

**TOUT EN  
FICHES**

**MÉMO VISUEL DE**  
**CHIMIE ORGANIQUE**

**4<sup>e</sup> ÉDITION**

Sous la direction de **Jacques Maddaluno**, directeur de recherche au CNRS (université de Rouen Normandie).

- **Véronique Bellosta**, professeure retraitée de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI Paris-PSL).
- **Isabelle Chataigner**, professeure à l'université de Rouen Normandie.
- **François Couty**, ancien professeur à l'université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines.
- **Anne Harrison-Marchand**, maître de conférences à l'IUT de Rouen.
- **Marie-Claire Lasne**, professeure retraitée de l'université de Caen Normandie.
- **Chrystel Lopin-Bon**, professeure à l'université d'Orléans.
- **Jacques Rouden**, professeur à l'ENSICAEN.

**DUNOD**

Uniformisation des illustrations et mise en page des fiches :  
Bernadette Coléno  
Direction artistique : Nicolas Weil  
Conception graphique de la couverture :  
Élizabeth Riba

**NOUS NOUS ENGAGEONS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT :**



Nos livres sont imprimés sur des papiers certifiés pour réduire notre impact sur l'environnement.



Le format de nos ouvrages est pensé afin d'optimiser l'utilisation du papier.



Depuis plus de 30 ans, nous imprimons 70 % de nos livres en France et 25 % en Europe et nous mettons tout en œuvre pour augmenter cet engagement auprès des imprimeurs français.



Nous limitons l'utilisation du plastique sur nos ouvrages (film sur les couvertures et les livres).

© Dunod, 2015, 2018, 2021, 2024

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-086202-3

|                    |    |
|--------------------|----|
| Avant-propos ..... | IX |
|--------------------|----|

## CHAPITRE 1 – DE L'ATOME AUX MOLÉCULES

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| <b>FICHE 1</b>  | Les éléments et les liaisons chimiques .....                  | 2  |
| <b>FICHE 2</b>  | La liaison hydrogène .....                                    | 3  |
| <b>FICHE 3</b>  | Les liaisons de Van der Waals .....                           | 4  |
| <b>FICHE 4</b>  | La molécule sous toutes ses formes .....                      | 6  |
| <b>FICHE 5</b>  | La géométrie des molécules .....                              | 7  |
| <b>FICHE 6</b>  | La représentation des atomes tétraonaux .....                 | 8  |
| <b>FICHE 7</b>  | Les molécules et les électrons : que d'effets ! .....         | 9  |
| <b>FICHE 8</b>  | L'effet inductif « I » .....                                  | 10 |
| <b>FICHE 9</b>  | L'effet mésomère « M » .....                                  | 11 |
| <b>FICHE 10</b> | Les effets électroniques et la réactivité des molécules ..... | 13 |

## CHAPITRE 2 – DESSINER, NOMMER ET IDENTIFIER LES MOLÉCULES

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| <b>FICHE 11</b> | Les principales classes de composés .....                                | 16 |
| <b>FICHE 12</b> | Les éléments de nomenclature .....                                       | 17 |
| <b>FICHE 13</b> | La construction du nom d'un composé polyfonctionnel .....                | 19 |
| <b>FICHE 14</b> | Quelques noms de molécules à connaître .....                             | 20 |
| <b>FICHE 15</b> | Les différents types d'isomérie .....                                    | 21 |
| <b>FICHE 16</b> | Les conformations des molécules acycliques .....                         | 22 |
| <b>FICHE 17</b> | Les conformations du cyclohexane .....                                   | 23 |
| <b>FICHE 18</b> | Les stéréodescripteurs <i>Z/E</i> , <i>cis/trans</i> et <i>R/S</i> ..... | 25 |
| <b>FICHE 19</b> | Les stéréodescripteurs <i>syn/anti</i> et <i>D/L</i> .....               | 27 |
| <b>FICHE 20</b> | La chiralité et l'activité optique .....                                 | 28 |
| <b>FICHE 21</b> | L'énantiométrie .....  | 29 |
| <b>FICHE 22</b> | La diastéréoisomérie .....   | 30 |
| <b>FICHE 23</b> | De l'importance d'être chiral .....                                      | 31 |
| <b>FICHE 24</b> | La chromatographie .....   | 32 |
| <b>FICHE 25</b> | La RMN : théorie .....   | 33 |
| <b>FICHE 26</b> | Le spectre de RMN <sup>1</sup> H .....                                   | 35 |
| <b>FICHE 27</b> | Les spectroscopies d'absorption UV-visible & IR .....                    | 37 |
| <b>FICHE 28</b> | La spectrométrie de masse .....  | 39 |

## CHAPITRE 3 – LES ACTEURS DE LA RÉACTION

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| <b>FICHE 29</b> | Les acides et les bases .....               | 42 |
| <b>FICHE 30</b> | Les nucléophiles et les électrophiles ..... | 43 |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| <b>FICHE 31</b> | L'oxydo-réduction en chimie organique . . . . .   | 44 |
| <b>FICHE 32</b> | Les principaux oxydants à base d'oxygène. . . . . | 45 |
| <b>FICHE 33</b> | Les réducteurs. . . . .                           | 46 |
| <b>FICHE 34</b> | Les solvants . . . . .                            | 48 |
| <b>FICHE 35</b> | Comment activer une réaction ? . . . . .          | 50 |
| <b>FICHE 36</b> | Le transfert de phase. . . . .                    | 51 |
| <b>FICHE 37</b> | Le déroulé pratique d'une réaction . . . . .      | 52 |

## CHAPITRE 4 – COMPRENDRE LA RÉACTION

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| <b>FICHE 38</b> | Les règles d'écriture des mécanismes . . . . .                | 54 |
| <b>FICHE 39</b> | Les intermédiaires réactionnels: carbocations . . . . .       | 55 |
| <b>FICHE 40</b> | Les intermédiaires réactionnels: carbanions. . . . .          | 56 |
| <b>FICHE 41</b> | Les intermédiaires réactionnels: radicaux . . . . .           | 57 |
| <b>FICHE 42</b> | Les intermédiaires réactionnels: carbènes . . . . .           | 58 |
| <b>FICHE 43</b> | L'étape élémentaire . . . . .                                 | 59 |
| <b>FICHE 44</b> | Les réactions complexes . . . . .                             | 60 |
| <b>FICHE 45</b> | Quelques notions de cinétique . . . . .                       | 61 |
| <b>FICHE 46</b> | L'état de transition . . . . .                                | 62 |
| <b>FICHE 47</b> | La catalyse. . . . .  | 63 |
| <b>FICHE 48</b> | Quelques notions de thermodynamique: les équilibres . . . . . | 64 |
| <b>FICHE 49</b> | Contrôle cinétique/thermodynamique ? . . . . .                | 65 |
| <b>FICHE 50</b> | Les sélectivités en chimie organique. . . . .                 | 66 |

## CHAPITRE 5 – CLASSER LES RÉACTIONS PAR MÉCANISME

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| <b>FICHE 51</b> | Les grands types de réactions . . . . .                      | 68 |
| <b>FICHE 52</b> | L'addition électrophile: le carbocation . . . . .            | 70 |
| <b>FICHE 53</b> | L'addition électrophile: l'ion ponté . . . . .               | 71 |
| <b>FICHE 54</b> | L'addition nucléophile $A_N$ . . . . .                       | 72 |
| <b>FICHE 55</b> | L'addition nucléophile sur systèmes conjugués. . . . .       | 73 |
| <b>FICHE 56</b> | Les additions apolaires <i>syn</i> . . . . .                 | 74 |
| <b>FICHE 57</b> | La cycloaddition de Diels-Alder . . . . .                    | 75 |
| <b>FICHE 58</b> | L'élimination E1 . . . . .                                   | 77 |
| <b>FICHE 59</b> | L'élimination E2 . . . . .                                   | 78 |
| <b>FICHE 60</b> | Les autres types d'élimination 1,2 . . . . .                 | 79 |
| <b>FICHE 61</b> | La substitution nucléophile unimoléculaire: $S_N1$ . . . . . | 80 |
| <b>FICHE 62</b> | La substitution nucléophile bimoléculaire: $S_N2$ . . . . .  | 81 |
| <b>FICHE 63</b> | La comparaison des réactions de $S_N1$ et $S_N2$ . . . . .   | 82 |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| <b>FICHE 64</b> | Les autres substitutions nucléophiles. . . . .              | 83 |
| <b>FICHE 65</b> | L'addition-élimination sur C=C et C=O . . . . .             | 84 |
| <b>FICHE 66</b> | La substitution électrophile aromatique: $S_EAr$ . . . . .  | 85 |
| <b>FICHE 67</b> | La substitution en position alpha du C=O. . . . .           | 86 |
| <b>FICHE 68</b> | Les réactions radicalaires . . . . .                        | 87 |
| <b>FICHE 69</b> | Les réarrangements de carbocations . . . . .                | 88 |
| <b>FICHE 70</b> | Les réarrangements d'autres espèces électrophiles . . . . . | 89 |
| <b>FICHE 71</b> | Les réarrangements sigmatropiques. . . . .                  | 90 |
| <b>FICHE 72</b> | Les réactions d'oxydation . . . . .                         | 91 |
| <b>FICHE 73</b> | Les réactions de réduction. . . . .                         | 93 |

## CHAPITRE 6 – LES HYDROCARBURES

|                 |  |     |
|-----------------|--|-----|
| <b>FICHE 74</b> | Les alcanes. . . . .                                       | 96  |
| <b>FICHE 75</b> | Les alcènes. . . . .                                       | 98  |
| <b>FICHE 76</b> | Les alcènes: hydrohalogénations . . . . .                  | 99  |
| <b>FICHE 77</b> | Les alcènes: dihalogénations . . . . .                     | 100 |
| <b>FICHE 78</b> | Les alcènes: additions de H–OH (hydratation) . . . . .     | 101 |
| <b>FICHE 79</b> | Les alcènes: oxydations douces . . . . .                   | 102 |
| <b>FICHE 80</b> | Les alcènes: oxydations dures. . . . .                     | 103 |
| <b>FICHE 81</b> | Les alcènes: hydrogénation . . . . .                       | 104 |
| <b>FICHE 82</b> | Les diènes et polyènes . . . . .                           | 105 |
| <b>FICHE 83</b> | Les alcynes. . . . .                                       | 106 |
| <b>FICHE 84</b> | La réactivité des alcynes . . . . .                        | 107 |
| <b>FICHE 85</b> | Les alcynes: hydrohalogénations et halogénations . . . . . | 108 |
| <b>FICHE 86</b> | Les alcynes: hydratations et oxydations. . . . .           | 109 |
| <b>FICHE 87</b> | Les alcynes: réductions . . . . .                          | 110 |

## CHAPITRE 7 – LES AROMATIQUES

|                 |  |     |
|-----------------|--|-----|
| <b>FICHE 88</b> | Le benzène et son aromaticité . . . . .                                  | 112 |
| <b>FICHE 89</b> | La substitution électrophile aromatique ( $S_EAr$ ) du benzène . . . . . | 113 |
| <b>FICHE 90</b> | Les effets des substituants sur la $S_EAr$ . . . . .                     | 114 |
| <b>FICHE 91</b> | Les $S_EAr$ sur un benzène déjà substitué . . . . .                      | 115 |
| <b>FICHE 92</b> | Les autres réactions des aromatiques. . . . .                            | 116 |
| <b>FICHE 93</b> | Les hétéroaromatiques . . . . .  | 117 |

## CHAPITRE 8 – LES FONCTIONS MONOVALENTES

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| <b>FICHE 94</b> | Les halogénoalcanes . . . . .               | 120 |
| <b>FICHE 95</b> | La réactivité des halogénoalcanes . . . . . | 121 |

|                  |  |     |
|------------------|--|-----|
| <b>FICHE 96</b>  | Les substitutions nucléophiles des halogénoalcanes . . . . .       | 122 |
| <b>FICHE 97</b>  | Les réactions d'élimination des halogénoalcanes. . . . .           | 123 |
| <b>FICHE 98</b>  | La compétition $S_N/E$ sur les halogénoalcanes . . . . .           | 124 |
| <b>FICHE 99</b>  | Les alcools . . . . .  | 125 |
| <b>FICHE 100</b> | Les alcools : coupure des liaisons O–H ou C–O . . . . .            | 126 |
| <b>FICHE 101</b> | Les alcools : réactivité nucléophile . . . . .                     | 127 |
| <b>FICHE 102</b> | La transformation des alcools en dérivés halogénés. . . . .        | 128 |
| <b>FICHE 103</b> | L'oxydation des alcools . . . . .                                  | 129 |
| <b>FICHE 104</b> | Les polyols . . . . .  | 130 |
| <b>FICHE 105</b> | Les phénols . . . . .  | 131 |
| <b>FICHE 106</b> | Les éther-oxydes. . . . .  | 132 |
| <b>FICHE 107</b> | Les époxydes . . . . .   | 133 |
| <b>FICHE 108</b> | Les thiols. . . . .  | 134 |
| <b>FICHE 109</b> | Les amines . . . . .   | 135 |
| <b>FICHE 110</b> | Les amines : synthèse par création de la liaison C–N . . . . .     | 136 |
| <b>FICHE 111</b> | Les amines : synthèse par réduction de fonctions azotées . . . . . | 137 |
| <b>FICHE 112</b> | Les amines : réactivité . . . . .                                  | 138 |
| <b>FICHE 113</b> | Les anilines. . . . .  | 139 |
| <b>FICHE 114</b> | Les organométalliques polaires. . . . .                            | 140 |
| <b>FICHE 115</b> | La réactivité des organométalliques polaires . . . . .             | 141 |
| <b>FICHE 116</b> | Les organométalliques polaires en synthèse. . . . .                | 142 |

## CHAPITRE 9 – LES FONCTIONS DIVALENTES

|                  |  |     |
|------------------|--|-----|
| <b>FICHE 117</b> | Les aldéhydes et les cétones : généralités. . . . .                          | 144 |
| <b>FICHE 118</b> | Les aldéhydes et les cétones : réactivité . . . . .                          | 145 |
| <b>FICHE 119</b> | Les additions de nucléophiles oxygénés ou soufrés . . . . .                  | 146 |
| <b>FICHE 120</b> | Les additions de nucléophiles azotés. . . . .                                | 147 |
| <b>FICHE 121</b> | Les réactions des amines secondaires avec les aldéhydes et cétones . . . . . | 148 |
| <b>FICHE 122</b> | Les additions d'organométalliques au carbonyle . . . . .                     | 149 |
| <b>FICHE 123</b> | La réaction de Wittig . . . . .  | 150 |
| <b>FICHE 124</b> | Les additions de l'ion cyanure au carbonyle . . . . .                        | 152 |
| <b>FICHE 125</b> | Les réductions des aldéhydes et des cétones . . . . .                        | 153 |
| <b>FICHE 126</b> | Les oxydations des aldéhydes et des cétones . . . . .                        | 154 |
| <b>FICHE 127</b> | La tautomérie céto-énolique . . . . .  | 155 |
| <b>FICHE 128</b> | L'acidité en alpha du carbonyle . . . . .                                    | 156 |
| <b>FICHE 129</b> | La régiosélectivité de l'énolisation . . . . .                               | 157 |
| <b>FICHE 130</b> | L'halogénéation en alpha du carbonyle . . . . .                              | 158 |

|                  |  |     |
|------------------|--|-----|
| <b>FICHE 131</b> | L'alkylation en alpha du carbonyle . . . . . | 159 |
| <b>FICHE 132</b> | L'aldolisation . . . . .                     | 160 |
| <b>FICHE 133</b> | L'aldolisation croisée . . . . .             | 162 |
| <b>FICHE 134</b> | L'addition de Michael . . . . .              | 163 |
| <b>FICHE 135</b> | L'annélation de Robinson . . . . .           | 164 |

## CHAPITRE 10 – LES FONCTIONS TRIVALENTES

|                  |  |     |
|------------------|--|-----|
| <b>FICHE 136</b> | Les fonctions trivalentes : généralités . . . . .            | 166 |
| <b>FICHE 137</b> | Les acides carboxyliques . . . . .                           | 168 |
| <b>FICHE 138</b> | Les halogénures d'acyle et les anhydrides d'acides . . . . . | 170 |
| <b>FICHE 139</b> | La réactivité en position alpha du carboxyle . . . . .       | 171 |
| <b>FICHE 140</b> | La synthèse des esters . . . . .                             | 172 |
| <b>FICHE 141</b> | Les réactions des nucléophiles sur les esters . . . . .      | 173 |
| <b>FICHE 142</b> | Les réactions de condensation des esters . . . . .           | 174 |
| <b>FICHE 143</b> | Les synthèses et propriétés des amides . . . . .             | 175 |
| <b>FICHE 144</b> | La réactivité des amides . . . . .                           | 176 |
| <b>FICHE 145</b> | Les nitriles . . . . .                                       | 177 |
| <b>FICHE 146</b> | Les composés 1,2-dicarbonylés . . . . .                      | 178 |
| <b>FICHE 147</b> | Les composés 1,3-dicarbonylés . . . . .                      | 179 |

## CHAPITRE 11 – LES FONCTIONS TÉTRAVALENTES

|                  |   |     |
|------------------|---|-----|
| <b>FICHE 148</b> | Les principales fonctions tétravalentes . . . . . | 182 |
| <b>FICHE 149</b> | Le dioxyde et le disulfure de carbone . . . . .   | 183 |
| <b>FICHE 150</b> | Le phosgène . . . . .                             | 184 |
| <b>FICHE 151</b> | Les carbamates . . . . .                          | 185 |
| <b>FICHE 152</b> | Les urées . . . . .                               | 186 |

## CHAPITRE 12 – ABORDER LA SYNTHÈSE ORGANIQUE

|                  |  |     |
|------------------|--|-----|
| <b>FICHE 153</b> | La synthèse organique . . . . .                      | 188 |
| <b>FICHE 154</b> | La protection des fonctions . . . . .                | 190 |
| <b>FICHE 155</b> | La rétrosynthèse . . . . .                           | 192 |
| <b>FICHE 156</b> | Les douze principes de la « chimie verte » . . . . . | 194 |
| <b>FICHE 157</b> | La chimie et les ressources renouvelables . . . . .  | 195 |

## CHAPITRE 13 – LES BIOMOLÉCULES

|                  |  |     |
|------------------|--|-----|
| <b>FICHE 158</b> | Les acides alpha-aminés . . . . .                  | 198 |
| <b>FICHE 159</b> | Liste des principaux acides alpha-aminés . . . . . | 199 |

|                  |   |     |
|------------------|---|-----|
| <b>FICHE 160</b> | Les peptides . . . . .                            | 201 |
| <b>FICHE 161</b> | Les protéines . . . . .                           | 202 |
| <b>FICHE 162</b> | Les glucides . . . . .                            | 204 |
| <b>FICHE 163</b> | La représentation des monosaccharides . . . . .   | 205 |
| <b>FICHE 164</b> | Quelques propriétés des monosaccharides . . . . . | 206 |
| <b>FICHE 165</b> | Les polysaccharides . . . . .                     | 208 |
| <b>FICHE 166</b> | Les glucides azotés . . . . .                     | 209 |
| <b>FICHE 167</b> | La composition des acides nucléiques . . . . .    | 210 |
| <b>FICHE 168</b> | Les acides nucléiques : l'ADN . . . . .           | 211 |
| <b>FICHE 169</b> | Les acides nucléiques : l'ARN . . . . .           | 212 |
| <b>FICHE 170</b> | Les acides gras . . . . .                         | 213 |
| <b>FICHE 171</b> | Les lipides saponifiables simples . . . . .       | 215 |
| <b>FICHE 172</b> | Les lipides saponifiables complexes . . . . .     | 216 |
| <b>FICHE 173</b> | Les terpènes . . . . .                            | 217 |
| <b>FICHE 174</b> | Le cholestérol et les stéroïdes . . . . .         | 218 |
| <b>FICHE 175</b> | Les alcaloïdes . . . . .                          | 220 |
| <b>FICHE 176</b> | Les enzymes, secrets de la vie . . . . .          | 221 |
| <b>FICHE 177</b> | Un exemple de chimie organique in vivo . . . . .  | 222 |

## CHAPITRE 14 – LA CHIMIE INDUSTRIELLE

|                  |   |     |
|------------------|---|-----|
| <b>FICHE 178</b> | La chimie organique industrielle . . . . .                | 224 |
| <b>FICHE 179</b> | La chimie de base . . . . .                               | 225 |
| <b>FICHE 180</b> | Les principales transformations de l'éthylène . . . . .   | 226 |
| <b>FICHE 181</b> | Le propène . . . . .                                      | 227 |
| <b>FICHE 182</b> | Quelques transformations du monoxyde de carbone . . . . . | 228 |
| <b>FICHE 183</b> | Le benzène et quelques dérivés . . . . .                  | 229 |
| <b>FICHE 184</b> | L'industrie des dérivés azotés . . . . .                  | 230 |
| <b>FICHE 185</b> | Les polymères organiques . . . . .                        | 231 |
| <b>FICHE 186</b> | Les réactions de polymérisation . . . . .                 | 233 |
| <b>FICHE 187</b> | Quelques applications en agrochimie . . . . .             | 235 |
| <b>FICHE 188</b> | Exemples de parfums et cosmétiques . . . . .              | 236 |

|  |     |
|--|-----|
| Tables des énergies et longueurs de liaisons . . . . . | 237 |
| pKa de quelques couples acides/bases . . . . .         | 238 |
| conjuguées en solution aqueuse à 298 K . . . . .       | 238 |
| Index . . . . .  | 239 |
| Crédits photographiques . . . . .                      | 245 |



« L'intelligence ? Une question de chimie organique, rien de plus. On n'est pas plus responsable d'être intelligent que d'être bête. »

Paul Léautaud, 1926

Au cœur donc de notre pensée, la chimie organique est néanmoins déconsidérée par la plupart des étudiants des premiers cycles universitaires qui la trouvent rébarbative et pleine de difficultés sournoises. Selon eux, cette matière à apprendre par cœur pour les examens n'aurait qu'un seul intérêt : celui de pouvoir être oublié dès l'été arrivé... Les enseignants-chercheurs des cinq établissements qui ont rédigé cet ouvrage ne sont pas de cet avis. Et ils mettent tout en œuvre pour convaincre, chaque année, leurs étudiants du caractère exceptionnellement créatif de cette science, en évolution permanente.

La quatrième édition du *Mémo Visuel de Chimie organique*, joliment illustrée, profite de leur intuition pédagogique. Les auteurs n'ont gardé, dans ce livre, que l'essentiel de ce qu'il faut savoir sur les molécules, même les plus complexes, et sur la façon dont elles interagissent. Leur ambition est de montrer au lecteur que quelques idées claires, exprimées simplement, peuvent donner tout son sens à une formule chimique, sans avoir auparavant assimilé plusieurs volumes encyclopédiques.

Il ne s'agit pourtant pas d'un apprentissage au rabais car les principes présentés ici sont les mêmes que ceux sur lesquels les cours plus complets de chimie organique reposent. Peut-on vraiment faire passer l'essentiel du message sous une forme ainsi condensée ? Les auteurs ont pris ce pari en faisant d'abord un rappel des fondamentaux de la physico-chimie puis en décrivant les grandes classes de réactions, avant d'adopter un plan basé sur la réactivité par fonction chimique. Ce voyage s'achève avec les biomolécules et la chimie industrielle, et montre au lecteur à quel point la chimie organique est un des principaux ressorts du monde qui nous entoure.

La lecture des 188 fiches de cette quatrième édition est facilitée par une belle iconographie qui rend palpables, et parfois humoristiques, les concepts ou les applications de chaque chapitre. Les auteurs ont donc tenté de proposer une description « mémovisuelle » de la chimie organique en associant au texte une image (parfois une icône) de référence.

Ce livre est finalement conçu comme un outil de révision dans lequel sont synthétisées les notions développées dans deux ouvrages compagnons des mêmes auteurs. Le premier est un cours complet *Le cours de chimie organique* (Dunod, 4<sup>e</sup> édition, 2023) alors que le second *Chimie organique, exercices et méthodes* (Dunod, 2017) propose de passer à la pratique en exerçant son savoir. D'un niveau scientifique correspondant au programme de Licence (1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> années, IUT), le *Mémo Visuel de Chimie organique* permettra également aux étudiants de l'enseignement, des professions médicales et paramédicales ou des classes préparatoires aux grandes écoles, de revenir rapidement sur les notions essentielles dont ils ont besoin pour préparer les concours.

Pour terminer, nous tenons à rendre un hommage tout particulier à notre regretté collègue, le Pr. François Couty, co-auteur enthousiaste qui a participé aux deux premières éditions de cet ouvrage. S'il nous a hélas quittés le 22 mai 2019, il restera au cœur de nos mémoires et sa contribution aux pages qui suivent est un sourire qu'il nous adresse par-delà le temps qui passe.



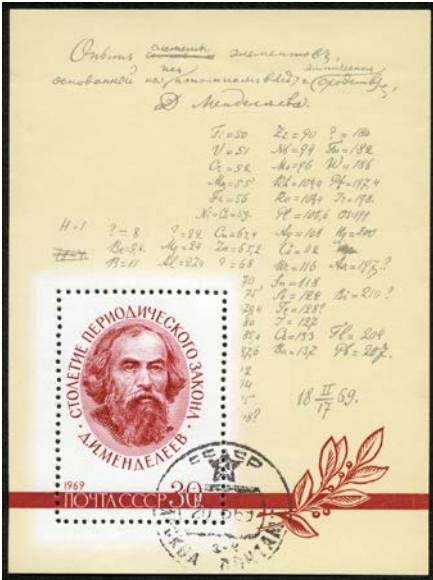


1

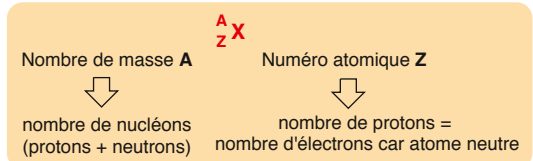
DE L'ATOME  
AUX MOLÉCULES

## LES ÉLÉMENTS ET LES LIAISONS CHIMIQUES

### ► Les éléments chimiques : classification de Mendeleïev



Une première classification de Dmitri Mendeleïev



#### Éléments les plus fréquents en chimie organique

|   |    |          |    |   |   |    |           |
|---|----|----------|----|---|---|----|-----------|
| <b>H</b>                                      |    |          |    |   |   |    | <b>He</b> |
| Li  | B  | <b>C</b> | N  | O | F | Ne |           |
| Na  | Mg | Al       | Si | P | S | Cl | Ar        |
| K   |    |          |    |   |   | Br | Kr        |
| ...   |    |          |    |   |   | I  | Xe        |
|   |    |          |    |   |   |    | gaz rares |
| 1   | 2  | 3        | 4  | 5 | 6 | 7  | (2) 8     |
| Nombre d'électrons de valence (périphériques) |    |          |    |   |   |    |           |

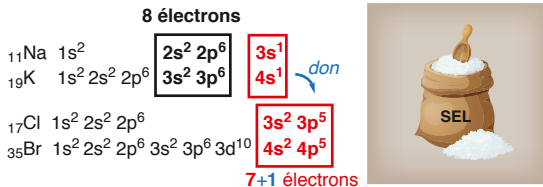
Les électrons d'un élément chimique se répartissent autour du noyau dans des couches. Les plus éloignés du noyau sont appelés **électrons périphériques** ou **électrons de valence**.

### ► Les liaisons chimiques

Les éléments de numéro atomique  $Z > 4$  tendent à acquérir huit électrons (octet : configuration électronique des gaz rares) sur leur couche périphérique pour gagner en stabilité. Pour cela, ils cèdent ou partagent des électrons avec d'autres atomes, donnant lieu à des « **liaisons chimiques** ».

#### La liaison ionique

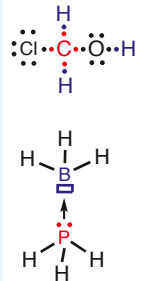
La liaison ionique est formée à partir de deux atomes présentant des électronégativités très différentes. Un élément perd ses électrons périphériques pour s'entourer des huit électrons de la couche précédente. Ces électrons sont récupérés par un élément à qui il en manque (exemple : NaCl).



#### La liaison covalente

Dans la liaison covalente, deux atomes mettent en commun deux électrons. Deux cas sont possibles :

- chaque atome contribue à la formation de la liaison en fournissant un électron ;
- un atome fournit deux électrons non liants à la lacune électronique d'un autre atome formant ainsi une liaison covalente de coordination aussi appelée liaison dative.

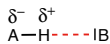


Une liaison hydrogène est une interaction dipôle-dipôle entre un atome d'hydrogène lié à un atome fortement électronégatif et un autre atome électronégatif porteur d'un doublet électronique non liant (O, N, F). Lorsque ce type d'interaction s'établit entre molécules du même type, cela se traduit par :

- un accroissement de la température de fusion ou d'ébullition du composé ;
- la solubilité dans l'eau de molécules possédant des « hydrogènes mobiles » (sucres par exemple) ;
- l'augmentation de l'énergie de cohésion et donc de la résistance d'un matériau moléculaire (polymère).

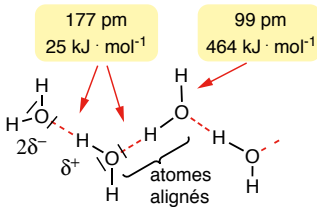
atome très électronégatif  
(F, O, N, Cl... mais pas C)

atome possédant  
un doublet non liant (N, O, F...)

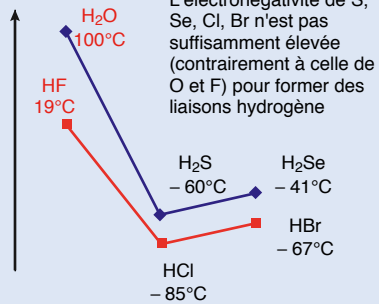


**Liaisons hydrogène**

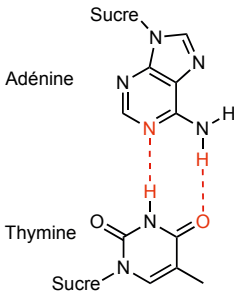
Dans l'eau



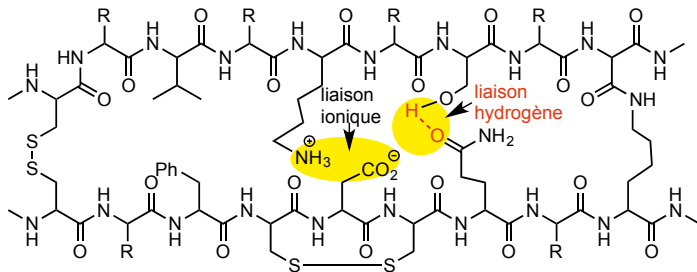
**Comparaison de quelques points d'ébullition**



Dans les bases azotées de l'ADN



Dans la fibre de laine



Dans la fibre de laine, des liaisons hydrogène se forment entre la fonction alcool de la sérine ou de la thréonine et l'atome d'oxygène d'un groupement C=O de la glutamine. Si un vêtement en laine est lavé à trop haute température, les liaisons hydrogène sont rompues, ce qui engendre une perte de l'élasticité des fibres et une déformation de la matière.

# FICHE 3

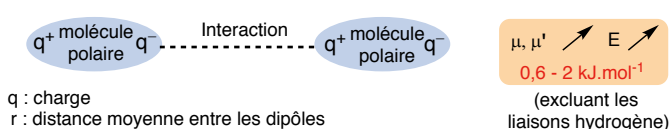
## LES LIAISONS DE VAN DER WAALS (1)

De nombreuses observations expérimentales traduisent l'existence d'interactions entre molécules (températures de changements d'état, solubilités...). Les forces de Van der Waals caractérisent des liaisons « intermoléculaires » de faible énergie ayant lieu à courtes distances entre atomes et/ou molécules.

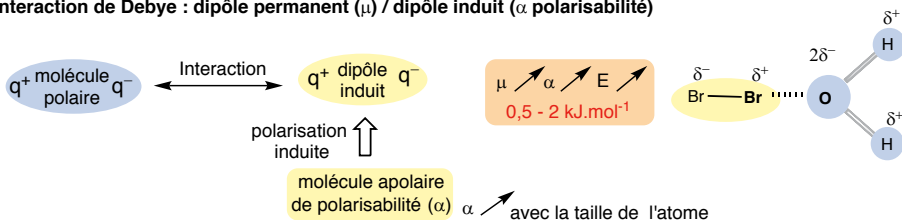
### ► Les différents types d'interactions et leurs conséquences

#### Interaction de Keesom : dipôle permanent ( $\mu$ ) / dipôle permanent ( $\mu'$ )

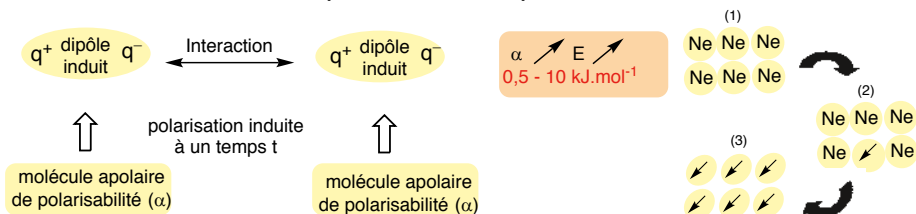
Molécule polaire = possède un moment dipolaire  $\mu$   $\ominus \leftarrow \mu \rightarrow \ominus$   $\mu = q \times r$



#### Interaction de Debye : dipôle permanent ( $\mu$ ) / dipôle induit ( $\alpha$ polarisabilité)



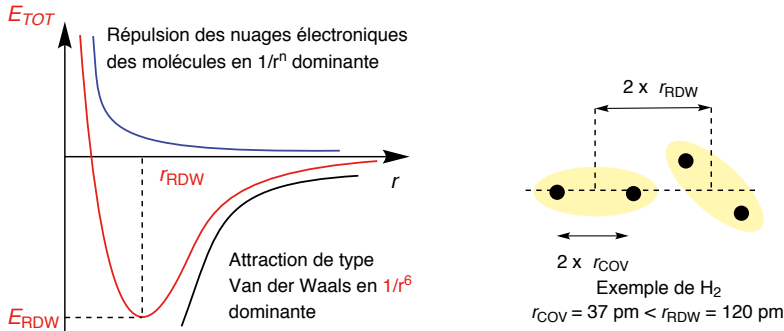
#### Interaction de London : molécules apolaires / molécules apolaires



L'effet Keesom est prédominant pour les molécules très polaires. Pour les molécules peu polaires ou apolaires, l'effet London devient plus important, l'effet de Debye étant en général très faible.

**Le rayon de Van der Waals** ( $r_{VDW}$ ) est défini comme la distance à laquelle l'énergie totale d'interaction répulsive entre les nuages électroniques des molécules est minimale. Le  $r_{VDW}$  est supérieur au rayon de covalence ( $r_{COV}$ ) de l'élément (moitié de la distance entre deux noyaux atomiques identiques reliés par une liaison covalente).

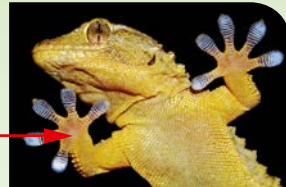
## LES LIAISONS DE VAN DER WAALS (2)



Les changements d'état (fusion, ébullition...) et la solubilité sont directement liés aux forces de Van der Waals. Les températures et enthalpies de changement d'état sont d'autant plus élevées que les interactions sont intenses.

### Les forces de Van der Waals dans la vie courante

Dans la nature, les forces de Van der Waals jouent un rôle crucial dans les phénomènes d'adhésion. Elles contribuent, par exemple, à la capacité des geckos (petit lézards) à grimper à très grande vitesse sur des surfaces verticales, lisses et des plafonds de natures très différentes. Les cinq doigts de chaque patte sont tapissés de « sétules » (micropoils de kératine). À l'extrémité de chaque sétule, se trouvent des centaines de structures plus petites, les « spatules », de diamètre inférieur à 200 nm. Cette structure nanométrique permet de créer avec la surface des interactions de Van der Waals.



Gecko

Ces mêmes liaisons sont à l'origine de l'adhésion extraordinaire sur des parois de l'araignée *Evarcha arcuata*. Celle-ci pourrait en effet porter plus de 170 fois son propre poids corporel tout en se tenant au plafond.



*Evarcha arcuata*



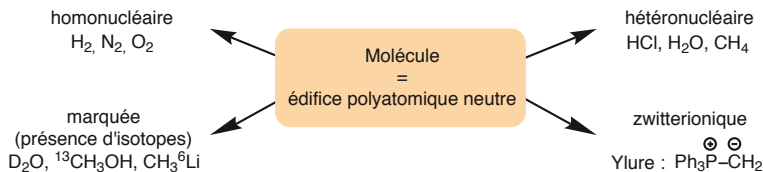
Et dans la vie quotidienne, chaque fois que l'on utilise un post-it, ce petit papier jaune autoadhésif, né dans les années 1970, nous mettons en jeu des forces de Van der Waals.



Le mécanisme de filtration qui permet aux porteurs de masques chirurgicaux (ou FFP2) d'être protégés d'une contamination virale (Covid-19 par exemple) n'est pas un simple effet de tamis. Il met en effet en jeu des forces de Van der Waals grâce auxquelles les particules se collent durablement sur les filaments de la microfibre.

# FICHE 4

## LA MOLÉCULE SOUS TOUTES SES FORMES



Une molécule « organique » contient au moins un atome de carbone.

### ► Formules au choix !

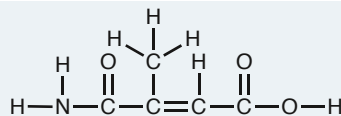
#### La formule « brute »

renseigne uniquement sur le type et le nombre d'atomes constituant la molécule en listant d'abord les C et H (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>...) puis les autres atomes (hétéroatomes) par ordre alphabétique de symbole.



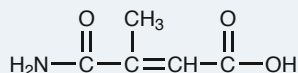
#### La formule « développée plane »

identifie les groupes d'atomes constitutifs de la molécule et le type de liaisons qui les relient en représentant tous les atomes et toutes les liaisons dans un plan.



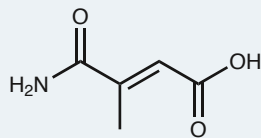
#### La formule « semi-développée »

simplifie la formule développée plane en ne représentant plus les liaisons carbone-hydrogène et hétéroatome-hydrogène.



#### La formule « développée plane topologique »

représente, dans un plan, les liaisons par des traits (simple, double ou triple selon la nature de la liaison) disposés en zigzag (liaisons simples et doubles) dont chaque extrémité correspond à un atome de carbone si aucun autre type d'atome n'est spécifié. Les atomes d'hydrogène sont omis, sauf s'ils sont liés à un atome de carbone fonctionnel (ex : CHO) ou à un hétéroatome (ex : OH, NH<sub>2</sub>).



### ► Quelle classe ?

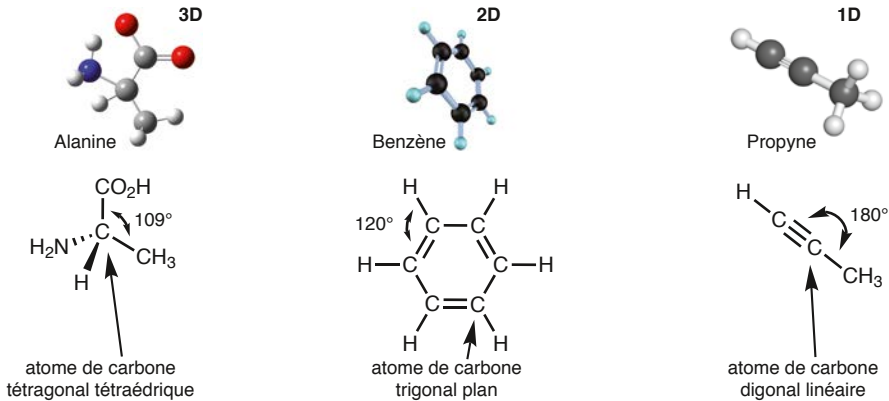
| les molécules<br>acycliques linéaires<br>ou ramifiées | les molécules « cycliques » |                 | les molécules<br>saturées | les molécules<br>insaturées | les molécules<br>aromatiques<br>(contraire : aliphatiques) |
|---|-----------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|--|
|   | carbocycliques              | hétérocycliques |                           |                             |  |
| <br>n-butane  | <br>cyclohexane             | <br>pipéridine  | <br>n-pentane             | <br>butadiène               | <br>benzène  |



## LA GÉOMÉTRIE DES MOLÉCULES

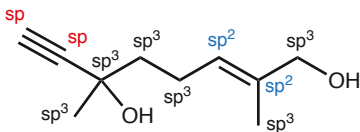
La géométrie des molécules organiques est corrélée à celle des différents atomes et en particulier des atomes de carbone qui les constituent. En effet, celui-ci peut être :

- **tétraédrique** (lié à quatre atomes uniquement via des liaisons covalentes simples) ;
- **trigonal plan** (lié à trois atomes, l'une des liaisons étant double) ;
- **digonal linéaire** (lié à deux atomes, l'une des liaisons étant triple ou les deux liaisons étant doubles).



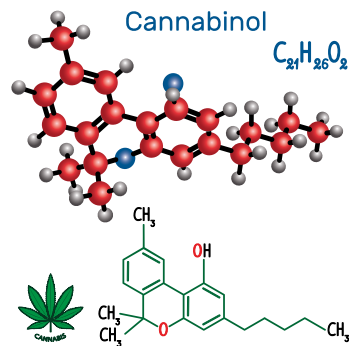
Une théorie mathématique, proposée par Linus Pauling, et appelée « théorie de l'hybridation des orbitales » attribue les dénominations :

- $sp^3$  pour l'élément de géométrie tétraédrique ;
- $sp^2$  pour l'élément de géométrie trigonale plane ;
- $sp$  pour l'élément de géométrie digonale linéaire.



2,6-Diméthyl-oct-2-én-7-yn-1,6-diol

La structure moléculaire détermine plusieurs propriétés d'une substance, dont sa réactivité, sa polarité, sa phase, sa couleur et son activité biologique. Elle est établie grâce à différentes techniques spectroscopiques telles que l'infrarouge (IR), la résonance magnétique nucléaire (RMN), l'ultraviolet (UV), la spectrométrie de masse (SM) ou la diffraction de rayons X (RX). Les géométries peuvent être également calculées par des méthodes de chimie quantique.



Exemple d'une représentation sur papier et dans l'espace d'une molécule complexe : le cannabidiol ou CBD.

# FICHE 6

## LA REPRÉSENTATION DES ATOMES TÉTRAGONAUX

Pour les molécules organiques qui occupent un espace à trois dimensions (éléments à géométrie tétragonale tétraédrique), des modèles de représentation ont été définis pour rendre compte au mieux de la géométrie 3D sur un support (feuille, tableau) limité à seulement deux dimensions.

### ► Représentation de Cram



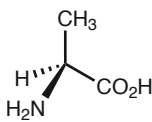
Deux liaisons en trait plein dans le plan de la feuille selon un angle de  $120^\circ$  (vraie valeur =  $109^\circ$ ).



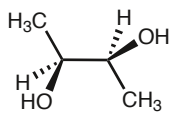
Une liaison en triangle plein = liaison en avant du plan de la feuille.



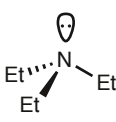
Une liaison en triangle hachuré = liaison en arrière du plan de la feuille.



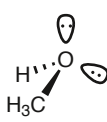
Alanine



Butane-2,3-diol



Triéthylamine



Méthanol

Un doublet non liant (dnl) peut aussi occuper une direction

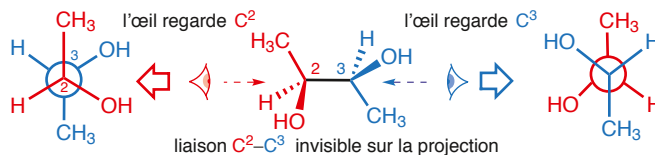
### ► Projection de Newman

Départ : molécule en représentation de Cram

Placer un œil dans l'axe de la liaison à projeter (ex :  $C^2-C^3$ ).

Projeter l'atome le premier rencontré par l'œil tel qu'il est vu (ce qui est en haut, en haut, ce qui est à droite, à droite, etc.)

Le 2<sup>e</sup> atome est représenté par un cercle centré sur le premier atome et les liaisons sont projetées dans le plan comme pour le 1<sup>er</sup> atome.



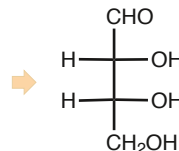
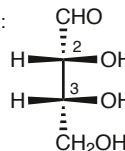
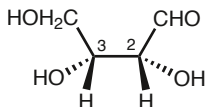
### ► Représentation de Fischer

Départ : molécule en représentation de Cram en conformation éclipsée.

La chaîne carbonée la plus longue est placée verticalement, avec à l'arrière :  
- en haut, le groupe le plus oxydé ;  
- en bas, le groupe le moins oxydé.

La liaison  $C^2-C^3$  est dans le plan.

Les substituants de la chaîne carbonée sont placés horizontalement à l'avant.



## LES MOLÉCULES ET LES ÉLECTRONS : QUE D'EFFETS !

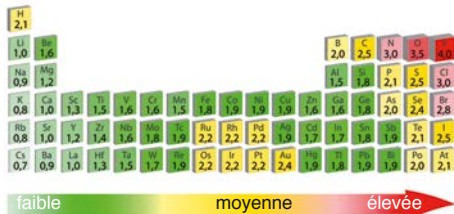
Les électrons ont un rôle majeur en chimie organique :

- ils sont à l'origine de la formation des liaisons entre atomes pour conduire aux molécules ;
- une fois les molécules formées, ils sont impliqués dans leur réactivité.

Bien qu'appariés sous forme de doublets liants (liaisons) ou de doublets non-liants (dnl), l'ensemble des électrons d'une molécule correspond à un nuage électronique, capable de se déformer, traduisant ainsi une capacité de mouvance des électrons au sein même des structures moléculaires. De multiples effets sont à l'origine de ces délocalisations électroniques.

### ► L'électronégativité des atomes : conséquences sur la liaison

L'électronégativité d'un atome, notée  $\chi$ , caractérise l'aptitude de celui-ci à attirer les électrons. La classification périodique des éléments rend compte de cet effet :  $\chi$  croît de gauche à droite, de bas en haut.



La différence d'électronégativité  $\Delta\chi$  entre atomes détermine la **nature des liaisons chimiques** : covalent <  $\Delta\chi = 1,7$  < ionique.

La différence d'électronégativité entre atomes engendre la polarisation d'une liaison : notion de charges partielles.

De  $\chi$  résultent les **effets inductifs I**.

liaison covalente



$$\Delta\chi = 1$$

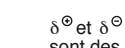
liaison ionique



$$\Delta\chi = 3$$



$$(\Delta\chi = 0,3)$$



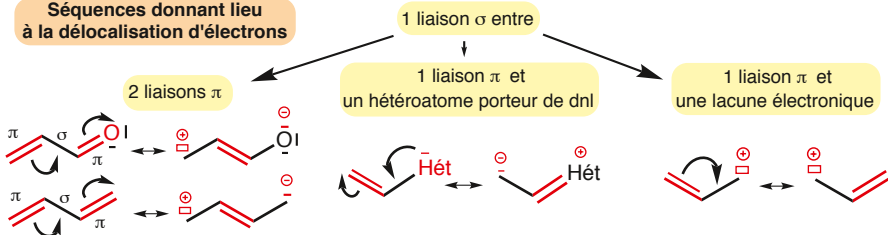
sont des charges partielles

(Fiche 8)

### ► La liaison chimique délocalisée

Certains enchaînements favorisent la délocalisation des électrons et donnent lieu, pour une même molécule, à plusieurs formules de Lewis appelées **formules mésomères**. Celles-ci sont séparées par une flèche droite à double pointe. La structure réelle est une forme pondérée de ces différentes formules.

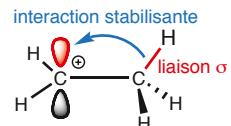
**Séquences donnant lieu à la délocalisation d'électrons**



### ► L'hyperconjugaison

L'hyperconjugaison est une interaction électronique stabilisante entre une liaison simple et une lacune électronique adjacente.

L'hyperconjugaison justifie la stabilisation de carbocations (ou de radicaux) par des atomes d'hydrogène ou groupes alkyles vicinaux, voire, est à l'origine de réarrangements de carbocations.

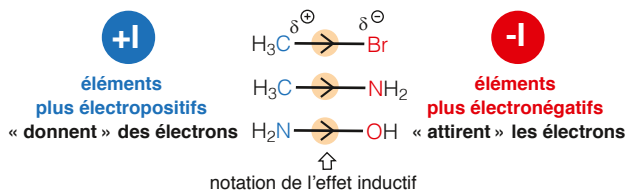


# FICHE 8

## L'EFFET INDUCTIF « I »

L'effet inductif « I » traduit le déplacement d'électrons au travers des liaisons sigma. Il est la conséquence directe de la différence d'électronégativité entre deux atomes ou groupes d'atomes.

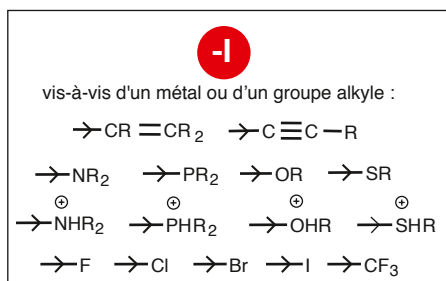
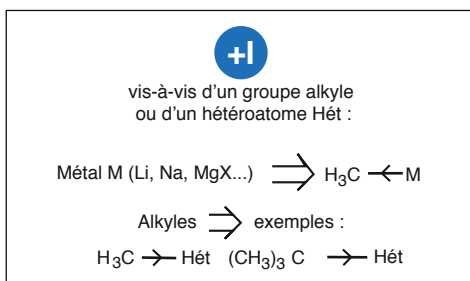
- les atomes plus électronégatifs attirent les électrons : effet électroattracteur -I ;
- les atomes plus électropositifs donnent des électrons : effet électrodonneur +I.



L'effet inductif est relatif et nécessite de choisir un atome de référence (notion de « vis-à-vis »).

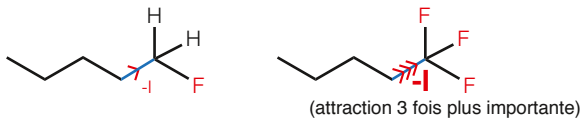
Par définition, l'atome d'hydrogène n'a pas d'effet inductif.

### Les grandes tendances de l'effet inductif

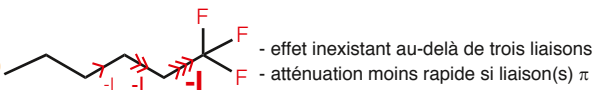


### Particularités et limites de l'effet inductif

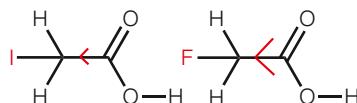
Additivité de l'effet



Atténuation rapide le long des liaisons  $\sigma$



Effet -I d'autant plus important que l'atome est plus électronégatif



L'acidité d'un acide organique est d'autant plus forte que l'effet -I est élevé :