

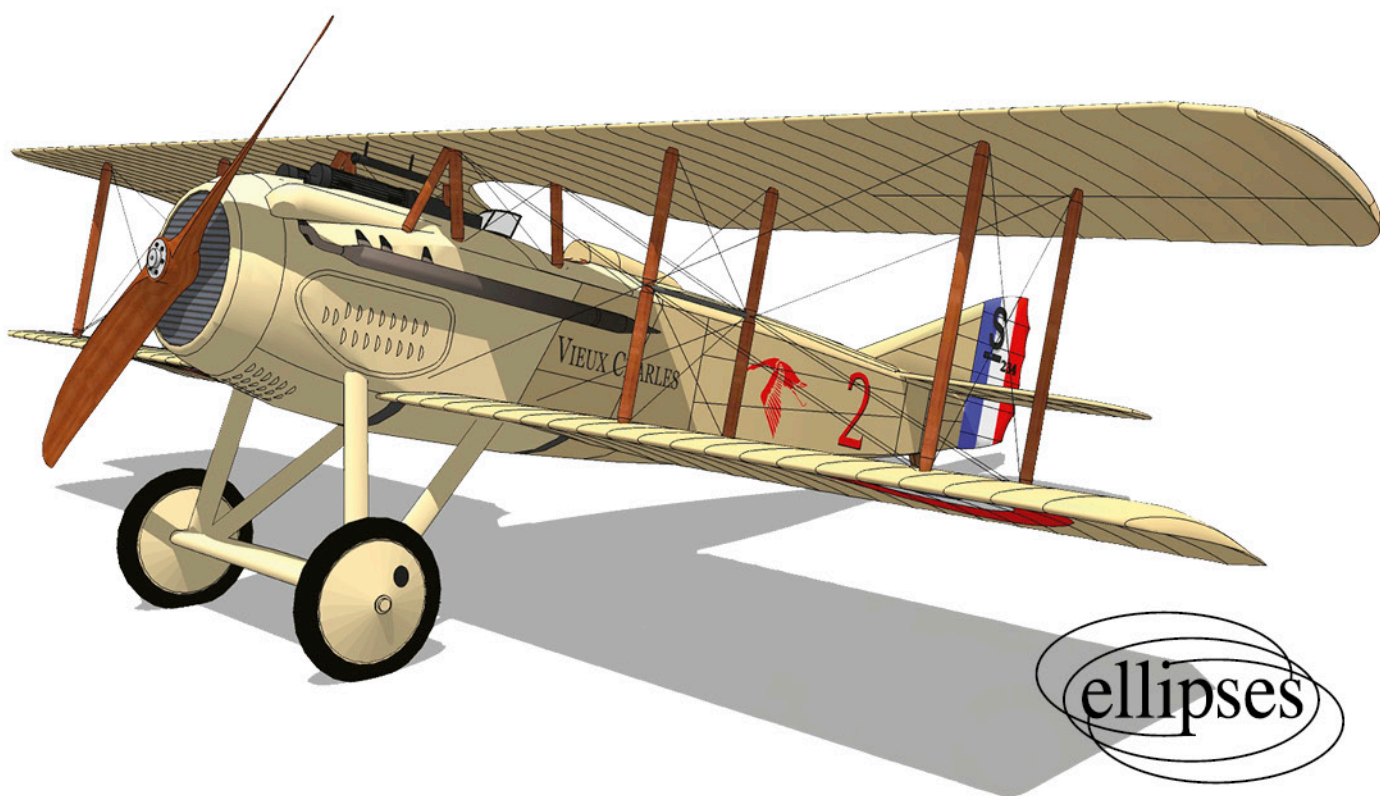
Jean-Christophe Bonnefoy

# Cap sur le B.I.A.

Brevet d'Initiation à l'Aéronautique

L'essentiel en 115 fiches

QCM corrigés, annales



ellipses

# Cap sur le B.I.A.

Brevet d'Initiation à l'Aéronautique



Références sciences

# Cap sur le B.I.A.

Brevet d'Initiation à l'Aéronautique

L'essentiel en 115 fiches

QCM corrigés, annales

Jean-Christophe Bonnefoy

*Formateur B.I.A.*

*Enseignant en mathématiques et sciences informatiques*

*Ingénieur CPE Lyon*





# Collection Références sciences

dirigée par Paul de Laboulaye  
paul.delaboulaye@editions-ellipses.fr

*Retrouvez tous les livres de la collection et des extraits sur [www.editions-ellipses.fr](http://www.editions-ellipses.fr)*



L'illustration de la couverture est de Serge Desmet / Wikipédia.

ISBN 9782340-114753

Dépôt légal : mai 2026

©Ellipses Édition Marketing S.A.

8/10 rue la Quintinie 75015 Paris



Le Code de la propriété intellectuelle et artistique n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

[www.editions-ellipses.fr](http://www.editions-ellipses.fr)

*À Pierre,*



# Avant-propos

---

Chers futurs candidats au Brevet d'Initiation Aéronautique (BIA) ou au Certificat d'Apptitude à l'Enseignement Aéronautique (CAEA), ou tout simplement passionné d'aéronautique désireux d'appréhender les notions essentielles d'aéronautique.

C'est avec un immense plaisir que je vous présente ce recueil de connaissances aéronautiques, spécialement conçu pour vous accompagner dans la préparation au B.I.A. et au C.A.E.A. Au fil de ces pages, vous découvrirez des fiches synthétiques soigneusement élaborées, et structurées suivant les cinq thèmes fondamentaux du programme officiel. La Fédération Française d'Aéronautique (FFA) a mis en œuvre, depuis maintenant plusieurs années, une politique volontariste tournée vers l'environnement et la protection de la Planète. Il est donc normal que ces fiches soient enrichies d'un contenu environnemental. Cet apport provient essentiellement du travail de l'association AAA (Aérien Ambassadeurs Avenir), de Cap sur l'avenir, de l'aéro-club de France et de la FFA.

L'aéronautique, domaine fascinant et en perpétuelle évolution, suscite une curiosité naturelle chez ceux qui aspirent à comprendre les mystères du vol. Que vous soyez des passionnés d'aviation en herbe ou des futurs enseignants désireux de transmettre cette passion, ce livre a été pensé pour répondre à vos attentes.

Chaque fiche ouvre une fenêtre sur le monde passionnant de l'aéronautique. Elle aborde avec clarté et concision les grands domaines du secteur : la météorologie, les aéronefs, les principes de vol, la navigation, la réglementation aérienne ainsi que l'histoire de l'aéronautique et du spatial.

J'ai voulu rendre ce livre accessible à tous, en structurant les informations de manière à faciliter votre apprentissage. Que vous soyez en pleine révision, en quête de nouvelles connaissances ou en préparation intensive pour les examens, ces fiches vous accompagneront avec efficacité.

Parce que la passion pour l'aéronautique se partage, j'espère que ce livre deviendra votre compagnon de route tout au long de votre parcours d'apprentissage. Qu'il suscite en vous l'enthousiasme, l'émerveillement et l'envie d'approfondir vos connaissances dans ce domaine exceptionnel.

Bonne lecture, et que ces pages vous guident vers le succès dans votre quête de connaissances aéronautiques.

Bien à vous dans le ciel de la connaissance.



# Table des matières

---

|                                                                  |               |
|------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>GÉNÉRALITÉS</b>                                               | <b>13</b>     |
| 1 Le B.I.A. . . . .                                              | 14            |
| 2 Le C.A.E.A. . . . .                                            | 16            |
| 3 L'O.A.C.I. . . . .                                             | 18            |
| 4 Les unités . . . . .                                           | 19            |
| <br><b>1<sup>re</sup> PARTIE : Météorologie &amp; aérologie</b>  | <br><b>21</b> |
| 5 L'atmosphère . . . . .                                         | 22            |
| 6 La température . . . . .                                       | 25            |
| 7 La pression atmosphérique . . . . .                            | 27            |
| 8 L'eau dans l'atmosphère . . . . .                              | 31            |
| 9 Les nuages . . . . .                                           | 33            |
| 10 Les précipitations . . . . .                                  | 36            |
| 11 Le vent . . . . .                                             | 38            |
| 12 Les brises . . . . .                                          | 42            |
| 13 Circulation générale des masses d'air . . . . .               | 44            |
| 14 Frontologie . . . . .                                         | 47            |
| 15 Brume et brouillard . . . . .                                 | 48            |
| 16 Le givre . . . . .                                            | 50            |
| 17 L'orage . . . . .                                             | 52            |
| 18 La carte TEMSI . . . . .                                      | 54            |
| 19 La carte WINTEN . . . . .                                     | 56            |
| 20 L'information météo . . . . .                                 | 58            |
| 21 English Vocabulary . . . . .                                  | 65            |
| <br><b>2<sup>e</sup> PARTIE : Aéronefs &amp; engins spatiaux</b> | <br><b>67</b> |
| 22 Classification des aéronefs . . . . .                         | 68            |
| 23 Le drone . . . . .                                            | 70            |
| 24 Nomenclature générale . . . . .                               | 73            |
| 25 Véhicules aérospatiaux et spatiaux . . . . .                  | 76            |
| 26 Structure de la cellule . . . . .                             | 79            |
| 27 Le fuselage . . . . .                                         | 82            |
| 28 La voilure . . . . .                                          | 85            |
| 29 L'empennage et les gouvernes . . . . .                        | 91            |
| 30 Le train d'atterrissage . . . . .                             | 96            |
| 31 Les propulseurs . . . . .                                     | 98            |
| 32 L'hélice . . . . .                                            | 99            |
| 33 Le moteur à pistons . . . . .                                 | 102           |
| 34 Le moteur à 4 temps . . . . .                                 | 103           |
| 35 Le circuit carburant et les autres circuits . . . . .         | 104           |

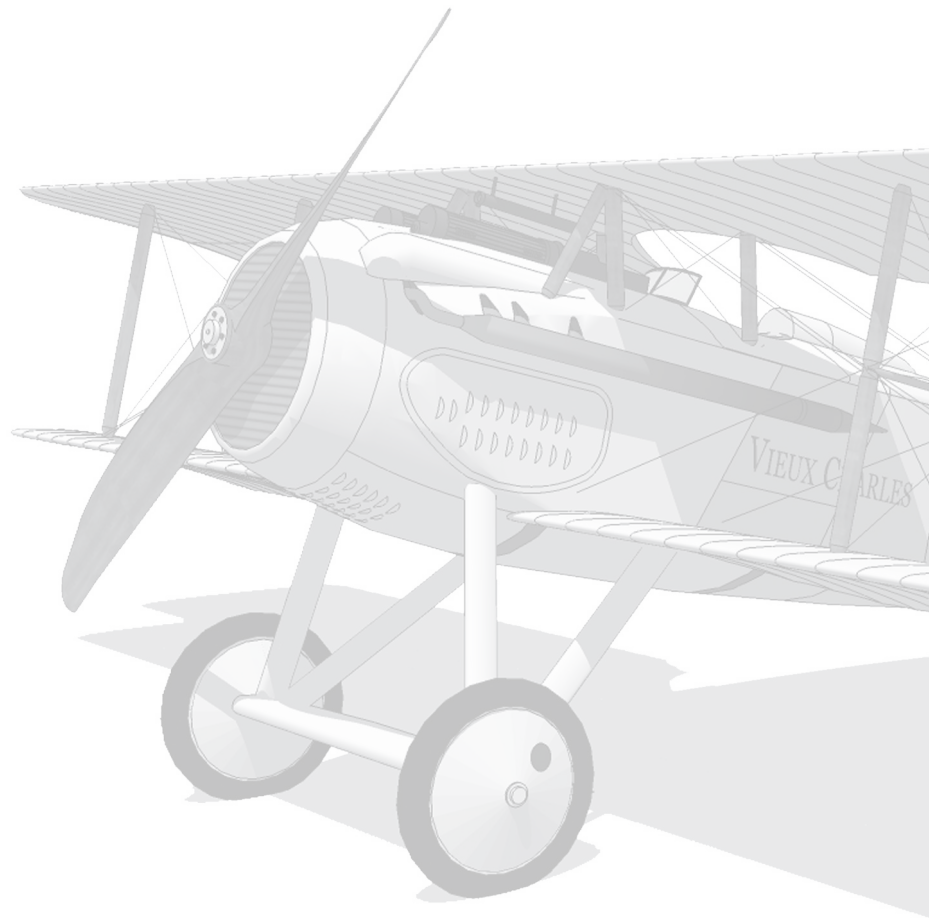
|                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 36 Le Groupe Turboréacteur (G.T.R.) . . . . .                                    | 107        |
| 37 Turbomachines à hélices . . . . .                                             | 109        |
| 38 Instrumentation de bord . . . . .                                             | 110        |
| 39 L'anémomètre (ou badin) ou ASI (Air Speed Indicator) . . . . .                | 112        |
| 40 L'altimètre . . . . .                                                         | 115        |
| 41 Le variomètre ou VSI (Vertical Speed Indicator) . . . . .                     | 117        |
| 42 L'indicateur de virage ou bille aiguille . . . . .                            | 119        |
| 43 L'horizon artificiel. . . . .                                                 | 121        |
| 44 Le compas ou boussole . . . . .                                               | 123        |
| 45 Le conservateur de cap ou directionnel . . . . .                              | 125        |
| 46 Les feux de navigation . . . . .                                              | 126        |
| 47 Le planeur . . . . .                                                          | 127        |
| 48 La fusée. . . . .                                                             | 130        |
| <b>3<sup>e</sup> PARTIE : Aérodynamique, aérostatique &amp; principes de vol</b> | <b>133</b> |
| 49 Comment les avions volent-ils ? . . . . .                                     | 134        |
| 50 Étude de la traînée . . . . .                                                 | 138        |
| 51 Bilan des forces en vol plané . . . . .                                       | 140        |
| 52 Bilan des forces en vol motorisé . . . . .                                    | 142        |
| 53 Gouvernes principales. . . . .                                                | 146        |
| 54 Gouvernes secondaires . . . . .                                               | 151        |
| 55 Facteur de charge . . . . .                                                   | 153        |
| 56 Décollage et atterrissage . . . . .                                           | 155        |
| 57 Aérostation. . . . .                                                          | 157        |
| 58 Vol de la fusée . . . . .                                                     | 159        |
| 59 Vol aérospatial. . . . .                                                      | 160        |
| 60 Principaux types d'orbite. . . . .                                            | 164        |
| 61 La soufflerie . . . . .                                                       | 166        |
| 62 English Vocabulary . . . . .                                                  | 168        |
| <b>4<sup>e</sup> PARTIE : Navigation, réglementation &amp; sécurité des vols</b> | <b>171</b> |
| 63 Organisations chargées de la réglementation. . . . .                          | 172        |
| 64 Brevets et licences. . . . .                                                  | 175        |
| 65 Certifications et immatriculations. . . . .                                   | 177        |
| 66 La radio . . . . .                                                            | 179        |
| 67 Signalisation des aéronefs . . . . .                                          | 183        |
| 68 Équipements et sécurité . . . . .                                             | 185        |
| 69 Accidents et facteurs humains . . . . .                                       | 186        |
| 70 Conditions de vol et de navigation . . . . .                                  | 189        |
| 71 Espaces aériens . . . . .                                                     | 191        |
| 72 Services de la circulation aérienne. . . . .                                  | 194        |
| 73 L'aérodrome . . . . .                                                         | 196        |
| 74 L'aire à signaux . . . . .                                                    | 199        |
| 75 Le tour de piste . . . . .                                                    | 200        |

|                                                                                           |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 76 La carte VAC . . . . .                                                                 | 201        |
| 77 Règles de circulation . . . . .                                                        | 203        |
| 78 Se repérer sur la Terre . . . . .                                                      | 205        |
| 79 Cartographie. . . . .                                                                  | 207        |
| 80 Mesures du temps. . . . .                                                              | 213        |
| 81 Déclinaison et dérive . . . . .                                                        | 215        |
| 82 Méthodes de navigation . . . . .                                                       | 217        |
| 83 Préparation de la navigation. . . . .                                                  | 223        |
| 84 Visite de prévol . . . . .                                                             | 229        |
| 85 English Vocabulary . . . . .                                                           | 231        |
| <b>5<sup>e</sup> PARTIE : Histoire &amp; culture de l'aéronautique et du spatial</b>      | <b>233</b> |
| 86 Du mythe à la réalité . . . . .                                                        | 234        |
| 87 Le choix du plus léger que l'air . . . . .                                             | 238        |
| 88 Les temps héroïques : 1890-1913. . . . .                                               | 241        |
| 89 Les premiers records . . . . .                                                         | 243        |
| 90 Frises chronologiques des plus légers que l'air et des plus lourds que l'air . . . . . | 248        |
| 91 La Première Guerre mondiale : 1914-1918 . . . . .                                      | 249        |
| 92 Les As de la Grande Guerre . . . . .                                                   | 251        |
| 93 Frise chronologique 1914-1918 . . . . .                                                | 254        |
| 94 L'entre-deux-guerres . . . . .                                                         | 255        |
| 95 L'Aéropostale . . . . .                                                                | 258        |
| 96 Les débuts de l'aviation commerciale . . . . .                                         | 262        |
| 97 Frise chronologique 1919-1938 . . . . .                                                | 264        |
| 98 La Deuxième Guerre mondiale : 1939-1945 . . . . .                                      | 265        |
| 99 Frise chronologique de 1939 à 1945 . . . . .                                           | 269        |
| 100 Le « mur » du son . . . . .                                                           | 270        |
| 101 L'aviation militaire . . . . .                                                        | 272        |
| 102 L'essor de l'aviation commerciale . . . . .                                           | 277        |
| 103 Frise chronologique de 1945 à nos jours . . . . .                                     | 281        |
| 104 Les hélicoptères . . . . .                                                            | 282        |
| 105 Quelques avions expérimentaux . . . . .                                               | 285        |
| 106 Les sauts extrêmes. . . . .                                                           | 288        |
| 107 Les précurseurs de la conquête de l'espace . . . . .                                  | 289        |
| 108 De Spoutnik à Apollo . . . . .                                                        | 291        |
| 109 De Saliout à l'ISS . . . . .                                                          | 293        |
| 110 Frise chronologique de la conquête spatiale. . . . .                                  | 299        |
| 111 L'exploration du système solaire . . . . .                                            | 301        |
| 112 Frise chronologique de l'exploration du système solaire . . . . .                     | 304        |
| 113 Quelques femmes célèbres. . . . .                                                     | 305        |
| 114 L'avenir du secteur aéronautique. . . . .                                             | 314        |
| 115 Les films sur l'aéronautique. . . . .                                                 | 316        |



|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| <b>EXAMEN BLANC</b>                 | <b>321</b> |
| Épilogue . . . . .                  | 357        |
| Bibliographie . . . . .             | 359        |
| Crédits des illustrations . . . . . | 361        |

# Généralités



# 1

# Le B.I.A.

---

## Introduction

---

Né en 1968, le **Brevet d'Initiation Aéronautique (B.I.A.)** est un diplôme à part pour l'Education Nationale. Il a remplacé le brevet élémentaire des sports aériens, lui-même issu des loisirs dirigés mis en place par Jean Zay, le ministre de l'Education nationale du Front populaire. La France est un grand pays d'aéronautique et le BIA est un formidable vecteur de découverte qui permet aux candidats de mettre en avant des compétences et des savoirs avec enthousiasme et rigueur. Le BIA est mis en œuvre en pleine coordination avec la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) et le Conseil National des Fédérations Aéronautiques et Sportives (CNFAS).

---

## Programme

---

Le candidat qui prépare le BIA doit développer des connaissances et compétences sur les 5 thèmes suivants (qui font l'objet de parties distinctes dans cet ouvrage) :

- ➔ Météorologie et aérologie.
- ➔ Étude des aéronefs et des engins spatiaux.
- ➔ Aérodynamique, aérostatique et principes du vol.
- ➔ Navigation, réglementation, sécurité des vols.
- ➔ Histoire et culture de l'aéronautique et du spatial.

---

## Épreuve

---

Le BIA comprend une épreuve obligatoire écrite d'une durée de 2h30 et une épreuve facultative écrite d'anglais d'une durée de 30 mn. Les épreuves se présentent sous forme d'un questionnaire à choix unique (QCU). **L'épreuve obligatoire** se compose de cinq sujets (correspondant aux 5 thèmes du programme), constitué chacun de 20 questions. Pour **l'épreuve facultative d'anglais**, seuls les points excédant 10 sur 20 sont additionnés au total des points obtenus à l'épreuve obligatoire. Les questions pour cette épreuve ne concernent que les parties « *Météorologie et aérologie* » « *Étude des aéronefs et des engins spatiaux* » et « *Navigation, réglementation, sécurité des vols* ».

---

## Niveaux d'acquisition

---

Les niveaux d'acquisition des savoirs et savoir-faire, sont caractérisés par les niveaux ci-dessous.

1. **Niveau d'information** : « je sais de quoi on parle », est un niveau d'information, il correspond à l'appréhension d'une vue d'ensemble d'un sujet et à la définition des

termes de base. Les réalités sont montrées sous certains aspects de manière partielle ou globale.

2. **Niveau d'expression** : « je sais en parler », est un niveau de compréhension des principes, il correspond à l'acquisition de moyens d'expression et de communication. Le candidat utilise les termes de la discipline et restitue des enchaînements logiques.
3. **Niveau de maîtrise d'outils** : « je sais faire », est un niveau d'application, il correspond à la maîtrise de procédés et d'outils d'étude ou d'action. Le candidat sait utiliser, manipuler des règles, des principes, en vue d'un résultat à atteindre ou d'une explication à donner.
4. **Niveau de la maîtrise méthodologique** : « je sais choisir », est un niveau de savoir et d'autonomie, avec une capacité d'analyse, de synthèse et d'évaluation, il correspond à la méthodologie de pose et de résolution de problèmes. Le candidat maîtrise une démarche structurée.

Globalement, pour le BIA, les niveaux 1 et 2 sont attendus dans chacun des thèmes. Pour plus de précisions, il faut se référer aux textes officiels.

---

### Textes officiels

---

Pour les programmes, le texte officiel est celui du Bulletin Officiel n°11 du 12 mars 2015 à l'annexe « *Programme et niveau des connaissances de l'examen du brevet d'initiation aéronautique (BIA)* ». Les arrêtés en vigueur sont les suivants :

- ➔ Arrêté du 19 février 2015 relatif au brevet d'initiation aéronautique (BIA).
- ➔ Arrêté du 28 avril 2016 modifiant l'arrêté du 19 février 2015 relatif au brevet d'initiation aéronautique (BIA).

# 2

## Le C.A.E.A.

---

### Introduction

---

**Le Certificat d'Aptitude à l'Enseignement de l'Aéronautique (C.A.E.A.)** s'adresse aux étudiants, enseignants et plus généralement à tous les personnels des établissements scolaires désireux de participer à un enseignement dans le domaine de l'aéronautique et de l'espace. Au moins un détenteur du CAEA encadre la formation au BIA. C'est un diplôme de l'éducation nationale délivré par l'académie de résidence du postulant.

---

### Programme

---

Globalement, le programme au CAEA est le même que celui du BIA (voir fiche précédente)

---

### Épreuve

---

L'examen du CAEA est constituée de 2 épreuves :

- ➔ Une épreuve d'admissibilité : il s'agit d'un QCU de 25 questions par thème.
- ➔ Une épreuve orale d'admission : elle doit permettre d'apprécier l'aptitude des candidats à préparer les élèves au BIA dans un environnement scolaire.

Des dispenses d'examens CAEA sont prévues pour les enseignants de l'Education nationale, les instructeurs, les moniteurs et éducateurs sportifs. Le CAEA s'obtient par équivalence pour tout enseignant de l'Education nationale qui dispose d'un titre ou d'une qualification délivré par l'Aviation civile ou par le ministère de la Ville, de la Jeunesse et des Sports.

---

### Niveaux d'acquisition

---

Les niveaux d'acquisition des savoirs et savoir-faire sont identiques à ceux du BIA. Globalement, pour le CAEA, les niveaux 3 et 4 sont attendus dans chacun des thèmes. Pour plus de précisions, il faut se référer aux textes officiels.

---

### Textes officiels

---

Pour les programmes, le texte officiel est celui du Bulletin Officiel n°11 du 12 mars 2015 à l'annexe « *Programme de l'épreuve d'admissibilité de l'examen du certificat d'aptitude à l'enseignement aéronautique (CAEA)* ». Les arrêtés en vigueur sont les suivants :

- 
- ✈ Arrêté du 19 février 2015 relatif au certificat d'aptitude à l'enseignement aéronautique (CAEA).
  - ✈ Arrêté du 26 octobre 2016 modifiant l'arrêté du 19 février 2015 relatif au certificat d'aptitude à l'enseignement aéronautique (CAEA).

# 3

## L'O.A.C.I.

---

### Introduction

---

**L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (O.A.C.I.)** a été créée par la Convention relative à l'aviation civile internationale, connue sous le nom de **Convention de Chicago, adoptée le 7 décembre 1944**. C'est une institution spécialisée et autonome des Nations Unies, dont le rôle est d'établir le cadre réglementaire mondial de la sécurité de l'aviation civile internationale.



FIG. 3.1 – Logo de l'O.A.C.I.

---

### Les objectifs stratégiques de l'OACI

---

Depuis l'origine, le rôle principal de l'OACI est d'établir le cadre réglementaire mondial de la sécurité de l'aviation civile internationale, mais la Convention de Chicago, dans son préambule, lui donne aussi un rôle d'organisation économique des services aériens, ceux-ci étant établis sur la base de l'égalité des chances et exploités d'une manière saine et économique. En tant qu'instance mondiale de coopération entre ses États membres et la communauté aéronautique mondiale, l'OACI établit et développe des normes et des pratiques recommandées visant à promouvoir le développement sûr et ordonné de l'aviation civile internationale.

L'OACI a pour mission principale de répondre à la nécessité évidente d'anticiper et de gérer la capacité du transport aérien mondial, tout en évitant de compromettre la sécurité, l'efficacité, la commodité et le bilan environnemental du système. Dans le cadre de cette mission, l'OACI a établi cinq objectifs stratégiques qui lui servent de « boussole » dans toutes ses actions :

- ➔ La sécurité.
- ➔ La capacité et l'efficacité de la navigation aérienne.
- ➔ La sûreté.
- ➔ Le développement économique du transport aérien.
- ➔ La protection de l'environnement.

# 4

## Les unités

---

### Introduction

---

Au début de l'aviation, les unités de mesure utilisées étaient celles en usage dans chaque pays (métriques ou anglo-saxonnes). En 1944, la Conférence internationale de l'aviation civile, qui s'est tenue en à Chicago, a adopté une résolution demandant aux États d'employer le système métrique comme principal système de mesure normalisé à l'échelon international. Dès 1947, avec la création de l'OACI, le Système International (S.I.) d'unités est adopté, avec une dérogation pour d'autres unités qui peuvent être utilisées ou non par les différents États, à la place ou en complément des unités *SI* pour la navigation aérienne et l'instrumentation des avions de ligne. Ces unités font l'objet de l'annexe 5 à la convention de Chicago intitulée « *Unités de mesure à utiliser dans l'exploitation en vol et au sol* ».

Il faut savoir que la transition vers un système unique reste toujours débattue au sein de l'O.A.C.I., l'informatisation des instruments de bord permettant théoriquement une transition facile entre les deux systèmes.

---

### Les unités principales

---

**Le pied (ft) ou le mètre (m) :** Les distances verticales, les altitudes ou les altitudes-pression, sont, dans la plupart des cas, exprimées en pieds (*ft*) ou en mètres (*m*). Il faut retenir :

$$1 \text{ ft} = 30,48 \text{ cm (soit } 0,3048 \text{ m)}$$

**Le mille marin appelé nautique (NM) :** Les distances horizontales sont exprimées en NM. Il faut retenir :

$$1 \text{ NM} = 1\,852 \text{ m (soit } 1,852 \text{ km)}$$

**Le niveau de vol (FL) :** il désigne l'altitude-pression en centaines de pieds.

*Exemple :*

le FL 380 correspond à 38 000 *ft* d'altitude-pression.

**Le pied par minute (*ft/min*) :** Les vitesses verticales sont exprimées en pied par minute (*ft/min*) ou en mètre par seconde (*m/s*).

**Le nœud (kt - milles nautiques par heure) :** Les vitesses indiquées, les vitesses propres, les vitesses sol et les vitesses du vent sont exprimées en nœuds. Il faut retenir :

$$1 \text{ kt} = 1,852 \text{ km/h} \approx 0,514 \text{ m/s}$$



---

### Les autres unités

---

**L'hectopascal ( $hPa$ ) (anciennement appelé millibar) :** La pression atmosphérique et le calage altimétrique sont exprimé en  $hPa$ .

**Le pouce de mercure ( $inHg$ ) :** Cette unité est utilisé pour la pression d'admission dans un moteur à pistons et, dans les pays anglo-saxons, pour le calage altimétrique. Il faut retenir :

$$1 \text{ } inHg \approx 33,86 \text{ } hPa$$

**Le nombre de Mach (Mach) :** Il correspond au rapport de la vitesse de l'avion à celle du son à la température ambiante. Ce n'est pas une unité mais une valeur physique, importante en aérodynamique compressible (pour les avions rapides) et indépendante du système d'unités utilisé. Il faut retenir que dans l'air à  $15^\circ\text{C}$  :

$$Mach \ 1 \approx 340 \text{ } m/s \approx 1224 \text{ } km/h$$

# Première partie

## Météorologie & aérologie



## 5

## L'atmosphère

## Définition

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse qui entoure la terre, sur quelques centaines de kilomètres. Elle nous protège des rayonnements solaires ultraviolets et réchauffe la surface par rétention de chaleur.

## Répartition verticale

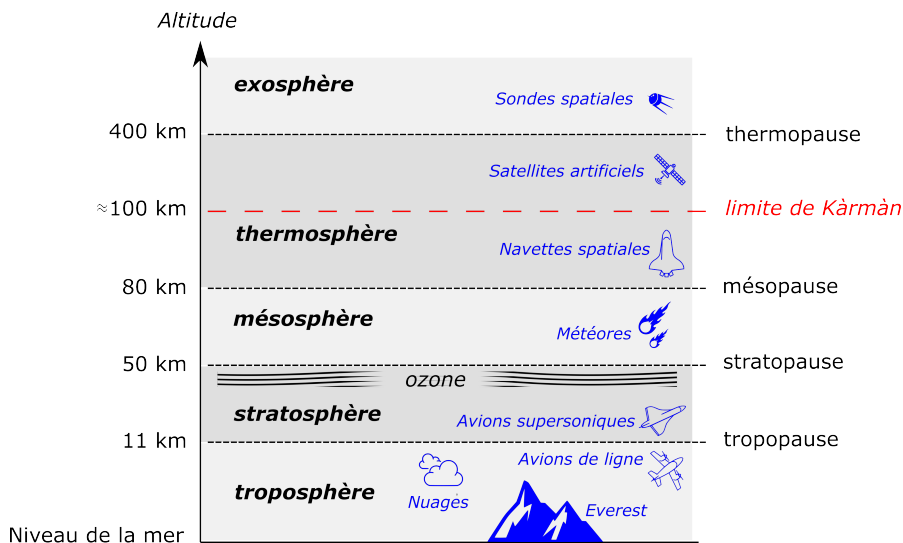


FIG. 5.1 – Répartition verticale de l'atmosphère.

L'atmosphère est divisée en plusieurs couches : troposphère - stratosphère - mésosphère - thermosphère - exosphère. En aéronautique, on s'intéresse plus particulièrement à **la troposphère, dont l'épaisseur varie de 7 à 15 km des pôles à l'équateur**, car c'est dans cette couche que l'on trouve les nuages et dans laquelle se produisent les phénomènes météorologiques. La surface de séparation entre la troposphère et la stratosphère s'appelle **la tropopause**. Elle se situe aux environs de 11 km d'altitude sous nos latitudes.

**La couche d'ozone** se situe dans la stratosphère entre 25 et 45 km. elle nous protège des rayons UV-C qui détériorent l'ADN des organismes biologiques, en empêchant 50 % des rayons du soleil de pénétrer dans la troposphère. **La ligne de Kàrmàn**, aux environs de 100 km, est considérée comme la frontière entre l'atmosphère et l'espace.

## Composition

| Air                                                                                                                                                                                                                               | Divers                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- 78 % de diazote (<math>N_2</math>)</li> <li>- 21 % de dioxygène (<math>O_2</math>)</li> <li>- 1 % de gaz divers<br/>(argon (Ar), dioxyde de carbone (<math>CO_2</math>), ...)</li> </ul> | Vapeur d'eau,<br>Poussières |

## Impact environnemental de l'aérien

Lors du vol, un avion rejette du  $CO_2$ , des oxydes d'azote, des particules de sulfate et de suie, de la vapeur d'eau et génère également des traînées de condensation. Ces émissions sont à l'origine des impacts principaux de l'activité aéronautique sur les changements climatiques.

**L'effet de serre :** C'est un phénomène d'origine naturelle qui permet une température habitable à la surface de la Terre (environ  $15^\circ C$ ), contre ( $-18^\circ C$  s'il n'y avait pas d'effet de serre), mais qui, amplifié par les émissions de gaz à effet de serre provenant des activités humaines, entraîne le réchauffement de la planète. En effet, certains gaz à effet de serre, provenant de la combustion d'énergies fossiles, comme le protoxyde d'azote, ainsi que certains composés chimiques tels que les chlorofluorocarbures (CFC), endommagent gravement la couche d'ozone, mettant en danger la vie sur Terre.

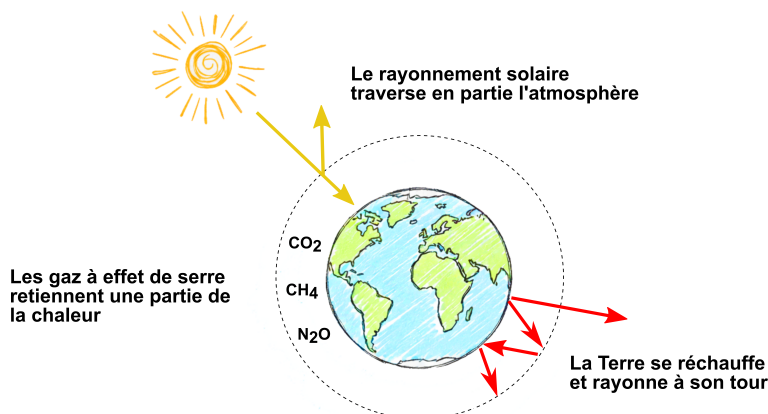


FIG. 5.2 – Principe de l'effet de serre.

**Contributions de l'aérien aux émissions de gaz à effet de serre :** Les activités aériennes sont responsables de l'émission de gaz à effet de serre, principalement en raison de la combustion du carburant par les avions. D'après l'Agence internationale de l'énergie (IEA),

le transport aérien représentait 2,4 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre en 2018. Conscients de cet enjeu, les acteurs de l'aéronautique ont déjà entamé des efforts, notamment à travers le développement de nouvelles technologies et l'optimisation des opérations. Ces avancées permettent d'améliorer considérablement l'efficacité du secteur, en transportant davantage de passagers, en augmentant les revenus et en diminuant les émissions de CO<sub>2</sub> par passager-kilomètre.

---

### Atmosphère standard ou normalisée

---

Pour les besoins de l'aéronautique, il a été nécessaire de « figer » l'atmosphère en une atmosphère moyenne, dite standard. On parle également d'ISA (International Standard Atmosphere). Cela permet une référence commune afin, par exemple, de calibrer les instruments de bord.

Il faut retenir qu'**au niveau de la mer** :

- ✈ **Température : 15°C.**
- ✈ **Pression atmosphérique : 1013,25 hPa.**
- ✈ **Masse volumique de l'air : 1,225 kg/m<sup>3</sup>.**

# 6

## La température

### Définition

**La température est la grandeur physique qui caractérise la sensation de chaud ou froid.** En France, la mesure des températures est réalisée suivant l'échelle Celsius notée °C. Cependant, il est bon de distinguer la notion de chaleur qui est une forme d'énergie et la température.

### Variation de la température

Dans la troposphère, la température diminue lorsque l'altitude augmente, pour atteindre une valeur de  $-56.5^{\circ}\text{C}$  à sa limite supérieure. On retiendra que dans cette couche, **le gradient de température baisse de  $2^{\circ}\text{C}$  lorsque l'altitude augmente de 1000 ft (ou  $-6.5^{\circ}\text{C}$  tous les 1000 m)**. La tropopause, transition entre la troposphère et la stratosphère, marque l'entrée dans une couche d'inversion de température, c'est à dire que la température se met à augmenter avec l'altitude jusqu'à la stratopause.

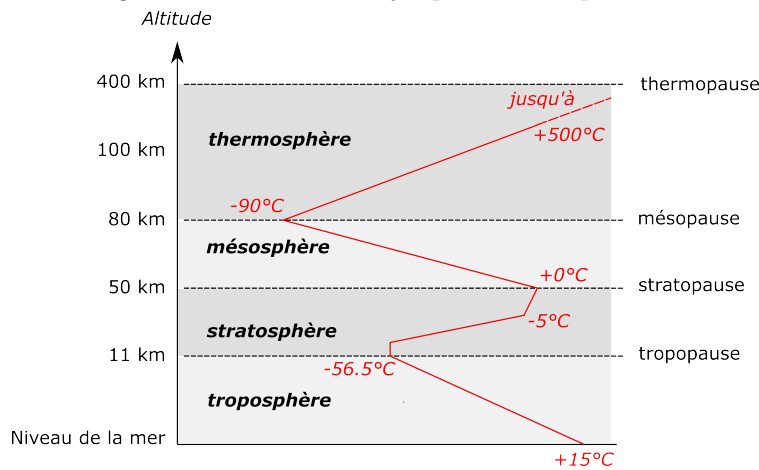


FIG. 6.1 – Évolution de la température en fonction de l'altitude.

### Échanges thermiques

**Rayonnement :** C'est le soleil qui chauffe directement les basses couches de l'atmosphère de la Terre (déduction faite de l'absorption par la couche d'ozone et par la troposphère).

**Conduction :** La chaleur se propage le long d'un corps ou d'un corps à l'autre par contact. Le chaud va vers le froid. L'air étant un mauvais conducteur de chaleur, seule une fine couche d'atmosphère peut se refroidir au contact d'un sol froid.

**Advection :** Transport de chaleur (ou de froid) par déplacement quasi horizontal (par le vent notamment) d'un bloc d'une masse d'air.

**Convection :** Une « bulle » plus légère que l'air environnant se forme et se détache peu à peu du sol, pour finalement s'élever à travers les couches situées au-dessus d'elle. L'air soulevé de la sorte est remplacé par un volume égal venant des couches voisines plus froides. Cet air renouvelé se réchauffe à son tour et il s'établit ainsi des courants verticaux ascendants et descendants de convection. Au sommet de la colonne d'air chaud se développe parfois un cumulus.

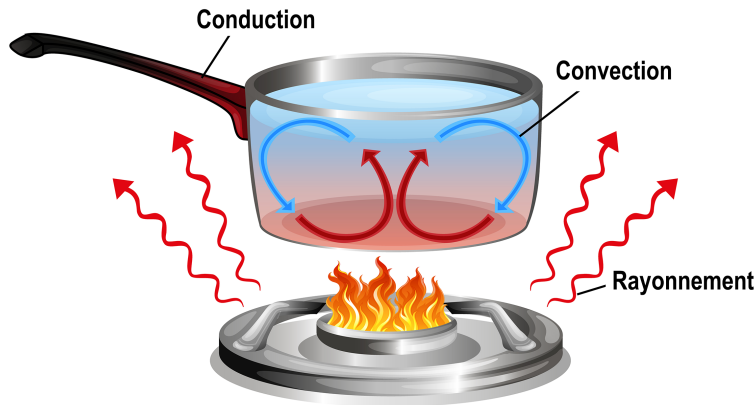


FIG. 6.2 – Les 3 principaux modes de transfert de chaleur vus sur une casserole.

---

## Mesure de la température

---

**En surface :** On mesure la température à 1,50 m au-dessus du sol, à l'abri du rayonnement et des précipitations avec un thermomètre.

**En altitude :** Des ballons sonde effectuent deux fois par jour des mesures de pression-température-humidité jusqu'à 30 km d'altitude environ. Le calcul des altitudes vraies qui sont traduites en **isolignes** sur les cartes, ne peut se faire sans relevés détaillés des températures en altitudes.

# 7

## La pression atmosphérique

### Définition

La pression atmosphérique correspond au poids de la colonne d'air s'étendant jusqu'à la limite supérieure de l'atmosphère, au-dessus d'une surface de  $1 \text{ m}^2$ . L'unité de mesure est le Pascal. Cependant, en météorologie, on utilise préférentiellement l'hectoPascal ( $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$ ).

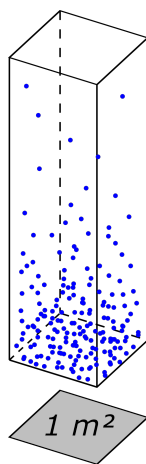


FIG. 7.1 – Représentation de la pression atmosphérique.

### Mesure de la pression

Les deux instruments utilisés pour mesurer la pression sont :

- ➔ Le baromètre à mercure.
- ➔ Le baromètre anéroïde.

**Le baromètre à mercure**, inventé par le physicien italien Evangelista Torricelli au XVII<sup>e</sup> siècle, fonctionne grâce à une colonne de mercure contenue dans un tube retourné sur un réservoir. La hauteur de la colonne varie selon la pression de l'air : plus elle est élevée, plus la pression est forte. Ce type de baromètre est très précis, mais son utilisation est limitée en raison de la toxicité du mercure.



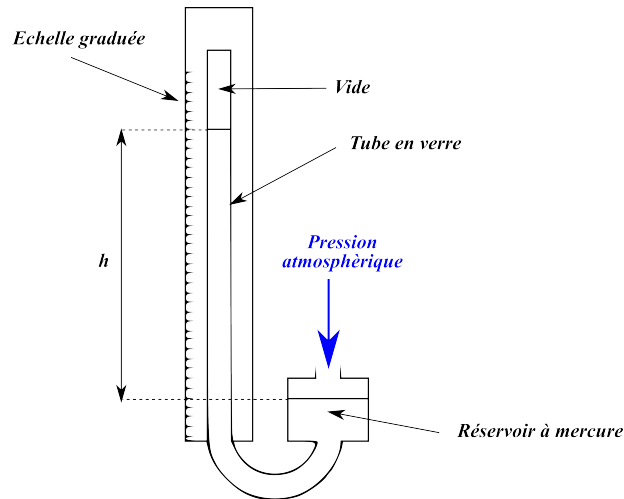


FIG. 7.2 – Principe du baromètre de Torricelli.

Le **baromètre anéroïde**, inventé par le physicien français Lucien Vidie, ne contient pas de liquide. Il repose sur une ou plusieurs capsules métalliques souples, appelées cellules anéroïdes, qui se déforment sous l'effet de la pression atmosphérique. Ces variations sont ensuite traduites en valeurs de pression sur une échelle graduée. Plus compact et plus sûr, le baromètre anéroïde est couramment utilisé dans les instruments portables et les altimètres.

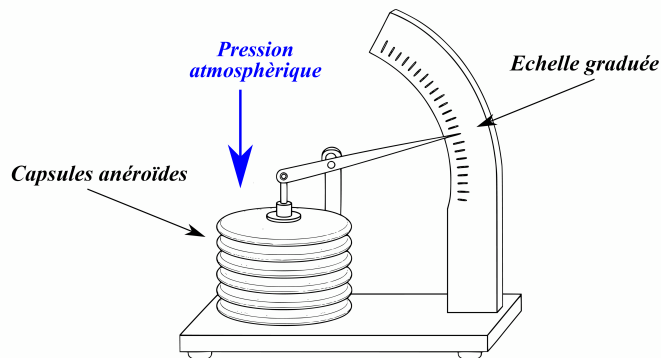


FIG. 7.3 – Principe du baromètre de Vidie.

---

### Variation de la pression atmosphérique

---

Lorsque l'on s'élève dans l'atmosphère, on a de moins en moins de molécules d'air au-dessus de soi, **l'atmosphère est moins dense en altitude**. La pression est maximale au sol et elle diminue avec l'altitude. **Dans les basses couches de l'atmosphère, le gradient de pression atmosphérique diminue lorsque l'altitude monte, il diminue de 1 hPa lorsque l'on monte de 28 ft.**

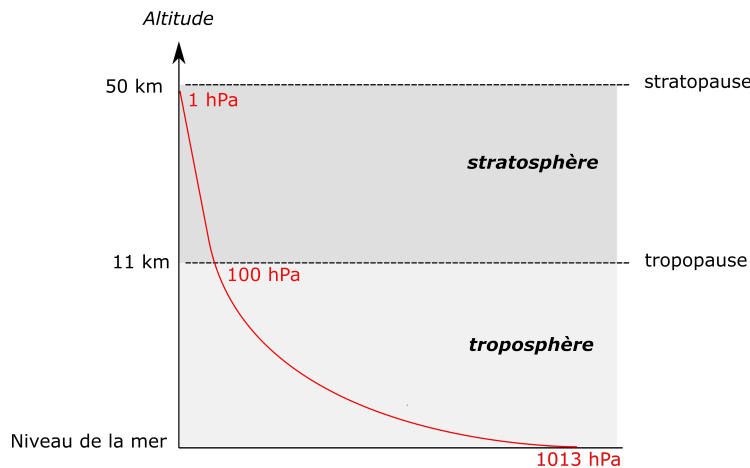


FIG. 7.4 – Évolution de la pression en fonction de l'altitude.

---

## Champs de pression

---

**Isobare :** On appelle isobare une ligne reliant les points d'égale pression (hPa).

**Anticyclone :** Zone de hautes pressions (A ou H) supérieures à 1013 hPa. **Les pressions sur les isobares augmentent en se rapprochant du centre.** Il faut imaginer une montagne pour un anticyclone : les valeurs de pressions (les cotes) vont augmenter de plus en plus lorsque l'on s'approche du centre. Un système anticyclonique est une masse qui contient de l'air plus dense, car cet air est plus froid et/ou plus sec que l'air environnant. Ainsi, cet air plus lourd tombe vers le bas et amène le beau temps.

**Dépression :** Zone de basses pressions (D ou L) inférieures à 1013 hPa. **Les pressions sur les isobares diminuent en se rapprochant du centre.** Il faut imaginer une vallée pour une dépression : les valeurs de pressions vont augmenter de plus en plus lorsque l'on s'éloigne du centre. Un système dépressionnaire est une masse d'air qui contient de l'air moins dense, car cet air est humide et/ou plus chaud. L'air environnant est attiré par le centre du système, ce qui occasionne des nuages ou des précipitations, car cet air humide se refroidit en montant. Dans le cas d'un système fortement dépressionnaire, il est possible qu'une tempête se forme.

---

## Autre vocabulaire

---

**La dorsale :** Il s'agit d'un axe de hautes pressions issues d'un anticyclone. Une dorsale a généralement pour effet de stabiliser le temps. Le vent y est faible et souvent de direction variable. On la retrouve souvent à l'avant d'une perturbation, avant le front chaud.

**Le talweg (ou thalweg) :** Un thalweg est l'opposé d'une dorsale : il s'agit d'un axe de basses pressions issues d'une dépression. Généralement, un thalweg indique la présence d'un front. Le vent peut y être soutenu.

**Le col :** Un col est une aire de transition entre deux anticyclones et deux dépressions. Le vent y est variable à nul et de direction variable.

**Le marais barométrique :** Il s'agit d'une zone à faible gradient de pression de 1013 hPa ou un peu moins. Les isobares y sont mal organisées. Le vent y est variable et faible, voire nul. On retrouve souvent ce type de condition atmosphérique lors des journées chaudes estivales. On y trouve généralement un temps chaud et lourd. Le faible gradient de pression et l'influence ni dépressionnaire ni anticyclonique en font une zone propice aux développements convectifs importants. Ainsi, c'est dans un marais barométrique que les orages les plus violents peuvent se former.

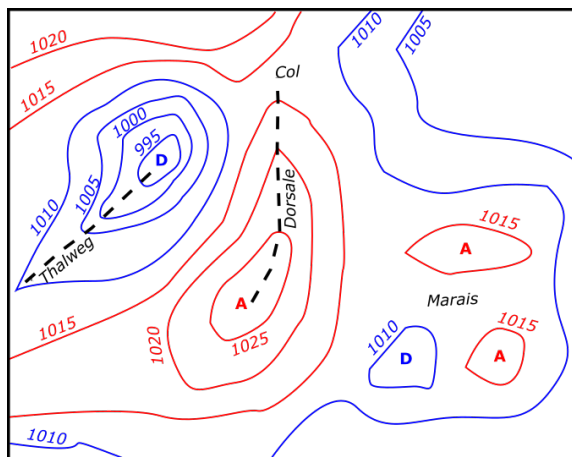


FIG. 7.5 – Exemple de carte isobare.

# 8

## L'eau dans l'atmosphère

### Changements d'état

L'eau dans l'atmosphère peut exister sous trois formes : solide, liquide ou gazeuse.

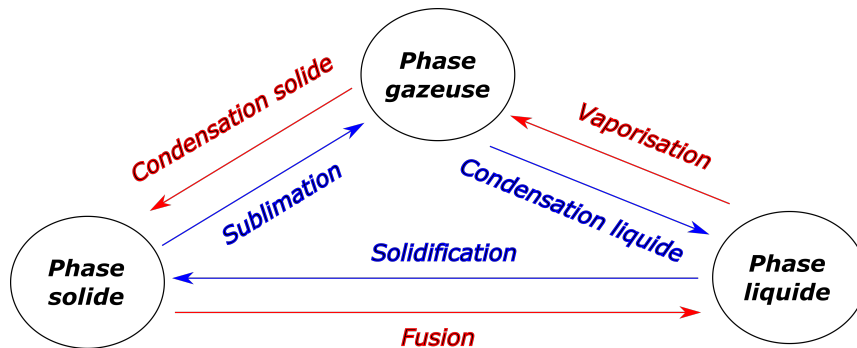


FIG. 8.1 – Changements d'état de l'eau.

**Condensation / évaporation :** Lorsque la température de l'air baisse au-delà du point de rosée, la condensation intervient. De fines gouttelettes d'eau se forment autour de poussières diverses en suspension dans l'air. Le phénomène inverse est l'évaporation.

**Solidification / fusion :** L'eau refroidie en dessous de  $0^{\circ}\text{C}$  se solidifie (neige, glace). Inversement, il y a fusion.

**Surfusion :** Dans l'atmosphère, les gouttelettes d'eau restent souvent liquides à des températures inférieures à  $0^{\circ}\text{C}$  (jusqu'à  $-10^{\circ}\text{C}$ ). Elles sont en état de surfusion. Le phénomène est courant dans le brouillard et les nuages où l'on observe des gouttelettes d'eau surfondues jusqu'à des températures de  $-40^{\circ}\text{C}$ .

### Quelques définitions

**Vapeur d'eau :** C'est l'eau à l'état gazeux contenue dans l'air. La quantité de vapeur d'eau dont l'air peut se charger augmente avec la température.

**Humidité :** Quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air.

**Humidité relative :** Lorsque l'humidité relative atteint 100 %, on se trouve à l'état de saturation.

$$\text{Humidité relative} = \frac{\text{vapeur d'eau réelle}}{\text{vapeur d'eau maximum}}$$

**Point de rosée :** Température à laquelle l'air doit être refroidit pour que l'humidité relative atteigne 100 %.

---

### Les traînées de condensation ou contrails

---

Les contrails sont ces longues traînées blanches se formant au passage d'un avion dans certaines conditions de température et d'humidité de l'air. Les particules rejetées par les moteurs sont à l'origine de l'apparition de ces nuages. En effet, l'eau s'agglutine autour de ces particules et se transforme en cristaux de glace formant alors ces « nuages ». Ces contrails ne se forment que dans des conditions très précises :

- ➔ Un air sursaturé en humidité.
- ➔ Des températures très froides (inférieures à  $-30^{\circ}\text{C}$ ).

Les traînées de condensation apparaissent ainsi en haute altitude, de 23 000 à 40 000 ft, à une altitude précise en fonction des conditions décrites ci-dessus. Lorsque les températures sont en-dessous de  $-40^{\circ}\text{C}$ , les contrails peuvent devenir persistantes et peuvent même s'étendre et se transformer en voiles de cirrus qui peuvent perdurer pendant plusieurs heures voire même plusieurs jours.



FIG. 8.2 – Contrails ou traînées de condensation.

---

### Impact sur le réchauffement climatique

---

On considère aujourd'hui que les contrails ont un impact non négligeable sur le réchauffement climatique : ces nuages augmentent l'effet de serre en emprisonnant les rayonnements solaires dans l'atmosphère. Il est envisageable de limiter l'impact climatique de ces nuages puisqu'ils ne se forment que dans des conditions très particulières. Par conséquent, de légers changements d'altitudes pourraient permettre d'éviter leur formation. Des chercheurs ont calculé en 2020 qu'en modifiant la trajectoire de 1,7 % des vols, on pouvait réduire l'effet réchauffant des contrails de 59,3 %.

# 9

## Les nuages

---

---

### Définition

---

**Le nuage correspond à l'ensemble visible de minuscules particules d'eau liquide et/ou de cristaux de glace en suspension dans l'atmosphère.**

---

---

### Formation

---

**Les nuages se forment par refroidissement de l'air ascendant.** Lorsque la température diminue, la quantité maximale de vapeur d'eau que peut contenir l'air diminue, donc l'humidité relative augmente. Lorsque l'humidité relative atteint 100 %, la condensation apparaît autour de minuscules particules solides.

---

---

### Classification

---

Les termes « cumuliforme » et « stratiforme » sont utilisés pour décrire deux types fondamentaux de structures de nuages.

**Cumuliformes :** Les nuages cumuliformes ont une structure gonflée, bombée ou en forme de dôme, souvent avec une base relativement plate et un sommet qui peut ressembler à une tête de chou-fleur. Ils sont caractérisés par leur aspect cotonneux et leur développement vertical. Ils sont souvent **associés à des conditions météorologiques changeantes**. Un ciel parsemé de cumulus peut indiquer un temps agréable, tandis que la présence de cumulonimbus suggère des conditions potentiellement violentes et instables.

**Stratiformes :** Les nuages stratiformes présentent une structure en couches ou en strates. Ils forment de vastes étendues horizontales uniformes, pouvant couvrir le ciel entier et donnant une impression de ciel couvert. Ils sont généralement **associés à des conditions météorologiques stables** mais peuvent entraîner des précipitations légères et continues, surtout dans le cas des nimbostratus. Ils indiquent souvent l'approche d'un front froid ou chaud.

---

---

### Répartition verticale

---

**De 0 à 2 km :** Les nuages dont la base est située entre le sol et 2 km de hauteur sont constitués d'eau liquide. Ces nuages n'ont pas de préfixe spécifique.

**De 2 à 6 km :** Les nuages dont la base est située entre 2 et 6 km de hauteur sont constitués de cristaux de glace et de gouttelettes d'eau liquide : préfixe « **alto** ».

**Au-delà de 6 km :** Les nuages dont la base est située au-dessus de 6 km de hauteur sont constitués de cristaux de glace : préfixe « **cirro** ».

**Certains nuages peuvent présenter une grande extension verticale.** Ce sont les nuages caractéristiques des précipitations et du mauvais temps : préfixe ou terminaison « **nimbus** ». La racine latine *nimbus* signifie « pluie ».

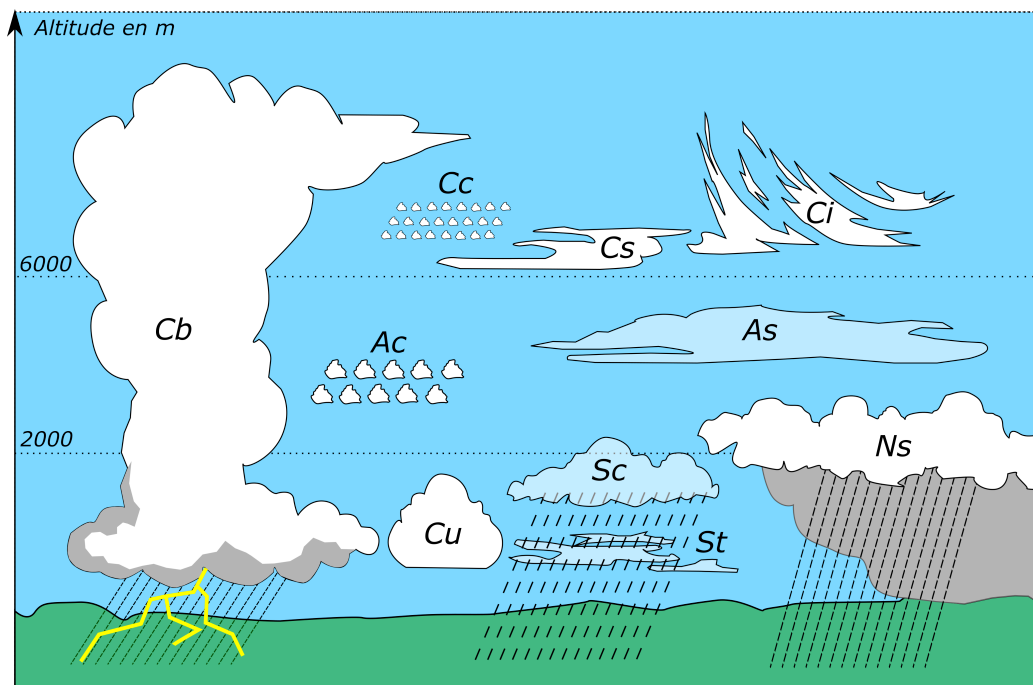


FIG. 9.1 – 10 nuages caractéristiques.

**Cumulus (Cu) :** Les cumulus se forment dans des ascendances thermiques et leur présence est un motif d'optimisme pour les vélivoles.

**Cumulonimbus (Cb) :** Le cumulonimbus est un nuage de très grande extension verticale. Il présente souvent une partie supérieure en forme d'enclume et peut donner naissance à des orages et des averses violentes. Leur traversée est particulièrement dangereuse pour les aéronefs en raison des très violentes turbulences.

**Nimbostratus (Ns) :** Les nimbostratus sont des nuages de grandes dimensions verticales et horizontales. Leur base est uniformément sombre. Sous ses nuages les pluies sont souvent abondantes et continues.

**Stratus (St) :** Les stratus sont des nuages bas qui se présentent en banc. Ils sont dangereux pour l'aéronautique en raison de leur proximité du sol.

**Stratocumulus (Sc) :** Ce sont des nuages qui se présentent en banc gris et bourgeonnants. Ils sont souvent soudés entre eux et présentent alors une couche uniforme. Ils donnent rarement des précipitations.

**Altostratus (As) :** Les altostratus se présentent sous forme d'une couche grisâtre ou bleuâtre dont l'aspect peut être strié ou uniforme. Selon leur épaisseur le soleil peut être ou non apparent au travers de la couche.

**Alto cumulus (Ac) :** Les altocumulus se présentent en banc ou nappe plus ou moins uniforme selon que les nuages sont soudés ou non.

**Cirrus (Ci) :** Les cirrus sont des nuages très élevés constitués de cristaux de glace. Ils se présentent isolés ou en bande étroite et leur faible épaisseur ne gêne pas la luminosité.

**Cirrostratus (Cs) :** Contrairement aux cirrus, les cirrostratus se présentent en voile très étendu (ils peuvent couvrir la totalité du ciel visible). Ils présentent souvent une couleur blanchâtre et au travers de la couche le soleil est souvent entouré d'un halo.

**Cirrocumulus (Cc) :** Ils se présentent en nappe peu épaisse composée de petits éléments granulaires qui peuvent être soudés ou non.

En résumé, le nimbostratus est le nuage classique de pluie, tandis que le cumulonimbus est le nuage d'orage. Les cumulus peuvent parfois se développer beaucoup plus en hauteur que sur la figure précédente. Les nuages bas, soit les stratus et les stratocumulus, peuvent parfois générer de légères précipitations.



# 10

## Les précipitations

### Définition & formation

**Définition :** On appelle précipitation l'ensemble de particules d'eau liquide et/ou solide tombant d'un nuage.

**Formation :** La formation des précipitations dans un nuage résulte de la condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes ou en cristaux de glace qui, en grossissant et s'alourdissant, finissent par tomber sous l'effet de leur poids. Toute précipitation commence presque toujours par un flocon de neige. Si ce flocon, en tombant, arrive dans une couche où la température est supérieure à  $0^{\circ}\text{C}$ , il se transforme en une goutte de pluie.

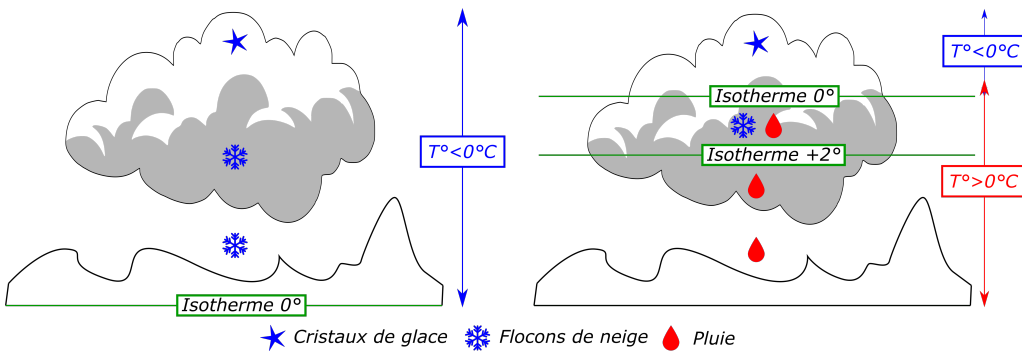


FIG. 10.1 – Formation de la neige et de la pluie.

### Nature

**La bruine :** Très fines gouttelettes d'eau d'un diamètre inférieur à 0,5 mm, très rapprochées les unes des autres, et provenant de nuages bas à extension horizontale (stratus) et du brouillard.

**La pluie :** Gouttelettes de plus grandes dimensions que la bruine provenant de nuages plus épais et de plus grande étendue (altostratus, nimbostratus, cumulonimbus, stratocumulus, altocumulus).

**La neige :** Cristaux de glace dont la plupart sont ramifiés, parfois étoilés. Pour des températures comprises entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $-16^{\circ}\text{C}$ , les cristaux sont agglomérés en flocons dont le diamètre est compris entre 0,5 et 2,5 cm. Les nuages qui en sont à l'origine sont de même nature que ceux à l'origine de la pluie.