

école —  
normale —  
supérieure —  
paris-saclay —

université  
PARIS-SACLAY

PRÉPARATION À L'AGRÉGATION DE SCIENCES  
PHYSIQUES OPTION CHIMIE

SESSION 2020

---

**Plans de leçons de physique**

---

DAMIEN TOCQUEVILLE  
École normale supérieure Paris-Saclay

# Table des matières

<b>Avant-Propos</b>	<b>11</b>
<b>Ressources fréquemment utilisées</b>	<b>12</b>
<b>Commentaires sur l'épreuve de la leçon de physique</b>	<b>14</b>
<b>◇LP1 - Spectres</b>	<b>15</b>
<b>I Analyse spectrale d'un son</b>	<b>16</b>
I.1 Onde sonore et spectre de FOURIER . . . . .	16
I.2 Fondamental et harmoniques . . . . .	17
<b>II Analyse de spectres lumineux</b>	<b>18</b>
II.1 Décomposition de la lumière . . . . .	18
II.2 Spectres d'émission et spectres d'absorption . . . . .	18
II.3 *Couleurs des corps chauffés, loi de Wien . . . . .	19
<b>LP2 - Ondes mécaniques</b>	<b>22</b>
<b>I Onde mécanique progressive</b>	<b>23</b>
I.1 Notion d'onde mécanique progressive . . . . .	23
I.2 Différents types d'ondes . . . . .	24
I.3 Notion d'onde progressive sinusoïdale . . . . .	26
<b>II Un exemple d'onde mécanique : les ondes sismiques</b>	<b>26</b>
II.1 Notion de célérité et de retard . . . . .	26
II.2 Détermination de l'épicentre . . . . .	26
II.3 Détermination de la vitesse du tsunami . . . . .	29
<b>III Un exemple d'onde mécanique : une onde sonore</b>	<b>29</b>
III.1 Célérité du son dans l'air . . . . .	29
III.2 Notion d'intensité et de niveau sonore . . . . .	29
III.3 Niveau des haut-parleurs . . . . .	31
<b>LP4 - Aspects ondulatoires en optique</b>	<b>36</b>
<b>I Phénomène de diffraction</b>	<b>37</b>
I.1 Mise en évidence du phénomène . . . . .	37
I.2 Diffraction d'une onde lumineuse monochromatique . . . . .	38
I.3 Application du phénomène de diffraction . . . . .	39
<b>II Phénomène d'interférences à 2 ondes</b>	<b>39</b>
II.1 Montage des fentes d'YOUNG . . . . .	40
II.2 Conditions d'interférences . . . . .	40
II.3 *Interfrange d'une figure d'interférences . . . . .	42

<b>LP6 - Phénomènes de polarisation en optique (Lycée)</b>	<b>45</b>
<b>I Description du phénomène de polarisation</b>	<b>46</b>
I.1 Polarisation . . . . .	46
I.2 Cas de la lumière naturelle . . . . .	47
I.3 Polarisation rectiligne et polariseur . . . . .	48
<b>II Déviation du plan de polarisation</b>	<b>49</b>
II.1 Loi de BIOT . . . . .	49
II.2 Application à la détermination d'une concentration . . . . .	50
<b>◇LP7 - Énergie électrique</b>	<b>53</b>
<b>I Générer l'électricité</b>	<b>54</b>
I.1 Générateur et puissance fournie . . . . .	54
I.2 Différents moyens pour produire l'énergie électrique . . . . .	55
<b>II Transporter l'énergie électrique</b>	<b>56</b>
II.1 Les pertes dans les lignes haute tension . . . . .	56
II.2 Le transformateur . . . . .	57
<b>III Utilisation de l'énergie électrique</b>	<b>58</b>
III.1 Modélisation et schématisation d'un appareil électrique : la bouilloire . . . . .	58
III.2 Bilan d'énergie sur la bouilloire . . . . .	59
<b>LP 8 - Conservation de l'énergie (Lycée)</b>	<b>60</b>
<b>I Conservation de l'énergie mécanique</b>	<b>61</b>
I.1 Le travail d'une force . . . . .	62
I.2 Étude énergétique du pendule simple . . . . .	63
I.3 Variation de l'énergie mécanique . . . . .	65
<b>II Conservation de l'énergie interne</b>	<b>66</b>
II.1 Définition de l'énergie interne . . . . .	66
II.2 Système isolé . . . . .	67
II.3 Application à la calorimétrie . . . . .	67
<b>LP9 - Transmission de l'information</b>	<b>70</b>
<b>I Chaîne de transmission de l'information</b>	<b>71</b>
I.1 Information . . . . .	71
I.2 Éléments de la chaîne de transmission . . . . .	71
<b>II Procédés physiques de la transmission</b>	<b>72</b>
II.1 Propagation libre . . . . .	72
II.2 Propagation guidée par un câble coaxial . . . . .	73

<b>III Caractéristiques d'une transmission</b>	<b>75</b>
III.1 L'atténuation . . . . .	75
III.2 Débit binaire . . . . .	76
<b>◇LP10 - Images et couleurs</b>	<b>78</b>
<b>I Fonctionnement de l'œil</b>	<b>79</b>
I.1 Modèle de l'œil réduit . . . . .	79
I.2 Phénomène d'accommodation . . . . .	79
I.3 Défauts de l'œil . . . . .	80
<b>II Obtention des couleurs</b>	<b>80</b>
II.1 Synthèse additive . . . . .	80
II.2 Synthèse soustractive . . . . .	80
<b>III Interprétation de la couleur des objets</b>	<b>81</b>
III.1 Absorption, transmission, et diffusion . . . . .	81
III.2 La couleur d'un objet . . . . .	81
<b>LP11 - Instruments d'optique</b>	<b>83</b>
<b>I De la lentille convergente à la lunette astronomique</b>	<b>84</b>
I.1 Construction de l'image d'un objet situé à l'infini . . . . .	84
I.2 Construction de l'image d'un objet situé au foyer objet . . . . .	85
I.3 La lunette astronomique . . . . .	85
<b>II Utilisation de la lunette astronomique</b>	<b>86</b>
II.1 Notion d'angle d'observation . . . . .	86
II.2 Expression du grossissement . . . . .	87
II.3 Cercle oculaire . . . . .	87
II.4 Pouvoir séparateur . . . . .	88
<b>LP12 - Sources de lumière</b>	<b>91</b>
<b>I Sources de lumière froides</b>	<b>92</b>
I.1 Définition . . . . .	92
I.2 Exemple . . . . .	92
I.3 Spectres de raies . . . . .	92
<b>II Un nouveau modèle pour la lumière</b>	<b>94</b>
II.1 Modèle particulaire . . . . .	94
II.2 Interaction lumière-matière . . . . .	94
<b>III Analyse spectrale</b>	<b>96</b>
III.1 Analyse du spectre du mercure . . . . .	96
III.2 Analyse spectrale d'une étoile . . . . .	97

<b>LP13 - Gravitation et poids</b>	<b>99</b>
<b>I Décollage de la fusée</b>	<b>100</b>
I.1 Forces appliquées à la fusée . . . . .	100
I.2 Détermination de l'accélération de la pesanteur . . . . .	101
<b>II Mise en orbite</b>	<b>101</b>
II.1 Expression du travail et stratégie adoptée . . . . .	102
II.2 Calcul à l'aide du langage PYTHON . . . . .	102
<b>III Mouvement du satellite</b>	<b>103</b>
III.1 Le repère de FRENET . . . . .	103
III.2 Satellite en orbite . . . . .	104
III.3 *Lois de KEPLER . . . . .	104
<b>LP14 - Transferts thermique (secondaire)</b>	<b>107</b>
<b>I Les différents modes de transferts thermique</b>	<b>108</b>
I.1 La conduction . . . . .	108
I.2 La convection . . . . .	108
I.3 Le rayonnement . . . . .	109
<b>II Aspect énergétique</b>	<b>109</b>
II.1 Notion de flux thermique . . . . .	109
II.2 Résistance thermique de conduction . . . . .	110
II.3 Application à l'économie d'énergie . . . . .	111
<b>◇LP15 - Interaction lumière-matière</b>	<b>113</b>
<b>I Dualité onde-particule</b>	<b>114</b>
I.1 Le modèle ondulatoire de la lumière . . . . .	115
I.2 La modèle corpusculaire de la lumière . . . . .	116
<b>II Quantification de la matière</b>	<b>116</b>
II.1 La quantification des niveaux d'énergie de l'atome . . . . .	117
II.2 Absorption de photon . . . . .	118
II.3 Émission de photon . . . . .	118
<b>III Application à la spectroscopie moléculaire</b>	<b>118</b>
III.1 Loi de BEER-LAMBERT . . . . .	119
III.2 Détermination d'une concentration . . . . .	120
<b>LP16 - Mouvements, interactions et notion de champs</b>	<b>122</b>

<b>I</b>	<b>Notion de champs électrostatique uniforme</b>	<b>123</b>
I.1	Étude du condensateur plan . . . . .	123
I.2	Influence des grandeurs physiques . . . . .	124
<b>II</b>	<b>Mouvements d'une particule chargée dans un champs électrostatique</b>	<b>124</b>
II.1	Force et accélération . . . . .	125
II.2	Équations horaires et trajectoire . . . . .	125
II.3	*Accélérateur linéaire de particules . . . . .	127
<b>LP17</b>	<b>- Description d'un fluide au repos</b>	<b>128</b>
<b>I</b>	<b>Relation entre la pression et le volume</b>	<b>129</b>
I.1	Pression et force pressante . . . . .	129
I.2	Loi de MARIOTTE . . . . .	130
<b>II</b>	<b>Relation entre la pression et la profondeur</b>	<b>132</b>
II.1	Notion de fluide incompressible . . . . .	132
II.2	Relation fondamentale de la statique des fluides . . . . .	132
<b>LP18</b>	<b>- Effet Doppler (supérieur)</b>	<b>135</b>
<b>I</b>	<b>Principe et explication de l'effet Doppler</b>	<b>136</b>
I.1	Mise en évidence . . . . .	136
I.2	Relation générale entre fréquence émise et reçue . . . . .	137
<b>II</b>	<b>Effet Doppler et ses applications</b>	<b>139</b>
II.1	Élargissement spectral des raies . . . . .	139
II.2	*Mesure de fréquences et vitesse des hématies . . . . .	142
<b>LP19</b>	<b>- Conservation de l'énergie (cpge)</b>	<b>144</b>
<b>I</b>	<b>Conservation ou non de l'énergie mécanique</b>	<b>145</b>
I.1	Théorème de l'énergie mécanique . . . . .	145
I.2	Cas du pendule sans frottements . . . . .	147
I.3	Cas du pendule avec frottements . . . . .	149
<b>II</b>	<b>Conservation de l'énergie totale</b>	<b>150</b>
II.1	Notion d'énergie totale . . . . .	150
II.2	Expression de l'énergie interne . . . . .	152
II.3	Application à l'échauffement de l'air par un pendule simple . . . . .	152
<b>LP20</b>	<b>- Acquisition et traitement de données</b>	<b>156</b>
<b>I</b>	<b>Numérisation d'un signal sinusoïdal dans le domaine temporel</b>	<b>157</b>
I.1	Conversion analogique-numérique . . . . .	157
I.2	Échantillonnage . . . . .	158

I.3	Discrétisation . . . . .	160
<b>II</b>	<b>Analyse fréquentielle de signaux numérisés</b>	<b>161</b>
II.1	Cas du signal sinusoïdal monochromatique . . . . .	161
<b>III*</b>	<b>Cas du signal non-sinusoïdal</b>	<b>163</b>
III.1	Problème de repliement de spectre . . . . .	165
<b>LP21</b>	<b>- Transferts thermiques (supérieur)</b>	<b>169</b>
<b>I</b>	<b>Les différents modes de transferts thermiques</b>	<b>171</b>
I.1	Convection . . . . .	171
I.2	Rayonnement . . . . .	171
I.3	Conduction (ou diffusion) thermique . . . . .	171
<b>II</b>	<b>Modélisation de la conduction</b>	<b>172</b>
II.1	Flux thermique et densité de courant thermique . . . . .	172
II.2	Loi de FOURIER . . . . .	173
II.3	Bilan thermique . . . . .	173
II.4	Résolution en régime stationnaire . . . . .	175
<b>III</b>	<b>Application à l'habitat</b>	<b>175</b>
III.1	Notion de résistance thermique . . . . .	175
III.2	Double vitrage . . . . .	176
<b>LP22</b>	<b>- Phénomènes de diffusion</b>	<b>180</b>
<b>I</b>	<b>Équation de conservation et bilan de particules</b>	<b>182</b>
I.1	Flux de particules . . . . .	182
I.2	Bilan . . . . .	182
I.3	*Généralisation à 3 dimensions . . . . .	183
<b>II</b>	<b>Équation de diffusion</b>	<b>183</b>
II.1	Loi phénoménologique . . . . .	183
II.2	Équation de diffusion . . . . .	184
II.3	Généralisation à 3 dimensions . . . . .	184
<b>III</b>	<b>Approche microscopique de la diffusion</b>	<b>185</b>
III.1	Modèle de marche aléatoire . . . . .	185
III.2	Approche statistique . . . . .	185
III.3	Simulation avec PYTHON . . . . .	186
<b>◇LP23</b>	<b>- Oscillations</b>	<b>192</b>

<b>I</b>	<b>*Oscillateur harmonique</b>	<b>193</b>
I.1	Description du modèle . . . . .	194
I.2	Mise en équation . . . . .	195
I.3	Résolution . . . . .	196
<b>II</b>	<b>Oscillateur amorti</b>	<b>197</b>
II.1	Description du modèle . . . . .	197
II.2	Mise en équation . . . . .	198
II.3	Résolution . . . . .	199
<b>III</b>	<b>Oscillations forcées</b>	<b>200</b>
III.1	Régime forcé . . . . .	200
III.2	Résolution et phénomène de résonance . . . . .	202
<b>IV</b>	<b>Aspect énergétique</b>	<b>203</b>
IV.1	Oscillations libres . . . . .	203
IV.2	Oscillations amorties . . . . .	205
<b>LP24</b>	<b>- Mesures et contrôles</b>	<b>210</b>
<b>I</b>	<b>La chaîne de mesure</b>	<b>211</b>
I.1	Présentation . . . . .	211
I.2	Caractéristiques . . . . .	212
<b>II</b>	<b>Mesure de viscosité et incertitudes de type B</b>	<b>213</b>
II.1	Système étudié . . . . .	213
II.2	Protocole et évaluation des incertitudes . . . . .	213
II.3	Critiques du protocole . . . . .	215
<b>III</b>	<b>Mesure de viscosité et incertitudes de type A</b>	<b>215</b>
III.1	Protocole . . . . .	215
III.2	Calcul des incertitudes . . . . .	215
III.3	Avantages et inconvénients de la méthode . . . . .	215
<b>LP25</b>	<b>- Régimes transitoires</b>	<b>217</b>
<b>I</b>	<b>Influence du temps de réponse</b>	<b>218</b>
I.1	Observations expérimentales . . . . .	218
I.2	Mise en équation . . . . .	219
I.3	Résolution de l'équation différentielle . . . . .	220
<b>II</b>	<b>Influence du facteur de qualité et du coefficient d'amortissement</b>	<b>221</b>
II.1	Observations expérimentales . . . . .	221
II.2	Mise en équation . . . . .	222
II.3	Régimes transitoires associés . . . . .	223
II.4	*Mesure de la cinétique de décroissance des oscillation . . . . .	225

<b>LP26 - Mouillage</b>	<b>227</b>
<b>I Notion de tension superficielle</b>	<b>228</b>
I.1 Origine . . . . .	228
I.2 Interprétation énergétique . . . . .	229
I.3 Mesure expérimentale . . . . .	229
<b>II Notion de mouillage</b>	<b>231</b>
II.1 Mouillage et étalement . . . . .	231
II.2 Loi de YOUNG-DUPRÉ . . . . .	232
<b>III Traitement de surface</b>	<b>233</b>
III.1 Notion d'hydrophobie . . . . .	233
III.2 Interprétation de l'effet Lotus . . . . .	233
<b>LP27 - Machines thermiques</b>	<b>234</b>
<b>I Transformation cyclique d'un système fermé</b>	<b>235</b>
I.1 Description du système . . . . .	235
I.2 Bilans énergétiques et entropiques . . . . .	236
<b>II Machines dithermes motrices</b>	<b>237</b>
II.1 Rendement du moteur ditherme . . . . .	237
II.2 Modélisation graphique du cycle . . . . .	239
<b>III Machines dithermes réceptrices</b>	<b>240</b>
III.1 Efficacité . . . . .	241
III.2 Efficacité de CARNOT . . . . .	241
<b>◇LP28 - Phénomènes de transport</b>	<b>244</b>
<b>I Description du phénomène de transport</b>	<b>245</b>
I.1 Notion de flux . . . . .	245
I.2 Cause de création du flux . . . . .	246
<b>II Bilan au sein d'un système siège d'un transport</b>	<b>247</b>
II.1 Bilans . . . . .	247
II.2 Cas du régime permanent . . . . .	248
<b>III Notion de résistance</b>	<b>249</b>
III.1 Résistance électrique . . . . .	249
III.2 Résistance thermique . . . . .	250
III.3 *Double vitrage . . . . .	250
<b>LP29 - Filtrages</b>	<b>253</b>

<b>I</b>	<b>Notion de filtre</b>	<b>254</b>
I.1	Fonction de transfert . . . . .	255
I.2	Types de filtres . . . . .	255
<b>II</b>	<b>Filtres du premier ordre</b>	<b>255</b>
II.1	Comportement haute et basse fréquence . . . . .	256
II.2	Pulsation de coupure . . . . .	257
<b>III</b>	<b>Diagramme de Bode</b>	<b>258</b>
III.1	Gain en décibel . . . . .	258
III.2	Tracé du diagramme de BODE en gain . . . . .	258
III.3	Tracé du diagramme de BODE en phase . . . . .	259
<b>LP30</b>	<b>- Viscosité</b>	<b>261</b>
<b>I</b>	<b>Notion de viscosité</b>	<b>262</b>
I.1	Mise en évidence expérimentale . . . . .	262
I.2	Notion de viscosité dynamique . . . . .	263
I.3	Le nombre de REYNOLDS . . . . .	265
<b>II</b>	<b>Mesure de la viscosité</b>	<b>266</b>
II.1	Principe . . . . .	266
II.2	Application . . . . .	267
<b>III</b>	<b>Écoulement réel</b>	<b>268</b>
III.1	Cas de l'écoulement de POISEUILLE . . . . .	268
III.2	Notion de couche limite . . . . .	269
<b>LP31</b>	<b>- Écoulement de fluides</b>	<b>272</b>
<b>I</b>	<b>Caractériser un écoulement</b>	<b>273</b>
I.1	Différents écoulements . . . . .	273
I.2	Expression du nombre de Reynolds . . . . .	274
<b>II</b>	<b>Écoulement d'un fluide réel</b>	<b>275</b>
II.1	Écoulement de POISEUILLE . . . . .	275
II.2	Débit volumique . . . . .	276
II.3	Résistance hydraulique . . . . .	277
<b>III</b>	<b>Étude d'un écoulement parfait</b>	<b>278</b>
III.1	Relation de BERNOULLI . . . . .	278
III.2	Effet VENTURI . . . . .	279
<b>LP32</b>	<b>- Irréversibilité</b>	<b>282</b>

<b>I</b>	<b>Lien entre l'irréversibilité et l'entropie</b>	<b>283</b>
I.1	Notion d'entropie . . . . .	283
I.2	Énoncé du deuxième principe de la thermodynamique . . . . .	284
<b>II</b>	<b>Phénomènes irréversibles</b>	<b>285</b>
II.1	Bilan entropique . . . . .	285
II.2	Chauffage de l'eau par effet JOULE . . . . .	286
II.3	Irréversibilité de la diffusion . . . . .	287
<b>LP33</b>	<b>Phénomènes de polarisation optique</b>	<b>289</b>
<b>I</b>	<b>Polarisation d'une OPPM</b>	<b>290</b>
I.1	Définition et description . . . . .	290
I.2	Différents états de polarisation . . . . .	291
I.3	Cas de la lumière naturelle . . . . .	293
<b>II</b>	<b>Loi de Malus</b>	<b>294</b>
II.1	Utilisation d'un polaroïd (polariseur-analyseur) . . . . .	294
II.2	Énoncé de la loi de MALUS . . . . .	295
<b>III</b>	<b>Pouvoir rotatoire de substances chirales</b>	<b>296</b>
III.1	Loi de BIOT . . . . .	296
III.2	Application au contrôle qualité . . . . .	296

## Avant-Propos

Ce document regroupe les leçons de physique rédigées lors de mon année de préparation à l'**agrégation externe de sciences physiques option chimie** de l'année universitaire 2019-2020, à l'École normale supérieure Paris-Saclay (anciennement ENS Cachan). Ces plans de leçon ont été largement réalisés avec ma binôme Laora BOULO. Par ailleurs, ils ont été réfléchis et pensés avec l'aide précieuse de Jean-Xavier BARDAUD et également de Pierre BLÉTEAU et de Maëli BLANC. Ce travail d'équipe a payé puisque nous sommes tous les cinq lauréats et lauréates de cette session 2020. Ces plans ne sont pas des corrigés d'épreuves orales de l'agrégation externe. Ce sont simplement des propositions de plans et de ressources, qui, bien que réfléchies avec d'autres étudiants de la promotion de l'ENS, restent issues de mon point de vue. Il va sans dire mais mieux vaut le préciser, un plan recopié n'est pas un « bon plan » ! Pour avoir un bon plan, il faut se l'approprier.

Les leçons marquées d'un signe «  $\diamond$  » ont été présentées à la promotion lors de l'année de préparation par ma binôme ou moi. La leçon LP25 - Régimes transitoires est celle que j'ai eu à présenter le *jour J*.

Les passages grisés sont des commentaires personnels sur le déroulé de la leçon.

Ceci est un passage grisé.

Les encadrés de types définition, remarques, importants, sont les choses que j'écris impérativement au tableau.

A chaque fin de leçon (ou presque), j'ai inséré des extraits de programmes. Si la leçon ne doit pas suivre à la lettre les programmes officiels, il est parfois utile de voir ce qui est classiquement traité au lycée ou en CPGE, ou bien cela peut inspirer l'écriture d'un plan. Il est de toutes façons important d'avoir les programmes de ces classes en tête.

La session 2020 de l'agrégation fut marquée par l'épidémie de coronavirus et le confinement au lendemain des épreuves écrites, et ce pendant la quasi-totalité de la période de préparation des oraux. Les épreuves orales ont tout de même eu lieu, au lycée D'ARSONVAL, du 5 au 15 juillet 2020. Les épreuves orales de leçons de physique et de chimie ont été écourtées : 4h de préparation, 1h d'épreuve avec une demi-heure de présentation et une demi-heure de questions. L'épreuve de montage a quant à elle été supprimée de cette session.

La lecture du *rapport de jury* est totalement indispensable à une bonne compréhension des épreuves, écrites et orales, et je recommande fortement sa lecture.

Bon courage aux agrégatifs et agrégatives qui liront ce document. Je suis ouvert à toute critique, toute question, remarque ou discussion, je suis joignable à l'adresse suivante :

*damien.tocqueville@ens-paris-saclay.fr*

## Ressources fréquemment utilisées

### Ouvrages de l'enseignement secondaire

- (1) *Physique-Chimie, 1ere spécialité*, Jean-Philippe BELLIER, Julien CALAFELL, Nicolas LESCURE, Hachette éducation, 2019.
- (2) *Physique-Chimie 1<sup>ère</sup>*, ANTCZAK, S., JOUVY, J-C., LACORRE-CHUETTE, N., LAGNAUD, P., MOUNIER, F., Hatier, 2019.
- (3) *Physique-Chimie 1<sup>ère</sup>, manuel collaboratif*, DOUTHE, L., FRAY, B., Le livre scolaire, 2019.
- (4) *Physique Chimie Tle*, GAILLARD, C. et coll., Le livre scolaire, 2020.
- (5) *Physique-Chimie Terminale*, BERTHELOT, S., LÉVÊQUE, T., ARER, L., Belin, 2020.
- (6) *Physique-Chimie Terminale S, programme 2012*, RUFFENACH, M., CARIAT, T., MORA, V., Dunod, 2012.
- (7) *Physique-Chimie Terminales*, BARDE, M., BARDE, N., BAUDOIN, T., Hachette éducation, 2020.
- (8) *Physique-Chimie Term S spécifique*, COPPENS, N., JOHANN, T., et coll., Nathan, collection Sirius, 2012.

### Ouvrages de classes préparatoires aux grandes écoles

- (1) *Physique PCSI*, Marie-Noëlle SANZ, Bernard SALAMITO, Stéphane CARDINI, Damien JURINE, Dunod, J'intègre, 5e ed., 2019.
- (2) *Physique PC-PC\* Tout-en-un*, Marie-Noëlle SANZ, Bernard SALAMITO, Dominique CHARDON, François VANDENBROUCK, Dunod, J'intègre, 5e ed., 2019.
- (3) *Exos Résolus PRÉPAS, Physique PCSI*, Frédérique DE LA BAUME, Caroline GOUTELARD, Hélène MOUILLERON, Damien TRISTANT, Hachette éducation, 2015.
- (4) *Physique-Chimie BCPST 2<sup>E</sup> année*, Isabelle CÔTE; Anne VIDAL, Dunod, J'assure aux concours, 2017.
- (5) *Tout-en-un Physique PC*, Jean-Christophe TISSERAND, Bréal, Les nouveaux Précis, 2014.
- (6) *Physique PC/PC\**, Florence DEPAQUIT-DEBIEUVRE, Ellipses, Savoir & faire en prépa, 2016.
- (7) *Physique PC/PC\**, Lionel VIDAL, Régis BOURDIN, Ludovic MENGUY, vincent PARMENTIER, Alban SAURET, Sylvie ZANIER, Ellipses prépa sciences, 3e ed., 2017.
- (8) *Thermodynamique, tout le cours*, Michel PULLICINO, Nathan, 2007.

### Sitographie

- (1) <https://femto-physique.fr/>, Jimmy ROUSSEL : Cours en ligne légèrement plus poussé que le programme des CPGE, source exceptionnelle de schémas, de démonstrations, etc.
- (2) <http://www.physagreg.fr/>, Julien GEANDROT : Cours en ligne niveau L1, quelques fois L2, beaucoup de schémas, de démonstrations rigoureuses, et d'anciens plans de leçons maintenant presque tous obsolètes.

- (3) [www.mchampion.fr](http://www.mchampion.fr), Maxime CHAMPION : Site personnel d'un enseignant en classe préparatoire PTSI au lycée Vauvenargues à Aix-En-Provence, de nombreux cours, TD, TP, mais pas de corrigés d'exercices.
- (4) [dlasne.physiquepc.free.fr](http://dlasne.physiquepc.free.fr), David LASNE : Site personnel d'un enseignant en classe préparatoire PC au lycée FRANÇOIS 1ER du Havre (prof que j'ai eu), de nombreux cours, TD, TP, mais pas de corrigés d'exercices.
- (5) <http://perso.numericable.fr/michel.aubert2/>, Michel AUBERT : Site personnel d'un enseignant en classe préparatoire BCPST1 au lycée FÉNÉLON à Paris, photocopiés de cours.
- (6) <http://jlamerenx.fr/>, Jean LAMERENX : Site personnel d'un enseignant de classe préparatoire BCPST2 au lycée SAINT-LOUIS à Paris : de nombreux photocopiés de cours d'où tirer beaucoup de schéma, et d'explications concises. **Utile aussi en chimie** (archives de la PC du lycée Marcellin BERTHELOT à Saint-Maur-des-fossés sur le même site).
- (7) <http://agregation.a-l-chimie.fr/index.php>, Océane AUCOIN, Aurélien GRENIER, Louis PÉAULT, Auriane PERRIN, Émilie RENOARD et Florianne VAYER : site personnels d'ancien · ne · s étudiant · e · s de l'ENS Paris-Saclay proposant plans de leçons et de montages.
- (8) <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/mnmecanique.html>, Jean-Jacques ROUSSEAU : Recueil d'animations en physique, très utiles en leçons (particulièrement celles du supérieur).
- (9) <http://www.ostralo.net/>, Adrien WILM : Recueil d'animations en physique, très utiles en leçons (particulièrement celles du secondaire).

## Commentaires sur l'épreuve de la leçon de physique

La leçon de physique est une épreuve orale de présentation de connaissance sur un sujet donné par le jury. Le déroulé de cet épreuve consiste en :

- 4h de préparation, avec accès à une large bibliothèque d'ouvrages et à internet (exceptés les sites internet qui requièrent un mot de passe) ;
- 1h20 de passage à l'orale devant le jury, avec 40 minutes de présentation (5 minutes d'introduction pédagogique suivies de 35 minutes d'exposé scientifique) puis 40 minutes d'entretien avec le jury (théoriquement 10 minutes de questions disciplinaires, 10 minutes de questions didactiques, et 10 minutes de questions pédagogiques).

La leçon n'est pas qu'un exercice scientifique. L'aspect pédagogique est capital, c'est pourquoi toutes les ressources à utiliser doivent être réfléchies, il faut savoir justifier chacun des choix de présentation fait durant l'exposé.

Élément imposé : Illustration de la notion de spectre sur un signal sonore**Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (1ère prog. 2019)
- Prérequis :
  - \* Ondes sonores (caractéristiques) ;
  - \* Couleurs et images : couleurs complémentaires,  $\lambda$ ,  $\nu$  ;
  - \* Quantification de l'énergie (niveaux d'énergie, absorption et émission de photon, loi de PLANK-EINSTEIN).
- Séquence pédagogique : à l'intersection de deux chapitres pour faire un lien entre les 2 . Dans le cadre programmes 2019, leçon qui s'inscrit dans l'enseignement de spé, après le cours sur les ondes mécaniques en ce qui concerne la partie "son", et après le cours sur l'optique géométrique, la couleur et la quantification de l'énergie pour la partie "lumière". Pour illustrer au mieux la notion de spectre, cette leçon se place à l'interface entre les deux domaines.
- Difficultés :
  - \* Ne pas confondre un spectre avec n'importe quel graphique ;
  - \* Comprendre la différence entre émission et absorption.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Connaître la notion de spectre ;
  - \* Reconnaître un son pur d'un son complexe ;
  - \* Connaître la notion d'harmoniques et de fondamental ;
  - \* Savoir obtenir le spectre d'une source spectrale et l'interpréter.
- Sources utilisées :

- (1) ANTCZAK, S., JOUVY, J-C., LACORRE-CHUETTE, N., LAGNAUD, P., MOUNIER, F., *Physique-Chimie 1<sup>ère</sup>*, Hatier, 2019.
- (2) RUFFENACH, M., CARIAT, T., MORA, V., *Physique-Chimie Terminale S, programme 2012*, Dunod, 2012.
- (3) DOUTHE, L., FRAY, B., *Physique-Chimie 1<sup>ère</sup>, manuel collaboratif*, Le livre scolaire, 2019.
- (4) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, tout-en-un, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.

## Introduction

On va s'intéresser à deux phénomènes, à priori totalement différents :

- Avant de jouer, un orchestre doit s'accorder. Mais comment procéder ? Pour cela, les instrumentistes s'accordent avec un hautbois qui "donne le La". On peut aussi faire cela avec un diapason. Pourquoi s'accordent-ils en prenant certains instruments comme base et pas d'autres ?
- Pour essayer de répondre à cette question, on va voir dans cette leçon une nouvelle leçon : celle de **spectre**.

### Définition

On appelle **spectre** tout graphique obtenu expérimentalement donnant la répartition dans l'espace d'une grandeur physique, champ électrostatique, ou la composition d'un rayonnement en fonction de la longueur d'onde (ou de fréquence) de ses constituants.

- On va voir aussi qu'on va faire un lien entre la représentation de la lumière et du son grâce à cette notion.

## I Analyse spectrale d'un son

*L'objectif de cette première partie est de s'intéresser à la notion de spectre en acoustique.*

### I.1 Onde sonore et spectre de Fourier

*On passe « sous le tapis » les difficultés mathématiques de la transformée de FOURIER, en revanche, les élèves doivent en comprendre le principe.*

- Une onde sonore est une onde mécanique longitudinale à **trois dimensions**.

### Expérience

Enregistrement du signal d'un son pour le la 440 Hz avec deux instruments de musique différents :

- Le diapason ;
- La flûte.

On remarque que le signal n'a pas exactement la même forme selon l'instrument utilisé, alors qu'on joue la même note.

- Un son peut être :
  - \* Pur : il s'agit d'une sinusoïde ;
  - \* Complexe : il s'agit d'une sinusoïde qui n'est pas "parfaite", déformée.
- Le mathématicien Joseph FOURIER (XVIIe siècle) a montré que tout signal périodique  $s(t)$  de fréquence  $f$  peut se décomposer en une somme de fonctions sinusoïdales de fréquences  $f_1, f_2, \dots$

$$s(t) = a_0 + \sum_n (a_n \times \cos(2\pi f_n \times t) + b_n \times \sin(2\pi f_n \times t))$$

○ On va donc voir comment caractériser cette différence et en quoi la théorie de FOURIER est utilisée.

## I.2 Fondamental et harmoniques

On rentre dans l'analyse du spectre enregistré.

### Définition

Le spectre en fréquence d'un son est la représentation de ses composantes sinusoïdales en fonction de la fréquence.

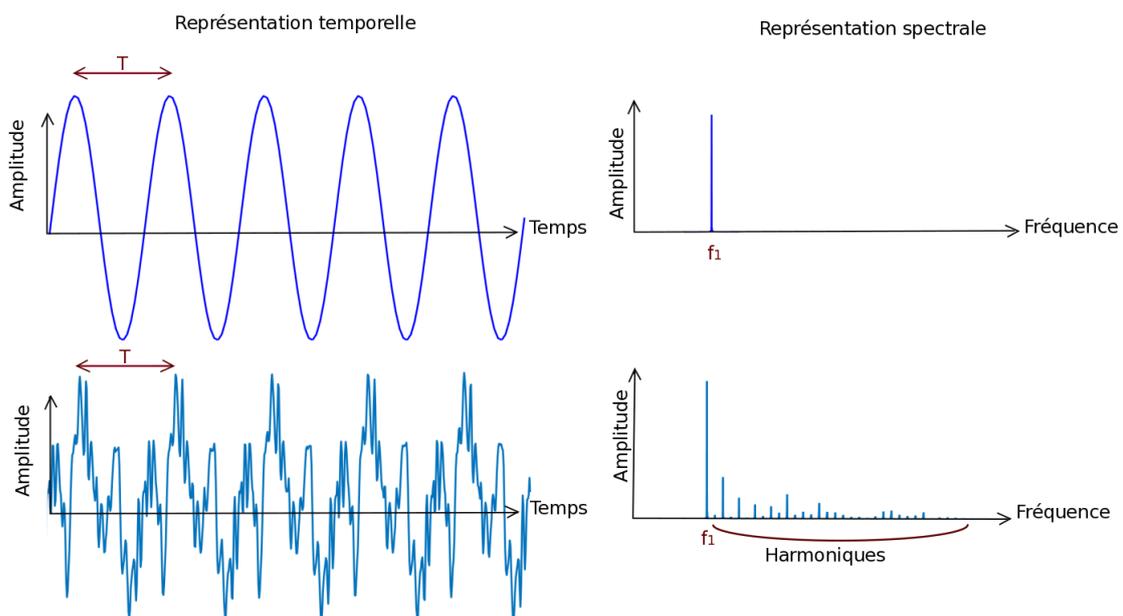
- Un son pur ne présente qu'un signal alors qu'un son complexe en présente plusieurs.

### Expérience

Enregistrement avec le logiciel LATISPRO des spectres en fréquence de chaque instrument. À l'aide du matériel suivant :

- Un ordinateur et LATISPRO ;
- La carte d'acquisition LATISPRO ;
- Un micro ;
- Un diapason ;
- Une flûte (enregistrement en préparation...).

Pour chacun, on montre la sinusoïde et le spectre en fréquence que donne le logiciel. On remarque que le diapason ne possède que le pic fondamental.



- Le signal de plus basse fréquence est appelé **fondamental** et les signaux de fréquence plus élevées sont appelés les **harmoniques**.
- On remarque que les fréquences des harmoniques sont multiples de celles du fondamental :

$$f_n = n \times f_1$$

○ Dans cette partie on a - en quelques sortes - décomposé une onde sonore grâce à un spectre. Maintenant, on va voir qu'on peut faire quelque chose de semblable sur la lumière !

## II Analyse de spectres lumineux

On change quelque peu de sujet, on passe à l'étude de spectres dans le domaine lumineux, la place de l'expérience dans cette partie doit être importante.

### Définition

On appelle **spectre lumineux** d'une source l'image que l'on obtient en décomposant sa lumière à l'aide d'un prisme.

### II.1 Décomposition de la lumière

Dans cette sous partie, il faut « jongler » entre l'expérience et le tableau.

- Dans le cas d'une source **polychromatique**, on observe un spectre continu.

### Expérience

Dispersion de la lumière blanche par un prisme. Montage constitué de :

- Une source de lumière blanche ;
- Un condenseur ;
- Une fente ;
- Une lentille convergente ;
- Un prisme ;
- Un écran.

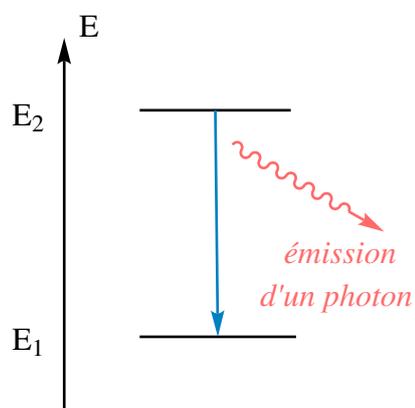
- Dans le cas d'une source **monochromatique**, on observe un spectre une seule radiation.
- Dans le cas des sources polychromatiques, on peut aussi trouver des **spectres discontinus** ou **spectres de raies**. C'est le cas de nombreux éléments du tableau périodique.

○ Comment expliquer l'allure de ces spectres ?

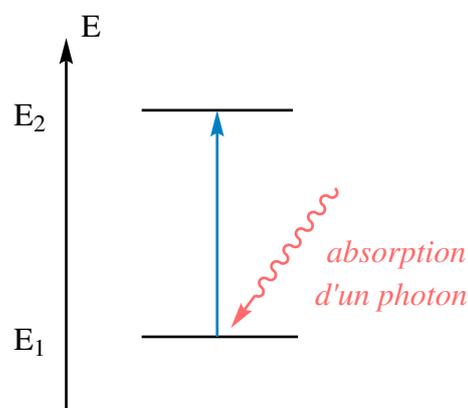
### II.2 Spectres d'émission et spectres d'absorption

Cette sous-partie a pour but d'expliquer l'origine des raies dans un spectre.

- Chaque entité physico-chimique peut absorber et émettre des rayonnements. En **absorbant** un photon, elle peut passer d'un état d'énergie vers un autre, plus haut. En **émettant** un photon, elle peut passer d'un état d'énergie vers un autre, plus bas.



a) Phénomène d'émission



b) Phénomène d'absorption

- Sur un spectre d'émission, on voit une raie colorée qui correspond à la longueur d'onde  $\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1}$ . Il s'agit de la désexcitation d'un photon.
- Sur un spectre d'absorption, on voit une raie noire correspondant à la longueur d'onde  $\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1}$ . Le composé n'a alors absorbé qu'une partie des rayonnements de la lumière blanche.

### Expérience

Spectre de la lampe à mercure (Hg). Le montage est composé de :

- Lampe à vapeur de mercure ;
- Un collimateur ;
- Une lentille convergente (Distance focale ?) ;
- Un réseau ;
- Une lentille convergente ;
- Un écran.

## II.3 \*Couleurs des corps chauffés, loi de Wien

### Définition

On appelle **corps noir** un corps qui absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit. En toute rigueur, un corps noir est un modèle, donc n'existe pas, mais beaucoup d'objets ont un comportement similaire au corps noir.

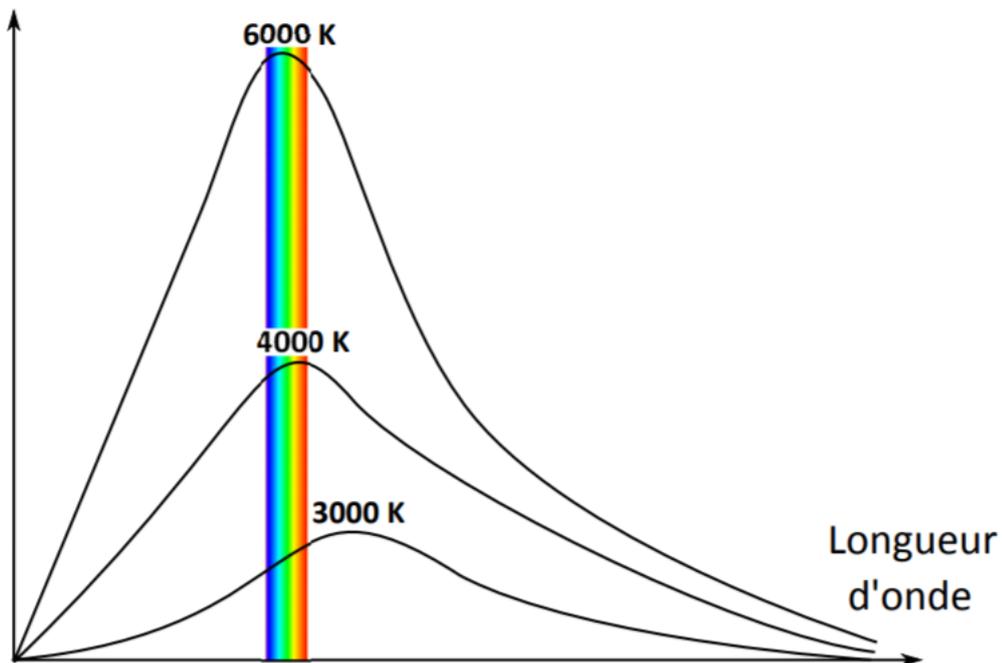
### Propriété (Loi de WIEN)

Un corps noir en équilibre thermique à la température  $T$  émet un rayonnement de spectre continu appelé **rayonnement thermique** présentant un maximum d'intensité pour une longueur d'onde  $\lambda_{\max}$  telle que :

$$\lambda_{\max} \times T = \text{constante} = 3.10^3 \text{ }\mu\text{m.K}$$

C'est la loi de WIEN.

Intensité  
lumineuse



## Conclusion

### Commentaire

Penser à regarder les nouveaux programmes, et les nouveaux manuels de Première pour construire cette leçon. Dorénavant les ondes sonores se voient en première donc cette leçon colle bien au programme de première.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- En une demi-heure (2020) il est judicieux de choisir entre spectre sonore ou spectre lumineux en fonction de l'élément imposé ;
- On peut discuter de la loi de STEFAN.

## Extraits de programme officiel

### — *Programme de l'enseignement scientifique (tronc commun) de première :*

<p>Un son pur est associé à un signal dépendant du temps de façon sinusoïdale.</p> <p>Un signal périodique de fréquence <math>f</math> se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences multiples de <math>f</math>. Le son associé à ce signal est un son composé.</p> <p><math>f</math> est appelée fréquence fondamentale, les autres fréquences sont appelées harmoniques.</p> <p>La puissance par unité de surface transportée par une onde sonore est quantifiée par son intensité. Son niveau d'intensité sonore est exprimé en décibels selon une échelle logarithmique.</p>	<p>Utiliser un logiciel permettant de visualiser le spectre d'un son.</p> <p>Utiliser un logiciel pour produire des sons purs et composés.</p> <p>Relier puissance sonore par unité de surface et niveau d'intensité sonore exprimé en décibels.</p>
--	--

### — *Programme de l'enseignement de spécialité de première :*

<p>Le photon. Énergie d'un photon.</p> <p>Description qualitative de l'interaction lumière-matière : absorption et émission.</p> <p>Quantification des niveaux d'énergie des atomes.</p>	<p>Utiliser l'expression donnant l'énergie d'un photon.</p> <p>Exploiter un diagramme de niveaux d'énergie en utilisant les relations <math>\lambda = c / \nu</math> et <math>\Delta E = h\nu</math>.</p> <p><i>Obtenir le spectre d'une source spectrale et l'interpréter à partir du diagramme de niveaux d'énergie des entités qui la constituent.</i></p>
--	---

**Élément imposé : Ondes sismiques, ondes sonores, notion de retard****Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (Term)
- Prérequis :
  - \* Notions sur les ondes :  $T$ ,  $\nu$ ,  $\lambda$ , double périodicité ;
  - \* Notion d'onde électromagnétique (vu en 2<sup>nde</sup>), domaine associé au visible ;
  - \* Pré-requis mathématique : fonction logarithme décimal.
- Séquence pédagogique : Cette leçon s'inscrit dans le programme de terminale spécialité. Les caractéristiques des ondes ont déjà été rencontrées, notamment en seconde. En TP, la leçon peut se poursuivre par la mesure de la célérité d'un son, et la prochaine leçon pourrait consister en l'étude des ondes lumineuses.
- Difficultés :
  - \* Double périodicité des ondes ;
  - \* On ne voit pas les ondes, pourtant elles font partie du langage courant ;
  - \* Finalement on décrit le même phénomène pour un séisme et une onde sonore : une onde mécanique progressive.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Donner des caractéristiques générales sur les ondes ;
  - \* Comprendre la notion de retard d'une onde ;
  - \* Connaître les caractéristiques d'une onde sonore.
- Sources utilisées :

- (1) RUFFENACH, M., CARIAT, T., MORA, V., *Physique-Chimie Terminale S, programme 2012*, Dunod, 2012.
- (2) *Localiser les séismes*, <http://musee-sismologie.unistra.fr>, Université de Strasbourg.
- (3) DOUTHE, L., FRAY, B., *Physique-Chimie 1<sup>ere</sup>, manuel collaboratif*, Le livre scolaire, 2019.
- (4) LEFORT, R., *Ondes et vibrations*, Dunod, 2017.
- (5) MEIER, D., SALLEN, L., *Réussir les TP de Physique aux concours*, Dunod, 2e éd., 2016.

## Introduction

- On a précédemment parlé d'ondes électromagnétiques : c'était le cas par exemple de la lumière. Elles pouvaient se propager dans le vide, autrement dit, elles ont besoin d'un milieu matériel pour se propager.
- Prenons un exemple tragique et réel : en 2011 au Japon, au large de Sendai, un séisme a provoqué un tsunami qui a déferlé sur la côte nord du Japon.

---

*Combien de temps ont disposé les autorités pour organiser l'évacuation de la population ? Quel réglage doit-on faire sur les haut parleurs de la ville pour alerter la population ?*

---

## I Onde mécanique progressive

*L'objectif de la première partie est de définir une onde mécanique et de lier ce concept à celui d'une perturbation. Si avec l'exemple du séisme on comprend aisément que l'onde mécanique transporte de l'énergie, il est plus difficile d'en faire sentir le non-transport de matière. C'est le défi de cette première partie.*

### I.1 Notion d'onde mécanique progressive

*Il s'agit dans cette partie de définir une perturbation et une onde mécanique.*

- On peut d'abord se demander ce qu'est une **onde mécanique**.

#### Animation

Sur cette vidéo, on peut observer la formation d'une onde qui **perturbe** la surface de l'eau.

- On observe donc la naissance d'une perturbation.

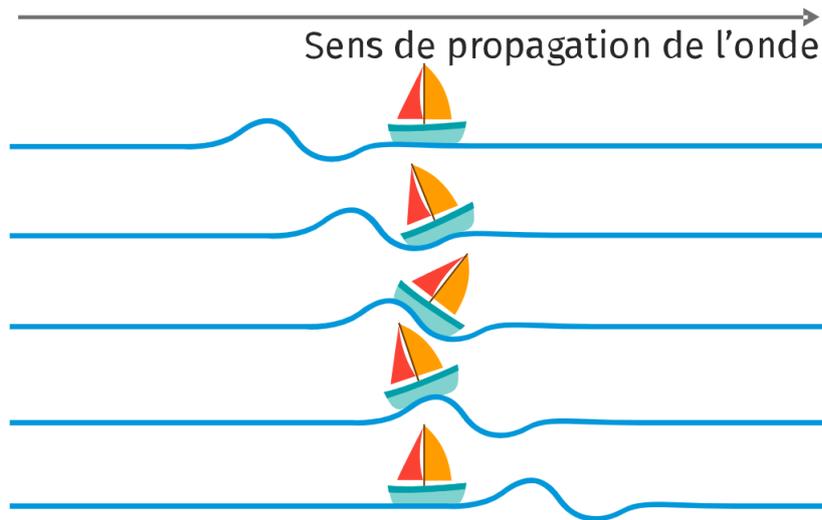
#### Définition

On appelle **perturbation** toute modification locale et temporelle des propriétés physiques d'un milieu.

- Cette perturbation se propage de proche en proche sur toute la surface grâce aux propriétés élastiques du milieu, mais sans transport de matière. En effet, si un bateau subit le passage d'une vague, celui-ci ne sera pas déplacé, contrairement à ce qu'on pourrait ressentir si l'on est à bord<sup>1</sup> :

---

1. Source schéma : <https://www.lelivrescolaire.fr/page/6862304>



### Animation

On peut utiliser cette animation <sup>a</sup> afin de montrer le caractère **progressif** d'une onde.

a. [https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Ondes/cuve\\_ondes/propagation\\_onde\\_circulaire.php](https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/cuve_ondes/propagation_onde_circulaire.php)

On peut maintenant donner une définition d'une onde mécanique.

### Définition

On appelle **onde mécanique** un phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu matériel **sans transport** de matière mais **avec transport d'énergie**.

On qualifie de **progressive** une onde mécanique qui se propage sans atténuation ni déformation.

- De plus, la propagation d'une onde mécanique progressive peut se faire dans plusieurs directions :
  - \* Dans **une seule** direction (*exemple : le ressort*) : on parle d'onde à une dimension ;
  - \* Dans un plan (*exemple : la cuve à onde*) : on parle d'onde à deux dimensions ;
  - \* Dans toutes les directions (*exemple : le son*) : on parle d'onde à trois dimensions.

○ Restons sur l'exemple du ressort, on peut montrer grâce à lui qu'il existe deux grandes familles d'ondes mécaniques.

## I.2 Différents types d'ondes

*Il s'agit dans cette partie de définir une perturbation et une onde mécanique.*

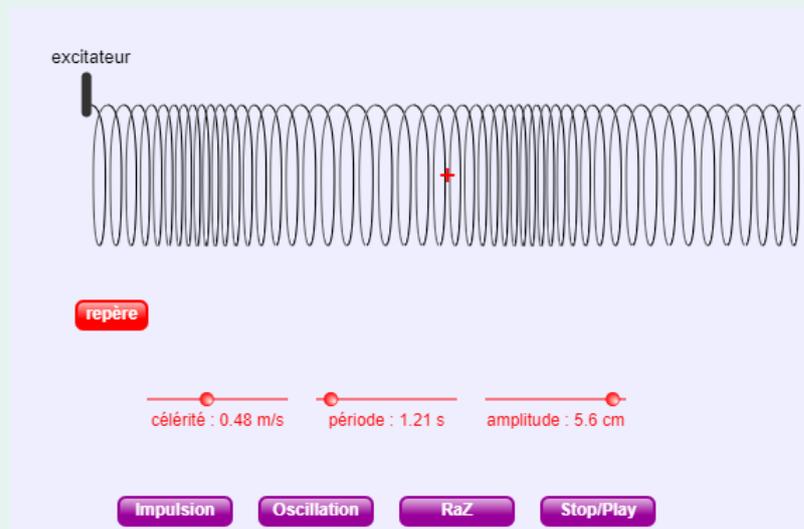
### Expérience

Fixer un long ressort quelque part dans la pièce, et montrer qu'il peut y avoir deux types d'onde : une onde transversale ou une onde longitudinale.

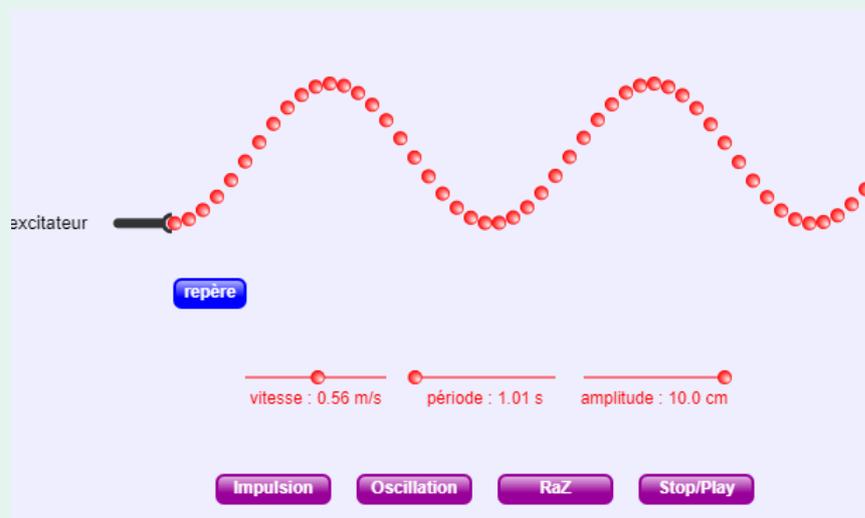
## Animation

Deux animations qui permettent de montrer les deux caractères :

— Onde longitudinale <sup>a</sup> :



— Onde transversale <sup>b</sup> :



<sup>a</sup>. [https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Ondes/general/onde\\_longitudinale.php?typanim=Javascript](https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/general/onde_longitudinale.php?typanim=Javascript)

<sup>b</sup>. [https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Ondes/general/onde\\_transversale.php?typanim=Javascript](https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/general/onde_transversale.php?typanim=Javascript)

## Définition

Une onde est dite **longitudinale** si la perturbation est **parallèle** à la direction de propagation.

Une onde est dite **transversale** si la perturbation est **perpendiculaire** à la direction de propagation.

⊙ Certaines ondes possèdent les particularité d'une onde périodique mais elle décrit une courbe particulière.

### I.3 Notion d'onde progressive sinusoïdale

Dans cette sous-partie qui n'est pas indispensable, on peut expliquer la double périodicité, mettre en évidence période, fréquence, et le lien entre les deux.

○ On va donc appliquer ce qu'on a vu au séisme japonais. Pour cela, il nous faut savoir des informations de temps et d'espace sur l'onde sismique.

## II Un exemple d'onde mécanique : les ondes sismiques

### II.1 Notion de célérité et de retard

- On peut définir la célérité  $v$  d'une onde comme sa vitesse de propagation :

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad (1)$$

La célérité d'une onde **dépend du milieu** dans lequel elle se propage.

#### Propriété

Les ondes  $P$  et les ondes  $S$  ne se déplacent pas à la même célérité.

- \* Les ondes  $P$  se déplacent à la célérité  $v_P \approx 6,0 \text{ km.s}^{-1}$  ;
- \* Les ondes  $S$  se déplacent à la célérité  $v_S \approx 4,0 \text{ km.s}^{-1}$ .

- Prenons une onde qui se propage à la célérité  $v$  selon une unique direction  $x$ . À l'instant  $t_1$ , elle est au point  $M_1$ . On veut connaître l'instant  $t_2$  où elle se trouvera en  $M_2$ . On introduit alors le retard  $\tau$  défini comme le décalage temporel entre les temps instants :

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{x_2 - x_1}{v} \quad (2)$$

○ Grâce à cette notion de retard, on peut prévoir la position de la perturbation en fonction du temps, connaissant sa vitesse.

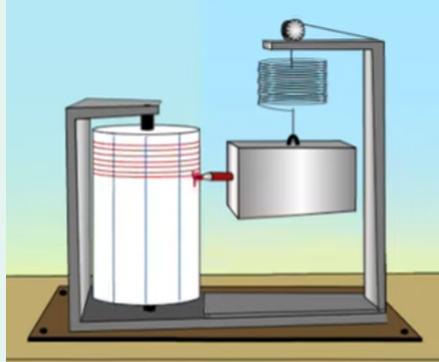
### II.2 Détermination de l'épicentre

Cette sous-partie concerne l'étude des séismes et est globalement tirée de [2], site de l'université de Strasbourg.

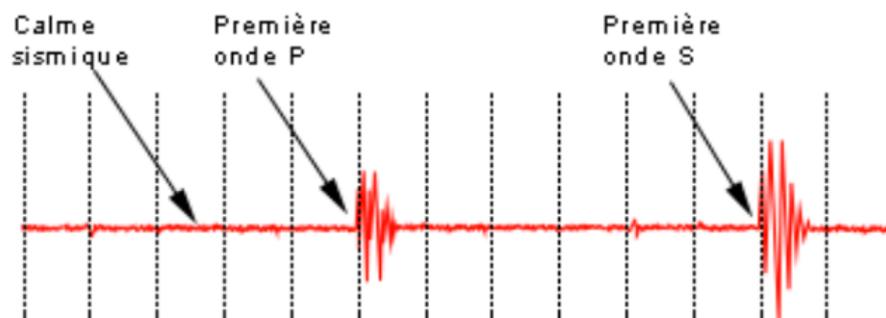
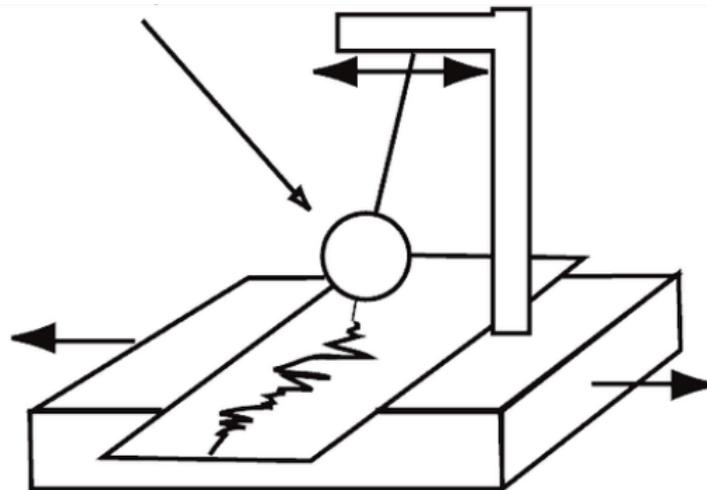
Grâce à la formule du retard, on va pouvoir déterminer le lieu d'où est parti le séisme. C'est ce que l'on appelle l'épicentre. Lorsqu'un séisme a lieu, des sismographes à travers le monde entier enregistrent l'arrivée des ondes  $P$  puis l'arrivée des ondes  $S$ , qui sont détectées en mesurant la vibration du sol grâce à un sismomètre. Le sismomètre enregistre sur un sismogramme les vibrations qu'il ressent.

### Animation

On peut montrer cette vidéo <sup>a</sup> qui montre le principe du sismomètre.



a. <https://victor-hugo-harnes.savoirsnumeriques62.fr/espace-pedagogique/sciences/classe-inversee-4eme-svt/principe-du-sismometre-5830.htm>



On a dit que les ondes  $P$  arrivent avant les ondes  $S$ . On a alors :

$$t_p = t_0 + \frac{d}{v_P} \quad (3)$$

$$t_S = t_0 + \frac{d}{v_S} \quad (4)$$

Avec :

- $t_p$  : date à laquelle arrive l'onde  $P$  ;
- $t_S$  : date à laquelle arrive l'onde  $S$  ;
- $t_0$  : date d'origine du séisme ;
- $v_P$  : vitesse de l'onde  $P$  ;
- $v_S$  : vitesse de l'onde  $S$  ;
- $d$  : distance parcourue par l'onde

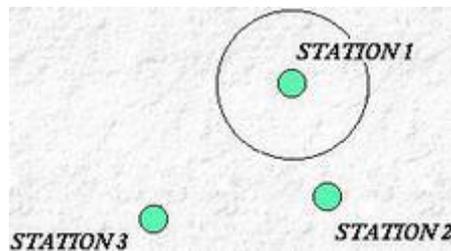
On cherche  $d$ , mais on ne connaît pas  $t_0$ . Il suffit donc de soustraire (3) et (4) :

$$t_P - t_S = d \left( \frac{1}{v_P} - \frac{1}{v_S} \right)$$

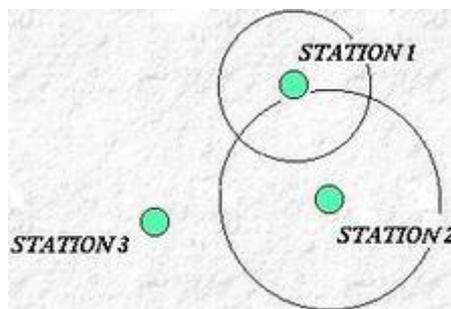
On isole donc  $d$  :

$$d = \frac{t_P - t_S}{\left( \frac{1}{v_P} - \frac{1}{v_S} \right)} \quad (5)$$

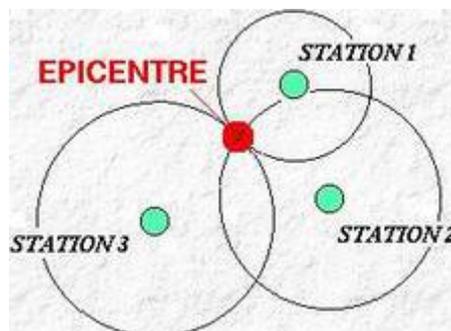
On peut alors grâce à cette distance tracer un cercle de rayon  $d$  autour de l'emplacement de l'appareil :



Mais ça ne suffit pas donc il faut une deuxième station :



Mais pour trancher entre les deux possibilités, on doit utiliser un troisième sismomètre :



Avec cette méthode on a la position précise de l'épicentre !

○ Maintenant qu'on connaît le lieu du début du séisme (l'épicentre), on peut déterminer par image satellite l'avancée de la vague par rapport à ce point en fonction du temps.

## II.3 Détermination de la vitesse du tsunami

○ Pour alerter toute la population, des sirènes retentissent dans la ville. Ces sirènes diffusent un son, qui est bien sûr, une onde mécanique.

## III Un exemple d'onde mécanique : une onde sonore

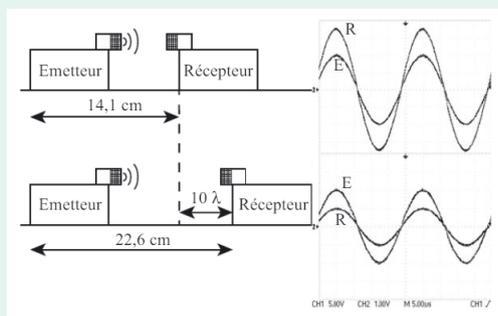
### III.1 Célérité du son dans l'air

Dans cette sous-partie, on mène l'expérience, très bien décrite dans la référence [5], de la mesure de célérité du son dans l'air. Cela représente la totalité du propos de cette sous-partie.

#### Expérience

Mesure de la célérité du son dans l'air <sup>a</sup>, avec le matériel suivant :

- Un générateur à basses fréquences (GBF) ;
  - Un oscilloscope ;
  - Un émetteur ;
  - Un récepteur ;
  - Un banc d'optique.
- Mesurer d'abord la période  $T$  (via la mesure de  $6T$ ) ;
  - Mesurer ensuite  $\lambda$  en décalant le récepteur par rapport à l'émetteur (ou inversement) : mesurer la distance décalée pour revenir à une période.



a. Réussir les TP de physique aux concours, 2<sup>e</sup> édition, L. SALLEN & D. MEIER, Dunod, page 318

○ La célérité n'est pas propre aux ondes sonores. En revanche, voyons d'autres grandeurs propres aux ondes sonores.

### III.2 Notion d'intensité et de niveau sonore

Cette sous-partie est une sous-partie de définition pour l'intensité et le niveau sonore. Attention cependant à bien « faire parler » ces notions, en s'aidant du graphique de l'échelle des décibels !

- Une onde sonore est une onde de matière (onde mécanique) comme on l'a vu qui se propage de proche en proche en compressant des « tranches » de molécules d'air. Lorsqu'on émet une onde sonore, l'onde émise est **sphérique** et on sait que la propagation de l'onde sonore s'accompagne d'une propagation d'énergie (mécanique) mais pas de matière.
- L'énergie que transporte l'onde sonore est répartie uniformément sur les **surfaces d'onde**, c'est-à-dire tous les points qui sont dans le même état vibratoire.

#### Définition

L'**intensité sonore** est l'énergie transportée par une onde sonore par unité de temps et de surface.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{\Delta t \cdot S} = \frac{\mathcal{P}}{S} \quad (6)$$

$I$  s'exprime en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

En revanche, pour parler d'un son, si il est fort ou non, on n'utilise pas le  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ . On utilise couramment le Décibel. Pour cela, on parle plutôt de **niveau d'intensité sonore**.

#### Définition

Le **niveau d'intensité sonore**  $L$  d'un son est défini par la relation :

$$L = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (7)$$

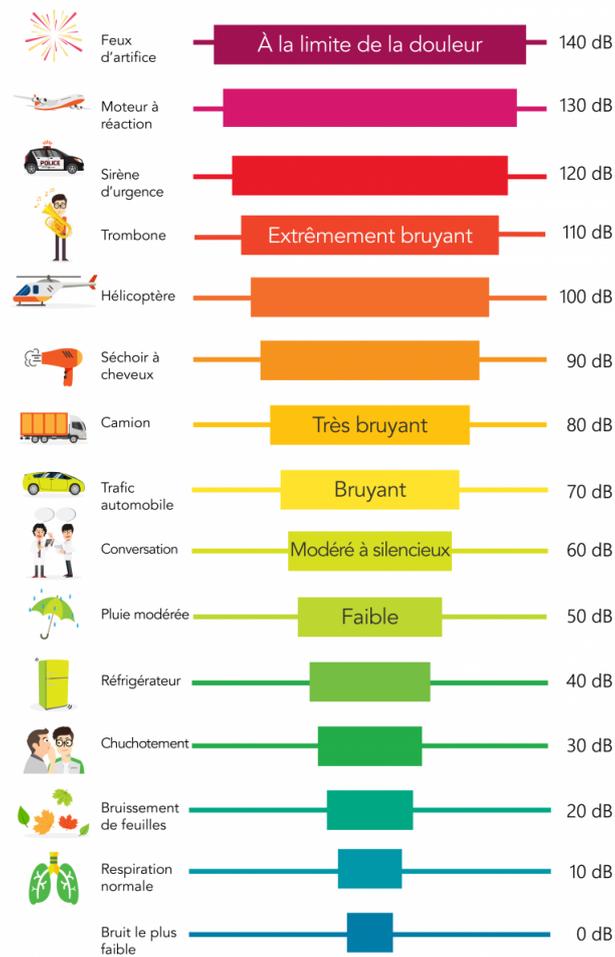
Avec  $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$L$  s'exprime en décibel (dB).

Le niveau sonore<sup>2</sup> permet de « classer » les sons :

2. Source schéma : <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/le-bruit-sur-la-terre-et-dans-la-station-spatiale>

# Échelle des décibels (dB)



○ Voyons maintenant comment appliquer cela au problème d'évacuation d'une ville.

## III.3 Niveau des haut-parleurs

*Dans cette sous-partie, on mène un calcul assez intéressant, qui permet d'utiliser les notions définies juste avant, ce qui est appréciable et apprécié.*

- La ville est divisée en secteur de 100 m de rayon. On souhaite que les maisons au bord du cercle entendent bien le son de la sirène même à l'intérieur de leur maison, donc il faut au moins que ce son soit de 100 dB. Quel doit être l'intensité que doit émettre le haut parleur à 1 mètre de la source ?
- On peut écrire les niveaux sonores :

$$L_1 = 10 \log \left( \frac{I_1}{I_0} \right) \quad (8)$$

et

$$L_2 = 10 \log \left( \frac{I_2}{I_0} \right) \quad (9)$$

On soustrait l'équation (9) à l'équation (8) :

$$L_1 - L_2 = 10 \log \left( \frac{I_1}{I_2} \right)$$

La surface d'un disque s'exprime avec la relation :  $S = 4\pi r^2$  donc l'intensité peut s'exprimer pour une onde sphérique comme :

$$I = \frac{\mathcal{P}}{4\pi r^2}$$

Donc la différence des niveaux s'écrit :

$$L_1 - L_2 = 10 \log \left( \frac{r_2^2}{r_1^2} \right)$$

Donc on peut calculer le niveau sonore :

$$L_1 = L_2 + 10 \log \left( \frac{r_2^2}{r_1^2} \right) \quad (10)$$

Ensuite on fait l'application numérique pour l'évacuation de la ville, ou bien pour la famille Lambda qui souhaite faire construire sa maison près d'un aéroport.

### Important

Attention, ici, l'onde a été considérée progressive, sans atténuation de l'air.

## Conclusion

- Réponse à la problématique : Grâce à nos connaissances acquises sur les ondes mécaniques : sismiques et sonore, on a pu voir comment trouver l'épicentre d'un séisme puis trouver la vitesse d'arrivée d'une vague pour en déduire le temps dont disposer les autorités pour évacuer la ville : temps courts, il faudrait donc mettre le détecteur plus loin en mer !
- Ouverture : Ondes ultrasonores, utilisées en médecine.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ L'intensité sonore  $I$  est en toute rigueur définie comme la puissance moyenne par unité de surface. C'est le flux moyen du vecteur de POYNTING sonore à travers une surface unité perpendiculaire à sa direction de propagation :  $I = \langle \Pi \rangle$  ;
- ☞ Ce vecteur de POYNTING s'écrit  $\vec{\Pi}(M, t) = p(M, t) \cdot \vec{v}(M, t)$
- ☞ Pourquoi le niveau sonore ? Parce que l'oreille est un récepteur logarithmique en quelques sortes. En effet, lorsque l'intensité sonore est multipliée par 10, l'oreille perçoit le double en volume sonore.
- ☞ L'intensité de référence,  $I_0$  correspond au seuil d'audibilité pour une fréquence d'environ 4 kHz, c'est-à-dire l'intensité maximale que peut détecter une oreille humaine.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Ordre de grandeurs des intensités sonores et niveau sonores ;
- ☞ L'échelle de RICHTER : on calcule la magnitude  $\mathcal{M}$  d'un séisme, grandeur calculée à l'aide des amplitudes à son épicentre que l'on compare à celle là on l'on se

trouve :  $\mathcal{M} = \log \left( \frac{A}{A_0} \right)$ .

## Extraits de programme officiel

— *Programme Terminale S 2011 (en vigueur jusqu'à juillet 2020)*

Notions et contenus	Compétences exigibles
<b>Caractéristiques des ondes</b> Ondes progressives. Grandeurs physiques associées. Retard.  Ondes progressives périodiques, ondes sinusoïdales.  Ondes sonores et ultrasonores. Analyse spectrale. Hauteur et timbre.	Définir une onde progressive à une dimension. Connaître et exploiter la relation entre retard, distance et vitesse de propagation (célérité). <i>Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier qualitativement et quantitativement un phénomène de propagation d'une onde.</i>  Définir, pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence et la longueur d'onde. Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité. <i>Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la période, la fréquence, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale.</i>  <i>Réaliser l'analyse spectrale d'un son musical et l'exploiter pour en caractériser la hauteur et le timbre.</i>

— *Programme 1<sup>ère</sup> spécialité 2019 (en vigueur à partir de septembre 2019) :*

Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
Onde mécanique progressive. Grandeurs physiques associées.  Célérité d'une onde. Retard.  Ondes mécaniques périodiques. Ondes sinusoïdales. Période. Longueur d'onde. Relation entre période, longueur d'onde et célérité.	Décrire, dans le cas d'une onde mécanique progressive, la propagation d'une perturbation mécanique d'un milieu dans l'espace et au cours du temps : houle, ondes sismiques, ondes sonores, etc. Expliquer, à l'aide d'un modèle qualitatif, la propagation d'une perturbation mécanique dans un milieu matériel. <i>Produire une perturbation et visualiser sa propagation dans des situations variées, par exemple : onde sonore, onde le long d'une corde ou d'un ressort, onde à la surface de l'eau.</i>  Exploiter la relation entre la durée de propagation, la distance parcourue par une perturbation et la célérité, notamment pour localiser une source d'onde. <i>Déterminer, par exemple à l'aide d'un microcontrôleur ou d'un smartphone, une distance ou la célérité d'une onde. Illustrer l'influence du milieu sur la célérité d'une onde.</i>  Distinguer périodicité spatiale et périodicité temporelle. Justifier et exploiter la relation entre période, longueur d'onde et célérité. Déterminer les caractéristiques d'une onde mécanique périodique à partir de représentations spatiales ou temporelles. <i>Déterminer la période, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale à l'aide d'une chaîne de mesure.</i> <b>Capacités numériques :</b> Représenter un signal périodique et illustrer l'influence de ses caractéristiques (période, amplitude) sur sa représentation. Simuler à l'aide d'un langage de programmation, la propagation d'une onde périodique. <b>Capacité mathématique :</b> Utiliser les représentations graphiques des fonctions sinus et cosinus.



Élément imposé : Dispositif des fentes d'Young**Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (Terminale S)
- Prérequis :
  - \* Caractéristiques d'une onde : période, fréquence, longueur d'onde ;
  - \* Lumière mono et polychromatique, caractère périodique et sinusoïdal.
- Séquence pédagogique : Cette leçon suivrait une leçon sur les caractéristiques des ondes, et traiterait sur les propriétés des ondes. Les ondes sonores auraient été vues avant, et ici on s'intéresse uniquement aux propriétés des ondes lumineuses. Naturellement après cette leçon, on s'intéresserait à d'autres propriétés des ondes au programme de terminale S, avec notamment l'effet DOPPLER. Un TP pourrait compléter cette leçon avec la détermination de la longueur d'onde d'un LASER ou de la taille d'un obstacle.
- Difficultés :
  - \* Ne pas confondre les phénomènes de diffraction et d'interférences ;
  - \* Considérer deux fentes comme deux sources ponctuelles ;
  - \* Interférences constructives et destructives, pas évident de voir qu'une intensité peut s'annuler alors qu'on ajoute deux sources...
- Objectifs de la leçon :
  - \* Connaître les deux phénomènes : diffraction et interférences ;
  - \* Savoir utiliser les relations démontrées dans la leçon pour retrouver des grandeurs par l'expérience (comme la longueur d'une d'une source, ou la taille d'une fente/d'un obstacle).
- Sources utilisées :

- (1) BERTHELOT, S., LÉVÊQUE, T., ARER, L., *Physique-Chimie Terminale*, Belin, 2020.
- (2) BARDE, M., BARDE, N., BAUDOIN, T., *Physique-Chimie Terminales*, Hachette éducation, 2020.
- (3) MÉLISSOPOULOS, A., *Les propriétés des ondes*, Lycée d'adulte, <https://www.lyceedadultes.fr/sitepedagogique/pages/PCTermS.html>, 2018.
- (4) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, *tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.

## Introduction

- Rappel (*Slides*) de ce qui a déjà été vu : Une onde possède une période  $T$ , une fréquence  $\nu$  ou  $f$  et une longueur d'onde  $\lambda$ .
- Comment fonctionne un CD ? Pourquoi un CD Blu-ray ne peut être lu que par un lecteur spécifique ?

## I Phénomène de diffraction

*Dans cette première partie, on met en évidence le phénomène de diffraction par l'expérience, et on le met en équation.*

### I.1 Mise en évidence du phénomène

*Cette sous-partie sert de mise en évidence expérimentale, naturellement la manipulation du LASER est indispensable.*

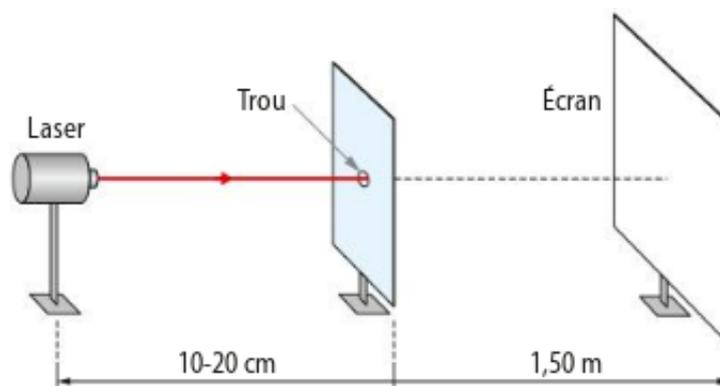
#### Expérience

Mise en évidence de la diffraction à l'aide du matériel suivant :

- Un banc optique ;
- Un L.A.S.E.R. ;
- Une fente de largeur variable ;
- Un écran.

L'idée est de montrer l'influence d'un obstacle et d'une fente sur le trajet des rayons du LASER.

- On commence par faire en sorte que la largeur de la fente soit trop faible pour qu'elle n'affecte pas le trajet du LASER. Ensuite on la réduit, et on voit des taches lumineuses.
- On remplace ensuite la fente par un cheveux, on remarque alors que l'effet est le même.



### Important

Le phénomène observé s'appelle le **phénomène de diffraction**. La figure observée sur l'écran s'appelle la **figure de diffraction**.

- On a remarqué que la taille de la fente a une influence sur le phénomène. Il y a donc une **condition à respecter** pour observer le phénomène de diffraction.

On remarque qu'il faut que la dimension de la fente soit du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du rayon diffracté. Cependant, pour les ondes lumineuses, on retiendra que la diffraction se produit pour une taille de fente d'environ 100 fois supérieure à la longueur d'onde<sup>3</sup>.

- Analogie avec les ondes mécanique : exemple de la digue dans le magnifique port du Havre.

○ On va s'intéresser plus particulièrement à la diffraction d'un rayonnement lumineux monochromatique. On va essayer de retrouver la longueur d'onde de ce rayonnement.

## I.2 Diffraction d'une onde lumineuse monochromatique

Dans cette sous-partie, on cherche à montrer, par l'expérience ou par une animation, que la longueur d'onde du rayonnement ainsi que la taille de la fente influencent l'écart angulaire du phénomène.

- Rappel (Slides) : Une onde lumineuse visible est une onde lumineuse dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 800 nm.

### Animation

Animation<sup>a</sup> pour observer l'influence de la longueur d'onde  $\lambda$  et de la taille de la fente (obstacle)  $a$  sur la figure de diffraction.

<sup>a</sup>. Site de l'Université du Mans : <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/fenteverte.html>

- Observations expérimentales :
  - \* Le phénomène est d'autant plus marqué que la longueur d'onde du rayonnement est grande.
  - \* Le phénomène est d'autant plus marqué que la taille de la fente est petite.
- La longueur d'onde du rayonnement, la largeur de la fente et l'écart angulaire sont reliés, pour  $\theta \ll 1$  rad par la relation :

$$\theta = \frac{\lambda}{a} \quad (11)$$

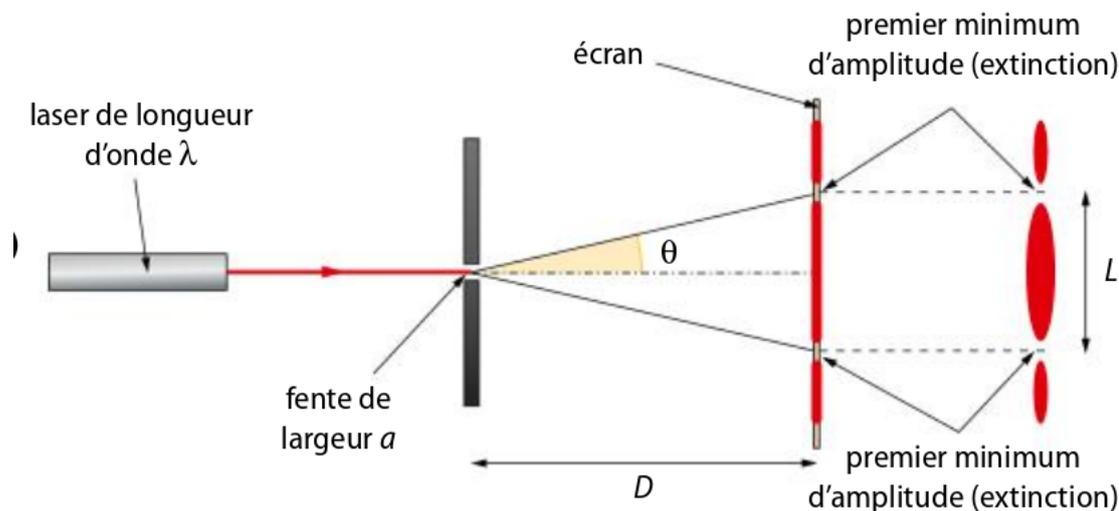
○ Quelle est la longueur d'onde de ce LASER ? On va pouvoir trouver maintenant qu'on a vu que la longueur d'onde avait une influence sur les observations à l'écran.

<sup>3</sup>. Voir après avec le laser, les dimensions sont assez différentes.

### I.3 Application du phénomène de diffraction

Cette sous-partie est à la fois calculatoire (on cherche à établir la relation  $L = \frac{2D\lambda}{a}$ ) et expérimentale (on l'applique!).

- On peut également trouver une relation entre l'écart angulaire  $\theta$  et la distance fente-écran :



On a alors, dans l'approximation des petits angles :

$$\tan \theta \approx \theta = \frac{L}{2D} \quad (12)$$

Donc d'après la relation (11) on obtient une relation entre la largeur de la tache et la largeur des tâches (entre autres) :

$$L = \frac{2D\lambda}{a}$$

- On mesure alors la largeur de la tâche<sup>4</sup> en changeant la largeur de la fente. (Faire par exemple trois points en préparation, et un en passage.)
  - On trace sur Regressi  $L = f\left(\frac{1}{a}\right)$  et la pente nous donne  $2D\lambda$  donc on remonte à  $\lambda$ .
- Voyons à présent ce que l'on peut observer si on ajoute une fente.

## II Phénomène d'interférences à 2 ondes

**ATTENTION** au conflit de notations : dans la majorité des livres, la largeur de la fente en diffraction est notée  $a$ , et la longueur  $S_1S_2$  est souvent notée  $a$  aussi. Ici, cette dernière sera appelée  $d$ .

4. Attention, il ne faut pas mesurer « au bord » des tâches, mais entre les centres des tâches sombres englobant la tache lumineuse de largeur  $L$ .

### Expérience

Mise en évidence du phénomène d'interférences, avec le même matériel que précédemment, mais avec un dispositif de fentes d'YOUNG.

## II.1 Montage des fentes d'Young

*Grâce à l'expérience réalisée dans l'introduction de la partie, on définit ici le phénomène observé.*

- Observations expérimentales : On observe une alternance de franges sombres et de franges brillantes.

### Important

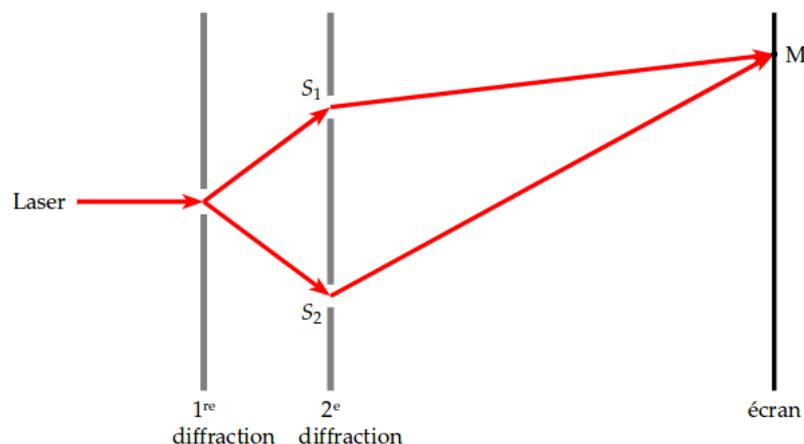
Ce phénomène est appelé **phénomène d'interférences**. On observe une **zone d'interférences** la région de l'espace où les ondes émises par plusieurs sources se superposent.

○ Cependant, lorsque l'on superpose deux lumières quelconques, on n'observe simplement une augmentation de l'intensité lumineuse, mais pas une alternance de franges sombres et de franges lumineuses. Il y a donc des conditions à respecter.

## II.2 Conditions d'interférences

*On parle maintenant des interférences constructives et destructives, en définissant la différence de marche.*

- Pour que deux ondes interfèrent, ils faut qu'elles aient rigoureusement la même fréquence  $f$ , *ie.* de même longueur d'onde  $\lambda$ .
- On peut définir la différence de marche<sup>5</sup>  $\delta$ .



5. Source schéma : Cours en ligne, Lycée d'adultes, Paris

Elle est définie par la différence entre la distance parcourue par un rayon issu de la source 2 et un rayon issu de la source 1, jusqu'au point  $M$  :

$$\delta = S_2M - S_1M$$

Si  $x$  est la distance qui sépare le point  $M$  de l'axe optique, on a la relation :

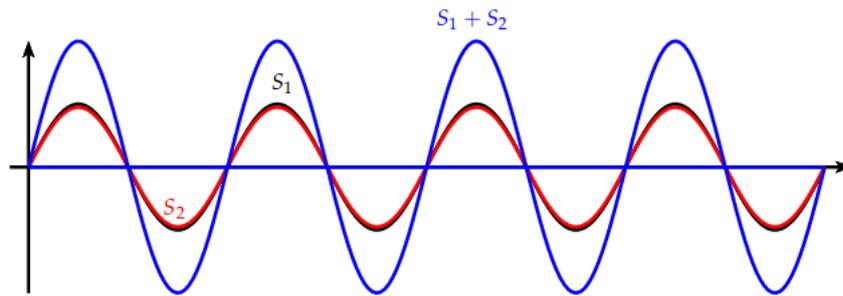
$$\delta = \frac{x \cdot d}{D} \quad (13)$$

- Selon la position du point  $M$  considéré, on peut alors se trouver sur une frange sombre où sur une frange brillante :

#### Définition

Si le point  $M$  se trouve sur un maximum d'intensité lumineuse, *ie.* une frange brillante, on parle d'**interférences constructives**. La différence de marche est alors un multiple de la longueur d'onde :

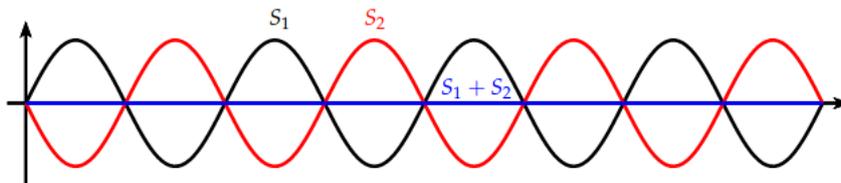
$$\delta = k \cdot \lambda, \quad k \in \mathbb{Z}$$



#### Définition

Si le point  $M$  se trouve sur un minimum d'intensité lumineuse, *ie.* une frange sombre, on parle d'**interférences destructives**. La différence de marche est alors reliée à la longueur d'onde par :

$$\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda, \quad k \in \mathbb{Z}$$



○ Faire varier la distance entre les fentes, et la distance entre l'écran et les fentes. Voir l'effet sur l'interfrange, montrer qu'il y a une dépendance.

## II.3 \*Interfrange d'une figure d'interférences

*Sous-partie sans grand intérêt, facilement supprimable si l'on manque de temps...*

- L'**interfrange**  $i$  est définie par la différence entre deux franges sombres ou deux franges brillantes consécutives.
- Calcul de l'interfrange :

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda D}{d}$$

### Conclusion

- Ouverture : La lecture des CD s'effectue grâce à la diffraction.
- Ouverture : interférence en lumière blanche.

#### Autre(s) possibilité(s) de plan

- On peut ne traiter **que la diffraction** (même si c'est un peu dommage), en faisant une partie sur la mise en évidence expérimentale avec tous les paramètres qui varient, une autre avec la détermination possible de grandeurs, et une dernière sur des applications.
- On peut ne traiter **que les interférences** en rentrant plus dans le détail, avec la lumière blanche, etc.

#### Questions auxquelles on peut s'attendre

☞ Il faut savoir démontrer toutes les relations :

-  $\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$  ;

-  $i = \frac{\lambda \cdot D}{d}$

- le terme d'interférences.

☞ Ici, cela n'a pas été dit, mais il faut savoir justifier le fait que les deux sources doivent être cohérentes pour interférer.

☞ Concernant la diffraction, il faut pouvoir justifier succinctement que la présence d'une fente ou d'un obstacle produit le même effet (*cf.* théorème de BABINET, fonction de transparence).

☞ Connaître le montage de FRAUNHOFFER (source à l'infini, image à l'infini).

**PROGRAMME OFFICIEL (TERMINALE, 2020) :**

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
Diffraction d'une onde par une ouverture : conditions d'observation et caractéristiques. Angle caractéristique de diffraction.	Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes. Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture. <i>Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées.</i> <i>Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction dans le cas d'une onde lumineuse diffractée par une fente rectangulaire en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.</i>
Interférences de deux ondes, condition d'observation. Interférences constructives, Interférences destructives.	Caractériser le phénomène d'interférence de deux ondes et en citer des conséquences concrètes. Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène. <i>Tester les conditions d'interférences constructives ou destructives à la surface de l'eau dans le cas de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase.</i>



## PHÉNOMÈNES DE POLARISATION EN OPTIQUE (LYCÉE)

### Élément imposé : Loi de Biot

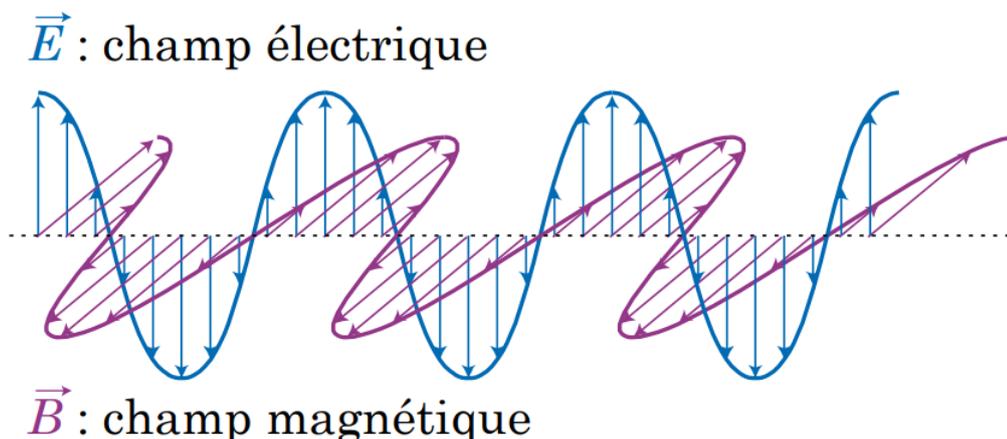
#### Introduction pédagogique

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire
- Prérequis :
  - \* Onde électromagnétique : champs électrique  $\vec{E}$ , champs magnétique  $\vec{B}$ , caractère ondulatoire de la lumière ;
  - \* Caractéristiques des ondes : ondes transversales, ondes longitudinales ;
  - \* Notion d'éclairement, de filtre et de couleur complémentaire ;
  - \* Chimie : molécule chirale, énantiomère.
- Séquence pédagogique : Dans cette leçon qui s'inscrit dans le programme des classe de STL, on se restreint à la polarisation rectiligne. .
- Difficultés :
  - \* Confusion entre direction de polarisation et de propagation ;
  - \* Les champs ne sont pas visibles à l'œil ;
  - \* Aspect mathématique et géométrique de la leçon.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Définir la polarisation d'une onde lumineuse ;
  - \* Savoir comment polariser une onde ;
  - \* Comprendre le lien entre les molécules chirales et la polarisation (activité optique).
- Sources utilisées :

- (1) *La polarisation*, Lycée polyvalent de la Borde Basse, Castres, Cours en ligne.
- (2) Académie de Montpellier, Eduscol Terminale STL, <https://spcl.ac-montpellier.fr/>, Cours en ligne.
- (3) Académie de Montpellier, Terminale STL, SPCL Ondes, *Ondes électromagnétiques et polarisation*, Cours en ligne.
- (4) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, *tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.

## Introduction

- On cherche à déterminer la concentration en saccharose dans un sirop pour la toux.
- Rappel : On a déjà vu que la lumière est une onde électromagnétique (O.E.M.). Elle est constituée (comme son nom l'indique...) d'un champ électrique  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  orthogonaux entre eux et à la direction de propagation,  $\vec{u}$ <sup>6</sup>.



---

*Comment mesurer cette concentration en saccharose grâce à la lumière ?*

---

## I Description du phénomène de polarisation

*Cette partie est une partie théorique et assez descriptive, elle a pour but de définir le phénomène de polarisation.*

### I.1 Polarisation

- On voit la lumière blanche car notre oeil est sensible au champ électrique<sup>7</sup>.
- On s'intéresse donc à la direction de l'espace sur laquelle le champ électrique est porté.

#### Définition

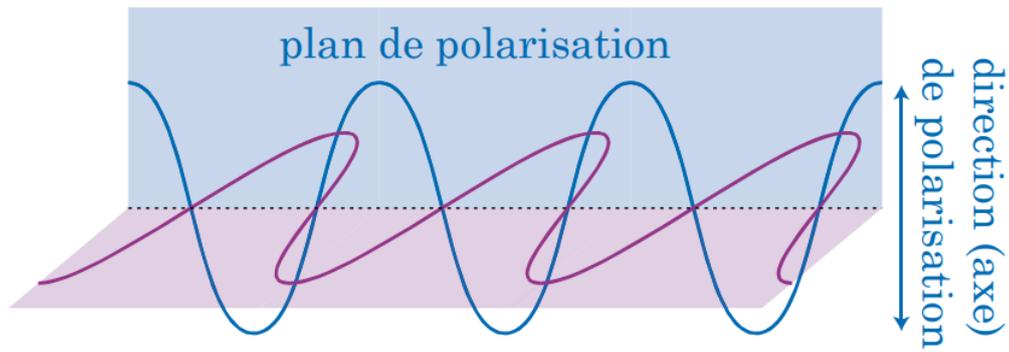
Le plan qui contient le champ électrique est appelé le **plan de polarisation** de l'onde électromagnétique.

La droite parallèle à la direction du champ électrique est appelée **axe de polarisation** ou **direction de polarisation**.

---

6. Source schéma : [3]

7. Notre oeil est sensible à l'éclairement  $\mathcal{E} = \langle \vec{E}^2 \rangle$



### Important

Attention à ne pas confondre direction de propagation et direction de polarisation.

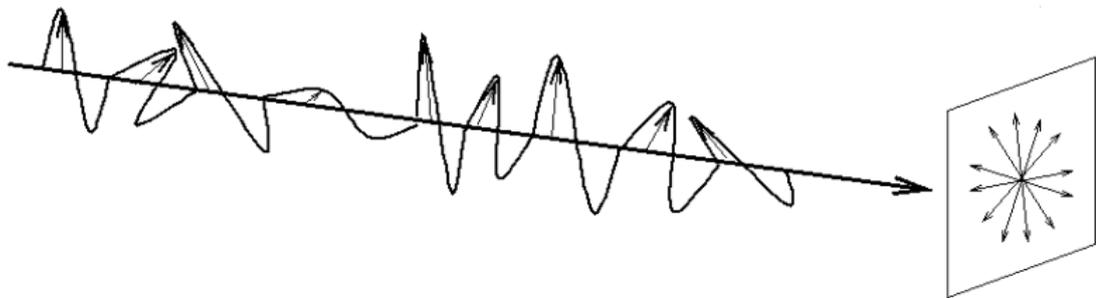
○ Mais cette direction de polarisation est-elle constante, régulière ?

## I.2 Cas de la lumière naturelle

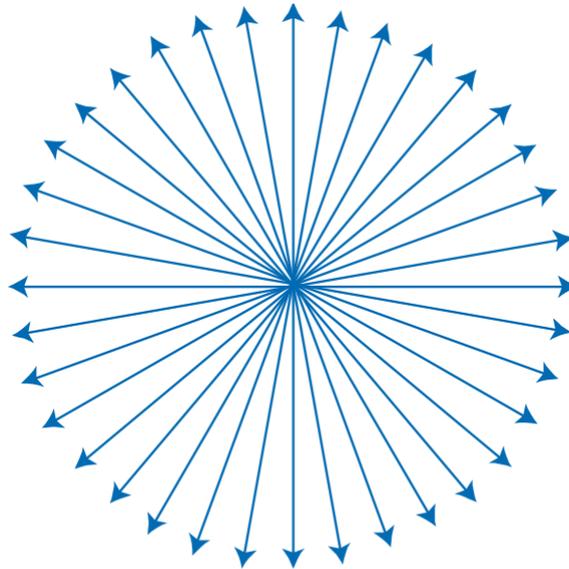
### Animation

Tout au long de cette partie, voire au long de la leçon, on peut utiliser cette vidéo qui consiste à faire une analogie entre la corde et la lumière pour observer une polarisation.

- La lumière naturelle, *ie.* la lumière émise par le soleil peut être représentée comme la propagation d'une O.E.M. selon la direction  $x$  et on peut représenter le vecteur  $\vec{E}$  :



- Si on place notre œil dans la direction de **propagation** de l'onde, on voit un champ électrique dans toutes les directions de l'espace :



## *Lumière naturelle*

### Définition

On appelle **lumière naturelle** un rayonnement au sein duquel toutes les directions de polarisation sont présentes. On dit que la lumière naturelle est **non polarisée**.

⊖ *Mais tous les rayonnements lumineux n'ont pas une répartition aléatoire de la direction du champ électrique.*

### I.3 Polarisation rectiligne et polariseur

- Certaines lumières ont un vecteur  $\vec{E}$  qui n'est porté que par une seule direction de l'espace. si on place notre oeil dans la direction de **propagation** de l'onde, on voit donc le champ sur une seule direction :

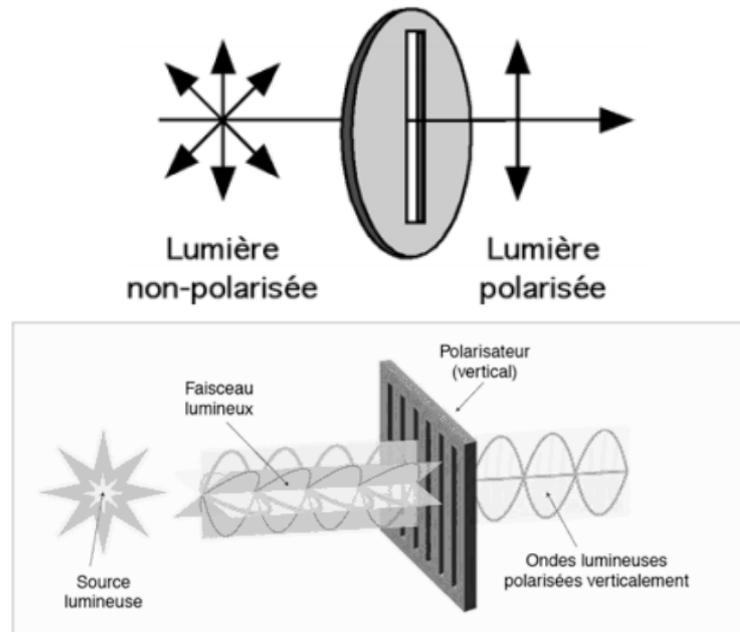


## *Lumière polarisée verticalement*

### Définition

On parle de **lumière polarisée rectilignement** si le champ électrique  $\vec{E}$  a une **direction fixe** dans l'espace.

- Comment polariser une onde lumineuse? On veut sélectionner une seule direction du champ électrique. Pour cela, on utilise un polariseur<sup>8</sup>.



### Définition

Le polariseur sélectionne un seul plan de polarisation. Nous avons fabriqué une onde polarisée rectilignement (ou linéairement). Le plan vertical s'appelle le plan de polarisation.

- Polariseurs alignés, polariseurs croisés.
  - On a donc un plan de polarisation dans lequel oscille le champs électrique. Certains corps peuvent le dévier.

## II Déviation du plan de polarisation

*Cette partie est une partie d'application. Une fois la théorie expliquée, on peut, grâce à la loi de BIOT, déterminer par exemple des concentrations*

### II.1 Loi de Biot

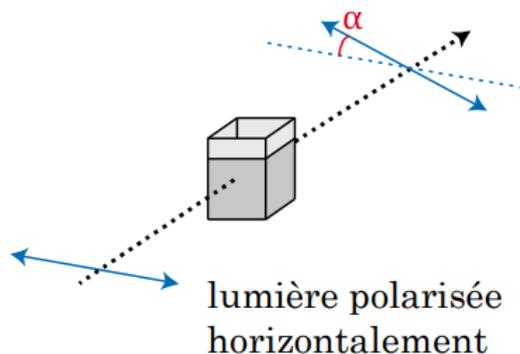
- On va maintenant pouvoir utiliser cette notion de polarisation à des fins d'analyse.

8. Source schémas : [3]

### Définition

Certains corps ont la propriété de faire pivoter la direction de polarisation d'une onde polarisée qui les traverse : elles sont **optiquement actives**.

L'angle  $\alpha$  dont la direction a tourné est le **pouvoir rotatoire** de l'objet.



- L'angle de déviation  $\alpha$  du plan de polarisation de la lumière polarisée est proportionnel à la concentration  $C$  en espèce chirale de l'échantillon :

$$\alpha = [\alpha]_{\lambda}^T \cdot \ell \cdot C \quad (14)$$

Avec :

- \*  $\alpha$  : angle de rotation du plan de polarisation de la lumière polarisée rectilignement ;
- \*  $[\alpha]_{\lambda}^T$  : pouvoir rotatoire spécifique ( $^{\circ} \cdot \text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{dm}^{-1}$ )
- \*  $\ell$  : longueur de la cuve (dm) ;
- \*  $C$  : concentration de l'espèce chirale ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

☺ Par analogie avec la loi de BEER-LAMBERT, on peut déterminer par étalonnage des concentrations.

## II.2 Application à la détermination d'une concentration

### Expérience

Détermination de la concentration en saccharose d'une solution <sup>a</sup>.

a. [https://spcl.ac-montpellier.fr/moodle/pluginfile.php/4304/mod\\_resource/content/1/Seq08-MesurerChimie\\_P3-Pola.pdf](https://spcl.ac-montpellier.fr/moodle/pluginfile.php/4304/mod_resource/content/1/Seq08-MesurerChimie_P3-Pola.pdf)

## Conclusion

- Réponse à la problématique : Méthode d'un dosage par étalonnage, on a réussi à trouver la concentration. Estimation des incertitudes ?
- Ouverture : Les cristaux liquides eux-aussi peuvent dévier le plan de polarisation de la lumière.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ▣ Estimation des incertitudes sur la mesure de concentration ;
- ▣ Polarisation autres que rectiligne ;
- ▣ Équations de MAXWELL, équations de MAXWELL dans le vide.

Dans le vide,  $\rho(M, t) = 0$  et  $\vec{j}(M, t) = \vec{0}$  donc les équations de MAXWELL s'écrivent de la manière suivante :

$$\begin{aligned}\operatorname{div} \vec{E}(M, t) &= 0 \quad (\text{MG}) \\ \operatorname{rot} \vec{E}(M, t) &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}(M, t) \quad (\text{MF}) \\ \operatorname{div} \vec{B}(M, t) &= 0 \quad (\text{M}\Phi) \\ \operatorname{rot} \vec{B}(M, t) &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}(M, t) \quad (\text{MA})\end{aligned}$$

Et c'est (MF) qui nous permet d'écrire que  $\vec{B}$ ,  $\vec{k}$  et  $\vec{E}$  forment un trièdre direct.

- ▣ Cristaux liquides ;
- ▣ Angle de BREWSTER ;
- ▣ Lames à retard ;
- ▣ Fonctionnement du polarimètre de LAURENT <sup>a</sup>

<sup>a</sup>. *Chimie générale expérimentale, Tout pour réussir les TP aux concours*, J. PIARD, De Boeck, 2018, Chapitre 4 page 135

**PROGRAMME OFFICIEL (TERMINALE STL) :**

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
<p>Polarisation naturelle et rectiligne des ondes électromagnétiques. Polariseur, analyseur.</p> <p>Activité optique. Loi de BIOT. Pouvoir rotatoire.</p>	<p>Associer la direction de polarisation d'une onde électromagnétique à la direction du champ électrique. Prévoir l'effet d'un polariseur sur une lumière naturelle et sur une onde polarisée rectilignement. Citer des exemples d'ondes partiellement polarisées et non polarisées. Associer l'activité optique d'une solution à la chiralité des espèces chimiques. Exploiter la loi de BIOT. Relier le pouvoir rotatoire d'un mélange de stéréoisomères à sa composition.</p> <p><b>Capacités expérimentales :</b> Produire et analyser une lumière polarisée rectilignement. Distinguer une lumière polarisée rectilignement, non polarisée ou partiellement polarisée. Déterminer une concentration d'une espèce optiquement active à partir de la mesure de son pouvoir rotatoire.</p>

Élément imposé : Bilan dans un convertisseur d'énergie**Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (Term STL)
- Prérequis :
  - \* Électrocinétique : notions de tensions et d'intensité, convention générateur et convention récepteur, loi d'OHM, constitution d'une bobine, notion de spire.
  - \* Capacités expérimentales : Mesure d'une tension et d'une intensité.
- Séquence pédagogique : Cette leçon se placerait au milieu d'une séquence d'électricité en TSTL. Il s'agit d'appliquer ce qui aurait été vu de manière « théorique » grâce à un précédent cours concernant les dipôles, leur représentation, la loi des mailles et des nœuds. La notion de puissance électrique serait en revanche introduite dans cette leçon. L'**effet Joule** est aussi introduit. La séquence se poursuivrait par la conversion d'énergie chimique en énergie électrique.
- Difficultés :
  - \* Les signes liés aux conventions, et aux puissances reçues et fournies ;
  - \* Le rôle du transformateur, le fait qu'une tension soit très élevée mais pas l'intensité.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre comment l'énergie électrique peut partir d'une conversion, être transportée puis être utilisée ;
  - \* Interpréter l'effet JOULE comme une conversion d'énergie électrique en énergie thermique.
- Sources utilisées :

- (1) *Transport et distribution de l'énergie électrique*, Chiphoumie, Cours en ligne.
- (2) BRAMAND, P, DURANDEAU, J-P., *et coll.*, *Physique Chimie Term. STI2D/STL*, Hachette éducation, 2012.
- (3) BRAMAND, P, DURANDEAU, J-P., *et coll.*, *Physique Chimie 1res STI2D/STL*, Hachette éducation, 2011.
- (4) GEANDROT, J., [physagreg.fr](http://physagreg.fr), 2020, Cours en ligne.
- (5) Site EDF, [edf.fr](http://edf.fr) (Schémas, vidéos, chiffres pour introduire la leçon)

# Introduction



Le but de cette leçon est de suivre l'énergie électrique, du début à la fin c'est-à-dire de sa production à sa consommation.

---

*D'où provient l'énergie qui circule dans les fils à la maison ? Comment en perdre le moins possible ?*

---

## I Générer l'électricité

### I.1 Générateur et puissance fournie

- Comme son nom l'indique, le générateur génère de l'électricité.

#### Définition

Le **générateur** est un dispositif permettant de fournir de l'énergie électrique dans un circuit.

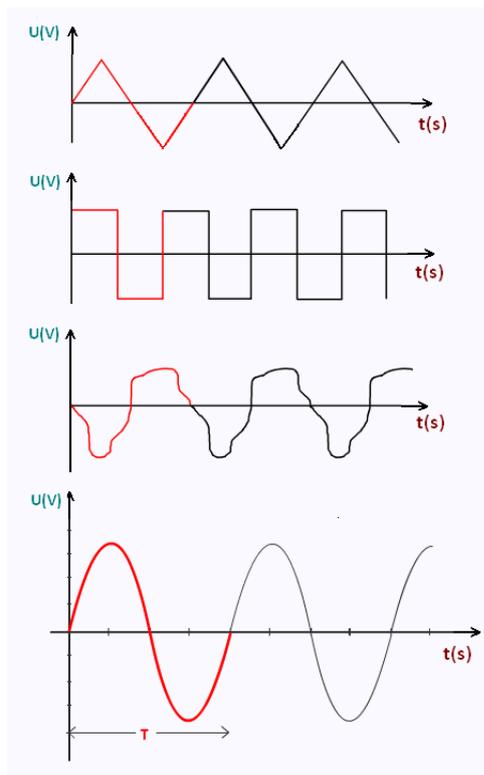
- Le générateur est un **dipôle actif** : c'est lui qui apporte l'énergie. On le représente en convection générateur.

#### Définition

On appelle **puissance fournie** par le générateur la grandeur définie par :

$$P = U_G \cdot i = \frac{\mathcal{E}}{\Delta t}$$

- *Slides* Il existe deux types de générateurs : les générateur de tension continue et les générateurs de tension alternative.



U (en V)



- Caractéristiques pour ces générateurs : fréquence  $f$ , période  $T$ , amplitude, valeur efficace<sup>9</sup>.

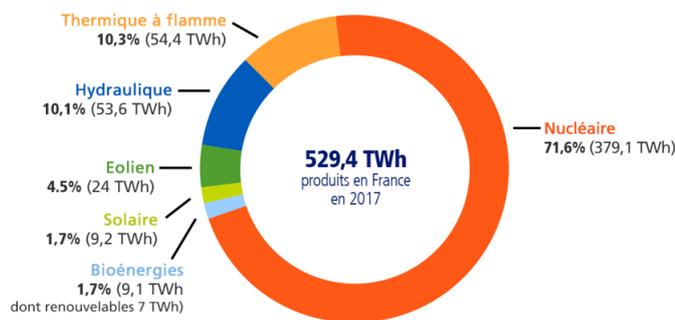
○ Mais comment faire pour la produire, cette énergie modélisée par le générateur ?

## I.2 Différents moyens pour produire l'énergie électrique

- Pour produire de l'énergie électrique, on transforme une énergie (mécanique, solaire, chimique, nucléaire, ...) et énergie électrique grâce à des centrales.

Projection du graphique EDF pour montrer la répartition.

<sup>9</sup>. la valeur efficace d'un courant alternatif est celle qui produit la même puissance consommée par effet Joule qu'un courant continu de même valeur



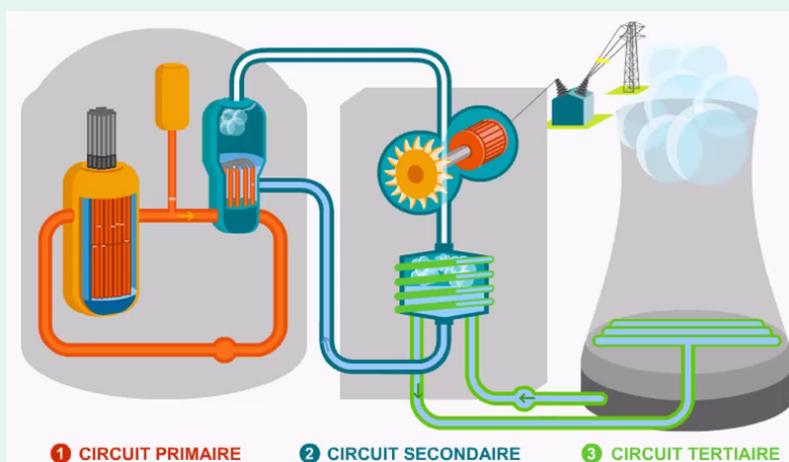
La production française d'électricité en 2017

Source RTE - bilan électrique 2017

© EDF

### Animation

Projection d'une animation<sup>a</sup> pour montrer le fonctionnement d'une centrale nucléaire.



a. <http://www.physagreg.fr/animations/animation-centrale-nucleaire.swf>

○ Mais une fois produite, comment l'énergie électrique est-elle acheminée jusqu'à nos maisons ?

## II Transporter l'énergie électrique

On voit souvent, dans la campagne, les lignes à haute tension (LHT). Mais pourquoi utilise-t-on de tels dispositifs ?

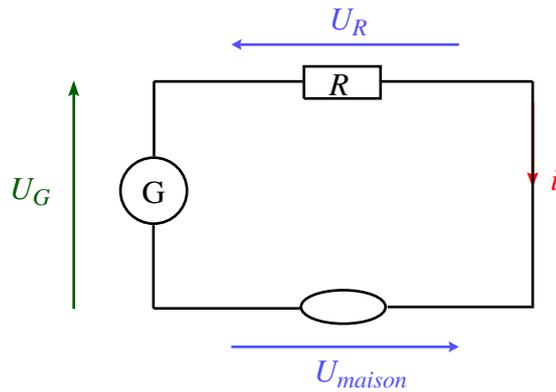
Problème : longues distances et résistivité linéique des fils. Pour les LHT,  $R_l \approx 0,1 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$ .

### Expérience

Montage électrique avec générateur, boîte à décade de résistances, ampèremètre et ampoule. On augmente la valeur de  $R$  et on montre l'effet que ça a sur le circuit (baisse de l'intensité lue sur l'ampèremètre et baisse de l'intensité lumineuse).

### II.1 Les pertes dans les lignes haute tension

- Bilan de puissance entre un générateur (*la centrale*), une résistance (*la résistance linéique des fils*) et un dipôle quelconque (*la maison*)



\* Loi des mailles :  $U_G = U_R + U_{maison}$  ;

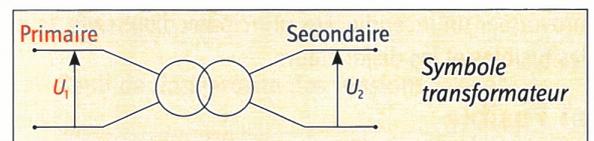
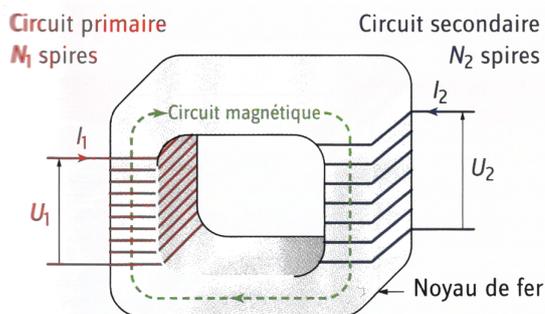
\* En multipliant la loi des mailles par  $i$ , on fait apparaître des puissances et on s'attarde sur le terme d'**effet Joule**  $\mathcal{P}_{diss} = U \cdot i = R \cdot i^2$ .

○ Comment limiter au maximum les pertes par effet JOULE ? On doit se placer à très haute tension.

## II.2 Le transformateur

Pour cela, on utilise un transformateur.

- Un transformateur électrique est constitué d'un circuit magnétique fermé sur lequel sont enboîtés deux enroulements électriquement indépendants (bobines) : le **primaire** et le **secondaire**.



### Définition

On définit le rapport de transformation  $m$  grâce aux tensions de sortie et d'entrée et du nombre de spires des circuits primaire et secondaire :

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Avec :

- $U_1$  la tension à l'entrée du transformateur (V) ;
- $U_2$  la tension à la sortie du transformateur (V) ;
- $N_1$  le nombre de spires du circuit **primaire** (sans unité) ;
- $N_2$  le nombre de spires du circuit **secondaire** (sans unité).

et ;

Commentaire sur  $m$  plus grand ou plus faible que 1 en fonction des paramètres. Commentaire sur l'adaptation des tensions en fonction du nombre de spires qu'on met.\*

- Schéma de la chaîne entre la centrale et la maison, en intégrant les deux transformations :



○ Maintenant que la tension est adaptée, l'énergie électrique peut accéder à la maison. On peut maintenant l'utiliser.

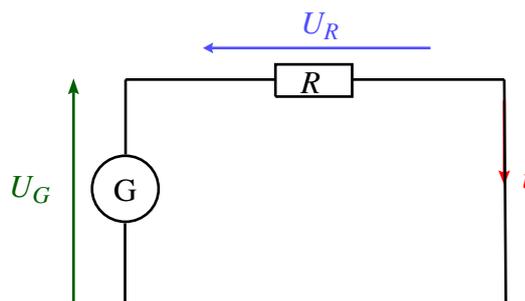
## III Utilisation de l'énergie électrique

Les appareils électriques sont des récepteurs. On les écrits en convention récepteurs.

### III.1 Modélisation et schématisation d'un appareil électrique : la bouilloire

Les pertes par effet JOULE peuvent-être positives : bouilloire, radiateur.

- On peut modéliser une bouilloire (générateur, résistance) par le simple circuit suivant :



- Bilan de puissance par loi des mailles. Idéalement,  $\mathcal{P}_{fournie} = \mathcal{P}_{reçue}$
- Essayons de comparer les deux valeurs pour voir si l'énergie se conserve.

### III.2 Bilan d'énergie sur la bouilloire

On peut réaliser cette expérience et réaliser nous-même ce bilan de puissance.

#### Expérience

On fait le montage de la modélisation d'une bouilloire par une résistance chauffante. On mesure  $U_G$  la tension aux bornes du générateur, on mesure  $I$  l'intensité du courant circulant dans le circuit. On met une masse  $m = 500$  g d'eau dans le calorimètre, on mesure la température initiale  $T_i$ .

On démarre le circuit en lançant le chronomètre. Au bout de  $\Delta t = 3$  min on arrête le circuit, on mesure la température finale  $T_f$ . Le but est de comparer l'énergie interne  $\Delta U_{eau} = c_{pm} \times m \times (T_f - T_i)$  et l'énergie dépensée par le générateur  $\Delta E_{elec} = U \times I \times \Delta T$

Attention à ne pas oublier la **masse en eau** du calorimètre !

## Conclusion

- On sait maintenant tout le traitement qui est fait à l'énergie électrique avant d'arriver aux prises ;
- On sait qu'il y a des pertes mais on peut les minimiser ;
- Que faire pour les minimiser encore plus ?
- Ouverture sur le stockage de l'énergie.

#### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Discussion sur le fonctionnement d'un transformateur (circuits primaire et secondaire), notion d'**inductance mutuelle**<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>. *Physique tout-en-un PCSI*, B. SALAMITO, Dunod, page 1081

#### PROGRAMME OFFICIEL (TERMINALE STL) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Loi des noeuds, loi des mailles. Loi d'OHM.	Citer et exploiter la loi des noeuds et la loi des mailles dans le cas d'un circuit simple. citer et exploiter la loi d'OHM.
Puissance et énergie électrique. Effet JOULE.	Citer et exploiter l'expression de la puissance électrique fournie par un générateur et reçue par un récepteur. Citer et exploiter la relation entre puissance et énergie. Analyser les échanges d'énergie dans un circuit électrique simple. Interpréter l'effet JOULE comme une conversion d'énergie électrique en énergie thermique, en citer des applications.

Élément imposé : Conservation de l'énergie mécanique**Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (TS, 1ere spé. ap. 2019)
- Prérequis :
  - \* Mécanique : notion de système, de référentiel, de force, de champ de pesanteur, vecteurs position vitesse et accélération, expression du poids ;
  - \* Début de la séquence sur l'aspect énergétique : définition des énergies cinétique et potentielle de pesanteur ;
  - \* Définition d'un système thermodynamique.
- Séquence pédagogique : Ce chapitre se place en terminale S ou première nouveaux programmes. Les notions nouvelles introduites dans cette leçon sont le **travail** d'une force constante, l'**énergie mécanique** et l'**énergie interne** d'un système. Cette leçon fait le lien entre la fin d'une séquence de mécanique du point et le début d'une séquence de thermodynamique qui se poursuivrait avec les transferts thermiques expliquant les échanges de chaleurs entre un système et l'extérieur. Un TP sur le pendule simple pourrait venir compléter cette leçon.
- Difficultés :
  - \* L'énergie est une notion connue des élèves, mais elle est tout de même abstraite...
  - \* Notion d'énergie totale, une partie n'est pas visible "à l'œil" ;
  - \* Une force conservative n'est pas une force « qui se conserve ».
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre ce que veut dire conservation de l'énergie, et comprendre que l'énergie ne peut ni apparaître, ni disparaître : elle se transfère.
- Sources utilisées :

- (1) RUFFENACH, M., CARIAT, T., MORA, V., *Physique-Chimie Terminale S, programme 2012*, Dunod, 2012.
- (2) BELLIER, J-P., CALAFELL, *et coll.*, *Physique/Chimie 1ère - Livre élève*, Hachette éducation, 2019.
- (3) SANZ, M-N., SALAMITO, B., *et coll.*, *Physique PCSI, tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019.

## Introduction

- L'**énergie** est une notion présente dans le langage courant. Dans le LAROUSSE, la définition est la suivante :

*Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction. (Unité SI le joule.)*

L'énergie est donc une grandeur qui se « conserve ». Mais qu'est-ce que cela veut-dire, « se conserver » ?

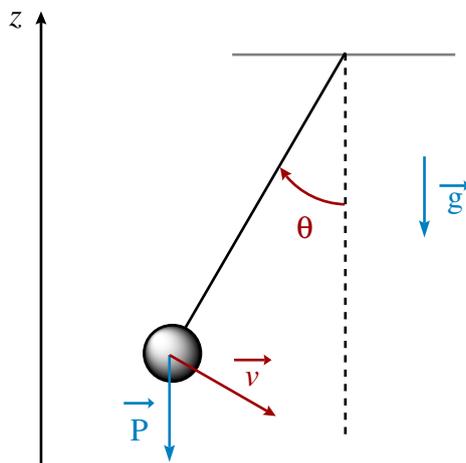
---

*Comment interpréter la définition de l'énergie « c'est une grandeur qui se conserve au cours du temps » ?*

---

## I Conservation de l'énergie mécanique

On a vu qu'une force modélise un **action mécanique**. Pour traduire les effets d'un **déplacement** sur l'action mécanique que traduit la force, on a un nouvel outil : le **travail**. On prend comme système le pendule suivant, il n'est soumis qu'à une seule force : son poids. **On néglige les frottements**.



## I.1 Le travail d'une force

### Définition (Travail d'une force)

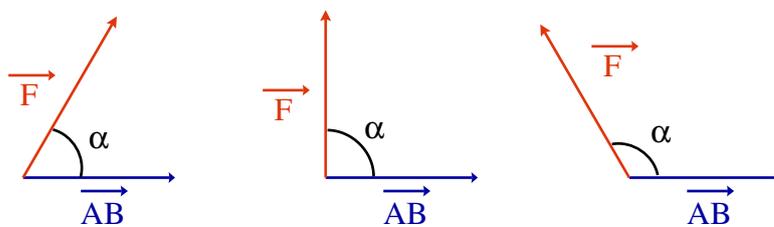
Le **travail**  $W_{AB}(\vec{F})$  d'une force constante au cours d'un déplacement d'un point  $A$  à un point  $B$  est donné par la relation :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB} \quad (15)$$

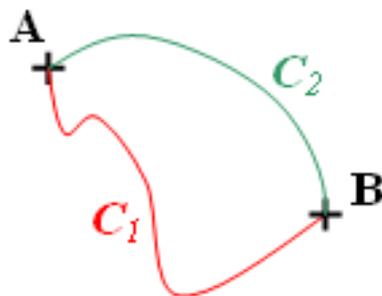
Avec :

- $W_{AB}(\vec{F})$  s'exprime en J ;
- la norme de  $\vec{F}$  s'exprime en N ;
- la norme  $\vec{AB}$  s'exprime en m.

- On peut exprimer le produit scalaire de la définition du travail de la force  $\vec{F}$ . Par définition,  $\vec{F} \cdot \vec{AB} = \|\vec{F}\| \times \|\vec{AB}\| \times \cos \alpha$ , avec  $\alpha = (\vec{F}; \vec{AB})$ .

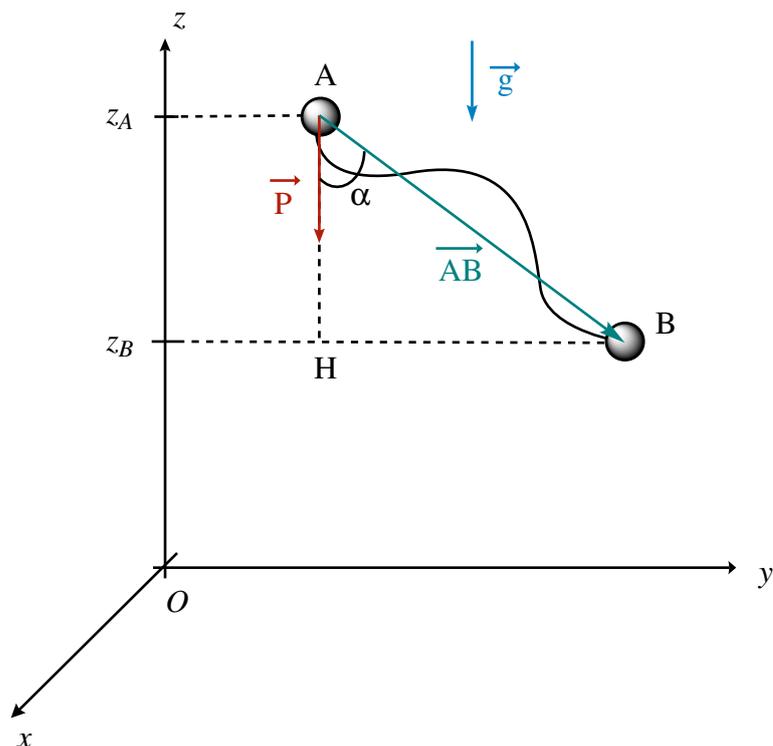


- Selon la valeur de l'angle, on qualifie différemment le travail de la force  $\vec{F}$  :
  - \* Si  $\alpha < \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow W_{AB}(\vec{F}) > 0$ , on dit que le travail est **moteur**.
  - \* Si  $\alpha = \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow W_{AB}(\vec{F}) = 0$ , on dit que la force **ne travaille pas**.
  - \* Si  $\alpha > \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow W_{AB}(\vec{F}) < 0$ , on dit que le travail est **résistant**.
- Pour certaines forces, le **travail ne dépend pas du chemin suivi**, on parle alors de **forces conservatives**. Prenons l'exemple du poids.



Par définition du travail, on a :

$$W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AB}$$



On peut appliquer une relation de CHASLES pour faire apparaître le point  $H$  :  $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{AH} + \overrightarrow{HB}$ . Le travail du poids s'exprime alors :

$$W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \overrightarrow{AH} + \underbrace{\vec{P} \cdot \overrightarrow{HB}}_{=0} = m \vec{g} \cdot \overrightarrow{AH} = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$$

On reconnaît alors la différence d'énergie potentielle de pesanteur (à projeter en slides)  $\Delta \mathcal{E}_{P_P, A \rightarrow B} = \mathcal{E}_{P_P, B} - \mathcal{E}_{P_P, A} = m \cdot g \cdot (z_B - z_A)$ . On a alors  $\Delta \mathcal{E}_{P_P, A \rightarrow B} = -W_{AB}(\vec{P})$

- Une force dont le travail dépend du chemin suivi est appelée **force non conservative**. C'est le cas par exemple d'une force de frottement.

○ On va maintenant mettre en évidence cette énergie potentielle sur l'exemple du pendule, et montrer que l'énergie cinétique  $y$  est liée.

## I.2 Étude énergétique du pendule simple

*Le but de cette sous-partie est d'étudier les variations de vitesse et position du système, en particulier de comprendre que lorsque l'une est maximale, l'autre est minimale.*

- Le pendule est dit **simple** si on considère le fil inextensible et de masse négligeable devant celle de la sphère.

### Important

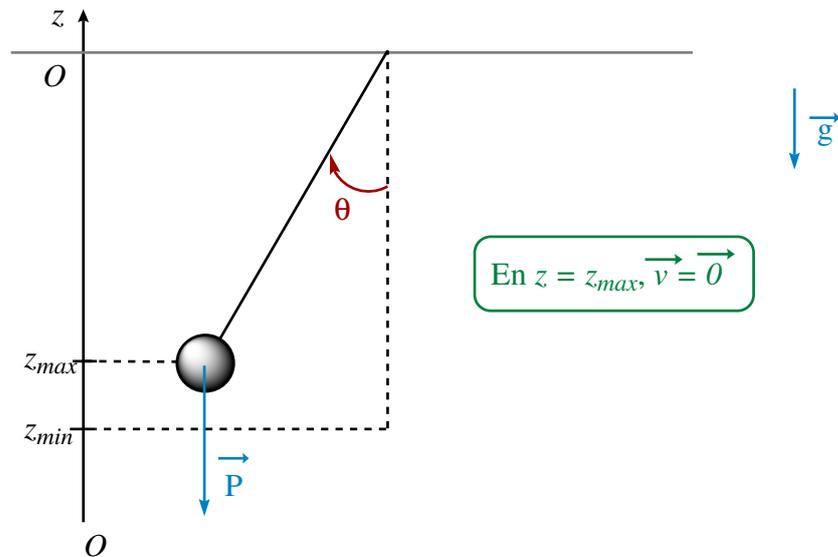
Ici, on se place dans l'approximation où **on néglige les frottements**.

- (Slides) On rappelle l'expression des énergies cinétique et potentielle de pesanteur de manière générale :

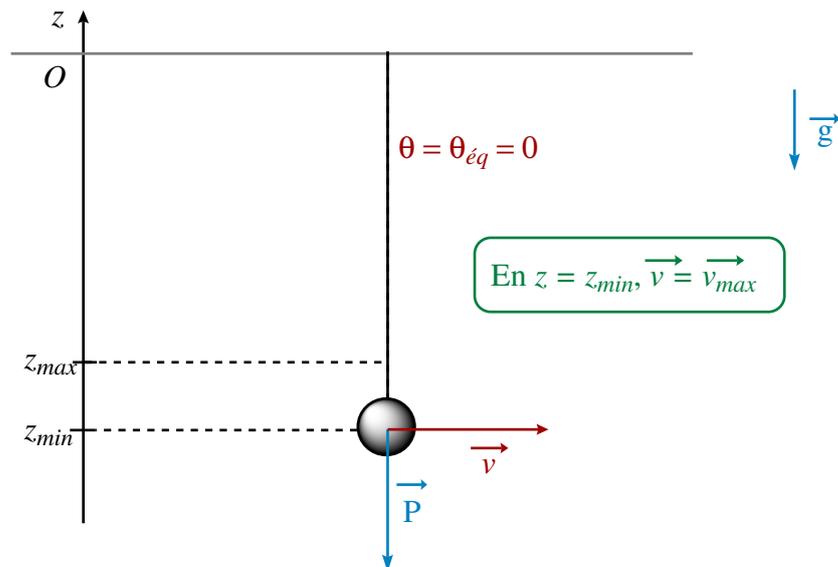
$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \text{ et } \mathcal{E}_{pp} = m \cdot g \cdot z$$

- Lors de l'oscillation du pendule simple, le système passe par des états d'énergie bien particuliers.

\* Lorsque le pendule est à son élongation maximale, la vitesse s'y annule, mais sa position  $z$  est maximale. Donc  $\mathcal{E}_c = \mathcal{E}_{c,min}$  et  $\mathcal{E}_{pp} = \mathcal{E}_{pp,max}$ .

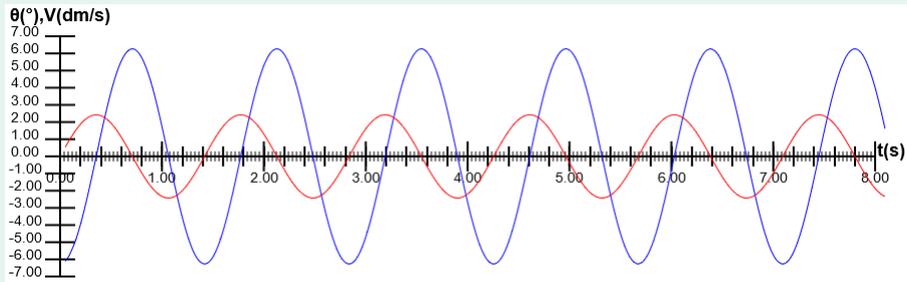


\* Lorsque le pendule passe par sa position d'équilibre ( $\theta = \theta_{\acute{e}q} = 0$ ), la vitesse y est maximale mais la position  $z$  est minimale. Donc  $\mathcal{E}_c = \mathcal{E}_{c,max}$  et  $\mathcal{E}_{pp} = \mathcal{E}_{pp,min}$ .



### Animation

Sur cette animation, on peut observer les variations de la vitesse et de la position.



- On peut alors poser une **grandeur qui se conserve** au cours du mouvement. On l'appelle l'**énergie mécanique**.

### Définition

On définit l'**énergie mécanique**  $\mathcal{E}_m$  d'un système de masse  $m$  comme la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle :

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_{pp} \quad (16)$$

L'énergie mécanique dépend donc de la **position** et de la **vitesse** du système.

○ Cette énergie mécanique est une grandeur qui va nous donner une information sur la dissipation d'énergie du système.

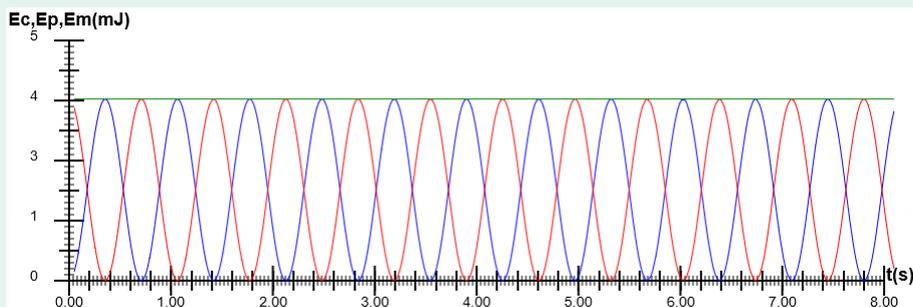
## I.3 Variation de l'énergie mécanique

*L'objectif de cette sous-partie est d'étudier la variation de l'énergie mécanique pour un système sans perte et avec pertes dues aux frottements.*

- Conservation de l'énergie mécanique

### Animation

Sur cette animation, on peut observer les variations des énergies potentielles et cinétiques, et donc observer la conservation de l'énergie mécanique.

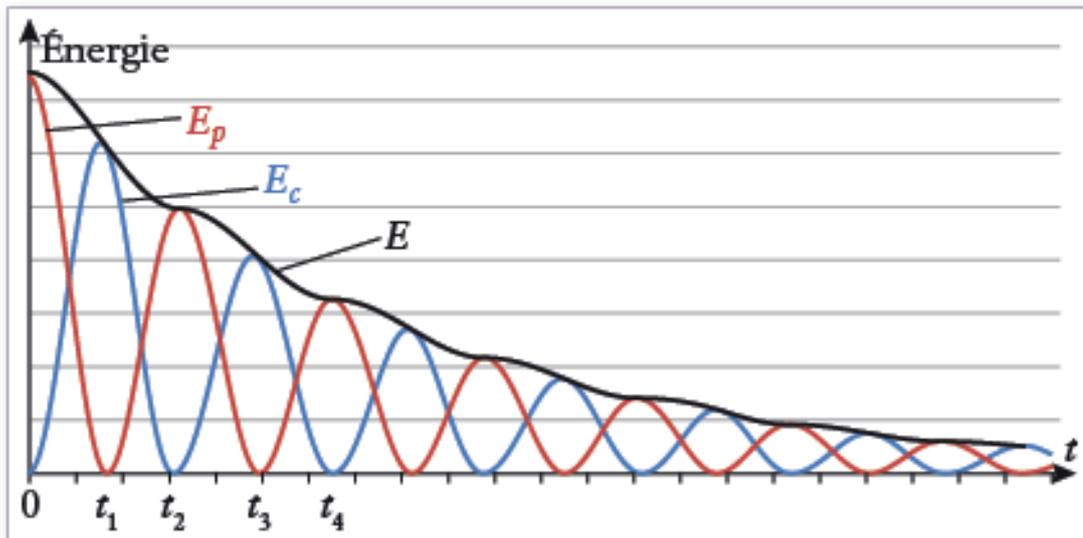


### Propriété

On retiendra que lorsqu'**aucune force non conservative** s'applique au système, l'énergie mécanique se conserve au cours du mouvement :

$$\Delta \mathcal{E}_{m_{A \rightarrow B}} = \mathcal{E}_{m_B} - \mathcal{E}_{m_A} = 0$$

- Non conservation de l'énergie mécanique Si l'on considère les frottements de l'air, on a une **force de frottements** qui s'exerce sur le système. Dans ce cas, la variation d'énergie mécanique n'est pas nulle. L'énergie mécanique se dissipe.



### Théorème (de l'énergie mécanique)

S'il y a des forces non conservatives et si la somme des travaux de ces forces est non nulle, alors :

$$\Delta \mathcal{E}_{m_{A \rightarrow B}} = \mathcal{E}_{m_B} - \mathcal{E}_{m_A} = \sum_i W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_{NC,i})$$

Cette relation est le **théorème de l'énergie mécanique**.

○ Pour l'instant on a parlé d'énergie à l'échelle macroscopique. Mais à l'échelle microscopique, on peut aussi définir des énergies cinétiques et potentielles, et effectuer le même genre d'étude.

## II Conservation de l'énergie interne

*L'objectif de cette partie est de parler de conservation d'énergie à l'échelle microscopique.*

### II.1 Définition de l'énergie interne

On peut définir l'énergie totale d'un système en fonction des énergies cinétiques et potentielles microscopiques et macroscopiques :

$$\mathcal{E}_{\text{tot}} = \underbrace{\mathcal{E}_{C,\text{macro}} + \mathcal{E}_{P,\text{macro}}}_{\text{énergie mécanique}} + \underbrace{\mathcal{E}_{C,\text{micro}} + \mathcal{E}_{P,\text{micro}}}_{\text{énergie interne}}$$

### Définition

L'**énergie interne**, notée  $U$ , est l'énergie qu'un système peut stocker sans qu'il y ait modification du mouvement de son centre d'inertie ni de l'altitude à laquelle il se trouve. **C'est l'énergie que renferme le système.**

*Tout cela pour dire que l'énergie interne est indépendante de l'énergie macroscopique. C'est donc l'énergie totale à laquelle on soustrait l'énergie mécanique...*

Interprétation :

- L'énergie cinétique microscopique  $\mathcal{E}_{C,\text{micro}}$  est liée à **la vitesse des particules du système.**
- L'énergie potentielle macroscopique  $\mathcal{E}_{P,\text{micro}}$  est liée à **l'interaction entre les particules du système.**

○ *Voyons ce que l'on peut dire de l'énergie interne pour un système isolé.*

## II.2 Système isolé

### Définition

Un **système isolé** est un système qui n'échange **ni matière ni énergie** avec l'extérieur.

Dans le cas d'un système isolé, l'énergie totale est constante :

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{tot}}^{\text{isolé}} = 0$$

Cependant, dans le cas d'un système macroscopiquement au repos, l'énergie mécanique ne varie pas au cours de la transformation :  $\Delta \mathcal{E}_{m_{A \rightarrow B}} = \Delta \mathcal{E}_{C,\text{macro}} + \Delta \mathcal{E}_{P,\text{macro}} = 0$ , de sorte que  $\Delta \mathcal{E}_{\text{tot}} = \Delta U$  On obtient alors :

$$\Delta U_{A \rightarrow B}^{\text{isolé}} = 0$$

○ *Un tel système est idéal, mais on peut s'en rapprocher en utilisant un calorimètre.*

## II.3 Application à la calorimétrie

Expérience de calorimétrie, avec mélange d'une masse d'eau froide connue et d'eau chaude connue.

## Conclusion

- Réponse à la problématique : Tout dépend du système, mais l'énergie se conserve veut dire qu'elle s'échange, se transfère, mais en aucun cas ne disparaît ou n'apparaît.
- Ouverture : Pas évoqué ici, mais dans un circuit électrique, l'énergie aussi se conserve.
- Ouverture : Stockage de l'énergie passe par sa conversion en énergies de différentes natures.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- J'ai essayé d'intégrer de la mécanique (classique, et élément imposé), ET de la thermodynamique pour faire des liens entre les deux, des analogies. Mais il est tout de même possible de ne se concentrant que sur la mécanique en faisant une première partie qui introduirait le travail, les notions de forces conservative et non-conservative puis de parler de la conservation d'énergie mécanique (TEM).
- Le pendule est l'exemple plutôt classique, mais on peut aussi faire l'exemple du saut à la perche (un petit peu plus compliqué à aborder du fait de l'énergie potentielle élastique, mais faisable).

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Bien définir le système à chaque fois. Si on veut vraiment faire le lien entre les deux parties, on peut imaginer un système qui prend en compte l'air autour du pendule et donc une conversion d'énergie mécanique en énergie interne...
- ☞ Définition d'un référentiel : C'est un **solide de référence** par rapport auquel on étudie le mouvement d'un point. Il est muni d'un repère d'espace et de temps.
- ☞ Le travail élémentaire d'une force  $\vec{f}$  quelconque le long d'un déplacement élémentaire  $\vec{d\ell}$  est donné par  $\delta W(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{d\ell}$ , donc le travail global entre deux point  $A$  et  $B$  est donné par 
$$W_{AB}(\vec{f}) = \int_A^B \vec{f} \cdot \vec{d\ell}.$$
- ☞ Lien avec la puissance : 
$$\delta W(\vec{f}) = \mathcal{P} \cdot dt$$
- ☞ Démonstration du théorème de l'énergie cinétique : on multiplie scalairement le PDF par  $\vec{v}$ , on fait apparaître la dérivée de l'énergie cinétique, et la puissance <sup>a</sup>.
- ☞ Force non-conservative : exemple de la force de frottements fluides  $\vec{f} = -\lambda \vec{v}$ . Son travail s'écrit  $\delta W(\vec{f}) = -\lambda \vec{v} \cdot \vec{d\ell} = -\lambda \vec{v} \cdot \vec{v} dt = -\lambda v^2 dt$ . Le travail dépend donc du chemin suivi, et même de la vitesse. Autres exemples de forces non-conservatives : les forces de pression, de viscosité, les forces de déformation lors d'une choc élastique.

a. [3], page 613

**PROGRAMME OFFICIEL (PREMIÈRE, 2019) :**

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Énergie cinétique d'un système modélisé par un point matériel. Travail d'une force. Expression du travail dans le cas d'une force constante.</p> <p>Théorème de l'énergie cinétique. Forces conservatives. Énergie potentielle. Cas du champ de pesanteur terrestre.</p> <p>Forces non conservatives : exemple des frottements.</p> <p>Énergie mécanique. Conservation et non conservation. Gain ou dissipation d'énergie.</p>	<p>Utiliser l'expression de l'énergie cinétique d'un système modélisé par un point matériel. Utiliser l'expression du travail <math>W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB}</math> dans le cas de forces constantes. Énoncer et exploiter le théorème de l'énergie cinétique. Établir et utiliser l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur pour un système au voisinage de la surface de la Terre. Calculer le travail d'une force de frottement d'intensité constante dans le cas d'une trajectoire rectiligne. Identifier des situations de conservation et de non conservation de l'énergie mécanique. Exploiter la conservation de l'énergie mécanique dans des cas simples : chute libre en l'absence de frottement, oscillations d'un pendule en l'absence de frottement, etc. Utiliser la variation de l'énergie mécanique pour déterminer le travail des forces non conservatives. Utiliser un dispositif (smartphone, logiciel de traitement d'images, etc.) pour étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique d'un système dans différentes situations : chute d'un corps, rebond sur un support, oscillations d'un pendule, etc.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> Utiliser un langage de programmation pour effectuer le bilan énergétique d'un système en mouvement.</p> <p><b>Capacité mathématique :</b> Utiliser le produit scalaire de deux vecteurs.</p>

Élément imposé : Illustrer la transmission de l'information sur un exemple concret (fibre optique, câble coaxial...)

### Introduction pédagogique

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (TS)
- Prérequis :
  - \* Optique géométrique (indice d'un milieu, relations de SNELL-DESCARTES) ;
  - \* Ondes (notions d'ondes mécaniques, d'ondes électromagnétiques) ;
  - \* Pré-requis mathématique : manipulation de la fonction logarithme décimal.
- Séquence pédagogique : Cette leçon est intégrée dans le programme de Terminale S (ancien programme, 2012). Elle débutera la séquence sur la transmission et le stockage de l'information. Elle sera suivie par une leçon sur la description des méthodes de stockage de l'information. Elle est placée dans le thème « Les défis du XXI<sup>e</sup> siècle » : il faut insister sur le défi que cela représente durant la présentation de la leçon.
- Difficultés :
  - \* Quelques difficultés mathématiques, avec la manipulation des exponentielles et logarithmes ;
  - \* Optique géométrique (angles, indices, réflexions et réfraction).
- Objectifs de la leçon :
  - \* Connaître la chaîne de transmission de l'information ;
  - \* Investir des connaissances en physique pour comprendre les technologies qui nous entourent ;
  - \* Comprendre les avantages et limites de certains modes de transports de l'information.
- Sources utilisées :

- (1) RUFFENACH, M., CARIAT, T., MORA, V., *Physique-Chimie Terminale S, programme 2012*, Dunod, 2012.
- (2) COPPENS, N., JOHANN, T., *et coll.*, *Physique-Chimie Term S spécifique*, Nathan, collection Sirius, 2012.
- (3) TISSERAND, É., PAUTEX, J-F., SCHWEITZER, P., *Analyse et traitement des signaux*, Dunod, 2<sup>e</sup> éd., 2008.

## Introduction

- Prendre une photo avec un smartphone aujourd'hui, c'est si simple ! .



On peut l'envoyer instantanément à quelqu'un d'autre. Mais comment cela fonctionne-t-il? Oui, avec internet, mais comment l'information est-elle transmise ?

---

*Comment l'information est-elle transmise d'un point A à un point B ?*

---

## I Chaîne de transmission de l'information

### I.1 Information

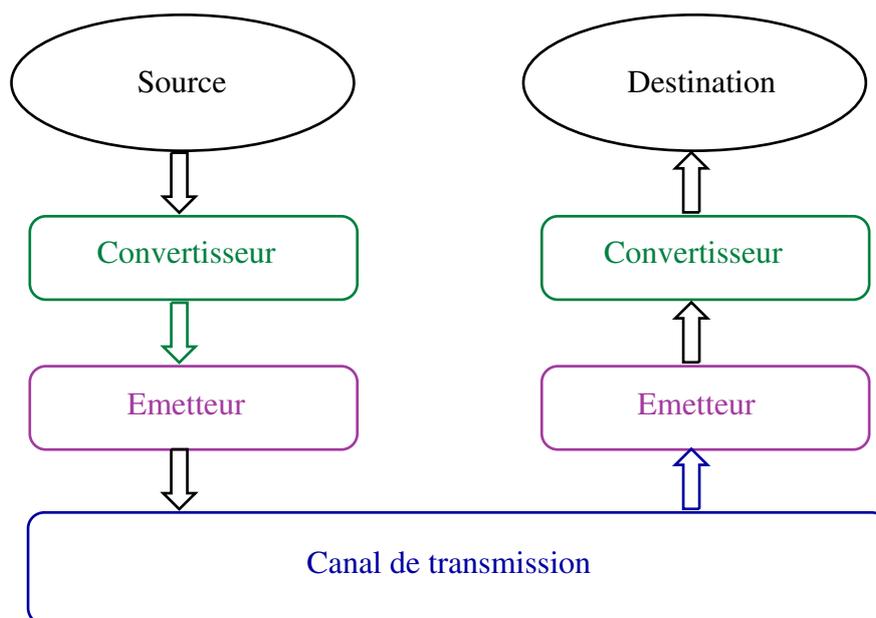
Une information est un fait qui suscite l'intérêt de l'individu qui la perçoit. Elle peut prendre plusieurs formes, notamment :

- écrite (journal, ...);
- sonore (musique, ...);
- image (télévision, photo, ...).

○ *Quelle que soit l'information, sa transmission d'un point A à un point B consiste en la même chaîne.*

### I.2 Éléments de la chaîne de transmission

Le transfert d'information d'une source à une autre se fait via une **chaîne de transmission de l'information**. La structure générale de la chaîne d'information est la suivante :



Analysons les différents maillons de la chaîne (*Projeter éventuellement le diaporama au fur et à mesure du discours, pour mieux capter l'attention*) :

- La **source** fournit l'information ;
- le **convertisseur d'entrée** transforme le format de l'information en une forme appelée **signal** ;
- l'**émetteur** conditionne le signal afin de l'envoyer ;
- le **canal** est le milieu physique dans lequel se propage le signal ;
- le **récepteur** reçoit et traite le signal reçu du canal afin de retrouver l'information ;
- le **convertisseur de sortie** redonne à l'information sa forme physique initiale ;
- la **destination** reçoit l'information et peut la lire.

○ On va s'intéresser à une partie seulement pour l'instant de cette chaîne de transmission : le canal de transmission.

## II Procédés physiques de la transmission

Le signal émis se propage vers un ou plusieurs destinataires via un canal de transmission. Ils en existent deux catégories.

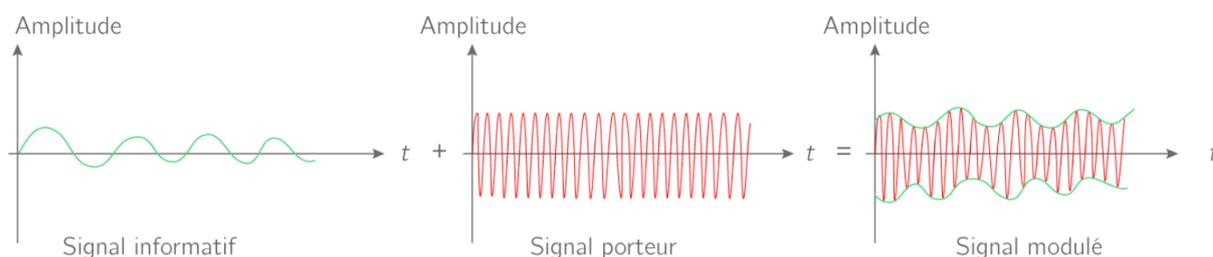
### II.1 Propagation libre

#### Définition

La propagation est dite **libre** quand le signal peut se propager dans toutes les directions de l'espace.

Ainsi on peut transmettre les informations à l'aide d'OEM qui transitent dans l'air ou dans l'espace à l'aide de satellite. Il peut être nécessaire d'utiliser des OEM de grande fréquence

comme support pour transmettre le signal. On appelle ce phénomène la **modulation**, cela consiste à adapter des caractéristiques de l'onde afin de l'adapter au canal de transmission.



○ On peut aussi brancher un câble pour avoir internet sur son PC. Souvent ça marche mieux...

## II.2 Propagation guidée par un câble coaxial

### Définition

La propagation est dite **guidée** quand le signal est contraint de se propager dans un espace limité (comme un câble).

Un câble coaxial est constitué d'un conducteur central, appelé « âme » et d'une tresse métallique, appelée « masse », séparés par un isolant plastique, la « gaine ».

### Important

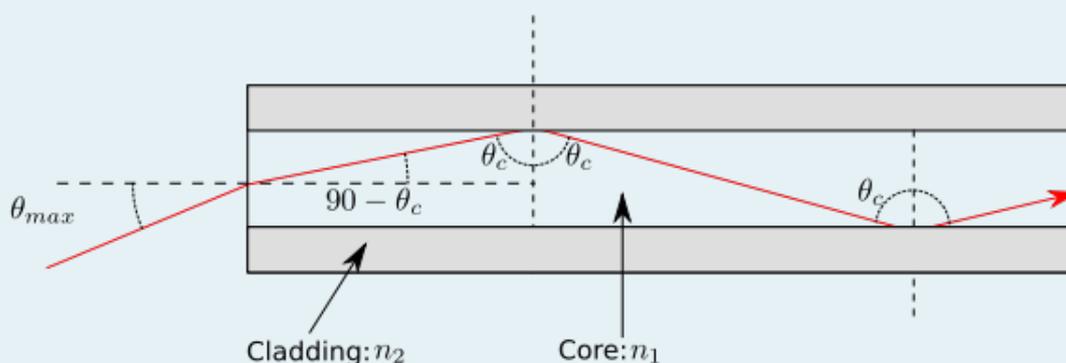
Le **câble** guide la propagation d'un **signal électrique**

○ On parle souvent de la fibre, qui va encore plus vite que tout le reste !

### c) Propagation guidée par fibre optique

#### Définition

Une fibre optique est un cylindre constitué au centre par un milieu d'indice  $n_1$  appelé le **coeur** entouré par un second milieu d'indice  $n_2$  appelé la **gaine**.



*Cladding : la gaine, Core : le corps.*

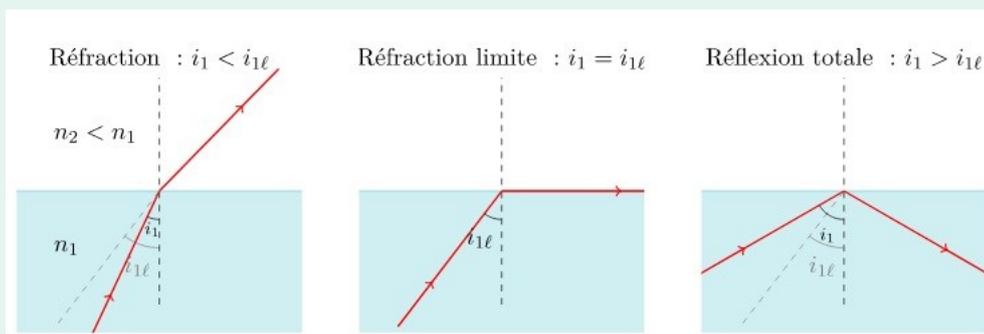
L'indice  $n_1$  du coeur est supérieur à celui de la gaine :  $n_1 > n_2$ .

### Important

La  **fibre optique**  guide un  **signal lumineux** .

### Expérience

Utilisation du tableau blanc avec LASER et lentilles. Montrer qu'il existe un angle limite au delà duquel on atteint la réflexion totale.



### Animation

Vidéo montrant le phénomène de réflexion totale.

Il faut que toute la lumière reste dans la fibre. Pour cela, **il faut qu'il y ait réflexion totale**.

On peut se demander avec quel angle le signal doit pénétrer dans la fibre.

On exprime l'angle d'incidence  $\theta_c$  en fonction des indices des milieux et de l'angle de réfraction  $\theta_r$  en appliquant la deuxième loi de SNELL-DESCARTES :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_r$$

Dans le cas où  $n_1 > n_2$ , il existe un angle limite  $\theta_{c,lim}$  au-delà duquel il n'y a plus de réfraction (cela correspond à  $\theta_r > 90^\circ$ ). Cet angle limite de réfraction se calcule par son sinus :

$$\sin \theta_{c,lim} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin 90 = \frac{n_2}{n_1}$$

Finalement, pour obtenir une réflexion totale, il faut que  $\theta_c > \theta_{c,lim}$ .

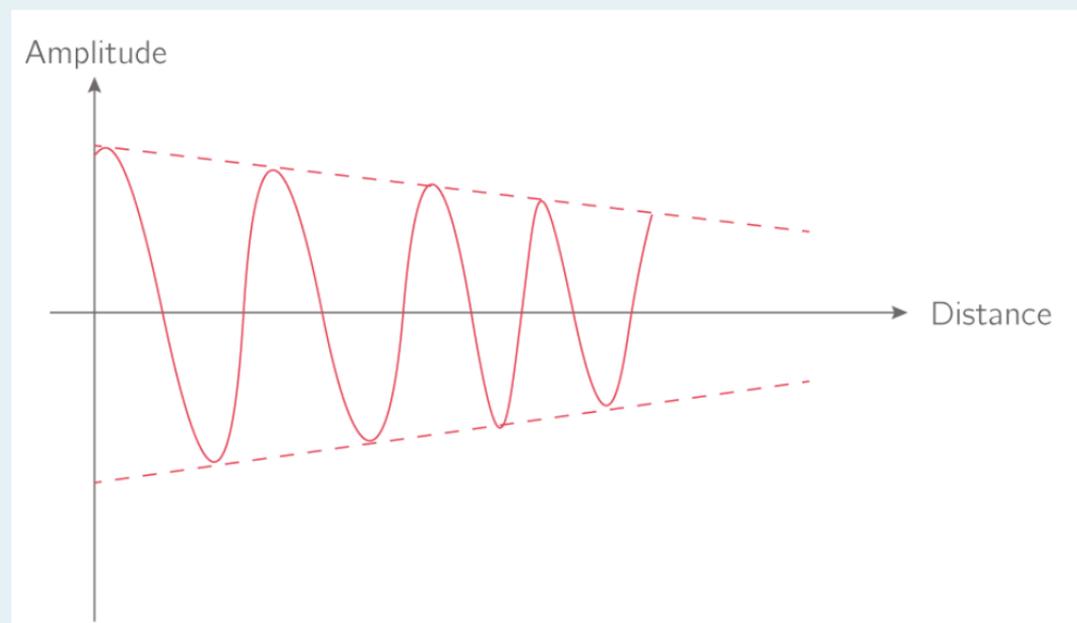
⊖ Mais l'information n'arrive pas toujours intacte. Il peut y avoir des pertes.

### III Caractéristiques d'une transmission

#### III.1 L'atténuation

##### Définition

On appelle **atténuation** du signal l'affaiblissement de l'amplitude de ce signal au cours de sa transmission.



- On dit qu'il y a atténuation lorsque la puissance reçue  $\mathcal{P}_{\text{reçue}}$  est plus faible que la puissance émise  $\mathcal{P}_{\text{émise}}$  :  $\mathcal{P}_{\text{reçue}} < \mathcal{P}_{\text{émise}}$
- Pour une fibre optique de longueur  $L$ , la puissance transportée diminue exponentiellement selon la relation suivante :

$$\mathcal{P}_{\text{reçue}} = \mathcal{P}_{\text{émise}} \cdot e^{-\alpha \cdot L}$$

Avec :

- $\mathcal{P}_{\text{reçue}}$  et  $\mathcal{P}_{\text{émise}}$  les puissances reçue et émise (en W)
  - $L$  la longueur de la fibre optique (en m)
  - $\alpha$  le coefficient d'atténuation linéaire (en  $\text{m}^{-1}$ )
- On définit le **coefficient d'atténuation**<sup>10</sup>  $A$  par la relation suivante :

$$A = \frac{10}{L} \log \left( \frac{\mathcal{P}_{\text{émise}}}{\mathcal{P}_{\text{reçue}}} \right)$$

Les coefficients linéaires d'atténuation de certains modes de transmissions sont rassemblés dans le tableau suivant, ce qui nous explique pourquoi la fibre est tant appréciée.

10. Cette relation n'est pas à savoir en terminale

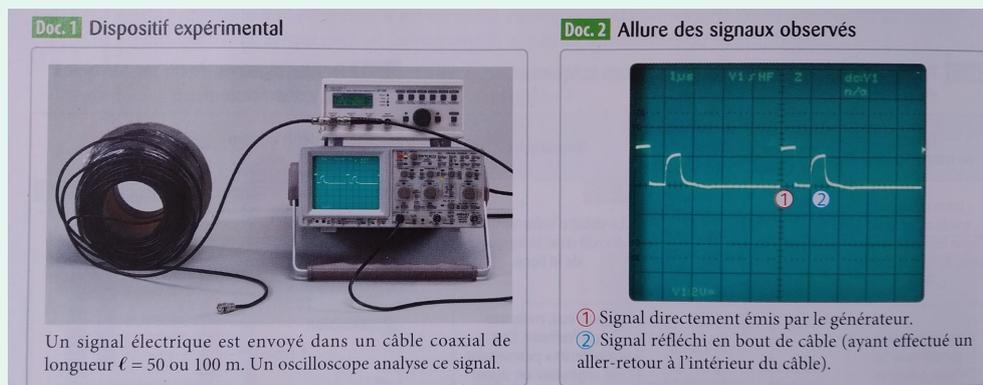
Canal de transmission	Coefficient linéique
ADSL (câble torsadé)	0,22
Câble coaxial	0,12
Fibre optique à saut d'indice	0,005
Fibre optique à gradient d'indice	0,001
Fibre optique monomode	0,0005

### Expérience

Détermination du coefficient d'atténuation d'un câble coaxial, à l'aide du matériel suivant :

- Un câble coaxial de longueur  $L$  connue (typiquement  $L = 50$  m) ;
- Un GBF ;
- Un oscilloscope.

On impose une tension crête à crête et l'on branche le câble coaxial à la voie 1 de l'oscilloscope.



Source schéma : [1], page 556

Dans le cas de l'information transmise par un courant, les puissances émise  $\mathcal{P}_{\text{émise}}$  et reçue  $\mathcal{P}_{\text{reçue}}$  sont proportionnelles aux carrés des amplitudes émise  $U_{\text{émise}}$  et reçue  $U_{\text{reçue}}$ . Le signal fait l'aller retour dans le câble, donc parcourt la distance  $2L$ .

$$\alpha = \frac{1}{2L} \cdot 20 \log \left( \frac{U_{\text{émise}}}{U_{\text{reçue}}} \right)$$

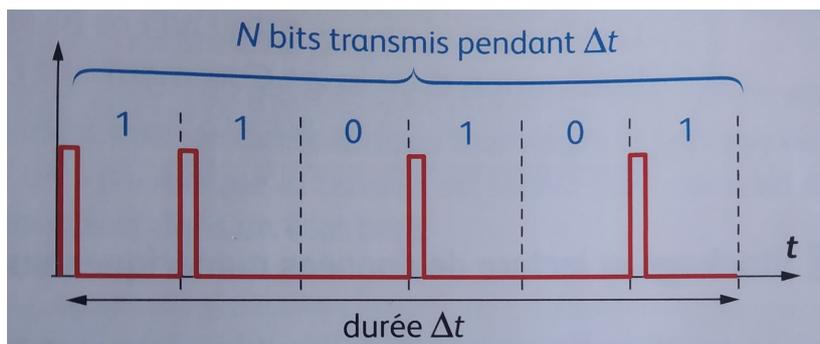
○ Pour se représenter la quantité d'information qui transite, on peut utiliser le débit binaire.

## III.2 Débit binaire

Lors de la transmission d'un signal numérisé, il existe trois paramètres pertinents :

- le nombre de bits utilisés ;
- la fréquence d'échantillonnage ;
- le nombre de signaux numérisés à transmettre.

Le débit binaire correspond au nombre  $n$  de bits transmis pendant la durée  $\Delta t$  :



$$D = \frac{n}{\Delta t}$$

## Conclusion

- Réponse à la problématique : On a toujours la même chaîne de transmission mais les composants et les modes de transports changent, ce qui fait varier l'efficacité du processus de transmission.
- Ouverture : Mais *quid* du stockage de l'info ?

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- Intégrer la conversion analogique et numérique de l'information.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Conversion analogique et numérique (non évoqué ici) ;
- ☞ Différents types de fibres (saut d'indice, gradient d'indice) ;
- ☞ Modulation de fréquence/d'amplitude ;
- ☞ Bruit (non évoqué ici).

Cette leçon était calquée sur les anciens programmes de Terminale S, jusqu'en 2020. Ces notions ont disparu des programmes de Terminale.

Élément imposé : Absorption et diffusion (des objets)**Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (1ère)
- Prérequis :
  - \* Notions d'optique géométrique (lentilles convergente et divergente, vergence d'une lentille, distance focale ...) introduites grâce à l'exemple de l'appareil photo ;
- Séquence pédagogique : Leçon placée après une introduction à ce thème par l'appareil photo qui a découlé sur l'énoncé des lois de l'optique géométrique et le tracé des rayons à travers des lentilles convergente et divergente, et avant un cours sur les sources de lumière dans laquelle seraient introduites les notions de raies d'émission, de profils spectraux, la loi de WIEN pour les corps chauffés, *etc.*
- Difficultés
  - \* Faire le lien entre les instruments optiques du laboratoire et le fonctionnement de l'œil ;
  - \* Faire la différence entre les notions de synthèse soustractive et synthèse additive ;
  - \* Comprendre que les objets n'ont pas de couleurs en propre.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre pourquoi on voit les objets d'une certaine couleur ;
  - \* Comprendre que l'œil peut-être totalement modélisé par des instruments d'optique.
- Sources utilisées :

- (1) GEANDROT, J., [physagreg.fr](http://physagreg.fr), 2020, Cours en ligne.
- (2) CARRASCO, J., *Physique-Chimie 1ère S*, Prépac, 2012 (anciens programmes).
- (3) Inspirations prises dans mon cours de physique de première de Christophe LAULANET.

## Introduction

On peut faire une analogie entre l'appareil photo vu précédemment et l'œil, qui nous permet de voir les objets. On va voir pourquoi les objets ne sont pas tous de la même couleur, et pourquoi on ne peut pas dire qu'ils **ont** une couleur propre.

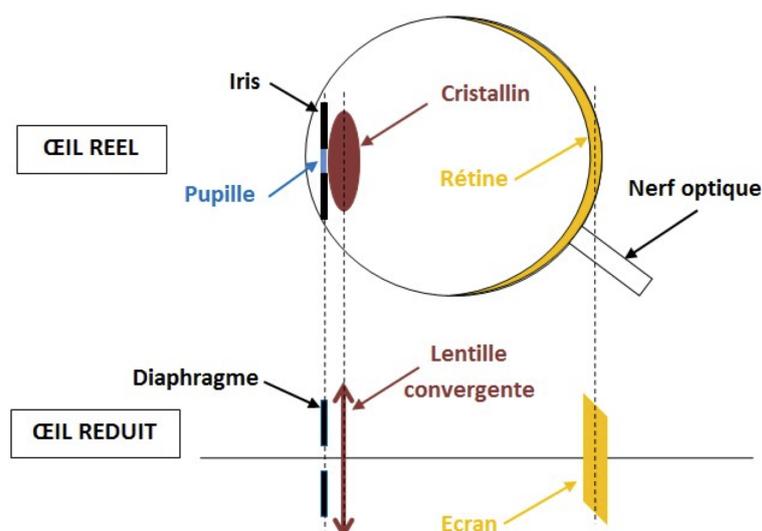
## I Fonctionnement de l'œil

*Le but de cette partie est de montrer l'analogie entre l'œil et un instrument d'optique.*

### I.1 Modèle de l'œil réduit

L'œil se comporte comme un système optique. Analogie avec un montage optique :

- Écran  $\longleftrightarrow$  rétine ;
- Lentille  $\longleftrightarrow$  cristallin ;
- diaphragme  $\longleftrightarrow$  iris-pupille.



○ Mais comment faire pour voir de manière nette les objets à des distances différentes ?

### I.2 Phénomène d'accommodation

Lorsqu'un objet **se rapproche** de l'œil, la distance focale du cristallin **diminue** pour que l'image se forme sur la rétine. C'est le phénomène d'accommodation.

#### Animation

Faire varier la distance de l'objet et la **vergence** du cristallin avec le site de l'Université du Mans.

### I.3 Défauts de l'œil

- Si l'œil est trop **convergent** : **myopie** ;
- Si l'œil est trop **divergent** : **hypermétropie** ;
- Défaut de **souplesse** du cristallin : **presbytie** ;
- Défaut de **géométrie** de l'œil : **astigmatisme**.

#### Animation

Faire varier la correction pour voir une image nette avec le site de l'Université du Mans

○ *Maintenant que l'on connaît les composantes de l'œil, voyons comment se forment des couleurs.*

## II Obtention des couleurs

La lumière blanche est composée d'une infinité de radiations colorées. C'est une lumière **polychromatique**.

#### Expérience

Décomposition de la lumière blanche par un prisme. Montage avec une source de lumière blanche, un condenseur, une fente, une lentille convergente, un prisme et un écran.

### II.1 Synthèse additive

- Toute lumière colorée peut-être reproduite en superposant 3 faisceaux lumineux : le **rouge**, le **vert** et le **bleu** (*cf.* code RGB). C'est la synthèse **trichromatique**.

#### Expérience

Synthèse additive en direct avec les faisceaux des différentes couleurs. Si problème de matériel, le faire en ligne sur ce site.

- Notion de pixel : "cases" colorées suffisamment proches pour que l'œil ne puisse les séparer.
- Exemples concrets de la synthèse soustractive : spots, télévisions, appareil photos numériques, *etc.*

○ *Cette synthèse ne permet pas d'expliquer, par exemple, le fonctionnement d'une imprimante.*

### II.2 Synthèse soustractive

- Sachant que la lumière blanche est constituée de plusieurs radiations, que se passe-t-il si l'on en enlève ?

### Expérience

Synthèse soustractive en direct, en plaçant différents filtres sur le chemin optique de la lumière blanche. Si problème de matériel, le faire en ligne sur ce site.

- Exemples concrets de la synthèse soustractive : imprimante, vidéoprojecteur, peinture, etc.

## III Interprétation de la couleur des objets

### III.1 Absorption, transmission, et diffusion

La surface d'un objet éclairé peut :

- Laisser passer une partie des radiations de la lumière incidente, c'est le phénomène de **transmission** ;
- Renvoyer une partie des radiations de cette lumière dans toutes les directions, c'est le phénomène de **diffusion** ;
- Capturer une partie des radiations de cette lumière et ne pas la renvoyer ni la laisser passer, c'est le phénomène d'**absorption**.

### III.2 La couleur d'un objet

- La couleur d'un objet telle qu'on la perçoit avec notre œil correspond à la composition de la lumière qu'il **diffuse**. Un objet n'a alors pas de couleur propre : celle-ci dépend de la lumière qu'il reçoit, et des radiations qu'il absorbe.
- Notion de couleur complémentaire

*Exemple (à projeter)* : Le drapeau de la France<sup>11</sup> éclairé en lumière blanche est bleu blanc et rouge, mais noir vert et noir si il est éclairé en lumière verte.

## Conclusion

On a vu ici comment l'œil fonctionnait et pourquoi les objets pouvaient, à la lumière du jour par exemple, nous apparaître avec une couleur particulières. Dans un prochain cours, on s'intéressera à la production de la lumière par les différences sources.

Possibilités d'ouverture :

- Diffusion RAYLEIGH pour expliquer la couleur du ciel ;
- Photographie argentique ?

---

11. C'est pour le côté patriotique, le jury appréciera :-)

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- Partir davantage sur l'optique géométrique (mais ici l'élément imposé nous en empêche) ;
- Parler davantage de l'appareil photo et moins de l'œil ;
- Parler de la diffusion RAYLEIGH dans la leçon, mais un peu compliqué et hors-programme de la première.

#### PROGRAMME OFFICIEL (PREMIÈRE, 2019) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Couleur blanche, couleurs complémentaires. Couleur des objets. Synthèse additive, synthèse soustractive. Absorption, diffusion, transmission. Vision des couleurs et trichromie.	Choisir le modèle de la synthèse additive ou celui de la synthèse soustractive selon la situation à interpréter. Interpréter la couleur perçue d'un objet à partir de celle de la lumière incidente ainsi que des phénomènes d'absorption, de diffusion et de transmission. Prévoir le résultat de la superposition de lumières colorées et l'effet d'un ou plusieurs filtres colorés sur une lumière incidente. <i>Illustrer les notions de synthèse additive, de synthèse soustractive et de couleur des objets.</i>

Élément imposé : Lunette astronomique**Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire
- Prérequis :
  - \* Optique : lentille convergente, règles de construction pour les rayons optiques, obtention d'une image à partir d'une lentille convergente ;
  - \* Mathématique : trigonométrie, approximation des petits angles.
- Séquence pédagogique : Cette leçon peut s'inscrire dans le cadre du nouveau programme (2020) en terminale. Le programme comporte une séquence sur la lunette astronomique qui vient compléter l'étude des lentilles de l'année de 1<sup>ère</sup> (cf. extrait prog.). On se concentre ici sur la lunette astronomique et on introduit les notions d'objet et image à l'infini, que l'on considère inconnue des élèves. Un TP pourrait compléter cette séquence, au cours duquel les élèves construiraient eux-mêmes et elles-mêmes une lunette astronomique avec des lentilles.
- Difficultés :
  - \* Grandeurs algébriques ;
  - \* Objets à l'infini, images à l'infini : quelles distances ?
  - \* Construction des rayons.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre le fonctionnement, l'intérêt et les caractéristiques de la lunette astronomique.
- Sources utilisées :

- (1) SANZ, M-N., SALAMITO, B., *et coll.*, *Physique PCSI, tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019.
- (2) *Des ondes pour voir plus grand*, Terminale STL.
- (3) GAILLARD, C. *et coll.*, *Physique Chimie Tle*, Le livre scolaire, 2020.
- (4) Académie de Montpellier, *Instruments d'optique, Terminale STL*, <https://spcl.ac-montpellier.fr/moodle/pluginfile.php>.
- (5) MOUSSA, A., *Cours de physique, tome 1 : Optique*, Devigne, 1988.

## Introduction

- Nous avons vu la dernière fois le principe de fonctionnement d'une loupe : assimilable à une convergente qui permet de grossir les images avec un diamètre apparent plus grand. Cependant, on se rend compte qu'on va être très rapidement limité dans le cas où on souhaite observer des objets à une distance beaucoup plus éloignée (planètes, étoiles..);
- Cette problématique est d'autant plus importante qu'au cours de l'histoire, on a voulu observer de plus en plus loin des objets invisibles à l'œil nu.

---

*Comment construire un instrument d'optique pour voir à des objets situés à de très grandes distances ?*

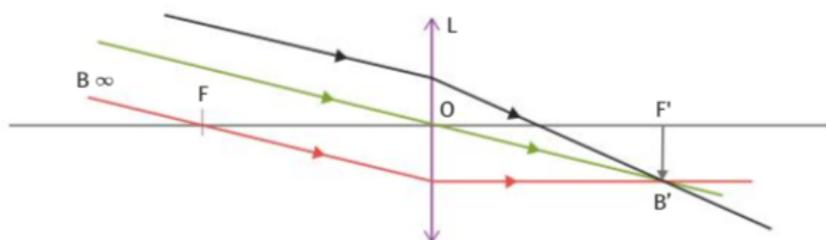
---

## I De la lentille convergente à la lunette astronomique

La lunette astronomique sert à examiner des astres, donc des objets qu'on peut considérer pratiquement à l'infini.

### I.1 Construction de l'image d'un objet situé à l'infini

- On dit qu'un **objet** est situé à l'infini lorsque les rayons qui en sont issus arrivent parallèlement sur la lentille. L'objet est alors situé à une distance très grande devant la distance focale de la lentille.
- *Effectuer le tracé au tableau en expliquant les traits de construction.*



- L'**image** est l'intersection entre le rayon rouge et le rayon vert. Elle se forme dans le **plan focal image de la lentille**.

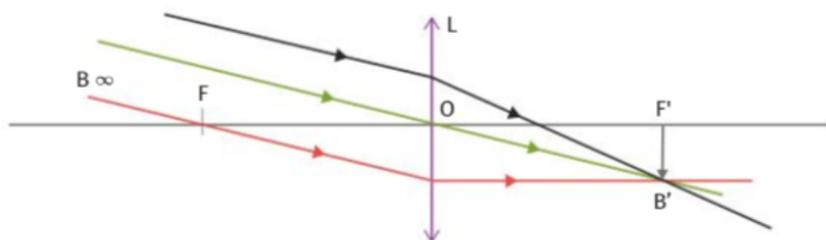
#### Important

Les rayons que l'on trace sont des **rayons particuliers**. Cependant, ils ne sont évidemment pas les seuls à traverser la lentille.

○ Maintenant qu'on a compris ce que signifiait un objet à l'infini, voyons comment tracer les rayons lorsque c'est l'image qui se trouve à l'infini.

## I.2 Construction de l'image d'un objet situé au foyer objet

- On dit qu'une **image** est située à l'infini lorsque les rayons ressortent parallèlement de la lentille. L'image est alors située à une distance très grande devant la distance focale de la lentille.
- *Effectuer le tracé au tableau en expliquant les traits de construction.*



- L'image est située « tellement loin » de la lentille qu'on ne peut la voir.

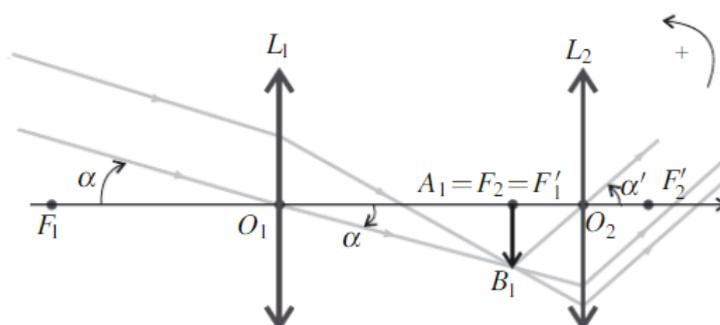
○ La lunette astronomique repose sur ces principes d'objet et d'image à l'infini. Mais il faut une association de lentilles.

## I.3 La lunette astronomique

- N'oublions pas que le but est de faire une image à l'infini d'un objet à l'infini. Pour cela, on va faire une association de lentilles. On place les lentilles  $\mathcal{L}_1$  et  $\mathcal{L}_2$  de telles sortes que le foyer image de  $\mathcal{L}_1$  soit confondu avec le foyer objet de  $\mathcal{L}_2$ <sup>12</sup>.

### Important

Un tel système (objet à l'infini, image à l'infini) est dit **afocal**.



### Expérience

Construction de la lunette astronomique sur le banc optique.

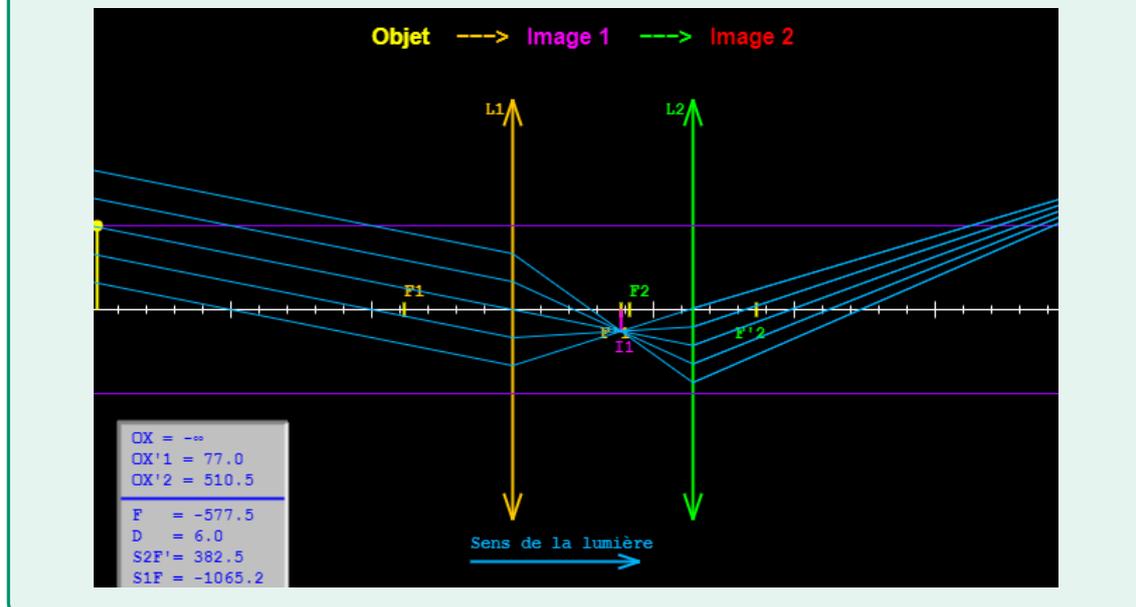
On peut représenter ce montage par la série suivante :

$$\infty \xrightarrow{\mathcal{L}_1} F'_1 = F_2 \xrightarrow{\mathcal{L}_2} \infty$$

12. [1], page 194.

### Animation

Cette animation permet de visualiser les rayons lumineux et leur devenir en fonction des distances focales des lentilles et de l'écart entre-elles.



- Ordres de grandeur :  $f'_1 = 60$  cm et  $f'_2 = 5$  cm
- La première lentille,  $\mathcal{L}_1$ , est appelée l'**objectif**. La deuxième lentille,  $\mathcal{L}_2$ , est appelée l'**oculaire**.

○ Quelles sont les caractéristiques à regarder pour choisir ou fabriquer sa lunette astronomique ?

## II Utilisation de la lunette astronomique

### II.1 Notion d'angle d'observation

L'angle  $\alpha$  est l'angle formé entre les rayons provenant de l'infini et l'axe optique. De même, les rayons sortant de l'oculaire forment un angle  $\alpha'$  avec l'axe optique.

#### Définition

L'**angle d'observation** est l'angle  $\alpha'$  entre l'axe optique et les rayons issus de l'oculaire.

## II.2 Expression du grossissement

### Définition

Le **grossissement**, noté  $G$ , permet de quantifier l'agrandissement de l'image obtenue par rapport à l'objet.

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} \quad (17)$$

$G$  est sans unité.

Exprimons la tangente des angles  $\alpha$  et  $\alpha'$  :

$$\begin{aligned} - \tan \alpha &= \frac{\overline{F'_1 B_1}}{\overline{O_1 F'_1}} = \frac{F'_1 B_1}{f'_1} \\ - \tan \alpha' &= -\frac{\overline{F'_1 B_1}}{\overline{O_2 F_2}} = -\frac{F'_1 B_1}{f'_2} \end{aligned}$$

### Commentaire

On est dans l'approximation des petits angles, donc on a  $\tan \alpha \approx \alpha$ .

D'où les expressions des angles :

$$\begin{aligned} - \alpha &= \frac{F'_1 B_1}{f'_1} ; \\ - \alpha &= -\frac{F'_1 B_1}{f'_2} \end{aligned}$$

Le grossissement s'écrit donc :

$$G = -\frac{f'_1}{f'_2} = -12 \quad (18)$$

### Commentaire

Le grossissement est négatif (attention aux valeurs algébriques, dues à l'orientation des angles), on voit donc l'astre à l'envers, mais cela n'a pas d'importance.

## II.3 Cercle oculaire

### Définition

Le **cercle oculaire** est l'image de l'objectif donnée par l'oculaire. C'est au niveau du cercle oculaire qu'il y a le **maximum d'intensité lumineuse** d'où l'intérêt de placer son œil à cet endroit.

### Animation

Avec cette animation, on fait varier le grossissement et on voit l'effet sur le cercle oculaire.

○ *Un autre problème est que l'on ne peut pas toujours distinguer deux planètes correctement avec l'instrument, du fait de la distance. Pour quantifier cela nous disposons d'un nouvel outil.*

## II.4 Pouvoir séparateur

### Définition

Le **pouvoir séparateur** est l'angle minimal entre deux points objets pouvant être nettement distingués. Plus cet angle est **faible**, meilleure est la qualité de l'instrument car celui-ci permet l'observation de détails fins.

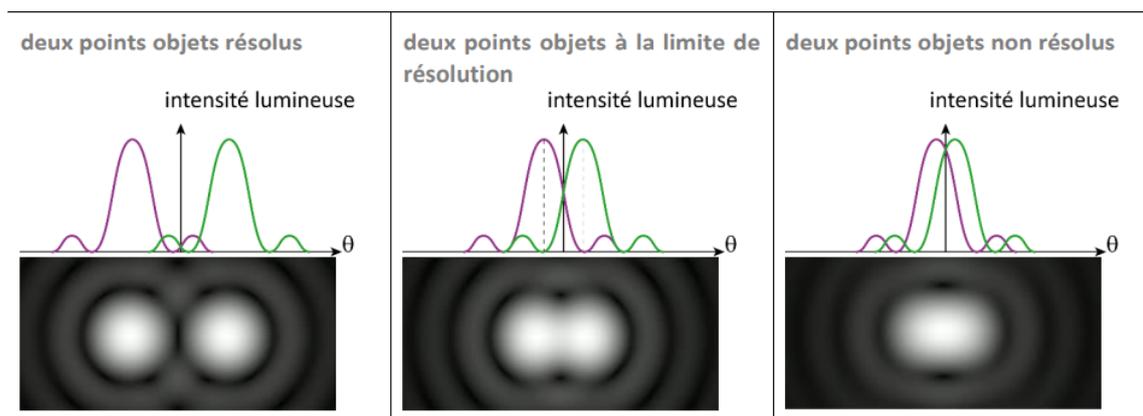
Si on appelle  $d$  la distance qui sépare ces deux points et  $D$  la distance entre eux et l'oeil de l'observateur, le pouvoir séparateur est décrit par la relation approchée :

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{d}{D} \quad (19)$$

### Commentaire

Cette notion est valable pour tout instrument optique.

Le pouvoir séparateur d'un instrument optique est limité notamment par les phénomènes de diffraction : la diffraction du faisceau de lumière à l'entrée de l'objectif. Plus l'objectif a un diamètre **élevé**, moins la diffraction est importante et plus le pouvoir séparateur est faible donc mieux c'est<sup>13</sup>.



### Définition

On peut définir le pouvoir séparateur théorique comme :

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Avec  $\lambda$  la longueur d'onde du rayonnement en m et  $D$  le diamètre de l'objectif en m.

## Conclusion

- Réponse à la problématique : On a montré que grâce à ce qui a été vu précédemment sur les lentilles minces, on peut construire des objets et des images de telle sorte qu'on arrive à voir très loin.

13. Source définitions et schéma : [4]

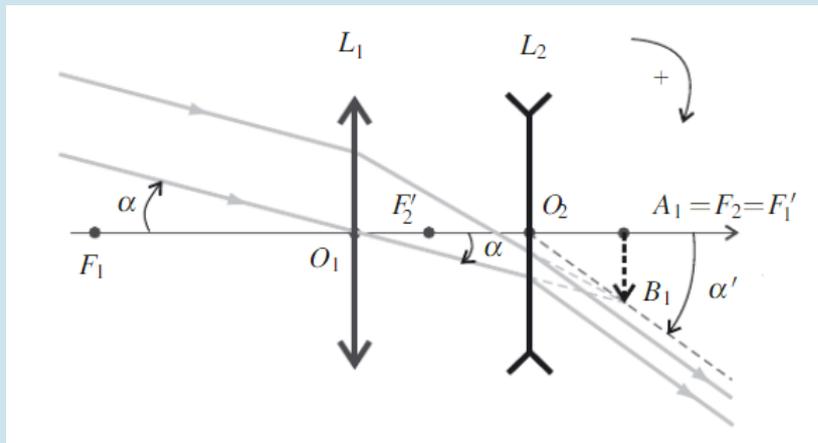
— Ouverture : Sur un autre appareil optique.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

— Il est également possible de traiter l'œil comme instrument d'optique, le microscope, ou encore la loupe.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

☞ Différence entre la lunette astronomique et la lunette de GALILÉE : la deuxième est constituée d'une lentille convergente comme objectif et d'une lentille divergente comme oculaire, le tout formant un système afocal <sup>a</sup> :



Le grossissement est en revanche positif.

- ☞ Mise au point : passée sous silence dans la leçon, il s'agit d'amener l'image définitive  $A_1B_1$  entre le *punctum proximum* et le *punctum remotum* de l'œil. Pour cela, on déplace l'oculaire par rapport à l'objectif. La latitude de mise au point est donc celle d'une loupe ayant la distance focale de l'ouverture <sup>b</sup> ;
- ☞ Le *punctum proximum* est le point le plus proche visible de manière nette par l'œil ;
- ☞ Le *punctum remotum* est la distance maximale à laquelle l'œil peut voir un œil au repos.

a. [1], page 193

b. [5], page 328

PROGRAMME OFFICIEL (TERMINALE, 2020) :

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
<p>Modèle optique d'une lunette astronomique avec objectif et oculaire convergents.</p> <p>Grossissement.</p>	<p>Représenter le schéma d'une lunette afocale modélisée par deux lentilles minces convergentes ; identifier l'objectif et l'oculaire.</p> <p>Représenter le faisceau émergent issu d'un point objet situé « à l'infini » et traversant une lunette afocale.</p> <p>Établir l'expression du grossissement d'une lunette afocale.</p> <p>Exploiter les données caractéristiques d'une lunette commerciale.</p> <p><i>Réaliser une maquette de lunette astronomique ou utiliser une lunette commerciale pour en déterminer le grossissement.</i></p> <p><i>Vérifier la position de l'image intermédiaire en la visualisant sur un écran.</i></p>

Élément imposé : Aspect corpusculaire du rayonnement et quantification de l'énergie des atomes

**Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (1re STL ou spé scientifique)
- Prérequis :
  - \* Modèle ondulatoire de la lumière (longueur d'onde, fréquence, période, ...);
  - \* Sources chaudes, spectres continus et spectres de raies, dispersion de la lumière.
- Séquence pédagogique : Cette leçon arrive après la séquence dite « image et couleurs » au cours de laquelle auraient été vus les chapitres d'optique géométrique ainsi que l'absorption, diffusion et transmission des couleurs par les objets. Ainsi, on s'intéresserait à présent à l'origine de la lumière d'un point de vue microscopique. Cette leçon vient conclure la séquence sur la lumière et peut être complétée par un TP sur l'exploitation des spectres de raies.
- Difficultés :
  - \* L'énergie prend des valeurs négatives;
  - \* L'énergie qui ne peut prendre que certaines valeurs;
  - \* La lumière transporte de l'énergie.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Définir la notion de luminescence, introduire les notions de corps froids et chauffés;
  - \* Introduire la quantification des niveaux d'énergie, et faire le lien avec l'interaction lumière-matière à l'aide de la notion de photon.
- Sources utilisées :

- (1) DOUTHE, L., FRAY, B., *Physique-Chimie 1<sup>ère</sup>, manuel collaboratif*, Le livre scolaire, 2019.
- (2) *Introduction à la physique quantique*, Cours du magistère de physique, Université Paris-Diderot, <http://magistereparis7.free.fr/documents/php/browser.php?dir=180&sort=0>.

## Introduction

- Qu'est-ce que la lumière ? *Projection d'un spectre, domaine du visible.*
- Historique sur les différentes lampes qui existent.

---

*Comment expliquer le fonctionnement de ces sources de lumière ? Quel modèle peut-on utiliser pour l'expliquer ?*

---

## I Sources de lumière froides

*C'est un plan de début d'année... Définition/Exemple, ce n'est pas très conseillé...*

### I.1 Définition

#### Définition

La **luminescence** est l'émission de lumière par des corps froids (par opposition aux corps chauffés). Elle a lieu en deux étapes : l'excitation puis l'émission.

○ *On peut en donner quelques exemples.*

### I.2 Exemple

- Les lampes à vapeur de sodium ;
- Les lampes à vapeur de mercure ;
- Les néons.

○ *Comment cela fonctionne-t-il ?*

### I.3 Spectres de raies

*C'est une sous-partie très expérimentale : il faut bien expliquer l'expérience et bien-sûr faire un schéma au tableau*

### Expérience

Spectre de la lampe à mercure (Hg). Le montage est composé de :

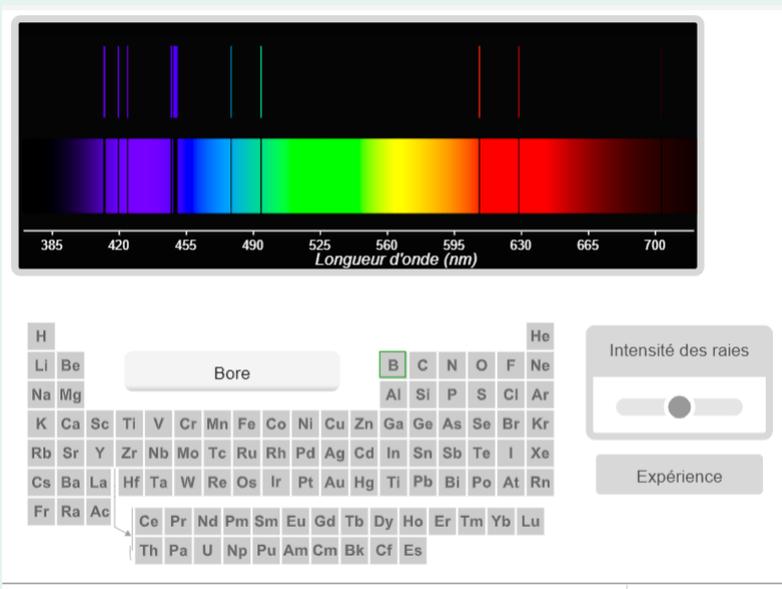
- Lampe à vapeur de mercure ;
- Un collimateur ;
- Une lentille convergente (Distance focale ?) ;
- Un réseau ;
- Une lentille convergente ;
- Un écran.

On distingue les spectres d'émission des spectres d'absorption.

- Les spectres d'**émission** sont les spectres décrivant la ou les longueur(s) d'onde émise(s) par une source ;
- Les spectres d'**absorption** sont les spectres décrivant la ou les longueur(s) d'onde absorbées par une source.

### Animation

Site le site Ostralo <sup>a</sup>, visualisation de certains spectres, propres à chaque atome.



a. [urlhttps://www.edumedia-sciences.com/fr/media/661-spectre-demission-et-dabsorption](https://www.edumedia-sciences.com/fr/media/661-spectre-demission-et-dabsorption)

○ *Le modèle ondulatoire ne permet pas d'expliquer la présence de ces raies. Il faut introduire de nouvelles notions.*

## II Un nouveau modèle pour la lumière

### II.1 Modèle particulaire

*Attention, cette partie introduit des notions complètement nouvelles, et difficile pour des élèves de première. Il faut faire attention aux mots que l'on emploie !*

L'existence d'une « particule » de lumière a été proposée. Cette particule transporte une énergie. C'est le **photon**.

#### Propriété

Le **photon** est une particule de masse et charge nulles. En se déplaçant, il déplace une énergie  $\mathcal{E}_{\text{photon}}$  telle que :

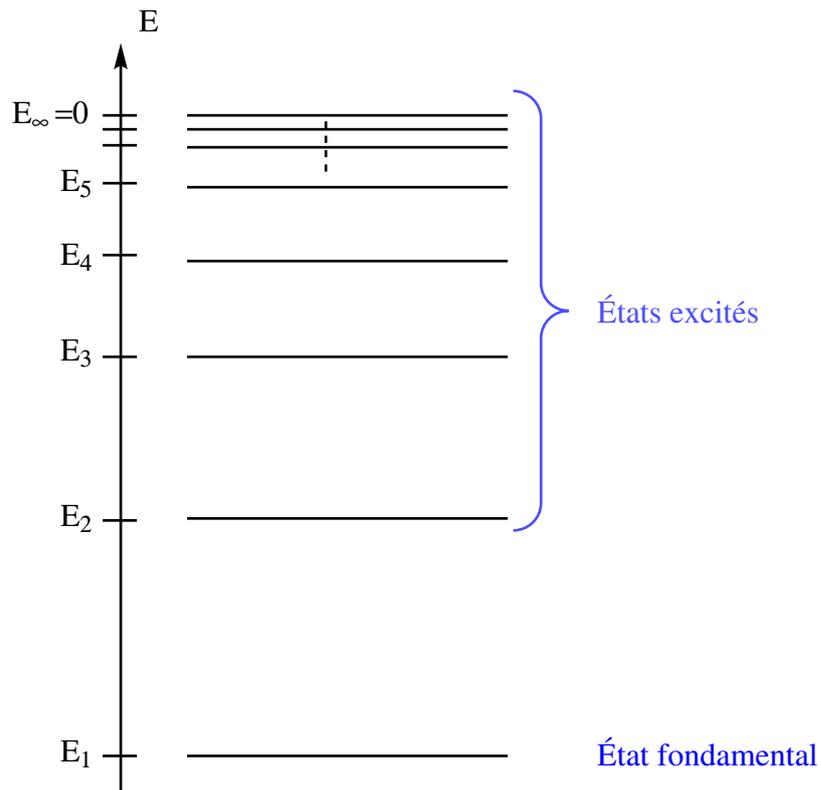
$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (20)$$

L'existence du photon a été introduite par EINSTEIN en 1905, mais sans vraiment parler de photon. Celui-ci a proposé la quantification de l'énergie. Il a fallu attendre 1923 pour qu'Arthur COMPTON propose l'existence du photon à proprement parler.

### II.2 Interaction lumière-matière

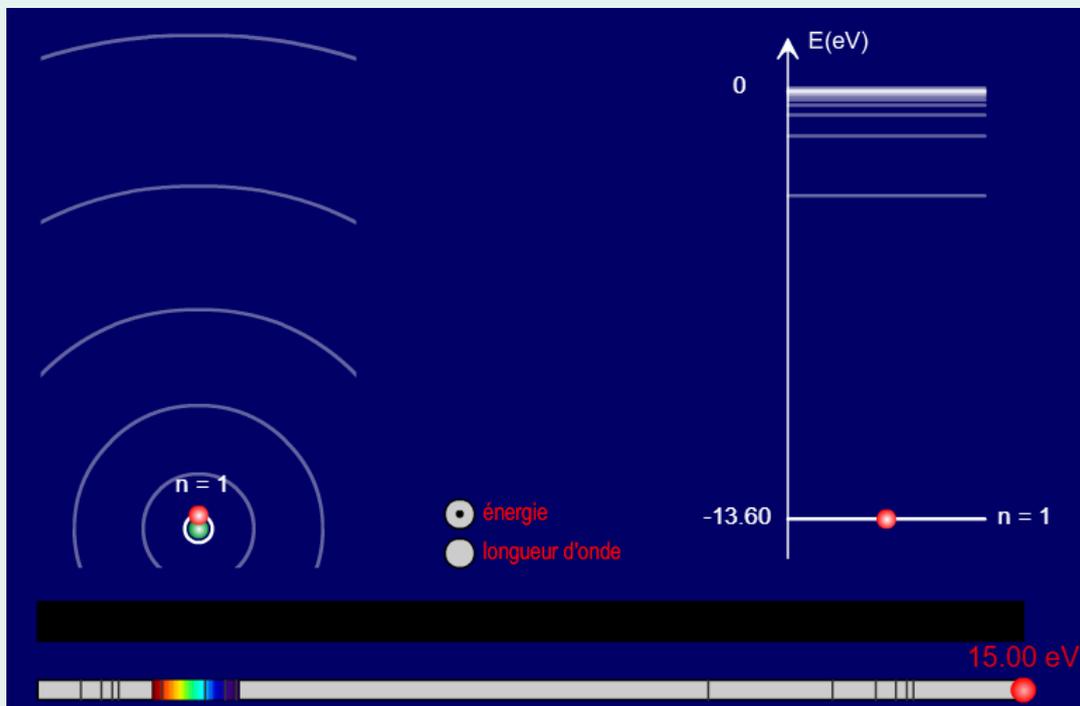
*L'idée de cette sous-partie est de bien ancrer l'idée d'une quantification d'énergie et que l'énergie ne peut prendre que certaines valeurs...*

- Niels BOHR propose en 1913 un modèle de structure des atomes en introduisant la notion de niveaux d'énergie. Les niveaux d'énergie sont quantifiés. On parle d'**état fondamental** lorsque l'atome est dans son état d'énergie la plus basse. On parle d'**états excités** pour les autres états, qui sont donc plus hauts en énergie.



### Animation

Grâce à cette animation <sup>a</sup>, on peut montrer que l'atome d'hydrogène ne peut pas prendre n'importe quelle valeur d'énergie.

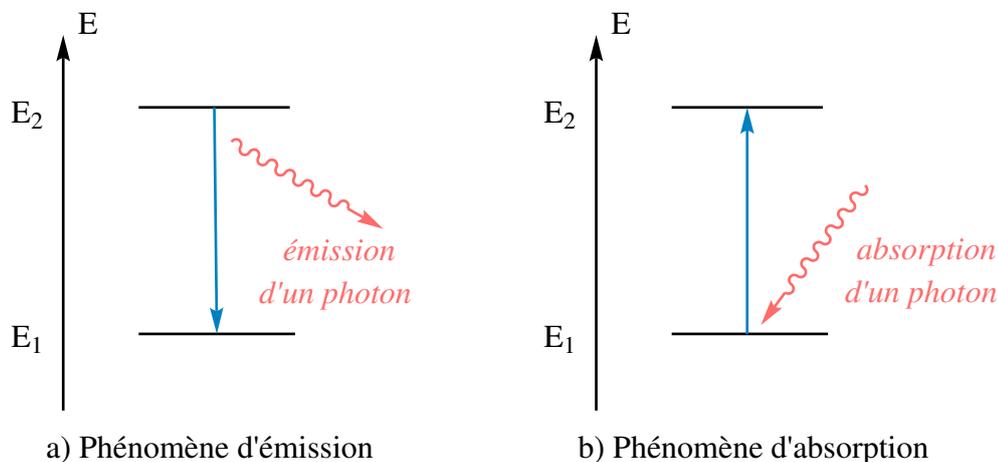


<sup>a</sup>. Site de Geneviève TULLOUE : [https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Divers/divers/bohr1.php](https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Divers/divers/bohr1.php)

- Chaque entité physico-chimique peut absorber et émettre des rayonnements. En **ab-**

**sorbant** un photon, elle peut passer d'un état d'énergie vers un autre, plus haut. En **émettant** un photon, elle peut passer d'un état d'énergie vers un autre, plus bas.

Faire ces schémas au tableau.



- L'énergie associée à la transition est celle du photon absorbé ou émis lors de celle-ci :

$$\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 = \frac{hc}{\lambda_{\text{ém/abs}}}$$

### III Analyse spectrale

*Dans cette dernière partie, on s'applique à relier la théorie avec l'expérience, en proposant des spectres de raies, et une application à la détermination de la composition d'une étoile.*

#### III.1 Analyse du spectre du mercure

*C'est une sous-partie très expérimentale : il faut bien expliquer l'expérience et bien-sûr faire un schéma au tableau*

##### Expérience

Spectre de la lampe à mercure (Hg). Le montage est composé de :

- Lampe à vapeur de mercure ;
- Un collimateur ;
- Une lentille convergente (Distance focale ?) ;
- Un réseau ;
- Une lentille convergente ;
- Un écran.

Résultats expérimentaux<sup>14</sup> :

N° de raie	1	2	3
$\lambda$ (nm)	434	546	578

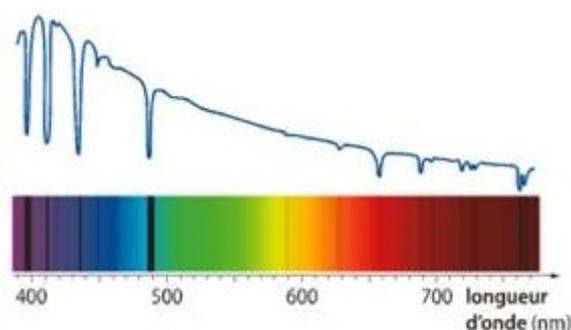
On peut alors calculer l'écart en énergie des deux niveaux concernés par la transition violette :

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{434 \cdot 10^{-9} \times 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,86 \text{ eV}$$

### III.2 Analyse spectrale d'une étoile

*Cette sous-partie est le clou du spectacle : on applique tout ce que l'on a vu !*

De quoi l'étoile VÉGA est-elle constituée ?



Grâce à ce spectre d'absorption, on sait que certains éléments sont présents sur cette étoile et qu'ils absorbent certains rayonnements. Il suffit de comparer les longueurs d'ondes absorbées pour savoir quels éléments composent cette étoile.

### Conclusion

- Réponse à la problématique : On a utilisé le modèle corpusculaire, on a montré qu'il s'agissait de transitions énergétiques. On a eu besoin d'introduire la notion nouvelle de photon.
- Ouverture : On s'est intéressé au visible, mais il y a aussi d'autres domaines (l'ultraviolet, l'infrarouge, ...) pour des applications diverses et variées.

#### Autre(s) possibilité(s) de plan

— On peut aussi parler du corps noir et de la loi de WIEN, ainsi que la loi de STEFAN.

14. [1], page 340

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Histoire du photon, effet photoélectrique, effet COMPTON ;
- ☞ Règles de sélection sur les transitions <sup>a</sup>.
- ☞ On peut s'attendre à avoir des questions sur le LASER. Mieux vaut consulter rapidement le Dunod PC <sup>b</sup> avant l'heure du passage pour se remémorer le principe, inversion de population, etc.

*a. Spectroscopies atomiques, BIÉMONT, De Boeck*

*b. SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., Physique PC-PC\*, tout-en-un, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.*

#### PROGRAMME OFFICIEL (PREMIÈRE, 2019) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Domaines des ondes électromagnétiques.</p> <p>Relation entre longueur d'onde, célérité de la lumière et fréquence.</p> <p>Le photon. Énergie d'un photon. Description qualitative de l'interaction lumière-matière : absorption et émission.</p> <p>Quantification des niveaux d'énergie des atomes.</p>	<p>Utiliser une échelle de fréquences ou de longueurs d'onde pour identifier un domaine spectral.</p> <p>Citer l'ordre de grandeur des fréquences ou des longueurs d'onde des ondes électromagnétiques utilisées dans divers domaines d'application (imagerie médicale, optique visible, signaux wifi, micro-ondes, etc.).</p> <p>Utiliser l'expression donnant l'énergie d'un photon.</p> <p>Exploiter un diagramme de niveaux d'énergie en utilisant les relations <math>\lambda = \frac{c}{\nu}</math> et <math>\Delta\mathcal{E} = h\nu</math>.</p> <p><i>Obtenir le spectre d'une source spectrale et l'interpréter à partir du diagramme de niveaux d'énergie des entités qui la constituent</i></p>

Élément imposé : Mouvement des satellites**Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (TS)
- Prérequis :
  - \* Notions de champs et de force, expression du poids, de la force de gravitation ;
  - \* Écriture du travail d'une force constante ;
  - \* Écriture des vecteurs position, vitesse et accélération, lois de NEWTON.
- Séquence pédagogique : Cette leçon viendrait à la fin d'une séquence de mécanique en terminale scientifique. Le choix ici qui est fait est d'introduire le mouvement des planètes et des satellites, en lien avec le thème de la gravitation, ainsi que d'introduire la comparaison avec le poids, en première partie. Cette leçon peut également être complétée par un TP dont le but serait de mesurer l'accélération de la pesanteur via un pendule simple et la mesure de sa période.
- Difficultés :
  - \* Confusion entre la masse et le poids ;
  - \* Confusion entre la trajectoire circulaire d'un satellite, et les lois de KEPLER énoncées pour une trajectoire elliptique.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre le lien entre la force de gravitation exercée par la Terre sur un objet et le poids d'un objet ;
  - \* Savoir caractériser le mouvement d'un satellite grâce aux outils de la mécanique.
- Sources utilisées :

- (1) BARDE, M., BARDE, N., BAUDOIN, T., *Physique-Chimie Terminales*, Hachette éducation, 2020.
- (2) MÉLISSOPOULOS, A., *Quantité de mouvement et mouvement des planètes*, Lycée d'adulte, <https://www.lyceedadultes.fr/sitepedagogique/pages/PCTermS.html>, 2018.

## Introduction

- Vous avez sans aucun doute entendu parler de l'astronaute Thomas PESQUET. Avec les autres membres de l'équipage de la mission « Soyouz MS-03 », ils ont décollé le 17 novembre 2016 à 20h20. Ils sont arrivés le 19 novembre 2016 à 21h58 sur la station spatiale internationale (ISS).
  - Rappel des leçons précédentes :
    - \* On sait ce qu'est un vecteur position, un vecteur vitesse et un vecteur accélération ;
    - \* On a vu les trois lois de NEWTON ;
    - \* On connaît la signification et le travail d'une force constante
    - \* On a également vu la force de gravitation (en 1ère).
- On va alors utiliser tous ces outils afin de répondre à la problématique suivante.

---

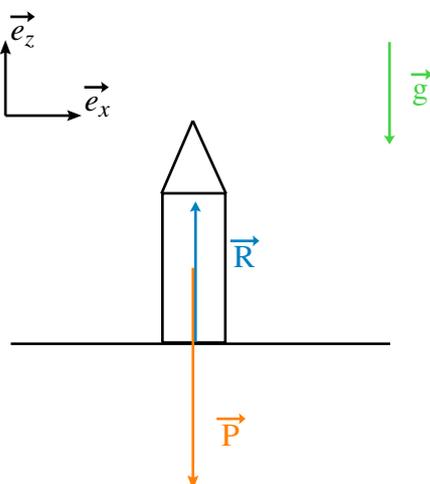
*Comment utiliser les outils de la mécanique pour étudier le décollage et le mouvement en orbite des satellites et des planètes ?*

---

## I Décollage de la fusée

### I.1 Forces appliquées à la fusée

- On fait l'étude mécanique de la fusée.
  - \* Référentiel : Terrestre, galiléen
  - \* Système : fusée
  - \* Bilan des forces :
    - Le poids :  $\vec{P} = m\vec{g} = -mg \cdot \vec{e}_z$
    - La réaction normale du support :  $\vec{R}_N = R_N \cdot \vec{e}_z$



- Rappel (Slides) : On connaît l'expression de la force gravitationnelle s'exerçant entre la terre de masse  $M_T$  et un objet de masse  $m$ , séparés par une distance  $R_T + h$  :

$$\vec{F}_g = -\frac{G \cdot m \cdot M_T}{(R_T + h)^2} \cdot \vec{u}$$

Avec :

- $G = 6,63 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$  ;
- $R_T = 6371 \text{ km}$  ;
- $h$  l'altitude de l'objet ;
- $\vec{u}$  le vecteur unitaire orienté de la Terre vers l'objet.

○ Voyons le lien entre le poids et la force de gravitation.

## I.2 Détermination de l'accélération de la pesanteur

- Lorsque la fusée n'a pas décollé, on a  $h = 0$ . On peut alors égaliser le poids et la force de gravitation :

$$\begin{aligned} \vec{P} &= \vec{F}_g \\ -mg\vec{e}_z &= -\frac{G \cdot M_T \cdot m}{R_T^2} \cdot \vec{e}_z \end{aligned}$$

On a finalement une expression de la constante d'accélération de la pesanteur  $g$  :

$$\boxed{g = \frac{G \cdot M}{R_T^2}} \quad (21)$$

### Expérience

Lancer d'une balle de masse connue pour retrouver la valeur de  $g$ , à l'aide du matériel suivant :

- Un ordinateur muni de LATISPRO ;
- Une webcam ;
- Une balle de tennis.

Sachant que la position de la balle et la durée de chute sont reliées par la relation suivante, on peut trouver la valeur de  $g$  :

$$z = \frac{\Delta t^2}{2g}$$

○ Pour l'instant, on a fait l'étude à l'équilibre, c'est-à-dire lorsque la fusée était au sol. Il faut maintenant l'amener à l'altitude de son orbite.

## II Mise en orbite

L'objectif de cette partie est de déterminer l'énergie nécessaire pour amener la fusée en orbite.

## II.1 Expression du travail et stratégie adoptée

- Rappel (Slides) : On connaît l'expression du travail d'une force  $\vec{F}$  **constante** entre un point  $A$  et un point  $B$  :

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB}$$

Attention, le travail est une grandeur scalaire, et la force est une grandeur vectorielle.

- Le problème dans notre cas est que **la force n'est pas constante**. On va donc devoir utiliser une astuce pour la résolution :

On va prendre une portion entre deux points  $C$  et  $D$ , de hauteur  $\Delta z$  assez faible de telle sorte que la force de gravitation y soit constante.

On a alors :

$$W_{C \rightarrow D}(\vec{F}_g) = \vec{F}_g \cdot \overrightarrow{CD} = -\frac{G \cdot M_T \cdot m}{(R_T + z)^2} \cdot \vec{e}_z \cdot \Delta z \cdot \vec{e}_z = -\frac{G \cdot M_T \cdot m}{(R_T + z)^2} \cdot \Delta z$$

- On remarque que  $W_{C \rightarrow D}(\vec{F}_g) < 0$  donc c'est un **travail résistant**. C'est tout à fait logique, puisqu'il faut apporter de l'énergie pour contrebalancer la force de gravitation qui retient la fusée au sol.

○ *Le problème maintenant, c'est que le calcul est assez compliqué à faire pour nous. Alors on va utiliser un programme PYTHON pour le faire à notre place.*

## II.2 Calcul à l'aide du langage Python

On fait donc la somme de tous ces "petits" travaux, pour avoir le travail sur toute la distance.

```
m=100000 # masse de l fusée en kilo
M=5.972*10**24 # masse de la terre en kilo
R=6371000 # rayon de la terre en mètre
G=6.674*10**-11

hmax = 23222000 # altitude de l'orbite du satellite galiléo
hpas = 1000 # hauteur d'une petite tranche d'altitude
h=0 # altitude initial
W=0 # Travail initial de la force gravitationnelle

while h < hmax :
    g=G*M/((R+h)*(R+h)) # accélération de la pesanteur à l'altitude h
    W+=m*g*hpas # travail pour la tranche d'altitude à l'altitude h
    h+=hpas # incrémentation de l'altitude
```

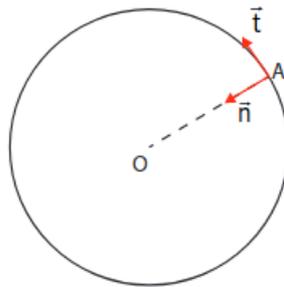
○ Une fois ce travail apporté, le satellite se trouve en orbite autour de la Terre, on peut alors étudier son mouvement, assez particulier.

### III Mouvement du satellite

*L'objectif de cette partie est d'étudier le mouvement du satellite une fois qu'il est arrivé en orbite autour de la Terre.*

#### III.1 Le repère de Frenet

- L'origine du repère de FRENET (A,  $\vec{t}$ ,  $\vec{n}$ ) est le système, en orbite autour de la Terre.
- Le vecteur  $\vec{t}$  est tangent à la trajectoire, tandis que le vecteur  $\vec{n}$  y est orthogonal, et pointe vers le centre de la Terre<sup>15</sup>.



- *Slides* : Dans ce repère, la vitesse s'exprime comme<sup>16</sup> :

$$\boxed{\vec{v} = v \cdot \vec{t}}$$

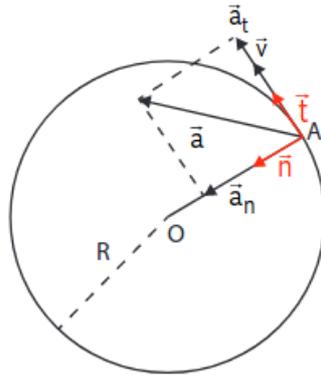
Et l'accélération comme<sup>17</sup> :

$$\boxed{\vec{a} = \underbrace{\frac{dv}{dt}}_{a_t} \cdot \vec{t} + \underbrace{\frac{v^2}{d_{TS}}}_{a_n} \cdot \vec{n}}$$

15. Source schéma : Lycée d'adulte, Paris

16. Admis en terminale, mais savoir le démontrer (en établissant les vecteur vitesse et accélération en base polaire)

17. Cette relation est donnée en classe de terminale (hors-programme). Il faut tout de même savoir la redémontrer.



○ Voyons ce que l'étude mécanique du satellite nous apporte, et déduisons-en la vitesse de celui-ci.

### III.2 Satellite en orbite

- Référentiel : géocentrique
- Bilan des forces : La force gravitationnelle qui s'exerce sur le satellite s'exprime maintenant comme :

$$\vec{F}_{T \rightarrow S} = -\frac{G \cdot M_T \cdot m}{d_{TS}^2} \cdot \vec{u}_{TS} = \frac{G \cdot M_T \cdot m}{d_{TS}^2} \cdot \vec{n}$$

- Seconde loi de NEWTON :  $\frac{d\vec{p}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}_{\text{ext}} = m \cdot \vec{a} = \frac{G \cdot M_T \cdot m}{d_{TS}^2} \cdot \vec{n}$

On peut, grâce à l'expression de l'accélération en base de FRENET donnée précédemment, identifier  $a_t$  et  $a_n$ , ce qui donne :

$$- a_n = \frac{v^2}{d_{TS}} = \frac{G \cdot M_T}{d_{TS}^2} \text{ donc :}$$

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{G \cdot M_T}{d_{TS}}}}$$

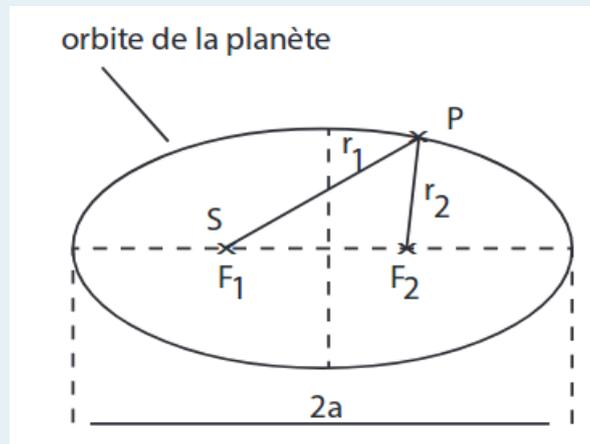
○ Cette dernière relation nous permet de trouver l'une des trois lois de KEPLER.

### III.3 \*Lois de Kepler

- On rappelle ce qu'est une ellipse, et que si les deux foyers sont confondus, c'est un cercle.

### Théorème (Première loi de KEPLER ou loi des orbites)

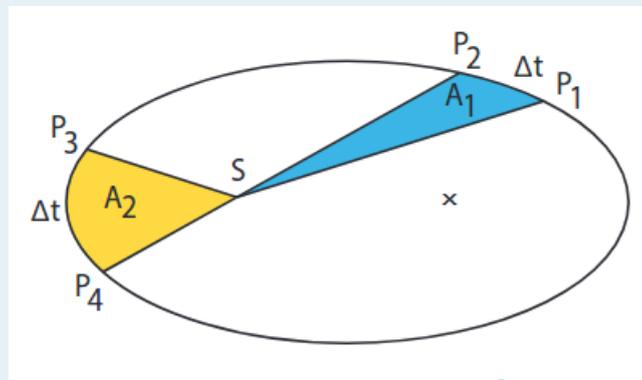
Les satellites décrivent des **ellipses** dont l'un des foyers est le centre de masse autour duquel ils tournent.



- Pourquoi voit-on certaines planètes moins longtemps que d'autres ?

### Théorème (Deuxième loi de KEPLER ou loi des aires)

Les aires balayées par le segment  $FS$  pendant deux durées  $\Delta t$  égales sont égales ;  $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2$ .



- On sait que la période de révolution  $T$  pour un mouvement circulaire et uniforme a pour expression :

$$T = \frac{\text{périmètre du disque}}{\text{vitesse de parcours}} = \frac{2\pi \cdot d_{TS}}{v}$$

En remplaçant  $v$  par l'expression trouvée à la partie précédente, on a :

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{d_{TS}^3}{G \cdot M_T}}$$

Ce résultat est généralisé par la troisième loi de KEPLER pour les satellite et les planètes.

### Théorème (Troisième loi de KEPLER ou loi des périodes)

Le carré de la période de révolution de chaque planète est proportionnel au cube du demi-grand axe  $a$  de son orbite elliptique :

$$\frac{T^2}{a^3} = k$$

Avec :

- $T$  en secondes (s) ;
- $a$  en mètres (m) ;
- $k$  en  $\text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ .

## Conclusion

- Réponse à la problématique : On a pu utiliser les lois de la mécanique newtonienne que l'on avait vu précédemment, et on en a déduit le mouvement du satellite.
- Ouverture : On a utilisé un langage informatique afin de faire un calcul : ouverture sur la véritable écriture du travail d'une force.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- On peut enlever la dernière partie sur les lois de KEPLER ou l'avant dernière partie sur l'étude mécanique dans la base de FRENET.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Le poids et la force de gravitation sont égales en première approximation, mais en réalité il manque la prise en compte des pseudo-forces d'inertie d'entraînement et de CORIOLIS. Voir l'explication dans le Dunod PC <sup>a</sup>, chapitre changement de référentiel avant de démarrer la leçon.
- ☞ Questions sur le programme python évidemment...

<sup>a</sup>. SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, tout-en-un, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.

### PROGRAMME OFFICIEL (TERMINALE, 2020) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Mouvement dans un champ de gravitation</b> Mouvement des satellites et des planètes. Orbite. Lois de Kepler. Période de révolution. Satellite géostationnaire.	Déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation newtonien. Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas du mouvement circulaire. <b>Capacité numérique</b> : Exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler.

Élément imposé : Résistance thermique**Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (Terminale) ;
- Prérequis :
  - \* Échelles macroscopique et microscopique ;
  - \* Ondes électromagnétiques (lumière) ;
  - \* Électrocinétique : loi d'OHM, association série et parallèle de résistances, puissance reçue ou délivrée.
- Séquence pédagogique : Il s'agit dans cette leçon d'introduire de nouveaux concepts concernant les transferts thermiques, c'est pourquoi les prérequis concernent d'autres domaines de la physique, notamment les prérequis d'électrocinétique pour une analogie entre la conduction et l'électricité. Le choix est fait ici de présenter les différents transferts mais de ne s'attarder que sur la conduction afin de l'appliquer aux pertes énergétiques. Une séance de TP de détermination de résistances thermiques de différents matériaux pourrait suivre la leçon.
- Difficultés :
  - \* Notion nouvelle de flux pas évidente à saisir ;
  - \* Trois modes différents de transferts thermiques.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Connaître les différents modes de transfert thermique et les associer à des situations connues ;
  - \* Connaître les notions de flux thermique et de résistance thermique, et les utiliser.
- Sources utilisées :

- (1) COPPENS, N., JOHANN, T., *et coll.*, *Physique-Chimie Term S spécifique*, Nathan, collection Sirius, 2012.
- (2) BARDE, M., BARDE, N., BAUDOIN, T., *Physique-Chimie Terminales*, Hachette éducation, 2020.
- (3) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, *tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.

# Introduction

Introduction sur la famille « Lambda » qui souhaite faire des économies dans la maison. Il y a des pertes d'énergies se faisant par plusieurs transferts thermiques.

## I Les différents modes de transferts thermique

*Dans cette partie, on cherche à voir par quel moyen l'énergie thermique est transportée.*

### I.1 La conduction

#### Expérience

Clous fixés sur une lame de cuivre avec de la cire, qui tombent tour à tour lorsqu'on chauffe l'extrémité du matériau. Possibilité de faire l'expérience avec plusieurs lames de matériaux différents pour montrer que la vitesse de chute des clous dépend du matériau choisi.

#### Définition

La **conduction** est un mode de transfert thermique qui s'effectue des zones chaudes vers les zones froides sans transport de matière, à travers un milieu immobile.

C'est un phénomène microscopique, et relativement lent, qui tend à uniformiser les températures.

#### Animation

GIF pour visualiser la conduction, on en trouve facilement en recherchant sur internet.

*Dans notre exemple de la maison : c'est pour cela qu'on isole la maison où qu'on met du double-vitrage, c'est pour empêcher la conduction qui amène du froid dans la maison.*

○ *Ce phénomène s'effectue sans transport de matière, mais que se passe-t-il avec transport de matière ?*

### I.2 La convection

#### Expérience

Tube en U rempli d'eau, et une goutte de colorant. On chauffe et on voit le déplacement de matière grâce au déplacement de la goutte de colorant.

Cette observation s'explique par l'évolution de la densité de l'eau en fonction de la température. L'eau est plus dense à faible température, donc l'eau chaude va monter (poussée d'ARCHIMÈDE).

#### Définition

La **convection** est un mode de transfert thermique, dans un fluide, qui s'effectue avec déplacement de matière.

Pour s'opérer, la convection nécessite un milieu matériel, à savoir un fluide en écoulement. C'est un phénomène relativement rapide.

*Dans notre exemple de la maison* : le vent peut venir souffler contre les murs, ce qui provoque un refroidissement des parois du mur, par convection.

○ *Lorsque l'on éclaire une surface, on observe parfois qu'elle s'échauffe. C'est encore un autre type de transfert d'énergie thermique.*

### I.3 Le rayonnement

#### Expérience

Expérience de la cloche à vide. On envoie un rayonnement lumineux (une simple lampe suffit) en faisant le vide ou non grâce à la cloche. On remarque que la température augmente, que le vide soit fait ou non.

Cette observation s'interprète par le fait que la lumière est une onde électromagnétique, et non une onde mécanique : elle n'a pas besoin de milieu matériel pour se propager.

#### Définition

Le **rayonnement** est un mode de transfert thermique qui s'effectue par absorption ou émission d'un rayonnement électromagnétique.

C'est le seul transfert thermique qui peut s'effectuer dans le vide.

*Dans notre exemple de la maison* : un radiateur, pour chauffer la maison, émet un rayonnement qui transporte l'énergie thermique utile.

○ *On va maintenant appliquer cela aux économies d'énergie de la famille lambda. On s'intéresse particulièrement à l'isolation.*

## II Aspect énergétique

### II.1 Notion de flux thermique

- Un corps chaud, séparé d'un corps froid par une paroi, échange avec l'extérieur pendant la durée  $\Delta t$  la quantité de chaleur  $Q$  selon les trois modes de transferts décrits précédemment.

#### Définition

On définit le **flux de transfert thermique**  $\Phi$  par la quantité d'énergie qui traverse une surface  $S$  par unité de temps :

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

Il s'exprime en Watt (ou  $\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

- On peut exprimer ce flux thermique en fonction de la surface  $S$  et de l'épaisseur  $e$  d'une paroi plane de conductivité thermique  $\lambda$  :

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = \frac{\lambda S}{e} (T_1 - T_2) \quad (22)$$

- Ainsi, si il fait plus chaud dans le domaine 2 que le domaine 1 ( $T_1 > T_2$ ), alors  $\Phi_{1 \rightarrow 2} > 0$ , ce qui veut dire que le transfert thermique s'effectue des zones chaudes vers les zones froides.
- La relation (22) fait intervenir  $\lambda$ , une nouvelle grandeur appelée **conductivité thermique**.

### Définition

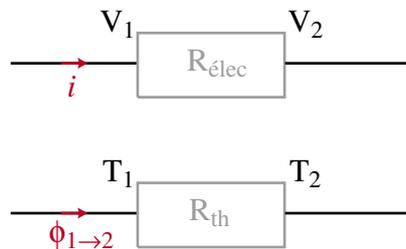
La **conductivité thermique** est une grandeur exprimée en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  qui traduit la capacité du matériau à transmettre la chaleur par conduction.

- Projeter un tableau avec quelques valeurs de conductivités thermiques de matériaux bien connus (eau, air, bois, fer)<sup>18</sup>.

○ Si l'on s'intéresse plus particulièrement à la conduction, on peut faire une analogie avec l'électricité qui a déjà été vue.

## II.2 Résistance thermique de conduction

On fait base cette partie sur une analogie avec l'électrocinétique :



On remarque une analogie entre :

- Le flux thermique  $\Phi_{1 \rightarrow 2}$  et l'intensité électrique : l'une est une énergie échangée par unité de temps, l'autre une quantité de charge échangée par unité de temps<sup>19</sup> ;
- La différence de température et la tension (différence de potentiel).

On peut donc avoir une analogie de la loi d'OHM  $U = Ri$  pour le transfert thermique :

$$T_2 - T_1 = R_{th} \Phi_{1 \rightarrow 2} \quad (23)$$

Par identification avec la relation (22), on en déduit la valeur de la résistance thermique dans le cas de la conduction :

18. SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., Physique PC-PC\*, tout-en-un, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.page 140.

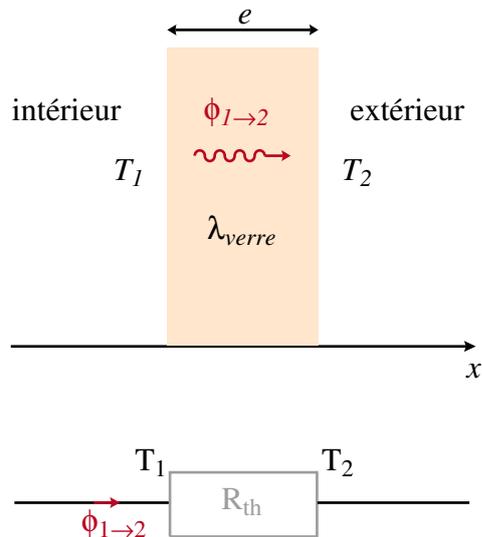
19.  $i = \frac{dq}{dt}$

$$R_{\text{cond}} = \frac{e}{\lambda S}$$

○ C'est bien la résistance thermique qui nous intéresse pour les économies d'énergies car elle "retient" la chaleur. On veut donc qu'elle soit la plus importante possible.

### II.3 Application à l'économie d'énergie

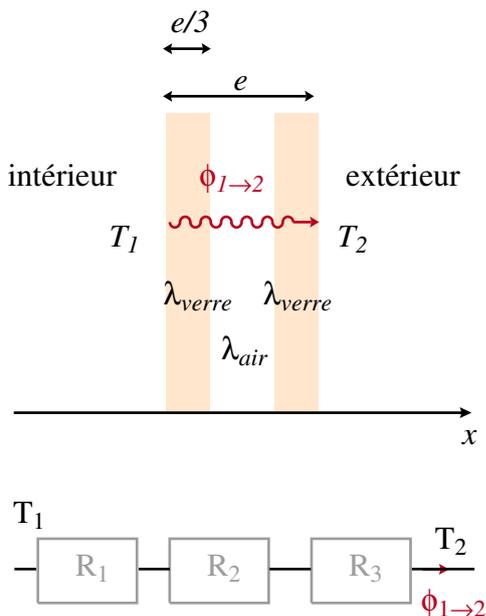
- Prenons l'exemple du simple vitrage :



La résistance thermique  $R_{\text{th}}$  est donc simplement :

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda_{\text{verre}} S} \quad (24)$$

- Prenons maintenant l'exemple du double vitrage. Le flux traverse successivement un milieu air puis verre puis air puis verre. On a donc une association série de trois résistances.



Cette fois la résistance thermique totale  $R_{\text{th,tot}}$  s'écrit :

$$R_{\text{th,tot}} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{2\frac{\epsilon}{3}}{S\lambda_{\text{verre}}} + \frac{\frac{\epsilon}{3}}{S\lambda_{\text{air}}}$$

- Pour comparer l'efficacité des résistances thermiques, on en fait le rapport :

$$\frac{R_{\text{th,tot}}}{R_{\text{th}}} = \frac{2}{3} + \frac{\lambda_{\text{verre}}}{3\lambda_{\text{air}}} \approx 30$$

- Conclusion : le double vitrage est 30 fois plus efficace que le simple vitrage<sup>20</sup>.

## Conclusion

- Réponse à la problématique : On a donc parlé majoritairement de la conduction dans cette leçon notamment sur les pertes, mais il existe aussi d'autres modèles prenant en compte la convection par exemple ;
- Ouverture : rayonnement du corps noir, effet de serre.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

— Faire une grande partie par rayonnement. Cela implique de traiter moins précisément le double vitrage au profit de la loi de STEFAN par exemple (cela pourrait être un élément imposé) pour les rayonnements.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Conducto-convection et loi de NEWTON ( $\delta Q = h(T_s - T_f) dSdt$ )
- ☞ Loi de FOURIER qui est implicitement énoncée dans cette leçon ;
- ☞ Équation de la chaleur ;
- ☞ Modèle du corps noir, loi de WIEN.

### PROGRAMME OFFICIEL (TERMINALE, 2020) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modes de transfert thermique. Flux thermique. Résistance thermique.	Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement. Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.

20. Source valeurs  $\lambda$  : *Physique tout-en-un PC/PC\**, 5<sup>e</sup> édition, M-N. SANZ, Dunod, pages 140 et 150

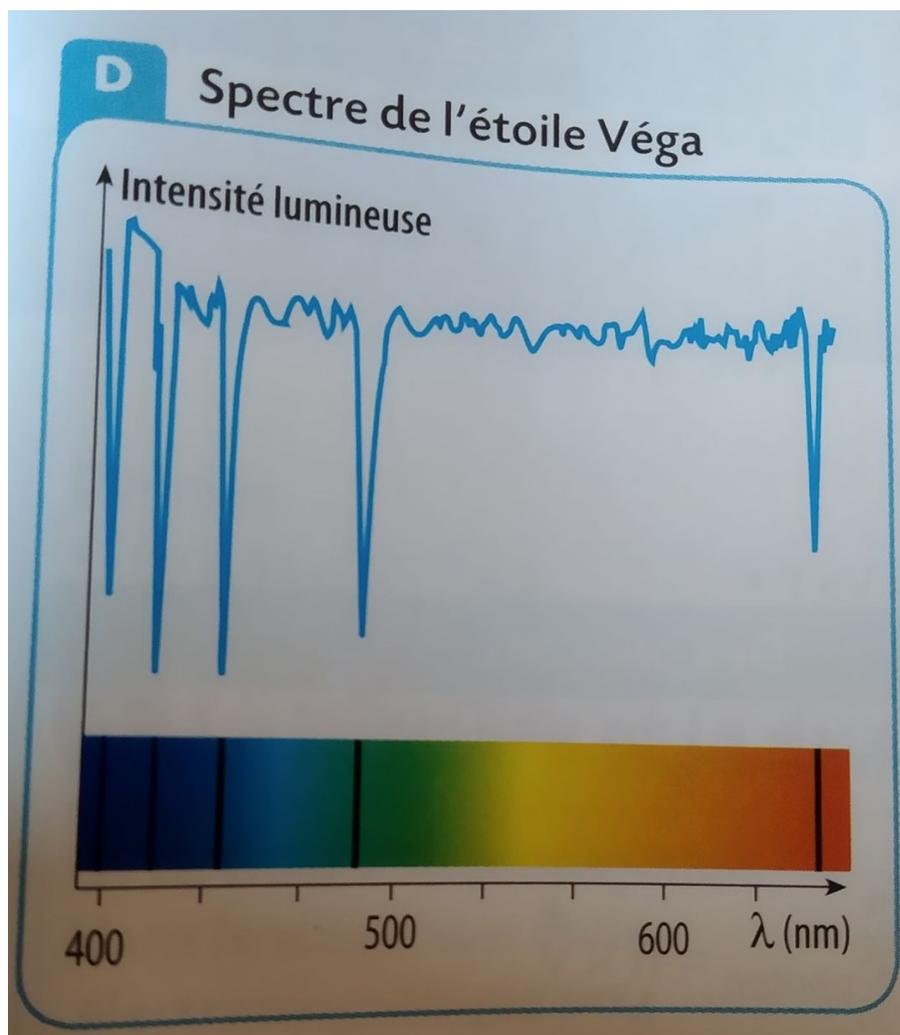
Élément imposé : Effet photoélectrique**Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (1ère spécialité P-C)
- Prérequis :
  - \* Notion de spectres vue en seconde ;
  - \* Synthèse des couleurs, couleurs complémentaires, etc.
  - \* Pré-requis mathématique : fonction logarithme décimal.
- Séquence pédagogique : Cette leçon serait placée après un cours sur les ondes, afin que les élèves aient déjà vu les notions de fréquence et de longueur d'onde. On se base également sur le programme de seconde dans lequel ils auraient déjà vu la dispersion de la lumière par un prisme et les spectres d'absorption continus et de raies. Après cette leçon, un TP pourrait être fait afin de compléter les notions d'absorbance et la loi de BEER-LAMBERT.
- Difficultés :
  - \* Notions sur les ondes : fréquence, longueur d'onde, et période.
  - \* Ne pas confondre les spectres d'émission et d'absorption ;
  - \* Voir des énergies de signe négatif ;
  - \* Considérer la lumière à la fois comme une onde ET comme une particule.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre que la lumière peut à la fois être considérée comme une onde et comme une particule ;
  - \* Comprendre la présence de raies sur les spectres d'absorption et d'émission ;
  - \* Connaître et utiliser la notion d'absorbance et la loi de BEER-LAMBERT.
- Sources utilisées :

- (1) ANTCZAK, S., JOUVY, J-C., LACORRE-CHUETTE, N., LAGNAUD, P., MOUNIER, F., *Physique-Chimie 1<sup>ère</sup>*, Hatier, 2019.
- (2) <https://phet.colorado.edu/>, animations pour la physique et la chimie ;
- (3) Site de Geneviève TULLOUE, [https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue](https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue).

## Introduction

- Voici le spectre d'absorption de l'étoile Véga<sup>21</sup> :



- On observe qu'il s'agit d'un spectre de raies. Comment peut-on expliquer la présence de ces raies ?

---

*Que se passe-t-il lorsque la lumière rencontre la matière ?*

---

## I Dualité onde-particule

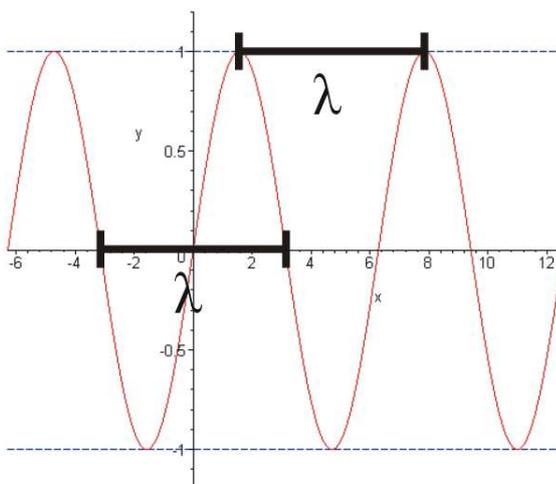
La lumière est-elle une onde ? Est-elle une particule ?

---

21. [1] page 343.

## I.1 Le modèle ondulatoire de la lumière

- L'onde est une **onde électromagnétique**. Elle est caractérisée par une fréquence  $\nu$  et une période  $T$  (caractère temporel) et une longueur d'onde (caractère spatial)  $\lambda$ .



- Ces deux grandeurs sont reliées par la relation :

$$\boxed{\lambda = \frac{c}{\nu}} \quad (25)$$

- Rappel (Slides) : Différents domaines des ondes électromagnétiques. Identifier la lumière visible.

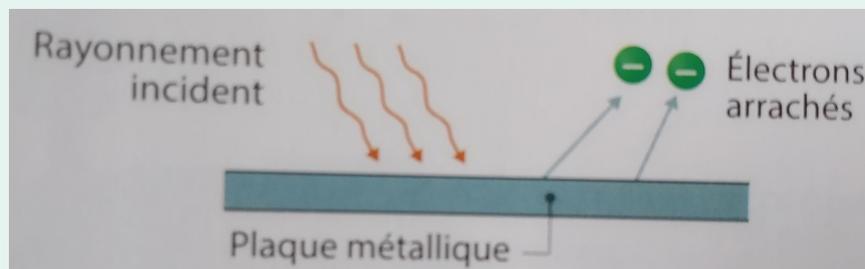
○ *Mais la lumière ne se comporte pas seulement comme une onde.*

## I.2 La modèle corpusculaire de la lumière

### Animation

Animation sur l'effet photoélectrique <sup>a</sup>

Lorsqu'on envoie des rayons lumineux sur une plaque, celui-ci est capable d'éjecter des électrons.



*Schéma vol  dans le manuel hachette*

- On peut faire varier l'intensité lumineuse ;
- On peut faire varier la longueur d'onde ;
- On remarque en faisant varier la longueur d'onde qu'il apparaît une longueur d'onde de seuil pour éjecter des électrons et donc faire apparaître un courant.
- On met donc en évidence que la lumière transporte une énergie donc la valeur est liée à la longueur d'onde du rayonnement.

a. Quelques explications concises mais précises dans SANZ, M-N., SALAMITO, B., *et coll.*, *Physique PCSI, tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019., page 228

- On met donc en évidence le fait que la lumière transporte de l'énergie.
- En 1905, Albert EINSTEIN émet l'hypothèse que cette énergie est transportée par des particules qui se déplacent à la vitesse de la lumière : les **photons**.
- L'énergie de ces photons est proportionnelle à la fréquence de l'onde lumineuse :

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

Où  $h$  est la constante de PLANCK,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  En utilisant la relation 25, on a également :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda}$$

  Notre but est de savoir comment la matière réagit à l'envoi de lumière. Pour cela on a besoin de savoir que la matière est quantifiée

## II Quantification de la matière

Même si le titre de cette partie est légèrement ambiguë, l'idée à faire passer ici est la quantification de l'énergie. Il faut bien choisir ses mots : ce concept totalement nouveau est complètement abstrait pour des élèves de première. Le jury nous attend là dessus.

### Expérience

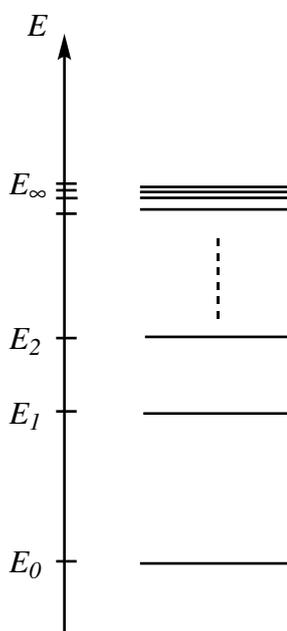
Spectre de la lampe à mercure (Hg). Le montage est composé de :

- Lampe à vapeur de mercure ;
- Un collimateur ;
- Une lentille convergente (Distance focale ?) ;
- Un prisme à vision directe ;
- Une lentille convergente ;
- Un écran.

On va dans cette partie tenter de comprendre pourquoi le spectre lumineux de la lampe à mercure est constitué de raies.

## II.1 La quantification des niveaux d'énergie de l'atome

- En 1913, Niels BOHR propose un modèle pour expliquer le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène (*projeté sur les slides, similaire à celui du mercure*). Il introduit la notion de **niveaux d'énergie**.



- Ainsi l'énergie d'un atome ne peut prendre que certaines valeurs bien précises (*un peu comme on ne peut ranger des livres que sur une étagère d'une bibliothèque, pas entre deux!*).

○ Mais comment faire un lien avec la lumière ?

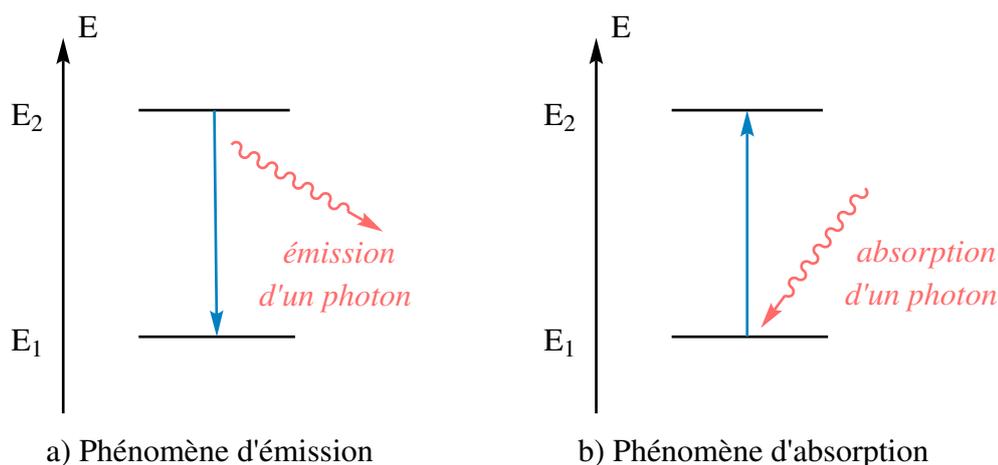
## II.2 Absorption de photon

- On envoie un rayon lumineux sur un échantillon.
- La lumière a pour effet d'apporter de l'énergie à l'atome de l'échantillon. C'est par le biais du photon que l'atome va **gagner** de l'énergie. Puisque l'énergie est quantifiée, il faut apporter exactement la quantité d'énergie suffisante pour que l'atome passe dans un niveau d'énergie supérieur.
- L'énergie de la transition correspond à l'énergie apportée par le photon :

$$\Delta\mathcal{E} = |\mathcal{E}_{\text{fin}} - \mathcal{E}_{\text{ini}}| = \frac{hc}{\lambda_{\text{abs}}}$$

## II.3 Émission de photon

- Si un atome se trouve dans un état excité, il peut retomber dans un état d'énergie plus faible.
- En perdant cette énergie, il va **émettre** un photon d'énergie égale à la différence d'énergie  $\Delta\mathcal{E}$  entre les deux niveaux d'énergie :



- L'énergie de la transition correspond à l'énergie du photon émis :

$$\Delta\mathcal{E} = |\mathcal{E}_{\text{fin}} - \mathcal{E}_{\text{ini}}| = \frac{hc}{\lambda_{\text{em}}}$$

Faire le calcul pour les transitions visibles pour le mercure, des niveaux d'énergies concernés par les raies.

○ On a parlé d'atomes, mais on peut appliquer cela aussi au molécule.

## III Application à la spectroscopie moléculaire

Dans cette partie, on va se concentrer sur le phénomène d'absorption.

## Expérience

Montage pour montrer l'absorption du permanganate de potassium. Le montage est composé de :

- Une lampe blanche (en général avec un collimateur "intégré") ;
- Une lentille convergente ;
- Un prisme à vision directe ;
- Une lentille convergente ;
- Un support élévateur sur lequel est posée la cuve contenant  $\text{KMnO}_4$ .

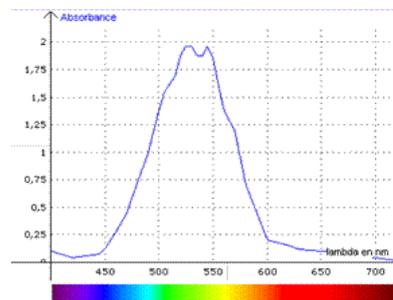


### III.1 Loi de Beer-Lambert

- On compare les intensités d'un faisceau à l'entrée ( $I_0$ ) et à la sortie ( $I$ ) d'un échantillon.
- La grandeur qui compare ces deux intensités est l'**absorbance**, et elle se mesure à l'aide d'un appareil appelé **spectrophotomètre**.
- On définit l'**absorbance** comme :

$$A = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

- Une molécule est capable d'absorber la lumière sur une certaine plage de longueur d'onde. On peut alors tracer l'absorbance en fonction de la longueur d'onde du rayon incident :



- On se place au maximum d'absorption. En augmentant la concentration on remarque que l'absorbance augmente elle aussi. Pour quantifier cela, la relation de BEER-LAMBERT donne une relation de proportionnalité :

$$A = \epsilon_\lambda \cdot \ell \cdot c$$

Avec :

- $\varepsilon_\lambda$  le **coefficient d'extinction molaire** en  $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$  qui traduit la capacité d'une molécule à absorber de la lumière ;
- $\ell$  en cm, la longueur de la cuve ;
- $c$  en  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , la concentration molaire de la solution.

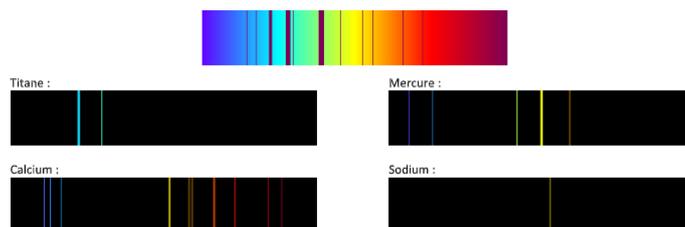
○ Quelles peuvent-être les utilités de cette loi ?

### III.2 Détermination d'une concentration

- Explication du dosage par étalonnage
- Détermination d'une concentration grâce à une échelle de teinte faite en préparation.

## Conclusion

- Réponse à la problématique : Ce que l'on a vu dans cette leçon est à la base de la spectroscopie, qui permet d'identifier comment les composés réagissent à l'envoi d'un rayonnement.
- Conclusion : Grâce à ces éléments, les chercheurs peuvent déterminer la présence de certains éléments sur des planètes ou des étoiles comme pour l'étoile Véga :



- On a beaucoup parlé de rayonnements visibles mais il y a aussi des rayonnements invisibles, par exemple, les spectres IR.

#### Autre(s) possibilité(s) de plan

- Ici j'ai décidé de me servir de l'élément imposé comme observation pour amener la notion d'énergie de photon, de quantification, etc. Mais on aurait pu voir aussi une partie entière dessus avec un détail plus important ;
- On aurait pu envisager de mettre la première partie complètement en pré-requis, *à priori* cela a déjà été vu en seconde ;
- On peut aussi faire en première partie l'énergie de photon, en deuxième la quantification de la matière et en troisième l'interaction lumière-matière sans mettre de chimie dedans.

**PROGRAMME OFFICIEL (PREMIÈRE, 2019) :**

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
<p>Domaines des ondes électromagnétiques.</p> <p>Relation entre longueur d'onde, célérité de la lumière et fréquence.</p> <p>Le photon. Énergie d'un photon. Description qualitative de l'interaction lumière-matière : absorption et émission.</p> <p>Quantification des niveaux d'énergie des atomes.</p>	<p>Utiliser une échelle de fréquences ou de longueurs d'onde pour identifier un domaine spectral.</p> <p>Citer l'ordre de grandeur des fréquences ou des longueurs d'onde des ondes électromagnétiques utilisées dans divers domaines d'application (imagerie médicale, optique visible, signaux wifi, micro-ondes, etc.).</p> <p>Utiliser l'expression donnant l'énergie d'un photon.</p> <p>Exploiter un diagramme de niveaux d'énergie en utilisant les relations <math>\lambda = \frac{c}{\nu}</math> et <math>\Delta\mathcal{E} = h\nu</math>.</p> <p><i>Obtenir le spectre d'une source spectrale et l'interpréter à partir du diagramme de niveaux d'énergie des entités qui la constituent</i></p>

## MOUVEMENTS, INTERACTIONS ET NOTION DE CHAMPS

Élément imposé : particule chargée dans un champ électrique

### Introduction pédagogique

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire
- Prérequis :
  - \* Mécanique du point : notion de référentiel, lois de NEWTON, notion de champ, de force.
  - \* Électrocinétique : notion de tension, de charges.
- Séquence pédagogique : Dans cette leçon de l'ancien programme de TS, on ne cherche pas l'exhaustivité en listant tous les champs possibles. On va se concentrer sur le champ électrique en se basant sur des analogies avec le champ de pesanteur qui aurait été vu avant. .
- Difficultés :
  - \* Force et champs ;
  - \* Difficultés mathématiques : vecteurs, géométrie, primitives.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Tracer la trajectoire d'une particule chargée plongée dans un champ électrostatique.
- Sources utilisées :

- (1) RUFFENACH, M., CARIAT, T., MORA, V., *Physique-Chimie Terminale S, programme 2012*, Dunod, 2012.
- (2) SANZ, M-N., SALAMITO, B., *et coll., Physique PCSI, tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019.
- (3) MÉLISSOPOULOS, A., *Quelques mouvements particuliers*, Lycée d'adultes, <https://www.lyceedadultes.fr/sitepedagogique/documents/PC/PCTermS/>.

### Introduction

- Contextualisation : spectrométrie de masse (on veut séparer des entités chargées selon leur masse, comment faire?) ou accélérateur linéaire de particule.

- Rappel de la leçon précédente : différence entre champs et force, champs de pesanteur uniforme qui provoque le déplacement d'un corps de masse non nul etc.

---

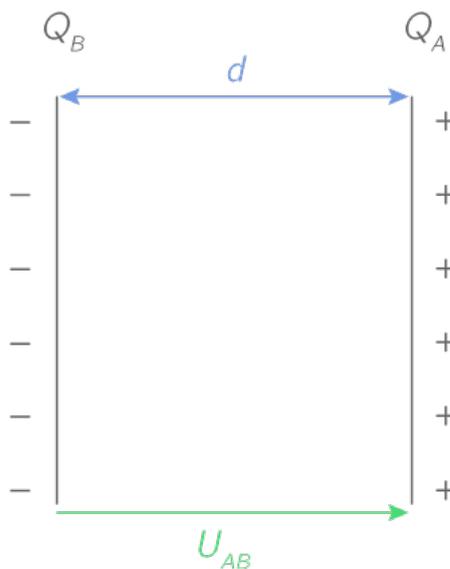
*Que devient une particule chargée plongée dans un champs électrostatique uniforme ?*

---

## I Notion de champs électrostatique uniforme

### I.1 Étude du condensateur plan

- On cherche à créer un champ électrostatique uniforme, c'est-à-dire un champ électrique ne dépendant pas du temps, et uniforme. Pour cela, on crée une accumulation de charge négative sur une plaque qui fait face à une autre plaque, celle-ci chargée positivement. Il se crée un champ électrostatique :



- On dit qu'un champ est uniforme lorsqu'il est le même en tout point de l'espace (analogie avec  $\vec{g}$ ).

○ Quelles sont les grandeurs caractéristiques de ce champ ?

## I.2 Influence des grandeurs physiques

### Expérience

Condensateur d'ÆPINUS, relié à un capacimètre. Montrer que la capacité dépend de la distance entre les plaques.



### Propriété

On admet que la norme du champ électrique entre deux plaques s'écrit de la manière suivante :

$$E = \frac{U}{d} \quad (26)$$

Avec :

- $E = \|\vec{E}\|$  la norme du champ électrostatique (en  $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ );
- $U$  la tension entre les deux plaques (en V);
- $d$  la distance entre les deux plaques (en m).

○ On va maintenant voir ce qu'il se passe lorsque l'on place une particule chargée au milieu d'un tel champs électrique.

## II Mouvements d'une particule chargée dans un champs électrostatique

*Le but de cette deuxième partie est d'établir les équations horaires et l'équation du mouvement de la particule plongée dans un champs.*

## II.1 Force et accélération

*On fait constamment l'analogie avec le champ de pesanteur.*

- On fait l'étude mécanique d'une particule.
  - \* Référentiel :  $\mathcal{R}$ , terrestre supposé galiléen
  - \* Système : une particule de charge  $q$
  - \* Bilan des forces : seulement la force électrique  $\vec{F}_e = q\vec{E}$  (ils ne la connaissent pas, il faut l'introduire, en précisant l'analogie avec  $\vec{P} = m\vec{g}$ )

### Remarque

Pourquoi ne pas prendre le poids en compte ? Montrer à l'aide d'un calcul d'ordre de grandeur que la prise en compte du poids est négligeable.

- \* Application du PFD : en considérant que la particule a une masse constante on a la relation suivante.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt}(t) = \vec{F}_e = q\vec{E}$$

On a donc l'expression de l'accélération de la particule dans le champs électrostatique uniforme donnée par la relation :

$$\boxed{\vec{a}_{P,\mathcal{R}} = \left. \frac{d\vec{v}}{dt} \right|_{P,\mathcal{R}} = \frac{q}{m} \vec{E}} \quad (27)$$

○ On a donc maintenant l'expression du vecteur accélération de la particule chargée une fois qu'elle pénètre dans la zone soumise au champs. Grâce à cela, et à ce qu'on connaît sur le vecteur accélération, on va pouvoir déterminer sa vitesse et sa position.

## II.2 Équations horaires et trajectoire

### Expérience

On fait l'expérience du tube de déviation : un canon à électrons envoie des électrons sur un écran luminescent entre lequel un champ électrostatique uniforme est appliqué. Si on n'applique aucune tension entre les deux plaques, alors le « jet » d'électrons n'est pas dévié. En revanche lorsqu'on applique une tension, il y a **déviation du faisceau** d'électrons vers le haut.

- On a donc un vecteur accélération dont les projections sont les suivantes :

$$\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -\frac{qE}{m} \\ a_z = 0 \end{cases}$$

- On cherche l'expression de la vitesse, c'est-à-dire la fonction qui, une fois dérivée, a donné  $\vec{a}_{P,\mathcal{R}}$ . Autrement dit on cherche les trois composantes du vecteur accélération correspondante chacune à la primitive de chaque composante du vecteur vitesse.

$$\begin{cases} v_x = k_1 \\ v_y = -\frac{qE}{m}t + k_2 \\ v_z = k_3 \end{cases}$$

Les conditions initiales nous permettent de trouver les constantes, et donc l'expression finale du vecteur position :

$$\begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = -\frac{qE}{m}t \\ v_z = 0 \end{cases} \iff \vec{v}_{P,\mathcal{R}} = v_0 \cdot \vec{e}_x - \frac{qE}{m}t \cdot \vec{e}_y$$

- Ensuite on réitère et on trouve les équations horaires de la position :

$$\begin{cases} x = v_0t \\ y = -\frac{qE}{2m}t^2 \\ z = 0 \end{cases} \iff \vec{OM}_{P,\mathcal{R}} = v_0t \cdot \vec{e}_x - \frac{qE}{2m}t^2 \cdot \vec{e}_y$$

### Important

Ces équations sont appelées **équations horaires du mouvement**.

- Ensuite on isole  $t$  dans l'équation horaire en  $x$ , pour obtenir une équation de trajectoire :

$$y(x) = -\frac{qEx^2}{mv_0^2} \quad (28)$$

Soit pour un électron, de charge  $q = -e$  avec  $e$  la charge élémentaire :

$$y(x) = \frac{eEx^2}{mv_0^2} \quad (29)$$

### Important

On retrouve l'équation d'une parabole.

○ Ces équations ont une application directe en science : l'accélérateur de particule, qui utilise directement les équations que l'on a établies.

## II.3 \*Accélérateur linéaire de particules

*Cette partie tiroir est très descriptive.*

Un accélérateur est un dispositif permettant d'accélérer des particules chargées afin de leur fournir une énergie cinétique importante dans le but de produire des réactions avec la matière.

### Conclusion

- Réponse à la problématique : On a mis en évidence le mouvement d'une particule chargée. Le mouvement dépend de la charge de la particule, de sa masse, de la valeur du champ électrique (*ie.* de la tension et distance entre les plaques).
- Ouverture : Accélérateur linéaire de particule et/ou spectrométrie de masse.

#### Autre(s) possibilité(s) de plan

- Voir la LP12 sur la gravitation, si l'élément imposé n'oriente pas la leçon sur les particules chargées ;
- Contextualisation possible via l'exemple du spectro de masse ([2] page 696).

#### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Questions sur le condensateur : capacité, démonstration via le théorème de GAUSS ;
- ☞ Force de LORENTZ et sa partie magnétique négligeable (savoir le montrer dans le cas des électrons non-relativistes) ;
- ☞ Équations de MAXWELL ;
- ☞ Aspect énergétique ([2] page 692) ;
- ☞ Questions Cyclotron.

#### PROGRAMME OFFICIEL (TERMINALE, 2020) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Mouvement dans un champ uniforme</b> Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme. Champ électrique créé par un condensateur plan. Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.  Principe de l'accélérateur linéaire de particules.	Montrer que le mouvement dans un champ uniforme est plan. Établir et exploiter les équations horaires du mouvement. Établir l'équation de la trajectoire. Discuter de l'influence des grandeurs physiques sur les caractéristiques du champ électrique créé par un condensateur plan, son expression étant donnée. Décrire le principe d'un accélérateur linéaire de particules chargées. <b>Capacités mathématiques</b> : Résoudre une équation différentielle, déterminer la primitive d'une fonction, utiliser la représentation paramétrique d'une courbe.

Élément imposé : Relation entre volume et pression**Introduction pédagogique**

- Niveau : Cycle terminal de l'enseignement secondaire (1ere Spécialité)
- Prérequis :
  - \* Notion de fluide (définition, exemples), définition de la masse volumique ;
  - \* Différentes échelles, macro, micro ;
  - \* Définition rapide de la température (seulement le lien avec l'agitation thermique).
- Séquence pédagogique : Ce cours arrive au début d'une séquence sur l'étude des fluides au repos. La notion de fluide a déjà été introduite. Les élèves sont à ce stade conscients de l'agitation thermique dans les fluides et on va définir, en lien avec ce qui a été vu, la notion de pression, bien qu'elle soit connue dans l'oreille du grand public. Ce cours peut être complété par un TP de vérification de la loi de MARIOTTE ou de la loi de la statique.
- Difficultés :
  - \* La pression n'est pas une force, ce n'est pas un vecteur ;
  - \* Attention aux erreurs de signes, notamment dans le PFS ;
  - \* Unités notamment celles de la pression, utilisées dans les relations.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Définir ce qu'est la pression ;
  - \* Découvrir et utiliser les lois de MARIOTTE et fondamentale de la statique.
- Sources utilisées :

- (1) DOUTHE, L., FRAY, B., *Physique-Chimie 1<sup>ère</sup>, manuel collaboratif*, Le livre scolaire, 2019.
- (2) BELLIER, J-P., CALAFELL, *et coll.*, *Physique/Chimie 1ère - Livre élève*, Hachette éducation, 2019.
- (3) FADIE, G., *Démonstration de la loi de BOYLE-MARIOTTE*, vidéo YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=hPhY6MZCv5U>.
- (4) POISSON, F., *Statique des fluides*, Lycée d'adultes, <https://www.lyceedadultes.fr/sitepedagogique/documents/PC>.

## Introduction

- Dans les leçons précédentes : on a vu ce qu'était un fluide (définition projeté sur slides) ;
- On remarque que si le plongeur descend dans le bas de la piscine, l'une des deux bouteilles se contracte.

### Animation

Vidéo YouTube <sup>a</sup> qui montre à la fois la relation profondeur pression, la loi de MARIOTTE, et le caractère compressible de l'air et incompressible de l'eau.

a. <https://www.youtube.com/watch?v=hPhY6MZCv5U>

---

*Pourquoi la bouteille se contracte-t-elle lorsqu'elle est plongée à quelques mètres sous la surface de l'eau ?*

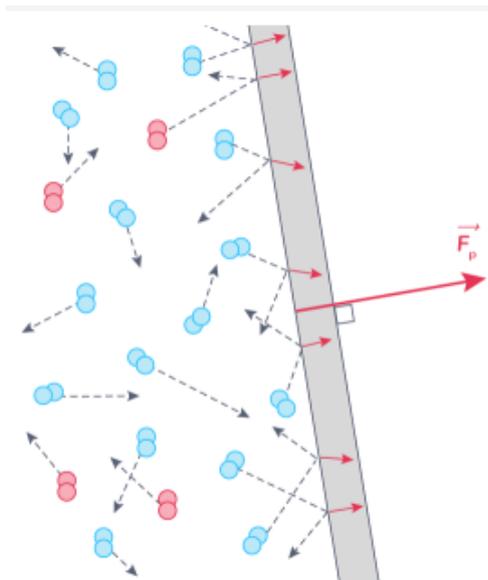
---

## I Relation entre la pression et le volume

La pression est présente dans le langage courant. Nous allons en donner une définition rigoureuse dans cette partie, et tenter de comprendre pourquoi le volume de la bouteille a diminué.

### I.1 Pression et force pressante

- L'agitation des molécules au sein d'un fluide provoque des chocs entre les molécules et des chocs sur les parois.
- La pression est une grandeur qui mesure l'action mécanique exercée par le fluide sur une surface. Il résulte de cette action mécanique une **force** appelée **force de pression** ou **force pressante**.



### Définition

La norme  $F$  de cette force de pression  $\vec{F}$  dépend de la pression  $P$  du fluide et de la surface  $S$  de contact <sup>a</sup> :

$$\boxed{F = P \times S} \quad (30)$$

- $F$  en N;
- $P$  en  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ;
- $S$  en  $\text{m}^{-2}$

La **direction** de cette force est perpendiculaire à la paroi. Le **sens** de cette force va du fluide vers la paroi.

<sup>a</sup>. Rigoureusement, la force s'écrit vectoriellement comme  $\vec{F}_p = P \cdot \vec{dS}$

### Expérience

Avec une seringue, on appuie, donc on augmente la pression. La force de pression tend à repousser le piston. Elle est donc dirigée vers l'extérieur du système dans lequel la pression est plus élevée que  $P_{atm}$

○ On a vu que dans l'une des bouteille, on avait un gaz : l'air. Et que dans cette bouteille, on avait une réduction du volume. Pourquoi ?

## I.2 Loi de Mariotte

- On va alors faire un lien entre la pression et le volume pour le gaz (l'air) se trouvant dans la bouteille en plastique.

### Théorème

À température constante et à quantité de matière constante, le produit de la pression  $P$  d'un gaz par le volume  $V$  qu'il occupe est constant :

$$P \times V = \text{constante}$$

- $P$  en Pa ;
- $V$  en  $\text{m}^3$ .

### Expérience

Pour retrouver cette loi, il faut se munir d'un capteur de pression pour mesurer la pression de l'air à l'intérieur d'une seringue. On trace alors  $P = f\left(\frac{1}{V}\right)$  et on en déduit la proportionnalité en obtenant une droite <sup>a</sup>.



a. [2], page 197.

- Limites de cette relation : Cette relation n'est valable que pour des pressions relativement faibles (inférieures à 100 bars, soit  $10^7$  Pa). Cette relation n'est **pas valable pour les liquides**.
- On peut alors trouver l'expression du volume au point  $B$ , en profondeur.  
Sachant que le produit  $PV$  est une constante, il est égal au point  $A$  et au point  $B$  :

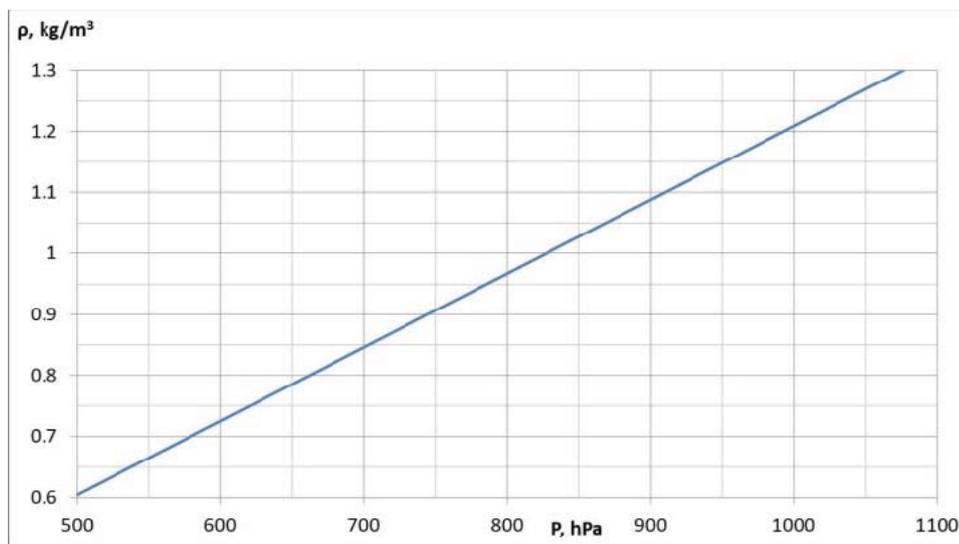
$$P_A \cdot V_A = P_B \cdot V_B \text{ donc } V_B = V_A \cdot \frac{P_A}{P_B}$$

○ Cependant, on ne peut pas faire l'application numérique, car il nous manque la valeur de la pression  $P_B$  en profondeur ! Pour cela, il nous faut une relation entre la profondeur  $z_B$  et la pression en ce point.

## II Relation entre la pression et la profondeur

### II.1 Notion de fluide incompressible

- On remarque expérimentalement<sup>22</sup> que certains fluides ont la même masse volumique quelle que soit la pression. D'autres on une pression qui varie. Par exemple, pour l'air, on voit que l'augmentation de pression provoque une augmentation de sa densité (*ie.* de sa masse volumique) :



#### Définition

Un fluide est dit **incompressible** lorsque sa masse volumique  $\rho$  est indépendante de la pression  $P$ .

- En pratique, les liquides sont considérés **incompressibles**, les gaz sont considérés **compressibles**.

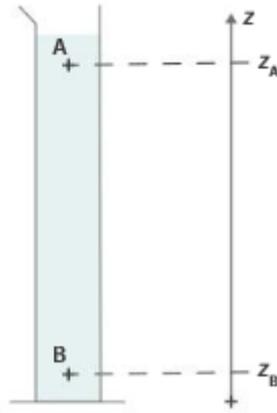
○ Dans notre exemple, l'eau est incompressible, on va pouvoir utiliser une relation et connaître la pression en profondeur.

### II.2 Relation fondamentale de la statique des fluides

La pression dans l'eau augmente avec la profondeur. Le but est de relier la pression à la profondeur :

---

22. Il faudrait des valeurs...



### Théorème

La **loi fondamentale de la statique des fluides** pour un fluide **au repos** et **incompressible** (masse volumique  $\rho$  constante) s'écrit :

$$\boxed{P_B - P_A = \rho \times g \times (z_A - z_B)} \quad (31)$$

dans le cas où l'axe des coordonnées verticales est orienté **vers le haut**.

- les pressions sont en Pa ou  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$  ;
- $\rho$  en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ;
- $g$  en  $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;
- $z_A$  et  $z_B$  en m.

On peut alors déterminer la pression en profondeur, au point  $B$  : on a une profondeur  $\Delta z = z_B - z_A$  de 11 mètres. Alors  $P_B = P_A - \rho \cdot g \cdot \Delta z = 10^5 + 1000 \times 9,82 \times 11 = 2,0802 \cdot 10^5$  Pa. D'après la relation de MARIOTTE, on peut en déduire le volume en profondeur :

$$V_B = \underbrace{1,5}_{\text{en L}} \cdot \frac{1,013}{2,0802} = 0,73 \text{ L}$$

## Conclusion

- Réponse à la problématique : On a vu que deux lois étaient impliqués dans le phénomène observé en introduction avec la vidéo. Non seulement la pression dans le liquide est plus élevée en profondeur, et le produit  $P \cdot V$  constant nous permet d'expliquer les observations. On a également vu que la bouteille d'eau plongée dans l'eau ne se contractait pas, on l'a expliqué par le fait que l'eau n'était pas un fluide compressible.
- Ouverture : Si l'on s'intéresse à la bouteille du plongeur, contenant 15 L d'air initialement, et donc la pression varie au cours de la plongée. Le volume des bouteilles d'oxygène ne varie pas cependant ! On a bien une autre variable, et il s'agit de la quantité de matière de gaz,  $n$ . La loi de MARIOTTE n'est plus acceptable.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- On peut (selon l'élément imposé...) commencer par introduire la notion de fluide, et de parler d'échelle macroscopique, microscopique.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ La démonstration du principe fondamental de la statique des fluides se démontre par un bilan mécanique sur une particule fluide. Les forces exercées sont le poids et les forces de pressions d'équivalent volumique  $\vec{f}_p = -\text{grad}p$ .
- ☞ La loi de MARIOTTE provient de la loi des gaz parfaits  $P \cdot V = nRT$  à température et quantité de matière constante.
- ☞ Avoir en tête que l'écoulement d'un fluide incompressible est caractérisé mathématiquement par l'équation locale  $\text{div} \vec{v} = 0$ . Le vecteur vitesse est alors à flux conservatif  $\oiint_S \vec{v} \cdot d\vec{S} = 0$  donc le débit volumique à travers une surface fermée est nul, quelle que soit la surface fermée.

### PROGRAMME OFFICIEL (PREMIÈRE, 2019) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Description d'un fluide au repos</b> Échelles de description. Grandeurs macroscopiques de description d'un fluide au repos : masse volumique, pression, température. Modèle de comportement d'un gaz : loi de MARIOTTE.  Actions exercées par un fluide sur une surface : forces pressantes.  Loi fondamentale de la statique des fluides.	Expliquer qualitativement le lien entre les grandeurs macroscopiques de description d'un fluide et le comportement microscopique des entités qui le constituent. Utiliser la loi de MARIOTTE. <i>Tester la loi de MARIOTTE, par exemple en utilisant un dispositif comportant un microcontrôleur.</i> Exploiter la relation $F = P.S$ pour déterminer la force pressante exercée par un fluide sur une surface plane $S$ soumise à la pression $P$ . Dans le cas d'un fluide incompressible au repos, utiliser la relation fournie exprimant la loi fondamentale de la statique des fluides : $P_2 - P_1 = \rho g (z_1 - z_2)$ . <i>Tester la loi fondamentale de la statique des fluides.</i>

Élément imposé : Application à l'échographie**Introduction pédagogique**

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur
- Prérequis :
  - \* Ondes :  $T, \nu, \lambda, \vec{u}, \vec{k}$  ;
  - \* Mécanique : référentiel,  $\vec{v}_{M,\mathcal{R}}$ , lien entre vitesse position et distance ;
  - \* Profils spectraux : gaussiennes et lorentziennes ;
  - \* Pré-requis mathématique : géométrie vectorielle, relation de CHASLES.
- Séquence pédagogique : Leçon qui trouve difficilement sa place dans une filière particulière de l'enseignement supérieur français. En BCPST, éventuellement. Une séquence sur les ondes viendrait se conclure par cette leçon. Un TP sur la détection synchrone peut être envisagé pour compléter l'exposé.
- Difficultés :
  - \* La démonstration de la formule générale qui est fait ici n'est pas aisée ;
  - \* Le signal lors d'une échographie subit un « double effet DOPPLER » ;
  - \* Positionnement du problème pouvant induire des erreurs de signe.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre plus profondément l'effet DOPPLER qu'au lycée, en démontrant la relation générale ;
  - \* Application de l'effet DOPPLER aux ondes électromagnétiques.
- Sources utilisées :

- (1) CÔTE, I., VIDAL, A., *Physique-Chimie BCPST 2e année*, Dunod, J'assure aux concours, 2017.
- (2) SAZDJIAN, H., *Ondes*, Cours en ligne, <http://ipnwww.in2p3.fr>.
- (3) *Sujet chimie CCINP 2019 MP*.
- (4) PAGNOL, *DOPPLER en astrophysique*, cours en ligne, [pcpagnol.free.fr](http://pcpagnol.free.fr).
- (5) GENDRAUD, M., *L'effet DOPPLER et ses applications*, cours en ligne, <http://aurore.unilim.fr/>.
- (6) MALHERBE, J-M., *Effets DOPPLER et ZEEMAN*, en ligne, <https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-01083068/document>, HAL.

## Introduction

- Monsieur Lambda doit passer des examens à l'hôpital, notamment une échographie de la carotide. Sur le récapitulatif, il voit écrit « DOPPLER carotidien ».

	Examen 1	Examen 2	Examen 3
Nom de l'examen	Doppler carotidien		
N° de dossier du patient	24924300		
Date de l'examen	1er juin 2018		
Appareil utilisé (fabricant)	Toshiba		
Nombre d'images	30		

- On a déjà rencontré l'effet DOPPLER, au lycée. On l'avait rencontré dans le cas du son d'une ambulance par exemple. Le son perçu par un observateur était différent du son émis par l'ambulance, cela étant dû au déplacement relatif de l'émetteur et du récepteur.
- Rapide introduction historique sur Christian DOPPLER.

---

*Comment mettre en évidence le phénomène d'effet Doppler ? Comment l'effet Doppler permet-il de réaliser une échographie ?*

---

## I Principe et explication de l'effet Doppler

*Cette partie commence par une description, qualitative donc, puis par une démonstration complète de la relation de l'effet DOPPLER.*

### I.1 Mise en évidence

*Dans cette courte sous-partie, on rappelle la mise en évidence de l'effet DOPPLER pour le son par exemple, et on précise qu'il y a un lien entre les fréquences émises et perçues et les vitesses de l'émetteur et du récepteur.*

#### Animation

Animation montrant le décalage entre les fréquences émises et reçues dans le cas d'une onde sonore

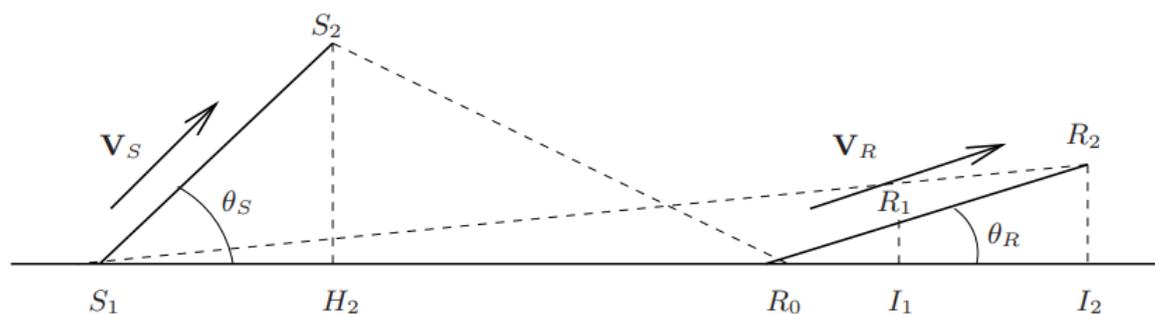
On peut donc remarquer que le déplacement de la source et/ou du récepteur provoque une différence entre la fréquence émise par la source et la fréquence reçue par le récepteur.

○ *Comment relier les fréquences et vitesses, émises et reçues ?*

## I.2 Relation générale entre fréquence émise et reçue

Le but de cette sous-partie est d'apporter une démonstration de la formule générale de l'effet DOPPLER.

- On considère la situation générale<sup>23</sup>, où la source  $S$  se déplace à une vitesse  $\vec{V}_S$  et le récepteur se déplace à une vitesse  $\vec{V}_R$  :



- Notations :

- \*  $t_1$  le temps auquel est émis le premier signal ;
- \*  $t_2$  le temps auquel est reçu le premier signal ;
- \*  $t_3$  le temps auquel est émis le second signal ;
- \*  $t_4$  le temps auquel est reçu le second signal.

Il en découle que la **période** du signal **émis** s'écrit  $T_E = t_3 - t_1$ , et que la **période** du signal **reçu** s'écrit  $T_R = t_4 - t_2$ .

La source se déplace à une vitesse de norme  $V_S \ll c$  et le récepteur se déplace à une vitesse de norme  $V_R \ll c$ , où  $c$  est la vitesse du son ou de la lumière, selon la situation.

### Important

On note que pendant une période  $T_E$ , les déplacements de la source et du récepteur sont très faibles devant la distance initiale entre la source et le récepteur ( $S_1R_0$ ).

- On cherche à exprimer  $t_4 - t_2$ . On peut écrire  $t_2$  comme :

$$t_2 = t_1 + \frac{\|\vec{S_1R_1}\|}{c} \quad (\text{temps que mets le signal pour faire la distance } S_1R_1)$$

De même on peut exprimer  $t_4$  comme suit :

$$t_4 = t_3 + \frac{\|\vec{S_2R_2}\|}{c}$$

23. Source démonstration : [2] page 101

D'où  $t_4 - t_2 = t_3 - t_1 + \frac{\|\overrightarrow{S_2R_2}\| - \|\overrightarrow{S_1R_1}\|}{c}$  donc en fonction des périodes reçues et émises :

$$T_R = T_E + \frac{\|\overrightarrow{S_2R_2}\| - \|\overrightarrow{S_1R_1}\|}{c} \quad (32)$$

Il reste donc maintenant à exprimer  $\|\overrightarrow{S_2R_2}\| - \|\overrightarrow{S_1R_1}\|$ .

- Pour  $\|\overrightarrow{S_1R_1}\|$  : Utilisons la relation de CHASLES.

$$\|\overrightarrow{S_1R_1}\| = \|\overrightarrow{S_1R_0} + \overrightarrow{R_0R_1}\| \approx \|\overrightarrow{S_1R_0} + \overrightarrow{R_0I_1}\| = \|\overrightarrow{S_1R_0}\| + \|\overrightarrow{R_0I_1}\|$$

#### Remarque

On a alors une distance sur un même axe, d'où la possibilité d'écrire que la norme de la somme est la somme des normes.

Or, on a  $\|\overrightarrow{R_0I_1}\| = \overrightarrow{V_R} \cdot \vec{u} \times t_2$ , d'où :

$$\|\overrightarrow{S_1R_1}\| \approx \|\overrightarrow{S_1R_0}\| + \overrightarrow{V_R} \cdot \vec{u} \times t_2 \quad (33)$$

- Pour  $\|\overrightarrow{S_2R_2}\|$  : Utilisons la relation de CHASLES.

$$\|\overrightarrow{S_2R_2}\| = \|\overrightarrow{S_2R_0} + \overrightarrow{R_0R_2}\| \approx \|\overrightarrow{H_2R_0} + \overrightarrow{R_0I_2}\| = \|\overrightarrow{H_2R_0}\| + \|\overrightarrow{R_0I_2}\|$$

#### Remarque

On a alors une distance sur un même axe, d'où la possibilité d'écrire que la norme de la somme est la somme des normes.

Or, on a  $\|\overrightarrow{R_0I_2}\| = \overrightarrow{V_R} \cdot \vec{u} \times t_4$ , et  $\|\overrightarrow{H_2R_0}\| \approx -\|\overrightarrow{S_2H_2}\| + \|\overrightarrow{S_1R_0}\|$  et enfin  $\|\overrightarrow{S_1H_2}\| \approx \|\overrightarrow{S_1S_2}\| = \overrightarrow{V_E} \cdot \vec{u} \times T_E$ . D'où :

$$\|\overrightarrow{S_2R_2}\| \approx -\overrightarrow{V_E} \cdot \vec{u} \times T_E + \|\overrightarrow{S_1R_0}\| + \overrightarrow{V_R} \cdot \vec{u} \times t_4 \quad (34)$$

- On remplace ceci dans la relation (32) :

$$T_R = T_E + \frac{-\overrightarrow{V_E} \cdot \vec{u} \times T_E + \|\overrightarrow{S_1R_0}\| + \overrightarrow{V_R} \cdot \vec{u} \times t_4 - \|\overrightarrow{S_1R_0}\| - \overrightarrow{V_R} \cdot \vec{u} \times t_2}{c}$$

En simplifiant et factorisant :

$$T_R = T_E + \frac{\overrightarrow{V_R} \cdot \vec{u} (t_4 - t_2) - \overrightarrow{V_E} \cdot \vec{u} T_E}{c}$$

Comme  $t_4 - t_2 = T_R$  :

$$T_R \left(1 - \frac{\overrightarrow{V_R} \cdot \vec{u}}{c}\right) = T_E \left(1 - \frac{\overrightarrow{V_E} \cdot \vec{u}}{c}\right)$$

### Conclusion

On a (enfin !) démontré la relation **générale** de l'effet DOPPLER :

$$T_R = T_E \left( \frac{c - \vec{V}_E \cdot \vec{u}}{c - \vec{V}_R \cdot \vec{u}} \right) \quad (35)$$

Où en fréquences :

$$\nu_R = \nu_E \left( \frac{c - \vec{V}_R \cdot \vec{u}}{c - \vec{V}_E \cdot \vec{u}} \right) \quad (36)$$

### Important

On a donc fait apparaître dans cette relation des grandeurs en  $\vec{V} \cdot \vec{u}$  qui représentent la norme des vitesses radiales, autrement dit la projection de la vitesse sur la direction de propagation.

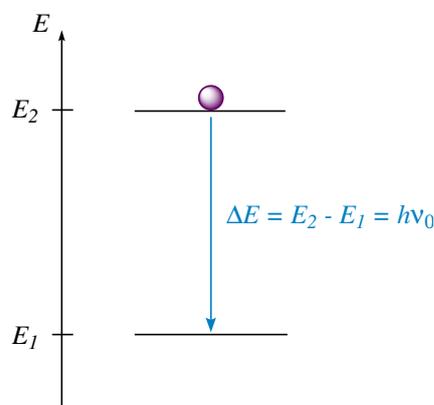
○ Cette relation n'est autre que celle(s) vue(s) au lycée, qui changeait selon la situation. Sans plus attendre voyons comment utiliser cette relation.

## II Effet Doppler et ses applications

*Le but de cette partie est de fournir des exemples d'utilisation de la relation démontrée dans la première partie. En 30 minutes, le tout semble ambitieux, alors on peut traiter au choix la première ou la seconde sous-partie, en adaptant le titre de celles-ci par soucis de structure.*

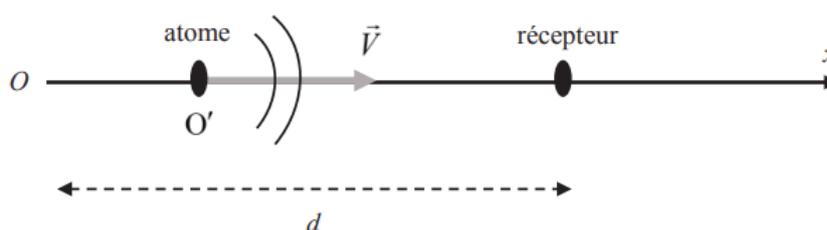
### II.1 Élargissement spectral des raies

- Lorsqu'un atome d'un niveau excité se désexcite vers un état plus bas en énergie, il libère une énergie  $\Delta\mathcal{E} = h\nu_0$ , visible sur un spectre à la fréquence  $\nu_0$ , ou bien à la longueur d'onde  $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$ .



A priori, on devrait observer sur un spectre une raie centrée sur la fréquence  $\nu_0$ . Cependant, cette raie est d'une largeur donnée par un profil lorentzien. Elle est caractérisée par une **largeur à mi-hauteur** notée  $\Delta\nu_{1/2}$ . On observe un élargissement de cette raie.

- Les atomes de la lampe spectrale à gaz sont animés d'un **mouvement d'agitation thermique**. On a donc une source en mouvement par rapport à un observateur. On a donc un décalage DOPPLER qui provoque un **élargissement des raies spectrales**. La distribution des vitesses des particules induit donc une distribution des fréquences mesurées, qui seront mesurées par un récepteur.
- Pour évaluer le décalage DOPPLER, on utilise un modèle simple<sup>24</sup> : on considère un atome qui se déplace à avec un vecteur vitesse  $\vec{V} = V \cdot \vec{e}_x$  et qui émet un rayonnement de fréquence  $\nu_0$ .



On reprend la relation générale (36) et on l'adapte, avec une vitesse nulle pour le récepteur.

$$\nu = \nu_0 \left( \frac{1}{1 - \frac{V}{c}} \right) \approx \nu_0 \left( 1 + \frac{V}{c} \right)$$

#### Remarque

Approximation à justifier par le fait que  $V \ll c$ .

Ensuite on isole la vitesse, ce qui donne :

$$V = c \cdot \frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} \quad (37)$$

- La distribution des vitesses des atomes qui émettent des rayonnements suit une loi de MAXWELL-BOLTZMANN :

$$N(V) = N_0 \exp \left( -\frac{1}{2} \frac{mV^2}{k_B T} \right) \quad (38)$$

En remplaçant V par son expression grâce à la relation (37) :

$$N(\nu) = N_0 \exp \left( -\frac{1}{2} \frac{mc^2 (\nu - \nu_0)^2}{k_B T \nu_0^2} \right)$$

24. Simpliste ?

On **admet** que l'intensité lumineuse émise est proportionnelle au nombre d'atomes ayant la vitesse  $V$  :

$$I(\nu) = I_{max} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{mc^2 (\nu - \nu_0)^2}{k_B T \nu_0^2}\right) \quad (39)$$

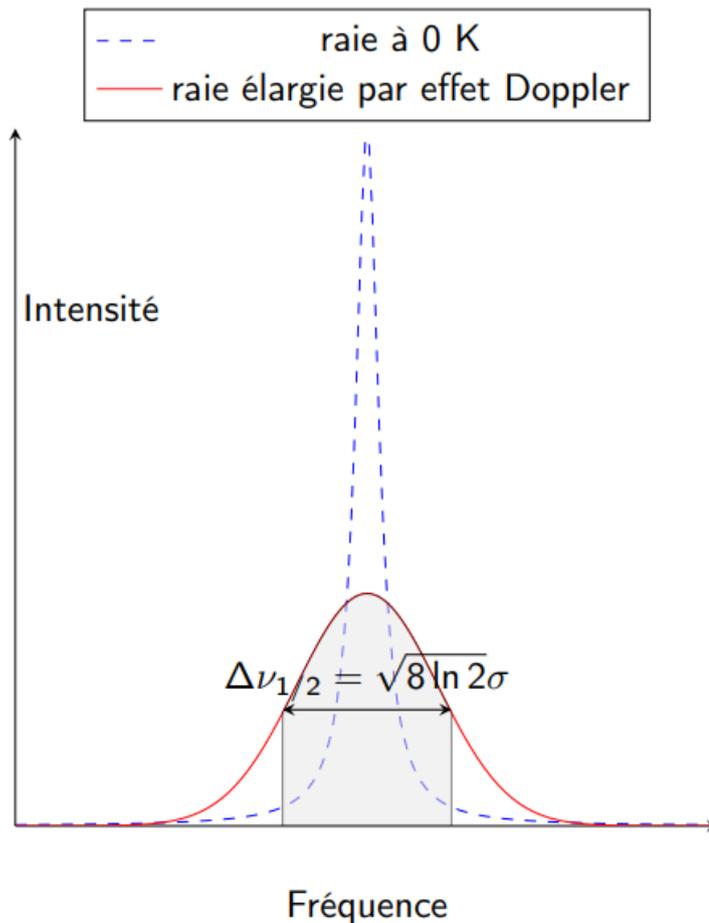
- (*Slides*) On peut comparer cette expression avec la relation mathématique d'un profil gaussien :

$$I(\nu) = I_{max} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(\nu - \nu_0)^2}{\sigma^2}\right)$$

Avec  $\sigma$  l'écart-type, relié à la largeur à mi-hauteur  $\Delta\nu_{1/2} = 8\sqrt{\ln 2}\sigma$ . Dans notre cas, on posera  $\sigma = \Delta\nu_D$  la largeur DOPPLER du profil. Elle vaut (par identification) :

$$\Delta\nu_D = \frac{\nu_0}{c} \sqrt{\frac{k_B T}{m}} \quad (40)$$

Sur le spectre, voici ce qu'on obtient :



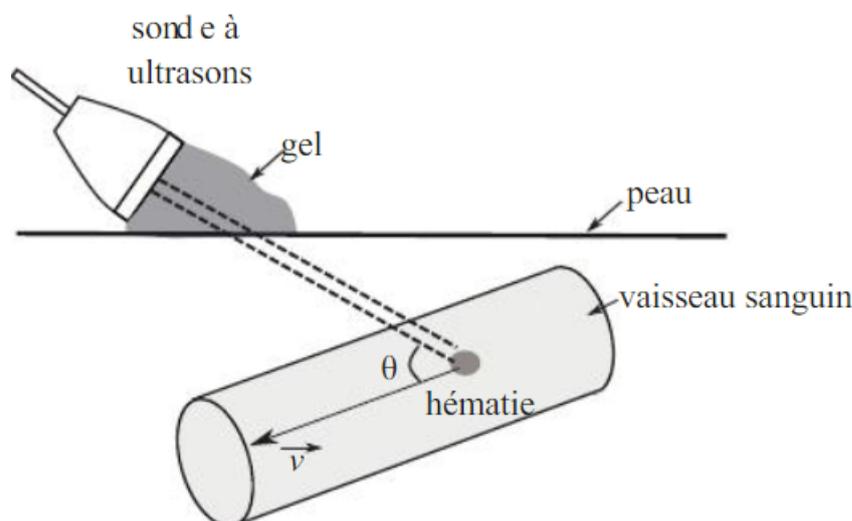
- Application éventuelle : mesure de la vitesse de rotation du soleil <sup>25</sup>.

25. [4]

## II.2 \*Mesure de fréquences et vitesse des hématies

*Le but de cette sous-partie est de présenter la méthode pour la mesure de la vitesse des globules rouge chez un patient. L'utilisation de la relation démontrée en début de leçon est alors optimale !*

- Afin d'évaluer les risques de sténoses vasculaires chez un patient, il faut pouvoir estimer localement la vitesse de l'écoulement du sang. On utilise pour cela une technique d'échographie DOPPLER<sup>26</sup>.
- Une sonde  $S$  émet une onde ultrasonore de célérité  $c$  et de fréquence  $\nu_0$ . Une hématie (un globule rouge, «  $G$  ») se déplaçant à la vitesse  $v$  renvoie cette onde à une fréquence différente.



La sonde à ultrason joue le rôle à la fois d'émetteur et de récepteur. Elle est positionnée sur la peau. La mesure de la différence de fréquence  $\Delta\nu$ .

- Il y a un premier trajet  $S \rightarrow G$  : avec une source fixe et un globule rouge qui s'approche. Les fréquences s'expriment donc comme :

$$\nu_G = \nu_0 \left( \frac{c + v \cos \theta}{c} \right)$$

- L'onde réfléchi effectue alors un trajet  $G \rightarrow S$  : avec un globule qui joue le rôle de l'émetteur, et qui est en mouvement ainsi qu'une source qui joue le rôle de récepteur et qui est immobile.

$$\nu_1 = \nu_G \left( \frac{c}{c - v \cos \theta} \right) = \nu_0 \left( \frac{c + v \cos \theta}{c} \right) \left( \frac{c}{c - v \cos \theta} \right) = \nu_0 \left( \frac{c + v \cos \theta}{c - v \cos \theta} \right)$$

On isole la vitesse :

$$\boxed{v = c \cdot \frac{\nu_1 - \nu_0}{2 \cos \theta \nu_0}} \quad (41)$$

26. [1] page 518

Lorsque Monsieur Lambda va passer son échographie carotidienne on détermine la vitesse de son sang à différents endroits des artères de sa carotide, car si un vaisseau présente un rétrécissement du vaisseau alors la vitesse des globules rouges va augmenter. C'est lorsqu'il y a rétrécissement du vaisseau qu'il y a de quoi s'inquiéter pour la santé du patient/de la patiente.

## Conclusion

- Réponse à la problématique : On peut utiliser le fait que le mouvement du récepteur et/ou de la source est en mouvement pour déterminer des vitesses et expliquer des résultats expérimentaux.
- Ouverture : ouverture avec le phénomène de la partie 2 qui n'a pas été présenté.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

— La partie sur la mesure de la vitesse des hématies est largement faisable par l'exemple de la mesure d'une vitesse par un radar.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Bien savoir justifier toutes les approximations lors de la démonstration de la relation générale de l'effet DOPPLER ;
- ☞ Effet DOPPLER-FIZEAU et prise en compte des effets relativistes.

#### PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - SECONDE ANNÉE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Effet DOPPLER. Retard temporel.	Réaliser une mesure de décalage de fréquence. Mettre en œuvre une mesure de retard temporel.

#### PROGRAMME OFFICIEL (PC - PHYSIQUE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Effet DOPPLER longitudinal	Décrire et mettre en œuvre un protocole de détection « synchrone » pour mesurer une vitesse par décalage DOPPLER.

## CONSERVATION DE L'ÉNERGIE (CPGE)

### Élément imposé : Forces de frottement et énergie mécanique

#### Introduction pédagogique

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (L1, BCPST1, PCSI)
- Prérequis :
  - \* Mécanique du point : vecteurs position, vitesse et accélération en base cartésienne et polaire, équation d'un oscillateur harmonique et sa résolution, équation d'un oscillateur amorti ;
  - \* Énergétique : définitions du travail et de la puissance d'une force, notion de force conservative, de force non-conservative, définitions des énergies cinétique, potentielle, et mécanique ;
  - \* Thermodynamique : échelles macro et microscopiques, libre parcours moyen, notion de systèmes et de transformation thermodynamique, grandeurs intensives et extensives, lien entre la température et l'agitation thermique..
- Séquence pédagogique : Cette leçon vient clôturer une séquence de mécanique du point, et en ouvrir une en thermodynamique. En effet, la notion de conservation de l'énergie se trouve à l'interface entre les deux disciplines et on traite les deux dans cette leçon. En particulier, pour la première fois les étudiants entendront parler d'**intégrale première du mouvement**, et sauront retrouver une équation du mouvement par une méthode énergétique. Par la même occasion, les **théorèmes énergétiques** seront introduits, et les notions de forces conservatives et non-conservatives seront réinvesties et exploitées. On introduit également le **premier principe de la thermodynamique**, l'**énergie interne** et la **capacité thermique** (même si cela a été un peu vu au lycée...).
- Difficultés :
  - \* Utilisation de notations infinitésimales ;
  - \* Forces conservative et énergie potentielle associée.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Savoir reconnaître des situations où l'énergie mécanique se conserve ;
  - \* Comprendre comment se transforme l'énergie dans le cas d'un système avec frottements.

## Introduction pédagogique

— Sources utilisées :

- (1) SANZ, M-N., SALAMITO, B., *et coll.*, *Physique PCSI, tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019.
- (2) GEANDROT, J., *Travail et énergies*, Physagreg, cours en ligne, <https://www.physagreg.fr/>, 2020.
- (3) FOUSSARD, J-N., *et coll.*, *Les bases de la thermodynamique*, Dunod, 3e éd., 2015.
- (4) BOREL, L, FAVRAT, D., *Thermodynamique et énergétique (Volume 1)*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005.

## Introduction

- Si on observe un pendule, on remarque qu'il oscille, et que vu que sa position et sa vitesse changent, alors ses énergies potentielle et cinétique changent. Pourtant, dans le cas d'oscillations harmoniques sans aucun frottement, le système peut osciller indéfiniment. D'un point de vue énergétique, il n'y a pas de pertes...
- Qu'est-ce que l'énergie? C'est une grandeur, malheureusement qu'on ne peut pas voir ni ressentir, mais qui se conserve<sup>27</sup>.

---

*L'énergie se conserve-t-elle toujours ? De quelle énergie peut-on parler lorsqu'on parle de conservation de l'énergie ?*

---

## I Conservation ou non de l'énergie mécanique

*Le but de cette partie est de parler de situations où l'énergie mécanique se conserve, grâce à l'exemple du pendule simple.*

### I.1 Théorème de l'énergie mécanique

*L'objectif de cette sous-partie est de trouver par le calcul les théorèmes énergétiques (TEC et TEM). Les étudiant·e·s connaissent déjà les expressions des énergies cinétique potentielle et mécanique, et l'expression du travail d'une force.*

---

27. Introduction assez courte, il y a beaucoup de choses à

- Rappel (*Slides*) :

### Définition

L'énergie mécanique d'un système  $\mathcal{S}$  est définie dans un référentiel  $\mathcal{R}$  par :

$$\boxed{\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_p} \quad (42)$$

Avec  $\mathcal{E}_c$  l'énergie cinétique et  $\mathcal{E}_p$  l'énergie potentielle du système.

### Important

L'énergie mécanique d'un système dépend du référentiel.

- On part de l'expression de l'énergie cinétique  $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2}m\vec{v}_{M,\mathcal{R}}^2$  dont on cherche la différentielle :

$$d\mathcal{E}_c = d(\vec{v}_{M,\mathcal{R}}^2) = \frac{1}{2}m\vec{v}_{M,\mathcal{R}} \times 2 \times d\vec{v}_{M,\mathcal{R}}$$

On force l'apparition de l'accélération :

$$d\mathcal{E}_c = m \frac{d\vec{v}_{M,\mathcal{R}}}{dt} \cdot \vec{v}_{M,\mathcal{R}} dt$$

$$d\mathcal{E}_c = \sum_i \overrightarrow{f_{ext,i}} \cdot \vec{v}_{M,\mathcal{R}} dt$$

Or,  $\overrightarrow{f_{ext,i}} \cdot \vec{v}_{M,\mathcal{R}} = \mathcal{P}(\overrightarrow{f_{ext,i}}) = \frac{\delta W(\overrightarrow{f_{ext,i}})}{dt}$ , ce qui nous donne le théorème de l'énergie cinétique.

### Théorème (de l'énergie cinétique)

Dans un référentiel galiléen  $\mathcal{R}$ , la variation de l'énergie cinétique d'un point matériel  $M$  est égale à la somme des travaux de toutes les forces lors d'un déplacement élémentaire  $\vec{d\ell}$  :

$$\boxed{d\mathcal{E}_c = \sum_i \delta W(\overrightarrow{f_{ext,i}})} \quad (43)$$

- Rappel (*Slides*) : Définition d'une force conservative<sup>28</sup>.

### Définition

Une force  $\overrightarrow{f_C}$  est dite **conservative** lorsque son travail entre deux points  $A$  et  $B$  ne dépend pas du chemin suivi mais uniquement de la position de ces deux points.

Une force conservative **dérive d'une énergie potentielle**.

28. [2], page 4

- Cette dernière phrase signifie que l'on peut écrire :

$$\vec{f}_C = -\overrightarrow{\text{grad}}\mathcal{E}_P \iff d\mathcal{E}_P = -\vec{f}_C \cdot \vec{d\ell}$$

On reconnaît le travail de la force conservative. On peut donc écrire :

$$d\mathcal{E}_P = -\delta W(\vec{f}_C) \quad (44)$$

Or, en reprenant l'expression de l'énergie mécanique (42) :

$$d\mathcal{E}_m = d\mathcal{E}_c + d\mathcal{E}_p \iff \mathcal{E}_m = \sum_i \delta W(\vec{f}_{ext,i}) - \sum_i \delta W(\vec{f}_{ext,C,i})$$

On fait donc apparaître le travail des forces non-conservatives, ce qui donne le théorème de l'énergie mécanique.

#### Théorème (de l'énergie mécanique)

Dans un référentiel galiléen  $\mathcal{R}$ , la variation de l'énergie mécanique d'un point matériel  $M$  est la somme des travaux des forces **non-conservatives** :

$$d\mathcal{E}_m = \sum_i \delta W(\vec{f}_{ext,NC,i}) \quad (45)$$

#### Important

Tous ces théorèmes énergétiques traduisent toujours, sous des formes diverses, la **conservation de l'énergie**.

○ Ces équations sont le point de départ de l'étude mécanique des conservations d'énergies. Mais voyons sur un cas concret comment les utiliser.

## I.2 Cas du pendule sans frottements

Cette sous-partie, assez rapide, a pour objectif d'introduire l'intégrale première du mouvement, d'établir l'équation du mouvement par une méthode énergétique.

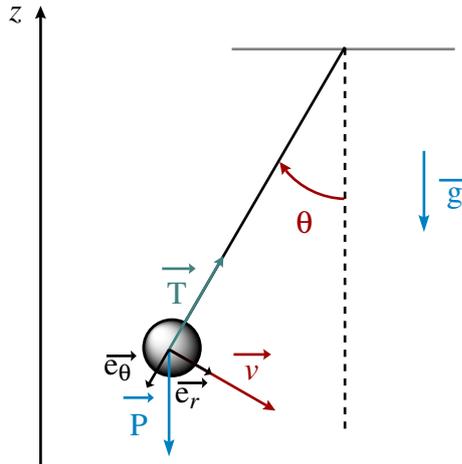
#### Animation

On peut utiliser cette animation <sup>a</sup>, ou celle-ci <sup>b</sup> pour étudier le mouvement du pendule et surtout montrer que l'énergie mécanique reste constante.

a. [https://www.pccl.fr/physique\\_chimie\\_college\\_lycee/lycee/premiere\\_1S/pendule\\_simple\\_forces\\_vitesse\\_energie.htm](https://www.pccl.fr/physique_chimie_college_lycee/lycee/premiere_1S/pendule_simple_forces_vitesse_energie.htm)

b. <http://rene.souty.free.fr/spip.php?article199>

- Le système est la masse accroché au bout du pendule, et nous étudions son mouvement dans le référentiel terrestre supposé galiléen.



- Les vecteurs positions et vitesse dans la base polaire s'écrivent :

$$\overrightarrow{OM} = \ell \cdot \vec{e}_r \text{ et } \vec{v}_{M,\mathcal{R}} = \ell \dot{\theta} \cdot \vec{e}_\theta$$

- Les forces appliquées à ce système sont la tension du fil et le poids.

$$\vec{T} = -T \cdot \vec{e}_r \text{ et } \vec{P} = -mg \cdot \vec{e}_z = mg (\sin \theta \cdot \vec{e}_r + \cos \theta \cdot \vec{e}_\theta)$$

- **Aucune force conservative** ne s'applique à ce système. Le **théorème de l'énergie mécanique** donne donc :

$$\boxed{d\mathcal{E}_m = 0}$$

### Important

L'**énergie mécanique** d'un point matériel soumis uniquement à des forces conservatives ou qui ne travaillent pas est un **constante du mouvement**.

On peut donc calculer les variations infinitésimales de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle.

- Énergie cinétique :  $d\mathcal{E}_c = d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = m\ell^2\dot{\theta}d\theta$  ;
- Énergie potentielle (de pesanteur) :  $d\mathcal{E}_p = d(mgz) = m\ell d[(1 - \cos(\theta))] = +mg\ell \sin(\theta)d\theta$

La somme de ces deux termes s'annule d'après le T.E.M., donc on a :

$$\left(m\ell^2\ddot{\theta} + mg\ell \sin(\theta)\right) d\theta = 0$$

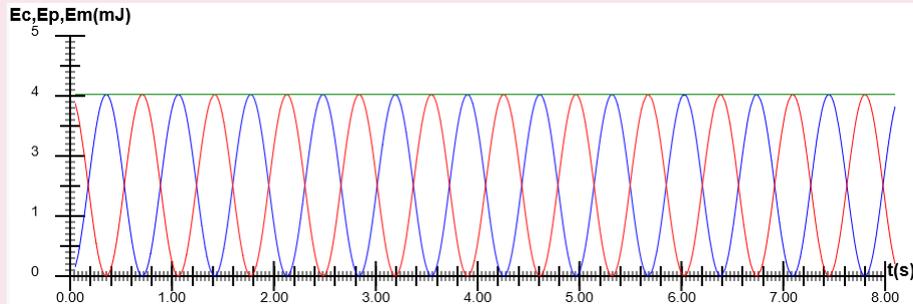
En supposant<sup>29</sup>  $d\theta \neq 0$ , on remarque qu'on obtient l'équation du mouvement :

$$\boxed{\ddot{\theta} + \frac{g}{\ell} \sin \theta = 0} \quad (46)$$

29. Ce qui paraît logique, sinon il n'y a pas de mouvement...

### Important

Dans le cas d'un **mouvement conservatif** (toutes les forces sont conservatives), l'**énergie mécanique** est une quantité qui se conserve au cours du mouvement et qui n'est fonction que de la position et de ses dérivées premières par rapport au temps. On dit alors que l'énergie mécanique est une **intégrale première du mouvement** <sup>a</sup>.



a. Source graphique : animation académie de Caen <https://physique-chimie.discip.ac-caen.fr/spip.php?article879>

○ Ce cas est évidemment irréaliste. En effet, sur ce système s'appliquent une force due aux frottements de l'air.

### I.3 Cas du pendule avec frottements

Dans cette sous-partie, le but est de montrer que les forces de frottements ne sont pas conservatives, et qu'elles font perdre de l'énergie mécanique au système.

#### Animation

Grâce à l'animation utilisée précédemment, on montre que l'ajout de la prise en compte des frottements provoque l'arrêt du pendule au bout de quelques oscillations. Par ailleurs, on montre que l'énergie mécanique tend à diminuer pour devenir nulle.

- Une force de frottements fluides dépend de la vitesse. Elle s'écrit  $\vec{f}_f = -\lambda \cdot \vec{v}_{M,\mathcal{R}}$  avec  $\lambda$  un coefficient positif appelé **coefficient de frottements**. Elle s'oppose à la vitesse, elle frêne le pendule.

- Calculons le travail élémentaire de cette force.

$$\delta W(\vec{f}_f) = \vec{f}_f \cdot d\vec{\ell} = -\lambda \vec{v}_{M,\mathcal{R}} \cdot \vec{v}_{M,\mathcal{R}} dt = -\lambda v^2 dt < 0$$

- On cherche à savoir si cette force est conservative. Pour qu'une force le soit, on a vu qu'il faut que son travail élémentaire puisse s'écrire comme la différentielle d'une grandeur scalaire qu'on appelle énergie potentielle.

### Important

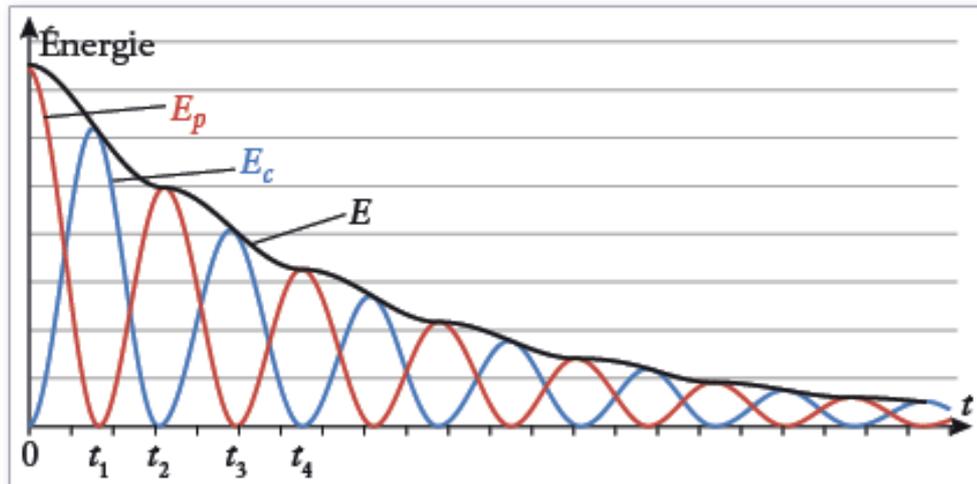
Ici, on ne peut pas écrire le travail élémentaire de la force de frottement comme la différentielle d'une énergie potentielle.

**La force de frottements fluides n'est pas conservative.**

- Dans ce cas, le théorème de l'énergie mécanique nous donne :

$$\boxed{d\mathcal{E}_m = \delta W(\vec{f}_f) = -\lambda v^2 dt < 0} \quad (47)$$

On a donc une diminution de l'énergie mécanique au cours du temps. Celle-ci **ne se conserve pas**.



○ Mais où va cette énergie ? Elle se transforme en énergie thermique et chauffe l'air ambiant. Dans ce cas, si on prend un système qui contient l'air autour du pendule, l'énergie se conserve-t-elle ?

## II Conservation de l'énergie totale

*Cette partie a pour but de faire un lien entre la mécanique et la thermodynamique.*

### II.1 Notion d'énergie totale

*Cette sous-partie est avant tout l'occasion de donner quelques définitions.*

- Si on prend un système fermé (échanges d'énergie mais pas de matière), il est possible de définir ce que l'on appelle l'**énergie totale**<sup>30</sup>.

30. [1], page 899.

### Définition

L'**énergie totale** d'un système, notée  $\mathcal{E}$ , est définie comme étant la somme des énergies cinétiques et potentielles macroscopiques et microscopiques :

$$\mathcal{E} = \underbrace{\mathcal{E}_{c,macro} + \mathcal{E}_{p,macro}}_{\mathcal{E}_m} + \underbrace{e_{c,micro} + e_{p,micro}}_U = \mathcal{E}_m + U \quad (48)$$

Avec :

- $\mathcal{E}_m$  l'**énergie mécanique**, qui dépend du référentiel choisi, et fait référence à un mouvement d'ensemble du système ;
- $U$  l'**énergie interne**, indépendante du référentiel choisi, elle rend compte des mouvements microscopiques, notamment de l'agitation thermique et des interactions entre les particules.

- On fait un bilan d'énergie totale. La variation d'énergie totale est la somme de l'énergie échangée avec le milieu extérieur et l'énergie créée au sein du système.

$$d\mathcal{E} = \delta\mathcal{E}_{éch} + \delta\mathcal{E}_{créée} \quad (49)$$

Or, il ne peut y avoir création d'énergie c'est-à-dire qu'il ne peut y avoir ni apparition ni disparition d'énergie. La variation d'énergie totale du système n'est due qu'à des échanges.

$$d\mathcal{E} = \delta\mathcal{E}_{éch} \quad (50)$$

Or, les seuls échanges possibles d'énergie entre un système et l'extérieur consistent en des échanges de travaux et des échanges thermiques.

Premier principe de la thermodynamique : Un système fermé qui subit une évolution infinitésimale d'un état  $A$  à un état  $A'$  (proche de l'état  $A$ ) échange avec le milieu extérieur un travail  $\delta W$  et une chaleur  $\delta Q$  tels que :

$$d\mathcal{E} = d\mathcal{E}_m + dU = \delta W + \delta Q \quad (51)$$

Dans le cas (fréquent) d'un système macroscopiquement au repos, le premier principe de la thermodynamique s'écrit, pour une transformation infinitésimale :

$$dU = \delta W + \delta Q \quad (52)$$

○ *Comment se servir de ce principe de conservation ? On doit pouvoir exprimer l'énergie interne en fonction des paramètres accessibles expérimentalement.*

## II.2 Expression de l'énergie interne

*Très rapide, cette sous-partie n'a pour but que de donner la définition et l'expression de la capacité thermique à volume constant.*

- On va pouvoir relier l'énergie interne à la température, grandeur accessible par l'expérience, grâce à la notion de capacité thermique :

### Définition

On définit la **capacité thermique à volume constant**, notée  $C_v$ , grandeur extensive définie comme l'énergie à apporter à un système pour augmenter sa température d'un Kelvin, lorsque l'expérience est réalisée à volume constant.

$$C_v = \left. \frac{\partial U}{\partial T}(T, V) \right|_V \quad (53)$$

où  $C_v$  est exprimée en  $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Pour un système homogène, on définit également la **capacité thermique massique à volume constant** notée  $c_v$ , et la capacité thermique massique à volume constant, notée  $C_{V,m}$ , toutes deux **intensives**, s'exprimant respectivement en  $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  et  $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ , telles que :

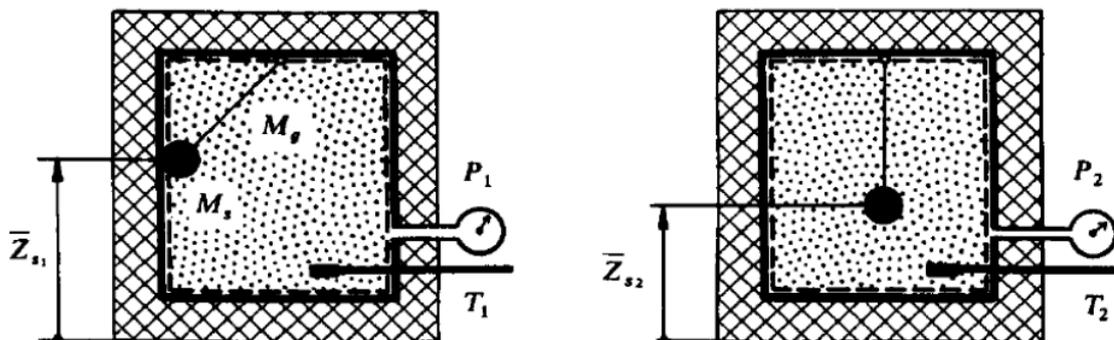
$$c_v = \frac{C_v}{m} \quad \text{et} \quad C_{V,m} = \frac{C_v}{n}$$

○ On peut à présent reprendre l'exemple du pendule. On va pour cela prendre un système légèrement différent de la partie précédente.

## II.3 Application à l'échauffement de l'air par un pendule simple

*Cette sous-partie a pour but de conclure sur tout ce qui a été vu. On montre que l'énergie dissipée par les forces de frottements fluides se retrouvent dans l'énergie interne des particules. Les calculs faits sont tirés de [4].*

- On considère le système constitué d'un gaz de masse  $m_g$  entourant le pendule dans le calorimètre et le pendule de masse  $m_s$ .



- On étudie la transformation entre l'état 1 d'un système et l'état 2.
  - État initial (1) : le pendule est accroché à la paroi à l'altitude  $z_1$ . Le gaz est à la pression  $p_1$  et la température initiale est  $T_1$ .
  - État final (2) : le pendule est à la verticale à l'altitude  $z_2$ . Le gaz est à la pression  $p_2$  et la température finale est  $T_2$ .

Pour passer de l'état (1) à l'état (2), le pendule est libéré. Son énergie potentielle se transforme en énergie cinétique, puis celle-ci se transforme en énergie potentielle, et ainsi de suite. Seulement, en raison des frottements du pendule sur le gaz, il se produit un **transfert d'énergie mécanique en énergie interne**.

- Sachant que l'énergie totale est une **fonction d'état**, elle est la somme des énergies du pendule et du gaz :  $\Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{E}_S + \Delta\mathcal{E}_g$ . Appliquons le premier principe de la thermodynamique entre l'état (1) et l'état (2) :

$$\Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{E}_S + \Delta\mathcal{E}_g = (\Delta\mathcal{E}_c + \Delta\mathcal{E}_p + \Delta U)_S + (\Delta\mathcal{E}_c + \Delta\mathcal{E}_p + \Delta U)_g = W_{1 \rightarrow 2} + Q_{1 \rightarrow 2}$$

- Pour le gaz : Il est au repos dans les états initial (1) et final (2) donc  $\Delta\mathcal{E}_{c,g} = \Delta\mathcal{E}_{p,g} = 0$ . De plus, c'est un **gaz parfait**, donc  $\Delta U_g = m_g c_v (T_2 - T_1)$ .
- Pour le pendule : Il est lui aussi au repos dans les états initial (1) et final (2) donc  $\Delta\mathcal{E}_{c,s} = 0$ . Il est cependant à deux altitudes différentes donc  $\Delta\mathcal{E}_{p,s} = m_s g (z_2 - z_1)$ , et c'est un solide incompressible donc  $\Delta U_s = m_s c_s (T_2 - T_1)$ .

De plus, l'enceinte étant calorifugée et qu'il n'y a pas de travaux de forces extérieures au système :

$$W_{1 \rightarrow 2} = Q_{1 \rightarrow 2} = 0$$

Le premier principe s'écrit donc :

$$m_g c_v (T_2 - T_1) + m_s g (z_2 - z_1) + m_s c_s (T_2 - T_1) = 0$$

On a finalement une expression de la température  $T_2$  :

$$\boxed{T_2 = T_1 + \frac{m_s g (z_1 - z_2)}{m_g c_v + m_s c_s}} \quad (54)$$

Comme  $z_1 - z_2 > 0$ , alors  $T_2 > T_1$ .

### Remarque

Pour faire l'application numérique, on a besoin des données suivantes :

- État initial :  $p_1 = 1 \text{ bar}$  et  $T_1 = 15^\circ\text{C}$  ;
- Chaleur spécifique isochore du dioxygène :  $c_{v,g} = 0,6496 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;
- Masse d'oxygène dans le calorimètre :  $m_g = 2 \text{ kg}$  ;
- Altitude du pendule en acier à l'état initial :  $z_1 = 1 \text{ m}$  ;
- Altitude du pendule en acier à l'état final :  $z_2 = 0,25 \text{ m}$  ;
- Chaleur spécifique de l'acier :  $c_s = 0,452 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;
- Masse du pendule en acier :  $m_s = 20 \text{ kg}$  ;
- Accélération de la pesanteur :  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

L'application numérique donne une température finale  $T_2 = 15,014^\circ\text{C}$ . Cette élévation est vraiment très faible, mais elle existe !

### Important

Dans le cas des frottements fluides, l'énergie mécanique est transformée en énergie interne.

## Conclusion

- Réponse à la problématique : l'énergie se conserve, oui, mais cela dépend de ce que l'on regarde. Ce qui est sûr, c'est qu'elle ne disparaît pas, elle est juste conservée ou transférée.
- Ouverture : Notion d'entropie et d'irréversibilité.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- On peut traiter l'oscillateur également, même si ici, si l'on veut terminer sur l'application numérique concernant l'élévation de la température dans le calorimètre, il faut traiter l'exemple du pendule.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Approximation sur les petits angles et le pendule et ses subtilités ;
- ☞ Modes de transferts thermiques (négligés ici) ;
- ☞ L'hypothèse fondatrice du premier principe est qu'il y a équivalence entre les deux types d'énergie micro et macro ;
- ☞ Autres forces non-conservatives que les forces de frottements : les forces de pression, de viscosité, de déformation lors d'un choc élastique ;
- ☞ Définition d'un référentiel : c'est un **solide de référence** par rapport auquel on étudie le mouvement d'un point. Il est muni d'un repère et d'une horloge.

**PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - PREMIÈRE ANNÉE) :**

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Premier principe de la thermodynamique en système fermé</b> Contributions à l'énergie d'un système : énergie interne, énergie cinétique macroscopique et énergie potentielle macroscopique. Énergie interne molaire et massique d'une phase condensée. Capacité thermique à volume constant. Premier principe en système fermé : <math>\Delta U + \Delta \mathcal{E}_p + \Delta \mathcal{E}_c = Q + W</math> Calorimétrie.</p>	<p>Relier l'énergie interne à la température pour une phase condensée.</p> <p>Formuler le premier principe en termes de puissance et sous forme d'un bilan élémentaire. <b>Réaliser un bilan à partir d'une expérience de calorimétrie.</b></p>
<p><b>Premier principe. Bilans d'énergie</b> Premier principe de la thermodynamique : <math>\Delta U + \Delta \mathcal{E}_c = Q + W</math></p>	<p>Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir travail <math>W</math> et transfert thermique <math>Q</math>. Exploiter l'extensivité de l'énergie interne. Distinguer le statut de la variation de l'énergie interne du statut des termes d'échange. Calculer le transfert thermique <math>Q</math> sur un chemin donné connaissant le travail <math>W</math> et la variation de l'énergie interne <math>\Delta U</math>. <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une grandeur thermodynamique énergétique (capacité thermique, enthalpie de fusion...).</b></p>

**PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - SECONDE ANNÉE) :**

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Forces conservatives, énergie potentielle</b> Potentiel d'un champ newtonien : potentiel électrique et potentiel de gravitation. Relation entre force et énergie potentielle.</p>	<p>Relier la force au gradient d'énergie potentielle. Démontrer le caractère conservatif d'une force dérivant d'une énergie potentielle.</p>

**PROGRAMME OFFICIEL (PCSI - PHYSIQUE) :**

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Approche énergétique du mouvement d'un point matériel</b> Puissance et travail d'une force.</p>	<p>Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force. Savoir que la puissance dépend du référentiel.</p>
<p>Loi de l'énergie cinétique et loi de la puissance cinétique dans un référentiel galiléen.</p>	<p>Utiliser la loi appropriée en fonction du contexte.</p>
<p>Énergie potentielle. Énergie mécanique.</p>	<p>Établir et connaître les expressions des énergies potentielles de pesanteur (champ uniforme), énergie potentielle gravitationnelle (champ créé par un astre ponctuel), énergie potentielle élastique, énergie électrostatique (champ uniforme et champ créé par une charge ponctuelle).</p>
<p>Mouvement conservatif.  Mouvement conservatif à une dimension.</p>	<p>Distinguer force conservative et force non conservative. Reconnaître les cas de conservation de l'énergie mécanique. Utiliser les conditions initiales. Dédire d'un graphe d'énergie potentielle le comportement qualitatif : trajectoire bornée ou non, mouvement périodique, positions de vitesse nulle. Expliquer qualitativement le lien entre le profil d'énergie potentielle et le portrait de phase.</p>

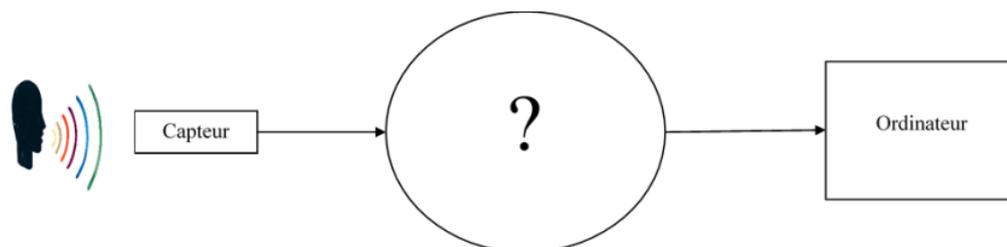
Élément imposé : Théorème de Shannon et qualité d'une acquisition**Introduction pédagogique**

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (L2)
- Prérequis :
  - \* Notion de spectre, période, fréquence ;
  - \* Représentation fréquentielle avec la théorie de FOURIER ;
  - \* Électrocinétique : tension, intensité, filtrage ;
  - \* Codage binaire.
- Difficultés :
  - \* Critère de NYQUIST-SHANNON qui a deux formes de répercussions ;
  - \* Passage de la représentation temporelle au spectre en fréquence ;
  - \* Confusion entre signaux périodiques, sinusoïdaux.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre les enjeux et le fonctionnement de la conversion analogique-numérique ;
  - \* Comprendre la notion d'échantillonnage et l'application du théorème de NYQUIST-SHANNON.
- Sources utilisées :

- (1) COTTET, F., *Traitement des signaux et acquisition de données*, Dunod, 5e éd., 2020.
- (2) CHAREYRON, D., *Numérisation d'un signal acoustique*, cours en ligne ENS Lyon, <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/numerisation-acoustique-Chareyron2.xml>, 2013.
- (3) BRAUX, B., *Comment choisir la fréquence d'échantillonnage ?*, Mesures, cours en ligne, <http://www.mesures.com/pdf/old/760solechantillonnage.pdf>.
- (4) DESMOULINS, J-B., *Acquisition et analyse FFT*, Cours en ligne ENS Paris-Saclay, <http://old.physique-ens-cachan.educ.space/>, 2020.

## Introduction

- L'acquisition de données est omniprésente dans notre société. Les téléphones portables, avec les capteurs dont ils sont constitués, doivent traiter des données lors d'une réunion *zoom*. La caméra film et le micro enregistre le son de la voix. Puis, ces informations sont transmises d'un ordinateur à l'autre, et sont ensuite déchiffrées.
- On s'intéresse dans cette leçon à l'acquisition de la voix d'une personne :



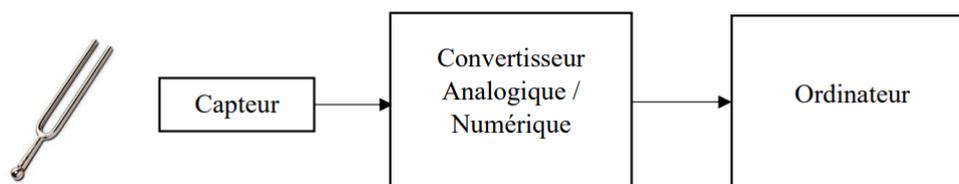
---

*Comment le son de la voix peut-il être acquis ?*

---

## I Numérisation d'un signal sinusoïdal dans le domaine temporel

On s'intéresse dans un premier temps à l'acquisition du simple signal du diapason. Cet instrument produit un son pur : la représentation de ce son est sinusoïdale.



Cette onde sonore est captée par le micro. Le capteur du micro transforme le signal sonore en signal électrique. Ensuite, il faut convertir ce signal pour qu'un ordinateur puisse le lire.

### I.1 Conversion analogique-numérique

*Le but de cette sous-partie est de comprendre le rôle du C.A.N.*

- Le signal fourni par le microphone est un **signal analogique**. C'est un signal continu en temps et en amplitude.
- Le signal lu par un ordinateur est un **signal numérique**. C'est un signal discret.

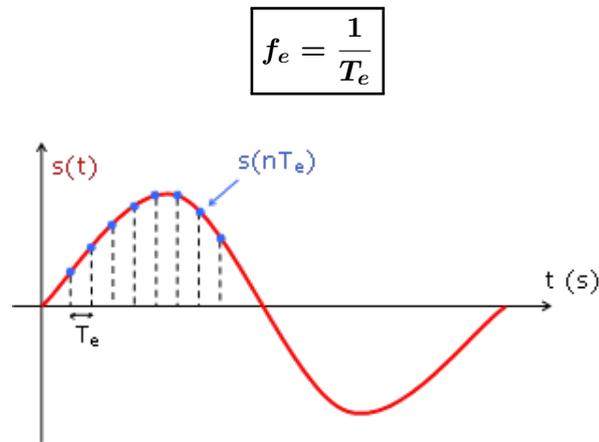
- On utilise un **convertisseur analogique-numérique** pour que le signal soit converti.

○ *Le signal analogique comporte une infinité de valeurs, et va devoir être transformé en un ensemble de valeurs discrètes.*

## I.2 Échantillonnage

*Le but de cette sous-partie est de montrer le lien entre le langage binaire et la conversion analogique-numérique.*

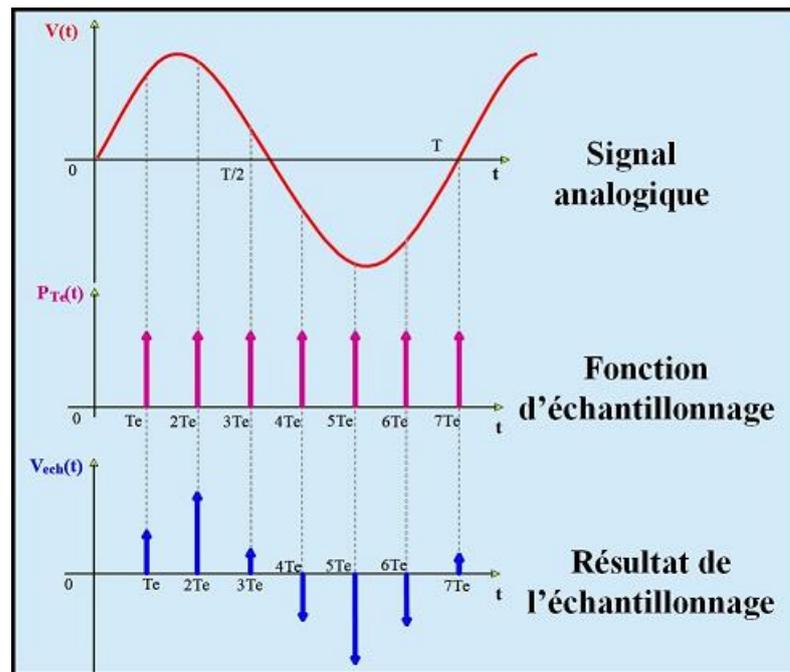
- On va diviser l'abscisse (le temps) en un nombre fini de valeurs discrètes. C'est-à-dire qu'on va enregistrer la valeur de l'amplitude du signal par pas de temps réguliers. Ce pas s'appelle la **fréquence d'échantillonnage** et elle est notée  $T_e$ . À cette période d'échantillonnage correspond bien entendu une fréquence, appelée **fréquence d'échantillonnage**<sup>31</sup> :



- Avec la prise de valeurs à intervalles de temps réguliers, on arrive à reconstituer le signal<sup>32</sup> :

31. Source schéma : <http://www.web-sciences.com/documents/terminale/tedo19/teco19.php>

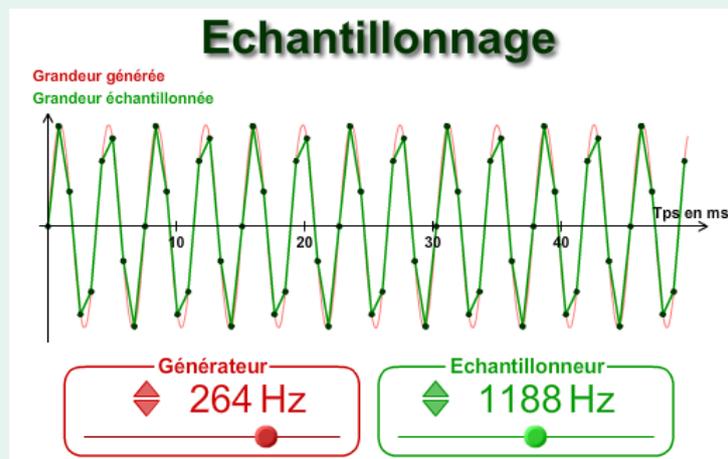
32. Source schéma : <https://openclassrooms.com/forum/sujet/echantillonnage>



Cependant, on remarque que la période d'échantillonnage semble avoir une valeur importante quant à la reconstitution du signal. En effet, si on prend une période d'échantillonnage trop élevée par rapport au signal, le signal numérique n'est plus du tout fidèle au signal numérique.

### Animation

On peut utiliser cette animation qui permet de montrer très clairement qu'il y a un critère sur la fréquence d'échantillonnage, ce qui nous amène droit vers le critère de NYQUIST-SHANNON.

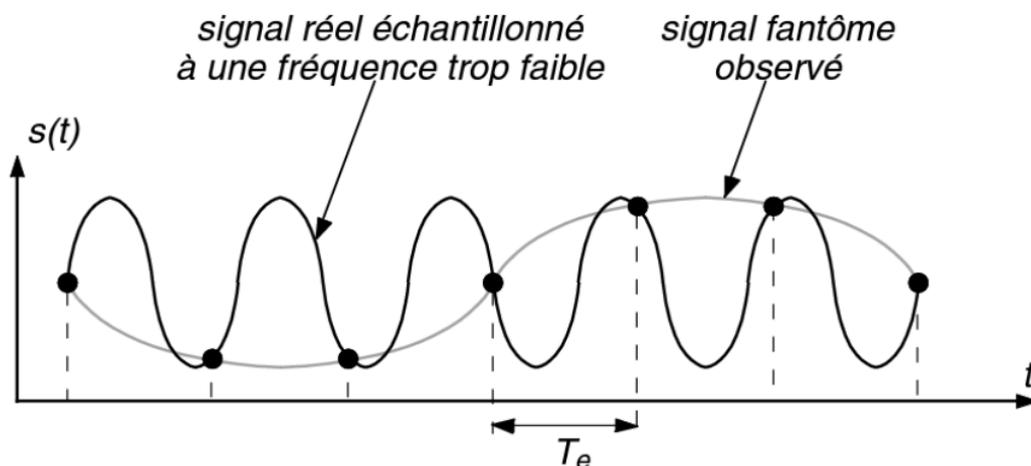


### Théorème (Critère de NYQUIST-SHANNON)

Pour mesurer une fréquence  $f_0$ , il faut une fréquence d'échantillonnage au moins deux fois supérieure :

$$f_{ech} > 2f_0 \quad \text{ou bien} \quad T_{ech} < 2T_0$$

Que se passe-t-il si ce critère n'est pas respecté? On a tout de même un signal mais il n'a pas la bonne période. On le qualifie de *signal fantôme*<sup>33</sup>.



○ On a parlé de l'abscisse avec la période d'échantillonnage. Parlons maintenant de la grandeur en ordonnée.

### I.3 Discrétisation

- Le but est de quantifier l'échelle des ordonnées. Ainsi, le but est de convertir une valeur en ordonnées en une valeur numérique, grâce au langage binaire.
- Le C.A.N. est défini par un calibre. C'est une plage de variation acceptable de la valeur analogique. Par exemple, sur LatisPro, le C.A.N. peut être paramétré en différents choix possibles  $\pm 10$  V,  $\pm 5$  V,  $\pm 1$  V, ou  $\pm 0,2$  V. Le CAN est aussi caractérisé par le **nombre de bit**  $N$  qui caractérise la plage de nombre que l'on peut écrire en code binaire. Ainsi, on peut écrire  $2^N$  nombres différents. On peut alors définir le **pas de quantification** comme :

$$q = \frac{V_{PE}}{2^N} \quad (55)$$

Avec  $V_{PE}$  la plage d'échantillonnage.

#### Animation

Grâce à cette animation sur le C.A.N., on peut voir l'effet de la discrétisation de la grandeur à échantillonner.

#### Expérience

On peut retrouver le nombre de bits codés par LatisPro. Pour cela, on utilise la relation (55) :

$$N = \frac{\ln\left(\frac{V_{PE}}{q}\right)}{\ln(2)}$$

33. Source schéma : [1] page 150

○ Maintenant que l'on a notre signal numérique, voyons quels sont les représentations en fréquence du signal acquis.

## II Analyse fréquentielle de signaux numérisés

Le but de cette partie est de faire l'analyse spectrale d'un signal échantillonné.

### II.1 Cas du signal sinusoïdal monochromatique

Le théorème de FOURIER n'est pas indispensable, il est considéré acquis par les étudiants · e · s enfin, au moins le principe. Le but de cette sous-partie est de montrer ce que donne le spectre d'un signal échantillonné, notamment la présence d'autres signaux que la fréquence fondamentale, qui peuvent être confondus avec des harmoniques.

- On peut faire la transformée de FOURIER d'un signal sinusoïdal. Cela permet d'avoir la fréquence de ce signal. On rappelle le théorème de FOURIER (Slides) :

#### Théorème (de FOURIER)

Tout signal  $s(t)$  de période  $T$  et de pulsation  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  peut se décomposer en une somme infinie de fonctions sinusoïdales du temps de pulsations  $k\omega$  ( $k$  entier positif). Cette somme est appelée série de FOURIER.

$$s(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (56)$$

— terme de rang 0,  $a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t) dt$  : on reconnaît la **valeur moyenne** du signal.

— termes de rang  $k$  appelés **harmoniques** de rang  $k$ .

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2},$$

avec  $a_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t) \cos(k\omega t) dt$  et  $b_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t) \sin(k\omega t) dt$ .

Pour  $k = 1$ , l'harmonique est appelé **fondamental**.

#### Important

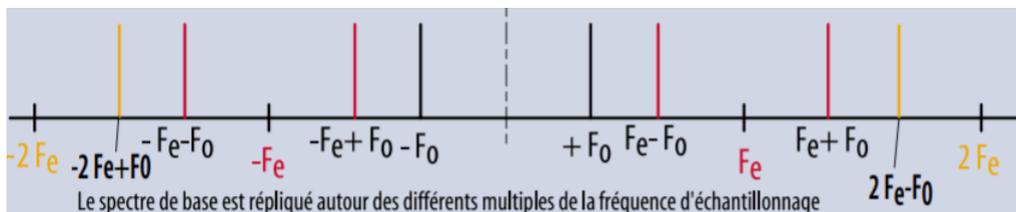
Le **spectre** d'un signal périodique représente l'amplitude  $c_k$  de chaque harmonique en fonction de sa pulsation (ou de sa fréquence).

- Lors de l'acquisition du signal du diapason, on s'attend à avoir un signal fondamental, et seulement lui. Or, cela n'est pas le cas, et on va essayer de comprendre pourquoi.

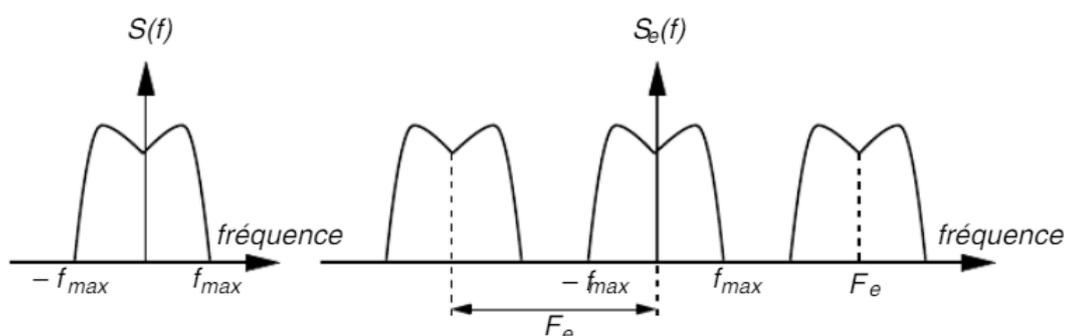
### Expérience

On fait l'acquisition à l'oscilloscope<sup>a</sup> du signal sonore du diapason. Et on voit apparaître plusieurs pics, alors qu'on s'attend à n'en avoir qu'un seul.

a. Si on fait l'acquisition avec LatisPro, on a filtration « automatique » des fréquences parasites dues à l'échantillonnage.

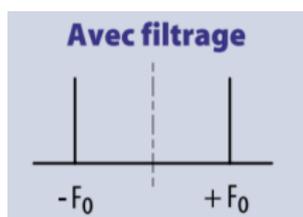


Ce schéma<sup>34</sup> est aussi assez visuel :



On remarque qu'autour de  $f = 0$ , il y a la fréquence  $F_0$  qui est celle du diapason, puis à  $F_e$  on trouve de part et d'autre de cette valeur, les fréquences  $F_e + F_0$  et  $F_e - F_0$ , et ainsi de suite<sup>35</sup>.

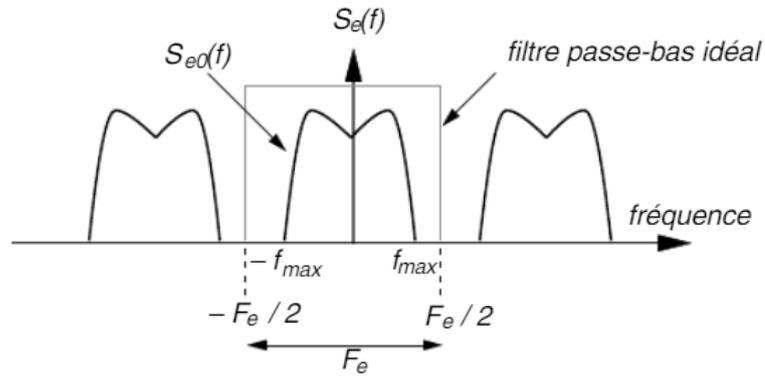
- Comment se débarrasser de ces signaux parasites à l'issue de l'échantillonnage ? Il suffit d'appliquer un filtre, pour ne sélectionner que la fréquence qui nous intéresse, c'est-à-dire  $f_0$ .



Dans le cas idéal, l'utilisation d'un filtre passe-bas ne va sélectionner **que la fréquence qui nous intéresse**, c'est à dire, la fréquence du diapason :

34. [1], page 147

35. On n'explique pas d'où cela vient. Par contre il faut s'attendre à ce que la question soit posée. Voir annexe pour éléments de réponse.

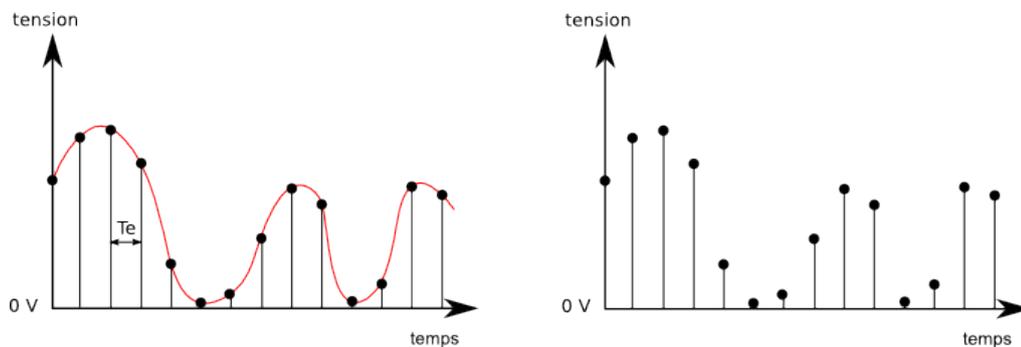


○ Que se passe-t-il dans le cas du signal non-sinusoidal ? Qu'est-ce qui change ?

### III \*Cas du signal non-sinusoidal

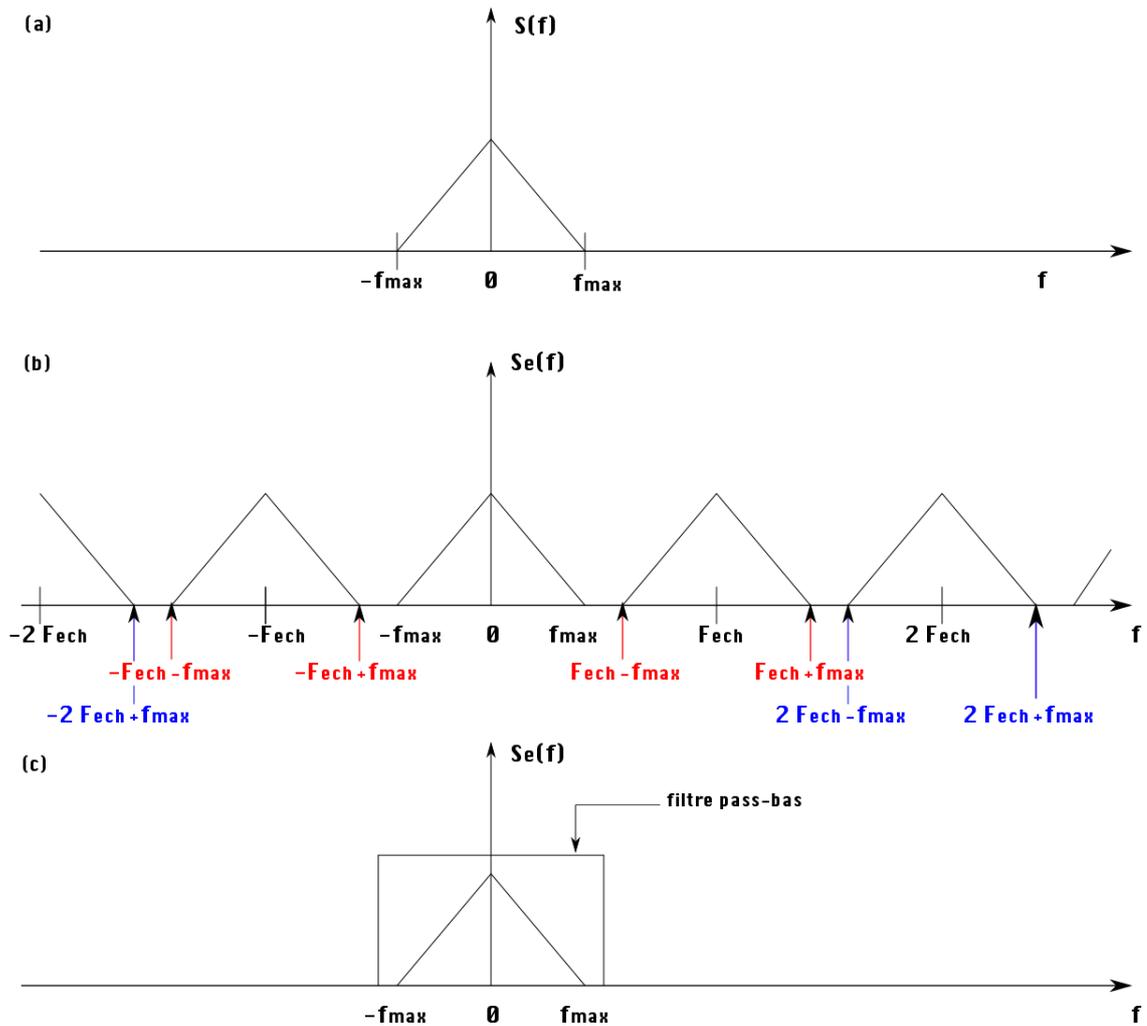
*Cette partie est tiroir. Elle n'est pas indispensable, mais elle apporte des compléments intéressants. On peut s'en servir comme ouverture lors de la conclusion.*

- On prend l'exemple de l'enregistrement d'une voix, c'est-à-dire un signal dont la fréquence ne varie que de 0 à 3,5 kHz. On applique le critère de NYQUIST-SHANNON et on procède à l'acquisition<sup>36</sup>.



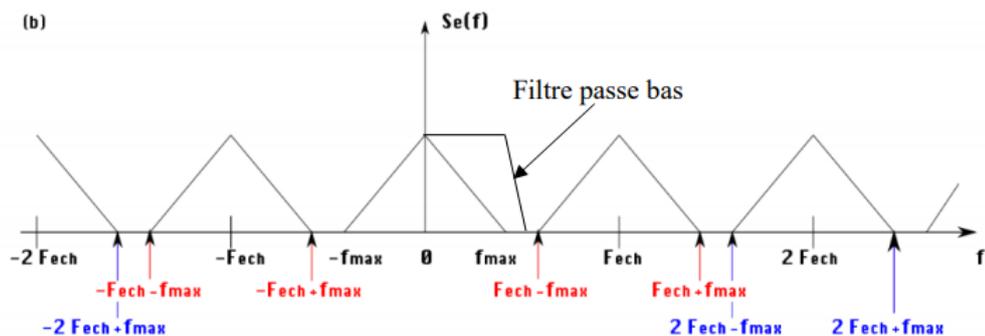
- Si on visualise l'analyse spectrale, voilà ce qu'on obtient :

<sup>36</sup>. Source schéma : <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/principe-numerisation.xml>



On retrouve une symétrie autour de la fréquence du fondamental. Les harmoniques sont compris dans la zones  $[-F_{max}; +F_{max}]$ . Par « gain de place », on préférera prendre une fréquence d'échantillonnage  $F_e$  telle que  $F_e = 2F_{max}$ . Cependant, c'est risqué. En effet, aucun filtre passe-bas n'est idéal, *ie.* il ne « descend pas à la verticale ». Donc cela amènerait le filtre à prendre en compte des fréquences parasites de la zone  $[F_{ech} - F_{max}; F_{ech} + F_{max}]$ , ce qui fausserait le signal<sup>37</sup>. On prends donc une valeur de  $F_{ech}$  légèrement supérieure à  $F_{max}$ .

37. Il faut faire un schéma là, sinon, on ne comprends rien...

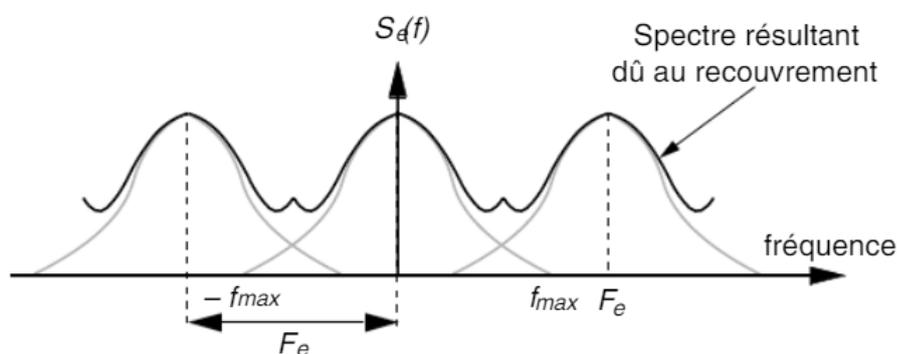


○ Il faut respecter le critère de NYQUIST-SHANNON pour les raisons que l'on a vu précédemment mais aussi pour les problèmes dits de repliement de spectres.

### III.1 Problème de repliement de spectre

Dans cette partie, on insiste sur le théorème de NYQUIST-SHANNON et on n'hésite pas à faire des schémas au tableau pour faire passer le message.

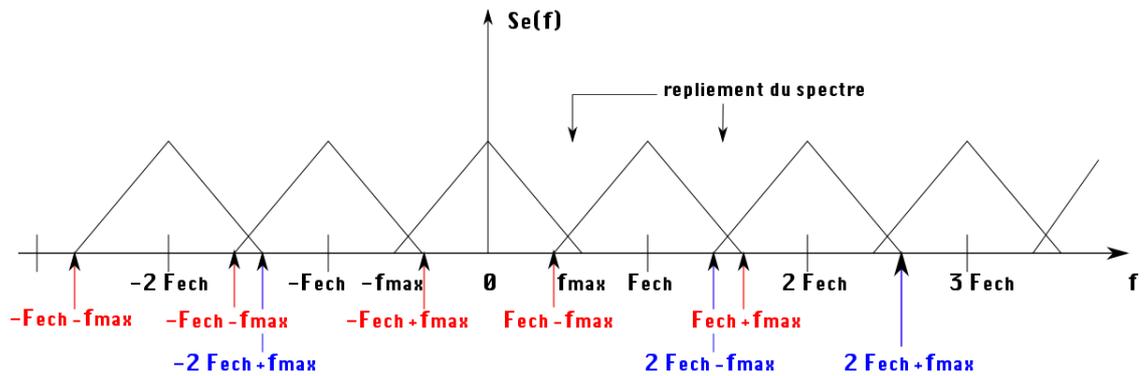
- Si le théorème de SHANNON n'est pas respecté, on dit qu'il y a **repliement de spectre**. Le filtre passe-bas idéal, qui permettrait de récupérer le spectre de base correspondant au signal initial ne peut plus agir efficacement<sup>38</sup>.



Autre schéma tout aussi visuel<sup>39</sup> :

38. Source schéma et définition : [1] page 149

39. Source schéma : [2]



- Une fréquence située dans la **zone de repliement** peut à la fois appartenir au signal initial, mais aussi au spectre image, qui est décalé de  $\pm F_e$ .

## Conclusion

- Réponse à la problématique : On a vu la nécessité de changer la forme du signal (analogique  $\implies$  numérique). On a vu les conditions nécessaires, et les problèmes que cela engendre.
- Ouverture : Une des parties non-traitée (la 2. b) par exemple). Modulation-démodulation.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

— Parler de modulation-démodulation.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Phénomène de repliement du spectre ;
- ☞ Produit de convolution entre un signal et le peigne de DIRAC (voir annexe) ;
- ☞ Chaîne d'acquisition non évoquée clairement ici ;
- ☞ Questions sur le codage en binaire ;
- ☞ Filtre actif et filtre passif ;
- ☞ Transformée de FOURIER et son inverse ;
- ☞ Modulation d'amplitude et de fréquence ;
- ☞ Plusieurs types de C.A.N. :
  - Les flash ;
  - les C.A.N. par approximation successives ;
  - les convertisseurs à rampe.
- ☞ Échantillonneur bloqueur.

PROGRAMME OFFICIEL (PC - PHYSIQUE) :

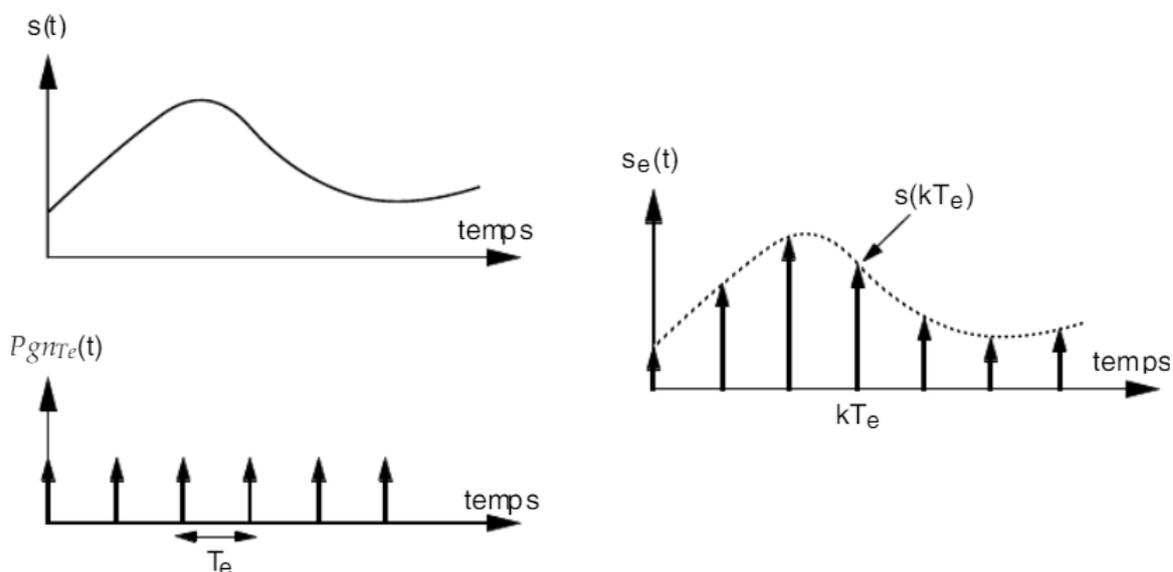
Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Mesures de temps et de fréquences</b></p> <p>Fréquence ou période : Mesure indirecte : par comparaison avec une fréquence connue voisine, en utilisant une détection « synchrone ».</p> <p>Analyse spectrale</p>	<p>Réaliser une détection « synchrone » élémentaire à l'aide d'un multiplieur et d'un passe-bas simple adapté à la mesure.</p> <p>Mettre en évidence le phénomène de repliement du spectre provoqué par l'échantillonnage avec un oscilloscope numérique ou une carte d'acquisition.</p> <p>Choisir les paramètres d'une acquisition numérique destinée à une analyse spectrale afin de respecter la condition de NYQUIST-SHANNON, tout en optimisant la résolution spectrale.</p>

## Annexe : le produit de convolution ([1] page 145)

Le processus d'échantillonnage revient à multiplier le signal analogique  $s(t)$  par une série d'impulsions. Cette série d'impulsion représente la prise d'un point à intervalle de temps régulier. D'un point de vue mathématique, il s'agit d'une fonction, appelée peigne de DIRAC et notée  $p(t)$ , qui est une suite de pics de DIRAC régulièrement espacés de  $T_e$ , la période d'échantillonnage :

$$p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - k \cdot T_e) \quad (57)$$

Lors de l'échantillonnage, on fait ce que l'on appelle un **produit de convolution** entre le peigne de DIRAC et le signal analogique.



On obtient alors un signal échantillonné, noté  $s_e(t)$  qui est une suite de pics de DIRAC mais tous n'ayant pas la même amplitude. L'expression de  $s_e(t)$  est la suivante, directement issue

d'un produit mathématique :

$$\boxed{s_e(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k \cdot T_e) \cdot \delta(t - k \cdot T_e)} \quad (58)$$

On peut donc écrire :

$$s_e(t) = s(k \cdot T_e) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - k \cdot T_e)$$

Soit finalement :

$$\boxed{s_e(t) = s(t) \cdot p(t)} \quad (59)$$

Élément imposé : Applications aux économies d'énergie**Introduction pédagogique**

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (L2, BCPST 2)
- Prérequis :
  - \* Diffusion de particules ;
  - \* Premier principe de la thermodynamique ;
  - \* Notions d'électricité.
- Séquence pédagogique : Leçon placée à la suite du cours sur la diffusion de particules. On beaucoup d'analogies avec la diffusion de particule (plus visuelle que la diffusion thermique). Les étudiants ont vu en première année le premier principe, donc ils ont déjà entendu parler de transferts thermiques. On va ici rentrer dans le détail de ce type de transfert d'énergie. Après cette leçon on verrait notamment le rayonnement du corps noir et la loi de STEFAN.
- Difficultés
  - \* Bilan d'énergie (visualisation difficile) ;
  - \* Notion de flux et de densité de courant ;
  - \* Transport d'une énergie thermique et pas d'une température. Difficile à visualiser.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Savoir faire un bilan d'énergie ;
  - \* Connaître et utiliser la notion de flux thermiques, de densité de courant, les modes de transferts thermiques.
- Sources utilisées :

- (1) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, tout-en-un, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.
- (2) ROUSSEL, J., *Transfert thermique*, Femto Physique, cours en ligne, <http://femto-physique.fr/>, 2020.
- (3) BATTAGLIA, J-L., KUSIAK, A., PRADERE, C., *Introduction aux transferts thermiques*, Dunod, 2e éd., 2019.
- (4) RIGAUT, M. (PC\* Lycée FABERT à Metz), *Phénomènes de diffusion*, Cours en ligne, <http://www.matthieurigaut.net/>.

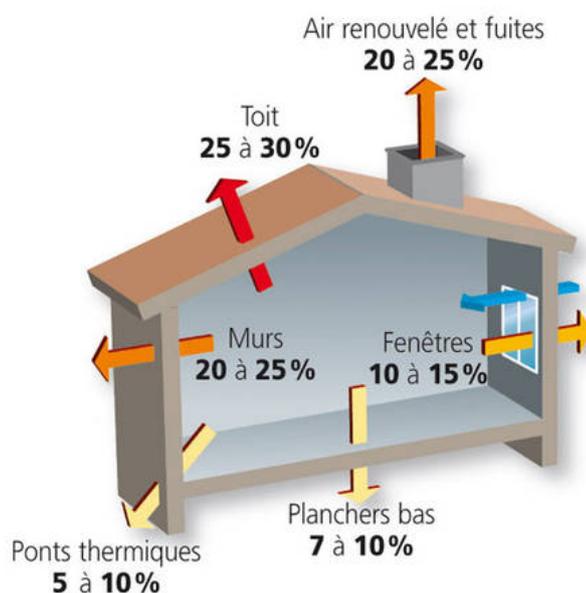
## Introduction

- On a vu en thermodynamique que la variation d'énergie totale d'un système fermé est dû à deux types de transferts d'énergie : c'est le **premier principe de la thermodynamique**.

$$\Delta \mathcal{E} = W + Q$$

C'est au terme de transfert thermique  $Q$  auquel nous allons nous intéresser dans cette leçon, à travers un exemple concret.

- La famille Lambda souhaite faire des économies d'énergie. Pour cela, on va étudier où sont les pertes d'énergie dans la maison et comment y faire face. Les pertes peuvent provenir des transferts d'énergie thermiques dans de nombreux endroits de la maison <sup>40</sup> !



- On cherche donc à répondre à la problématique suivante :

---

*Comment est transportée l'énergie thermique, et comment la prendre en compte pour comprendre les pertes énergétiques d'une maison ?*

---

---

40. Source schéma : [Banque des savoirs](#)

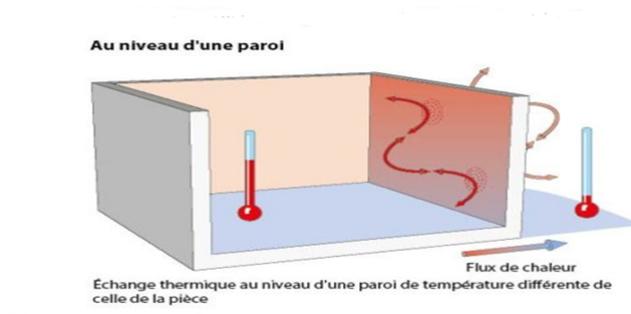
# I Les différents modes de transferts thermiques

## I.1 Convection

### Définition

Lorsqu'un fluide est en mouvement (macroscopique), il transporte avec lui de l'énergie : on dit qu'il y a transfert thermique par **convection**.

C'est un transfert thermique dû à un **déplacement de matière** (fluide en écoulement).



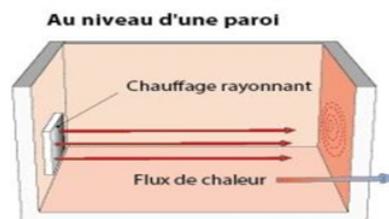
○ Dans la maison, on fait parfois une véranda. C'est un tout autre phénomène mis en jeu.

## I.2 Rayonnement

### Définition

On dit qu'il y a transfert thermique par **rayonnement** lorsque l'énergie est transportée par une onde électromagnétique.

C'est un transfert thermique qui ne nécessite pas de milieu matériel (et c'est le seul!). C'est un phénomène relativement rapide.



○ Et si on n'a pas de déplacement macroscopique de matière ?

## I.3 Conduction (ou diffusion) thermique

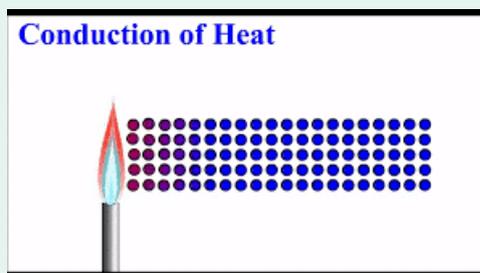
### Définition

Un transfert thermique se fait par **conduction (ou diffusion)** lorsque l'énergie se propage à travers un milieu matériel immobile, sans transfert de déplacement macroscopique de matière.

La conduction est un phénomène :

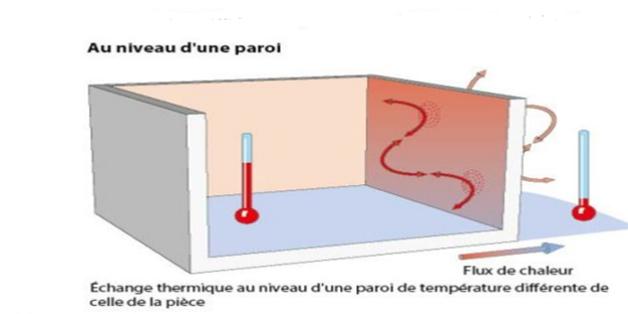
- **microscopique**, provoqué par l'agitation thermique ;

Animation



Source : recherche rapide sur google image

- lent (tout dépend du matériau) qui tend globalement à uniformiser les températures ;
- qui nécessite un milieu matériel.



○ On va maintenant voir comment modéliser mathématiquement la diffusion thermique, en se basant sur ce que l'on a déjà vu en diffusion de particules.

## II Modélisation de la conduction

### II.1 Flux thermique et densité de courant thermique

- Le **flux thermique**  $\phi_{th}$  est une quantité d'énergie par unité de temps traversant une surface  $S$  :

$$\phi_{th} = \frac{\delta Q}{dt}$$

Unité :  $\phi_{th}$  s'exprime en Watt (W)

On l'appelle parfois la puissance thermique.

- La **densité de courant thermique**  $\vec{j}_{th}$  est un vecteur dont le flux à travers une surface  $S$  traduit la puissance qui traverse cette surface :

$$\delta\phi_{th} = \vec{j}_{th} \cdot \vec{dS} \quad \text{soit} \quad \phi_{th} = \iint \vec{j}_{th} \cdot \vec{dS}$$

○ Ce vecteur densité de courant nous donne le sens de propagation de l'énergie thermique, sens qui va intuitivement du chaud vers le froid. Il existe une loi pour décrire cela.

## II.2 Loi de Fourier

- La loi de FOURIER est l'équivalent de la loi de FICK pour la diffusion thermique.

$$\boxed{\vec{j}_{th}(M, t) = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}T(M, t)} \quad (60)$$

Si l'on considère un problème unidimensionnel d'axe  $Ox$ , alors la loi de FOURIER devient :

$$\vec{j}_{th}(M, t) = -\lambda \cdot \underbrace{\frac{\partial T}{\partial x}(x, t)}_{j_{th,x}} \cdot \vec{e}_x$$

On a un coefficient,  $\lambda > 0$ , qui est caractéristique du matériau. Analyse dimensionnelle :  
[ $\lambda$ ] =  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Ce coefficient, appelé **conductivité thermique**, traduit la capacité d'un matériau à conduire l'énergie thermique, à température donnée. Quelques exemples<sup>41</sup> :

Matériau	$\lambda$ à 300 K ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
Cuivre	$4,0 \cdot 10^{-2}$
Acier	$\approx 50$
Béton	$\approx 1$
Eau	$6,0 \cdot 10^{-1}$

- Le signe "-" traduit le fait que que l'énergie passe des zones chaudes vers des zones froides : la température tend donc à s'uniformiser.

○ On va maintenant faire un bilan pour lier les variations de température avec l'énergie « déplacée » traduite par le vecteur densité de courant.

## II.3 Bilan thermique

On fait un bilan sur un cylindre, entre l'abscisse  $x$  et  $x + dx$ , et entre  $t$  et  $t + dt$ .

- Les hypothèses sont :

- Problème unidimensionnel d'axe  $Ox$  ;
- pas de convection ;
- masse volumique  $\rho$ , capacité thermique massique  $c$  constantes et uniformes ;
- milieu indéformable.

### Important

Ce bilan thermique va faire intervenir la température dans le milieu, mais la température est une grandeur intensive : ce n'est pas elle qui est transportée mais bien de l'énergie !

41. [1], page 140

- Le premier principe de la thermodynamique donne :  $dU = \delta Q + \delta W = \delta Q_e$  car pas de pièces mobiles donc pas de travaux, et on suppose qu'il n'y a pas de création donc juste un terme d'échange thermique ;
- On exprime d'abord la variation d'énergie interne  $dU$  :

$$dU = U(t + dt) - U(t) = \delta m \times c \times (T(x, t + dt) - T(x, t)) = \rho c S \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) dt dx$$

- On exprime le transfert thermique reçu pendant  $dt$  par le système :

$$\delta Q_x = \phi_{th}(x, t) dt$$

$$\delta Q_{x+dx} = \phi_{th}(x + dx, t) dt$$

Le terme de transfert thermique  $\delta Q$  correspond à la quantité d'énergie « entrant » en  $x$  à laquelle on retranche celle « sortie » en  $x + dx$  :

$$\delta Q = \delta Q_x - \delta Q_{x+dx} = \iint \vec{j}_{th}(x, t) \cdot \vec{dS} dt - \iint \vec{j}_{th}(x + dx, t) \cdot \vec{dS} dt$$

$\vec{j}_{th}$  étant constant sur la surface, on peut le sortir de l'intégrale. On obtient alors :

$$\delta Q = [j_x(x, t) - j_x(x + dx, t)] S dt$$

- En faisant apparaître le vecteur densité de courant, puis sa dérivée, on obtient l'équation de conservation de l'énergie (sans terme de création, qui a été négligé) :

$$\boxed{\rho c \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) = - \frac{\partial j_{th,x}}{\partial x}(x, t)}$$

Cette équation est généralisable en 3D, en transformant la dérivée première par rapport à l'espace en divergence.

$$\boxed{\rho c \frac{\partial T}{\partial t}(M, t) + \text{div} \vec{j}_{th}(M, t) = 0} \quad (61)$$

- En utilisant la loi de FOURIER introduite auparavant, on a l'**équation de diffusion** (ou **équation de la chaleur**) :

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t}(x, t) = D_{th} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t)} \quad (62)$$

en posant  $\boxed{D_{th} = \frac{\lambda}{\rho c}}$  le coefficient de diffusion, en  $m^2 \cdot s^{-1}$

○ Si on attend longtemps, comme en mécanique par exemple, on peut voir que les grandeurs ne dépendent plus du temps, c'est le régime stationnaire.

## II.4 Résolution en régime stationnaire

- En **régime stationnaire**, le terme en dérivée temporelle s'annule. On a donc <sup>42</sup> :

$$\frac{d^2T}{dx^2}(x) = 0 \Leftrightarrow T(x) = \alpha x + \beta$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes. On les détermine en connaissant les températures  $T_e$  et  $T_s$  à l'entrée et à la sortie de la barre de cuivre :

$$T(x) = \frac{T_s - T_e}{L}x + T_e$$

### Expérience

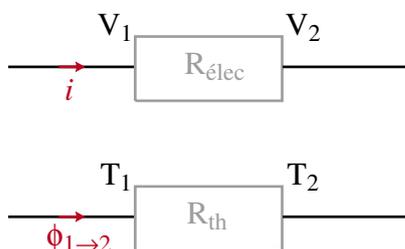
Relevé de température sur la barre de cuivre, pour montrer que cette équation est vérifiée.

○ Cette équation nous permet de modéliser les pertes dans la maison, notamment dans le cas des fenêtres.

## III Application à l'habitat

### III.1 Notion de résistance thermique

- On fait l'analogie entre le courant électrique et le flux thermique :



$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} \quad \text{et} \quad \phi_{1 \rightarrow 2} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$$

- Dans le cas de la **conduction d'un conducteur cylindrique** :

$$R_{\text{cond}} = \frac{e}{\lambda S}$$

- Dans le cas de la **convection**, on utilise la loi empirique de NEWTON :

$$\delta Q = (T_s - T_f) dS dt$$

où  $h$  est un coefficient qui dépend de la surface du solide, de l'écoulement, des matériaux considérés ;  $T_s$  la température du solide, et  $T_f$  la température du fluide en écoulement.

Donc par identification on déduit que

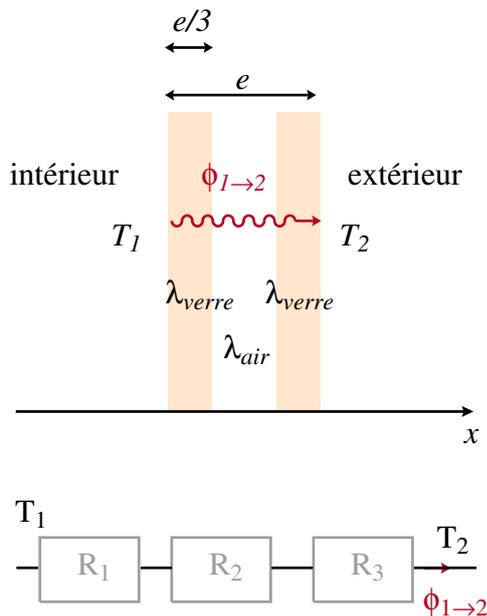
$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{hS}$$

○ On peut appliquer ceci aux économies d'énergie.

42. Expliquer qu'on passe de dérivées partielles à des dérivées droites.

### III.2 Double vitrage

- Prise en compte de la conduction uniquement :



La résistance thermique totale  $R_{\text{th,tot}}$  s'écrit :

$$R_{\text{th,tot}} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{2\frac{e}{3}}{S\lambda_{\text{verre}}} + \frac{\frac{e}{3}}{S\lambda_{\text{air}}}$$

Pour comparer l'efficacité des résistances thermiques, on en fait le rapport :

$$\boxed{\frac{R_{\text{th,tot}}}{R_{\text{th}}} = \frac{2}{3} + \frac{\lambda_{\text{verre}}}{3\lambda_{\text{air}}} \approx 30}$$

Conclusion : Avec cette méthode, le double vitrage est 30 fois plus efficace que le simple vitrage<sup>43</sup>.

- Prise en compte de la conducto-convection<sup>44</sup> : La résistance thermique totale s'écrit :

$$R_{\text{th,tot}} = 42 \frac{e}{\lambda S} + \frac{1}{h_1 S} + \frac{1}{h_2 S} = 0,37 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \simeq 2R_1$$

Conclusion : La prise en compte de la convection rend le modèle moins concluant !

## Conclusion

- Réponse à la problématique : L'énergie thermique est donc transportée par trois différents types de transferts thermique, et on a réussi à les prendre en compte pour modéliser les pertes énergétiques de la maison, grâce à la notion de résistance thermique notamment.
- Ouverture : On n'a pas pris en compte les rayonnements ici, mais ils peuvent aussi jouer un rôle.

43. Source valeurs  $\lambda$  : [1] pages 140 et 150

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- On peut aussi faire la démonstration directement à 3 dimensions pour l'équation de conservation (*cf.* annexe), à voir ;
- La leçon est placée à un niveau allant au-delà du niveau BCPST2 (*cf.* programmes officiels ci-dessous). Elle est quasiment à un niveau PC/PC\*.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Ici, dans l'équation de conservation, je n'ai pas parlé du terme source. Mais on peut l'intégrer, en avoir conscience.

#### PROGRAMME OFFICIEL (PC - PHYSIQUE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Diffusion thermique</b>	
Vecteur densité de flux thermique $j_Q$	Exprimer le flux thermique à travers une surface en utilisant le vecteur $j_Q$ .
Premier principe de la thermodynamique.	Utiliser le premier principe dans le cas d'un milieu solide pour établir une équation locale dans le cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne, éventuellement en présence de sources internes. Admettre et utiliser une généralisation en géométrie quelconque utilisant l'opérateur divergence et son expression fournie.
Loi de FOURIER.	Utiliser la loi de Fourier. Citer quelques ordres de grandeur de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, béton, acier.
Régimes stationnaires. Résistance thermique.	Utiliser la conservation du flux sous forme locale ou globale en l'absence de source interne. Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique. Exprimer une résistance thermique dans le cas d'un modèle unidimensionnel en géométrie cartésienne. Utiliser des associations de résistances thermiques.
Équation de la diffusion thermique en l'absence de sources internes.	Établir une équation de la diffusion dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Admettre et utiliser une généralisation en géométrie quelconque en utilisant l'opérateur laplacien et son expression fournie. Analyser une équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle. Utiliser la relation de Newton $\delta Q = h(T_s - T_a) dS dt$ fournie comme condition aux limites à une interface solide-fluide.

PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - SECONDE ANNÉE) :

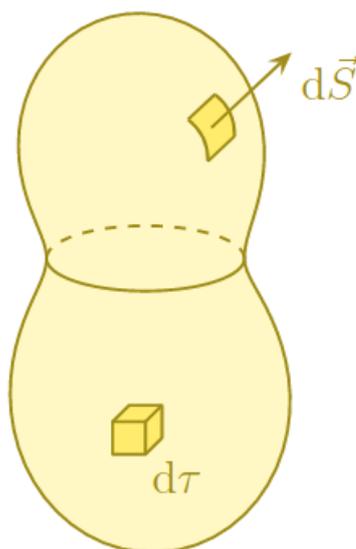
Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Conduction thermique</b>	
Conduction thermique. Résistance thermique.	Réaliser une analogie entre la conduction électrique et la conduction thermique.
Loi de FOURIER.	Interpréter une association de résistances thermiques. Établir, dans le cas d'un transport unidirectionnel, un bilan local d'énergie, avec source volumique ou avec échange à travers la paroi.
Diffusivité thermique.	Exprimer le temps caractéristique d'un régime transitoire par analyse dimensionnelle. Établir un bilan global d'énergie dans le cas d'un transport radial cylindrique ou sphérique en régime permanent. Exprimer le champ de température en régime permanent, après avoir proposé des critères plausibles de continuité ou de non divergence.

## Annexe : démonstration de l'équation de conservation à 3 dimensions <sup>45</sup>

— Les hypothèses sont :

- Problème tridimensionnel ;
- pas de convection ;
- masse volumique  $\rho$ , capacité thermique massique  $c$  constantes et uniformes ;
- milieu indéformable.

— Système : système fermé de volume  $\mathcal{V}$ , fixe et indéformable, délimité par une surface  $\mathcal{S}$ .



— Bilan d'énergie (premier principe) entre  $t$  et  $t + dt$  :

$$d\mathcal{E} = dU = \delta Q = \delta Q_e + \underbrace{\delta Q_{crée}}_{\approx 0} \text{ (pas de travaux, pas de création)}$$

45. Principalement tirée de mon cours de prépa, et de la source [4] pour le schéma notamment.

— Énergie interne  $U$  du système à  $t$  et à  $t + dt$  :

$$U(M, t) = \iiint_{M \in \mathcal{V}} u(M, t) \cdot d\tau = \iiint_{M \in \mathcal{V}} \rho c T(M, t)$$

$$U(M, t + dt) = \iiint_{M \in \mathcal{V}} u(M, t + dt) \cdot d\tau = \iiint_{M \in \mathcal{V}} \rho c T(M, t + dt)$$

— Variation d'énergie interne :

$$dU = \iiint_{M \in \mathcal{V}} [u(t + dt) - u(t)] \cdot d\tau = \iiint_{M \in \mathcal{V}} \left( \rho c \frac{\partial T}{\partial t}(M, t) \right) dt d\tau$$

— Expression de  $\delta Q_e$  :

$$\delta Q_e = -\phi_{th} dt$$

(signe « - » car la surface est orientée vers l'extérieur)

$$\delta Q_e = - \oiint_S \vec{j}_{th} \cdot d\vec{S} dt$$

On utilise alors le théorème de GREEN-OSTROGRADSKI :

$$\delta Q_e = - \iiint_{M \in \mathcal{V}} \operatorname{div}(\vec{j}_{th}) d\tau$$

L'égalité du premier principe donne donc la relation suivante, valable pour tout point  $M \in \mathcal{V}$  :

$$\iiint_{M \in \mathcal{V}} \left[ \rho c \frac{\partial T}{\partial t}(M, t) + \operatorname{div}(\vec{j}_{th}) \right] dt = 0$$

Ce bilan étant valable pour tout volume  $\mathcal{V}$ , on peut passer au bilan local :

$$\boxed{\rho c \frac{\partial T}{\partial t}(M, t) + \operatorname{div}(\vec{j}_{th}) = 0}$$

Élément imposé : Coefficient de diffusion**Introduction pédagogique**

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (L2, de BCPST2 à PC)
- Prérequis :
  - \* Diffusion thermique (établir l'équation de conservation de l'énergie thermique par un bilan d'énergie interne, loi de FOURIER, équation de la chaleur);
  - \* Thermodynamique (mouvement brownien);
  - \* Pré-requis mathématique (analyse vectorielle, développement de TAYLOR).
- Séquence pédagogique : Cette leçon se place dans une séquence sur les phénomènes de transport, juste après les transferts thermiques. On a déjà vu comment faire un bilan à une dimension (Pour l'énergie, on va le faire pour les particules) et la loi de FOURIER pour la diffusion thermique. Cette leçon se base sur les analogies faites entre diffusion de particules et thermique, mais traite essentiellement de la diffusion de particule notamment en adoptant en seconde partie de leçon une approche statistique (on sort alors du programme de BCPST). Le choix fait est de faire en permanence l'analogie (étape par étape) avec le bilan d'énergie fait dans la leçon précédente, et ne pas passer trop de temps sur les mathématiques...
- Difficultés :
  - \* Diffusion et convection ne doivent pas être confondues;
  - \* Bilan éventuellement difficile mais méthode considérée acquise;
  - \* Coefficient de diffusion : nouvelle notion, unités difficilement rationnalisables;
  - \* Aspect statistique inhabituel.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre comment modéliser la diffusion de particule, en raisonnant constamment par analogie avec la diffusion thermique;
  - \* Adopter un point de vue phénoménologique pour caractériser le flux de particules (loi de FICK) mais aussi un point de vue de probabilité.

## Introduction pédagogique

— Sources utilisées :

- (1) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, *tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.
- (2) ROUSSEL, J., *Diffusion moléculaire*, Femto Physique cours en ligne, <https://femto-physique.fr/>, 2020.
- (3) Vidéo sur la diffusion, YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=xM3LRP9ynYk>, ENS Lyon.

## Introduction

- On voit sur cette [vidéo](#) que les molécules d'ammoniac se diffusent. On remarque que le phénomène est assez lent (la vidéo a même dû être accélérée).
- On a déjà parlé de diffusion, lors du chapitre sur les transferts thermiques, on avait vu que le phénomène de diffusion thermique (aussi appelé conduction thermique) était un phénomène lent, et régit par l'équation de la diffusion, qui était une équation de diffusion. La grandeur transportée était l'énergie thermique.

### Définition (Rappel)

La **diffusion** est un phénomène de transport lorsque les particules se déplacent **sans mouvement macroscopique**.

- Ici, on va voir que les particules elles-aussi peuvent diffuser. On appellera **particule** tout type d'objet microscopique (atome, ions, molécule, agrégat, ...). Et on définit la densité particulaire, comme une concentration en particules en quelques sortes (comme en chimie) :

### Définition

La **densité particulaire**  $n(M, t)$  est le nombre de particules par unité de volume.  
 $n$  s'exprime en  $\text{m}^{-3}$

---

*Comment se comportent des particules lorsque leur répartition dans l'espace n'est pas homogène ?*

---

# I Équation de conservation et bilan de particules

## I.1 Flux de particules

### Définition

Soit une surface orientée  $\vec{S}$ . Le **flux de particules**  $\Phi_N$  est le nombre de particules qui traversent cette surface par unité de temps (homogène à un débit de particules) :

$$\Phi_N = \frac{\delta N}{dt}$$

$\Phi_N$  est en  $s^{-1}$ .

- *Analogie* : Flux thermique déjà vu en diffusion thermique.
- Le flux de particules est donc un débit, une grandeur globale, tout comme un débit massique ou volumique. Il nous faut introduire une grandeur locale.

### Définition

On appelle **vecteur densité de courant de particules** le vecteur  $\vec{j}_N(M)$  tel que le flux de ce vecteur à travers une surface corresponde au flux de particules à travers cette surface. On a alors :

$$\delta\Phi_N = \vec{j}_N(M) \cdot d\vec{S}(M) \quad \text{soit} \quad \Phi_N = \iint_{M \in S} \vec{j}_N(M) \cdot d\vec{S}(M)$$

La norme de  $\vec{j}_N$  s'exprime en  $m^{-2} \cdot s^{-1}$

- *Analogie* : vecteur densité de flux thermique  $\vec{j}_{th}$ .

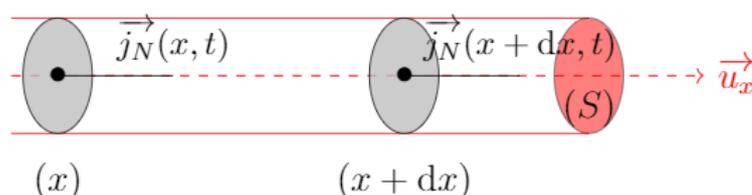
○ Ce flux traduit donc le déplacement des particules. Si on choisit un système, on va pouvoir compter les particules qui rentrent, celles qui sortent et faire le bilan.

## I.2 Bilan

- Hypothèses :

- Problème unidimensionnel d'axe  $Ox$  ;
- Pas de convection ;
- Pas de création

- Système :



- Bilan de particules entre  $t$  et  $t + dt$  :  $dN = \delta N_{\text{éch}} + \underbrace{\delta N_c}_{=0}$
- Expression de  $dN$  :  $dN = N(t + dt) - N(t) = (n(x, t + dt) - n(x, t)) S dx$
- Expression de  $\delta N_{\text{éch}}$  :  
 $\delta N_{\text{éch}} = \delta N_{\text{entrant en } x} - \delta N_{\text{sortant en } x+dx} = \Phi_N(x, t) dt - \Phi_N(x + dx, t) dt$  On fait alors apparaître le vecteur densité de courant de particules :

$$\delta N_{\text{éch}} = \iint \vec{j}_N(x, t) \cdot \vec{dS} dt - \iint \vec{j}_N(x + dx, t) \cdot \vec{dS} dt = j_N(x, t) S dt - j_N(x + dx, t) S dt = (j_N(x, t) - j_N(x + dx, t)) S dt$$

- Bilan : en égalisant les deux membres, on obtient l'équation de conservation des particules à 1 dimension :

$$\boxed{\frac{\partial n}{\partial t}(x, t) = -\frac{\partial j_N}{\partial x}(x, t)} \quad (63)$$

- En régime stationnaire, le terme en dérivée temporelle disparaît. La conséquence est donc la **conservation du flux** de particule.

○ Pour plus de simplicité, on a fait le bilan à une dimension, mais si on raisonne sur trois dimension, c'est pareil.

### I.3 \*Généralisation à 3 dimensions

On admet la généralisation suivante du bilan précédent, à 3 dimensions, en géométrie quelconque. La dérivée spatiale de la densité de flux devient sa divergence :

#### Conséquence

Équation de conservation des particules à 3D :

$$\boxed{\frac{\partial n}{\partial t}(M, t) + \text{div} \vec{j}_N(M, t) = 0} \quad (64)$$

*Analogie* : équation de conservation de l'énergie pour la diffusion thermique.

○ On pourrait s'arrêter là pour la mise en équation, mais on a d'un côté de l'équation une densité de particules, et de l'autre une densité de courant de particules. Pour faire le lien entre les deux, on peut se demander si la densité particulaire n'influe pas elle-même la densité de courant de particules ?

## II Équation de diffusion

### II.1 Loi phénoménologique

- *Analogie* : Loi de FOURIER en diffusion thermique, ou loi d'OHM en conduction électrique.
- On observe que le flux de particule est dirigé des fortes densités vers les faibles densités et qu'il est nul si la densité est homogène.

### Loi de Fick

$$\vec{j}_N = -D_N \overrightarrow{\text{grad}n} \quad (65)$$

C'est une loi **phénoménologique**.

$D_N$  est appelé le coefficient de diffusion des particules,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Ordre de grandeur :

Type de diffusion	Coefficient de diffusion en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Molécules dans un gaz	$10^{-6}$ à $10^{-4}$
Molécules dans un liquide	$10^{-12}$ à $10^{-8}$
Atomes dans un solide	$10^{-30}$ à $10^{-16}$

○ *Et si on combinait la loi de FICK et l'équation de conservation ?*

## II.2 Équation de diffusion

La loi de FICK à une dimension selon l'axe  $Ox$  en coordonnées cartésiennes s'écrit :

$$j_N(x, t) = -D_N \frac{\partial n}{\partial x}(x, t)$$

On remplace cela dans l'équation (63) et on obtient l'**équation de la diffusion** des particules :

$$\frac{\partial n}{\partial t}(x, t) = D_N \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}(x, t) \quad (66)$$

*Analogie* : c'est l'analogue de l'équation de la chaleur.

### Expérience

On peut éventuellement parler du régime stationnaire et faire l'expérience de la phénolphtaléine et l'ammoniac qui diffuse... idée.

○ *Pareil qu'avant, on a fait à une dimension, mais ça marche dans les 3.*

## II.3 Généralisation à 3 dimensions

On utilise la relation d'analyse vectorielle  $\text{div}(\overrightarrow{\text{grad}f}) = \Delta f$ , donc en combinant la loi de FICK (65) avec la loi de conservation (64), on obtient l'**équation de diffusion à 3D** :

$$\frac{\partial n}{\partial t}(M, t) = D_N \Delta n(M, t) \quad (67)$$

### Important

Par **analyse dimensionnelle**, on peut relier le temps et l'espace pour un phénomène de diffusion :

$$\frac{\partial n}{\partial t} \sim \frac{n}{\tau} \text{ et } \Delta n \sim \frac{n}{l^2}$$

Donc l'équation de diffusion nous donne :

$$l \sim \sqrt{D_N \tau}$$

*Exemple* : en combien de temps la grenadine se propage dans un verre par diffusion si on ne mélange pas ? (on prend  $D_N \approx D_{N, \text{eau}} \sim 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $l \sim 10 \text{ cm}$ ) **Le calcul donne 100 jours !**

○ On a vu que la loi de FICK était une loi phénoménologique. Mais on peut la retrouver par une approche statistique.

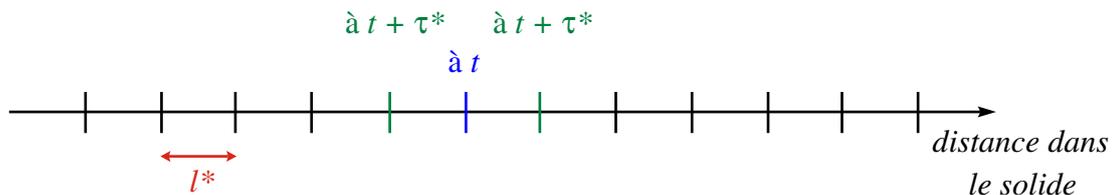
## III Approche microscopique de la diffusion

### III.1 Modèle de marche aléatoire

De manière générale, la trajectoire d'un atome au sein d'un matériau solide peut être modélisé par une succession aléatoire de sauts dans toutes les directions. Ce mouvement est appelé **mouvement brownien**. On note :

- $l^*$  le **libre parcours moyen** ;
- $\tau^*$  le **temps moyen** entre deux chocs ;
- $v^* = \frac{\delta^*}{\tau}$

Pour modéliser simplement la diffusion, on se place à **1 dimension**, et on imagine que des particules effectuent à chaque pas de temps  $\tau^*$  un « saut » de longueur  $l^*$ , le mouvement ayant lieu avec une **égale probabilité vers la gauche ou vers la droite**.



○ Cette probabilité dépend donc de la position et du temps pour chaque mouvement de particule. On va mettre tout ça en équation.

### III.2 Approche statistique

On étudie une particule et on appelle  $p(x, t)$  la probabilité qu'elle soit à la position  $x$  à l'instant  $t$ .

Calculons alors la probabilité qu'elle soit à l'abscisse  $x$  à l'instant  $t + \tau^*$ . Pour être en  $x$  à  $t + \tau^*$ , il faut :

- soit qu'elle ait été en  $x - l^*$  à l'instant  $t$  et qu'elle se soit déplacée vers la droite ;
- soit qu'elle ait été en  $x + l^*$  à l'instant  $t$  et qu'elle se soit déplacée vers la gauche.

La probabilité s'écrit donc :

$$p(x, t + \tau^*) = \frac{1}{2} (p(x - l^*, t) + p(x + l^*, t))$$

On passe à la limite continue en faisant de  $p(x, t)$  une fonction continue de  $x$  et de  $t$ , considérant que  $\tau^*$  et  $l^*$  sont des infiniments petits :

- $p(x, t + \tau^*) \approx p(x + l^*, t) \times \frac{1}{2} \times p(x - l^*, t) \times \frac{1}{2} \approx p(x, t) + \tau^* \frac{\partial p}{\partial t}$
- $p(x + l^*, t) \approx p(x, t) + l^* \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{l^{*2}}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$
- $p(x - l^*, t) \approx p(x, t) - l^* \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{l^{*2}}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$

Ce qui nous donne :

$$p(x, t) + \tau^* \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{2} \left[ 2 \times p(x, t) + l^* \frac{\partial p}{\partial x} - l^* \frac{\partial p}{\partial x} + l^{*2} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right]$$

On obtient donc une équation de diffusion sur la probabilité :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{l^{*2}}{2\tau^*} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (68)$$

Le coefficient de diffusion est donc donné par  $D_N \sim \frac{l^{*2}}{\tau^*} \sim l^* v^*$ . On peut faire une application numérique pour un gaz en prenant  $l^* \sim 100$  nm et  $v^* \sim 100$  m/s. On retrouve un coefficient de diffusion de l'ordre de  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>.

○ Ceci est bien entendu adapté à une simulation informatique qui peut nous permettre de visualiser l'effet de la diffusion à une dimension

### III.3 Simulation avec python

Le code PYTHON à utiliser est le suivant <sup>46</sup>.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import random
L= [-1,1]
y=[]
Nbpas=1000
NbPart=5000
for k in range(NbPart):
    x=0.
    for tirage in range(Nbpas):
```

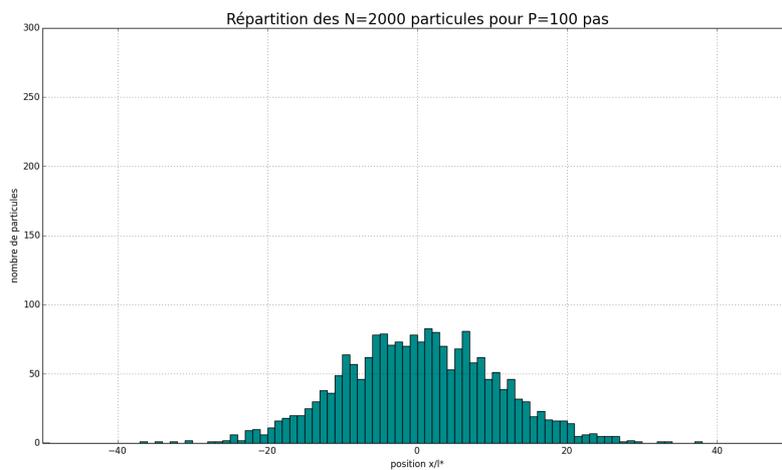
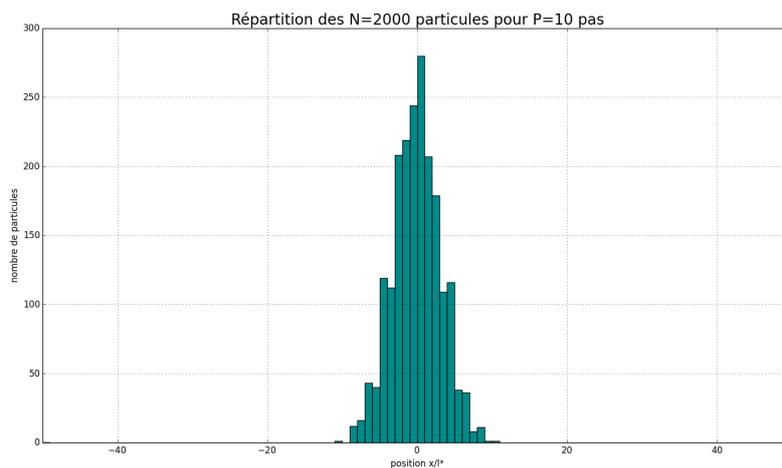
46. [1], page 101

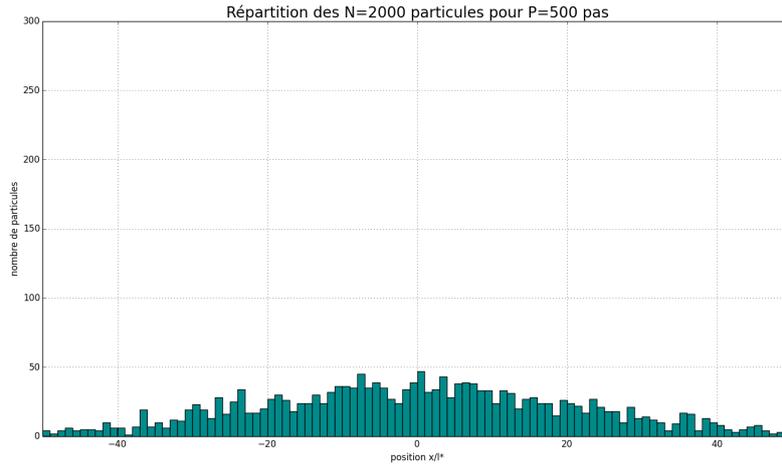
```

    deplacement=random.choice(L)
    x += deplacement
    y.append(x)
plt.grid()
plt.hist(y,(max(y)-min(y))/2,normed='True',color='black')
xmin=-150; xmax=150; ymin=0; ymax=0.08
plt.xlim(xmin, xmax)
plt.ylim(ymin, ymax)
plt.xlabel(u'position_apres_1000_pas', fontsize=14)
plt.ylabel(u'probabilite_de_presence', fontsize=14, rotation=90)
plt.show()

```

On fait varier le nombre de période  $P$  (nombre de pas) et on regarde la distribution des particules en fonction de la position au temps  $t = P \cdot \tau^*$ .





## Conclusion

- Réponse à la problématique : Les particules obéissent donc aux lois de la diffusion, elles se déplacent jusqu'à l'homogénéité parfaite dans le milieu. On a utilisé plusieurs approches pour appréhender le phénomène de diffusion.
- Ouverture : diffusion de quantité de mouvement, avec la viscosité.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- On peut aussi (c'est classiquement fait) parler de diffusion thermique après avoir parlé de diffusion de particule, mais je trouve cela assez peu naturel ;
- Ce plan est quand même assez mathématique et assez calculatoire. Il s'apparente davantage à un niveau PC/PC\* que BCPST.
- On peut parler de la diffusion de quantité de mouvement, ou de conduction électrique.
- On peut aussi faire la démonstration de l'équation de conservation directement à 3D (*cf. annexe*).

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Limites de la loi de FICK : gradient trop important, gradient qui varie trop vite dans le temps, et quelques milieux anisotropes pour lesquels la diffusivité dépend de la direction de l'espace <sup>a</sup> ;
- ☞ Discussion approche microscopique (à 1D seulement, et probabilité qui peut dépendre d'autres paramètres comme les défauts dans le solide...);
- ☞ Pour un problème à une dimension selon  $Ox$ , on peut montrer que la fonction suivante est solution de l'équation de diffusion, l'avoir en tête :

$$n(x, t) = \frac{N_0}{S\sqrt{4\pi D_N t}} \exp - \left( \frac{x^2}{4D_n t} \right)$$

Cela représente des genre de gaussiennes.

a. [1], page 95

#### PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - SECONDE ANNÉE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Diffusion de matière</b> Transferts de masse par convection ou diffusion. Loi de FICK.	Citer les deux modes de transfert de masse. Interpréter le transport par diffusion à l'aide du potentiel chimique. Procéder par analogie lors de la réalisation de bilans local ou global entre les phénomènes de conduction thermique et de diffusion de matière, les capacités exigibles étant identiques.

**PROGRAMME OFFICIEL (PC - PHYSIQUE) :**

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
Vecteur densité de flux de particules $\vec{j}_N$ .	Exprimer le nombre de particules traversant une surface en utilisant le vecteur $\vec{j}_N$ .
Bilans de particules.	Utiliser la notion de flux pour traduire un bilan global de particules. Établir une équation traduisant un bilan local dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne, éventuellement en présence de sources internes. Admettre et utiliser une généralisation en géométrie quelconque utilisant l'opérateur divergence et son expression fournie.
Loi de FICK.	Utiliser la loi de FICK. Citer l'ordre de grandeur d'un coefficient de diffusion dans un gaz dans les conditions usuelles.
Régimes stationnaires.	Utiliser la conservation du flux sous forme locale ou globale en l'absence de source interne.
Équation de diffusion en l'absence de sources internes.	Établir une équation de la diffusion dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Utiliser une généralisation en géométrie quelconque en utilisant l'opérateur laplacien et son expression fournie. Analyser une équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.
Approche microscopique du phénomène de diffusion.	Mettre en place un modèle probabiliste discret à une dimension de la diffusion (marche au hasard) et évaluer le coefficient de diffusion associé en fonction du libre parcours moyen et de la vitesse quadratique moyenne.

## Annexe : démonstration de l'équation de conservation à 3 dimensions<sup>47</sup>

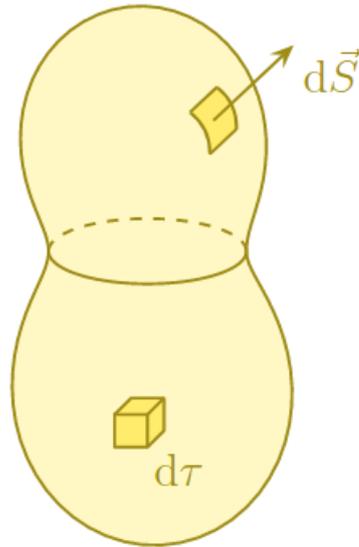
— Les hypothèses sont :

- Problème tridimensionnel ;
- pas de convection ;
- masse volumique  $\rho$ , capacité thermique massique  $c$  constantes et uniformes ;
- milieu indéformable.

— Système : système fermé de volume  $\mathcal{V}$ , fixe et indéformable, délimité par une surface  $\mathcal{S}$ .

---

47. Principalement tirée de mon cours de prépa, et de la source [2] pour le schéma notamment (sur le site, mais cours diffusion thermique).



— Bilan de particules entre  $t$  et  $t + dt$  :

$$dN = \delta N_{\text{éch}} + \underbrace{\delta N_c}_{=0} = N(t + dt) - N(t)$$

— Nombre de particules à  $t$  et à  $t + dt$  :

$$N(M, t) = \iiint_{M \in \mathcal{V}} n(M, t) \cdot d\tau(M) =$$

$$N(M, t + dt) = \iiint_{M \in \mathcal{V}} n(M, t + dt) \cdot d\tau(M)$$

— Variation du nombre de particules :

$$dN = \iiint_{M \in \mathcal{V}} [n(t + dt) - n(t)] \cdot d\tau(M) = \iiint_{M \in \mathcal{V}} \left( \frac{\partial n}{\partial t}(M, t) \right) dt d\tau$$

— Expression de  $\delta N_{\text{éch}}$  :

$$\delta N_{\text{éch}} = -\phi_N dt$$

(signe « - » car la surface est orientée vers l'extérieur)

$$\delta N_{\text{éch}} = - \oiint_S \vec{j}_N \cdot \vec{dS} dt$$

On utilise alors le théorème de GREEN-OSTROGRADSKI :

$$\delta N_{\text{éch}} = - \iiint_{M \in \mathcal{V}} \text{div}(\vec{j}_N) d\tau$$

L'égalité du bilan donne donc la relation suivante, valable pour tout point  $M \in \mathcal{V}$  :

$$\iiint_{M \in \mathcal{V}} \left[ \frac{\partial n}{\partial t}(M, t) + \text{div}(\vec{j}_N) \right] dt = 0$$

Ce bilan étant valable pour tout volume  $\mathcal{V}$ , on peut passer au bilan local :

$$\boxed{\frac{\partial n}{\partial t}(M, t) + \text{div}(\vec{j}_N) = 0}$$

Élément imposé possibles : Oscillations libres, oscillations amorties, phénomène de résonance, aspects énergétiques

### Introduction pédagogique

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (L1, BCPST1, PCSI)
- Prérequis : *tout dépend du plan choisi*
  - \* Électrocinétique : loi des noeuds, loi des mailles, circuit RC et circuit RLC. Différents régimes.
  - \* Mécanique : notion de champs, de force, expression du poids, des énergies mécanique cinétique et potentielle, application du PFD.
  - \* Pré-requis mathématiques : résolution des équations différentielles du second ordre, manipulation des nombres complexes.
- Séquence pédagogique : Cette leçon arrive en milieu d'année de L1, après avoir étudié l'électrocinétique avec les circuits dans l'ARQS, les circuits du premier et second ordre. Ainsi, on va étudier des oscillations mécaniques, et faire l'analogie avec l'électrocinétique pour chaque étape.
- Difficultés : *tout dépend du plan choisi*
  - \* Force de rappel (orientation surtout)
  - \* Notations complexes pour le RSF : ne pas confondre le signal (réel) et son amplitude ;
  - \* Pour l'électrocinétique, on ne voit pas les oscillations. C'est pourquoi je préfère faire les calculs sur les systèmes mécaniques.
- Objectifs de la leçon : *tout dépend du plan choisi*
  - \* Savoir établir les équations différentielles vérifiées par la position d'un système oscillant ;
  - \* Connaître le phénomène de résonance ;
  - \* Savoir faire un bilan énergétique ainsi que le lien entre ce qu'il traduit et les oscillations.

## Introduction pédagogique

— Sources utilisées :

- (1) GEANDROT, J., *Mécanique - Oscillateurs*, Physagreg cours en ligne, <http://www.physagreg.fr>.
- (2) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, *tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.
- (3) CHAMPION, M., *Oscillateur amorti*, cours en ligne Physique PTSI, <http://mchampion.fr/cours/>.
- (4) DE LA BAUME, F., *et coll.*, *Exos Résolus Prépa MPSI*, hachette éducation, 2015.
- (5) CHAMPION, M., *Oscillateur forcés*, cours en ligne Physique PTSI, <http://mchampion.fr/cours/>.

## Introduction

- Systèmes oscillants dans la vie quotidienne : un métronome, une horloge, le pendule de FOUCAULT sous la coupole du Panthéon. Comment les modéliser en physique ?
- Parfois, on veut que les oscillations s'arrêtent très vite (canon ?). Mais parfois on veut qu'elles oscillent tout de même un peu (amortisseurs de voiture ?).
- Beaucoup de système physique sont oscillants. Si, en première approximation, il est intéressant de négliger les frottements et de se baser sur des modèles d'oscillateurs non-amortis, il peut être intéressant de savoir en fonction de ses caractéristiques comment se comporte le système oscillant. Quand va-t-il s'arrêter ?

---

*Comment caractériser une oscillation ? Comment les grandeurs caractéristiques d'un système oscillant permettent de prévoir les oscillations au cours du temps ?*

---

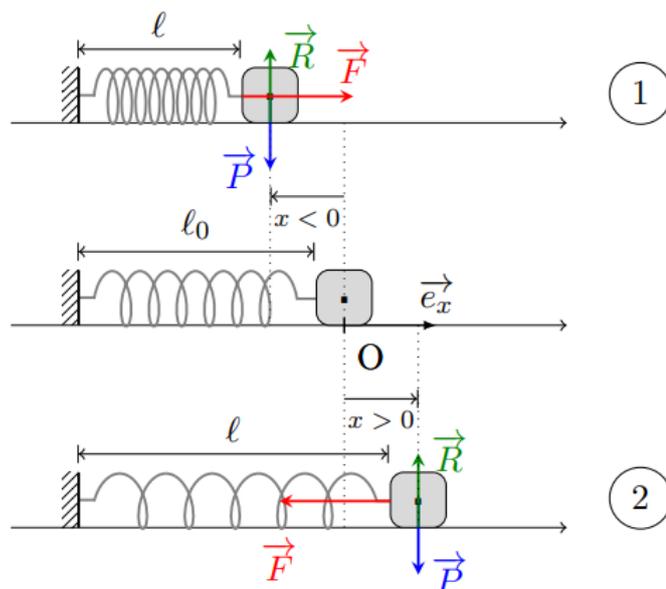
## I \*Oscillateur harmonique

*Cette partie n'est à traiter que si il s'agit de l'élément imposé. Sinon, mieux vaut garder du temps pour la suite, plus intéressante, en mettant cette partie en pré-requis.*

## I.1 Description du modèle

Dans cette sous-partie, on insiste sur le fait que tout frottement est négligé, et on tente de bien définir la force de rappel du ressort.

- On considère un oscillateur horizontal, constitué d'un dispositif masse-ressort, c'est-à-dire une masse  $m$  à laquelle est fixé un ressort idéal (parfaitement élastique), de masse supposée nulle.



### Important

Dans cette partie, on néglige les forces de frottements.

### Animation

Animation de Geneviève TULLOUE qui permet de visualiser le système oscillant et le diagramme représentant sa position en fonction du temps.

- Le ressort soumet la masse à une force appelée force de rappel.

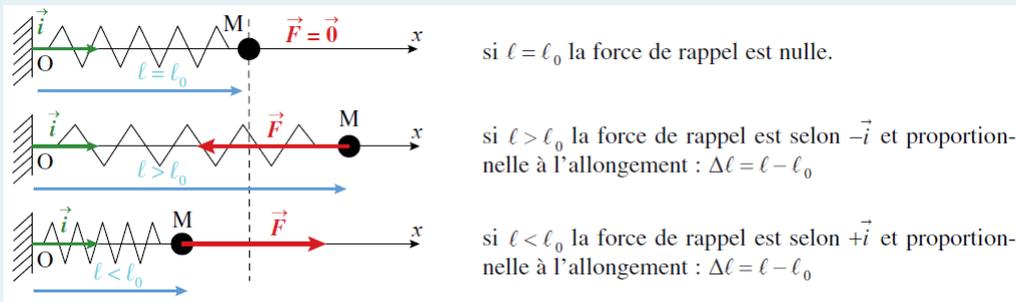
### Définition

La **force de rappel** (ou **force élastique**) exercée par le ressort sur  $m$  est proportionnelle à l'allongement  $\Delta\ell = \ell - \ell_0$  du ressort selon la loi suivante :

$$\boxed{\vec{F}_r = -k\Delta\ell \vec{i}} \quad (69)$$

Où :

- $\ell_0$  est la longueur à vide du ressort (en m) ;
- $k$  est la **constante de raideur** du ressort (en  $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ) ;
- $\vec{i}$  est un vecteur unitaire orienté du point de fixation du ressort vers la masse.



○ Cette expression de la force de rappel du ressort va nous être utile pour mettre en équation le problème, le but étant de déterminer la position du système au cours du temps.

## I.2 Mise en équation

Dans cette sous-partie, le but est d'établir l'équation différentielle du second ordre, le plus proprement possible ce qui permettra d'aller plus vite dans les parties suivantes.

- On effectue un PFD :
  - Référentiel :  $\mathcal{R}$  Terrestre, supposé galiléen ;
  - Système : masse  $m$  ;
  - Bilan des forces :
    - La force de rappel du ressort :  $\vec{F}_r = -k(\ell - \ell_0) \vec{i} = -k(x - \ell_0) \vec{e}_x$
    - Le poids
    - La réaction du support, uniquement selon  $\vec{e}_z$  car pas de frottements.

### Important

Le poids et la réaction du support se compensent. On ne travaille que sur l'axe  $Ox$  pour cette étude mécanique.

- Application du PFD : (masse constante, précaution orale)

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -k(x - \ell_0)$$

On remarque que  $\ell_0 = x_{\text{éq}}$ , c'est-à-dire que la position d'équilibre est égale à la longueur à vide du ressort.

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = \frac{k}{m}x_{\text{éq}} \quad (70)$$

On pose  $X = x - x_{\text{éq}}$  de telle sorte que  $\dot{X} = \dot{x}$  et  $\ddot{X} = \ddot{x}$ . On pose également

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

appelée pulsation propre. On a alors :

$$\ddot{X} + \omega_0^2 X = 0 \quad (71)$$

○ On a besoin des résultats mathématiques pour résoudre une telle équation.

### I.3 Résolution

*Attention dans cette sous-partie à bien préciser les conditions initiales.*

- La solution d'une telle équation est donnée par la relation générale suivante :

$X(t) = X_m \cos \omega_0 t + \varphi$  où  $X_m$  représente l'amplitude et  $\varphi$  la phase (ce sont des constantes, appelées **constantes d'intégration**).

- Pour trouver ces constantes, on utilise deux conditions initiales (à  $t = 0$ ) :

- Condition initiale sur la position : à  $t = 0$ , on a lâché la masse depuis une position

$$x(t=0) = x_0 > 0 \quad \text{donc} \quad X_m = x_0$$

- Condition initiale sur la vitesse : à  $t = 0$ , on a lâché la masse **sans vitesse initiale**

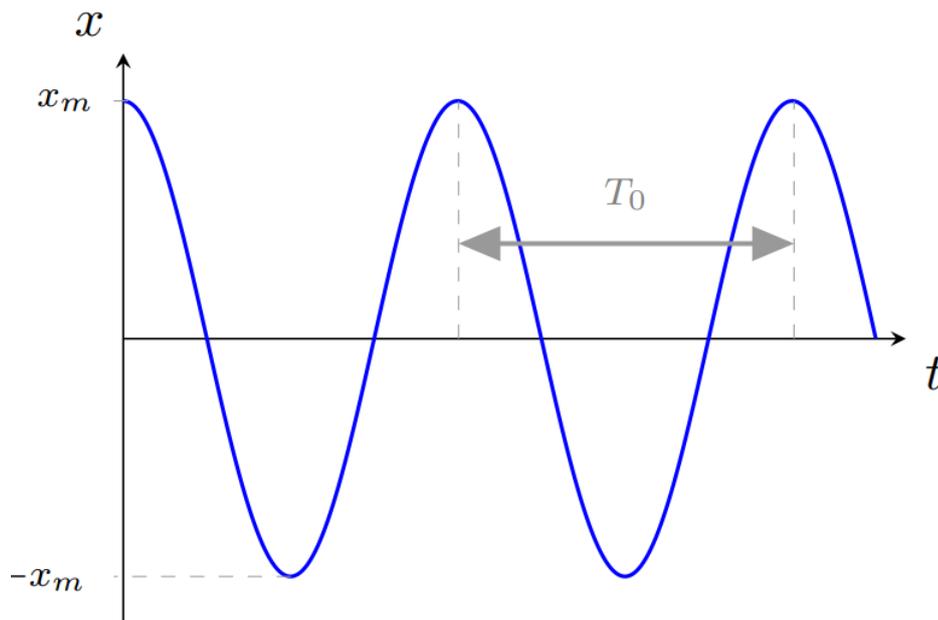
$$\dot{x}(t=0) = 0 \Leftrightarrow -\omega_0 X_m \sin(\omega_0 \times 0 + \varphi) = 0. \quad \text{Or, } \omega_0 \text{ et } X_m \text{ ne sont pas nuls}^{48} \text{ et donc } \varphi = 0 [\pi].$$

- Finalement, la solution est :

$$x(t) = x_{\text{éq}} + x_0 \cos(\omega t) \quad (72)$$

Ce que l'on peut tracer :

48. Sinon, la solution est nulle...



○ Que se passe-t-il si on prend en compte les frottements, qui ont jusqu'alors été négligés ?

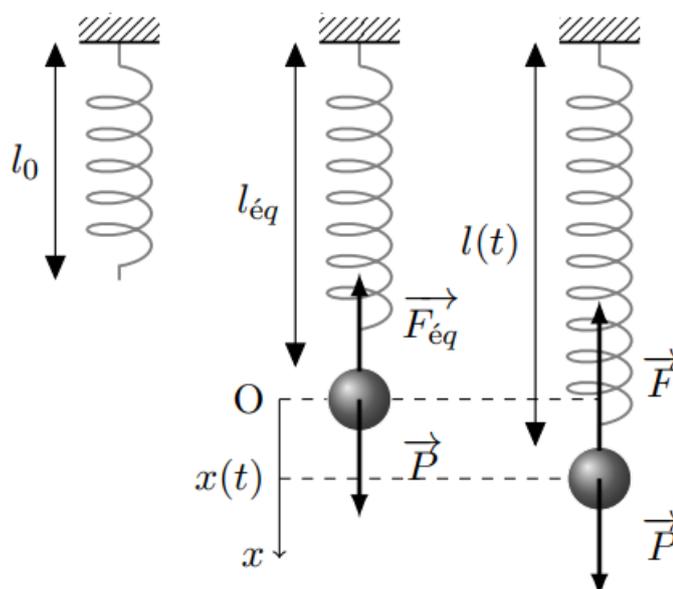
## II Oscillateur amorti

*Dans cette partie, à faire donc en tant que première partie si l'élément imposé le permet, on se base sur ce qui est vu dans la partie oscillations harmoniques pour aller assez vite dans la mise en équation. La résolution est moins aisée, il faut mettre un maximum de résultats sur les slides pour ne pas que l'écriture des solutions soit ennuyeuse...*

### II.1 Description du modèle

*Le but de cette sous-partie est d'insister sur la différence avec l'oscillateur harmonique : la force de frottements fluides.*

- On se place dans le cas d'un système oscillant verticalement.



- On ajoute une force de frottement fluide dû à l'air<sup>49</sup>. Celle-ci s'exprime comme :

$$\vec{f}_f = -\alpha \cdot \vec{v}$$

### Important

Dans le cas de l'oscillateur vertical, l'origine de l'axe des abscisses ne coïncide pas avec la longueur à vide du ressort ! La force de rappel du ressort n'est pas nulle à l'équilibre.

- Comment cette force de frottements influence-t-elle la réponse du système ?

## II.2 Mise en équation

*Il faut aller assez rapidement sur cette partie, puisqu'il s'agit d'une méthode quasi identique à la mise en équation dans le cas de l'OH.*

- Étudions le système mécanique :
  - Référentiel :  $\mathcal{R}$  Terrestre, supposé galiléen ;
  - Système : masse  $m$  ;
  - Bilan des forces :
    - La force de rappel du ressort :  $\vec{F}_r = -k(\ell - \ell_0) \vec{i} = -k(\ell - \ell_0) \vec{e}_x$
    - Le poids :  $\vec{P} = m\vec{g} = mg\vec{e}_x$
    - La force de frottements fluides :  $\vec{f}_f = -\alpha \cdot \vec{v}$

49. On est se place dans le cas de petites vitesses, donc la force de frottement est linéaire par rapport à la vitesse. Dans le cas de vitesses grandes, celle-ci est quadratique.

**Important**

Le poids et la réaction du support se compensent. On ne travaille que sur l'axe  $Ox$  pour cette étude mécanique.

- Application du PFD : (avec masse constante, précaution orale)

$$m \vec{a}_{M,\mathcal{R}} = \vec{P} + \vec{F}_r + \vec{f}_f \iff m \cdot \ddot{x}(t) = mg - k(x(t) + \ell_{\text{eq}} - \ell_0) - \alpha \cdot \dot{x}(t)$$

Or, à l'équilibre :

$$mg - k(\ell_{\text{eq}} - \ell_0) = 0$$

Donc l'équation différentielle devient :

$$\ddot{x}(t) + \frac{\alpha}{m} \dot{x}(t) + \frac{k}{m} x(t) = 0 \quad (73)$$

- On continue à utiliser la pulsation propre des oscillations  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  et on introduit un autre facteur, appelé facteur de qualité  $Q = \frac{\sqrt{km}}{\alpha}$ . L'équation devient alors la suivante, dite sous forme canonique :

$$\ddot{x}(t) + \frac{\omega_0}{Q} \dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = 0 \quad (74)$$

○ Comment trouve à partir de cela la position du système à toute date  $t$  ?

### II.3 Résolution

*Attention dans cette sous-partie à ne pas trop s'étaler sur l'équation caractéristique et les solutions. On considère cela comme acquis des étudiant · e · s et on discute de la physique qu'il y a derrière.*

- La solution d'une telle équation dépend des paramètres  $\lambda$  et  $\omega_0$ . En effet, l'équation caractéristique de cette équation différentielle s'écrit :

$$r^2 + \frac{\omega_0}{Q} r + \omega_0^2 = 0 \quad (75)$$

De discriminant  $\Delta = \left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2 = \omega_0^2 \left(\frac{1}{Q^2} - 4\right)$

- Projeter les différentes solution selon le signe du discriminant de l'équation caractéristique, projeter les solutions (racines) selon le signe. En déduire donc ce qui suit (préciser que  $A$ ,  $B$  et  $\varphi$  sont des constantes d'intégration à déterminer grâce aux conditions initiales) :

- Régime apériodique :  $\Delta > 0 \Leftrightarrow Q < \frac{1}{2}$

La solution s'écrit comme :

$$x(t) = e^{-\frac{2Q}{\omega_0}t} (Ae^{\Omega t} + Be^{-\Omega t}) \text{ avec } \Omega = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{4Q^2} - 1}$$

Le système est fortement amorti.

- Régime pseudo-périodique :  $\Delta < 0 \Leftrightarrow Q > \frac{1}{2}$

La solution s'écrit comme :

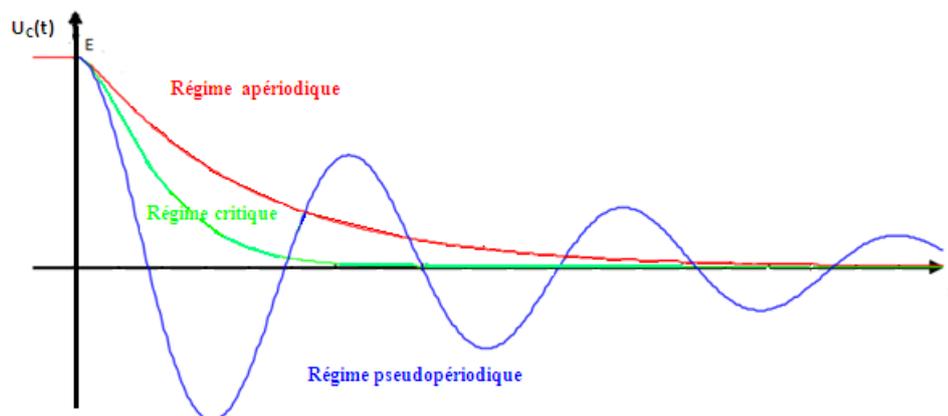
$$x(t) = e^{-\frac{2Q}{\omega_0}t} (A \cos(\Omega t + \varphi)) \text{ avec } \Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$$

Le système subit des oscillations qui s'atténuent au cours du temps.

- Régime critique :  $\Delta = 0 \Leftrightarrow Q = \frac{1}{2}$

La solution s'écrit comme :

$$x(t) = e^{-\frac{2Q}{\omega_0}t} (At + B)$$



○ Jusqu'alors, on a écarté la masse de sa position d'équilibre, et on a observé son retour à l'équilibre. Mais comment le système réagit-il si on le force à osciller ?

### III Oscillations forcées

Dans cette partie, on considère un système forcé. La notion de **résonance** étant nouvelle, passer du temps à en discuter.

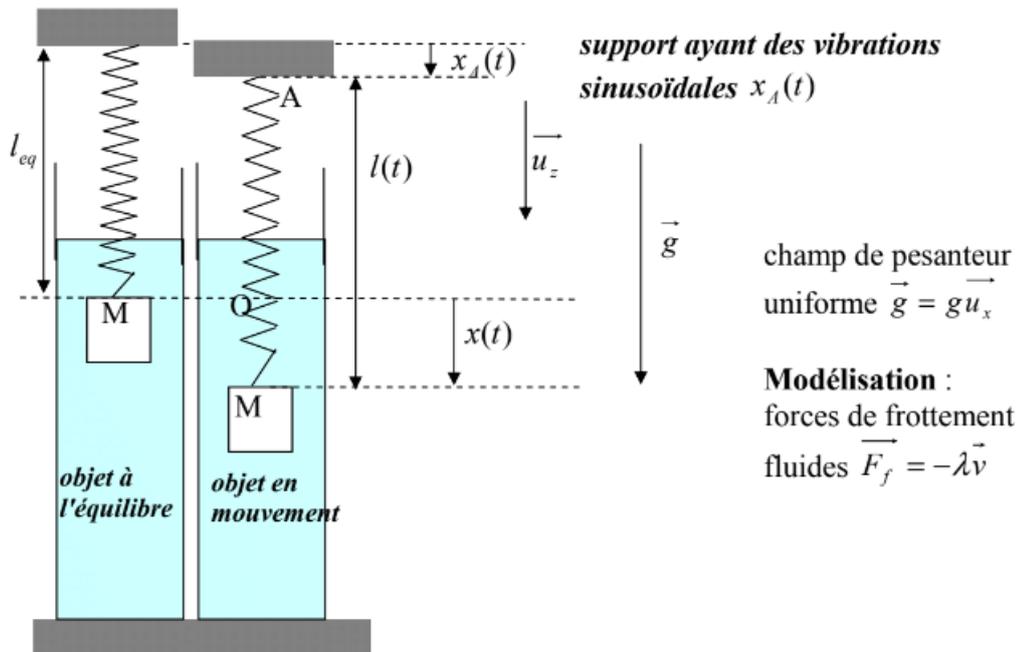
#### III.1 Régime forcé

Dans cette sous-partie, le but est de décrire le système considéré. Décrire les notions, notamment décrire précisément les équations lors du passage en notation complexe. **Préciser l'analogie avec un générateur de tension sinusoïdale.**

## Animation

Vidéo montrant les oscillations forcées en deuxième partie de vidéo.

- On reprends le cas de l'oscillateur vertical amorti, cependant, on rajoute une condition supplémentaire. Pendant l'expérience, le support sur lequel est fixé le ressort vibre à la fréquence  $\omega$ . On a alors un second membre dans l'équation différentielle qui correspond à cette vibration du support <sup>50</sup>.



Le support a des vibrations sinusoidales  $x_A(t) = X_{A,m} \cos(\omega t)$ . La force excitatrice qui en découle est  $\vec{F}_{exc}(t) = kx_A(t) \cdot \vec{e}_x = \underbrace{kX_{A,m}}_{F_{A,m}} \cos(\omega t) \cdot \vec{e}_x$ .

- On passe en notation complexe. L'équation devient :

$$\boxed{m\ddot{\underline{x}} + \alpha\dot{\underline{x}} + k\underline{x} = \underline{F}_{exc}} \text{ avec } \underline{F}_{exc} = F_{A,m}e^{j\omega t} \text{ et } \underline{x} = X_m e^{j\omega t}$$

La dérivation donne :

$$m(j\omega)^2 \underline{x} + \alpha j\omega \underline{x} + k \underline{x} = F_{A,m} e^{j\omega t}$$

On isole  $\underline{x}$  :

$$\underline{x} = \frac{F_{A,m} e^{j\omega t}}{-m\omega^2 + j\omega\alpha + k}$$

Soit, pour l'amplitude :

$$\boxed{\frac{X_m}{F_{A,m}} = \frac{1}{-m\omega^2 + j\omega\alpha + k}} \quad (76)$$

50. Source schéma : [https://www.dropbox.com/sh/pemcd0gz6bve7zo/AABpAaxGSe2A2f3nXLHo51FFa/Cours%20et%20TD/10.%20SP7%20oscillateurs%20amortis?dl=0&preview=SP7+0scillateurs+en+RSF.pdf&subfolder\\_nav\\_tracking=1](https://www.dropbox.com/sh/pemcd0gz6bve7zo/AABpAaxGSe2A2f3nXLHo51FFa/Cours%20et%20TD/10.%20SP7%20oscillateurs%20amortis?dl=0&preview=SP7+0scillateurs+en+RSF.pdf&subfolder_nav_tracking=1) (mon cours de PCSI)

On met cette équation sous forme canonique avec les grandeurs introduites plus haut :

$$\underline{X}_m = \frac{F_{A,m}}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - \frac{j\omega\omega_0}{Q}} \quad (77)$$

○ Le but maintenant est de déterminer l'amplitude en fonction de la pulsation imposée au système, et observer sa réponse.

### III.2 Résolution et phénomène de résonance

On met en évidence le fait qu'il existe un maximum d'amplitude dans certaines situations.

- On peut chercher le module de  $\underline{X}_m$  d'après la relation (77) :

$$X_m = \frac{F_{A,m}}{m} \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega\omega_0}{Q}\right)^2}} \quad (78)$$

- On cherche à tracer  $X_m$  en fonction de  $\omega$ . On remarque que cette fonction est maximum quand son dénominateur est minimum, c'est-à-dire lorsque :

$$\omega_r = \omega \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \quad (79)$$

Lorsque cette fonction prend son maximum, on parle de **phénomène de résonance**.

#### Définition

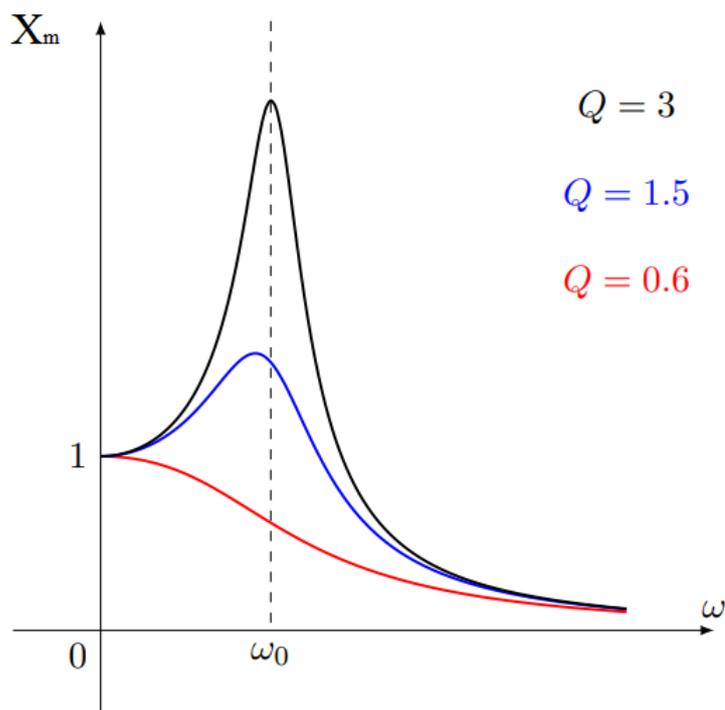
Le phénomène de **résonance** correspond à l'existence d'une pulsation  $\omega_r$  telle que l'amplitude du signal de sortie soit maximale.

La pulsation  $\omega_r$  pour laquelle le signal de sortie est maximal est la pulsation de résonance.

Il faut que  $\omega_r$  soit réelle et positive donc que la grandeur  $1 - \frac{1}{2Q^2}$  soit positive, c'est-à-dire que

$$Q > \frac{1}{\sqrt{2}}. \text{ Selon la valeur de } Q, \text{ on remarque qu'il y a résonance uniquement lorsque } Q > \frac{1}{2} \text{ }^{51}.$$

51. [5], page 14



### Important

Il faut bien comprendre le lien avec le facteur de qualité : lorsqu'il est élevée, il y a peu de frottements, d'où un phénomène de résonance possible. Cependant lorsqu'il y a trop de frottements, *ie.* le système n'oscille pas, alors le phénomène de résonance ne peut avoir lieu.

○ Comment traduire tout ce qu'on a vu par des échanges d'énergies ? Ou va l'énergie procurée au système et que devient-elle ?

## IV Aspect énergétique

*Dans cette partie, on fait des bilans d'énergie ou de puissance (ne pas oublier de préciser qu'il s'agit de la même chose).*

### IV.1 Oscillations libres

*On mets les étudiant · e · s sur la piste du théorème de l'énergie mécanique.*

- Énergie cinétique : elle s'écrit en fonction de la vitesse de la masse.

$$\mathcal{E}_c(t) = \frac{1}{2}m (\vec{v}_{M,\mathcal{R}})^2 = \frac{1}{2}m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 = \frac{1}{2}m\dot{x}^2$$

Ce qui donne, en dérivant la solution :

$$\mathcal{E}_c(t) = \frac{1}{2} m \omega_0^2 x_0^2 \sin^2(\omega_0 t) \quad (80)$$

- Énergie potentielle : cette énergie provient de la force de rappel du ressort <sup>52</sup>. C'est l'énergie « stockée » dans le ressort par sa déformation.

$$\mathcal{E}_p(t) = \frac{1}{2} k (\ell - \ell_0)^2$$

Soit ici :

$$\mathcal{E}_p(t) = \frac{1}{2} k (x(t) - x_{\text{éq}})^2 = \frac{1}{2} k X^2(t)$$

Ce qui donne, en utilisation l'expression de la solution :

$$\mathcal{E}_p(t) = \frac{1}{2} m \omega_0^2 x_0^2 \cos^2(\omega_0 t) \quad (81)$$

- Énergie mécanique <sup>53</sup> :

#### Définition

L'**énergie mécanique** d'un système est la somme de ses énergies cinétique et potentielle :

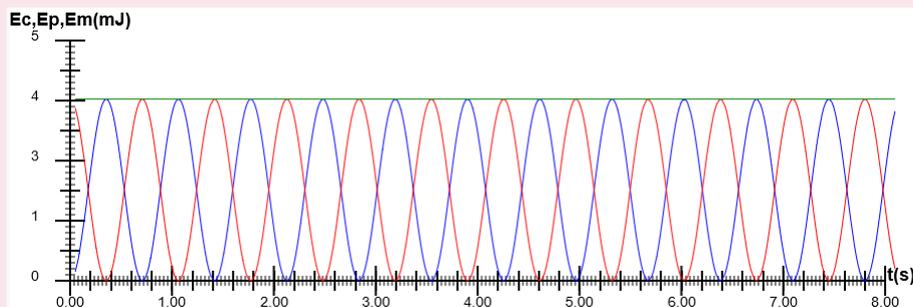
$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_p$$

Pour l'oscillateur harmonique, on somme donc les équations (80) et (81) :

$$\mathcal{E}_m = \frac{1}{2} m \omega_0^2 x_0^2 = \frac{1}{2} k x_0^2 = E_0 \quad (82)$$

#### Important

Pour l'oscillateur harmonique, **l'énergie mécanique se conserve**. Elle se répartit alternativement entre le terme d'énergie potentielle (élevé lorsque le ressort est étiré ou comprimé) et le terme d'énergie cinétique (élevé lorsque la masse prend de la vitesse).



52. Les forces conservatives ne sont pas connues des étudiant · e · s, mais on admet l'expression.

○ On a vu que la présence de forces de frottements provoquait l'arrêt des oscillations. Où est alors passée l'énergie du système oscillant ?

## IV.2 Oscillations amorties

Bien insister sur l'effet JOULE en électrocinétique, le but de cette sous-partie est de montrer la présence d'un terme en énergie ou en puissance dans laquelle « part » l'énergie du système.

- Système mécanique (oscillateur amorti) :

On multiplie l'équation du mouvement (74) par la norme de la vitesse  $v = \frac{dx}{dt} = \dot{x} = \|\overrightarrow{v_{M,\mathcal{R}}}\|$  :

$$m \cdot v \cdot \ddot{x}(t) + \alpha \cdot v \cdot \dot{x}(t) + k \cdot v \cdot x(t) = 0 \Leftrightarrow m \cdot v \cdot \frac{dv}{dt}(t) + \alpha v^2 + k \cdot x \cdot \frac{dx}{dt} = 0$$

On fait apparaître des dérivées composées.

$$\frac{d}{dt} \underbrace{\left(\frac{1}{2}mv^2\right)}_{E_c(t)} + \frac{d}{dt} \underbrace{\left(\frac{1}{2}kx^2\right)}_{E_p(t)} + \underbrace{\alpha v^2}_{\mathcal{P}_{diss}} = 0$$

On a donc fait un bilan de puissance (i.e. un bilan d'énergie à dt près) pour le système :

$$\boxed{\mathcal{P}_{cin} + \mathcal{P}_{ressort} + \mathcal{P}_{diss} = 0} \quad (83)$$

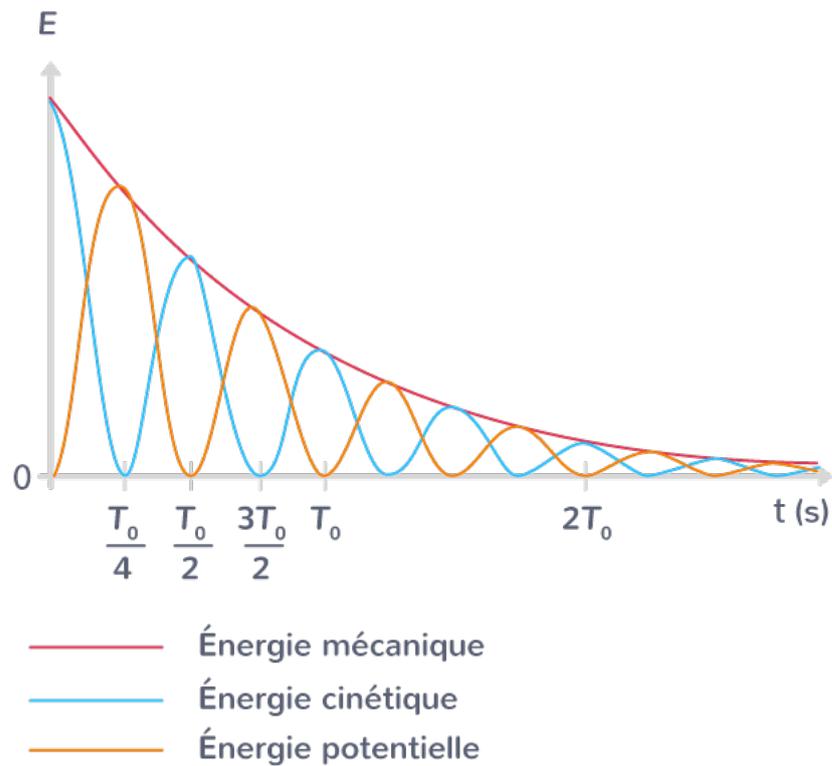
On remarque dans ce bilan un terme de dissipation. Le fait que ce terme soit en  $v^2$  provoque une irréversibilité : la puissance dissipée ne peut plus changer de forme.

Ce bilan s'écrit aussi comme :

$$\boxed{\frac{d\mathcal{E}_m}{dt}(t) = -\mathcal{P}_{diss} < 0}$$

L'énergie mécanique n'est pas conservée, mais elle diminue au cours de l'évolution temporelle du système<sup>54</sup>.

54. [3] page 8



- Système électronique (circuit RLC) :

On multiplie l'équation électrique par l'intensité  $i(t) = \dot{q}$  :

$$L\dot{q}\ddot{q} + R\dot{q}^2 + \frac{1}{C}\dot{q}q = 0$$

On fait ensuite apparaître des dérivées composées :

$$\frac{d}{dt} \underbrace{\left( \frac{1}{2} Li^2(t) \right)}_{\mathcal{E}_E} + \frac{d}{dt} \underbrace{\left( \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \right)}_{\mathcal{E}_M} + Ri^2(t) = 0$$

On met en évidence deux nouveaux termes :

- L'**énergie électrique** qui correspond à une énergie stockée dans le condensateur

par la charge :  $\mathcal{E}_E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$

- L'**énergie magnétique** qui correspond à une énergie non-stockable, et qui s'annule

en l'absence de courant :  $\mathcal{E}_M = \frac{1}{2} L \dot{q}^2(t) = \frac{1}{2} Li^2(t)$

- Analogies :<sup>55</sup>

55. [4] page 140.

SYSTÈME	ÉLECTRIQUE	MÉCANIQUE	ANALOGIE
Stockage d'énergie	Le condensateur dispose à tout instant d'une <b>énergie électrique</b> . Cette énergie peut être stockée, si on bloque le condensateur dans cet état en ouvrant le circuit et vaut : $\varepsilon_E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$	Le ressort dispose à tout instant d'une <b>énergie potentielle</b> . Cette énergie peut être stockée si l'on bloque le ressort en immobilisant le système dans une position quelconque et vaut : $E_p = \frac{1}{2} kx^2$	$\varepsilon_E \leftrightarrow E_p$  et  $I/C \leftrightarrow k$
Énergie en fonctionnement	Lorsque le courant circule, la bobine « contient » de l' <b>énergie magnétique</b> . Non stockable, cette énergie s'annule en l'absence de courant et vaut : $\varepsilon_M = \frac{1}{2} Li^2$	Lorsque le mobile se déplace, le solide « contient » de l' <b>énergie cinétique</b> . Non stockable, cette énergie s'annule en l'absence de mouvement et vaut : $E_c = \frac{1}{2} mv^2$	$\varepsilon_M \leftrightarrow E_c$  et  $L \leftrightarrow m$
Énergie dissipée	En cas d'amortissement, la <b>résistance</b> dissipe de l'énergie sous forme de chaleur (effet Joule).	En cas d'amortissement, les <b>frottements</b> dissipent de l'énergie sous forme de chaleur.	$R \leftrightarrow \alpha$
Échanges énergétiques	Les oscillations traduisent un échange permanent entre $\varepsilon_E$ et $\varepsilon_M$	Les oscillations traduisent un échange permanent entre $E_p$ et $E_c$	$\varepsilon_M \leftrightarrow \varepsilon_E$ $\updownarrow$ $E_c \leftrightarrow E_p$
Énergie susceptible d'être conservée	L' <b>énergie électromagnétique</b> $\varepsilon_{em}$ reste constante si l'amortissement est nul et décroît sinon : $\varepsilon_{em} = \varepsilon_E + \varepsilon_M$	L' <b>énergie mécanique</b> $E_m$ reste constante si l'amortissement est nul et décroît sinon : $E_m = E_p + E_c$	$\varepsilon_{em} \leftrightarrow E_m$

## Conclusion

- Réponse à la problématique : Une oscillation se caractérise par une amplitude certes, mais on a vu que les paramètres comme la constante de raideur du ressort, où le coefficient de frottements fluide  $\alpha$  avait une influence sur le nombre d'oscillations observée, tout comme la valeur de  $R$  en électrocinétique.
- Ouverture : sismographe et changement de référentiel.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

— Plan « à la carte », qui couvre, je pense, tout élément imposé possible... Le phénomène de résonance est assez intéressant à montrer, mais je n'ai pas développé l'analogie avec l'électrocinétique ici, il vaudrait mieux le faire plus proprement si on le présente au jury.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Phénomène de résonance ;
- ☞ Décrément logarithmique : « outil » pour mesurer  $Q$  ;
- ☞ Circuit RLC (questions expérimentales ?) ;
- ☞ La fameuse question « Qu'est-ce qu'un référentiel galiléen ? » Il faut considérer le temps de manipulation court devant le temps de rotation de la Terre. C'est un référentiel dans lequel s'applique le principe d'inertie ;
- ☞ Autres référentiels à connaître (géocentrique, héliocentrique, COPERNIC).

**PROGRAMME OFFICIEL (PCSI - PHYSIQUE) :**

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Oscillateur harmonique</b>	
Mouvement horizontal sans frottement d'une masse accrochée à un ressort linéaire sans masse. Position d'équilibre.	Établir et reconnaître l'équation différentielle qui caractérise un oscillateur harmonique. La résoudre compte tenu des conditions initiales. Caractériser le mouvement en utilisant les notions d'amplitude, de phase, de période, de fréquence, de pulsation. Contrôler la cohérence de la solution obtenue avec la conservation de l'énergie mécanique, l'expression de l'énergie potentielle élastique étant ici affirmée.
<b>Oscillateur amortis</b>	
Circuit RLC série et oscillateur mécanique amorti par frottement visqueux.	<b>Mettre en évidence la similitude des comportements des oscillateurs mécanique et électronique. Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire du deuxième ordre et analyser ses caractéristiques.</b> Analyser, sur des relevés expérimentaux, l'évolution de la forme des régimes transitoires en fonction des paramètres caractéristiques. Prévoir l'évolution du système à partir de considérations énergétiques. Prévoir l'évolution du système en utilisant un portrait de phase fourni. Écrire sous forme canonique l'équation différentielle afin d'identifier la pulsation propre et le facteur de qualité. Connaître la nature de la réponse en fonction de la valeur du facteur de qualité. Déterminer la réponse détaillée dans le cas d'un régime libre ou d'un système soumis à un échelon en recherchant les racines du polynôme caractéristique. Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire, selon la valeur du facteur de qualité.
Oscillateur électrique ou mécanique soumis à une excitation sinusoïdale. Résonance.	<b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental autour du phénomène de résonance.</b> Utiliser la construction de Fresnel et la méthode des complexes pour étudier le régime forcé. À l'aide d'un outil de résolution numérique, mettre en évidence le rôle du facteur de qualité pour l'étude de la résonance en élongation. Relier l'acuité d'une résonance forte au facteur de qualité. Déterminer la pulsation propre et le facteur de qualité à partir de graphes expérimentaux d'amplitude et de phase. Expliquer la complémentarité des informations présentes sur les graphes d'amplitude et de phase, en particulier dans le cas de résonance d'élongation de facteur de qualité modéré. <b>Mettre en œuvre une démarche expérimentale autour des régimes transitoires du premier ou du second ordre (flash, sismomètre, ...).</b>

**PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - PREMIÈRE ANNÉE) :**

Notions et contenus	Capacités exigibles
Petits mouvements au voisinage d'une position d'équilibre stable ; approximation locale par un puits de potentiel harmonique.	Déduire d'un graphe la position et la nature stable ou instable des positions d'équilibre Établir l'équation du mouvement à partir de l'énergie mécanique. Reconnaître l'équation d'un oscillateur harmonique non amorti. Relier la période et la dérivée seconde de l'énergie potentielle à l'équilibre.

**PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - SECONDE ANNÉE) :**

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
Oscillations libres et forcées.	Établir l'équation différentielle du mouvement. Faire le lien avec l'oscillateur électrique.

Élément imposé : Comparaison de différents protocoles de mesure**Introduction pédagogique**

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur
- Prérequis :
  - \* Analyse dimensionnelle ;
  - \* Notions d'incertitudes  $A$  et  $B$ .
- Séquence pédagogique : Avant cette leçon, les incertitudes auraient été introduites, notamment les incertitudes de type  $A$  et de type  $B$ . Ici on va introduire la notion de **chaîne de mesure** et quelques notions qui y sont associées. On appliquera ensuite ce qui a été vu en incertitudes avant la leçon et le vocabulaire de la chaîne de mesure à la détermination d'une viscosité dynamique, grâce à deux méthodes différentes. En raison de l'absence de manipulation, une vidéo YouTube sert de support. Avec la même vidéo, donc la même expérience, on va comparer la précision de la détermination de la vitesse de la bille.
- Difficultés :
  - \* Précision du vocabulaire ;
  - \* Évaluation des incertitudes différentes : il n'est pas évident d'admettre qu'avec la même manipulation, les incertitudes ne soient pas les mêmes.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Admettre qu'une mesure parfaite n'existe pas, que toute mesure est entachée d'une incertitude ;
  - \* Comprendre les incertitudes de type  $A$  et  $B$ , savoir les évaluer ;
  - \* Critiquer un protocole, proposer des pistes pour l'améliorer.

## Introduction pédagogique

— Sources utilisées :

- (1) PIARD, J., *Chimie générale expérimentale, Tout pour réussir les TP aux concours*, De Boeck supérieur, 2018.
- (2) Vidéo support pour l'expérience : <https://youtu.be/755BqtBR6G4>
- (3) BONNET, P., *Capteurs et chaîne de mesure*, cours en ligne.
- (4) *Viscosité des liquides*, cours en ligne.
- (5) VÉROT, M., *Mesure, erreur, incertitude*, Agrégation de chimie, cours en ligne, <http://agregationchimie.free.fr>.
- (6) LAGUETTE, M., *Mesures et incertitudes*, Mon cours de PCSI.

## Introduction

- Contextualisation : Il peut être utile de mesurer la viscosité du sang d'un patient, pour prévenir de certaines maladies.
- Dans cette leçon on va voir comment effectuer une mesure de viscosité grâce à un viscosimètre à chute de bille.

---

*Comment mettre en place un protocole de mesure pour contrôler une grandeur physique ?*

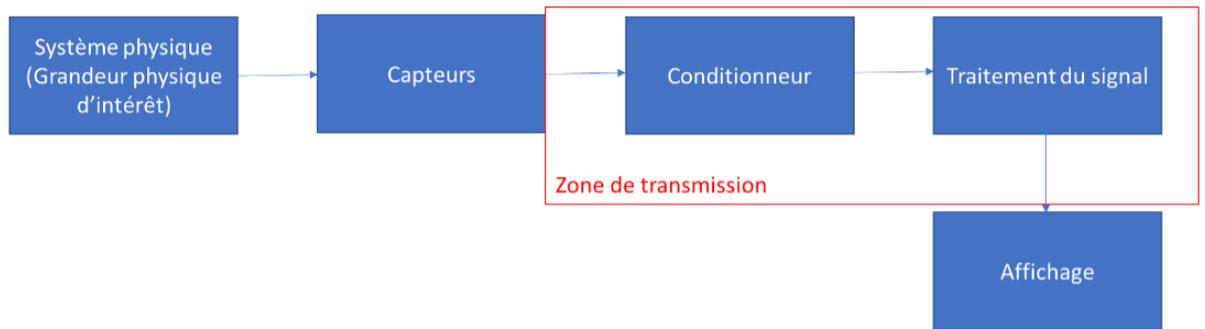
---

## I La chaîne de mesure

*Cette première partie est une partie très qualitative, inspirée du référentiel de BTS métiers de la chimie, qui présente quelques mots de vocabulaire incontournables.*

### I.1 Présentation

- On cherche à déterminer une grandeur physique d'un système :



- Quelques définitions :

#### Définition

Une **grandeur** est une propriété d'un phénomène, d'un corps, ou d'une substance que l'on peut exprimer quantitativement.

#### Définition

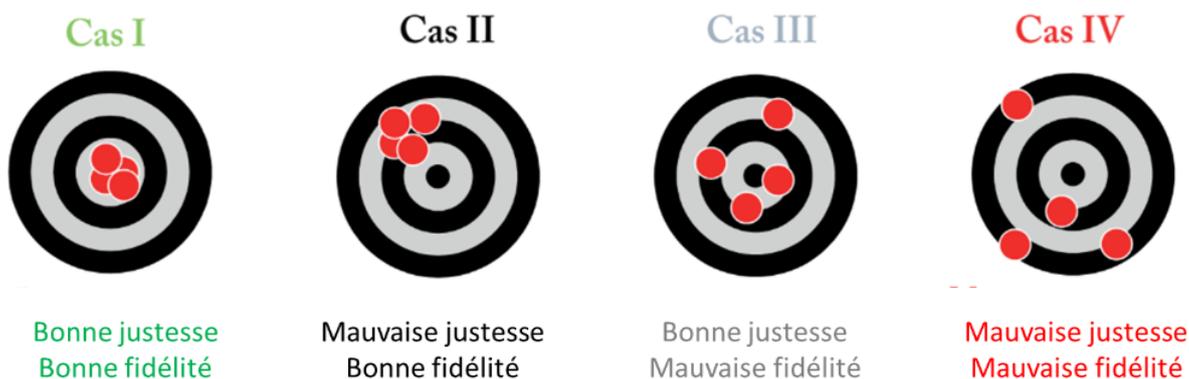
Le **mesurande** est la grandeur que l'on souhaite mesurer.

Le capteur réagit aux vibrations du mesurande et délivre un signal image du mesurande. Le conditionneur permet de créer le signal électrique que l'on va traiter. ☹ Cette chaîne de mesure est donc propre à chaque expérience.

## I.2 Caractéristiques

- Chaque chaîne de mesure est caractérisée par une **étendue des mesures**. C'est la gamme de valeurs mesurées que l'on peut obtenir (*par exemple*, pour un thermomètre usuels dans une maison, on pourra difficilement mesurer des températures excédant la soixantaine de degrés celcius).
- Il y a également le **temps de mesure** qui peut fluctuer. Il s'agit de l'intervalle de temps entre le changement de la grandeur et l'affichage de la valeur mesurée.
- Deux paramètres important et qui nous intéressent particulièrement dans cette leçon sont la **justesse** et la **fidélité**<sup>56</sup>.
  - Fidélité : caractérise le regroupement des valeurs mesurées autour d'une valeur moyenne.
  - Justesse : caractérise l'écart des valeurs mesurées à la valeur moyenne.

56. Source schéma : [1] page 327



☺ On va appliquer ce qu'on a vu et surtout faire un calcul d'incertitude, pour nous donner une idée de la précision de la mesure du viscosimètre.

## II Mesure de viscosité et incertitudes de type B

Dans cette partie, on présente le calcul des incertitudes pour une seule mesure.

### II.1 Système étudié

Le but de cette sous-partie n'est pas de démontrer les relations utiles à la détermination de la viscosité, mais d'expliquer le principe.

- On étudie la chute d'une bille. Au bout d'un certain temps, le régime permanent est atteint, et la mesure de la vitesse maximale de la bille  $v_{max}$  donne accès à sa viscosité :

$$\eta = \frac{2 r^2 g (\rho_s - \rho_f)}{9 v_{max}} \quad (84)$$

- Le but est de déterminer cette vitesse maximale. Grâce à une *vidéo YouTube*, on

**Important**

Ici, les mesurandes sont la distance et la durée.

☺ Voyons comment on peut déterminer cette vitesse maximale, avec seulement une caméra.

### II.2 Protocole et évaluation des incertitudes

- Dans ce protocole, on va effectuer **seule mesure** de la vitesse de chute de la bille. On va considérer que la bille a atteint son régime permanent. En mesurant le temps de chute de la bille sur une distance connue, on peut évaluer  $v_{max}$  :

$$v_{max} = \frac{h}{\Delta t} \quad (85)$$

### Expérience

Avec un chronomètre, on mesure  $\Delta t$ .

- Évaluation des incertitudes :

### Important

Dans ce cas de figure, l'évaluation des incertitudes se fait sur les grandeurs directement mesurées.

Pour évaluer les incertitudes de chaque grandeur, il faut se fier aux consignes des constructeurs.

- L'évaluation de  $h$  s'effectue à l'aide d'un double-décimètre. L'incertitude peut être évaluée à 1 mm puisque l'outil de mesure ne permet pas d'aller en deçà de cette unité.

$$\delta h = 1 \text{ mm} = 0,1 \text{ cm}$$

- L'évaluation de l'incertitude sur le temps de chute s'effectue par la prise en compte de la qualité de la vidéo. Le temps de chute est évalué avec la relation suivante :

$$\delta(\Delta t) = \frac{\text{Numéro image de début de chute} - \text{Numéro image de fin de chute}}{\text{Nombre d'images par secondes}}$$

avec 30 images par seconde.

La qualité de la vidéo nous permet d'obtenir une incertitude sur  $N_{début} - N_{fin}$  de 4 images. On a alors :

$$\delta(\Delta t) = 0,133 \text{ s}$$

- On peut alors évaluer l'incertitude-type sur la vitesse maximale de la bille :

$$\frac{\Delta v_{max}}{v_{max}} = \sqrt{\left(\frac{\delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t}\right)^2} \quad (86)$$

### Remarque

Si l'un des termes  $\left(\frac{\delta G}{G}\right)^2$  est très faible devant les autres, alors il peut être négligé. En particulier ici, on considèrera l'incertitude sur le rayon de la bille, sur les masses volumique et l'accélération de pesanteur négligeables.

- Pour obtenir l'incertitude élargie, il faut multiplier l'incertitude-type par un **coefficient d'élargissement**. Pour avoir un intervalle de confiance  $\mathcal{P} = 95\%$ , on utilise un coefficient d'élargissement  $k = 2$ .

$$\Delta v_{max}(95\%) = k \cdot \Delta v_{max}$$

○ *Commentaire sur la valeur déterminée.*

## II.3 Critiques du protocole

- Avec une seule mesure, on peut donc évaluer l'incertitude sur la viscosité. C'est l'atout majeur de cette méthode. Elle est **rapide** car une seule mesure est nécessaire.
- Le problème de cette méthode est qu'elle est limitée par les instruments de mesure. Pour obtenir des résultats plus précis, il faut de meilleurs instruments de mesure...

○ *On va donc modifier le protocole pour encadrer plus précisément le résultat.*

## III Mesure de viscosité et incertitudes de type A

*Dans cette partie, on présente un calcul d'incertitude pour une mesure répétée plusieurs fois.*

### III.1 Protocole

- On utilise la même vidéo. C'est le traitement de l'image qui est différent.
- On évalue la vitesse de la bille en plusieurs points, grâce au logiciel LatisPro. Toutes les 10 images, on pointe la position de la bille. Le logiciel peut alors évaluer entre deux positions la vitesse de la bille.
- On effectue 17 pointages, on obtient donc 16 valeurs de vitesse.

#### Important

Dans ce cas de figure, l'évaluation des incertitudes se fait sur l'ensemble des valeurs des grandeurs mesurées.

○ *Est-ce mieux ou moins bien que la mesure précédente ?*

### III.2 Calcul des incertitudes

- Les incertitudes dans ce cas sont obtenues par des calculs statistiques : forts du fait d'avoir plusieurs mesures, on a un écart-type et une incertitude-type via les relations mathématiques :
- Calcul d'un écart-type et de l'incertitude-type :

$$\Delta v_{max} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad \text{avec} \quad \sigma = \sqrt{E((E(X) - X)^2)}$$

○ *Commentaire sur la valeur trouvée.*

### III.3 Avantages et inconvénients de la méthode

- On est limité par la qualité de la vidéo, ici, assez mauvaise.
- Le problème de cette méthode est qu'il faut que l'expérience soit reproductible. Aussi, cette méthode prend du temps.

- L'avantage de ce protocole est de pouvoir mesurer un nombre important de valeurs. L'incertitude sur la mesure se voit ainsi diminuée. Celle-ci décroît en  $\frac{1}{\sqrt{N}}$  avec  $N$  le nombre de mesures.

## Conclusion

- Réponse à la problématique : On compare et on récapitule.

Protocole : incertitude type B		Protocole : incertitude type A	
Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
Besoin d'une unique mesure	Rapidement limité par le matériel utilisé	Matériel moins limitant	Expérience non reproductible impossible
Expérience non reproductible possible		Incertitude dépend du nombre de mesure	Souvent long d'effectuer plusieurs mesures

- Ouverture : d'autres méthodes pour mesurer une viscosité.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

— Classiquement, le thermocouple est traité dans cette leçon.

Élément imposé : Relier les caractéristiques d'un régime transitoire aux propriétés d'un système

### Introduction pédagogique

- Niveau : Enseignement supérieur (L1, BCPST 1)
- Prérequis :
  - \* Électrocinétique : loi des mailles, loi des noeuds, loi constitutives des dipôles ;
  - \* Mécanique : lois de NEWTON, forces courantes (poids, forces de rappel d'un ressort, réaction du support, forces de frottements) ;
  - \* Pré-requis mathématique : résolution d'équations différentielles du premier et second degré.
- Séquence pédagogique : Cette leçon arrive d'une part après l'étude des circuits électriques dans l'ARQS, afin que les étudiants sachent manipuler sans soucis les lois de KIRSCHOFF et les lois des dipôles ; et après un cours de mécanique sur l'oscillateur harmonique d'autre part. On considère que la résolution des équations différentielles (notamment celles du second ordre) ne pose aucun problème aux étudiants : dans la leçon l'aspect mathématique ne sera pas développé, alors qu'en situation réelle, il serait un éventuel point de blocage.
- Difficultés :
  - \* Difficulté mathématique avec la résolution d'équations différentielles ;
  - \* Ne pas confondre ordre 1 et 2 selon le circuit/phénomène physique.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre la notion de régime transitoire opposée à régime permanent ;
  - \* Comprendre que les caractéristiques d'un régime transitoire dépendent des propriétés d'un système.
- Sources utilisées :

- (1) SANZ, M-N., SALAMITO, B., *et coll.*, *Physique PCSI, tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019.
- (2) MEIER, D., SALLEN, L., *Réussir les TP de Physique aux concours*, Dunod, 2e éd., 2016.
- (3) DE LA BAUME, F., *et coll.*, *Exos Résolus Prépa MPSI*, hachette éducation, 2015.

## Introduction

On a vu précédemment l'étude mécanique de l'oscillateur harmonique, qui négligeait les frottements. Or, il est intuitif de voir que cette approximation semble grossière : l'oscillateur fini bien par s'arrêter. Cependant, entre le moment où on le met en mouvement et le moment où il s'arrête, il se passe une durée plus ou moins longue. Même chose pour un objet qui tombe : il accélère pendant une durée plus ou moins longue puis atteint une vitesse limite. De quels paramètres dépendent ces durées ? C'est ce que nous allons voir dans cette leçon, sous un aspect électrique et mécanique.

## I Influence du temps de réponse

On va commencer cette leçon par des systèmes dits d'ordre 1, c'est-à-dire des systèmes dont la grandeur observée obéit à une équation différentielle du premier ordre. Il y a deux exemples notables que l'on peut citer :

- En électrocinétique : le circuit RC ;
- En mécanique : la chute libre d'un corps.

### I.1 Observations expérimentales

#### Expérience

Circuit RC du premier ordre <sup>a</sup> en utilisant le matériel suivant :

- Un générateur à basse fréquence ;
  - Un oscilloscope ;
  - Une boîte à décades de capacité ;
  - Une boîte à décades de résistances ;
  - Des fils de 3 couleurs différentes.
- Faire le montage RC, en imposant **un signal créneaux sur le GBF** au circuit, et en prenant comme valeurs :
- $C = 1,0 \mu\text{F}$  ;
  - $R \approx 50 \text{ k}\Omega$  ;
  - $e = 10 \text{ V}$ .
- Visualiser sur la voie 1 de l'oscilloscope la tension d'entrée, et la tension aux bornes du condensateur sur la voie 2. Montrer la mise en évidence des deux régimes : le **régime transitoire** et le **régime permanent**.
- Faire varier la valeur de  $C$  et de  $R$  et montrer que si l'un de ces deux paramètres augmente, alors la courbe atteint plus lentement sa valeur limite, autrement dit, que le régime transitoire est plus important.

*a. Réussir les TP de physique aux concours, 2e édition, L.SALLEN et D. MEIER, Dunod, page 92*

On donne alors la définition des deux régimes :

### Définition

On appelle **régime permanent**, ou **régime établi** le régime pour lequel les grandeurs caractéristiques du système sont soit constantes dans le temps, soit périodiquement variables dans le temps.

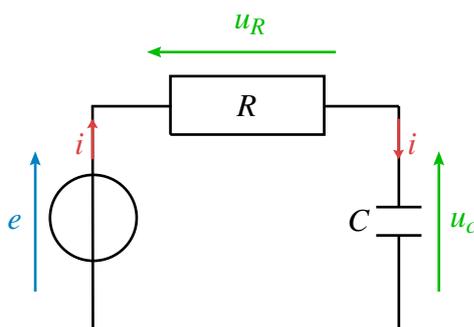
On appelle **régime transitoire** le régime pour lequel les grandeurs sont en variation pendant une durée déterminée.

On a observé expérimentalement qu'en fonction des paramètres du système étudié, le régime transitoire est plus ou moins long.

○ Pour comprendre cette dépendance, on va étudier d'un point de vue mathématique ce qu'il se passe.

## I.2 Mise en équation

- Le montage étudié est le suivant :



- On applique la loi des mailles :  $u_c + u_R = e$  ;

- Les lois constitutives des dipôles donnent  $u_R = Ri$  (loi d'OHM, résistance),  $i = C \frac{du_c}{dt}$  (condensateur).

- L'équation différentielle est donc :

$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = e$$

- On pose  $\tau$  le **temps caractéristique** du système :  $\tau = RC$ . L'équation différentielle devient alors :

$$\frac{du_c}{dt}(t) + \frac{u_c}{\tau}(t) = \frac{e}{\tau} \quad (87)$$

○ Maintenant que l'on a mis en évidence la présence d'un temps caractéristique, on peut résoudre l'équation afin de voir comment il se manifeste sur la courbe.

### I.3 Résolution de l'équation différentielle

- Pour  $t < 0$ , la tension délivrée par le GBF est nulle ( $e = 0$ ). On a alors :  $u_c(t < 0) = 0$ .
- Pour  $t > 0$ , la tension délivrée par le BGF est constante :  $e = E_0$
- La solution  $u_c(t)$  est la somme de la solution de l'équation homogène et d'une équation particulière :

$$u_c(t) = u_{c,h}(t) + u_{c,part}(t)$$

- L'équation homogène est la suivante :

$$\frac{du_{c,h}}{dt}(t) + \frac{u_{c,h}}{\tau}(t) = 0$$

De solution :

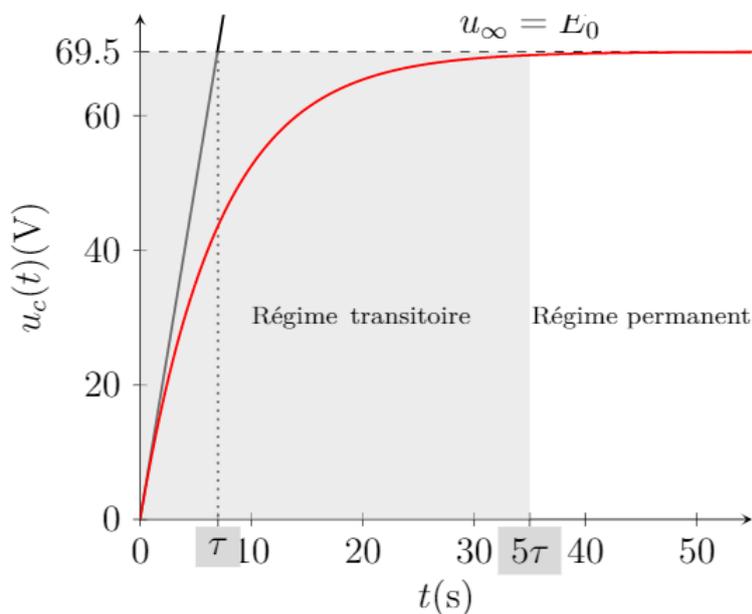
$$u_{c,h}(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

- La solution particulière est constante ( $u_{c,part}(t) = u_{c,part}$ ) car le second membre est constant. On en déduit, en remplaçant dans l'équation différentielle (87) :

$$u_{c,part} = E_0$$

- Finalement la solution de l'équation différentielle s'écrit :

$$u_c(t) = E_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (88)$$



○ On peut s'intéresser maintenant à des systèmes oscillants, qui eux aussi ont leur propre régime transitoire.

## II Influence du facteur de qualité et du coefficient d'amortissement

### II.1 Observations expérimentales

#### Expérience

Circuit RLC du second ordre <sup>a</sup> à l'aide du matériel suivant :

- Un générateur à basses fréquences (GBF) ;
  - Un oscilloscope ;
  - Une boîte à décades d'inductance variable ;
  - Une boîte à décades de capacité variable ;
  - Une boîte à décades de résistance variable ;
  - Des fils de 4 couleurs différentes.
- Faire le montage RLC, en prenant comme valeurs :
- $C = 33 \text{ nF}$  ;
  - $L = 560 \text{ mH}$  ;
  - $R$  variable.
- Faire varier la valeur de la résistance, et mesurer la valeur de la tension  $u_c$  aux bornes du condensateur à l'aide de la voie 2 de l'oscilloscope, la voie 1 étant branchée sur le GBF.
- $R = 20 \text{ k}\Omega$  : on observe un régime transitoire qui ressemble à ce que l'on a vu à la partie précédente ;
  - $R = 3,0 \text{ k}\Omega$  : on observe un régime transitoire avec une "petite oscillation" ;
  - $R = 1,0 \text{ k}\Omega$  : on observe un régime transitoire avec des oscillations qui s'atténuent.

---

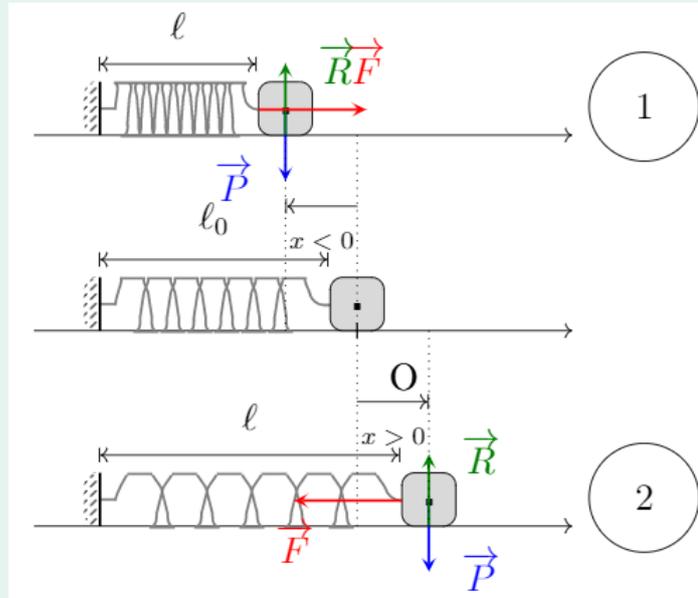
a. SANZ, M-N., SALAMITO, B., et coll., *Physique PCSI, tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019, page 337

Regardons l'analogie qui peut être faite avec la mécanique et l'exemple du dispositif masse-ressort. On l'avait vu lors du chapitre sur l'oscillateur harmonique mais on n'avait pas pris en compte les frottements. Que se passe-t-il si on les prend en compte ?

### Animation

Oscillateur horizontal <sup>a</sup> :

- imposer un coefficient d'amortissement nul : on retrouve le comportement d'un oscillateur harmonique ;
- imposer un coefficient d'amortissement non-nul : on voit que les oscillations s'atténuent, et qu'au delà d'une valeur seuil pour le coefficient d'atténuation, il n'y a plus d'oscillations.



a. Site de Geneviève TULLOUE, univ. de Nantes

## II.2 Mise en équation

- Mise en équation pour le circuit RLC :

- Loi des mailles :  $u_L + u_c + u_R = e$

- Lois constitutives des dipôles :  $u_R = Ri$  (loi d'OHM, résistance),  $u_L = L \frac{di}{dt}$  (bobine)

et  $i = C \frac{du_c}{dt}$  (condensateur).

- On a donc, après quelques calculs :

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2}(t) + RC \frac{du_c}{dt}(t) + \frac{u_c}{LC} = e$$

qui s'écrit elle aussi sous forme canonique :

$$\boxed{\frac{d^2 u_c}{dt^2}(t) + \frac{\omega_0}{Q} \frac{du_c}{dt}(t) + \omega_0^2 u_c(t) = 0} \quad (89)$$

- En posant :

- La pulsation propre  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , elle correspond à la pulsation des oscillations qu'aurait le système sans atténuation.

- Le facteur de qualité  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ , qui quantifie l'amortissement.

- *Slides* : Pour l'équation de l'oscillateur amorti, on a la même équation différentielle :

$$\frac{d^2x}{dt^2}(t) + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dx}{dt}(t) + \omega_0^2 x(t) = 0 \quad (90)$$

En posant  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  la pulsation propre et  $Q = \frac{\sqrt{km}}{\alpha}$  le facteur d'amortissement.

○ On peut étudier de plus près comment la valeur de ce facteur de qualité va influencer le régime transitoire du système.

### II.3 Régimes transitoires associés

- On résout cette équation différentielle. On a, comme précédemment  $x(t) = x_h(t) + x_p(t)$ , mais puisque le second membre est nul, la solution se résume à la solution homogène.
- La solution dépend des paramètres. L'équation caractéristique s'écrit :

$$r^2 + \frac{\omega_0}{Q} r + \omega_0^2 = 0$$

De discriminant  $\Delta = \left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2 = \omega_0^2 \left(\frac{1}{Q^2} - 4\right)$

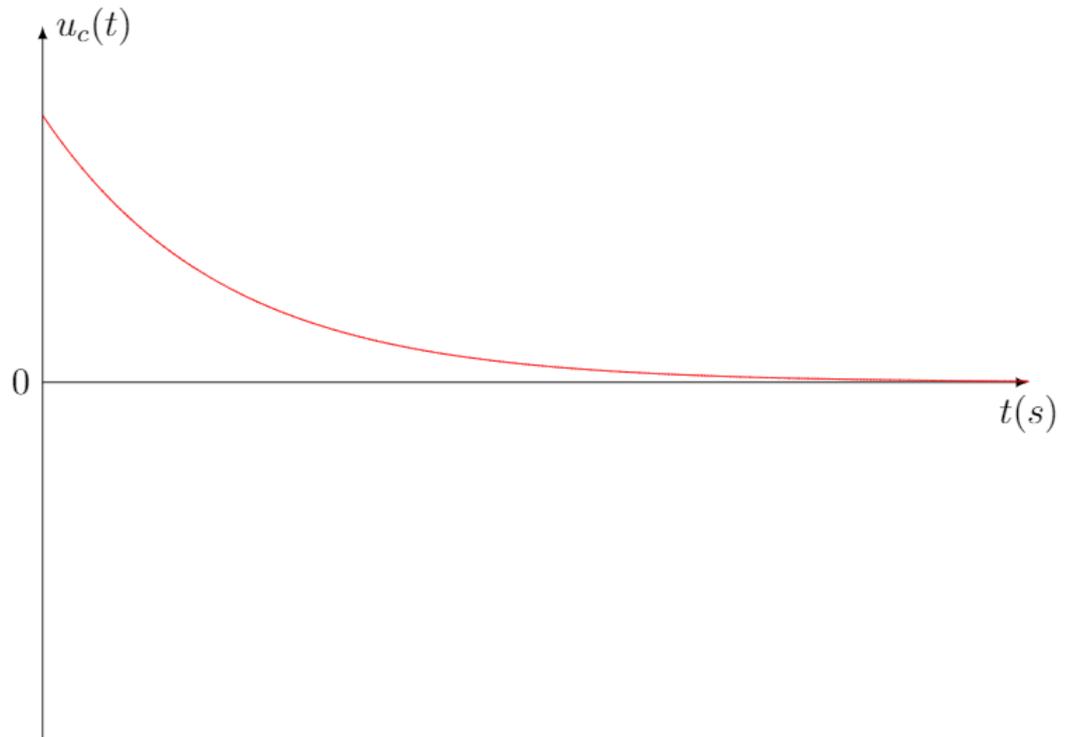
- Projeter les différentes solutions selon le signe du discriminant de l'équation caractéristique, projeter les solutions (racines) selon le signe. En déduire donc ce qui suit (préciser que  $A$ ,  $B$  et  $\varphi$  sont des constantes d'intégration à déterminer grâce aux conditions initiales) :

- **Régime apériodique** :  $\Delta > 0 \Leftrightarrow Q < \frac{1}{2}$

La solution s'écrit comme :

$$u_c(t) = e^{-\frac{2Q}{\omega_0} t} \left( A e^{\Omega t} + B e^{-\Omega t} \right) \text{ avec } \Omega = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{4Q^2} - 1}$$

Le système est fortement amorti.

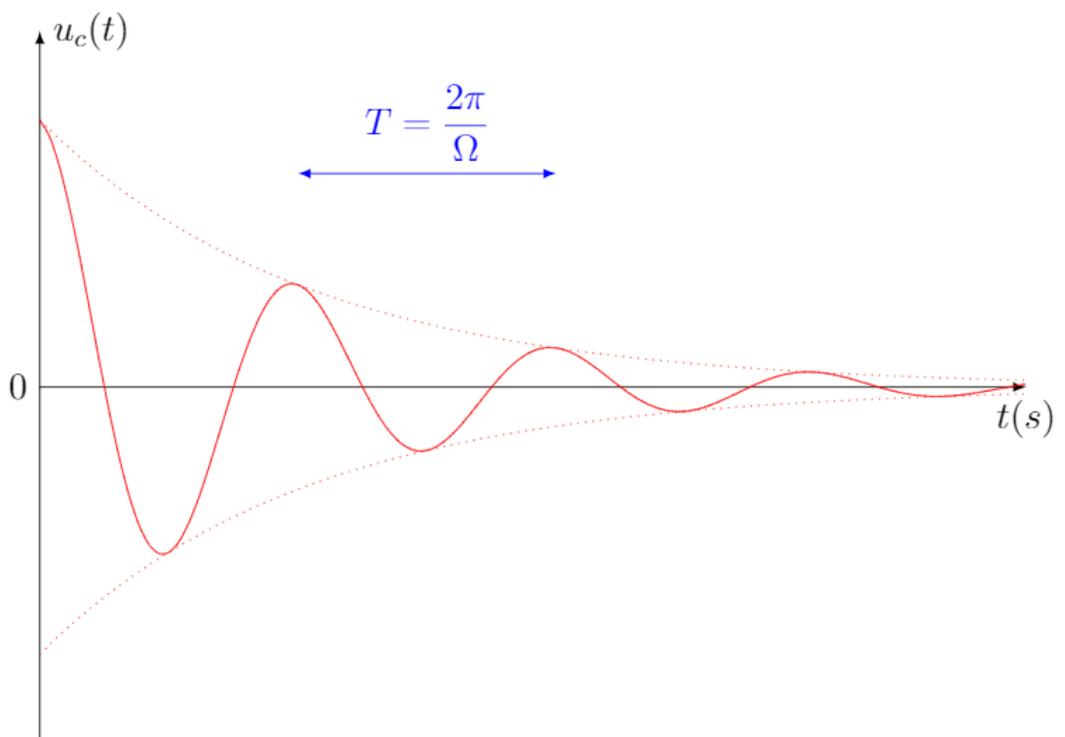


- Régime pseudo-périodique :  $\Delta < 0 \Leftrightarrow Q > \frac{1}{2}$

La solution s'écrit comme :

$$u_c(t) = e^{-\frac{2Q}{\omega_0}t} (A \cos(\Omega t + \varphi)) \text{ avec } \Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$$

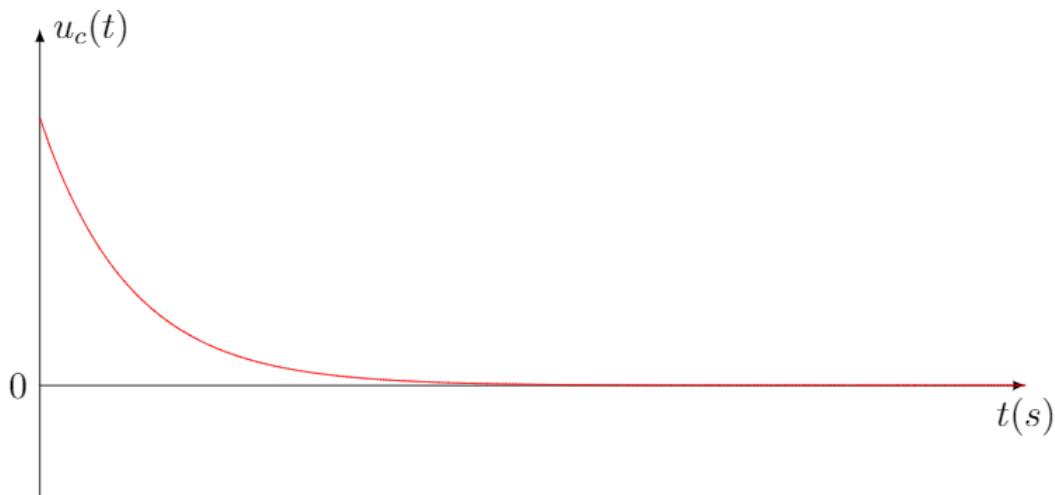
Le système subit des oscillations qui s'atténuent au cours du temps.



- Régime critique :  $\Delta = 0 \Leftrightarrow Q = \frac{1}{2}$

La solution s'écrit comme :

$$u_c(t) = e^{-\frac{2Q}{\omega_0}t} (At + B)$$



- Projeter un tableau de comparaison des deux systèmes
- On peut donc faire l'analogie et voir que la résistance dans le circuit RLC joue le même rôle que le coefficient de frottement fluides pour le dispositif masse-ressort.
- Dans notre exemple, il faut donc ajuster le coefficient de frottement (propre au fluide) pour que les dos d'âne soient correctement amortis. En profiter qu'il ne faut pas toujours voir les frottements comme quelque chose de négatif!

○ Dans le cas du régime pseudo-périodique, qui nous arrange dans notre exemple, on peut introduire une grandeur qui va permettre de mesurer la rapidité de décroissance.

## II.4 \*Mesure de la cinétique de décroissance des oscillation

- Cet outil s'appelle le décrément logarithmique.

### Définition

Le **décrrément logarithmique**  $\delta$  est une grandeur sans unité qui permet de mesurer la rapidité de décroissance des oscillations.

- Dans notre cas, il est défini par :

$$\delta = \ln \left( \frac{u_c(t)}{u_c(t + T)} \right)$$

Faire le calcul<sup>57</sup>, montrer que :

$$\delta = \frac{\pi}{\sqrt{4Q^2 - 1}}$$

57. SANZ, M-N., SALAMITO, B., et coll., *Physique PCSI, tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019., page 658

## Conclusion

- Ceci peut par exemple trouver une application pour les voitures et leur amortisseurs.
- Ouverture : Ici, on n'a parlé que de régime transitoire amenant à un régime permanent de retour à l'équilibre, mais il en existe d'autres, par exemple en régime sinusoïdal forcé.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- Ne faire que l'ordre 1 ou que l'ordre 2. Les avis divergent sur la question ;
- Se baser uniquement sur la mécanique (chute verticale puis oscillateur mécanique) et faire l'analogie avec l'électronique.
- Intégrer la manipulation de la chute de la bille dans la glycérine.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Puisqu'on évoque la chute verticale d'un corps et de la force de frottement fluide en  $-\lambda \vec{v}$ , il faut savoir justifier cette expression et en énoncer la validité ;
- ☞ Toute question sur le montage, l'oscilloscope, etc ;
- ☞ Ici on n'a ni parlé d'aspect énergétique ni de portrait de phase, mais on peut s'attendre à en parler dans la discussion ;
- ☞ Savoir expliquer le critère du  $3\tau \Leftrightarrow$  régime permanent atteint.

#### PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - PREMIÈRE ANNÉE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modélisation des régimes transitoires par un circuit RC.  Stockage et dissipation de l'énergie.	Établir l'équation différentielle de la réponse d'un circuit RC à un échelon de tension et la résoudre. Réaliser un montage permettant de visualiser à l'oscilloscope la charge et la décharge d'un condensateur. Maîtriser l'analogie entre le bilan d'énergie dans un circuit RC et un bilan particulaire ou thermique en régime transitoire.

#### PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - SECONDE ANNÉE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Oscillations libres d'un circuit RLC.	Établir l'équation différentielle régissant l'oscillateur. Faire le lien avec l'oscillateur mécanique. Identifier la nature du régime : pseudopériodique ou apériodique. Déterminer le coefficient d'amortissement et la pseudo-période à partir d'un graphe ou de la solution fournis. Montrer que l'oscillateur harmonique est un cas limite de l'oscillateur amorti. <b>Réaliser un montage permettant de visualiser l'évolution temporelle d'une grandeur électrique dans un circuit RLC.</b>

Élément imposé : Utilisation du mouillage pour des traitements de surface**Introduction pédagogique**

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (L2, ou BTS métiers de la chimie)
- Prérequis :
  - \* Interactions intermoléculaires de VAN DER WAALS ;
  - \* Mécanique : travail d'une force, travail d'une force conservative et lien avec l'énergie potentielle.
- Séquence pédagogique :
- Difficultés :
  - \* Origine de la tension superficielle ,
  - \* Approche mécanique VS approche énergétique.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Définir l'énergie et la force de tension superficielle ;
  - \* Définir et utiliser la notion de mouillage ;
  - \* Compétence expérimentale : connaître une méthode de mesure d'un coefficient de tension superficielle.
- Sources utilisées :

- (1) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, *tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.
- (2) ROUSSEL, J., Cours en ligne Tension Superficielle, Femto Physique, cours en ligne, <https://femto-physique.fr/>.
- (3) LASNE, D., *TP 19 - Tension superficielle*, Mon cours PC.
- (4) DE GENNES, P-G., *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin.

## Introduction

Montrer une image d'une surface avec une goutte de mercure et une goutte d'eau. Elles ne s'étalent pas de la même manière.

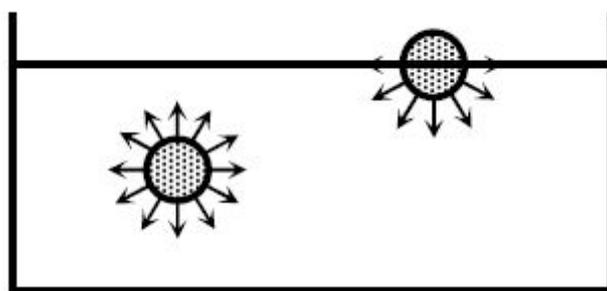
*Comment expliquer que la goutte d'eau et la goutte de mercure ne s'étalent pas de la même façon ?*

---

## I Notion de tension superficielle

### I.1 Origine

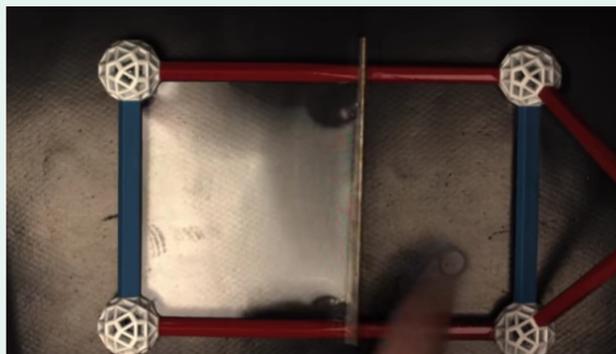
L'état liquide est un état condensé où chaque molécule subit des interactions attractives de la part des autres molécules du liquide. Les molécules à la surface perdent donc environ la moitié de ces interactions et se trouvent alors dans un état énergétique défavorable.



Un liquide va donc avoir tendance à avoir un minimum de molécules dans cet état, c'est-à-dire à **minimiser la surface de l'interface avec l'extérieur**.

#### Animation

Vidéo sur wikipédia montrant l'existence d'une force qui déplace la tige lorsque la bulle de savon se détruit.



○ On a donc mis en évidence une force, voyons ses caractéristiques et une nouvelle notion, le coefficient de tension superficielle.

## I.2 Interprétation énergétique

### Définition

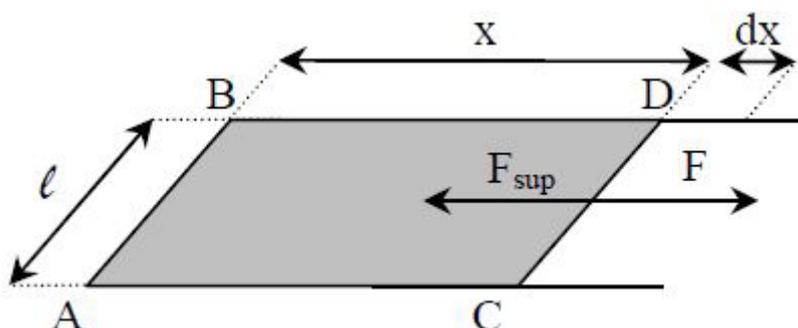
Le comportement des molécules au sein d'un fluide est fortement perturbé au voisinage d'une interface, ce qui provoque l'apparition de forces, appelés **forces de tension superficielle**, qui tendent à **minimiser la surface de l'interface**. On associe à cette force une énergie potentielle, proportionnelle à la surface :

$$\mathcal{E} = \gamma S$$

où  $\gamma$  est appelé *coefficient de tension superficielle*.

Liquide	Éthanol	Acétone	glycérol	Eau	Mercure
$\gamma$ (mJ · m <sup>-2</sup> )	23	24	63	72	485

On peut montrer que plus  $\gamma$  est grand, et moins un liquide a tendance à s'étaler. Considérons une portion d'interface rectangulaire ABCD dont l'un des côtés CD est mobile :



Pour augmenter la surface de  $dx$ , il faut fournir un travail  $\delta W = \vec{F} \cdot \vec{dl} = F \cdot dx$ . Cela correspond à une augmentation d'énergie potentielle de  $\gamma dx$ . Cette force est conservative donc  $d\mathcal{E} = -\delta W(\vec{F})$ . On en déduit par identification que :

$$F = 2\gamma l$$

Le coefficient 2 est dû à la présence de deux interfaces.

### Important

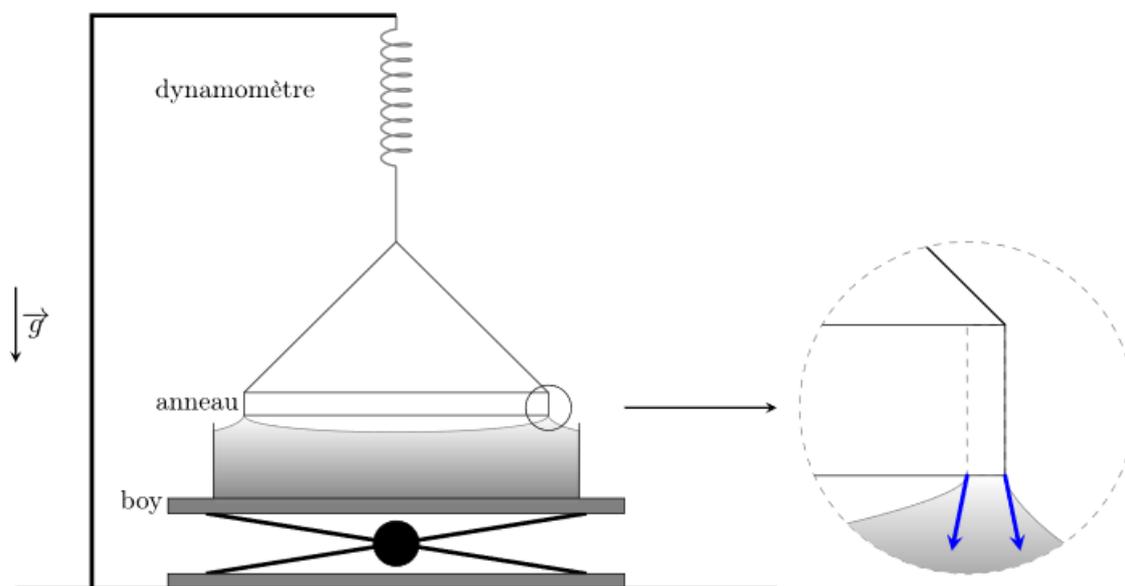
Le coefficient de tension superficielle  $\gamma$  est une **énergie par unité de surface**, *ie.* une **force par unité de longueur**

○ Voyons à présent une méthode pour déterminer par l'expérience ce coefficient de tension superficielle.

## I.3 Mesure expérimentale

L'objectif de cette sous-partie est de présenter une méthode expérimentale pour déterminer  $\gamma$ .

La méthode présentée s'appelle la **méthode d'arrachement**. Le but est de mesurer la force nécessaire pour arracher un cylindre creux placé sur la surface d'un liquide<sup>58</sup>.



### Animation

Cette [vidéo](#) vaut mieux que de longs discours pour expliquer le principe de la manipulation.

Les mesures de la classe pendant mon année de PC sont les suivantes :

Expérience	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\gamma$ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	40	65	59	65	59	59	30	47	46	49

On peut tenter de présenter ce résultat à l'aide d'incertitude. Pour analyser une série de  $n$  mesures on calcule l'écart-type  $\sigma_{n-1}$  de la série de mesure<sup>59</sup>, et on a ensuite la relation suivante pour l'incertitude type :

$$\sigma = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$

On prend  $2\sigma$  pour l'incertitude élargie. Le résultat est alors :

$$\gamma = 52 \pm 7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

○ Voyons l'effet de ces forces de tensions superficielles sur une goutte de liquide, par le biais de l'étude du mouillage.

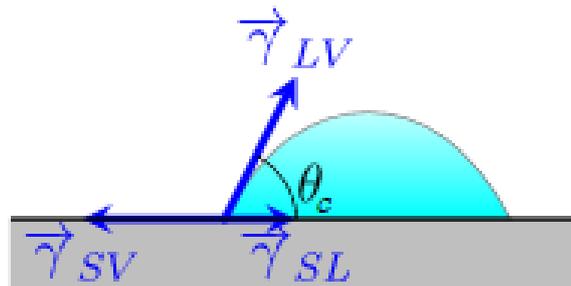
58. Source schéma : [2]

59. Il est donné par la calculatrice dans l'onglet « statistique ».

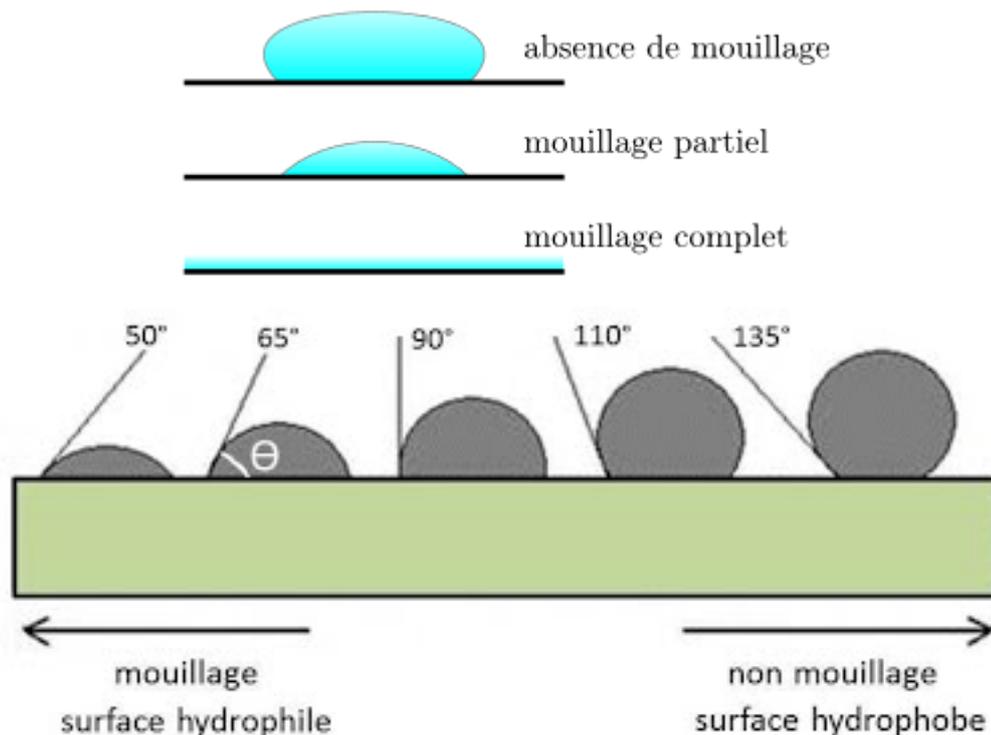
## II Notion de mouillage

### II.1 Mouillage et étalement

- Le **mouillage** d'un liquide sur un solide désigne d'une part la forme que prend le liquide à la surface du solide (mouillage statique) et la façon dont il se comporte lorsqu'on essaie de le faire couler.
- A l'interface entre une goutte de liquide et le milieu environnant, des **forces surfaciques** s'exercent ( $\gamma_{air/liq}$ ;  $\gamma_{air/sol}$  et  $\gamma_{sol/liq}$ ). Elle conduisent à une forme d'équilibre pour la goutte, avec un **angle de raccordement** ou **angle de contact**  $\theta_c$ <sup>60</sup> :



- On définit plusieurs cas selon la manière dont un liquide s'étale sur un support :
  - Si  $\theta_c > \frac{\pi}{2}$ , on parle de **mouillage nul**.
  - Si  $\theta_c = 0$ , on parle de **mouillage complet** (ou **mouillage parfait**).
  - Si  $0 < \theta_c < \frac{\pi}{2}$ , ce qui est le cas la plupart du temps, on parle de **mouillage partiel**.

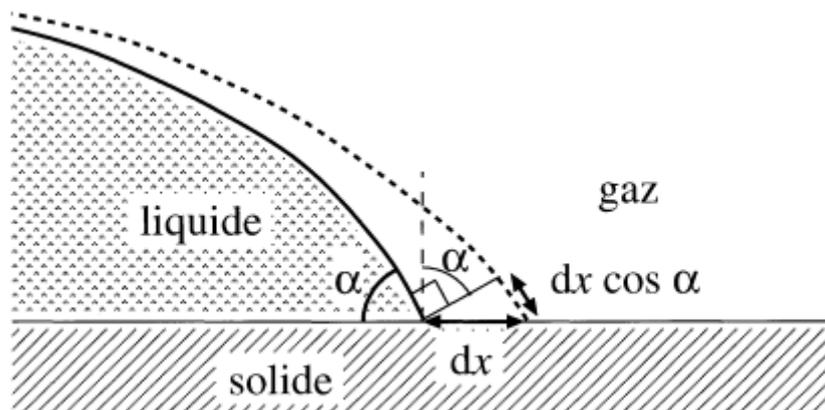


60. Source schéma : [3]

○ Comment prévoir la valeur de cet angle ? Grâce au lien que l'on va faire entre l'angle et les coefficients de tension superficielle.

## II.2 Loi de Young-Dupré

Le but de cette partie est de relier l'angle de contact aux coefficients de tension superficielle.



Calculons le travail à fournir pour faire un déplacement infinitésimal de longueur  $dx$  le long de la ligne triple. Le périmètre de la goutte augmente donc d'une longueur  $d\ell$ . Lors du déplacement, les aires varient<sup>61</sup> :

- Pour l'interface air-solide :  $d\mathcal{A}_{air/sol} = -dx d\ell$  (signe « - » car il y a une diminution de la surface de l'interface) ;
- Pour l'interface solide-liquide :  $d\mathcal{A}_{sol/liq} = +dx d\ell$  (signe « + » car il y a une augmentation de la surface de l'interface) ;
- Pour l'interface air-liquide :  $d\mathcal{A}_{air/liq} = +dx d\ell \cdot \cos \theta_c$  (signe « + » car il y a une augmentation de la surface de l'interface).

Les travaux pour faire varier les aires de la sorte sont les suivants :

- Pour l'interface air-solide :  $\delta W_{air/sol} = \gamma_{air/sol} \cdot d\mathcal{A}_{air/sol} = -\gamma_{air/sol} \cdot dx d\ell$  ;
- Pour l'interface solide-liquide :  $\delta W_{sol/liq} = \gamma_{sol/liq} \cdot d\mathcal{A}_{sol/liq} = +\gamma_{sol/liq} \cdot dx d\ell$  ;
- Pour l'interface air-liquide :  $\delta W_{air/liq} = \gamma_{air/liq} \cdot d\mathcal{A}_{air/liq} = +\gamma_{air/liq} \cdot dx d\ell \cdot \cos \theta_c$ .

Le force de tension superficielle est une force conservative. On a alors  $d\mathcal{E}_p = -\delta W(\vec{f})$ .

**A l'équilibre** :  $\boxed{d\mathcal{E}_{P_{\text{eq}}} = 0}$ . On a alors :

$$\delta W_{air/sol} + \delta W_{sol/liq} + \delta W_{air/liq} = 0$$

Ce qui, d'après ce qui précède, donne :

$$-\gamma_{air/sol} \cdot dx d\ell + \gamma_{sol/liq} \cdot dx d\ell + \gamma_{air/liq} \cdot dx d\ell \cdot \cos \theta_c = 0$$

61. Source Schéma : BUP n°851

### Conclusion

L'angle de contact  $\theta_c$  est donc donné par la relation de YOUNG-DUPRÉ suivante :

$$\cos \theta_c = \frac{\gamma_{air/sol} - \gamma_{sol/liq}}{\gamma_{air/liq}} \quad (91)$$

○ Voyons maintenant les effets recherchés ou fuis de ce phénomène, et comment cela est utilisé en recherche.

## III Traitement de surface

*Le but de cette partie est de voir des applications de ce qui a été vu par le biais de l'étude des surfaces. Cette partie peut servir de conclusion, sauf si il s'agit de l'élément imposé au quel cas il faut s'y consacrer pleinement.*

### III.1 Notion d'hydrophobie

#### Définition

Une **surface hydrophobe** est une surface sur laquelle le **mouillage est nul** ou **quasi-nul**, *ie.* une surface pour laquelle  $\theta_c > 150^\circ$ .

○ C'est le cas des feuilles de Lotus, dont nous allons voir l'interprétation microscopique.

### III.2 Interprétation de l'effet Lotus

On peut éventuellement parler des lois de WENZEL et de CASSIE-BAXTER qui décrivent l'angle de contact  $\theta_c$  pour certains matériaux.

#### Autre(s) possibilité(s) de plan

— On peut aussi intégrer la loi de JURIN dans cette leçon.

#### PROGRAMME OFFICIEL (PC - PHYSIQUE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Coefficient de tension superficielle.	Mesurer un coefficient de tension superficielle. Utiliser l'expression de l'énergie de tension superficielle pour interpréter un protocole expérimental.

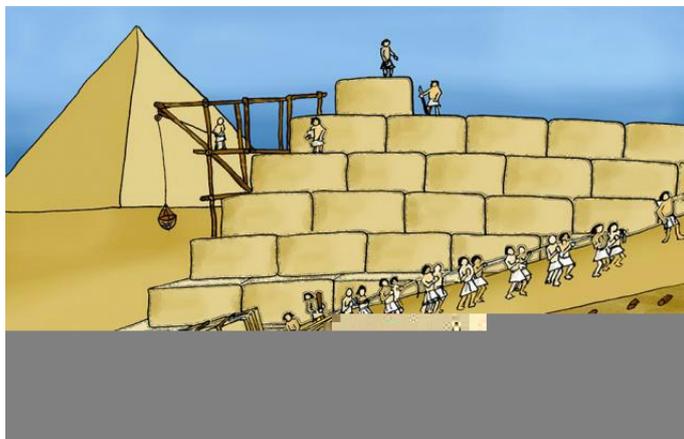
Élément imposé : Cycle de Carnot**Introduction pédagogique**

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (L1, PCSI, MPSI, ou BCPST2)
- Prérequis :
  - \* Description de systèmes thermodynamiques : échelles de descriptions, notion de système, modèle du gaz parfait ;
  - \* Premier principe de la thermodynamique : énergie interne, énergie totale, lois de JOULE, premier principe ;
  - \* Second principe de la thermodynamique : notion d'entropie, second principe, bilan entropiques.
- Séquence pédagogique : Cette leçon viendrait clôturer une séquence de thermodynamique. Il faut qu'elle vienne à la fin de cette séquence car on a besoin de connaître le premier et le second principe. Ce chapitre est donc une application des prérequis thermodynamiques.
- Difficultés :
  - \* La définition du système : on prend le fluide comme système ;
  - \* Notion d'efficacité, différente de celle de rendement ;
  - \* Faire le lien entre les étapes de la machine et la représentation dans le diagramme  $(p, V)$  et  $(T, S)$ .
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre le rôle des machines thermiques ;
  - \* Connaître le fonctionnement général des machines thermiques dithermes ;
  - \* Exploiter la définition de l'efficacité ou du rendement pour chaque type de machines.
- Sources utilisées :

- (1) SANZ, M-N., SALAMITO, B., *et coll.*, *Physique PCSI, tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019.
- (2) DE LA BAUME, F., *et coll.*, *Exos Résolus Prépa MPSI*, hachette éducation, 2015.

## Introduction

Avant, on avait des machines purement mécaniques, comme par exemples celles utilisées par les égyptiens pour construire leur pyramides !



### Expérience

Expérience du moteur de STIRLING, bol d'eau bouillante.

Ici, la différence est que l'on transforme une énergie thermique, délivrée par la chaleur de l'eau bouillante. On va étudier ce nouveau type de machine, les **machines thermiques**, à la lumière des cours précédents de thermodynamique.

---

*Comment utiliser les principes de la thermodynamique pour comprendre le fonctionnement des machines thermiques ?*

---

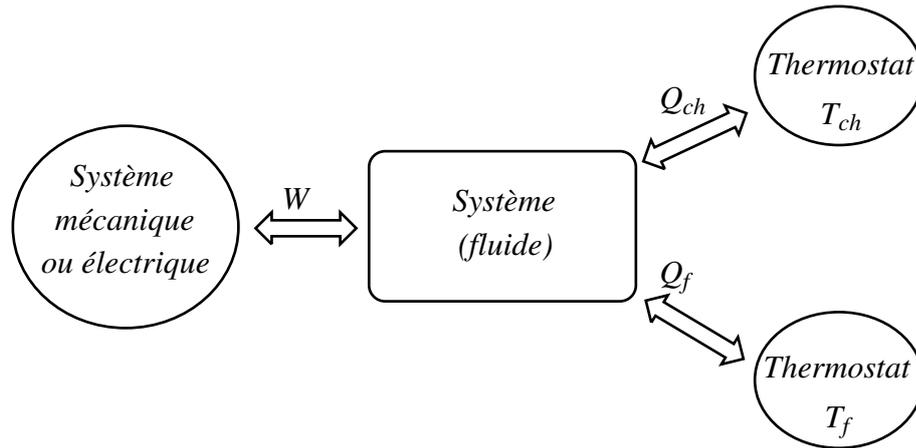
## I Transformation cyclique d'un système fermé

### I.1 Description du système

#### Définition

De manière générale, une **machine thermique** est un mécanisme dans lequel un système thermodynamique généralement constitué d'un fluide et qui échange du travail  $W$  et de la chaleur  $Q$  avec le milieu extérieur.

- On appelle **machine thermique ditherme** une machine thermique en contact avec deux thermostats (une source chaude à la température  $T_{ch}$  et une source froide à la température  $T_f$ ) :



C'est la machine thermique la plus rencontrée en pratique.

- On distingue alors deux grands types de machines thermiques, selon le signe de  $W$ .
  - Si le travail est **fourni**, *ie.* si  $W < 0$ , on dit que le cycle est **moteur**.
  - Si le travail est **reçu**, *ie.* si  $W > 0$ , on dit que le cycle est **récepteur**.

○ On peut relier les différentes grandeurs thermodynamiques. Pour cela, on va utiliser les principes de la thermodynamique.

## I.2 Bilans énergétiques et entropiques

- Dans tout ce qui suit, **on prend comme système le fluide** qui circule dans la machine thermique.

*Rapport de jury :* « Pour toute étude de machine thermique il est indispensable de préciser clairement le système étudié, de présenter des solutions pratiques couramment retenues et de mettre en évidence l'intérêt et les limites des modèles. »

C'est la machine thermique la plus rencontrée en pratique.

- Appliquons le premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta U_{\text{cycle}} = W + Q_{\text{ch}} + Q_{\text{f}} = 0 \text{ (cycle)}$$

On a donc une première relation :

$$\boxed{W = -(Q_{\text{ch}} + Q_{\text{f}})} \quad (92)$$

- Appliquons le second principe de la thermodynamique :

$$\Delta S_{\text{cycle}} = \underbrace{S_{\text{créé}}}_{\geq 0} + S_{\text{échangée}} = 0 \text{ (cycle)}$$

Or, on a un échange de chaleur avec deux sources, ce qui donne  $S_{\text{échangée}} = \frac{Q_{\text{ch}}}{T_{\text{ch}}} + \frac{Q_{\text{f}}}{T_{\text{f}}}$

### Conséquence (Inégalité de CLAUSIUS)

On a alors démontré l'inégalité de Clausius :

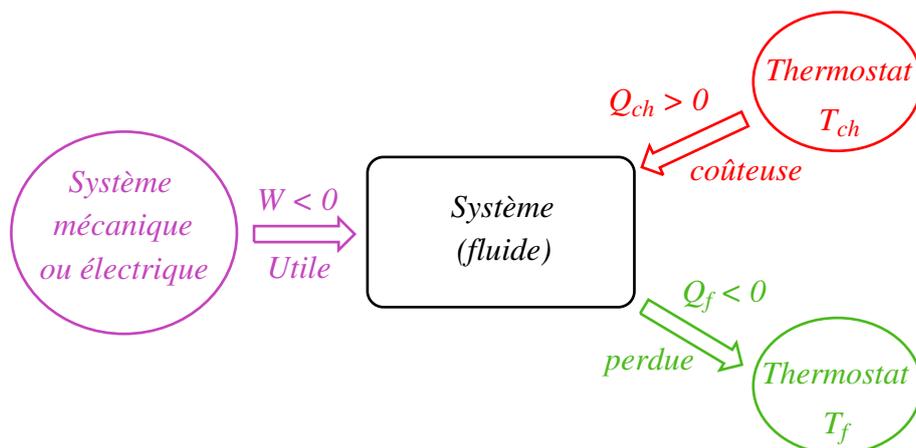
$$\frac{Q_{\text{ch}}}{T_{\text{ch}}} + \frac{Q_{\text{f}}}{T_{\text{f}}} \leq 0 \quad (93)$$

Dans le cas d'une transformation réversible, on a  $S_{\text{créé}} = 0$  donc  $\frac{Q_{\text{ch}}}{T_{\text{ch}}} + \frac{Q_{\text{f}}}{T_{\text{f}}} = 0$

○ À la lumière de ces relations, on va pouvoir étudier plus précisément les machines thermiques. On commence par les machines qui fournissent du travail.

## II Machines dithermes motrices

On se place donc dans le cas d'une machine thermique **en contact avec deux sources de chaleur** et pour laquelle **le travail est l'énergie utile**.



### II.1 Rendement du moteur ditherme

- Par définition, le rendement d'un motheur ditherme est donné par la relation :

$$\rho = \left| \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}} \right|$$

- Dans le cas du moteur, l'énergie utile est le travail fourni ( $W < 0$ ) et l'énergie coûteuse est l'énergie reçue provenant de la source chaude ( $Q_{\text{ch}} > 0$ ).
- Le rendement est donc exprimé comme suit :

$$\rho_{\text{moteur}} = \left| \frac{W}{Q_{\text{ch}}} \right| = -\frac{W}{Q_{\text{ch}}}$$

Or d'après le premier principe - la relation (92) - on a :

$$\rho_{\text{moteur}} = 1 + \frac{Q_{\text{f}}}{Q_{\text{ch}}}$$

On multiplie l'équation du second principe par  $\frac{T_f}{Q_{ch}}$ , ce qui nous permet d'exprimer le rendement en fonction de l'entropie créée <sup>62</sup> :

$$\rho_{\text{moteur}} = 1 - \frac{T_f}{T_{ch}} - \frac{T_f S_{\text{créée}}}{Q_{ch}}$$

○ On va étudier un cas idéal, et le confronter aux cas réels.

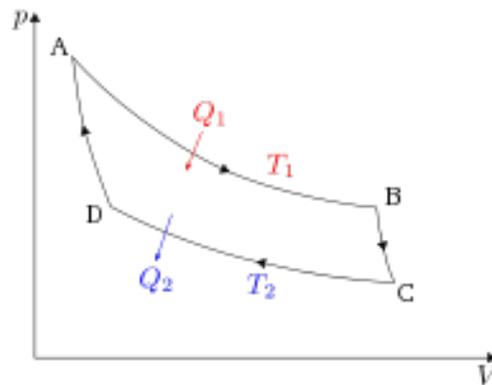
## b) Moteur de Carnot

- Le **moteur de Carnot** est un moteur réversible, c'est à dire que  $S_{\text{créée}} = 0$ . On a donc une efficacité maximisée. C'est le **théorème de Carnot**.

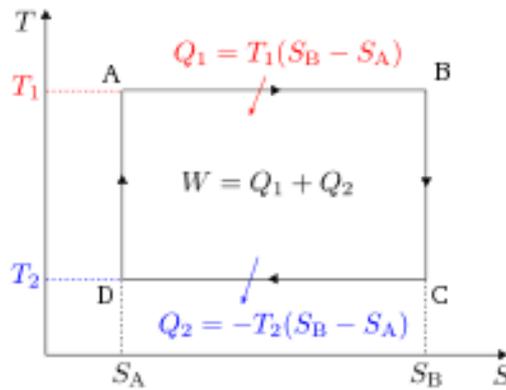
$$\rho_{\text{moteur}} = 1 - \frac{T_f}{T_{ch}} \quad (94)$$

Pour qu'il n'y ait aucune création d'entropie (*ie.* aucune irréversibilité), il faut que le **cycle de Carnot** vérifie :

- Les échanges de chaleurs doivent être effectués de manière quasi-statiques (successions d'états d'équilibre) et donc isothermes ;
- Les phases où le fluide change de température doivent se faire sans échange de chaleur (adiabatiques réversibles, *ie.* isentropiques) ;
- Toutes les transformations doivent être infiniment lentes pour qu'elles soient réversibles.
- En appliquant ces conditions, on trace le diagramme de CLAPEYRON ( $p, V$ ) et le diagramme ( $T, S$ ) :



62. [1], page 950

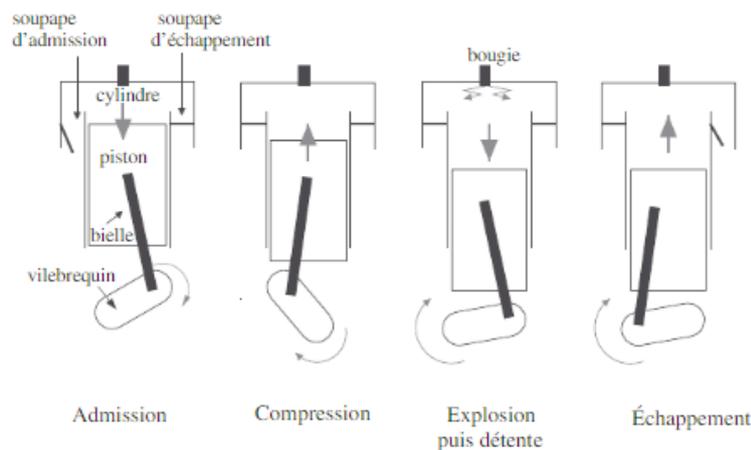


*Rapport de jury* : « Les diagrammes de CLAPEYRON et de WATT ne sont pas équivalents ! »

○ On va comparer cela aux "vrais" cycles.

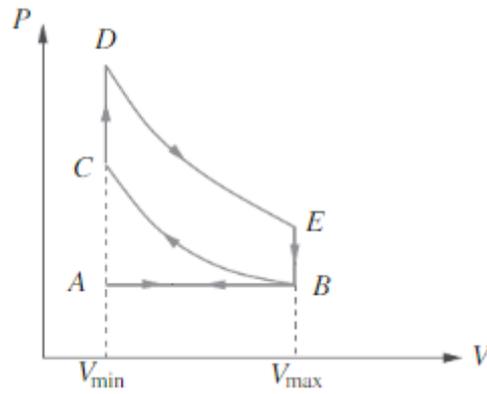
## II.2 Modélisation graphique du cycle

Dans cette partie, on va chercher à représenter l'évolution des grandeurs physiques au cours du cycle pour un moteur (réel cette fois!), le moteur à essence 4 temps<sup>63</sup>.



- L'évolution est la suivante (à projeter sur les slides! Mais tracer le diagramme en live) :
  - Transformation  $A \rightarrow B$  : admission ;
  - Transformation  $B \rightarrow C$  : compression adiabatique ;
  - Transformation  $C \rightarrow D$  : compression isochore ;
  - Transformation  $D \rightarrow E$  : détente adiabatique (avec production de travail utile) ;
  - Transformation  $E \rightarrow B$  : détente isochore.

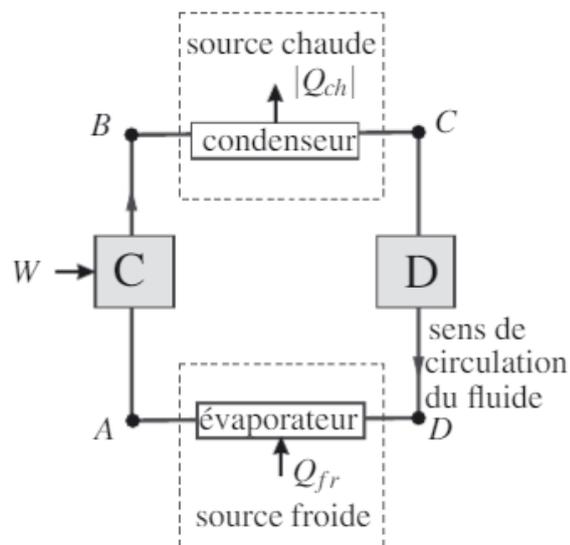
63. [1] page 959.



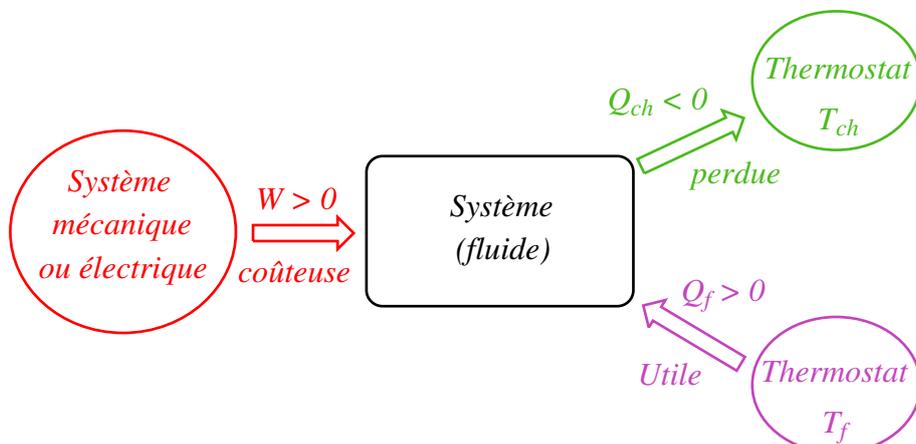
○ Et que se passe-t-il lorsque la machine reçoit du travail afin de fournir un transfert thermique utile ?

### III Machines dithermes réceptrices

On prend l'exemple du réfrigérateur.



La question à se poser est de savoir d'où vient l'énergie coûteuse et l'énergie utile.



### Expérience

Machine thermique, on remarque que la source froide est refroidie et la source chaude se réchauffe.

## III.1 Efficacité

### Définition

L'efficacité d'un récepteur ditherme est définie par :

$$e = \left| \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}} \right| \quad (95)$$

Dans le cas du réfrigérateur, l'énergie utile est le transfert thermique fourni  $Q_f > 0$ , de la machine vers la source froide, l'énergie coûteuse est le travail électrique reçu  $W > 0$ .

$$e = \left| \frac{Q_f}{W} \right| = \frac{Q_f}{W}$$

D'après la relation (92), on a alors :

$$e = -\frac{Q_f}{Q_{\text{ch}} + Q_f} = -\frac{1}{1 + \frac{Q_{\text{ch}}}{Q_f}}$$

○ On va là encore chercher quelle est l'efficacité maximale de cette machine thermique

## III.2 Efficacité de Carnot

La relation de CLAUSIUS donne  $\frac{Q_{\text{ch}}}{Q_f} \leq -\frac{T_{\text{ch}}}{T_f}$  donc on peut définir l'efficacité maximale :

$$e = -\frac{1}{1 + \frac{Q_{\text{ch}}}{Q_f}} \leq \frac{1}{\frac{T_{\text{ch}}}{T_f} - 1} = \frac{T_f}{T_{\text{ch}} - T_f}$$

### Conséquence

L'efficacité maximale du récepteur frigorifique ditherme correspond à un cycle réversible appelé **cycle de Carnot** et vaut :

$$e_{\text{max}} = \frac{T_f}{T_{\text{ch}} - T_f}$$

C'est le **théorème de Carnot**.

**Rapport de jury :** « Lors de l'étude des machines thermiques, il convient de s'interroger sur la notion d'efficacité. »

*Slides* Attention à ne pas confondre l'efficacité avec le rendement. Le rendement d'une machine ditherme réceptrice est défini par :

$$\rho_{\text{recepteur}} = \frac{e_{\text{recepteur}}}{e_{\text{max}}}$$

### Expérience

On fait l'application numérique de l'efficacité de CARNOT.

## Conclusion

- Similitude et différences entre les machines thermiques vues dans la leçon.
- Ouverture : sur les machines réelles, et l'efficacité réelle (accessible par l'expérience).
- Ouverture : sur la pompe à chaleur. L'expression de l'efficacité ne sera pas la même car l'énergie utile n'est plus le transfert thermique avec la source froide, mais celui avec la source chaude.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- Enlever (et mettre en pré-requis) la première partie qui est descriptive, et faire une troisième partie avec le premier principe industriel et le diagramme des frigoristes.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Fonctionnement concret du moteur présenté ;
- ☞ Pourquoi parler d'efficacité et pas de rendement ?
- ☞ Recevabilité du modèle de CARNOT.

#### PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - SECONDE ANNÉE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Machines thermiques.	<p>Appliquer le premier principe en système ouvert et en régime permanent à des éléments simples d'une machine thermique : échangeur thermique, compresseur, détenteur isenthalpique, mélangeur.</p> <p>Réaliser un bilan local sur un échangeur thermique monodimensionnel.</p> <p>Estimer à partir des différents éléments d'une machine pris séparément le travail utile et le transfert thermique en termes de puissances ou de grandeurs massiques.</p> <p>Établir le rendement ou l'efficacité d'une machine thermique.</p>

#### PROGRAMME OFFICIEL (PCSI - PHYSIQUE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Machines thermiques</b></p> <p>Application du premier principe et du deuxième principe aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.</p>	<p>Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.</p> <p>Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme.</p> <p>Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Justifier et utiliser le théorème de Carnot.</p> <p>Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles.</p>
<p>Exemples d'études de machines thermodynamiques réelles à l'aide de diagrammes (p,h).</p>	<p>Utiliser le 1er principe dans un écoulement stationnaire sous la forme <math>h_2 - h_1 = w_u + q</math>, pour étudier une machine thermique.</p>

Élément imposé : Analogies entre différents modes de transports**Introduction pédagogique**

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (BCPST2)
- Prérequis :
  - \* Électrocinétique : loi d'OHM macroscopique, résistance électrique en série et en parallèle ;
  - \* Thermodynamique : premier principe de la thermodynamique.
- Séquence pédagogique : Dans cette leçon, seuls les modes de transport par conduction seront abordés. Les modes de transport par convection seront vus ultérieurement dans une séquence de mécanique des fluides. Le choix est fait pour cette leçon de faire une analogie constante entre les modes de transport et non de les séparer au cours de la leçon.
- Difficultés :
  - \* Mathématiques : gradient ;
  - \* Variété des grandeurs transportées, en particulier l'énergie interne, qui n'est pas « visuelle ».
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre la cause d'un phénomène de transport ;
  - \* Comprendre l'analogie entre les phénomènes de conduction thermique et électrique ;
  - \* Connaître la notion de résistance thermique, et ses effets/applications.
- Sources utilisées :

- (1) CÔTE, I., VIDAL, A., *Physique-Chimie BCPST 2e année*, Dunod, J'assure aux concours, 2017.
- (2) ROUSSEL, J., *Transferts thermiques*, Femto Physique cours en ligne, <https://femto-physique.fr>.
- (3) JANNOT, Y., *Transferts thermiques*, cours en ligne, <http://www.thermique55.com/principal/thermique.pdf>.

## Introduction

- Lorsque l'on mesure la conductivité d'une solution en TP, on étudie un phénomène de conduction électrique, cela est dû à un transport de porteurs de charge ioniques. Lorsque l'on plonge une cuillère dans un café chaud, à partir d'un moment le bout non immergé de la cuillère devient chaud, cela est dû à un transport d'énergie thermique. Enfin lorsque l'on met un colorant dans l'eau (expérience en direct), on observe de la diffusion de particules (transport de matière). Ces phénomènes de transports sont issus d'un déséquilibre du système *ie.* d'une inhomogénéité spatiale d'une grandeur intensive : le potentiel, la température, la concentration...
- On distingue deux types de phénomènes de transport : le transport conductif (dans un milieu au repos macroscopique) et le transport convectif (avec mouvement macroscopique du milieu). Dans cette leçon, on étudiera les transports conductifs. On se limitera à des mouvement indépendant du temps.

---

*Comment modéliser le déplacement des charges dans un conducteur ? Comment modéliser l'évolution de la température dans un métal qui touche une surface chaude par une extrémité ?*

---

## I Description du phénomène de transport

### I.1 Notion de flux

- Dans le cas du transport de charges ou de la conduction thermique, on peut définir des flux. Ce sont en quelques sortes des débits, c'est-à-dire une quantité de la grandeur transportée à travers une surface  $S$  par unité de temps.
- Conduction électrique :

#### Définition

Soit une surface orientée  $\vec{S}$ .

L'**intensité du courant**  $I$  à travers  $\vec{S}$  est la **charge qui traverse cette surface par unité de temps** (homogène à un « débit » de charge) :

$$I = \frac{\delta q}{dt} \quad (96)$$

$I$  est en  $C \cdot s^{-1} = A$

- Conduction thermique :

### Définition

Soit une surface orientée  $\vec{S}$ .

Le **flux thermique**  $\Phi_{th}$  est la **quantité d'énergie** qui traverse cette surface par unité de temps. Un flux thermique est homogène à une puissance (on l'appelle parfois puissance thermique) :

$$\Phi_{th} = \frac{\delta Q}{dt} \quad (97)$$

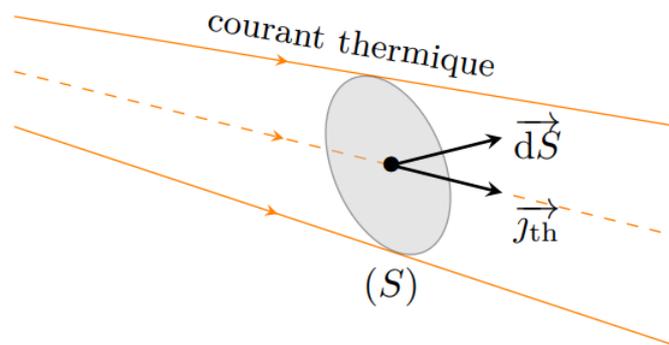
$\Phi_{th}$  s'exprime en W

○ Qu'est-ce qui provoque un déplacement de charge ou d'énergie ?

## I.2 Cause de création du flux

- À quoi est dû ce flux de charge ou flux thermique? Pour que les charges se mettent en mouvement, il faut une inhomogénéité de potentiel. Pour la conduction thermique, il s'agit d'une inhomogénéité de température. Ainsi, lorsque la température ou le potentiel sont inhomogènes, il se crée un gradient de cette grandeur.

On peut alors définir une **densité de courant** qui est un flux par unité de surface dans les deux cas.



- Conduction électrique :

### Définition

On appelle **vecteur densité volumique de courant** le vecteur tel que le flux de  $\vec{j}_e(M)$  à travers une surface corresponde à l'intensité de courant :

$$I(S) = \iint_S \vec{j}_e(M, t) \cdot \vec{dS}(M) \quad (98)$$

La norme de  $\vec{j}_e(M, t)$  s'exprime en  $A \cdot m^{-2}$ .

- Conduction thermique :

### Définition

On appelle **vecteur densité de flux thermique** le vecteur  $\vec{j}_{th}(M, t)$  tel que le flux de  $\vec{j}_{th}(M, t)$  à travers une surface corresponde au flux thermique à travers cette surface :

$$\Phi_{th} = \iint_S \vec{j}_{th}(M, t) \cdot \vec{dS}(M) \quad (99)$$

La norme de  $\vec{j}_{th}(M, t)$  s'exprime en  $W \cdot m^{-2}$ .

- Expérimentalement, on constate que ces vecteurs densité de courant sont reliés aux gradients d'inhomogénéité. Des lois **phénoménologiques** en ont été déduites :

Conduction électrique	Conduction thermique
Loi d'OHM locale	Loi de FOURIER
$\vec{j}_e(M, t) = -\gamma \vec{\text{grad}}V$	$\vec{j}_{th}(M, t) = -\lambda \vec{\text{grad}}T$
$\gamma$ : conductivité électrique	$\lambda$ : conductivité thermique
$[\gamma] = A \cdot V^{-1} \cdot m^{-1}$	$[\lambda] = W \cdot V^{-1} \cdot m^{-1}$

- Deux analyses dimensionnelles rapides pour montrer que  $[\gamma] = A \cdot V^{-1} \cdot m^{-1}$  et  $[\lambda] = W \cdot V^{-1} \cdot m^{-1}$ .

### Remarque

Oui,  $\vec{j}_e(M, t) = -\gamma \vec{\text{grad}}V$  est bien la loi d'OHM. On va voir plus tard le lien avec la loi d'OHM que l'on connaît déjà, à savoir  $U = R \cdot I$ .

○ Maintenant qu'on sait exprimer les flux en fonction de la grandeur inhomogène, on va pouvoir mettre en équation le transport.

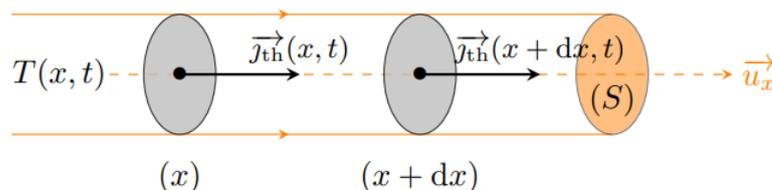
## II Bilan au sein d'un système siège d'un transport

*Le but de cette partie est d'établir les équations de conservation. Attention, cela n'est pas au programme des CPGE BCPST.*

### II.1 Bilans

*Le but de cette sous-partie est d'établir des bilans, pour en déduire des équations de conservation. On détaille bien le raisonnement, le système, et le bilan, avec schéma faits au tableau.*

- On effectue un bilan d'énergie interne sur une portion située entre  $x$  et  $x + dx$  d'un cylindre de section  $S$  :



Un bilan d'énergie interne n'est autre qu'un premier principe de la thermodynamique :  $dU = \delta W + \delta Q = \delta Q$  en considérant qu'il n'y a aucun travail.

$$dU = \delta Q = \delta Q_{\text{entrant en } x} - \delta Q_{\text{sortant en } x + dx} = (\Phi_{th}(x) - \Phi_{th}(x + dx)) dt$$

Ce qui peut donc s'écrire :

$$\boxed{\frac{dU}{dt} = \Phi_{th}(x) - \Phi_{th}(x + dx)} \quad (100)$$

- On fait la même chose, mais cette fois un bilan de **charges** sur une portion située entre  $x$  et  $x + dx$  d'un cylindre de section  $S$  de conducteur ohmique :

$$dq = \delta q_{\text{entrant en } x} - \delta q_{\text{sortant en } x + dx} = (I(x) - I(x + dx)) dt$$

Ce qui peut donc s'écrire :

$$\boxed{\frac{dq}{dt} = I(x) - I(x + dx)} \quad (101)$$

⊙ Ces relations sont difficilement exploitables en l'état actuel des choses. On va simplifier cela en considérant que le régime permanent est atteint, et qu'au cours du temps, les grandeurs ne varient plus.

## II.2 Cas du régime permanent

Le but de cette sous-partie est d'expliquer la simplification due au régime permanent, qui permet une résolution de la conservation des flux.

- En régime permanent, les grandeurs ne dépendent plus du temps. On a donc, pour nos deux cas,  $\frac{dU}{dt} = 0$  et  $\frac{dq}{dt} = 0$ .
- La conséquence est la conservation des flux :
  - Conduction électrique :  $I(x) = I(x + dx) = I_0$
  - Conduction thermique :  $\Phi_{th}(x) = \Phi_{th}(x + dx) = \Phi_0$
- Grâce aux lois phénoménologiques, on peut exprimer dans le cas unidimensionnel :
  - Conduction électrique :  $\boxed{I_0 = -\gamma \frac{dV}{dx} S}$
  - Conduction thermique :  $\boxed{\Phi_0 = -\lambda \frac{dT}{dx} S}$

### Important

Attention, les dérivées  $\frac{dV}{dx}$  et  $\frac{dT}{dx}$  sont des constantes, malgré la manière dont elles sont écrites, qui peut porter à confusion <sup>a</sup>.

a. Cela se démontre par l'équation de la chaleur en régime stationnaire.

○ Comment retrouver la loi d'OHM globale, celle que l'on connaît ?

## III Notion de résistance

Dans ces parties, le maître-mot est **analogies**. Il s'agit de faire comprendre que les notions connues peuvent s'appliquer à d'autres domaines de la physique. Il faut le « faire sentir » !

### III.1 Résistance électrique

Dans cette sous-partie, on reporte la notion de résistance électrique vue par la loi d'OHM au collège/lycée sur un raisonnement microscopique grâce aux nouvelles lois vues ici.

- On se place dans le cas d'un conducteur ohmique cylindrique. On suppose la loi d'OHM locale vérifiée, transposée à une dimension :

$$\boxed{\vec{j}_e = -\gamma \overrightarrow{\text{grad}} V \iff j_x = -\gamma \frac{(V_s - V_e)}{L}} \quad (102)$$

Avec  $L$  la longueur de la portion du cylindre,  $V_e$  et  $V_s$  respectivement les potentiels à l'entrée et la sortie du cylindre de longueur  $L$ . En remarquant par ailleurs que  $j_e = I \times S$ , on a :

$$\boxed{U = \frac{L}{\gamma S} I} \quad (103)$$

Par identification, on remarque donc qu'on a une résistance électrique s'exprimant comme

$$\boxed{R = \frac{L}{\gamma S}}$$

### Expérience

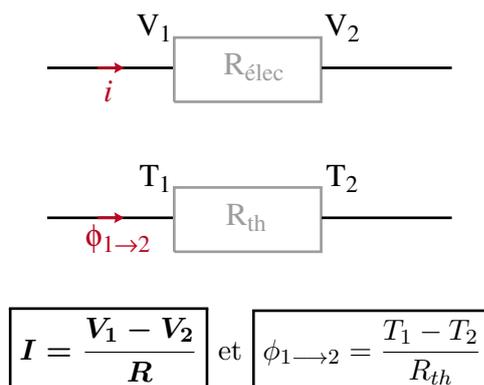
On peut vérifier ce résultat par l'expérience grâce à une barre de métal de section  $S$  connue et de longueur  $L$  connue.

○ Il est possible de pousser l'analogie entre l'électrocinétique et la thermique jusqu'à la résistance.

### III.2 Résistance thermique

*Le but de cette sous-partie est de raisonner par analogie et de proposer une expression de la résistance thermique. Physiquement, il faut « faire sentir » cette notion : c'est bien la capacité d'un matériaux à ne pas laisser passer l'énergie thermique.*

- On fait l'analogie entre le courant électrique et le flux thermique :



- Dans le cas de la **conduction d'un conducteur cylindrique** :

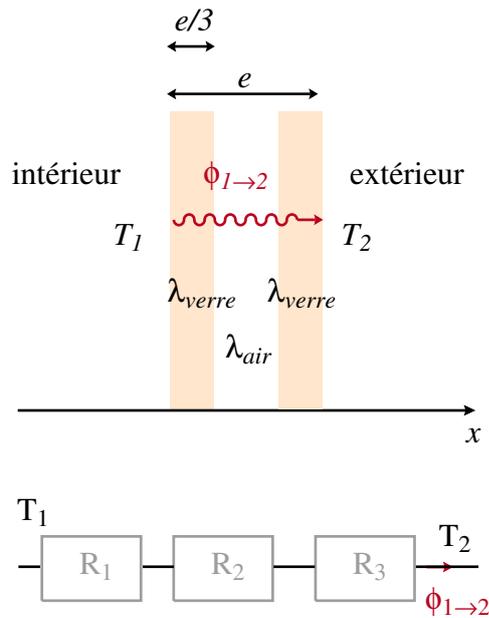
$$\boxed{R_{th} = \frac{e}{\lambda S}} \quad (104)$$

○ On peut appliquer ceci aux économies d'énergie.

### III.3 \*Double vitrage

*Cette partie tiroir permet une application chiffrée de la notion de résistance thermique. Application parlante dans la mesure où tous les étudiants ont déjà entendu parler du double vitrage.*

- Prise en compte de la conduction uniquement :



La résistance thermique totale  $R_{th,tot}$  s'écrit :

$$R_{th,tot} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{2\frac{e}{3}}{S\lambda_{verre}} + \frac{\frac{e}{3}}{S\lambda_{air}}$$

Pour comparer l'efficacité des résistances thermiques, on en fait le rapport :

$$\frac{R_{th,tot}}{R_{th}} = \frac{2}{3} + \frac{\lambda_{verre}}{3\lambda_{air}} \approx 30$$

Conclusion : Avec cette méthode, le double vitrage est 30 fois plus efficace que le simple vitrage

## Conclusion

- Réponse à la problématique : deux phénomènes similaires, qui se traitent de la même manière...
- Ouverture : autres phénomènes de transport, comme la convection qui mérite d'être prise en compte pour le calcul du double vitrage.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- Commencer par faire l'étude de la diffusion thermique, basées sur les connaissances en diffusion de particules. Procéder ensuite à la conduction électrique en analogie avec les deux autres.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Questions sur la conducto-convection qui doit être prise en compte pour affiner le calcul du double vitrage. Cf. loi de NEWTON :

$$\delta Q = (T_s - T_f) dSdt$$

- ☞ La conduction électrique n'est pas de la diffusion de charge ;
- ☞ Établissement de la loi d'OHM locale via le modèle de DRÜDE pour les électrons (approche statistique du déplacement d'électrons dans une mer de charge positives, représentés comme des obstacles et qui donnent lieu à des chocs modélisés par une force de frottements fluides) ;
- ☞ Équation de diffusion non présentée ici (équation de la chaleur) mais il peut y avoir des questions s'y rapportant ;
- ☞ Bon conducteur électrique implique bon conducteur thermique, réciproque fausse ;
- ☞ Différence entre phénomène de transport et phénomène de diffusion : transport plus grande discussion sur les flux, au final on n'a pas toujours une équation de diffusion, juste un flux qui engendre un transport d'une grandeur.

#### PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - SECONDE ANNÉE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Flux d'une grandeur extensive</b> Vecteur densité de courant (ou densité de flux). Flux.	Utiliser les expressions des surfaces usuelles (cylindre, disque, sphère). Choisir, en fonction de la symétrie du transport, la surface appropriée à la détermination d'un flux. Exprimer le flux dans le cas de symétries simples (axiales, radiales cylindrique et sphérique).
<b>Conduction électrique</b> Conduction électrique. Loi d'Ohm locale. Résistance électrique.	Exprimer la résistance électrique d'un conducteur dans le cas d'un transport de vecteur densité de courant uniforme.
<b>Conduction thermique</b> Conduction thermique. Résistance thermique.  Loi de FOURIER.  Diffusivité thermique	Réaliser une analogie entre la conduction électrique et la conduction thermique. Interpréter une association de résistances thermiques. Établir, dans le cas d'un transport unidirectionnel, un bilan local d'énergie, avec source volumique ou avec échange à travers la paroi. Exprimer le temps caractéristique d'un régime transitoire par analyse dimensionnelle. Établir un bilan global d'énergie dans le cas d'un transport radial cylindrique ou sphérique en régime permanent. Exprimer le champ de température en régime permanent, après avoir proposé des critères plausibles de continuité ou de non divergence.

Élément imposé : Application du filtrage à la réduction du bruit de mesure**Introduction pédagogique**

- Niveau : L1 (PCSI, MPSI) ou BCPST2
- Prérequis :
  - \* Électrocinétique (tension, intensité, loi d'OHM, lois constitutives des dipôles, ...), circuits du premier et du second ordre ;
  - \* Régime sinusoïdal (notion d'impédance, impédance des dipôles usuels) ;
  - \* Spectre et transformée de FOURIER (notion de spectre en fréquence, savoir qu'un signal périodique se décompose en somme de sinusoïdes) ;
  - \* Prérequis mathématiques : utilisation des notations complexes (modules, arguments), diagrammes de BODE.
- Séquence pédagogique : Leçon placée à la fin d'une séquence sur l'électrocinétique, pour avoir fait avant tout ce qui concerne le régime sinusoïdal forcé. Leçon qui pourrait être prolongée grâce à des séances de travaux pratiques pour mettre en œuvre la démarche apprise ici, appliquée à d'autres types de filtre. L'aspect mathématique ne sera pas beaucoup approfondie ici, en supposant que les étudiants sont parfaitement à l'aise avec la manipulation des nombres complexes.
- Difficultés
  - \* Utilisation de la notation complexe en électrocinétique ;
  - \* Difficulté de manipulation des diagrammes de BODE ;
  - \* Beaucoup de nouvelles notions.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Connaître la notion de filtre et savoir reconnaître la nature d'un filtre grâce à une étude asymptotique ;
  - \* Savoir tracer les diagrammes de BODE en gain et en phase d'un filtre.
- Sources utilisées :

- (1) SANZ, M-N., SALAMITO, B., *et coll.*, *Physique PCSI, tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019.
- (2) BAUDE, S., GRECIAS, P., *Performance concours - Physique ; 2e année BCPST - véto*, Lavoisier, 2014.
- (3) DECOUT, D., *Électrocinétique et filtres*, cours en ligne, <https://decout.org>.

## Introduction

Si l'on veut écouter la radio, on ne veut pas capter toutes les fréquences. Pour en sélectionner une en particulier, on utilise la notion de **filtrage** de fréquence.

### Expérience

Enregistrement du spectre sonore du diapason, avec le matériel suivant :

- Un diapason ;
- Une carte d'acquisition LatisPro ;
- Un ordi sur lequel est installé LatisPro ;
- Un micro.

On enregistre le son du diapason pour deux situations : le son pur et le son "pollué" par exemple en parlant pendant l'enregistrement. On a alors une fréquence en plus, qui se trouve dans le domaine du kHz.

---

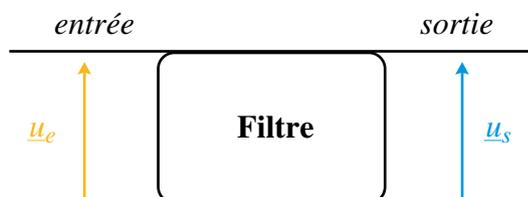
*Comment faire pour n'obtenir qu'une certaine plage de fréquences qui nous intéresse sans l'endommager ?*

---

## I Notion de filtre

*Cette partie est à la fois descriptive et mathématique. Après avoir décrit la nécessité d'établir des filtres en introduction, on en explique le principe dans cette partie. Il faut garder en tête que les notions sont difficile à amener du fait de l'utilisation des nombres complexes.*

- On peut représenter un filtre par le schéma suivant (à faire succinctement au tableau) :



### Définition

Un **filtre** est un système dont le signal de sortie (réponse) est différent du signal d'entrée (excitation).

- Les tensions d'entrée et de sortie sinusoïdales sont notées respectivement  $\underline{u}_e$  et  $\underline{u}_s$ , d'expression :

$$\underline{u}_e = E \times e^{j\phi} \times e^{j\omega t} = \underline{E}e^{j\omega t}$$

$$\underline{u}_s = S \times e^{j\phi} \times e^{j\omega t} = \underline{S}e^{j\omega t}$$

## I.1 Fonction de transfert

*On introduit les notions de fonction de transfert, de gain, et de phase d'un filtre dans cette sous-partie.*

- On définit la fonction de transfert  $\underline{H}(\omega)$  d'un filtre par :

$$\underline{H}(\omega) = \frac{\underline{u}_s}{\underline{u}_e}$$

- On définit le gain du filtre comme le module de la fonction de transfert :

$$G(\omega) = |\underline{H}(\omega)|$$

- On définit la phase du filtre comme l'argument de la fonction de transfert :

$$\varphi(\omega) = \arg \underline{H}(\omega)$$

○ Selon l'expression de la fonction de transfert, l'effet du filtre n'est pas le même. Pour cela, on classe les filtres en plusieurs catégories.

## I.2 Types de filtres

*Partie un peu « catalogue », qui permet de montrer la puissance et la diversité de ces dispositifs électroniques !*

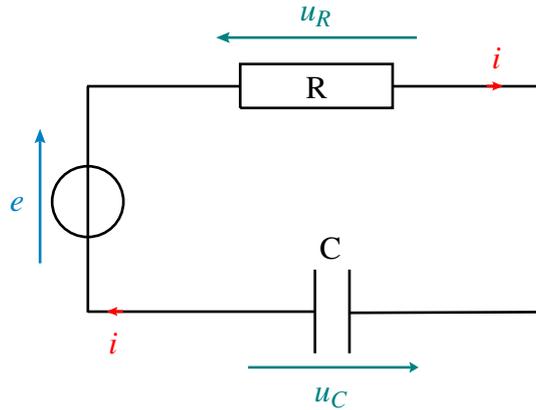
Projection de différents filtres (gain résultant de différents filtres) au vidéo-projecteur.

○ Le filtre dont nous avons besoin est un filtre qui nous laisse passer les basses fréquences et qui bloque les hautes fréquences.

## II Filtres du premier ordre

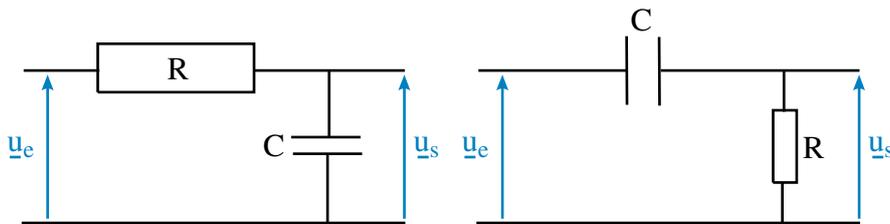
*On se focalise dans cette partie sur les filtre du premier ordre.*

On a vu dans une précédente leçon sur les régimes transitoires, que les circuits du premier ordre étaient des systèmes régis par une équation différentielle du premier ordre. Par exemple, on sait que le circuit RC est un circuit du premier ordre.



## II.1 Comportement haute et basse fréquence

*L'objectif de cette sous-partie est de savoir aux bornes de quel dipôle on doit prendre la tension pour avoir un filtre passe-bas.*



- On peut commencer à faire l'étude du filtre à haute et basse fréquence.
  - Rappel (*slides*) : A basses fréquences, le condensateur se comporte comme un interrupteur ouvert, alors qu'à hautes fréquences, il se comporte comme un fil.
  - On fait alors les schémas équivalents dans chaque cas :

<b>Circuit</b>		
<b>Tension de sortie</b>	$u_s = u_c$	$u_s = u_R = R \cdot i$
<b>Eq. haute fréquence</b>		
<b>Eq. basse fréquence</b>		
<b>Type de filtre</b>	Passe-bas	Passe-haut

- On choisi alors de prendre comme tension de sortie la tension aux bornes du condensateur.
- D'après la relation du pont diviseur de tension :

$$\underline{u}_s = \underline{u}_e \times \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_R + \underline{Z}_C} = \underline{u}_e \times \frac{\frac{1}{jC\omega}}{R + \frac{1}{jC\omega}} = \underline{u}_e \times \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

- Par définition de la fonction de transfert, on a dans notre cas :

$$\boxed{H(\omega) = \frac{1}{1 + jRC\omega}} \quad (105)$$

- On a alors, pour ce filtre, le gain suivant :

$$G(\omega) = \frac{1}{|1 + jRC\omega|} = \frac{1}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}}$$

- Et la phase s'écrit :

$$\varphi(\omega) = \arg(H(\omega)) = -\arctan RC\omega$$

○ On va maintenant voir une nouvelle caractéristique, qui est déterminante pour les stations radio que l'on souhaite écouter.

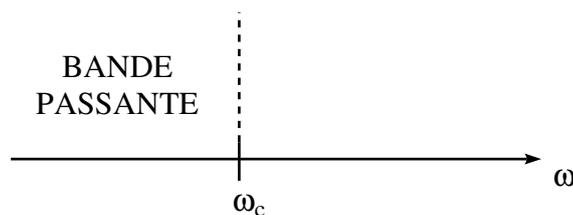
## II.2 Pulsation de coupure

L'objectif de cette sous-partie est de définir la pulsation de coupure, et en expliquer le rôle.

### Définition

On appelle **pulsation de coupure**  $\omega_c$  la valeur de pulsation pour laquelle

$$\boxed{G(\omega_c) = \frac{G_{\max}}{\sqrt{2}}}$$



- Cherchons sa valeur dans le cas de notre filtre. On voit que la fonction  $G$  est maximale lorsque son dénominateur est minimum donc vaut 1. Finalement,  $\boxed{G_{\max} = 1}$ . On cherche donc  $\omega_c$  telle que  $\sqrt{1 + (RC\omega_c)^2} = \sqrt{2}$ . On a donc l'expression suivante pour la pulsation de coupure :

$$\boxed{\omega_c = 2\pi f_c = \frac{1}{RC}} \quad (106)$$

- L'expression de  $\omega_c$  nous montre que le choix des composants est primordial : en fonction des valeurs de résistance et de capacité, on change la fréquence à partir de laquelle on filtre.

- Application numérique : Pour une valeur de capacité  $C = 50 \text{ nF}$ , et une résistance  $R = 300 \text{ k}\Omega$ , on obtient une fréquence de coupure de  $f_c = 10,6 \text{ Hz}$ .

### Expérience

Adapter la pulsation de coupure de telle sorte à "couper" le bruit.

○ Chaque filtre doit filtrer un domaine de fréquence qui lui est propre. On dispose d'outils qui permettent de représenter le gain pour visualiser le rôle du filtre.

## III Diagramme de Bode

Dans cette partie, on trace pas-à-pas le diagramme de BODE du filtre.

### III.1 Gain en décibel

Dans cette sous-partie de définition, on s'aide de ce qu'on a vu à la partie précédente.

Le gain en décibel est défini par :

$$G_{dB} = 20 \log G(\omega)$$

Calcul :

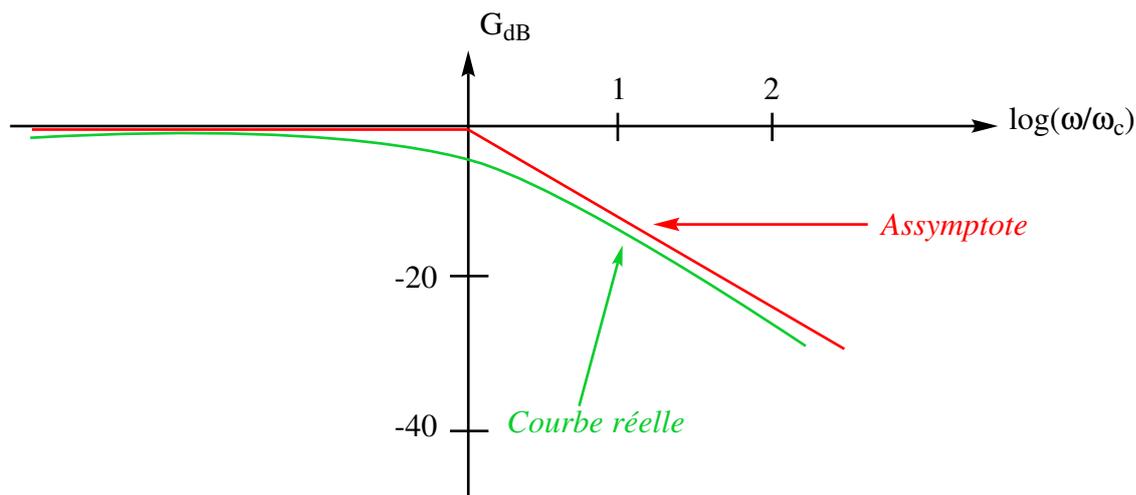
$$G_{dB} = 20 \log \left( \frac{1}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}} \right) = 20 \log \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}} \right) = -10 \log \left( 1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 \right)$$

○ Il ne reste plus qu'à étudier le comportement du filtre et de le représenter en échelle log.

### III.2 Tracé du diagramme de Bode en gain

Dans cette sous-partie, on fait des études asymptotiques (compétences importantes, il faut insister dessus pour le jury) et on déduit le tracé du diagramme de BODE.

- On fait l'analyse asymptotique du gain :
  - En hautes fréquences ( $\omega \gg \omega_c$ ) :  $G_{dB} \approx -10 \log \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 \approx -20 \log \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$ . Il s'agit donc d'une **asymptote de pente -20 dB par décade**.
  - En basses fréquences ( $\omega \ll \omega_c$ ) :  $G_{dB} \approx -10 \log 1 = 0$ . Il s'agit donc d'une **asymptote horizontale d'ordonnée  $G_{dB} = 0$** .
  - Tracé du diagramme de BODE en gain (au tableau) :

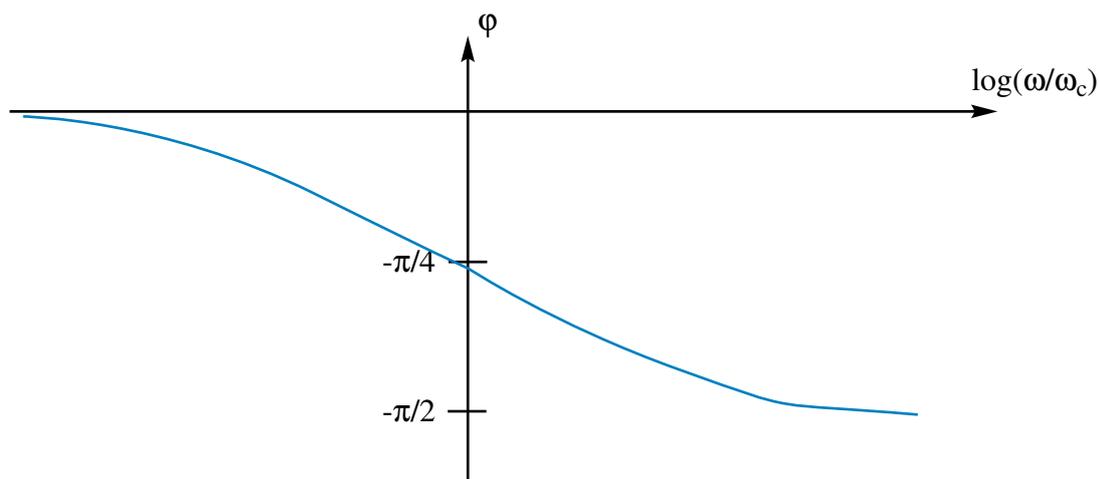


- Mise en évidence de la bande passante à -3 dB. Prenons une valeur de  $\omega$  telle que  $G(\omega) \geq \frac{G_{\max}}{\sqrt{2}}$ . On a alors  $G_{\text{dB}} \geq 20 \log \frac{G_{\max}}{\sqrt{2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} \approx -3 \text{ dB}$ .
- Mise en évidence graphique.

○ On fait exactement la même démarche, mais pour la phase cette fois.

### III.3 Tracé du diagramme de Bode en phase

- On fait l'analyse asymptotique de la phase du filtre :
  - En hautes fréquences ( $\omega \gg \omega_c$ ) :  $\varphi(\omega) \approx -\frac{\pi}{2}$ . Il s'agit d'une **asymptote horizontale d'ordonnée  $-\frac{\pi}{2}$** .
  - En basses fréquences ( $\omega \ll \omega_c$ ) :  $\varphi(\omega) \approx 0$ . Il s'agit d'une **asymptote horizontale d'ordonnée 0**.



### Conclusion

- Ouverture : filtres du second ordre ;

- Ouverture : Le filtrage optique <sup>64</sup>.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

On peut évidemment traiter l'ordre 2. Ainsi, la première partie ne serait pas vraiment adaptée.

### Remarque

- Attention à bien noter un signe " $\approx$ " et non " $=$ " pour les asymptotes.
- Éviter de faire ordre 1 + ordre 2, parce que déjà, seulement ordre 1, c'est long !

#### PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - SECONDE ANNÉE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Filtres.	Identifier la nature d'un filtre passe-bas, passe-haut ou passe-bande à partir d'une fonction de transfert donnée. <b>Mesurer le facteur d'amplification d'un filtre et le déphasage entre les signaux d'entrée et de sortie.</b>

#### PROGRAMME OFFICIEL (PCSI - PHYSIQUE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Fonction de transfert harmonique. Diagramme de Bode.	Utiliser une fonction de transfert donnée d'ordre 1 ou 2 et ses représentations graphiques pour conduire l'étude de la réponse d'un système linéaire à une excitation sinusoïdale, à une somme finie d'excitations sinusoïdales, à un signal périodique. <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental illustrant l'utilité des fonctions de transfert pour un système linéaire à un ou plusieurs étages.</b> Utiliser les échelles logarithmiques et interpréter les zones rectilignes des diagrammes de Bode d'après l'expression de la fonction de transfert.

64. SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, tout-en-un, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019., page 865

Élément imposé : Écoulement de Poiseuille**Introduction pédagogique**

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (L2, BCPST 2)
- Prérequis :
  - \* Mécanique du point (force de frottements fluides déjà vue sous forme  $\vec{f}_f = -\lambda \cdot \vec{v}$ ).
  - \* Écoulement des fluides parfaits ;
  - \* Diffusion des particules.
- Séquence pédagogique : Cette leçon arriverait après la première partie du cours sur la mécanique des fluides notamment après avoir vu l'écoulement de fluides parfait, avec notamment l'équation de BERNOULLI. On introduit alors la notion de viscosité pour la première fois ici. On ne parle pas de l'équation de NAVIER-STOCKES, conformément à l'approche proposée par le programme des CPGE BCPST.
- Difficultés :
  - \* Nouveau cadre pour la mécanique des fluides : les élèves ont peut-être compris précédemment que tous les fluides sont considérés parfait, ce qu'il faut déconstruire ici ;
  - \* Interprétation microscopique de la viscosité ;
  - \* Différents profils de vitesse (difficiles à visualiser déjà), ne pas les confondre.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre les effets de la viscosité sur un écoulement ;
  - \* Connaître les profils de vitesse d'écoulement de fluides visqueux.
- Sources utilisées :

- (1) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, tout-en-un, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.
- (2) CÔTE, I., VIDAL, A., *Physique-Chimie BCPST 2e année*, Dunod, J'assure aux concours, 2017.
- (3) ANTZOULATOS, V., *Cours en ligne formulation*.

## Introduction

### Expérience

Manipulation qualitative : remplir une burette d'eau, et une burette d'huile ou autre fluide visqueux. Constater que l'une des deux se vide avant l'autre.

Dans le langage courant, on connaît la viscosité. Cela nous paraît intuitif que la burette d'eau se vide avant la burette d'huile.

On a vu que dans une précédente leçon que le sang qui s'écoule dans l'aorte pouvait être considéré comme un écoulement parfait. Mais est-ce le cas pour tous les écoulement de sang dans le corps humain ?

---

*Qu'est-ce que la viscosité, et comment la prendre en compte pour caractériser un écoulement ?*

---

## I Notion de viscosité

*Cette partie consiste en la mise en évidence par l'expérience et en la définition scientifique de la viscosité d'un fluide.*

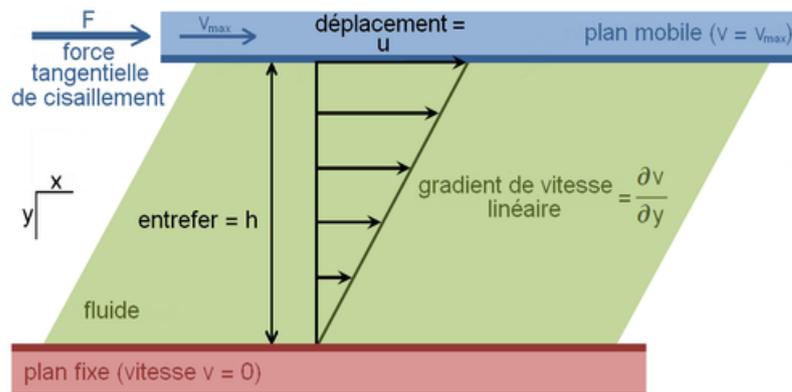
### I.1 Mise en évidence expérimentale

*Sous-partie largement expérimentale, on mets en évidence une grandeur qui « empêche » l'écoulement d'un fluide.*

### Expérience

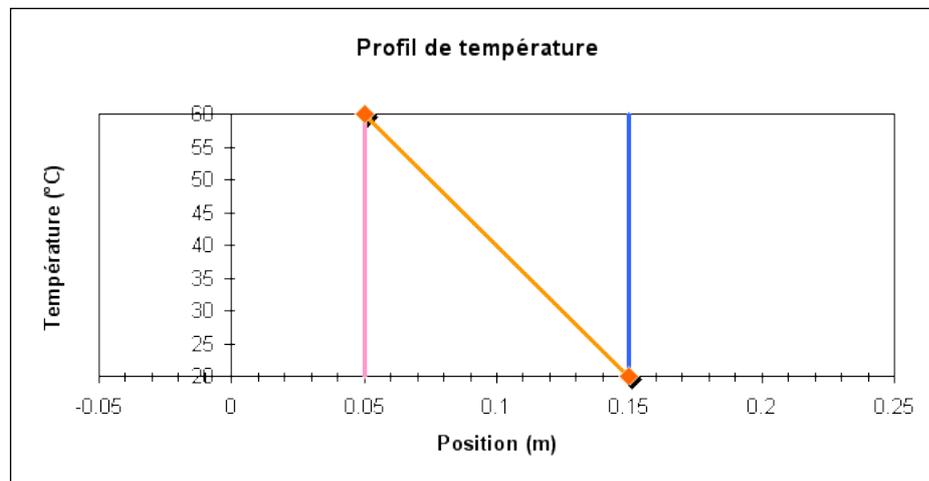
Écoulement de COUETTE-plan. On fait bouger la paroi de la conduite. On observe alors le profil de vitesse, grâce au colorant.

- La plaque inférieure est maintenue fixe, la plaque supérieure est déplacée à une vitesse constante  $\vec{V}_0$  suivant une direction constante  $Ox$ . On observe un profil de vitesse linéaire suivant la direction  $y$ .



Visiblement, les particules de fluides proches de la paroi mobile se déplacent à une vitesse proche de celle de la paroi. En revanche, les particules de fluide proche de la paroi immobile ont une vitesse nulle ou presque.

- On peut faire une analogie avec la conduction thermique :



- C'est la viscosité qui est à l'origine de ce profil de vitesse particulier.

## I.2 Notion de viscosité dynamique

*Il s'agit là de rentrer légèrement davantage dans le détail. On fait la différence entre les viscosités cinématique et dynamique.*

- Imaginons que l'on découpe le fluide en tranches de très faible largeur.



- Les couches de fortes vitesses entraînent celles de faible vitesse donc il y a des frottements entre les couches fluides.

#### Définition

La viscosité est alors définie comme le coefficient de proportionnalité entre la contrainte  $\sigma$  et le gradient de vitesse :

$$\sigma = \frac{dF}{dS} = \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \quad (107)$$

Unités :

- $\sigma$  en  $\text{N}\cdot\text{m}^2$  donc en Pa ;
- $F$  en N ;
- $S$  en  $\text{m}^2$  ;
- $v$  en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- $y$  en m ;
- **Donc  $\eta$  en Pa·s, appelé le poiseuille (Pl)**

- Si la viscosité dynamique est constante quelle que soit la contrainte appliquée alors on dit que le fluide est newtonien.
- La viscosité dépend bien sûr du fluide<sup>65</sup> :

65. Source valeurs : Cours en ligne, cndp

Fluide	Viscosité à 20°C (Pa.s)
Eau	$10^{-3}$
Huile d'olive	0,1
Glycérine	1,5
Miel	10
Bitume	$10^8$

- On peut aussi avoir besoin de la **viscosité cinématique**  $\nu$ . Elle s'exprime en fonction de la masse volumique  $\rho$  du fluide et de la viscosité dynamique  $\eta$  comme :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

○ Comment avoir une idée de l'impact qu'à la viscosité sur tel ou tel écoulement de fluide ?

### I.3 Le nombre de Reynolds

On introduit cette grandeur en montrant qu'il faut quantifier un seuil pour lequel l'écoulement change de comportement.

- Lors de l'écoulement d'un fluide, la quantité de mouvement  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$  est transportée par deux modes de transports :

- La convection : le temps caractéristique de convection est  $\tau_{\text{conv}} = \frac{L}{V}$

- La diffusion : le temps caractéristique de la diffusion est  $\tau_{\text{diff}} = \frac{\rho L^2}{\eta}$

- Le nombre de REYNOLDS permet de quantifier l'importance relative des deux phénomènes. Il est défini comme le rapport suivant :

$$\mathbf{Re} = \frac{\text{transport de quantité de mouvement par convection}}{\text{transport de quantité de mouvement par diffusion}}$$

Donc, on peut exprimer le nombre de REYNOLDS grâce aux temps caractéristiques :

$$\mathbf{Re} = \frac{\tau_{\text{diff}}}{\tau_{\text{conv}}} = \frac{\rho L V}{\eta}$$

- On voit que ce nombre est dépendant de la viscosité. Plus la viscosité sera élevée, plus ce nombre sera faible, et inversement.
  - Si  $Re \ll 1$  : le transport de quantité de mouvement par convection est moins efficace que le transport par diffusion visqueuse. La viscosité joue donc un rôle prépondérant à l'échelle de la longueur  $L$ .
  - Si  $Re \gg 1$  : c'est le transport de quantité de mouvement par diffusion qui devient moins efficace que le transport par convection. La viscosité joue un rôle négligeable à l'échelle  $L$  on se rapproche ici d'un écoulement parfait !

○ Pour savoir si on doit prendre en compte ou non la diffusion de quantité de mouvement du à la viscosité il faut déterminer cette nouvelle grandeur

## II Mesure de la viscosité

Il est explicitement précisé dans le programme de BCPST2 qu'il faut savoir déterminer expérimentalement un coefficient de viscosité. On s'y applique au cours de cette partie.

Il existe plusieurs techniques pour déterminer la viscosité dynamique d'un fluide. Dans le cas du sang, on utilise un viscosimètre à chute de bille. C'est donc son principe que nous allons étudier et voir pourquoi il peut être important de déterminer la viscosité du sang dans le corps. On se base sur la relation de STOKES :

### Définition

Pour une sphère de rayon  $r$ , de vitesse relative  $\vec{v}$  par rapport à un fluide de viscosité dynamique  $\eta$ , la **loi de Stokes** donne l'expression de la force de frottement visqueux que subit l'objet :

$$\vec{F}_t = -6\pi\eta r \vec{v}$$

Cette relation est valable à faible nombre de REYNOLDS :  $Re \leq 1$

### II.1 Principe

Cette sous-partie est descriptive. Il s'agit de mise en équation du problème.

- On va reproduire ici le viscosimètre.

### Expérience

On lâche une bille dans une éprouvette. On remarque (si on a de bons yeux...) que la vitesse au bout d'un certain temps est constante.

- On fait l'étude mécanique de la bille de masse  $m_{\text{bille}}$  et de rayon  $r$ .
  - Référentiel : laboratoire, supposé galiléen
  - Bilan des forces :
    - Le poids :  $\vec{P} = m_{\text{bille}} \cdot \vec{g}$
    - La poussée d'ARCHIMÈDE :  $\vec{\Pi} = -m_{\text{fluide}} \cdot \vec{g} = -\rho_{\text{fluide}} \cdot V_{\text{fluide}} \cdot \vec{g}$
    - La force de traînée (relation de STOKES) :  $\vec{F}_t = -6\pi\eta r \vec{v}$
  - Principe fondamental de la dynamique :

$$m_{\text{bille}} \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{P} + \vec{\Pi} + \vec{F}_t$$

$$m_{\text{bille}} \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m_{\text{bille}} \cdot \vec{g} - \rho_{\text{fluide}} \cdot V_{\text{fluide}} \cdot \vec{g} - 6\pi\eta r \vec{v}$$

En régime stationnaire, la bille atteint une vitesse limite  $\vec{v} = \overline{v_{lim}}$  constante, donc le terme de dérivée première s'annule. On obtient (après quelques lignes de calcul) l'expression de la force de viscosité :

$$\eta = \frac{2r^2}{9v_{lim}} (\rho_{bille} - \rho_{fluide}) \cdot g \quad (108)$$

○ L'inconnue du problème est la vitesse en régime stationnaire,  $v_{lim}$ . On doit donc la mesurer et on aura la valeur de la viscosité du glycérol.

## II.2 Application

*Cette sous-partie est expérimentale. On détermine la valeur du coefficient de viscosité.*

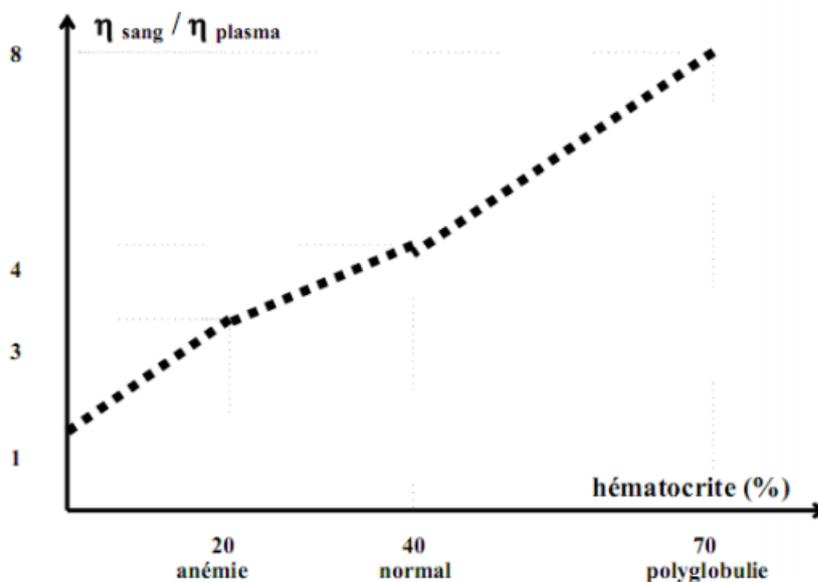
- On peut donc retrouver la viscosité du glycérol.

### Expérience

On prends en vidéo la chute de la bille. On pointe la bille avec LATISPRO. On fixe l'échelle de longueur, on en déduit la vitesse limite.

On fait 16 mesures différentes, discussion sur les incertitudes.

- On peut, grâce à cette méthode, mesurer la viscosité du sang : elle vaut en moyenne  $4 \cdot 10^{-3}$  Pl. La viscosité du sang est intéressante à mesurer car elle peut donner de précieuses informations sur des maladies possibles.



○ On va donc pouvoir voir comment s'écoule le sang dans les canaux où l'écoulement n'est pas parfait.

### III Écoulement réel

Dans cette partie, on se propose d'observer ce qu'il se passe lorsque l'on prends en compte la viscosité pour étudier les écoulements.

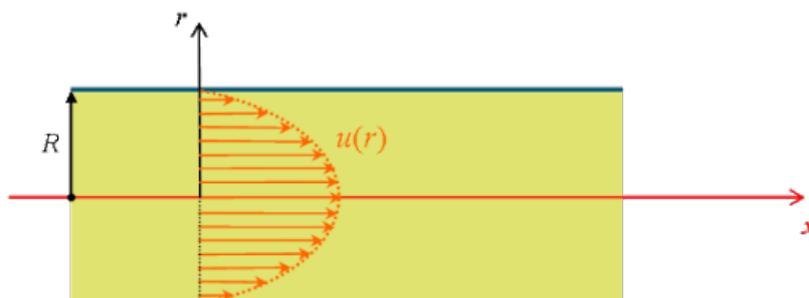
#### III.1 Cas de l'écoulement de Poiseuille

C'est un cas d'école, au programme des CPGE BCPST, on l'étudie grâce à un schéma précis au tableau, et des hypothèses à formuler. On peut aussi faire la démonstration, mais on s'écarte des clous du programme de BCPST et on entre plutôt dans du programme de PC.

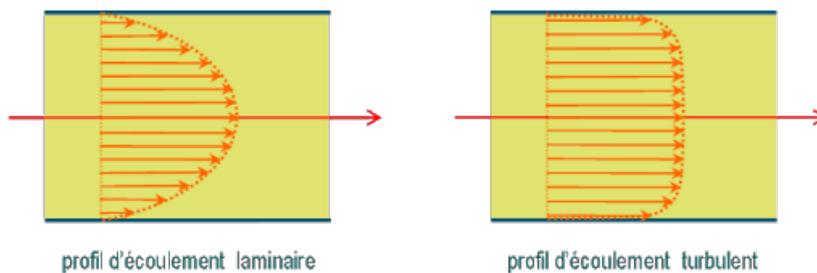
- Hypothèses :
  - On a un cylindre de longueur  $L$ , de rayon  $R$  et de section  $S$ .
  - Le point  $A$ , à l'entrée du cylindre se trouve à la pression  $P_A$ , le point  $B$  en sortie se trouve à la pression  $P_B$ . On a une différence de pression  $\Delta P = P_B - P_A \neq 0$
  - Le fluide est considéré comme **visqueux**, newtonnien, et **incompressible**.
  - Les phénomènes convectifs sont négligés.
- Il est possible de déterminer le profil de vitesse, que l'on ne démontre pas ici<sup>66</sup> :

$$v(r) = v_{\max} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

On a donc un profil de vitesse **parabolique** :



- Cependant, ce profil de vitesse n'est parabolique que dans le cas des capillaires. Dans le cas de l'aorte, on n'observe pas du tout la même chose !



66. On le démontre avec l'équation de NAVIER-STOKES

- Calculons le nombre de REYNOLDS dans le cas de l'aorte et des capillaires<sup>67</sup> :

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot L \cdot V}{\eta}$$

	Diamètre (mm)	Vitesse (cm·s <sup>-1</sup> )	Re
<b>Aorte</b>	10	33	871
<b>Capillaires</b>	10·10 <sup>-3</sup>	0,04	1,1·10 <sup>-3</sup>

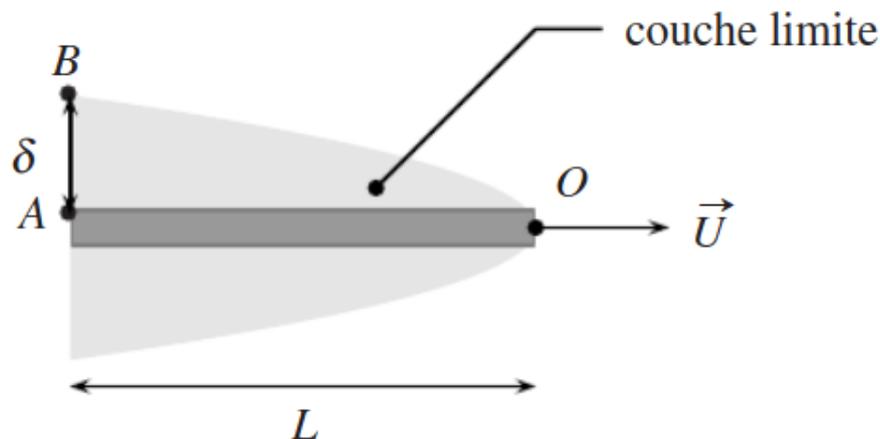
La viscosité a donc un effet moindre dans le cas de l'aorte que dans le cas du capillaire. Dans l'aorte, la vitesse est homogène loin des bords : la viscosité n'y a pas d'impacte. Mais près des bords, la viscosité a un impact.

○ On a parlé des bords et de l'impact de la viscosité sur l'écoulement près et loin des bords. La notion de couche limite va nous aider à expliquer ce phénomène.

### III.2 Notion de couche limite

Dans cette dernière sous-partie, on introduit la notion de couche limite. Il faut la « faire sentir » physiquement !

Il existe une zone dans laquelle les phénomènes de diffusion ne sont pas négligeables<sup>68</sup>. Imaginons une planche qui se déplace au sein d'un fluide à la vitesse  $\vec{V} = V \cdot \vec{e}_x$  :



#### Définition

On appelle **couche limite**  $\delta$  la zone autour d'un obstacle solide dans laquelle la vitesse du fluide passe de la vitesse de l'obstacle à sa vitesse loin de l'obstacle. C'est une zone de fort gradient de vitesse, où les effets de la viscosité sont prépondérants.

Cette couche limite s'exprime comme  $\delta(t) = \sqrt{\nu \cdot t}$  avec  $\nu$  la viscosité cinématique qui a la dimension d'un coefficient de diffusion.

Le fluide parcourt la distance  $L$  à la vitesse  $V$  pendant la durée  $t > 0$ . On obtient alors que :

67. Source données : <http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/bioph2an09-circulation.pdf>

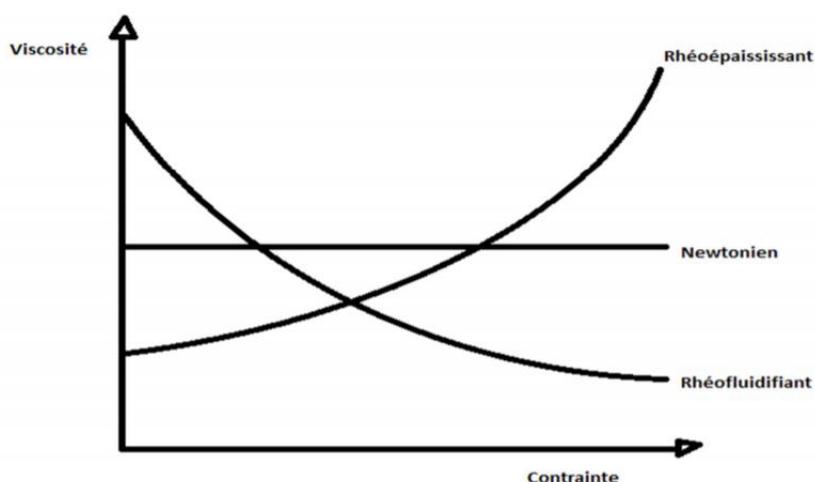
68. [1], page 317

$$\delta \sim \frac{L}{\sqrt{Re}}$$

Donc la couche limite est d'autant plus fine que le nombre de REYNOLDS est grand. Cela explique la différence des profils de vitesse entre les deux canaux naturels.

## Conclusion

- Réponse à la problématique : On ne peut plus utiliser la relation de BERNOULLI par exemple. La viscosité crée de la diffusion de quantité de mouvement. Microscopiquement, c'est donc des frottements entre particules de fluides.
- Ouverture : On n'a parlé que de fluides **newtonniens**. Ce n'est pas le cas de tous les fluides!



### Autre(s) possibilité(s) de plan

— Intégrer la loi de HUGEN-POISEUILLE.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Exemples de fluides rhéoépaississants : mélange eau-maïzena, et slime.
- ☞ Exemples de fluides rhéofluidifiants : polymères fondus, purées de fruits...
- ☞ Équation de NAVIER-STOKES :  $\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \cdot \vec{v} \right) = \vec{f}_{\text{vol}} - \text{grad} p + \eta \Delta \vec{v}$
- ☞ Autre expression de la force de traînée, lorsque  $10^3 < Re < 10^5$  (**turbulent**) :  $\|\vec{F}_t\| = \frac{1}{2} C_x S \rho V^2$ . Avec  $C_x$  coefficient de traînée sans dimension mais non constant!
- ☞ Pour la couche limite, on peut l'établir via l'équation de NAVIER-STOKES aussi, en comparant les termes.

**PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - SECONDE ANNÉE) :**

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Dynamique des fluides réels</b></p> <p>Viscosité dynamique ; viscosité cinématique.</p> <p>Force tangentielle de viscosité d'un fluide newtonien.</p> <p>Loi de POISEUILLE. Résistance hydraulique.</p> <p>Nombre de REYNOLDS</p> <p>Écoulement à bas nombre de REYNOLDS (écoulements rampants).</p> <p>Écoulement dans un milieu poreux. Porosité. Pression effective. Perméabilité. Loi de DARCY.</p> <p>Mouvement d'une bille dans un fluide newtonien.</p> <p>Loi de STOKES.</p>	<p>Identifier les propriétés des fluides newtoniens soumis à un cisaillement simple plan.</p> <p>Exprimer le taux de déformation dans le système de coordonnées approprié à la géométrie de l'écoulement.</p> <p>Donner le lien entre la force tangentielle de viscosité et le taux de déformation.</p> <p>Établir l'expression du débit volumique dans le cas d'un écoulement dont le profil de vitesse est donné.</p> <p>Définir la résistance hydraulique d'une conduite.</p> <p>Procéder par analogie avec les associations de résistances électriques pour proposer un modèle simplifié de la circulation sanguine.</p> <p>Utiliser la pression motrice dans le cas d'une dénivellation.</p> <p>Calculer et interpréter le nombre de REYNOLDS d'un écoulement dans un conduit ou autour d'un obstacle.</p> <p>Connaitre des ordres de grandeur du nombre de Reynolds permettant de différencier les régimes d'écoulements laminaire et turbulent.</p> <p>Identifier les propriétés des écoulements à bas nombre de REYNOLDS.</p> <p>Définir la porosité d'un milieu.</p> <p>Établir le lien entre la porosité d'un milieu et la perméabilité dans le cadre d'un modèle simplifié de capillaires parallèles.</p> <p>Utiliser la loi de DARCY.</p> <p>Utiliser la pression motrice dans le cas d'une dénivellation.</p> <p>Identifier les conditions d'application de la loi de Stokes.</p> <p><b>Approche documentaire :</b> Illustrer un processus de sédimentation.</p> <p><b>Mesurer une différence de pression avec un manomètre différentiel.</b></p> <p><b>Mettre en oeuvre une détermination de porosité et de perméabilité.</b></p> <p><b>Mettre en oeuvre une détermination de viscosité.</b></p>

Élément imposé : Exploiter la relation de Bernoulli**Introduction pédagogique**

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (L2, BCPST 2)
- Prérequis :
  - \* Thermodynamique : expression du premier principe ;
  - \* Diffusion, convection, ordres de grandeurs dans les deux cas ;
  - \* Statique des fluides : définition de la pression et des forces pressantes sur une surface ;
  - \* Cinématique des fluides : champ de vitesse, lignes de courant, tubes de courant, débits volumique et massique, lien avec la vitesse, fluide incompressible.
- Séquence pédagogique : Cette leçon arriverait au milieu d'une séquence de mécanique des fluides en L2 ou CPGE BCPST 2. Il s'agit, grâce à des hypothèses et modèles, de caractériser des écoulements de fluides. Le choix a été fait ici, par souci de temps, de ne pas tout démontrer, notamment l'expression du profil de vitesse pour l'écoulement de POISEUILLE. Le choix a été fait également de ne pas utiliser l'équation de NAVIER-STOKES en prenant exemple sur le programme des classes préparatoires BCPST.
- Difficultés :
  - \* Beaucoup de conditions pour appliquer les théorèmes ;
  - \* Notion de nombre de REYNOLDS compliquée à interpréter ;
  - \* Difficultés mathématiques pour la relation de BERNOULLI.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Connaître et savoir exploiter le nombre de REYNOLDS ;
  - \* Savoir exploiter les informations données par les équations de l'écoulement de POISEUILLE ;
  - \* Appliquer à différentes situations les notions vues en cinématique des fluides ;
  - \* Développer des analogies entre la mécanique des fluides et l'électrocinétique.

## Introduction pédagogique

— Sources utilisées :

- (1) CÔTE, I., VIDAL, A., *Physique-Chimie BCPST 2e année*, Dunod, J'assure aux concours, 2017.
- (2) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, *tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.
- (3) GUYON, E. *et coll.*, *Ce que disent les fluides*, Belin, 2e éd., 2011.
- (4) *Dynamique des fluides*, cours en ligne, [www.rpn.ch](http://www.rpn.ch).
- (5) KLEIN, Emmanuel, *Mécanique des fluides*, Cours PT au Havre.
- (6) ANTZOULATOS, V., *Cours en ligne formulation*.

## Introduction

- Dans cette leçon nous allons nous intéresser à l'hémodynamique. C'est l'étude de l'écoulement du sang dans le corps humain. Pour cela, nous avons besoin d'outil de dynamique des fluides.
- *Rappel des leçons précédentes (slides)* : Définition fluide newtonien<sup>69</sup>, force de viscosité et écoulement incompressible.

## I Caractériser un écoulement

*Cette première partie a pour but de montrer que différents types d'écoulement existent, et qu'on peut appliquer des modèles pour certains d'entre eux.*

### I.1 Différents écoulements

*L'expérience, bien que difficile à rendre parlante, permet de montrer notre propos.*

#### Expérience

Ampoule à décanter et vitesse d'écoulement, avec le matériel suivant :

- Une ampoule à décanter de gros volume, remplie d'eau ;
- Une bassine de gros volume ;
- Du colorant.

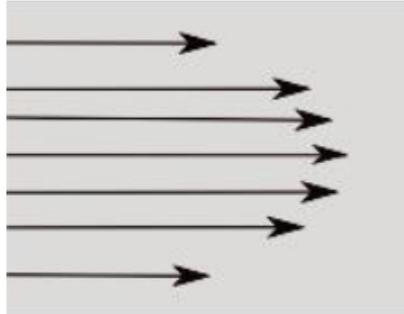
Faire varier la vitesse d'écoulement de l'eau à la sortie de l'ampoule et observer les lignes de courant grâce au colorant.

<sup>69</sup>. Fluide dont la viscosité est une constante.

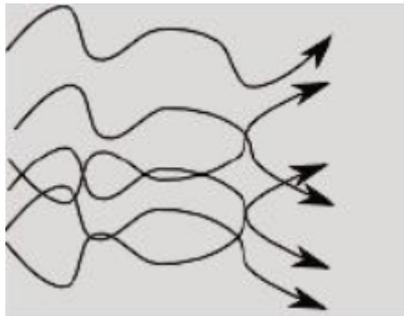
### Animation

Vidéo pour remplacer la manipulation : [https://www.youtube.com/watch?v=\\_RqUdA1ZOLY](https://www.youtube.com/watch?v=_RqUdA1ZOLY).

- Observations expérimentales : On voit que selon la vitesse d'écoulement, l'écoulement du fluide change de "forme".
- Il existe plusieurs types d'écoulement<sup>70</sup> :
  - L'écoulement laminaire : les lignes de courant sont bien dessinées et régulières.



- L'écoulement turbulent : il n'est pas possible de déterminer les lignes de courant.



○ Il existe un nombre qui va nous aider à savoir dans quel cas on a un écoulement laminaire ou un écoulement turbulent.

## I.2 Expression du nombre de Reynolds

*Cette sous-partie a pour but de définir le nombre de REYNOLDS, et d'en comprendre le sens physique.*

- Lors de l'écoulement d'un fluide, la quantité de mouvement  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$  est transportée par deux modes de transports :

- La convection : le temps caractéristique de convection est  $\tau_{\text{conv}} = \frac{L}{V}$

- La diffusion : le temps caractéristique de la diffusion est  $\tau_{\text{diff}} = \frac{L^2}{\nu}$

70. Source image : [1].

### Définition

Le nombre de REYNOLDS permet de comparer l'importance relative des deux phénomènes. Il est défini comme le rapport suivant :

$$\mathbf{Re} = \frac{\text{transport de quantité de mouvement par convection}}{\text{transport de quantité de mouvement par diffusion}}$$

Donc, on peut exprimer le nombre de REYNOLDS grâce aux temps caractéristiques :

$$\mathbf{Re} = \frac{\tau_{\text{diff}}}{\tau_{\text{conv}}} = \frac{LV}{\nu}$$

- Il y a donc un critère liant le nombre de REYNOLDS et l'écoulement :
  - Si  $\mathbf{Re} < 2000$  : l'écoulement est **laminaire** ;
  - Si  $\mathbf{Re} \gg 2000$  : l'écoulement est **turbulent**.

○ Comment représenter la vitesse d'un écoulement dans le cas d'un fluide réel ?

## II Écoulement d'un fluide réel

*Grâce à l'exemple (contextualisation) de la circulation sanguine, on peut discuter sur le caractère réel de l'écoulement. C'est le but de cette deuxième partie.*

On va baser cette partie sur l'exemple de la circulation sanguine dans les veines. Cet écoulement peut être modélisé par un écoulement dit de POISEUILLE.

On fait le calcul du nombre de REYNOLDS pour l'écoulement du sang dans les veines. On en déduit que cet écoulement est laminaire.

### II.1 Écoulement de Poiseuille

*Comme dans la LP30, on étudie ce cas d'école important grâce à une ressource numérique, ou une expérience en direct.*

- Un écoulement de POISEUILLE est un écoulement de fluide visqueux à l'intérieur d'une conduite cylindrique de rayon  $R$ , provoqué par une différence de pression entre l'entrée et la sortie<sup>71</sup>.

---

71. [2] (5<sup>e</sup> édition) page 359

### Animation

On peut visualiser l'expérience grâce à [cette animation](#).



- Le profil de vitesse est donné par la relation suivante :

$$\vec{v}(r) = \frac{p_e - p_s}{4\eta L} (R^2 - r^2) \cdot \vec{e}_z \quad (109)$$

○ De cette loi nous pouvons déduire d'autres paramètres qui sont utiles pour caractériser un écoulement visqueux.

## II.2 Débit volumique

*Cette sous-partie a pour but la définition du débit volumique.*

- Le débit volumique élémentaire s'écrit par définition comme  $\delta D_v = \vec{v}(M, t) \cdot d\vec{S}$ , soit pour le débit volumique global :

$$D_v = \iint \vec{v}(M, t) \cdot d\vec{S}$$

- Il suffit donc d'utiliser la relation (109) trouvée dans la partie précédente, et d'intégrer entre  $r = 0$  et  $r = R$  :

$$D_v = \int_0^R \frac{\pi (p_e - p_s)}{2\eta L} (R^2 r - r^3) dr$$

Soit finalement,

$$D_v = \frac{\pi R^4}{8\eta L} (p_e - p_s) \quad (110)$$

Cette relation est connue sous le nom de **loi de Poiseuille**

## Expérience

Vérification de la loi de POISEUILLE grâce à l'expérience du vase de MARIOTTE.



○ On peut faire une analogie avec un autre domaine de la physique !

### II.3 Résistance hydraulique

*Cette sous-partie est centrée sur l'analogie.*

- On peut faire une analogie entre l'électrocinétique et l'hydraulique.

Électrocinétique	Mécanique des fluides
Intensité (A)	Débit volumique ( $L \cdot s^{-1}$ )
Tension (V)	Différence de pression (Pa)
Résistance $R_{elec} = \frac{U}{I}$	Résistance $R_h = \frac{\Delta p}{D_v}$

Par identification avec la relation (110), on a ainsi :

$$R_h = \frac{8\eta L}{\pi R^4} \quad (111)$$

Elle est exprimée en  $Pa \cdot s \cdot m^{-3}$ .

- Cette résistance hydraulique est donc proportionnelle à la viscosité dynamique  $\eta$ . C'est intuitif : plus le fluide est visqueux, et moins l'écoulement est facilité.

- On remarque par ailleurs que la résistance diminue très vite à mesure que le diamètre du conduit augmente.

○ *Jusqu'ici, on a pris en compte la viscosité du fluide. Mais on voit que l'écoulement de miel ou d'eau ne peut être considéré de la même manière. Certains écoulements sont alors considérés comme "parfaits".*

### III Étude d'un écoulement parfait

*Dans cette dernière partie, on s'affranchit de la viscosité, et on obtient de nouvelles relations.*

#### Définition

On dit qu'un **écoulement est parfait** si on peut négliger tous les phénomènes diffusifs, en particulier la viscosité.

On prends l'exemple de la sténose vasculaire. Il s'agit d'une maladie qui réduit le diamètre de l'aorte. On justifie le fait qu'on peut se placer dans le cas de l'écoulement parfait en calculant les nouvelles dimensions du problème.

#### III.1 Relation de Bernoulli

*Le but de cette sous-partie est d'établir le théorème de BERNOULLI. On procède par un bilan d'énergie.*

- On considère un écoulement :
  - **parfait** ;
  - **stationnaire** ;
  - **incompressible** ;
  - **homogène**.
- On applique au système {tranche de fluide entre  $x$  et  $x + dx$  } (fermé) entre  $t$  et  $t + dt$  le premier principe de la thermodynamique le long d'une ligne de courant :

$$d\mathcal{E} = \delta W + \delta Q$$

Soit, en explicitant l'énergie totale en fonction des énergies interne, potentielle et cinétique :

$$\boxed{dU + d\mathcal{E}_{\text{cin}} + d\mathcal{E}_{\text{pot}} = \delta W + \delta Q}$$

- Or, le fluide évolue de manière adiabatique (conséquence de l'hypothèse d'écoulement parfait) donc  $\boxed{\delta Q = 0}$  et réversible (idem) donc  $\boxed{dU = 0}$ . Par ailleurs, on peut expliciter chaque terme :

- $d\mathcal{E}_{\text{cin}} = d\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$
- $d\mathcal{E}_{\text{pot}} = d(mgz)$
- $\delta W = -pdV = -d\left(p\frac{m}{\rho}\right)$

- En regroupant les termes, on obtient alors :

$$d\left(\frac{v^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho}\right) = 0$$

### Théorème

D'où le **théorème de Bernoulli** entre les points  $A$  et  $B$  appartenant à une même ligne de courant <sup>a</sup> :

$$\frac{v_A^2}{2} + gz_A + \frac{p_A}{\rho} = \frac{v_B^2}{2} + gz_B + \frac{p_B}{\rho} \quad (112)$$

Ce théorème fut pour la première fois établi en 1738 par le médecin, mathématicien et physicien suisse Daniel BERNOULLI.

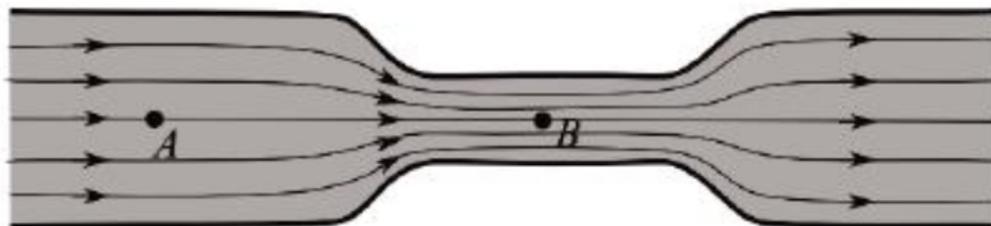
a. Avoir conscience de l'autre démonstration, via l'équation d'EULER, [2] (5è édition) page 379.

○ Voyons sans plus attendre une application directe de ce théorème.

## III.2 Effet Venturi

*Dans cette sous-partie, on applique le théorème qu'on vient de démontrer. Bien qu'il existe d'autres exemples classique, cette partie est très importante, afin de se servir du théorème et non pas juste l'avoir établi sans but.*

- On peut appliquer ce théorème à la détermination de la vitesse d'un fluide, grâce au dispositif d'effet VENTURI.
- Slides, schéma :



- Par hypothèse, l'écoulement est incompressible et stationnaire : le débit volumique se conserve.

$$D_v = v_A S_A = v_B S_B$$

Écrit autrement, on a  $\frac{v_A}{v_B} = \frac{S_B}{S_A}$  donc puisque  $S_A > S_B$ , on a  $\boxed{v_B > v_A}$ .

- Qu'en est-il pour la pression ? Pour cela, on applique la relation de BERNOULLI entre les points  $A$  et  $B$  (situés sur une même ligne de courant) :

$$\frac{v_A^2}{2} + gz_A + \frac{p_A}{\rho} = \frac{v_B^2}{2} + gz_B + \frac{p_B}{\rho}$$

En prenant  $A$  et  $B$  à la même hauteur, on a  $z_A = z_B$  donc :

$$\frac{v_A^2}{2} + \frac{p_A}{\rho} = \frac{v_B^2}{2} + \frac{p_B}{\rho}$$

- On en déduit  $p_A = p_B + \frac{\rho}{2} \underbrace{(v_B^2 - v_A^2)}_{>0}$  d'où  $\boxed{p_A > p_B}$
- C'est le phénomène qui se produit dans l'aorte, et l'augmentation de pression est alors dangereuse pour la santé.

## Conclusion

- Relativisation des modèles employés pour contextualiser : attention le sang ne peut pas vraiment être considéré comme un fluide newtonien.
- *Ouverture* : loi de DARCY<sup>72</sup> dans les milieux poreux.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- Ici, le choix est fait de tout faire sans l'équation de NAVIER-STOKES, en se calant sur le BO des BCPST. Cependant, il est tout à fait possible de l'utiliser.
- Enlever et mettre en prérequis la partie sur le nombre de REYNOLD, selon l'élément imposé, ou si besoin de plus de temps pour les manips, etc.
- Prendre d'autres exemples comme par exemple le tube de PITOT pour appliquer la relation de BERNOULLI.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ On peut s'attendre à devoir sortir l'équation de NAVIER-STOKES tôt ou tard dans l'entretien : bien la connaître et savoir retrouver tout en partant de ça.
- ☞ Nombre de REYNOLDS : critère, temps caractéristiques, et le retrouver avec NAVIER-STOKES.
- ☞ Savoir justifier toutes les hypothèses données (et il y en a beaucoup) tout au long de la leçon.
- ☞ Démonstration de la relation de BERNOULLI : lignes de courant, irrotationnel, etc.
- ☞ Expérience sur le vase de MARIOTTE, ne fonctionnant pas toujours, savoir tout justifier...

72. [2] page 670

**PROGRAMME OFFICIEL (BCPST - SECONDE ANNÉE) :**

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Dynamique des fluides parfaits</b> Relation de BERNOULLI. Conservation de la charge.</p> <p>Mesure d'une vitesse. Tube de PITOT.</p> <p>Mesure d'un débit volumique. Tube de VENTURI.</p> <p><b>Dynamique des fluides réels</b> Viscosité dynamique ; viscosité cinématique.</p> <p>Force tangentielle de viscosité d'un fluide newtonien.</p> <p>Loi de POISEUILLE. Résistance hydraulique.</p> <p>Nombre de REYNOLDS</p> <p>Écoulement à bas nombre de REYNOLDS (écoulements rampants). Écoulement dans un milieu poreux. Porosité. Pression effective. Perméabilité. Loi de DARCY.</p> <p>Mouvement d'une bille dans un fluide newtonien. Loi de STOKES.</p>	<p>Écrire et interpréter la conservation de l'énergie volumique. Utiliser la conservation de la charge le long d'une ligne de courant d'un écoulement permanent d'un fluide parfait et incompressible. Décrire le principe d'un tube de PITOT. Établir la relation donnant la vitesse du fluide. Décrire le principe d'un tube de VENTURI. Décrire le principe d'une trompe à eau. Établir la relation donnant le débit volumique d'un liquide ou d'un gaz.</p> <p>Identifier les propriétés des fluides newtoniens soumis à un cisaillement simple plan. Exprimer le taux de déformation dans le système de coordonnées approprié à la géométrie de l'écoulement. Donner le lien entre la force tangentielle de viscosité et le taux de déformation. Établir l'expression du débit volumique dans le cas d'un écoulement dont le profil de vitesse est donné. Définir la résistance hydraulique d'une conduite. Procéder par analogie avec les associations de résistances électriques pour proposer un modèle simplifié de la circulation sanguine. Utiliser la pression motrice dans le cas d'une dénivellation.</p> <p>Calculer et interpréter le nombre de REYNOLDS d'un écoulement dans un conduit ou autour d'un obstacle. Connaitre des ordres de grandeur du nombre de Reynolds permettant de différencier les régimes d'écoulements laminaire et turbulent. Identifier les propriétés des écoulements à bas nombre de REYNOLDS. Définir la porosité d'un milieu. Établir le lien entre la porosité d'un milieu et la perméabilité dans le cadre d'un modèle simplifié de capillaires parallèles. Utiliser la loi de DARCY. Utiliser la pression motrice dans le cas d'une dénivellation.</p> <p>Identifier les conditions d'application de la loi de Stokes. <b>Approche documentaire</b> : Illustrer un processus de sédimentation. <b>Mesurer une différence de pression avec un manomètre différentiel.</b> <b>Mettre en oeuvre une détermination de porosité et de perméabilité.</b> <b>Mettre en oeuvre une détermination de viscosité.</b></p>

Élément imposé : Irréversibilité de la diffusion**Introduction pédagogique**

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (L2)
- Prérequis :
  - \* Thermodynamique : premier principe, lois de JOULE.
  - \* Diffusion thermique : établissement de l'équation de diffusion, loi de FOURIER.
  - \* Électrocinétique : loi d'OHM, effet JOULE, travail d'une force électrique.
- Séquence pédagogique : Cette leçon est placée en deuxième année de l'enseignement supérieur, et adressée à un public ayant déjà vu en cours le premier principe de la thermodynamique, et les phénomènes de diffusion : il s'agit alors de mettre en défaut ce premier principe et d'**introduire le deuxième principe** pour parler d'évolution spontanée.
- Difficultés :
  - \* L'entropie est un nouveau concept, dont l'unité n'est pas forcément parlante par rapport à ce que cette fonction représente ;
  - \* Le bilan d'entropie est mathématiquement assez difficile.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre ce qu'est l'entropie et à quoi sert l'introduction du second principe.
  - \* Savoir caractériser l'irréversibilité d'un système.
- Sources utilisées :

- (1) BOURDREUX, S., *Exemples de phénomènes irréversibles*, cours en ligne, [http://s.bourdreux.free.fr/sciences/agregation\\_fichiers/LECONS/PHYSIQUE/lp15.pdf](http://s.bourdreux.free.fr/sciences/agregation_fichiers/LECONS/PHYSIQUE/lp15.pdf).
- (2) SANZ, M-N., SALAMITO, B., *et coll.*, *Physique PCSI, tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019.
- (3) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, *tout-en-un*, Dunod, J'intègre, 5e éd., 2019.
- (4) CLEYNEN, O., *Thermodynamique de l'ingénieur*, cours en ligne, <https://thermodynamique.fr>.

## Introduction

- Imaginons un verre qui tombe d'une table, et qu'il se casse. On perçoit mal le fait que cette transformation revienne en arrière. Cette transformation est donc **irréversible**.

### Définition

On définit une transformation **irréversible** comme une transformation dont on ne peut pas inverser le cours du temps.

- (*Slides*) On connaît déjà le premier principe de la thermodynamique :

### Premier principe de la thermodynamique

Les variations d'**énergie totale** d'un système fermé qui évolue d'un état initial  $i$  vers un état final  $f$  sont dues à un travail  $W$  et une chaleur  $Q$  selon le principe de conservation de l'énergie :

$$\Delta E_{i \rightarrow f} = \Delta E_{m,i \rightarrow f} + \Delta U_{i \rightarrow f} = W_{i \rightarrow f} + Q_{i \rightarrow f}$$

Ce premier principe nous permet de caractériser l'équilibre mais en aucun cas ne nous donne le sens d'**évolution spontanée**<sup>73</sup> du système. En effet, si on explicite le premier principe pour une balle qui tombe au sol par exemple, en parcourant une hauteur  $h$  :

$$U_2 - U_1 + E_{P_2} - E_{P_1} = 0$$

En passant les termes de l'autre côté de l'équation, on obtient :

$$U_1 - U_2 + E_{P_1} - E_{P_2} = 0$$

donc finalement, le bilan d'énergie est le même dans un sens ou dans l'autre de la transformation.

---

*Comment prévoir le caractère réversible ou non d'un système ? Quel outil est à notre disposition ?*

---

## I Lien entre l'irréversibilité et l'entropie

### I.1 Notion d'entropie

*L'objectif de cette sous-partie est d'**introduire** la notion d'entropie, notion nouvelle.*

Pour établir le sens de la transformation, on va définir une fonction d'état appelé **entropie** (transformation en grec), notée  $S$ . Elle possède les propriétés suivantes :

---

<sup>73</sup>. Spontanée : sans apporter d'énergie au système.

- $S$  est une **fonction d'état** ;
- $S$  est **extensive** ;
- $S$  **n'est pas une grandeur conservative**, contrairement à l'énergie.

Lors d'une transformation calorifugée ( $\delta Q = 0$ ) d'un état  $A$  à un état  $B$ , **l'entropie ne peut qu'augmenter**. L'entropie caractérise **le désordre**, et surtout l'absence d'information sur un système.

○ *Comment déduire de cette notion d'entropie le sens d'évolution d'un système siège d'une transformation ?*

## I.2 Énoncé du deuxième principe de la thermodynamique

*L'objectif de cette sous-partie est double : énoncer le second principe et faire sentir d'où il vient et pourquoi il nous est utile.*

- Pour faire comprendre d'où vient le second principe :  
*Pour quantifier l'irréversibilité d'une évolution, nous allons quantifier la chaleur qu'il faudrait retirer au corps pour le ramener dans son état initial de manière réversible. En lui soustrayant la chaleur qui a été effectivement transmise, nous obtenons en quelque sorte la chaleur qui a été inutilement créée pendant l'évolution. Or, plus la température à laquelle cette chaleur créée est basse, moins elle peut être transformée en travail. Nous allons ainsi « pénaliser » le coût en chaleur en le divisant par la température.*
- Énoncé (le plus courant) :

## Deuxième principe de la thermodynamique

Soit un système fermé. On postule l'existence d'une fonction d'état extensive appelé entropie  $S$  telle qu'au cours d'une transformation entre deux états d'équilibre, la variation d'entropie  $\Delta S$  du système s'écrit :

$$\Delta S = S_e + S_c$$

Avec :

- $S_e$  l'**entropie échangée**, s'exprimant en fonction du transfert thermique fourni de manière **réversible** et de la température extérieure au système de la manière

suivante : 
$$S_e = \int_i^f \frac{\delta Q}{T_{ext}} ;$$

- $S_c$  l'**entropie créée** vérifiant  $S_c \geq 0$ .

Entropie créée	Transformation
$S_c = 0$	Réversible
$S_c > 0$	Irréversible
$S_c < 0$	Impossible

L'entropie ne peut qu'augmenter lors de l'évolution d'un système.

- Il est intéressant d'écrire le deuxième principe « à l'envers » :

$$S_c = \Delta S - S_e$$

L'entropie créée, due à l'irréversibilité, est donc la différence entre la variation réelle d'entropie entre les deux états initial et final et l'entropie échangée si la réaction était réversible.

○ Pour savoir si un système est réversible ou non, il faut et il suffit de connaître la valeur de l'entropie créée  $S_c$ .

## II Phénomènes irréversibles

### II.1 Bilan entropique

L'objectif de cette sous-partie est de déterminer la différence d'entropie d'une phase condensée.

- Hypothèses :

On considère la phase condensée :

- Indilatable ;
- Incompressible.

- Considérons un chemin réversible pour la transformation considérée. On a alors :

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

Le premier principe s'écrivant  $dU = \delta W + \delta Q$ , on peut écrire :

$$dS = \frac{dU - \delta W}{T}$$

Pour une phase condensée **incompressible**, on a  $\delta W = -P_{ext}dV = 0$  car la variation du volume est quasi-nulle. Cela donne donc une expression de la variation d'entropie uniquement en fonction de l'énergie interne, elle même exprimée en fonction de la température par la deuxième loi de JOULE :

$$dS = \frac{dU}{T_{ext}} = \frac{C dT}{T}$$

Intégrons cette relation entre un état initial  $i$  et un état final  $f$  :

$$\Delta S_{i \rightarrow f} = \int_i^f dS = C \int_i^f \frac{dT}{T} = C \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right)$$

○ On va utiliser cette expression pour des exemples concrets.

## II.2 Chauffage de l'eau par effet Joule

- Position du problème : On place une masse  $m$  d'eau dans un calorimètre. On y plonge une résistance électrique. On note  $T_i$  et  $T_f$  les températures initiale et finale. On fait passer un courant  $i$  pendant une durée  $\tau$ .
- Le premier principe de la thermodynamique nous donne :

$$\Delta H = W_{autres}$$

Car la transformation est adiabatique (calorimètre) et le système immobile dans le référentiel considéré.

D'après la seconde loi de JOULE,  $\Delta H = m \cdot C_{eau,m} \cdot (T_f - T_i)$ . Il reste maintenant à déterminer l'expression du terme de travaux autres que ceux de pression. Il s'agit du travail électrique apporté :  $W_{autres} = \mathcal{P} \cdot \tau = R \cdot i^2 \cdot \tau$ . L'expression du premier principe s'écrit alors :

$$m \cdot C_{eau,m} \cdot (T_f - T_i) = R \cdot i^2 \cdot \tau \Leftrightarrow T_f = T_i + \frac{R \cdot i^2 \cdot \tau}{m \cdot C_{eau,m}} \Leftrightarrow \boxed{\frac{T_f}{T_i} = 1 + \frac{R \cdot i^2 \cdot \tau}{m \cdot C_{eau,m} \cdot T_i}}$$

On obtient alors l'expression de la variation d'entropie, en remplaçant dans l'expression trouvée à la partie précédente :

$$\boxed{\Delta S_{i \rightarrow f} = m \cdot C_{eau,m} \cdot \ln \left( 1 + \frac{R \cdot i^2 \cdot \tau}{m \cdot C_{eau,m} \cdot T_i} \right)}$$

La fonction mathématiques  $f(x) = \ln(1+x)$  est strictement positive pour  $x \geq 0$ .

### Important

Le point important ici est de souligner qu'on a  $S_e = 0$  car  $Q = 0$ . Ainsi,  $\Delta S = S_c$ , ce que l'on a calculé n'est autre que l'**entropie créée**.

### Conséquence

L'entropie créée au cours de l'échauffement d'une masse  $m$  d'eau par effet JOULE est donc **positive** : cette transformation est **irréversible**.

L'effet JOULE est un **phénomène dissipatif**, qui crée de l'entropie.

○ On connaît un autre phénomène dissipatif, c'est la diffusion.

## II.3 Irréversibilité de la diffusion

- Rappel sur la diffusion de chaleur (Slides) : Les phénomènes de diffusion sont créés par un gradient de température et se font des zones chaudes vers les zones froides.

On a la loi de FOURIER :

$$\vec{j}_{th}(M, t) = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}(M, t)$$

L'équation de diffusion s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

- Si l'on se place en  $-t$ , alors l'équation devient :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

Ce qui change l'équation, et montre l'**irréversibilité**.

- Bilan d'entropie de la diffusion thermique Par définition, on a  $\Phi_{th}(x, t) = \frac{\delta Q(x, t)}{dt}$ , et  $\delta S_e = \frac{\delta Q(x, t)}{T}$ .

L'entropie échangée par la tranche de la barre de métal de surface  $\Sigma$ <sup>74</sup> et de largeur  $dx$  entre  $t$  et  $t + dt$  s'écrit :

$$\delta S_e = \frac{\Phi(x, t)}{T(x, t)} - \frac{\Phi(x + dx, t)dt}{T(x + dx, t)} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\Phi(x, t)}{T} \right) dx dt$$

On a de même  $\Phi(x, t) = j_{th}(x, t) \times \Sigma$  ce qui donne :

$$\delta S_e = \frac{\Phi(x, t)}{T(x, t)} - \frac{\Phi(x + dx, t)dt}{T(x + dx, t)} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{j_{th}(x, t)}{T} \right) \Sigma dx dt$$

Par loi de FOURIER, on a  $j_{th} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(x, t)$ , que l'on remplace dans l'expression précédente, puis on effectue la dérivation du produit :

$$\delta S_e = +\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial x}(x, t) \right) \Sigma dx dt = \left( -\frac{\lambda}{T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda}{T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t) \right) \Sigma dx dt$$

74. Noter la surface  $\Sigma$  et pas  $S$ , sinon conflit de notation avec l'entropie.

On a donc l'expression de l'entropie échangée. Il nous reste à déterminer la variation d'entropie de la transformation et nous aurons accès à l'entropie créée.

- Rappelons que pour une phase condensée, on a :

$$dS = mc \frac{dT}{T} = \mu c \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) \Sigma dx dt$$

- On peut alors en déduire l'entropie créée :

$$\delta S_c = dS - \delta S_e = \mu c \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) \Sigma dx dt - \left( -\frac{\lambda}{T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda}{T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t) \right) \Sigma dx dt$$

On réorganise et on fait apparaître l'équation de la chaleur :

$$\delta S_c = \underbrace{\left( \mu c \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t) \right)}_{=0} \frac{1}{T} \Sigma dx dt + \frac{\lambda}{T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 \Sigma dx dt$$

On a donc au final l'expression suivante de l'entropie créée :

$$\delta S_c = \frac{\lambda}{T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 \Sigma dx dt \geq 0$$

## Conclusion

- Réponse à la problématique : L'entropie est donc la fonction qui nous permet de prévoir le sens d'évolution d'un système. On a vu que dans beaucoup de cas, on peut mettre en évidence une création d'entropie qui empêche un retour en arrière du phénomène.
- Ouverture : force de frottement d'un oscillateur.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- Intégrer une partie (au profit d'une autre) sur la mécanique et les forces de frottements, mais il est plus difficile de trouver des valeurs d'entropie créée.
- Intégrer (ça pourrait être l'élément imposé tellement c'est classique) la détente de JOULE GAY-LUSSAC.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Interprétation statistique de l'entropie selon BOLTZMANN :  $S = k_B \ln \Omega$  : plus il y a de microétats, plus il y a de désordre.

## PHÉNOMÈNES DE POLARISATION OPTIQUE (CPGE)

### Élément imposé : Loi de Malus

#### Introduction pédagogique

- Niveau : Deux premières années de l'enseignement supérieur (L2)
- Prérequis :
  - \* Description de la lumière comme une onde électromagnétique, orthogonalité des champs  $\vec{E}(M, t)$  et  $\vec{B}(M, t)$  ;
  - \* Représentation complexe du vecteur  $\vec{E}(M, t)$  ;
  - \* Chimie : molécules chirales ;
  - \* Optique : définition de l'intensité lumineuse en fonction du champ électrique.
- Séquence pédagogique :
- Difficultés :
  - \* Ne pas confondre les directions de propagation ;
  - \* Écriture paramétrique des champs.
- Objectifs de la leçon :
  - \* Comprendre le phénomène de polarisation ;
  - \* Comprendre et mettre en oeuvre un montage polariseur-analyseur ;
  - \* Découvrir la loi de MALUS.
- Sources utilisées :

- (1) SANZ, M-N., SALAMITO, B., CHARDON, D., VANDENBROUCK, F., *Physique PC-PC\**, tout-en-un, Dunod, J'intègre, 5e éd, 2019.
- (2) LASNE, D., *Ondes électromagnétiques dans le vide*, mon cours de PC.
- (3) ROUSSEL, J, *femto physique*, cours en ligne, <https://femto-physique.fr/>.

# Introduction

L'utilisation de « polariseurs » différents sur les verres des lunettes 3D permet au spectateur de recevoir sélectivement une image sur l'oeil droit et l'autre sur l'oeil gauche. Un léger décalage spatial entre les deux prises de vue permet alors d'avoir une impression de relief dans l'image.

---

*Qu'est-ce que la lumière polarisée ? Comment polariser une lumière et reconnaître une lumière polarisée ?*

---

## I Polarisation d'une OPPM

### I.1 Définition et description

#### Définition

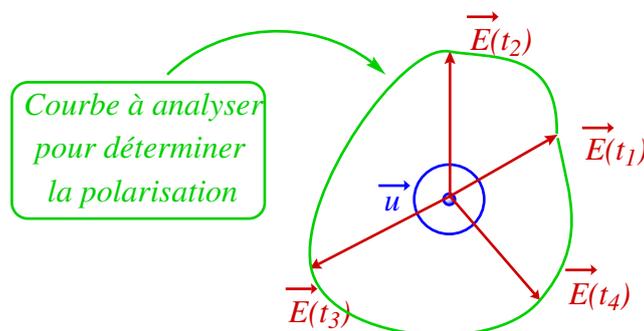
On appelle **direction de polarisation d'une OPPM** à l'instant  $t$  la direction du champ électrique  $\vec{E}(M, t)$  à l'instant  $t$ .

#### Important

Il ne faut pas confondre direction de propagation (direction du vecteur  $\vec{k}$ ) et direction de polarisation (direction du vecteur  $\vec{E}$ ). En particulier, on notera que pour une OEPPM, on a :

$$\underbrace{\vec{k}}_{\text{direction de propagation}} \perp \underbrace{\vec{E}}_{\text{direction de polarisation}}$$

On décrit la polarisation d'une OPPM se propageant selon la direction  $\vec{u}$  en regardant dans le sens opposé à la direction de propagation (donc selon  $-\vec{u}$ ) et en suivant au cours du temps la courbe décrite par l'extrémité du champ électrique projetée dans un plan fixe orthogonal à  $\vec{u}$ .



#### Définition

On appelle **état de polarisation** d'une OPPM correspond à la description de la courbe décrite par l'extrémité du champ électrique au cours du temps dans un plan orthogonal au champ.

○ La courbe décrite par l'extrémité du champ électrique peut prendre des formes spécifiques, sous certaines conditions.

## I.2 Différents états de polarisation

On choisit un repère cartésien dans lequel  $\vec{k} = k \cdot \vec{e}_x$ .

$$\text{Alors, } \vec{E}(M, t) = \begin{pmatrix} 0 \\ E_{0y} \cos(\omega t - kx + \varphi_{ey}) \\ E_{0z} \cos(\omega t - kx + \varphi_{ez}) \end{pmatrix}$$

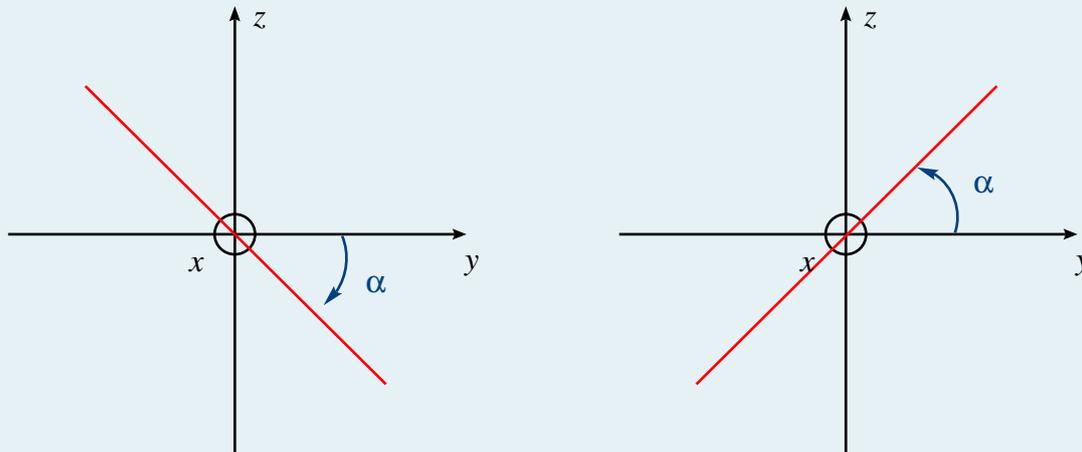
On se place dans un plan d'onde orthogonal à  $\vec{k}$ , donc à  $x = x_0$  donné. Si l'onde est polarisée alors le champ électrique décrit une courbe dans le plan  $x = x_0$  qui dépend des valeurs des amplitudes  $E_{0y}$  et  $E_{0z}$ , de  $x_0$  et du déphasage  $\Delta\varphi = \varphi_{ey} - \varphi_{ez}$  :

$$\vec{E}(x = x_0, t) = \begin{pmatrix} 0 \\ E_{0y} \cos(\omega t - kx_0 + \varphi_{ey}) \\ E_{0z} \cos(\omega t - kx_0 + \varphi_{ez}) \end{pmatrix}$$

- Polarisation rectiligne :

### Définition

Une OPPM est polarisée **rectilignement** si l'extrémité de  $\vec{E}$  décrit un **segment** au cours du temps.



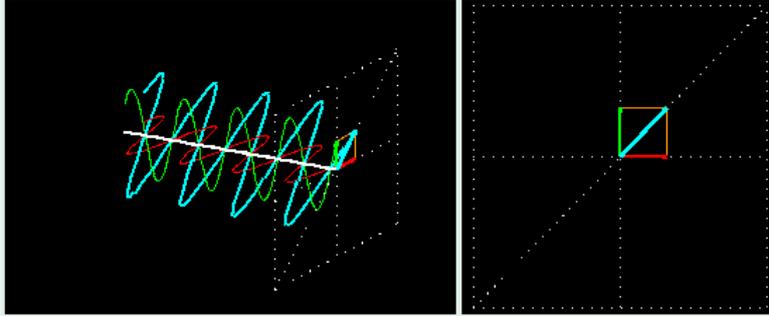
### Important

**Condition nécessaire :** pour que la direction de  $\vec{E}$  soit toujours la même, il faut que ses deux composantes soient en phase, ou en opposition de phase, c'est-à-dire :

$$\Delta\varphi = \varphi_{ey} - \varphi_{ez} = 0 \text{ ou } \pi$$

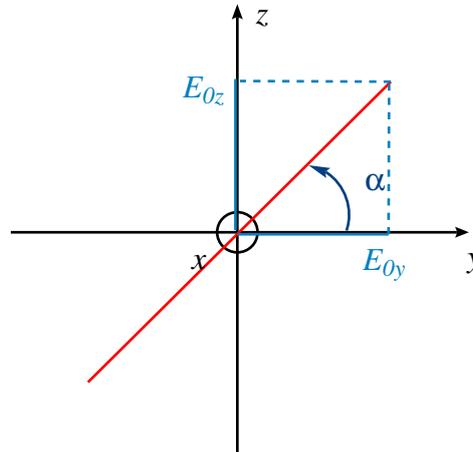
### Animation

Sur [ce site<sup>a</sup>](https://cddemo.szialab.org/), on voit l'évolution du vecteur  $\vec{E}$  au cours du temps.



a. <https://cddemo.szialab.org/>

Une fois établi que l'onde est rectiligne, il reste à déterminer la direction de la droite de polarisation. On note  $\alpha$  l'angle entre la direction de polarisation et l'axe  $Oy$  :



On voit qu'on a alors  $\tan \alpha = \frac{E_{0z}}{E_{0y}}$

- Polarisation elliptique :

### Définition

Une OPPM est polarisée **elliptiquement** si l'extrémité de  $\vec{E}$  décrit une **ellipse**.

Il s'agit du cas général (en fait, la polarisation rectiligne est un cas particulier de polarisation elliptique).

- Polarisation circulaire :

### Définition

Une OPPM est **polarisée circulairement** si l'extrémité de  $\vec{E}$  décrit un **cercle**.

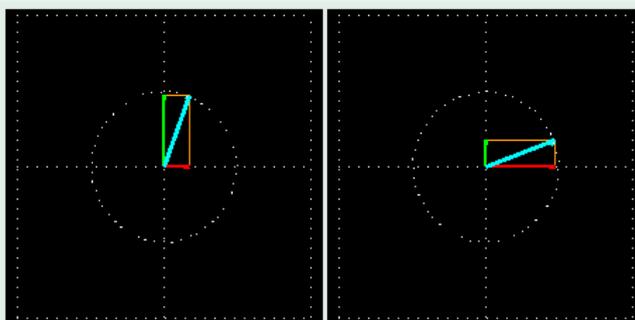
### Important

**Conditions nécessaires** : il faut que les deux composantes aient même amplitude et que l'une soit nulle pendant que l'autre est en extremum, donc qu'elle soit en **quadrature de phase**, c'est-à-dire :

$$E_{0y} = E_{0z} \text{ et } \Delta\varphi = \varphi_{ey} - \varphi_{ez} = \pm\frac{\pi}{2}$$

### Animation

Sur [ce site](https://cddemo.szialab.org/)<sup>a</sup>, on voit l'évolution du vecteur  $\vec{E}$  au cours du temps. Dans la catégorie *Circularly polarized waves*, bien montrer que les composantes du champs en  $y$  et  $z$  sont en quadrature.

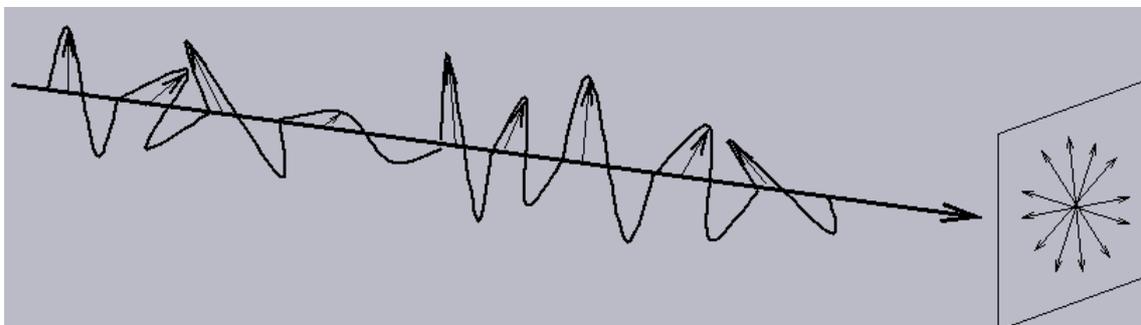


a. <https://cddemo.szialab.org/>

○ *Mais quelle est la polarisation de la lumière dans cette salle ?*

### I.3 Cas de la lumière naturelle

Un faisceau de lumière est donc une superposition d'un grand nombre de trains d'onde de durée très courte et émis constamment de manière aléatoire. Cela signifie que le champ électrique résultant de la superposition de tous ces trains d'onde ayant une direction de polarisation précise, mais jamais la même, a une direction parfaitement aléatoire au cours du temps<sup>75</sup>.



**On dit que la lumière naturelle est non polarisée.**

○ *Comment produit-on une lumière polarisée à partir d'une source non polarisée alors ?*

75. Schéma trouvé par une simple recherche google "polarisation lumière naturelle".

## II Loi de Malus

### II.1 Utilisation d'un polaroïd (polariseur-analyseur)

- On a vu que la lumière naturelle était polarisée aléatoirement, mais on peut la polariser grâce à un polariseur.

#### Définition

Un **polariseur** est un dispositif optique qui ne laisse passer qu'une direction de polarisation de la lumière.

On note cette direction ( $Op$ ), elle dépend de l'orientation du polariseur.

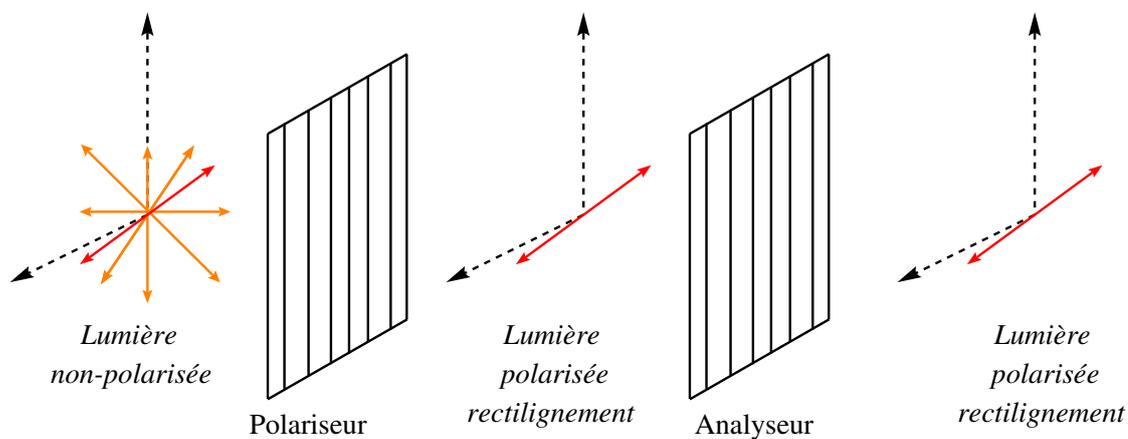
#### Important

Un polariseur fournit une **lumière polarisée rectilignement**.

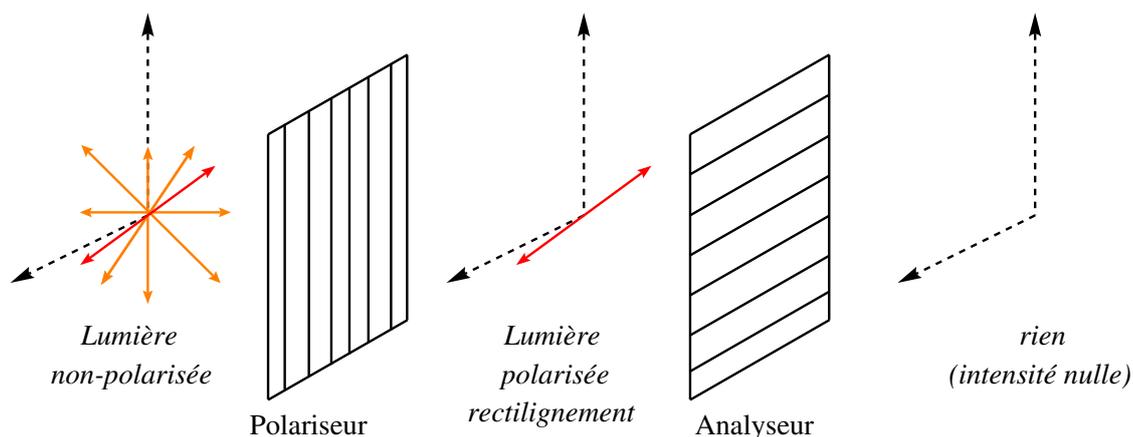
#### Expérience

Faire le montage et montrer qu'on passe par un maximum d'intensité et une extinction.

- Mais comment le vérifier ? On peut le vérifier en plaçant un second polariseur à la suite, que l'on qualifie alors d'**analyseur**.
  - Premier cas : le polariseur et l'analyseur sont alignés.



- Deuxième cas : le polariseur et l'analyseur sont croisés.



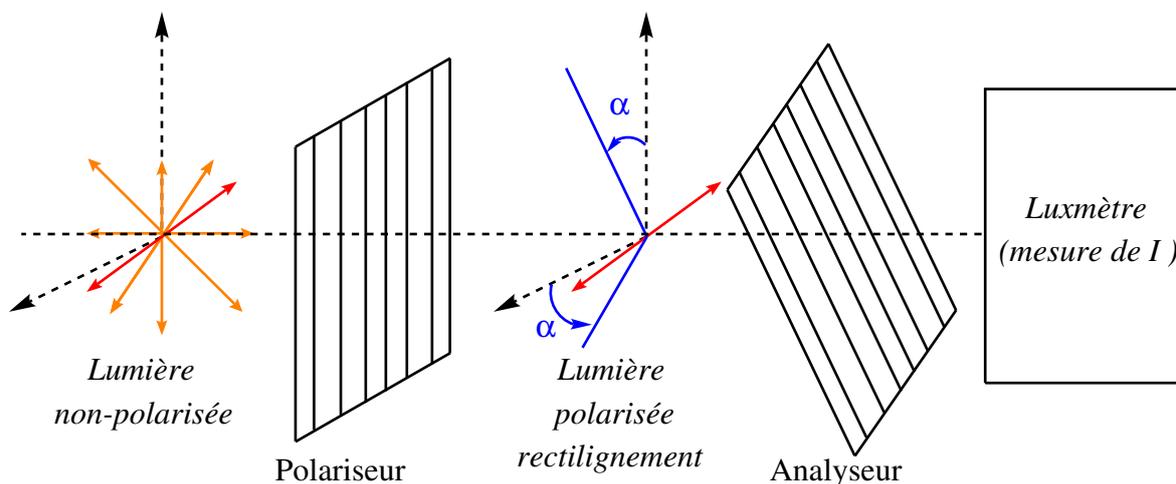
### Animation

Tout ce qui est vu dans cette partie peut être résumé grâce à [cette animation](#), ce qui fait la transition avec la partie suivante en remarquant qu'on peut faire varier l'intensité en sortie de l'analyseur.

○ On a vu qu'il y avait un effet nul sur la polarisation quand les polariseurs sont alignés, et une extinction lorsqu'ils sont croisés. Qu'en est-il entre les deux ?

## II.2 Énoncé de la loi de Malus

En sortie du polariseur, le vecteur champ électrique est orienté différemment, et il s'est orienté d'un angle  $\alpha$  par rapport à la direction initiale. Cet angle  $\alpha$  est l'angle que l'on avait entre la direction du polariseur et l'axe du premier polariseur.



L'intensité lumineuse incidente  $I_0$  et l'intensité lumineuse  $I(\alpha)$  sortant du polariseur s'écrivent respectivement :

$$\begin{aligned}
 - I_0 &= k \langle \|\vec{E}_0\|^2 \rangle \\
 - I(\alpha) &= k \langle \|\vec{E}_0\|^2 \cos^2 \alpha \rangle = \underbrace{k \|\vec{E}_0\|^2}_{=I_0} \cos^2 \alpha
 \end{aligned}$$

### Propriété

Si le polariseur est éclairé avec une lumière incidente polarisée rectilignement, l'intensité passe par un maximum et un **minimum nul** lorsque l'on tourne le polariseur ; on a la **loi de Malus** :

$$I(\alpha) = I_0 \cos^2 \alpha$$

Où  $\alpha$  est l'angle entre la polarisation incidente et la direction passante du polariseur.

Interprétation de la loi (cas limites) :

- Si  $\alpha = 0$ , alors  $I(\alpha) = I_0$  : toute l'intensité a été transmise.
- Si  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , alors  $I(\alpha) = 0$  : rien n'est transmis.

○ *Le plan de polarisation d'une lumière peut être tourné, sous l'effet de substances, qu'on appelle communément les substances optiquement actives.*

## III Pouvoir rotatoire de substances chirales

### Propriété

Les substances chirales possèdent la propriété de faire tourner d'un angle  $\alpha$  le plan de polarisation de la lumière polarisée : elles possèdent un **pouvoir rotatoire**.

### III.1 Loi de Biot

L'angle de déviation  $\alpha$  (aussi appelé **pouvoir rotatoire** du plan de polarisation de la lumière polarisée est proportionnel à la concentration  $C$  en espèce chirale de l'échantillon :

$$\alpha = [\alpha]_{\lambda}^T \cdot l \cdot C \quad (113)$$

Avec :

- $\alpha$  : angle de rotation du plan de polarisation de la lumière polarisée rectilignement ;
- $[\alpha]_{\lambda}^T$  : pouvoir rotatoire spécifique ( $^{\circ} \cdot \text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{dm}^{-1}$ )
- $l$  : longueur de la cuve (dm) ;
- $C$  : concentration de l'espèce chirale ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

○ *Par analogie avec la loi de BEER-LAMBERT, on peut aussi déterminer des concentrations.*

### III.2 Application au contrôle qualité

Détermination de la concentration en saccharose d'une solution.

## Conclusion

- Réponse à la problématique : La polarisation est la direction du champ électrique. Notre oeil n'y est pas sensible, mais il y a un lien avec l'intensité. Montage polariseur/analyseur.

- Ouverture : suivi cinétique d'une réaction aussi, ou encore ouverture sur les cristaux liquides.

### Autre(s) possibilité(s) de plan

- En 30 minutes, il faudra forcément enlever une des deux dernières parties.
- On peut enlever aussi les polarisations elliptique et circulaire, ne traiter que la polarisation rectiligne.

### Questions auxquelles on peut s'attendre

- ☞ Dans le vide,  $\rho(M, t) = 0$  et  $\vec{j}(M, t) = \vec{0}$  donc les équations de MAXWELL s'écrivent de la manière suivante :

$$\operatorname{div} \vec{E}(M, t) = 0 \quad (\text{MG})$$

$$\operatorname{rot} \vec{E}(M, t) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}(M, t) \quad (\text{MF})$$

$$\operatorname{div} \vec{B}(M, t) = 0 \quad (\text{MT})$$

$$\operatorname{rot} \vec{B}(M, t) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}(M, t) \quad (\text{MA})$$

Et c'est (MF) qui nous permet d'écrire que  $\vec{B}$ ,  $\vec{k}$  et  $\vec{E}$  forment un trièdre direct.

- ☞ Se renseigner sur les cristaux liquides ;
- ☞ Se renseigner sur l'angle de BREWSTER ;
- ☞ Se renseigner sur les lames à retard ;
- ☞ Fonctionnement du polarimètre de LAURENT <sup>a</sup>

a. PIARD, J., *Chimie générale expérimentale, Tout pour réussir les TP aux concours*, De Boeck supérieur, 2018., Chapitre 4 page 135

#### PROGRAMME OFFICIEL (BTS) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Pouvoir rotatoire	Mesurer un pouvoir rotatoire afin de déterminer une concentration, d'identifier une espèce chimique, d'effectuer le suivi temporel d'une transformation chimique.
Polarisation rectiligne de la lumière. Activité optique, pouvoir rotatoire	Associer l'activité optique d'une espèce chimique avec la rotation du plan de polarisation d'une onde électromagnétique monochromatique polarisée rectilignement.
Loi de BIOT.	Citer et exploiter la loi de BIOT.

#### PROGRAMME OFFICIEL (PC - PHYSIQUE) :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Polarisation des ondes électromagnétiques planes progressives harmoniques : polarisation elliptique, circulaire et rectiligne.	Relier l'expression du champ électrique à l'état de polarisation d'une onde.
<b>Analyse d'une lumière totalement polarisée. Utiliser une lame quart d'onde ou demi-onde pour modifier ou analyser un état de polarisation, avec de la lumière totalement polarisée.</b>	<b>Reconnaître une lumière non polarisée. Distinguer une lumière non polarisée d'une lumière totalement polarisée.</b>