCICES



(a) Matériel nécessaire.



(b) Mélanger à sec l'ocre et le calcaire.



(c) Verser 30 g d'huile de lin.



(d) Verser 15 g d'essence de térébenthine.



(e) Mélanger le tout puis rajouter 30 g d'huile de lin.



(f) Ajouter quelques gouttes de siccatif puis mélanger.

FIGURE 7.5: Fabrication d'une peinture.

QUESTIONS

1. Quel ingrédient est responsable de la couleur de la peinture?
2. Quel est le rôle du siccatif dans le mélange?
3. Comment le calcaire modifie-t-il le produit obtenu?
4. Quel est le rôle du calcaire?

CONSTITUANTS DE LA PEINTURE

01

Rappels de cours :

1. Citer les principaux constituants d'une peinture.
2. Quel est le rôle du liant dans une peinture?
3. Quel est le rôle des charges dans une peinture?
4. Quel sera l'un des constituants d'une peinture « sans solvant »?
5. Qu'est-ce qu'un siccatif?

02

Relier les constituants d'une peinture à la catégorie à laquelle ils appartiennent.

Talc •	• Liant
Alcool •	• Pigment
Bleu outre-mer •	• Charge
Résine •	• Diluant

03

La formule d'une peinture est donnée dans l'étiquette ci-dessous.

Formule	(%)
Mélange de polymères (résine acrylique et latex naturel)	20
Carboxyméthylcellulose	0.5
Garance	1
CaCO ₃	40
Agent filmogène	2.5
Agent dispersant	1
Eau	35

1. Quel est le liant de cette peinture?
2. Quel est le pigment de cette peinture?
3. Quel est le diluant de cette peinture?
4. Quelle est la charge de cette peinture?
5. Quels sont les additifs?

04

Ci-dessous sont données les étiquettes de deux peintures.

Peinture A**Formule (%)**

Résine alkyde	19
Dioxyde de titane	2
Talc	15
Butanol	2
White Spirit	15
Plastifiants	
Phtalate de dibutyle	15
Nitrocellulose	4

**Peinture B****Formule (%)**

Eau	32.7
Acide oléique (acide gras)	28
Dioxyde de titane	21.8
Kaolin	7.4
Hectorite	0.24
Calcaire	6.3
Copolymère acrylique styréné	2.28
Hydroxyéthylcellulose	0.57
Huile de paraffine	0.15
Agent anti-adhésion microbien	0.01
Polyacrylate de sodium	0.21
Conservateurs	0.35

- Pour chaque étiquette donner les liants, diluants, charges, additifs, pigments.
- Parmi les étiquettes suivantes, laquelle est associée à une peinture sans solvant?

05

Réaliser une planche décrivant les différentes étapes de fabrication d'une peinture.

06

Associer chacun des produits suivants à un constituant d'une peinture.

07

On souhaite colorer un T-shirt en coton à l'aide d'une teinture naturelle indigo.



- À quelle catégorie de fibres appartient le coton?
- Quelle est l'origine de la teinture indigo?
- Décrire les principales étapes permettant de teindre un textile.
- Expliquer la différence entre un pigment et un colorant.

MÉCANISMES DE SÉCHAGE**08****Rappels de cours :**

- Quels sont les principaux mécanismes de séchage?
- Quelle est la principale différence entre ces deux techniques?

09

Ci-dessous sont données les différentes étapes du séchage par siccavation.

- Réaction d'oxydo-réduction
- Polymérisation
- Évaporation du solvant

- Classer ces étapes par ordre chronologique.
- Décrire chacune de ces étapes à l'aide d'un schéma.

10

Ci-dessous sont données les étiquettes d'une peinture à l'huile et d'une peinture pour l'aquarelle.

Peinture A**Formule (%)**

Gomme arabique	55
Dispersant (fiel de bœuf)	8
Glycérine	16
Pigment	20
Eau	1

Peinture B**Formule (%)**

Pigment	75
Huile de lin	23
Stéarate de magnésium	2

- Associer chaque étiquette à un type de peinture.

- Décrire le mécanisme de séchage de la peinture à l'aquarelle et celui de la peinture à l'huile.

11

On souhaite superposer plusieurs couleurs sur une toile. L'étiquette de chacune est donnée ci-dessous.

- Expliquer la règle du *gras sur maigre*.
- Classer les peintures suivantes par ordre chronologique de dépôt sur une toile.

Peinture bleue**Formule (%)**

Bleu de cobalt	16.7
Résine	41.8
CaCO ₃	41.5

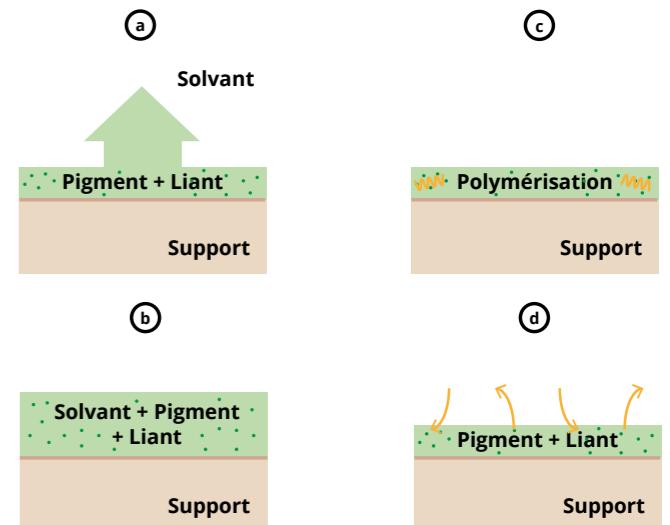
Peinture Jaune**Formule (%)**

Jaune de Hansa	20.4
Résine	29.5
CaCO ₃	50.1

12

Ci-dessous est schématisé les différentes étapes d'un même mécanisme de séchage d'une peinture.

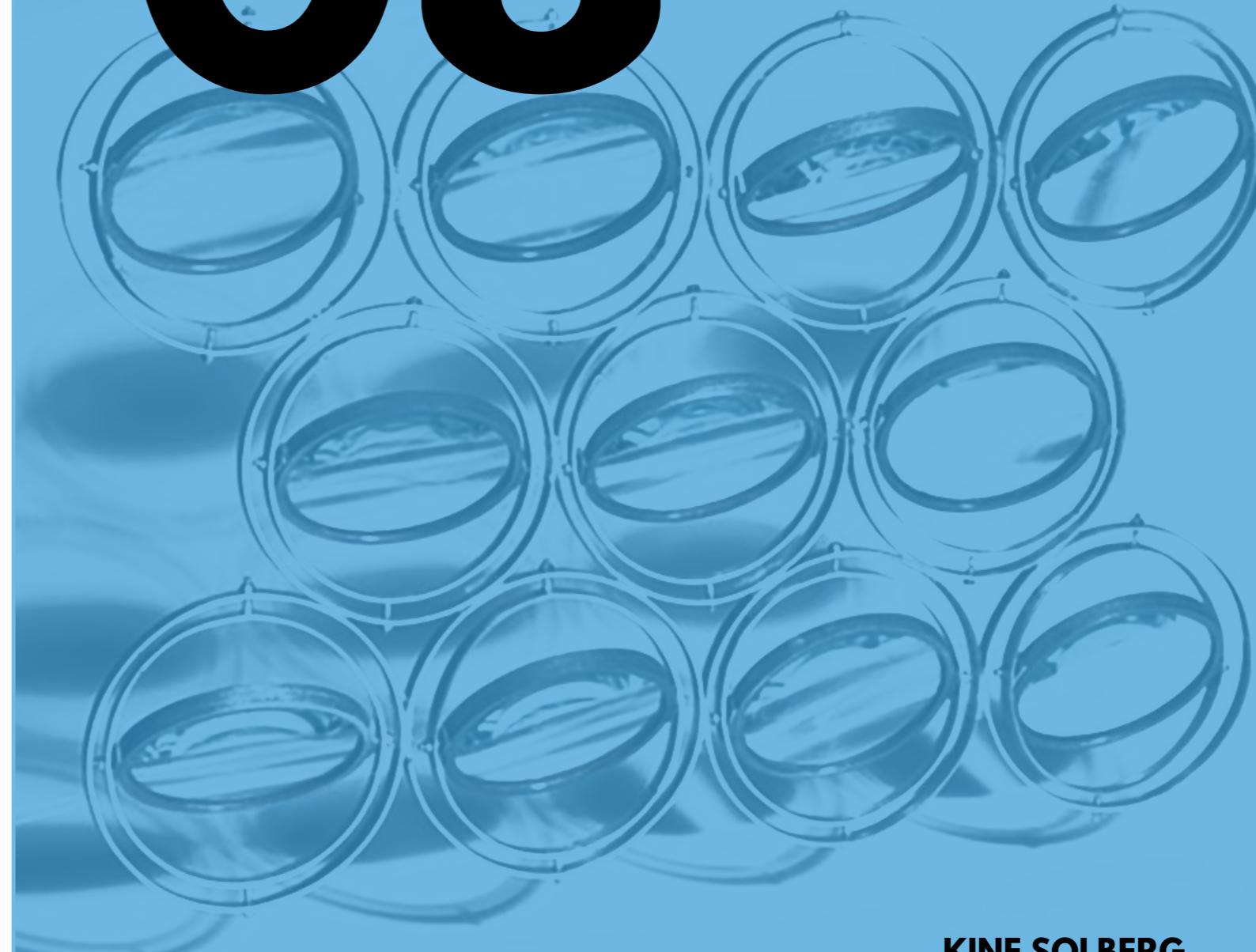
- Quel mécanisme de séchage est représenté?
- Ordonner les différentes étapes par ordre chronologique.
- Décrire chacune des étapes représentées.



LA PHOTOGRAPHIE

Objectifs du chapitre : Construire l'image d'un objet dans le cas d'une lentille convergente / Utiliser la relation de conjugaison / Calculer un agrandissement / Donner les principaux éléments d'un appareil photographique « reflex » / Décrire le rôle de chacun des principaux éléments d'un appareil photographique « reflex » / Établir une analogie entre l'appareil photographique et l'œil humain / Définir la focale d'un objectif / Lier la focale d'un objectif aux paramètres esthétiques de la photographie / Differencier grand angle et téléobjectif / Citer les principaux réglages d'une prise de vue photographique et leur influence sur l'esthétique de l'image.

08



KINE SOLBERG
Landscape
2014

LENSCAPE

Doc 1

Exploration de la fenêtre en tant qu'élément architectural et de la façon dont elle peut être conçue comme élément interactif, *Landscape* est une projet de la designer Kine Solberg présentée dans le cadre de l'exposition des diplômés du Master de design et d'architecture intérieure de l'Institut Piet Zwart aux Pays-Bas. L'œuvre est composée de plusieurs lentilles convergentes circulaires suspendues dans deux montures en verre acrylique concentriques, formant un mécanisme à cardan. Ce système permet à chaque lentille de pivoter dans toutes les directions, créant un motif de différentes vues.



FIGURE 8.1: *Landscape*, Kine Solberg, 2014.

Doc 2

L'optique géométrique

Développée dès l'Antiquité, notamment par Euclide, l'optique géométrique permet d'expliquer la formation des images obtenues au travers de lentilles. Dans cette approche, la lumière se propage de façon rectiligne - on parle de rayon lumineux - et sa direction change, éventuellement, à l'interface entre deux milieux transparents différents.

L'optique géométrique est régie par quatre lois qui ont simultanément, mais indépendamment, été découvertes au XVII^e siècle par Willebrord Snell et René Descartes.

La construction se fait dans le plan où sont représentés le système modifiant le trajet de la lumière, par exemple une lentille, et l'axe optique passant par le centre optique du système et perpendiculaire à celui-ci. Les rayons provenant de l'infini sont représentés par des droites parallèles à l'axe optique.

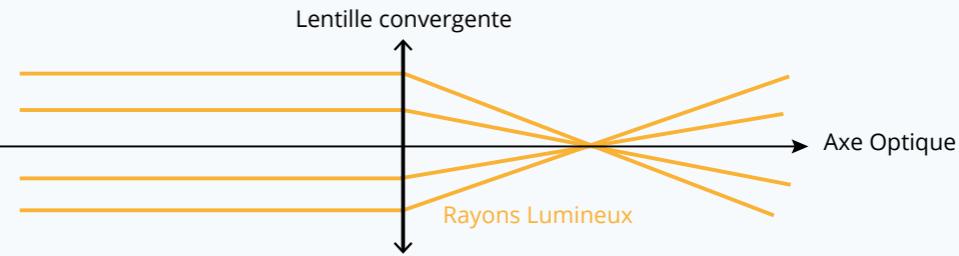


FIGURE 8.2: Modification du trajet de rayons provenant de l'infini par une lentille convergente.

Doc 3

Lentilles convergentes

Une lentille convergente rapproche les rayons de l'axe optique.

- Les rayons parallèles à l'axe optique seront déviés et passeront par un même point appelé foyer image F' .
- Les rayons passant par le centre optique O ne seront pas déviés.
- Le foyer objet F est un point dont la distance au centre optique est égale à celle séparant ce dernier avec le point foyer image. Tout rayon passant par ce point sera dévié par la lentille en un rayon parallèle à l'axe optique.

Une lentille convergente est caractérisée par la distance $OF=OF'=f$ appelée distance-focale.

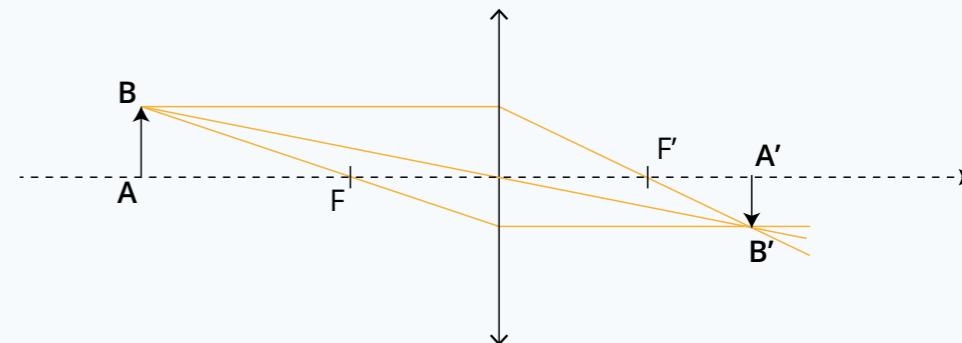


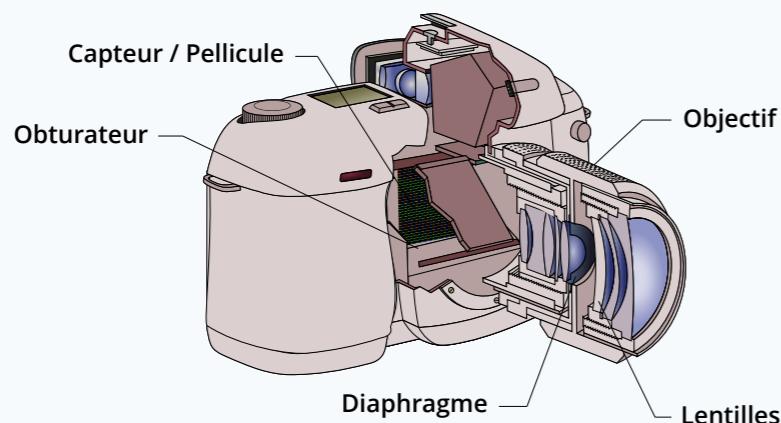
FIGURE 8.3: Construction de l'image d'un objet.

À partir des documents précédents, répondre aux questions suivantes :

1. Expliquer la construction de l'image de l'objet AB à la fin du document 3.
2. Représenter sur un schéma optique le trajet des rayons parvenant aux lentilles de *Landscape*.
3. Sur l'image présentée au document 1, expliquer la formation d'image renversée.
4. Quelle est la condition pour que l'image de l'objet observée ne soit pas renversée ?

Doc 1

Un appareil photo, argentique ou numérique, est composé de 4 principaux éléments.



- La/Les lentille(s) : son choix dépendra de l'angle de champ, c'est-à-dire l'angle de vision de l'appareil, ainsi que la distance focale, distance de l'objet à photographier, que l'on souhaite avoir. Elle influe également sur la profondeur de champ.
- Le diaphragme : avec la/les lentille(s) il constitue l'objectif de l'appareil. Son ouverture détermine la quantité de lumière qui sera reçue pour la capture d'une image. Elle influe également sur la profondeur de champ. Plus l'ouverture sera grande, plus la distance sur laquelle les objets observés paraissent nette sera réduite.
- L'obturateur : il couvre le système de capture de l'appareil. Il s'ouvre afin de laisser passer les rayons lumineux et permettre l'acquisition d'une image. Plus le temps pendant lequel l'obturateur est ouvert est long, plus la quantité de lumière reçue sera importante.
- Le capteur CCD (appareil numérique) ou la pellicule (appareil argentique).

Doc 2

Le fonctionnement du capteur d'un appareil photographique numérique repose sur l'effet photoélectrique. Les photons incidents arrachent des électrons créant un courant électrique qui est alors amplifié. Plusieurs capteurs, sensibles à des plages de longueurs d'ondes différentes, permettent de créer une image en couleurs.



FIGURE 8.4: Capteur CCD d'un appareil photographique.

L'amplification du signal peut être régulée à l'aide de la sensibilité ISO (qui est fixe dans le cas des pellicules). Cependant, si une partie de la photo est surexposée, les informations sont définitivement perdues contrairement à l'acquisition argentique. La résolution des images capturées est quant à elle limitée par le nombre de cellules photoélectriques.

Doc 3

Une pellicule destinée à la photographie « noir et blanc » est constituée de microcristaux (ou « grains ») de sels d'argent photosensibles comme le bromure d'argent ($\text{Br}^- + \text{Ag}^+$). L'exposition à la lumière de ce dernier conduit à la formation de germes d'argent issus de la combinaison d'ions argent et d'électrons et produit l'*image latente*. Celle-ci va ensuite être « amplifiée » lors du développement à l'aide d'un bain révélateur, par exemple d'hydroquinone ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2$), via une réaction d'oxydoréduction. Après un bain d'arrêt qui stoppe l'action du révélateur, l'image est « fixée » à l'aide d'un bain contenant l'ion thiosulfate $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ (aq).

Le tirage couleur nécessite plus de produits et des gradations de filtres jaune, magenta et cyan pour obtenir une image avec les bonnes couleurs.

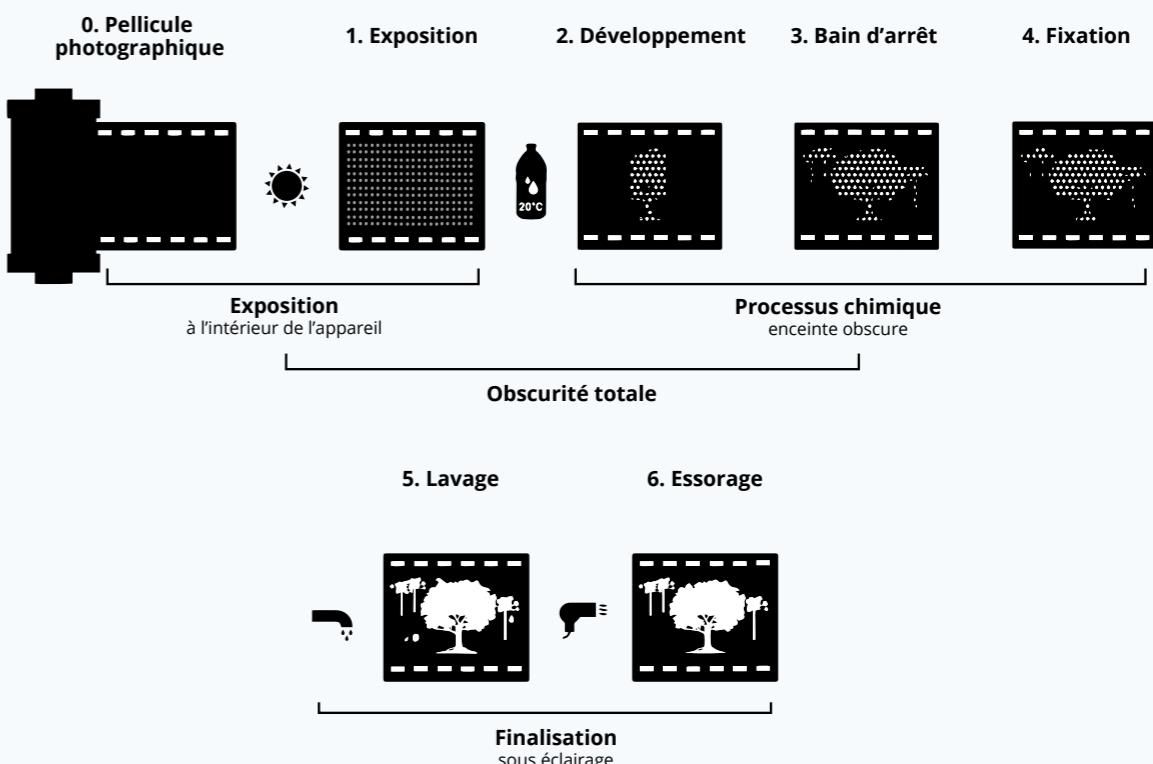


FIGURE 8.5: Tirage photographique noir et blanc.

Données - Couples redox : Ag^+ / Ag et $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2 / \text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2$

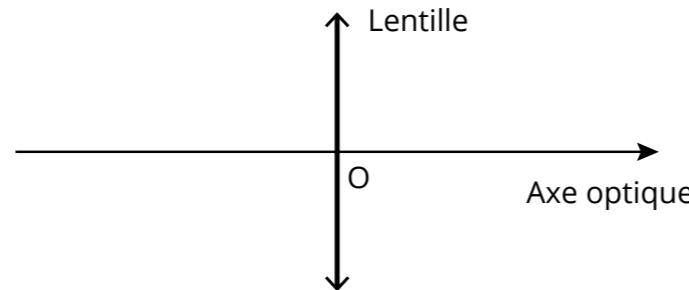
À partir des documents précédents, répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les composants en commun entre les appareils photographiques numérique et argentique ?
- Quel est le rôle de chacun de ces éléments ?
- Quelle est la principale différence entre les appareils photographiques numérique et argentique ?
- Décrire l'acquisition d'une photographie pour chacun de ces appareils.

FORMATION DES IMAGES

DÉFINITIONS

- L'objectif d'un appareil photographique peut être modélisé, d'un point de vue optique, par une **lentille mince convergente**.
- Une lentille optique est un dispositif généralement transparent pour la lumière qui **modifie le trajet** de certains faisceaux lumineux.
- On appelle **axe optique** d'une lentille, la droite passant par le centre de la lentille, appelé **centre optique**, et perpendiculaire à celle-ci. Il est orienté dans le sens de conventionnel de propagation de la lumière, c'est-à-dire de gauche à droite.
- On appelle **centre optique O**, le centre de la lentille situé à l'intersection de celle-ci et de l'axe optique.



- On distingue les **lentilles convergentes** qui **rapprochent** les rayons de l'axe optique, des lentilles divergentes qui les en éloignent.

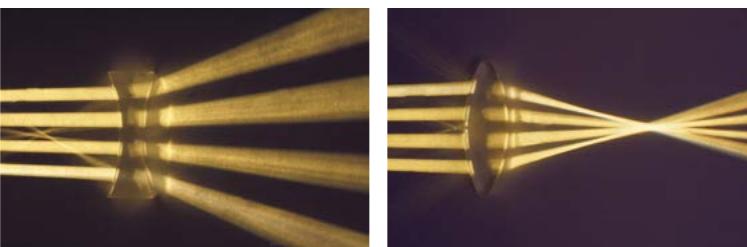


FIGURE 8.6: Lentille divergente (à gauche), lentille convergente (à droite).

- Remarque :** une lentille est dite mince si son épaisseur est faible devant le rayon de courbure de ses faces.

TRAJET DES RAYONS LUMINEUX

- Afin d'étudier l'image d'un objet observé au travers d'une lentille, nous nous plaçons dans le plan contenant l'axe optique comme représenté ci-dessous.

► Le trajet des rayons lumineux est représenté par des segments. Des rayons provenant de l'infini seront représentés tous parallèles.

► En arrivant à la lentille :

- les rayons passant par le centre optique continuent leur trajet dans la même direction;
- les rayons parallèles à l'axe optique seront déviés et passeront par un point appelé **foyer image F'** situé sur l'axe optique;
- si les rayons sont passés par un point particulier, appelé **foyer objet F**, ils sont transformés en rayons parallèles à l'axe optique

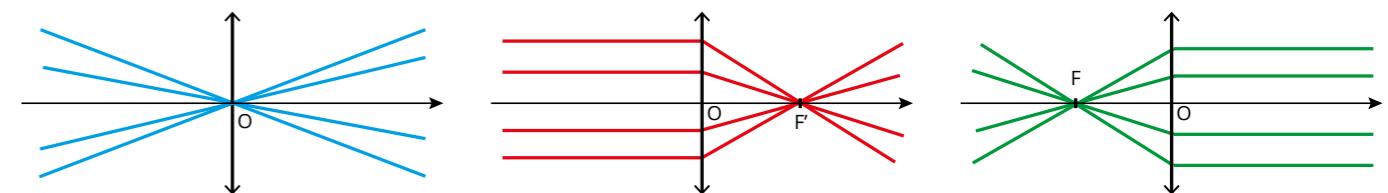


FIGURE 8.7: Trajet de rayons lumineux : passant par le centre optique (à gauche); provenant de l'infini (au centre); passant par le foyer objet (à droite).

- Une lentille convergente peut être utilisée indifféremment dans les deux sens. Ainsi $OF = OF'$.
- La position des points foyers caractérise de la lentille. On appelle **distance focale f'** la longueur $OF : f' = OF = OF'$
- Remarque :** on utilise parfois la **vergence C** définie par $C = \frac{1}{f'}$ pour caractériser la distance focale d'une lentille.

CONSTRUCTION OPTIQUE

- La position de l'image d'un objet par une lentille convergente est obtenue en utilisant les trois rayons caractéristiques décrits précédemment : rayon passant par le centre optique, rayons provenant de l'infini et rayon passant par le point focal objet.

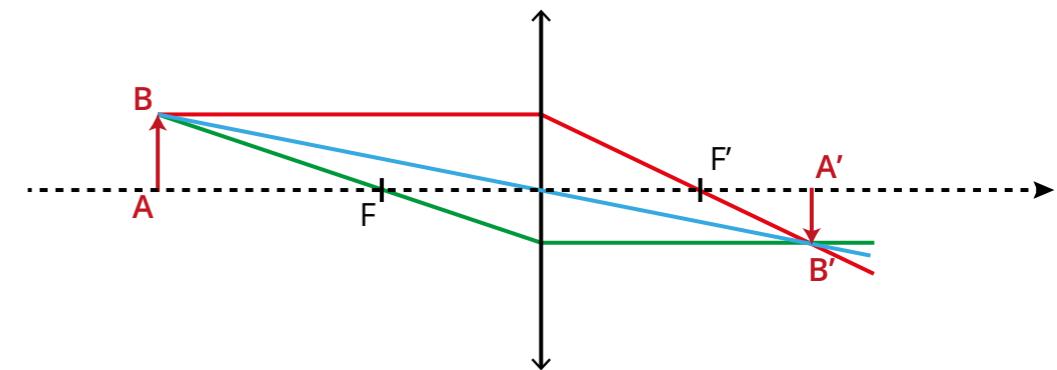


FIGURE 8.8: Construction de l'image A'B' de l'objet AB.

- L'objet AB étant plan et perpendiculaire à l'axe optique, son image A'B' sera plane et perpendiculaire à l'axe optique.
- La position, la taille et le sens de l'image sont les caractéristiques de l'image. Elles dépendent de la lentille et de la position de l'objet.

- Les abscisses x_A et $x_{A'}$ sont liées à la distance focale par la relation de conjugaison :

$$\frac{1}{x_{A'}} - \frac{1}{x_A} = \frac{1}{f'}$$

- Le rapport $\frac{y_{B'}}{y_B}$ appelé **grandissement** γ peut être obtenu à partir des abscisses x_A et $x_{A'}$:

$$\gamma = \frac{y_{B'}}{y_B} = \frac{x_{A'}}{x_A}$$

L'APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE

ÉLÉMENTS D'UN APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE À VISÉE « REFLEX »

- Un appareil photographique comprend plusieurs éléments.

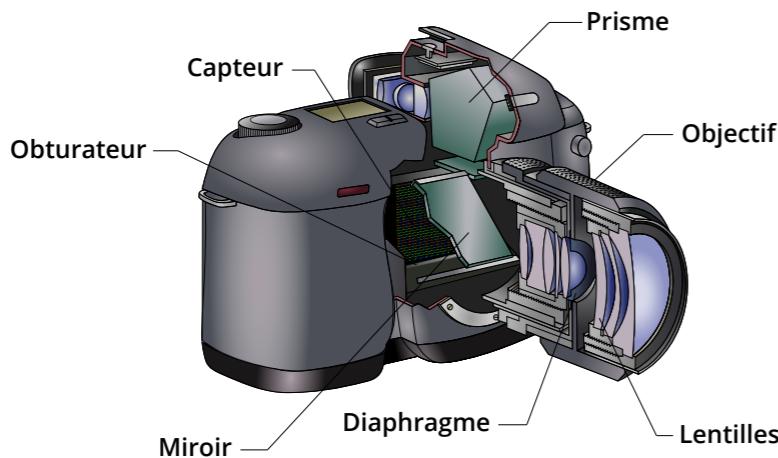


FIGURE 8.9: Éléments d'un appareil photographique « reflex ».

- **Objectif**: c'est un système optique composé de lentilles et d'un diaphragme. Le **diaphragme** conditionne la quantité de lumière transmise par son ouverture. Plus celle-ci sera importante, plus la quantité de lumière transmise sera importante. Les lentilles caractérisent la distance focale de l'objectif.

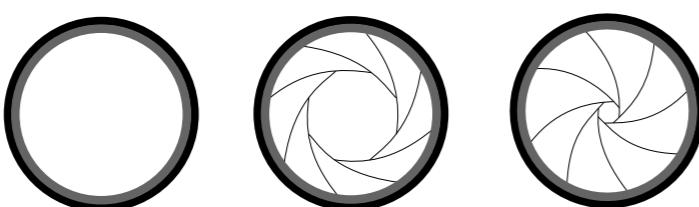


FIGURE 8.10: L'ouverture du diaphragme est contrôlée par plusieurs lamelles permettant de réguler la quantité de lumière transmise.

- **Miroir**: baissé, il redirige les rayons lumineux vers le viseur par l'intermédiaire du prisme; levé il laisse passer les rayons lumineux directement vers le capteur. Ainsi, durant l'acquisition, il est impossible d'utiliser le viseur.

- **Prisme** : il redirige les rayons lumineux vers le viseur.
- **Obturateur** : il masque le capteur, contrôlant le temps d'exposition de ce dernier et donc la quantité de lumière reçue.
- **Capteur** : il est composé de plusieurs cellules photoélectriques qui convertissent l'énergie électromagnétique de la lumière en un signal électrique qui est ensuite traité pour obtenir une image. Élement central d'un reflex, il définit ses performances aussi bien pour la définition, la sensibilité que pour l'aspect de l'image finale .

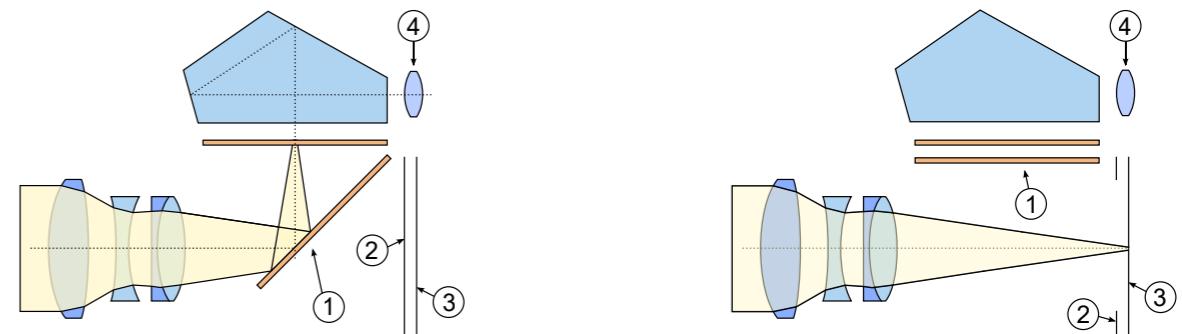


FIGURE 8.11: À gauche - configuration pendant la visée : le miroir (1) est baissé et l'image est redirigée vers le viseur (4), l'obturateur (2) est fermé. À droite - configuration pendant l'acquisition : le miroir est relevé et l'obturateur est ouvert, les rayons lumineux arrivent directement vers le capteur (3).

L'ŒIL HUMAIN ET LA MISE AU POINT

- La vision chez l'être humain est semblable à l'acquisition d'images par un appareil photographique :

- **la cornée et le cristallin** jouent le rôle de la lentille et concentrent la lumière vers
- **la rétine**, analogue du capteur;
- **l'iris**, comme le diaphragme, régule la quantité de lumière absorbée.

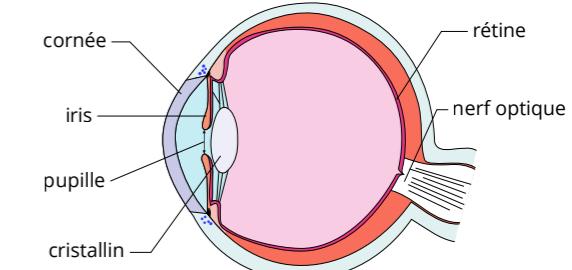


FIGURE 8.12: Schéma d'une coupe longitudinale d'œil humain.

- Pour que l'image d'un objet se forme sur la rétine ou sur le capteur de l'appareil photographique, il est nécessaire que le foyer image F' soit situé sur ces derniers. Dans le cas contraire l'objet apparaîtra flou.
- La myopie et l'hypermétropie sont des troubles de la vision caractérisée par une image floue respectivement au loin et à distance proche. Dans le cas de l'hypermétropie, la distance de la rétine au centre optique est plus courte que la distance focale. Dans le cas de la myopie, cette distance est plus grande.

FOCALES

- Les objectifs photographiques sont caractérisés par leur distance focale, ou « focale ».
- **Exemple** : un objectif 28-300mm, est un objectif à distance focale variable, réglable entre 2,8 cm et 30cm.

► La distance focale influe sur :

- **l'angle de champ**, c'est-à-dire le champ de vision de l'appareil,
- l'effet de perspective
- et la **profondeur de champ**, c'est-à-dire la distance sur laquelle les éléments paraissent nettes.

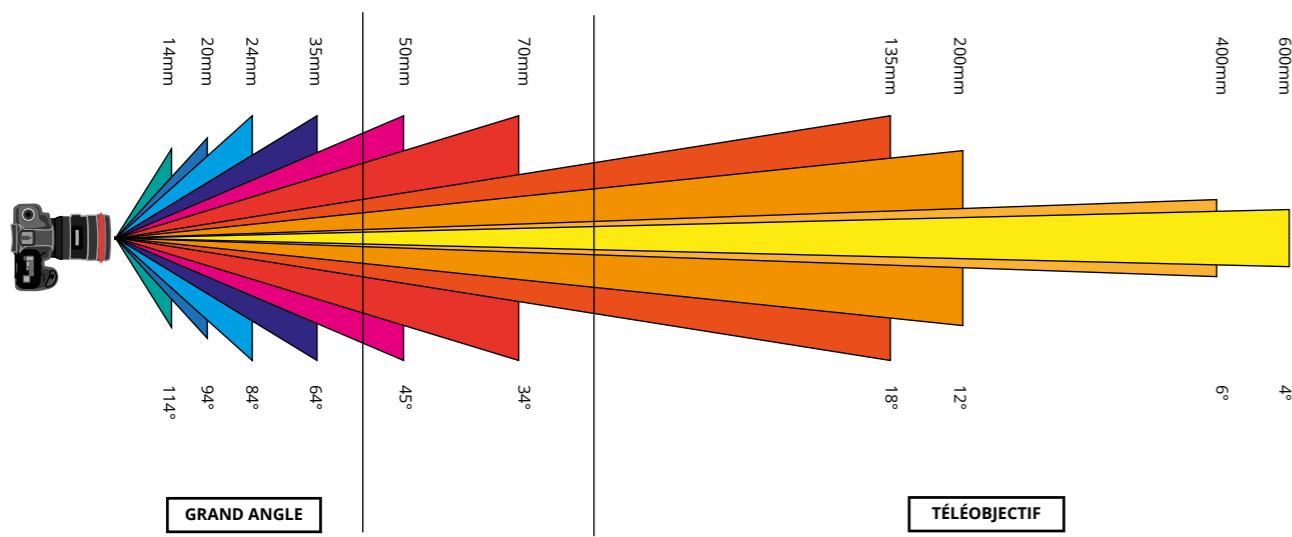


FIGURE 8.13: Relation entre la focale d'un objectif et son angle de champ.

- Plus la distance focale sera petite, plus l'angle de champ sera grand. La perspective est alors exagérée et la profondeur de champ grande.
- Inversement, plus la distance focale sera grande, plus l'angle de champ sera réduit. La perspective sera écrasée et la profondeur de champ limitée séparant nettement l'objet sur lequel l'appareil a fait sa mise au point, du reste de son environnement.
- On appelle **grand angle** un objectif à courte focale (35mm, 28mm et moins). Son angle de champ est strictement supérieur à 45°.
- On appelle **téléobjectif** un objectif à grande focale (100mm, 135mm, 200mm et plus). Son angle de champ est strictement inférieur à 45°.
- Une focale de 40 à 55mm permet de reproduire la même impression de perspective et de profondeur que l'œil humain.



FIGURE 8.14: Influence de la focale d'un objectif sur l'aspect de l'image capturée.

RÉGLAGES

► La vitesse d'obturation

- La vitesse d'obturation contrôle le temps d'exposition ou *temps de pose*.
- Ce temps peut être exprimé sous forme de fraction de seconde ou donné directement. Ainsi une vitesse réglée à **2"** aura un temps d'exposition de 2 secondes. Une vitesse réglée **1/5** aura un temps d'exposition d'un cinquième de seconde soit 200ms.

- Plus le temps d'exposition sera important, plus la quantité de lumière captée sera importante.
- Un temps d'exposition trop faible donnera une photo sous-exposée, un temps d'exposition trop long donnera une image surexposée.
- Dans le cas d'un temps d'exposition long, l'appareil doit être maintenu fixe, à l'aide d'un trépied par exemple, afin d'éviter tout flou de mouvement indésirable.



FIGURE 8.15: La photo de droite a été prise avec un temps d'exposition plus long que la photo de gauche.

► Le nombre d'ouverture

- L'ouverture du diaphragme, ou ouverture, est caractérisé par le **nombre d'ouverture** noté sous la forme $f/$ ou $N =$ suivi d'un nombre. Plus l'ouverture sera grande plus ce nombre sera petit.
- Elle influe sur la profondeur de champ. Plus l'ouverture sera grande, plus la profondeur de champ sera faible.
- Elle influe aussi, comme le temps d'exposition, sur la quantité de lumière reçue. Par convention, il a été établi une suite de nombres d'ouverture pour lesquels le passage à la valeur supérieure entraîne une division par deux de l'éclairage : $1 - 1,4 - 2 - 2,8 - 4 - 5,6 - 8 - 11 - 16 - 22 - 32 - 45 - 64 - \dots$
- Pour obtenir la même quantité de lumière en modifiant le nombre d'ouverture, il suffit de changer le temps de pose dans la proportion inverse. Par exemple, $1/60$ à $f/5,6$ donne le même résultat que $1/15$ à $f/11$ en terme d'exposition.

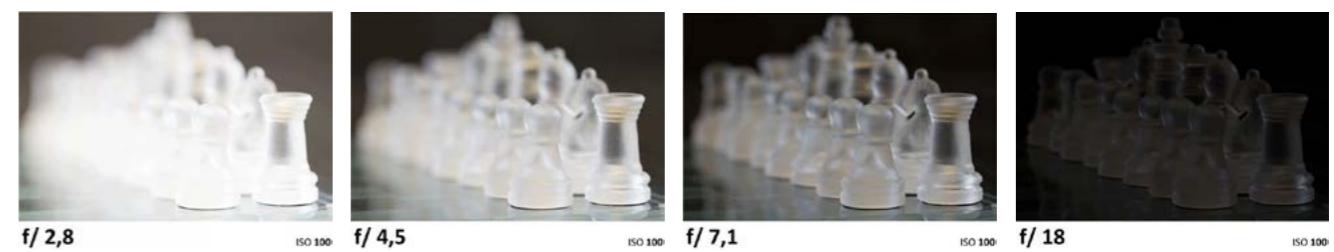


FIGURE 8.16: Une même scène photographier avec différents nombres d'ouvertures.

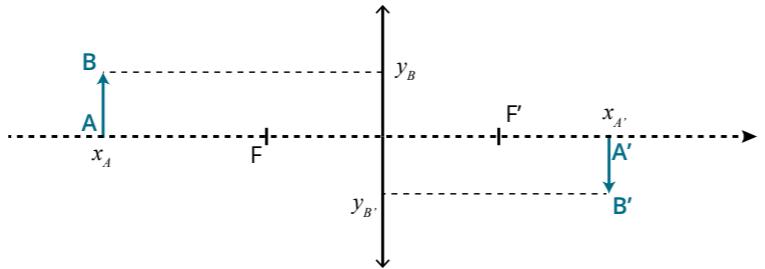
► La sensibilité ISO

- L'ISO règle la sensibilité à la lumière de l'appareil.
- Plus celle-ci sera élevée, plus l'appareil sera sensible à la lumière. En augmentant l'ISO on compense ainsi un éclairage faible.
- Une valeur trop élevée conduit à une photo surexposée. Trop faible la photo sera sous-exposée.
- De plus, en augmentant la sensibilité ISO, la qualité de l'image diminue. Un grain se forme causé par le bruit électronique dû à l'augmentation de la sensibilité.

RELATIONS POUR UNE LENTILLE MINCE CONVERGENTE

INTRODUCTION

On considère une lentille convergente de distance focale f' .



Le but de cette activité est de vérifier les relations de conjugaison :

$$\frac{1}{x_{A'}} - \frac{1}{x_A} = \frac{1}{f'}$$

et de grandissement :

$$\gamma = \frac{y_{B'}}{y_B} = \frac{x_{A'}}{x_A}$$

MATÉRIEL

- 1 banc optique
- 1 source de lumière blanche + un condenseur intégré à la source
- 1 lentille convergente de longueur focale f'
- 1 objet placé sur le banc optique
- 1 écran blanc

VÉRIFICATION DE LA FORMULE DE CONJUGAISON

1. Placer l'objet sur le banc optique à la graduation 0.
2. Placer la lentille à la graduation 20cm. On notera p cette distance objet-lentille.
3. Placer l'écran sur le banc et déplacer-le afin d'avoir une image nette de l'objet.
4. Noter alors la distance lentille-écran p' , dans le tableau ci-dessous.
5. Répéter les instructions ci-dessus pour les différentes valeurs de p données et compléter au fur et à mesure le tableau
6. Conclure sur la validité de la formule de conjugaison.

$p(\text{cm})$	$p'(\text{cm})$	$\frac{1}{p}$	$\frac{1}{p'}$	$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$	$\frac{1}{f}$
20					
30					
40					
50					

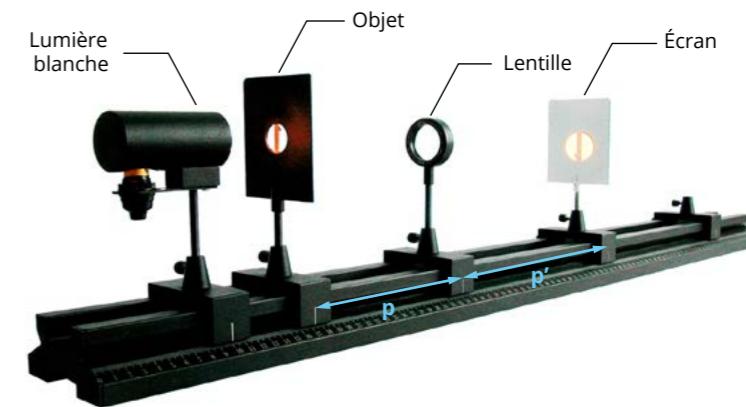


FIGURE 8.17: Montage sur banc optique.

VÉRIFICATION DE LA FORMULE D'AGRANISSEMENT

1. Mesurer la hauteur de l'objet. On la notera h .
2. Placer l'objet sur le banc optique à la graduation 0.
3. Placer la lentille à la graduation 20cm. On notera p cette distance objet-lentille.
4. Placer l'écran sur le banc et déplacer-le afin d'avoir une image nette de l'objet.
5. Noter alors la distance lentille-écran p' , dans le tableau ci-dessous.
6. Mesurer la hauteur de l'image. On la notera h' .
7. Répéter les instructions ci-dessus pour les différentes valeurs de p données et compléter au fur et à mesure le tableau
8. Conclure sur la validité de la formule de l'agrandissement.

$p(\text{cm})$	$p'(\text{cm})$	$h(\text{cm})$	$h'(\text{cm})$	$\frac{p'}{p}$	$\frac{h'}{h}$
20					
30					
40					
50					

RÉGLAGES D'UN APPAREIL PHOTO

Le gratuiciel [Photography Mapped](#) permet de visualiser les conséquences des réglages d'un appareil photographique.

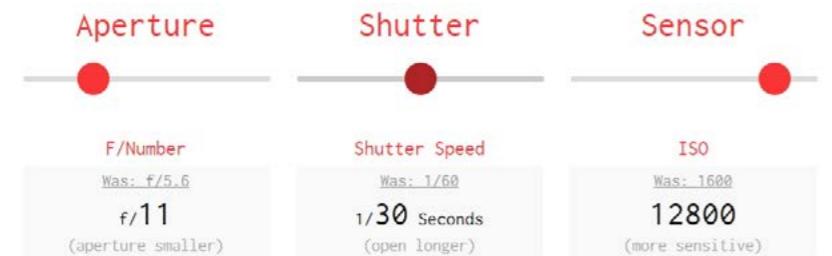
PRÉ-RÉGLAGES ET INDICATEURS

- Le curseur *Light* permet de définir la luminosité de la scène. En dessous du curseur est indiqué le moment de la journée associé à la luminosité choisie.
- Le curseur *Exposure* indique l'exposition de la scène. Une valeur de zéro indique une bonne exposition. Une valeur positive indiquera une surexposition, une valeur négative une sous-exposition.
- Les cases *Depth Of Field*, *Motion Blur* et *Noise* indiquent, respectivement, l'importance de la profondeur de champ, du flou de mouvement et du bruit pour les réglages effectués.



RÉGLAGES

- Les curseurs *Aperture*, *Shutter* et *Sensor* contrôlent respectivement le nombre d'ouverture, le temps de pose et la sensibilité ISO de l'appareil photographique.



ÉTUDE

- Dans le cas d'une ville éclairée de nuit, fixer les réglages afin d'obtenir un arrière-plan le plus net possible tout en ayant une image la moins bruitée possible.
- Vérifier votre résultat en cliquant sur 3. TAKE PHOTO.
- Répéter l'opération pour une scène dont l'éclairage est au maximum, avec une image pour laquelle on souhaite avoir le moins de bruit possible et une absence de flou de mouvement.

REMARQUE

Le gratuiciel [Exposure Simulator](#) est similaire à *Photography Mapped* et permet d'observer en temps réel l'influence des trois réglages sur la photographie finale.

04. EXERCICES

VERRES

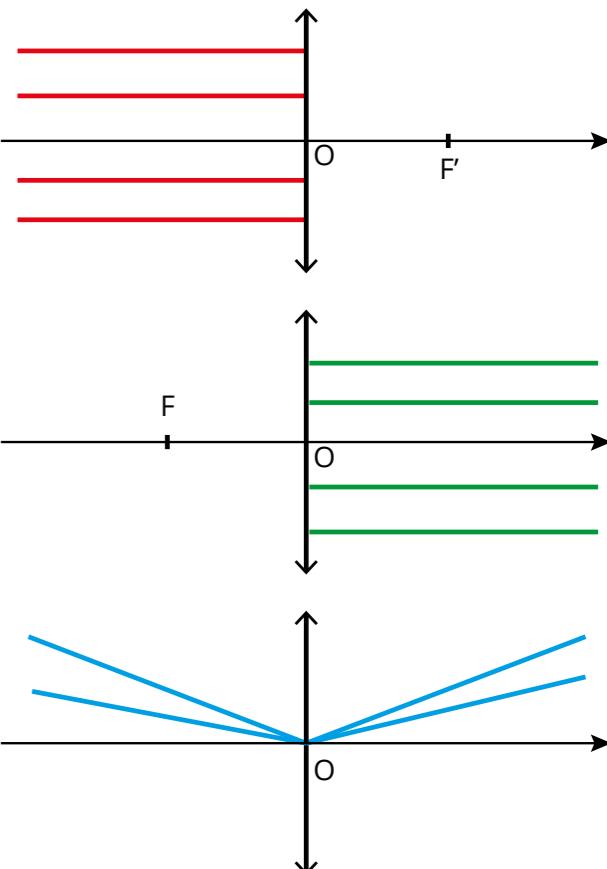
01

Rappels de cours :

- Sur un schéma, représenter une lentille convergente, son axe optique et son centre optique.
- Sur un schéma, représenter le trajet de rayons qui passent par le centre optique d'une lentille convergente.
- Définir le foyer image d'une lentille convergente.
- Définir le foyer objet d'une lentille convergente.
- Qu'est-ce que la distance focale ?
- Définir la vergence d'une lentille.

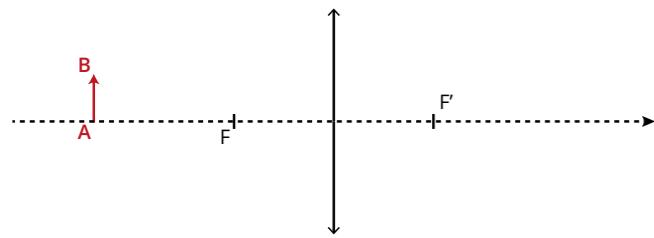
02

Compléter les figures ci-dessous :



03

Construire l'image de l'objet AB représenté sur le schéma ci-dessous :



04

L'image d'un objet situé à 40cm du centre optique d'une lentille convergente se forme à 20cm de celui-ci.

1. À l'aide d'un graphique, ou par le calcul, déterminer la distance focale de la lentille.
2. En déduire sa vergence.
3. Quel sera l'agrandissement ?

05

Un objet est situé à 1m d'une lentille convergente de distance focale 50cm.

1. Représenter la situation à l'aide d'un schéma (la hauteur de l'objet sera choisie arbitrairement).
2. À l'aide du graphique précédent, déterminer la distance séparant la lentille de l'image de cet objet ?
3. À l'aide du graphique, déterminer l'agrandissement γ .
4. Vérifier par le calcul les résultats des questions 2 et 3.

06

Un projecteur pour smartphone est constitué d'une lentille convergente de distance focale $f' = 100\text{mm}$. Le smartphone est installé à une distance de la lentille de 15cm. On étudie l'image de l'écran du smartphone qui a une hauteur de 6cm.



1. Réaliser un schéma du dispositif.
2. Déterminer la position et la taille de l'image du smartphone au travers de la lentille.
3. En déduire l'agrandissement. Interpréter.
4. L'image projetée sur un écran situé à une distance de 25cm du projecteur est floue.
 - (a) Expliquer cette observation.
 - (b) À quelle distance de l'écran doit-être placé le projecteur ?

07

Vincent Leroy est un artiste français qui explore dans plusieurs de ses œuvres les interactions optiques. *Slow Lens* est une installation à grande échelle dans laquelle un réseau de lentilles convergentes suspendue se meuvent dans l'espace déformant ainsi la perspective du spectateur.

En considérant que les rayons qui traversent ces lentilles proviennent de l'infini, lequel des schémas suivants illustre le mieux l'installation ?

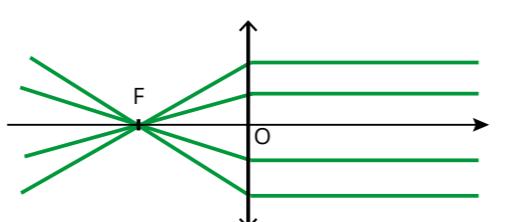
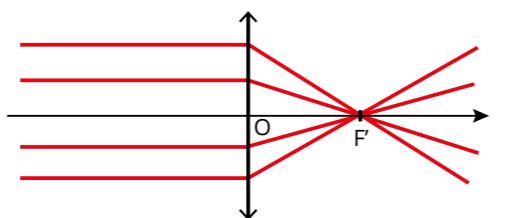
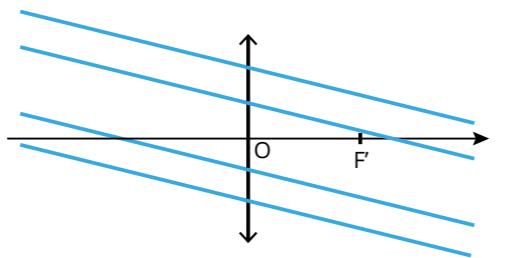


FIGURE 8.18: *Slow Lens*, Vincent Leroy, 2019.

L'APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE

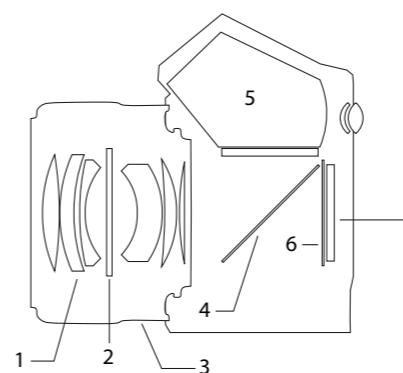
08

Rappels de cours :

1. Quel est le rôle du diaphragme dans un appareil photo ?
2. Quel élément d'un appareil photo contrôle le temps d'exposition ?
3. Définir l'exposition. Qu'est-ce qu'une image surexposée ? Sous-exposée ?
4. Citer trois réglages permettant de modifier l'aspect d'une photo.
5. Quelles sont les différences entre un grand angle et un téléobjectif ?

09

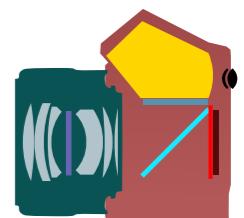
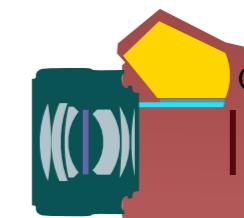
Compléter le schéma ci-dessous :



10

Ci-dessous sont représentés deux schémas d'un reflex numérique avant et pendant l'acquisition d'une photo.

1. Quel schéma est associé au moment de l'acquisition ?
2. Associer à chaque numéro un élément de l'appareil photo.
3. Quels sont les éléments de l'appareil qui se meuvent pour acquérir une photo ?
4. Pour chacun des schémas, tracer le trajet des rayons lumineux.



- (1)
- (2)
- (3)
- (4)
- (5)
- (6)
- (7)
- (8)

11

Associer chaque partie de l'œil humain donnée ci-dessous à son équivalent pour un appareil photographique reflex :

- | | | |
|------------|---|--------------|
| Rétine | • | • Diaphragme |
| Cornée | • | • Capteur |
| Cristallin | • | • Lentille |
| Iris | • | • Obturateur |

12

Le photographe russe Daniel Kordan est un maître de la photographie du cosmos. Le cliché ci-dessous est tiré d'un voyage en Namibie où il a cartographié des sentiers tourbillonnants d'étoiles au-dessus du Deadvlei, un plateau d'argile blanche situé dans le désert du Namibie.



1. La photo étant prise de nuit, indiquer si les réglages suivant doivent être bas ou élevés :

- l'ISO,
- le nombre d'ouverture,
- la vitesse d'obturation.

2. Expliquer les longues traînées observées sur le cliché présenté.

13

Ci-dessous est la première photo tirée d'une séance pour un magazine de mode. De l'avis du photographe, le modèle ne ressort pas assez de l'arrière-plan. Il souhaite donc rendre ce dernier flou.



1. Dans quel sens doit-on faire varier le nombre d'ouverture pour que l'arrière plan devienne flou ?
2. Qu'adviendra-t-il alors de l'exposition de la photo ?
3. Comment faudra-t-il modifier la vitesse d'obturation de l'appareil pour palier à cet effet ?

14

Les deux photos ci-dessous ont été prises avec un même appareil équipé de deux objectifs différents.



1. Définir ce qu'est un objectif grand angle et un téléobjectif.
2. Quelles sont les principales différences physiques entre ces deux objectifs ?
3. Quelles sont les principales différences esthétiques entre ces deux objectifs ?
4. Identifier la photo prise par un grand angle et celle prise par un téléobjectif.

15

Les caractéristiques de deux appareils photos sont données dans le tableau ci-dessous.

	Appareil A	Appareil B
Type de capteur	APS-C	M4/3
Taille du capteur	23,5 x 15,6	17,3 x 13
Focale réelle (équivalence 24x36)	16/50mm 24/75mm	25/75mm 50/150mm
Zoom numérique	x4	x2
Poids (en g)	435	510

1. Qu'est-ce qu'un objectif grand angle ? Qu'est-ce qu'un téléobjectif ?
2. Parmi les deux appareils présentés, lequel est le plus adapté pour prendre des photos de loin ?
3. Doit-on diminuer ou augmenter le nombre d'ouverture afin d'obtenir un arrière-plan flou ?
4. Quel sera alors l'effet sur l'exposition de la photo ?
5. Comment compenser cet effet à sensibilité fixe ?

16

Une photo a été prise avec les réglages suivants : N = 4 et T = 1/30. Une photo similaire est ensuite prise avec un nombre d'ouverture égal à 8.

1. Quelle va être l'influence de cette modification sur la profondeur de champ et l'exposition ?
2. Afin d'obtenir une exposition similaire à la photo initiale, quelle doit être la nouvelle valeur du temps de pose à sensibilité ISO fixe ?
3. Si le photographe compte modifier la sensibilité ISO, dans quel sens devra-t-il le faire ?

Données : Nombres d'ouverture et temps d'exposition

N	2	2,8	4	5,6	8	11	16	22
T	1	1/2	1/4	1/8	1/15	1/30	1/60	1/125

17

La photo ci-dessous a été prise avec les réglages suivants : N = 8 et T = 1/125.



Les valeurs possibles pour le réglage de l'appareil sont données dans le tableau ci-dessous.

N	4	5,6	8	11	16	22	32
T	1/4	1/8	1/15	1/30	1/60	1/125	1/250

1. Faut-il augmenter ou diminuer la distance focale pour augmenter l'angle de champ ?
2. Le photographe décide d'augmenter le nombre d'ouverture N à 11.
 - Quel sera l'effet sur la profondeur de champ ?
 - Quelle devra être la nouvelle valeur du temps de pose, à sensibilité égale, afin d'obtenir un cliché présentant la même exposition que la photographie initiale ?

18

L'œil humain et l'appareil photographique

1. Citer les principaux éléments d'un appareil photographique « reflex ».
2. Associer les principaux éléments de l'œil humain à ceux de l'appareil photographique.
3. On considère un objet de distance focale $f' = 25\text{mm}$ et un objet de 50mm de hauteur placé à 1m de cette lentille.
 - À quelle famille appartient l'objectif présenté ?
 - Réaliser un schéma et placer l'image de l'objet.
 - À quelle distance de la lentille se formera l'image de l'objet.
 - Le capteur de l'appareil est situé à 27mm de la lentille. L'image de l'objet sera-t-elle nette ? Justifier ?
 - On remplace l'appareil par une vision à l'œil nu de l'objet. La distance focale f' de l'œil étant de 17mm et la distance du cristallin à la rétine étant 23mm que peut-on dire de l'image de l'objet perçue par l'œil humain ? Illustrer votre propos à l'aide d'un schéma.

19

Le cliché ci-dessous a été capturé par un photographe amateur.



1. Définir l'exposition de cette image.
2. Comment le temps de pose doit-il être modifié pour corriger cette exposition ?
3. Sur quel autre paramètre peut-on jouer pour corriger l'exposition de cette image ? Quelle serait la conséquence d'une telle modification.

LA RESTAURATION

Objectifs du chapitre : Décrire l'analyse d'une œuvre d'art sous lumière visible rasante / Décrire l'analyse d'une œuvre d'art par fluorescence sous ultra-violets / Décrire l'analyse d'une œuvre d'art par réflectographie infrarouge / Décrire l'analyse d'une œuvre d'art par radiographie / Expliquer la méthode d'analyse PIXE / Expliquer la méthode d'analyse PIGE / Citer les différents moyens de datation d'une œuvre.

09



Figurine en terre cuite
VIIIe - Ve siècle avt. J.-C.

ACTIVITÉ

PIXE (PROTON INDUCED X-RAY EMISSION)

Doc 1

Inauguré en novembre 2017, le nouvel accélérateur Grand Louvre d'analyse élémentaire (AGLAÉ) est un appareil d'analyse destiné à l'étude des œuvres d'art et d'archéologie.

Long de 26 mètres et pesant 10 tonnes, il est construit sous le musée du Louvre dans une enceinte protégée. Le faisceau, issu de l'accélérateur de particules, excite les atomes de la cible et des détecteurs analysent les émissions secondaires (rayons X, rayons gamma, lumière). Ces émissions permettent d'identifier, même à l'état de traces, tous les éléments chimiques présents dans les couches superficielles de l'objet. Leur nature, leur concentration et leur localisation dévoilent l'histoire de l'objet et permettent de l'authentifier.

Différentes méthodes d'acquisitions existent en fonction de la nature de la particule émise : PIXE, RBS, NRA.



FIGURE 9.1: L'accélérateur d'ions AGLAE au C2RMF (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France).

Doc 2

PIXE est utilisée pour déterminer la composition « élémentaire » (au sens d'élément chimique) d'un échantillon. Un faisceau d'ions est émis en direction du matériau et va interagir avec celui-ci. Un rayonnement électromagnétique va alors être émis dont la longueur d'onde, dans le domaine des rayons X, dépendra de l'élément chimique de l'atome ayant interagi avec le faisceau d'ions. Ce rayonnement est capté par deux détecteurs afin de détecter simultanément les éléments majeurs et ceux

présents à l'état de trace. Un des avantages majeurs de cette méthode est qu'elle est non-destructive, contrairement aux techniques chimiques ou consistant à extraire des échantillons micrométriques.

Doc 3

La statuette ci-dessous, découverte à Chypre et datée entre le VIII^e et V^e siècle avant J.C., est une figurine en terre cuite représentant un homme sur un cheval à deux têtes.

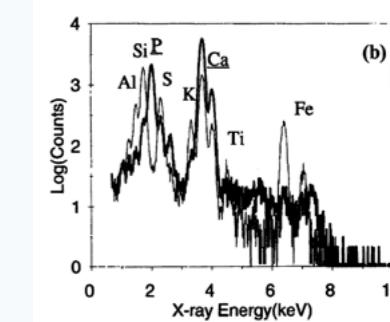
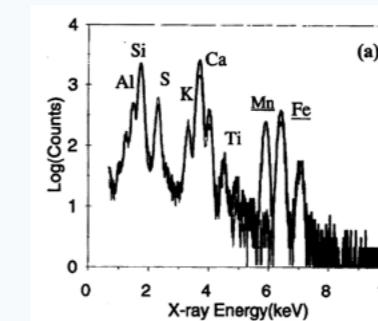
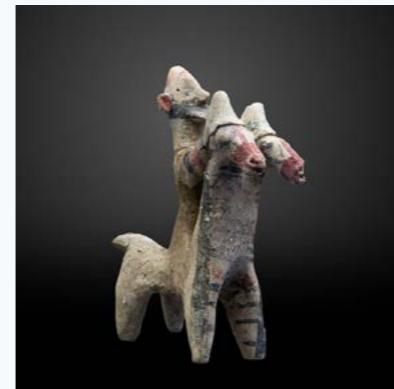
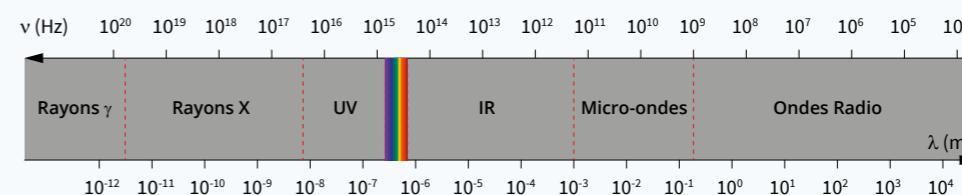


FIGURE 9.2: De gauche à droite : Figurine en terre cuite datant du VIII^e-V^e avt. J.-C.; spectre obtenu par analyse PIXE du pigment noir de la figurine (superposé au spectre de la terre cuite non colorée); spectre obtenu par analyse PIXE du pigment blanc de la figurine (superposé au spectre de la terre cuite non colorée). Symboles des éléments présents dans le spectre : Aluminium (Al), Calcium (Ca), Fer (Fe), Potassium (K), Manganèse (Mn), Phosphore (P), Souffre (S), Silicium (Si), Titane (Ti).

Le 1er spectre issu de cette analyse a révélé l'utilisation de matériaux riches en oxyde de manganèse pour le pigment noir (terre d'ombre présente en abondance à Chypre), à une époque où cette technique avait été abandonnée en Grèce, remplacée par une technique reposant sur la réduction du fer. Le second spectre montre la présence de calcium et de phosphore lors de l'analyse du pigment blanc, issu probablement d'une pulvérisation d'os.

Doc 4

Les différentes catégories d'ondes électromagnétiques :



À partir des documents précédents, répondre aux questions suivantes :

1. Définir ce qu'est une méthode d'analyse non-destructive.
2. Sur quel principe repose l'analyse PIXE ? Représenter celui-ci à l'aide d'un schéma.
3. Comment obtient-on les spectres représentés au document 3 ? Réaliser un schéma illustrant l'acquisition d'un spectre.
4. À quel intervalle appartient les longueurs d'ondes émises lors de l'analyse PIXE ?
5. Expliquer le pic observé sur le spectre de la figurine en terre cuite pour le silicium.

ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES : OBSERVATION ET ANALYSE DES ŒUVRES D'ART

OBSERVER UNE ŒVRE D'ART GRÂCE AUX ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

- ▶ L'analyse d'une œuvre d'art à l'aide d'ondes électromagnétiques est une méthode dite **non-destructive**, c'est-à-dire qui préserve l'œuvre. Le prélèvement d'échantillons, par opposition, est une méthode destructive.
- ▶ Les informations obtenues dépendent de la longueur d'onde de l'onde électromagnétique utilisée. Certaines donneront des informations sur les couches profondes de l'œuvre, d'autres sur les couches superficielles.
- **La lumière visible** : dans un premier temps, un tableau est analysé sous lumière visible **rasante**. On peut ainsi détecter les craquelures et les **aspérités** de la surface.



FIGURE 9.3: La Vierge et l'Enfant de Joos van Cleve, vers 1525. De gauche à droite : œuvre originale et macrophotographie réalisée sous lumière visible rasante, permettant de détecter les craquelures à la surface.

- **Les ultraviolets** : les UV pénètrent faiblement et s'arrêtent à la couche picturale. La couche de vernis devient fluorescente lors de l'observation par ultraviolets, permettant ainsi d'analyser l'homogénéité de celle-ci et de déceler d'éventuelles retouches. On nomme habituellement cette technique **analyse par fluorescence sous UV**.
- **Les infrarouges** : la **rélectographie infrarouge** permet de révéler le dessin initiale de l'artiste, le rayonnement infrarouge étant absorbé par la couche de carbone ou renvoyé par la colle.

- **Les rayons X** : ils ont le pouvoir de pénétration le plus important et traversent toutes les couches du tableau. Seuls les éléments lourds, comme le plomb, peuvent absorber ces rayons. On place ainsi à l'arrière du tableau éclairé par des rayons X une plaque photosensible dont les parties atteintes par ces rayons s'assombrissent. Cette technique, appelée communément **radiographie**, permet d'observer la constitution et les caractéristiques du support, l'état de la couche picturale, les réutilisations de toile, la technique du peintre, etc.



FIGURE 9.4: Portrait d'une noble est une peinture flamande du XIX^e siècle. De gauche à droite : Peinture originale; rélectographie infrarouge révélant l'existence d'un dessin initial différent de l'œuvre finale; radiographie permettant d'observer la constitution du support et l'état de la couche picturale.

ANALYSER UNE ŒVRE D'ART GRÂCE À L'INTERACTION ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE-MATIÈRE

- ▶ Il est possible également de connaître la composition d'une œuvre d'art en l'exposant à un faisceau d'ions. L'interaction qui en résulte produit un spectre électromagnétique qui révèle les éléments chimiques présents dans cette œuvre.
- ▶ On distingue la méthode **PIXE (Particle Induced X-Ray Emission)** et la méthode **PIGE (Particle Induced Gamma-Ray Emission)** lorsque les rayons utilisés sont respectivement des rayons X et gamma.
- ▶ Le spectre obtenu permet d'identifier les matériaux constitutifs de l'objet. Par exemple, pour un tableau, on peut ainsi connaître la composition du support, des couches de pigments, de vernis, de repeints, des liants, etc.



FIGURE 9.5: Céphale et Procris réalisée vers 1680 par Godfried Schalcken.

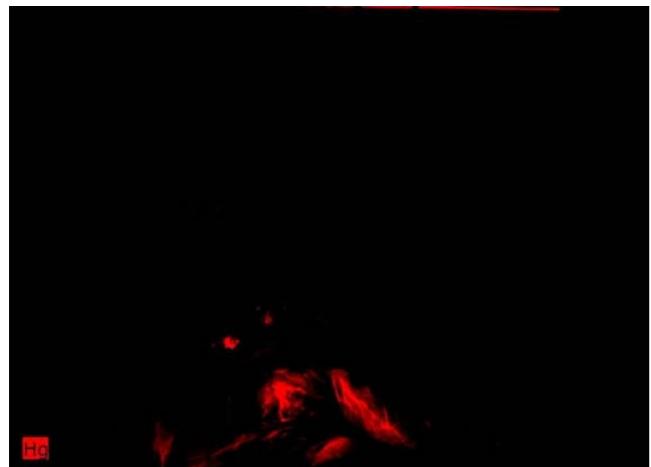


FIGURE 9.6: Analyse PIXE de la toile **Céphale et Procris**. Dans le sens des aiguilles d'une montre, en partant de la gauche : présence de calcium associé au travail sur le feuillage, suggérant que de la craie a été utilisée comme charge pour le pigment organique jaune; présence de cobalt lié au pigment bleu smalt qui n'a été utilisé que dans la petite partie de ciel visible en haut du tableau; la carte de répartition du fer montre : qu'un pigment de terre rouge à base de fer, plus modéré que le vermillon, a été utilisé pour la pointe de la lance ensanglantée et dans les ombres de la robe rouge, et des pigments de terre bruns et jaunes contenant du fer ont également largement utilisé pour le fond boisé; la carte de distribution du mercure révèle que Schalcken a utilisé du vermillon, un pigment contenant du mercure, dans les passages de la robe rouge de Procris et le sang dans sa plaie, ainsi que dans les reflets du tissu brun enroulé autour de Procris.

DATATION D'UNE ŒUVRE D'ART

- ▶ On peut dater une céramique à l'aide de la **luminescence**. Pour cela on chauffe un échantillon qui va alors émettre un rayonnement qui sera proportionnel au nombre d'années passées depuis sa fabrication.
- ▶ La datation au carbone 14 est une autre technique utiliser pour estimer l'année de réalisation d'une œuvre. Le carbone 14 est un isotope du carbone présent dans tout organisme vivant à quantité constante durant sa vie. Lorsque cette organisme meurt, la quantité de carbone détectable diminue de manière exponentielle à un rythme constant (division par deux de la quantité de carbone 14 en 5734 ans), quelque soit l'organisme vivant. Ainsi le calcul du rapport entre la quantité de carbone et de son isotope 14 permet de dater une œuvre d'art.
- ▶ Enfin la **dendrochronologie** consiste à mesurer la largeur des cernes de bois, par exemple sur le châssis d'une toile, afin de dater à l'année près celui-ci.

03. EXERCICES

OBSERVER UNE ŒUVRE

01

Rappels de cours :

1. Citer les avantages des méthodes d'analyse d'œuvre utilisant les ondes électromagnétiques?
2. Quelles sont les différents domaines d'ondes électromagnétiques utilisées pour observer une œuvre?

02

Classer les ondes électromagnétiques suivantes en fonction de leur pouvoir de pénétration pour l'étude d'une œuvre :

- rayons ultraviolets
- rayons X
- lumière visible
- rayons infrarouges

03

Les Noces de Cana est une peinture à l'huile sur panneau de bois réalisée par Juan de Flandes en 1500. À côté de l'œuvre originale est représentée la réflectographie infrarouge de celle-ci.



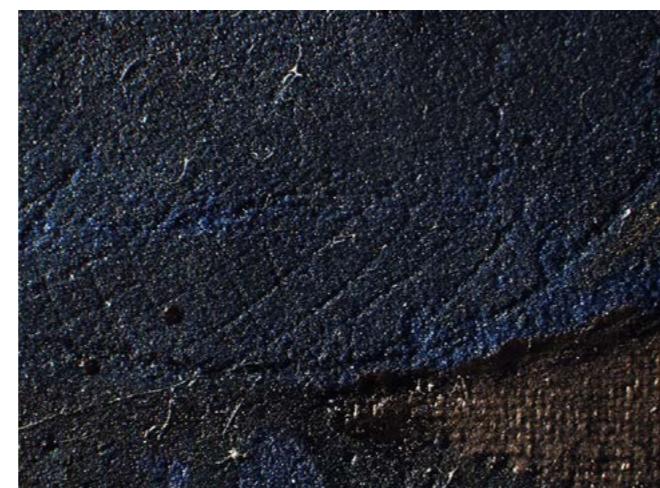


1. Quel élément de l'œuvre absorbe le rayonnement infrarouge ?
2. Quelle partie de la toile réfléchit ce rayonnement ?
3. Quelles sont les parties de l'œuvre révélées par le rayonnement infrarouge ?
4. Repérez les modifications apportées par l'artiste entre son dessin initial et l'œuvre finale.

04

La Vierge allaitant l'Enfant représentée ci-dessous est une tempera sur lin d'origine flamande. Elle est accompagnée de deux macrophotographies de la robe et de l'arrière-plan réalisées sous une lumière rasante.

1. Réaliser un schéma décrivant le protocole d'observation.
2. Quelle est l'intervalle de longueurs d'ondes des ondes électromagnétiques utilisées ?
3. Quelle couche de l'œuvre peut ainsi être analysée ?
4. Quelles informations obtient-on avec ce type d'observation ?



05

La **Vierge et l'Enfant avec des anges**, représentée ci-dessous, accompagnée d'une analyse par fluorescence sous ultraviolets du drapé de la Vierge, est une tempera sur panneau de 1410 peinte par Gentile da Fabriano.

1. Quelle couche de l'œuvre réfléchit les rayons ultraviolets ?
2. Que permet de révéler l'analyse par fluorescence sous ultraviolets ?
3. Repérer les modifications apportées par l'artiste sur le drapé de la Vierge.



06

Benedikt von Hertenstein est un portrait de Hans Holbein le Jeune réalisé en 1517 (huile et tempera sur papier marouflé sur bois). Ci-dessous sont représentées l'œuvre originale ainsi que sa radiographie.

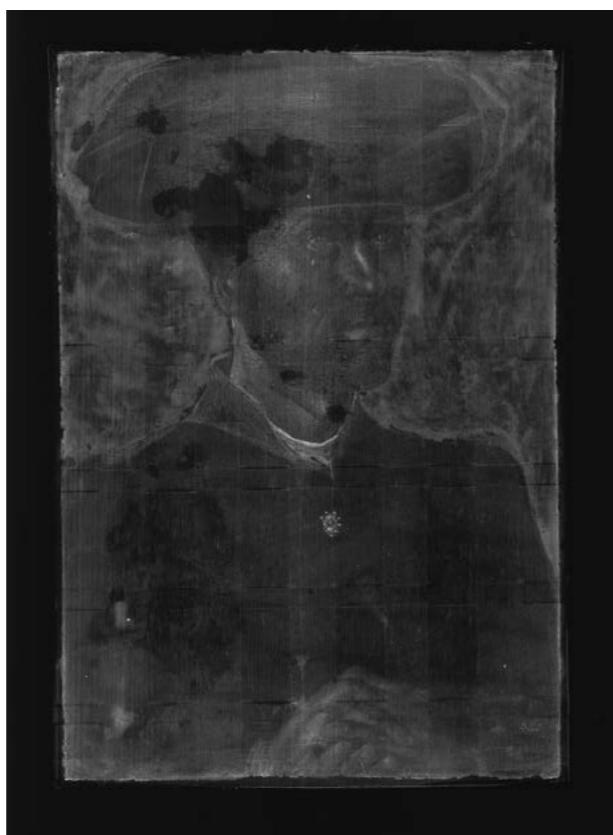


- Quels éléments de l'œuvre absorbent les rayons X?
- Expliquer le fonctionnement d'une radiographie.
- Que révèle l'examen aux rayons X?
- Que nous apprend l'examen aux rayons X de l'œuvre de Hans Holbein le Jeune.

07

L'homme au chaperon rouge est une peinture à l'huile sur panneau de bois flamande datant de 1440/1450, dont l'auteur est inconnu. Ci-dessous sont données l'œuvre originale, ainsi que la réflectographie infrarouge de celle-ci et son examen aux rayons X.

- Quelle image permet de comparer le dessin initial et l'œuvre finale?
- Quelles modifications ont été apportées par l'artiste dans l'œuvre finale par rapport au dessin initial?
- Quelle image permet d'observer la constitution du support et la technique du peintre?
- Que révèle l'examen aux rayons X?



08

Le **Portrait d'un jeune homme** de Bronzino, une huile sur toile réalisée vers 1530, est accompagné ci-dessous d'une radiographie et d'une réflecto-

graphie infrarouge ainsi que de photos de l'arrière du panneau.

- Identifier la radiographie et la réflectographie infrarouge.
- Représenter sur un schéma les différentes couches de l'œuvre ainsi que la profondeur de pénétration des rayons X et des rayons IR.
- À l'aide de la photo de l'arrière du panneau, expliquer les traces blanches observées sur l'une de ces images.
- Quelle photo permet de repérer les changements effectués par l'artiste entre le dessin original et l'œuvre peinte?
- Repérer quelques-uns de ces changements.



ANALYSER UNE ŒUVRE

09

Rappels de cours :

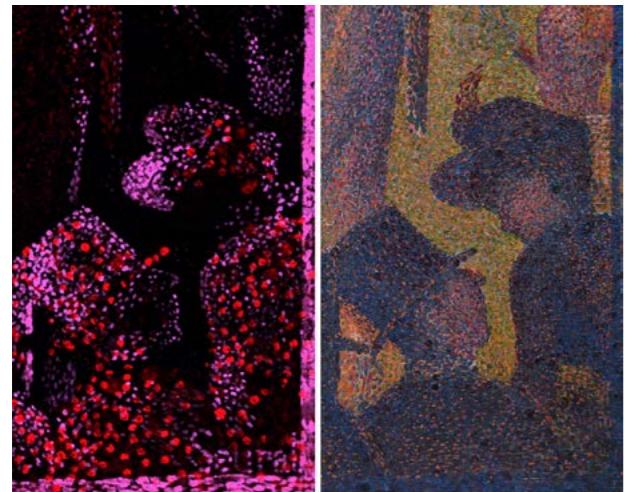
- Sur quel principe repose les méthodes PIXE et PIGE?

2. Quelle est la différence entre ces deux méthodes?
3. Comment peut-on obtenir la composition d'un pigment utilisé dans une œuvre?
4. Citer trois méthodes de datation d'une œuvre.

10

La **Parade de cirque** est une toile de Georges Seurat réalisée entre 1887 et 1888. L'analyse de cette œuvre par la méthode PIXE a permis d'établir une carte des éléments présents sur celle-ci. Un extrait de cette analyse est présentée ci-dessous. Les points roses dénotent la présence de nickel, les points rouges la présence de cobalt.

1. À l'aide d'un schéma, expliquer le principe de la méthode PIXE.
2. Expliquer comment le spectre obtenu via la méthode PIXE permet d'obtenir la carte représentée ci-dessus.



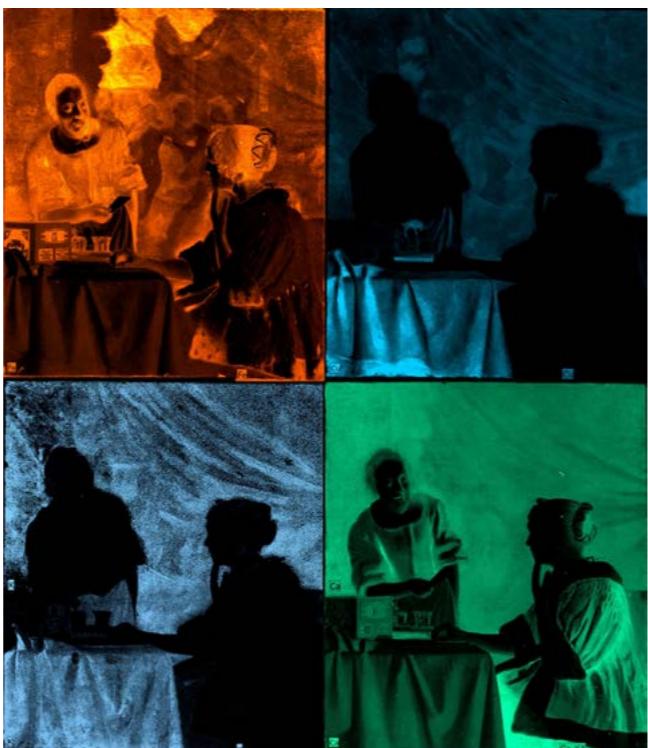
11

La **maîtresse et la servante** est un tableau de Johannes Vermeer peint vers 1666-1667. Une carte des différents éléments présents dans la toile, obtenue grâce à la méthode PIXE, a été représentée ci-dessous (dans le sens des aiguilles d'une montre, en partant de la gauche, sont représentés, le fer, le cuivre, le calcium et le potassium).

1. Cette analyse révèle la composition initiale de l'arrière-plan.

 - (a) Quels sont les changements qui furent apportés par l'artiste?

- (b) Quel(s) élément(s) permet de visualiser ces changements?
2. Rappeler les parties d'un tableau que révèle la reflectographie infrarouge.
3. La reflectographie infrarouge aurait-elle permis d'observer les modifications apportées par le peintre?



Crédit photographique

Couverture : © hilbrt / p.7 et 8 © Fornes / p.9 (CC) MrJayW / p.10 (CC) Congerdesign / p.11 (CC) Bru-nO / p.11 (CC) roon / p.12 (CC) F. Kesselring, FKuR Willich / p.12 (CC) Elke Wetzig / p.13 (CC) Стрелец Игорь / p.16 (CC) BriBra / p.17 © Evabloem / p.17 © Petr Stolin / p.17 © Studio Chris Fox / p.18 © Joel Escalona / p.19 © CutteCircuit / p.21 et 22 © Qiyun Deng / p.23 (CC) Ben_Kerckx / p.25 (CC) Benjah-bmm27 / p.28 (CC) Minihaa / p.30 (CC) Стрелец Игорь / p.30 (CC) birev / p.42 (CC) Devanath / p.44 (CC) Tom Page / p.45 © Brian McCutcheon / p.47 © Hicham Berrada / p.51 (CC) Jonathan Zander / p.55 (CC) Torsten Henning / p.56 (CC) Leiem / p.60 (CC) Sailko / p.61 © John Bisbee / p.62 (CC) Zirroti / p.63 © Hicham Berrada / p.65, 66 et 67 © David Patchen / p.69 (CC) sabinevanerp / p.69 © David Patchen / p.69 (CC) Gerardus / p.69 (CC) Studio Michael Behrens / p.70 (CC) marcelkessler / p.70 (CC) anncapictures / p.70 (CC) congerdesign / p.70 (CC) Daderot / p.71 (CC) elliottwolf / p.71 (CC) Astrowikizhang / p.71 (CC) Krb19 / p.73 (CC) Adrian Pingstone / p.73 © Pantone / p.74 (CC) FelixReimann / p.74 (CC) D-Vu / p.74 (CC) Tomascastelazo / p.74 (CC) analogicus / p.74 (CC) Daderot / p.75 © Bordeled / p.75 (CC) Olivier2000 / p.77 et 80 © Whitney / p.78 © Studio Waldemeyer / p.82 (CC) Sergiu Bacioiu / p.86 © UNDERWOOD / p.87 (CC) Saperaud / p.88 (CC) LPS.1 / p.88 (CC) workflow / p.89 (CC) 彭嘉傑 / p.90 (CC) BigRiz / p.90 (CC) Flappiefh / p.91 (CC) Thomas Wydra / p.94 © Ibini / p.94 © Iris van herpen / p.96 © Nizam / p.98 © Pneuhaus / p.99 © Bruce Munro / p.99 © KateJoyce / p.101 et 102 (CC) AlexanderMigl / p.104 (CC) Dmitry Makeev / p.104 (CC) Loz Flowers / p.105 (CC) Wade Tregaskis / p.106 (CC) Maxim Razin / p.112 © Ateliercruzdiez / p.112 (CC) Solomon R. / p.112 (CC) Madison60 / p.113 (CC) Surrey NanoSystems / p.113 (CC) Pink Cow Photography / p.114 (CC) Driken / p.114 (CC) Vampshow / p.114 (CC) Cathrotterdam / p.119 (CC) Marco Almbauer / p.121 (CC) gokalpiscan / p.121 (CC) Mattman723 / p.122 (CC) Jaredzimmerman / p.124 (CC) Robin Taylor / p.128 (CC) Rasbak / p.128 (CC) Jibi44 / p.128 (CC) Kardinal9 / p.128 (CC) LoggaWiggler / p.131 et 132 © Solberg / p.134 et 138 (CC) Jean François WITZ / p.138 (CC) Allophos / p.139 (CC) Cburnett / p.139 (CC) Talos / p.140 (CC) Dyunin / p.141 (CC) ApolloWissen / p.141 (CC) Markus Mayer / p.147 © Vincent Leroy / p.147 © Kordan / p.148 (CC) Selena13 / p.148 (CC) Florian Schott / p.149 (CC) mochilazocultural / p.149 (CC) Kamal Osama Elgazzar / p.151 et 153 (CC) Arma / p.152 (CC) Jean-Pierre Dalbéra / p.153 ©z Karaegorghis et al.

Les autres photographies et illustrations ne figurant pas dans le domaine public sont propriétés de hilbrt.

© hilbrt 2021, 115 Boulevard de Cessole, 06100 Nice

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.
« Le Code de la propriété intellectuelle et artistique n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L.122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1er de l'article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. »

