

Gérard Pujol
Nicolas Kestens

FORMATION AU
TÉLÉPILOTAGE
DE DRONES

**LES NOTIONS CLÉS,
LA RÉGLEMENTATION,
DES QCM POUR S'ENTRAÎNER**

Le tout-en-un pour préparer votre examen théorique

DUNOD

Direction artistique : Nicolas Wiel
Conception graphique de la couverture : Pierre André Gualino
Illustration de couverture : Nano Calvo – Alamy

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2021

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-081729-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), 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 » (art. 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.

Table des matières

CHAPITRE 1 – LA MÉTÉOROLOGIE		3
1	L'atmosphère	3
1.1	La composition de l'atmosphère	3
1.2	Le découpage de l'atmosphère	4
1.3	La température de l'air	6
1.4	Les échanges thermiques dans l'atmosphère	7
1.5	La pression	11
1.6	Les cartes de pression	13
1.7	L'atmosphère standard	14
1.8	La masse volumique de l'atmosphère	16
2	L'altimétrie	17
2.1	Quel est le lien entre altimétrie et baromètre ?	17
2.2	Que mesure-t-on ?	17
3	L'humidité de l'air : mesure et rôle	18
3.1	L'humidité absolue	19
3.2	L'humidité relative	19
3.3	Le point de rosée	19
4	Le vent	20
4.1	Les mesures du vent	20
4.2	L'origine du vent : le champ de pression	21
4.3	Les vents régionaux	23
4.4	Les brises	23
5	L'aérologie de basse couche	24
5.1	La couche limite	24
5.2	Les dangers invisibles	24
6	Les nuages	26
6.1	Comment se forment les nuages ?	26
6.2	Classification des nuages et répartition verticale	26
6.3	Comment se déclenchent les précipitations ?	27
6.4	Les nuages dangereux	27
6.5	La nébulosité en octas	29
7	Circulation atmosphérique, fronts et perturbations	29
7.1	La circulation générale	29

7.2 Les masses d'air	30
7.3 Le front et la surface frontale.....	30
7.4 La formation d'une perturbation.....	30
7.5 Front chaud, front froid et occlusion.....	31
7.6 Les dangers liés aux fronts.....	32
7.7 La carte d'une perturbation	33
QCM	34

CHAPITRE 2 – LA MÉCANIQUE DU VOL 39

1 Les différents types de drones.....	39
2 La mécanique des fluides.....	40
2.1 Le tube de courant	40
2.2 Le principe de Bernoulli.....	40
2.3 Pressions statique et dynamique	41
3 Le vol des drones à voilure fixe	42
3.1 Le comportement aérodynamique d'une aile	42
3.2 L'écoulement de l'air autour d'un profil.....	42
3.3 La résultante aérodynamique.....	44
3.4 La portance R_z et la traînée R_x	44
3.5 La polaire : un outil pour analyser le bilan aérodynamique.....	45
3.6 La finesse	46
4 Les lois de la mécanique du vol	47
4.1 Le référentiel galiléen et la première loi de Newton.....	47
4.2 Le vol dynamique des drones à voilure fixe.....	48
4.3 Le facteur de charge.....	51
5 Le vol dynamique des drones à voilure tournante.....	52
5.1 Le vol statique d'un drone quadrirotor (quadricoptère)	52
5.2 Le déplacement horizontal rectiligne à vitesse constante	52
5.3 Montée ou descente verticale à vitesse constante	53
5.4 La montée inclinée à vitesse constante	53
5.5 Le comportement en virage et en ressource.....	53
5.6 Le vol dynamique des drones de type « dirigeable »	54
6 Les hélices et les rotors.....	55
6.1 Le rôle des moteurs.....	55
6.2 Qu'est-ce qu'une hélice ?	56
6.3 Qu'est-ce qu'un rotor ?	58
6.4 La conversion du couple moteur en poussée	59
7 La masse et le centrage d'un drone.....	60
7.1 La masse et le centrage	60
7.2 La masse et le centrage des drones à voilure fixe	60
7.3 La masse et le centrage des drones à voilure tournante.....	64
QCM	66

 CHAPITRE 3 – LA NAVIGATION

 71

1	Se repérer sur le globe terrestre	71
2	Les cartes	72
2.1	Comment sont réalisées les cartes planes d'une sphère ?	72
2.2	Les différentes cartes	72
2.3	L'utilisation des cartes	74
3	La mesure du temps	76
3.1	Le mouvement de la Terre dans le système solaire	76
3.2	Mesurer le temps	76
3.3	Notion de jour et de nuit pour piloter à vue	77
4	Les mesures et unités employées	78
4.1	Latitude et longitude : des raisons historiques.....	78
4.2	Des miles nautiques pour les distances	78
4.3	Des nœuds pour les vitesses	79
4.4	Des pieds pour les altitudes.....	79
5	Magnétisme et compas : s'orienter sur le globe terrestre	79
5.1	Le pôle Nord géographique ou Nord vrai (N_v) et le cap	79
5.2	Le compas	80
5.3	Le pôle Nord magnétique (N_m)	80
5.4	La déclinaison magnétique (D_m)	80
5.5	La déviation du compas	81
6	Orientation et cap de l'appareil.....	82
6.1	Le cap	82
6.2	La route.....	82
6.3	Gestion en vol : correction d'une déviation de route.....	83
6.4	Le triangle des vitesses.....	83
7	La navigation à l'estime.....	84
7.1	Les bases de la navigation à l'estime	84
7.2	L'erreur systématique	85
7.3	Je suis perdu, je fais quoi ?	85
7.4	Et avec un drone ?	86
8	Les ondes électromagnétiques.....	86
8.1	Nature et propagation des ondes.....	86
8.2	Longueur d'onde et fréquence.....	87
8.3	Les problèmes d'émission et de réception.....	88
9	Le système GPS	89
9.1	Présentation.....	89
9.2	L'obtention d'un point GPS	90
9.3	Les différents systèmes de positionnement par satellite.....	90
9.4	La navigation utilisant un GPS	90
10	Calculs de distance	91
10.1	Utilisation des coordonnées angulaires (lat et long).....	91

10.2 Exercices	93
10.3 Calculs et conversions.....	95
QCM	96

————— CHAPITRE 4 – LA RÉGLEMENTATION AÉRONAUTIQUE ————— 101

1 Les organismes mondiaux, européens et français.....	101
1.1 Au niveau mondial : naissance de l’OACI et de l’IATA	101
1.2 Au niveau européen : l’EASA	102
1.3 La DGAC.....	102
1.4 Du niveau international au niveau national : l’entonnoir	103
2 Sécurité, sûreté : quelles différences ?	103
2.1 La sécurité	103
2.2 La sûreté	103
2.3 Les organismes d’enquête sur la sécurité	103
3 Les règles de l’air	104
3.1 La proximité entre aéronefs.....	104
3.2 La priorité entre aéronefs.....	104
3.3 En Europe, les règles « SERA »	105
3.4 La hauteur minimale de vol en aviation habitée.....	105
4 Circulation aérienne et règles de vol	106
4.1 Typologie de la circulation aérienne	106
4.2 Les règles de vol.....	106
4.3 Responsabilité et autorité du commandant de bord.....	106
5 Services et organismes de la circulation aérienne.....	106
5.1 La terminologie.....	106
5.2 Le service de contrôle.....	107
5.3 Le service d’information de vol (SIV)	107
5.4 Le service d’alerte.....	108
6 L’organisation des espaces aériens.....	108
6.1 Les grandes régions de navigation aérienne (GRNA)	108
6.2 Les régions d’information de vol.....	109
6.3 Les portions d’espaces aériens contrôlées.....	109
6.4 Les classes d’espaces aériens	110
7 Une nouvelle définition de l’espace aérien	111
8 Conclusion.....	113
QCM	114

————— CHAPITRE 5 – LA CONNAISSANCE TECHNIQUE DES DRONES ————— 117

1 Le drone	117
2 Le système électrique des drones	118
2.1 Le courant électrique et la tension.....	118
2.2 Les lois de l’électricité.....	119

2.3 La puissance et l'énergie électrique	122
3 Les batteries.....	124
3.1 Technologie des batteries et critères de choix	124
3.2 Les batteries Li-Po.....	125
3.3 Les associations de modules Li-Po	125
3.4 Les caractéristiques complètes d'un accumulateur Li-Po	126
3.5 Entretien des batteries.....	127
4 Le moteur électrique.....	128
4.1 Principe général de fonctionnement	128
4.2 Le moteur électrique classique avec balais, dit « <i>brushed</i> ».....	129
4.3 Le moteur électrique sans balais, dit « <i>brushless</i> »	129
5 Le servomoteur et l'hélice.....	131
5.1 Le servomoteur	131
5.2 L'hélice	132
6 Les instruments de bord d'un drone	132
6.1 L'IMU ou « <i>Inertial Measurement Unit</i> »	132
6.2 Au fait, qu'est-ce qu'un capteur ?	133
6.3 Quelques instruments munis de capteurs	134
6.4 Et les instruments gyroscopiques ?.....	136
6.5 Bilan	137
7 Le système de pilotage	137
7.1 Les trois modes de pilotage principaux.....	137
7.2 Les conséquences d'une réversion de mode.....	138
7.3 D'autres fonctionnalités sophistiquées.....	138
8 Première leçon de pilotage.....	139
8.1 Les trois axes et les gouvernes d'un drone type avion	139
8.2 Les trois axes et les gouvernes d'un drone de type multicoptère....	141
8.3 Les effets induits : exemple du lacet inverse des drones avion	143
9 L'entretien d'un drone	144
9.1 Les efforts appliqués sur la structure	144
9.2 L'importance de l'entretien	144
QCM	145

CHAPITRE 6 – LA RÉGLEMENTATION SPÉCIFIQUE AUX DRONES 149

1 Cadre réglementaire, textes et dates	149
1.1 Acteurs et développement de la réglementation	149
1.2 Sites internet et guides à consulter impérativement.....	150
2 La réglementation française	151
2.1 Le principe fondateur.....	151
2.2 La période de transition	151
2.3 Les textes fondateurs	151
3 La réglementation européenne	152
3.1 Le fondement de la réglementation européenne	152

3.2	Les changements introduits par la réglementation européenne.....	153
3.3	Pour mieux comprendre.....	154
3.4	Les classes de drones identifiées par un marquage « CE ».....	157
3.5	Aperçu des trois catégories d'exploitation.....	158
3.6	Différencier propriétaire, exploitant et télépilote.....	159
4	La catégorie d'exploitation « ouverte ».....	159
4.1	La sous-catégorie A1.....	160
4.2	La sous-catégorie A2.....	161
4.3	La sous-catégorie A3.....	163
4.4	Le vol dans un autre État membre.....	164
4.5	L'enregistrement en catégorie ouverte.....	165
4.6	Dispositif de signalement électronique et lumineux, et identification directe à distance en catégorie ouverte.....	165
4.7	L'enregistrement de votre drone en catégorie ouverte.....	167
4.8	La notice d'information standardisée.....	167
4.9	Résumé de la catégorie ouverte.....	167
5	La catégorie d'exploitation « spécifique ».....	168
5.1	Option 1 : réaliser une étude complète des risques (méthode SORA).....	169
5.2	Option 2 : la déclaration selon un scénario standard.....	174
5.3	Option 3 : utiliser une analyse de risque prédéfinie (PDRA).....	178
5.4	Option 4 : demander la délivrance d'un LUC.....	180
5.5	L'enregistrement d'exploitant d'UAS en catégorie spécifique.....	180
5.6	L'enregistrement du drone en catégorie spécifique.....	180
5.7	Dispositif de signalement électronique et lumineux, et identification directe à distance en catégorie spécifique.....	180
5.8	Le manuel d'exploitation.....	181
5.9	La déclaration d'activité d'exploitant en catégorie spécifique.....	181
5.10	Le bilan annuel d'activité.....	182
5.11	Zone minimale d'exclusion des tiers/zone contrôlée.....	182
5.12	La catégorie spécifique en résumé.....	184
6	Les conditions particulières de vol.....	184
6.1	Le vol à proximité des aérodromes.....	184
6.2	Le vol à plus de 120 mètres de hauteur.....	189
6.3	Le vol au sein d'espaces aériens à statut particulier.....	190
6.4	Le vol dans une zone d'entraînement militaire.....	191
6.5	Le survol des obstacles artificiels.....	191
6.6	Le vol de nuit.....	191
6.7	Le vol au sein d'une zone peuplée.....	192
6.8	Les prises de vues.....	192
7	La catégorie d'exploitation « certifiée ».....	193
8	Responsabilités et assurances.....	193
8.1	Des responsabilités différentes selon les rôles.....	193
8.2	Les assurances.....	194

9 La protection de la vie privée	195
9.1 Espace public et espace privé	195
9.2 Le droit à la vie privée	195
9.3 Ce qui me concerne en tant que télépilote	196
10 Le cas particulier de l'aéromodélisme	196
10.1 L'aéromodélisme	196
10.2 L'intégration par la réglementation européenne	196
10.3 Qu'est-ce qu'un aéromodèle ?	197
10.4 Qu'est-ce qu'une association d'aéromodélisme ?	197
10.5 Critères pour entrer dans le champ de l'aéromodélisme	197
10.6 Les prises de vue en aéromodélisme	198
10.7 L'enregistrement des drones en aéromodélisme	198
10.8 Autres règles et dispositions	198
11 Cas pratiques simples pour le loisir	199
11.1 Mon drone pèse moins de 250 g : sous-catégorie A1	200
11.2 Mon drone pèse plus de 250 g mais moins de 900 g : sous-catégorie A1	200
11.3 Mon drone pèse plus de 900 g mais moins de 4 kg : sous-catégorie A2	200
11.4 Mon drone pèse plus de 4 kg mais moins de 25 kg : sous-catégorie A3	201
11.5 Le cas particulier de l'aéromodélisme	201
11.6 Et si je souhaite faire plus avec mon drone ?	202
12 Les documents à présenter en cas de contrôle	202
13 Exemples d'incidents et accidents	202
13.1 Incident grave d'un A320 Air France le 19 février 2016	202
13.2 Incident grave d'un DJI Inspire 2 le 14 juillet 2019	203
13.3 Incident grave d'un drone en Belgique	203
13.4 Un drone tombe sur le toit d'une maison en Angleterre	203
14 Pour aller plus loin : drones et aviation habitée	204
QCM	205

CHAPITRE 7 – LA PRÉPARATION ET LA GESTION DU VOL 209

1 Les bases de la communication radiotéléphonique	209
1.1 Le code Morse et l'alphabet aéronautique	209
1.2 L'échelle de lisibilité radiotéléphonique	211
1.3 Le code Q	211
1.4 Hauteur, altitude et niveau de vol	212
2 L'information aéronautique	213
2.1 Le système intégré d'information aéronautique IAIP	214
2.2 AIP et AIC : des informations permanentes	214
2.3 Consulter l'AIP	214
2.4 Les zones à statut particulier	215

2.5	Le cycle AIRAC : mise à jour de l'information permanente	217
2.6	NOTAM et SUP AIP : les informations temporaires	217
3	Les messages météorologiques	220
3.1	METAR et TAF : les messages météorologiques d'aérodrome	220
3.2	Le message d'alerte météorologique SIGMET	221
3.3	Les abréviations des messages météorologiques à retenir.....	221
4	Les cartes météorologiques.....	222
4.1	Les cartes TEMSI pour le temps significatif	222
4.2	Les cartes WINTEM pour les vents et les températures.....	224
5	Les cartes de navigation.....	225
5.1	La carte des restrictions pour les drones de loisir.....	225
5.2	La carte de vol à vue, OACI VFR.....	226
5.3	Les cartes d'approche à vue des aérodromes, cartes VAC	226
6	La préparation d'un vol par drone	226
6.1	Drone et zone de vol : par où dois-je commencer ?	226
6.2	Les exigences réglementaires essentielles	227
6.3	Le dossier météorologique.....	228
6.4	Déclarations, autorisations, dérogations, notifications	228
6.5	Le jour J	228
6.6	Briefing et débriefing	229
6.7	Quelques acronymes utiles.....	230
6.8	Des plateformes qui vous facilitent la tâche !	230
7	La gestion du vol.....	231
7.1	De l'importance de l'entretien et des procédures adaptées.....	231
7.2	Procédure vs. <i>check-list</i>	232
QCM	234

CHAPITRE 8 – LES FACTEURS HUMAINS 237

1	Les concepts de base	237
1.1	Les facteurs humains dans l'aviation.....	237
1.2	Devenir un télépilote compétent.....	237
2	Physiologie et psychologie	238
2.1	La vision chez l'homme.....	238
2.2	Les effets des médicaments et de l'alcool	241
2.3	Le stress.....	242
2.4	Fatigue, sommeil et rythme circadien.....	244
3	Connaissances, compétences, expériences.....	246
4	La prise de décision	247
5	Rapporter une situation et principe du <i>closed loop</i>	248
5.1	Communiquer efficacement sur une situation.....	248
5.2	Le <i>closed loop</i> ou boucle fermée	249
6	La mémoire	250

6.1 La mémoire à long terme	250
6.2 La mémoire à court terme.....	250
6.3 La mémoire de travail.....	251
7 Conscience d'une situation et désorientation visuelle.....	251
7.1 La conscience d'une situation.....	251
7.2 La désorientation visuelle.....	251
8 Évitement et gestion des erreurs	252
8.1 Qu'est-ce qu'une erreur ?.....	252
8.2 Comment éviter nos erreurs ?.....	253
9 Compte-rendu d'événement et retour d'expérience	253
9.1 Le compte-rendu d'événement.....	253
9.2 Le retour d'expérience	255
10 Le principe de culture juste	256
QCM	258
Solutions.....	261
Crédits iconographiques	267
Acronymes	269
Index	271

Introduction

Depuis l'entrée en vigueur de la réglementation européenne le 1^{er} janvier 2021, l'utilisation de drones civils est soumise à un ensemble de règles identiques au sein de tous les États membres de l'Union européenne, notamment en ce qui concerne les formations et examens théoriques et pratiques des pilotes à distance. Néanmoins, en France, certaines dispositions nationales demeurent applicables pendant une période de transition qui court jusqu'en 2023.

En plus de vous apporter les éléments de connaissances essentiels dans divers domaines (météorologie, mécanique du vol, navigation, réglementation aéronautique, préparation du vol et facteurs humains), cet ouvrage se veut une aide à la compréhension de la nouvelle réglementation européenne. En outre, il vous permettra d'enrichir vos connaissances en complément de vos futures formations (obligatoires ou non) et de vous préparer aux examens disponibles à ce jour et à ceux à venir.

Pour vous aider, vous trouverez en page suivante un tableau synthétique qui reprend les différentes formations et examens réglementaires. Bonne lecture !

Titre/intitulé	Utilité	Partie théorique	Partie pratique
<p>Formation loisir</p>	<p>Piloter un drone > 800 g : - en « équivalent catégorie ouverte » pendant la période de transition ; - en aéromodélisme, dans certains cas.</p>	<p>Plateforme « FoxAlphaTango » : Formation e-learning + examen en ligne (40 QCM)</p>	<p><i>Formation pratique conseillée</i> Obligatoire pour aéromodèle de catégorie B</p>
<p>Brevet d'Aptitude à Distance (BAPD)</p>	<p>Piloter en sous-catégories A1 et A3 (catégorie ouverte)</p>	<p>Plateforme « Formation catégorie ouverte » : Formation e-learning + examen en ligne (40 QCM)</p>	<p><i>Formation pratique conseillée</i></p>
<p>Formation et examen A1/A3</p>	<p>Piloter en sous-catégorie A2 (catégorie ouverte)</p>	<p>Examen en centre d'examen DGAC (30 QCM) <i>Formation théorique conseillée</i></p>	<p>Auto-formation pratique obligatoire</p>
<p>Pas d'intitulé (titre qui se compose du CATT et des documents relatifs à la formation pratique basique)</p>	<p>Équivalence valable 5 ans du BAPD (conditions de prorogation à définir) Piloter un drone selon les scénarios standards nationaux (intérêt pour les télépilotes actifs avant 2021)</p>	<p>Examen en centre d'examen DGAC (60 QCM) = délivrance du Certificat d'Aptitude Théorique de Télépilote (CATT) <i>Formation théorique conseillée</i></p>	<p>Formation « pratique basique » obligatoire = délivrance d'une attestation de formation + livret de progression</p>
<p>Certificat d'Aptitude de Pilote à Distance (CATPD)</p>	<p>Piloter selon les scénarios standards européens (STS)</p>	<p>Examen en centre d'examen DGAC (40 QCM) <i>Formation théorique conseillée</i></p>	<p>Formation et examen pratique obligatoires</p>
<p>Autres titres (autres cas)</p>	<p>Piloter un drone dans d'autres cas (PDRA, analyse SORA, LUC)</p>	<p>À définir par le demandeur et à proposer à la DGAC dans le cadre de la demande d'autorisation d'exploitation</p>	

Chapitre 1

La météorologie

Objectifs du chapitre – programme d'examen

Ce chapitre décrit le milieu d'évolution des drones. Pour prévoir l'évolution des conditions météorologiques, et les dangers qui y sont associés, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement de notre atmosphère et de connaître les moyens de s'informer.

1 L'atmosphère

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse qui entoure la Terre (Figure 1.1). Vue de l'espace, cette bande bleutée apparaît peu épaisse. Sa limite externe est assez difficile à déterminer car sa densité diminue continuellement. L'atmosphère est caractérisée par sa **composition**, sa **température**, sa **pression** et son **humidité** en chaque point. Ces grandeurs sont connues par des observations et des mesures en temps réel qui permettent de construire une modélisation et donc une prévision à court terme de son évolution.

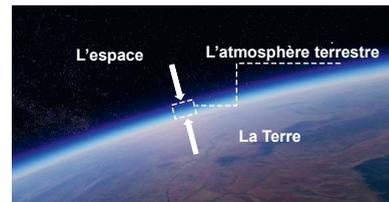


Figure 1.1 – L'atmosphère

1.1 La composition de l'atmosphère

L'air atmosphérique est constitué d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Le rôle très important de l'eau et son implication sous ses différentes phases (solide, liquide et vapeur) dans les phénomènes météorologiques justifie que ce composant soit considéré à part. L'air sec est lui-même constitué d'un mélange de plusieurs gaz, de composition pratiquement constante dans les couches inférieures intéressant les météorologistes (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 – La composition de l'air sec

Composition de l'air sec	Pourcentage volumétrique
Diazote N₂	78,09 %
Dioxygène O₂	20,95 %
Argon Ar	0,93 %
Dioxyde de carbone CO₂ ; Hélium He ; Néon Ne ; Krypton Kr ; Dihydrogène H₂ ; Xénon Xe ; Ozone O₃ .	0,03 %

■ Le diazote (N_2) et le dioxygène (O_2) représentent 99 % de l'air sec.

Le pourcentage de dioxyde de carbone (CO_2) évolue progressivement avec l'activité industrielle. La concentration en ozone (O_3) au niveau de la mer est très faible, mais elle devient plus importante en altitude au niveau de la couche d'ozone qui nous protège des rayonnements UV et qui est située entre 15 km et 45 km d'altitude.

La composition de l'atmosphère est à retenir : 78 % de diazote (N_2), 21 % de dioxygène (O_2), et 1 % d'autres gaz dont l'argon (Ar) est le plus important.

En plus de ces composants gazeux, on trouve en suspension dans l'atmosphère des particules diverses de dimensions microscopiques (pollution, débris divers, végétaux et minéraux comme des particules de sel marin provenant de l'évaporation des embruns, etc.). La présence de ces divers corpuscules joue un rôle très important dans les phénomènes météorologiques. En effet, la vapeur d'eau atmosphérique va interagir avec ces **noyaux de condensation** précurseurs des premières gouttes ou des premiers cristaux dans les processus de formation des nuages.

• **CO_2 , O_3 et activités humaines**

• Même si, dans le cadre d'un bilan atmosphérique, leurs concentrations sont très faibles, une grande partie du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique, mais aussi de l'ozone (O_3) libéré au niveau du sol, provient des activités humaines. Le dioxyde de carbone joue un rôle prépondérant dans l'effet de serre qui se traduit depuis quelques années par des températures en hausse et des phénomènes atmosphériques plus violents.

• L'ozone est quant à lui responsable d'une pollution dangereuse pour les humains au niveau des villes.

1.2 Le découpage de l'atmosphère

C'est la variation (décroissance, croissance ou pause de la température avec l'altitude) qui a servi d'indicateur pour diviser l'atmosphère en plusieurs grandes couches.

Sur la figure 1.2, chaque changement de zone correspond à un changement notable de comportement de la température que nous détaillerons depuis le sol vers l'espace.

♦ **La troposphère**

La **troposphère** est la zone la plus proche du sol. La température y décroît habituellement de manière linéaire jusqu'à la tropopause située aux alentours de 10 km d'altitude. La troposphère concentre la majeure partie de la masse d'air et est le siège des phénomènes météorologiques. C'est aussi la zone d'évolution de la quasi-totalité des aéronefs, nous y attacherons donc le plus grand intérêt.

♦ **La stratosphère**

Découpée, comme les autres couches, selon l'évolution de la température, la **stratosphère** comporte **deux parties**. Elle débute avec la **tropopause** qui correspond à une stabilisation de la température autour de -55 °C selon la latitude. Les engins volant que l'on peut y rencontrer sont rares car seuls des avions ultraperformants comme l'était le Concorde peuvent accéder à ces très hautes altitudes. On y voit donc passer de rares avions militaires, des ballons stratosphériques principalement à usage météorologique, et quelques drones dits HALE (*High Altitude Long Endurance*, c'est-à-dire des drones à haute endurance et volant à haute altitude) comme le « RQ-4 Global Hawk ». La température se met ensuite à augmenter jusqu'à atteindre une seconde zone stable autour de 0 °C nommée **stratopause**, située vers 50 km d'altitude. Notons

la présence dans la stratosphère de la **couche d'ozone**, positionnée entre 15 km à 45 km d'altitude, qui nous protège des rayonnements ultraviolets (UV-C) du Soleil.

♦ La mésosphère

C'est la stratopause qui marque l'entrée dans la **mésosphère** pour laquelle la température se remet à baisser (jusqu'à -90 °C environ). La mésosphère quant à elle s'étend de 50 km jusqu'à 85 km d'altitude environ. Dans cette zone, la densité de l'air est environ mille fois plus faible que dans la troposphère ! Cette couche et les suivantes ne sont traversées ou parcourues que par des engins spatiaux.

♦ La thermosphère et la ligne de Kármán

Dans la **thermosphère**, la température recommence à croître jusqu'à 500 °C vers 400 km d'altitude. C'est dans la thermosphère que l'on franchit la **ligne de Kármán** qui marque la frontière entre l'atmosphère terrestre et l'espace. Cette ligne a été positionnée arbitrairement par la FAI (Fédération aéronautique internationale) à 100 km au-dessus de la surface de la Terre.

Si la température croît ici, cela n'a plus beaucoup de sens ni la moindre importance car la densité de l'atmosphère y est extrêmement faible. Cette température élevée n'a donc aucun effet sur les objets que l'on y trouve (les premiers satellites) ni même sur les astronautes en sorties extravéhiculaire. C'est cette zone qui accueille, vers 400 km d'altitude, l'énorme structure de l'ISS (*International Space Station*, la Station spatiale internationale). La pression y décroît très rapidement passant de 10^{-2} hPa à 85 km d'altitude jusqu'à 10^{-8} hPa à 500 km d'altitude ! Les faibles traces d'atmosphère résiduelle restent malgré tout suffisantes pour freiner, et donc faire revenir sur Terre, les satellites qui évoluent dans cette proche banlieue de la Terre.

♦ L'exosphère

La description de l'atmosphère terrestre se termine avec l'**exosphère**, qui se développe jusqu'à 50 000 km d'altitude, avec une densité gazeuse extrêmement faible. On y approche le vide spatial (10^{-8} hPa dans la partie basse la plus dense !). On y trouve les satellites géostationnaires positionnés à 36 000 km d'altitude et dont les évolutions ne sont pas perturbées par des densités de particules aussi faibles.

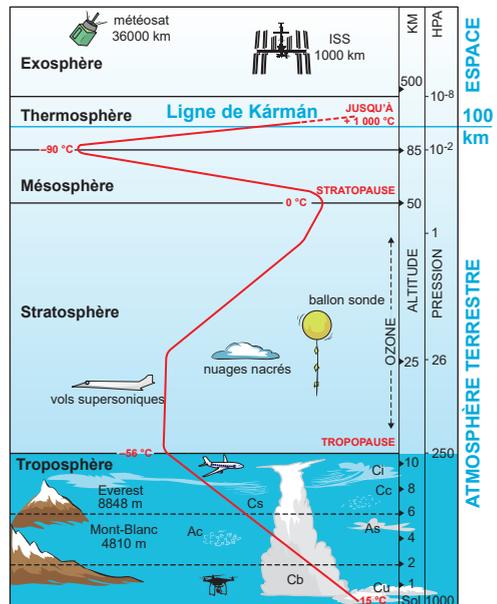


Figure 1.2 – Le découpage de l'atmosphère

✦ **Le cas très particulier de la tropopause**

La tropopause, qui marque le début de la stratosphère, débute à une altitude et surtout à des températures très variables pouvant passer pour paradoxales (Figure 1.3). Basse et chaude dans les régions polaires (8 km et – 50 °C), elle s’élève et donc se refroidit en zone tempérée puis devient très élevée et très froide (17 km et – 80 °C) dans la région équatoriale. Ce paradoxe trouve son explication dans l’altitude de cette limite liée à la vitesse de rotation de la Terre et non à la température au sol. La tropopause matérialise aussi la limite supérieure de la zone de formation des courants jets, dits « **jet stream** », qui se forment entre les cellules convectives (de Hadley, de Ferrel et polaire). Ces très forts vents d’altitude circulent autour de la Terre à des vitesses impressionnantes allant de 200 km/h à 400 km/h.

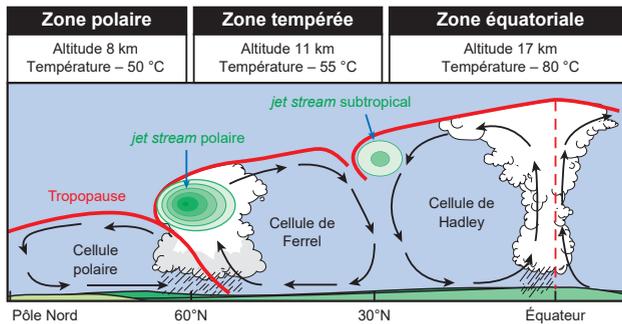


Figure 1.3 – Tropopause et jet stream

1.3 La température de l’air

✦ **L’échelle Celsius, le zéro absolu et l’échelle kelvin**

Ce sont les travaux d’Anders Celsius qui ont permis la création des thermomètres à dilatation gradués en 100 divisions à partir du point de congélation de l’eau (0 °C avec C pour Celsius) et de son point d’ébullition à 100 °C. Lord Kelvin, de son véritable nom William Thomson, va donner à la température une orientation plus thermodynamique puisque cette grandeur devient une mesure de l’agitation du milieu. Il existe donc un **zéro absolu** que l’on atteint lorsque plus le moindre atome ne vibre ou ne bouge. Sa valeur, déterminée expérimentalement, le place à – 273,15 °C, qui devient donc le point zéro de l’échelle kelvin. Notons au passage que si cette échelle a une limite inférieure, elle n’a aucune limite supérieure. Notons aussi que c’est la température, notée *T* en kelvin, qui intervient dans toutes les expressions scientifiques.



Figure 1.4 – Thermomètre kelvin/Celsius

Le **kelvin** (K) ayant la même valeur que le **degré Celsius** (1 K = 1 °C), il en découle naturellement une relation directe (décalage) des deux échelles de température (Figure 1.4) :

$$T_{(K)} = t_{(°C)} + 273,15 \text{ ou } t_{(°C)} = T_{(K)} - 273,15$$

1.4 Les échanges thermiques dans l'atmosphère

◆ Conduction, convection et rayonnement

Les échanges de chaleur dans l'atmosphère terrestre sont d'une importance majeure pour la météorologie. Il est indispensable de les comprendre pour pouvoir analyser et expliquer le fonctionnement de l'atmosphère. La thermodynamique a trait aux processus de transfert d'énergie qui se font dans toutes les relations calorifiques et mécaniques auxquelles sont soumises les masses gazeuses. La chaleur est une forme d'énergie que l'on mesure par la température. Pour une certaine masse, plus celle-ci est élevée, plus il y a d'énergie. Or, cette énergie est toujours diffusée vers des corps de température plus basse.

Dans le cas de l'atmosphère, le réchauffement et le refroidissement se font très simplement. Le Soleil réchauffe la Terre, qui en diffuse à son tour la chaleur à l'atmosphère. Quand la Terre refroidit, l'atmosphère en subit immédiatement l'influence. Ces transferts thermodynamiques revêtent plusieurs formes. Il n'existe pour cela que trois modes d'échange possibles : la conduction, la convection et le rayonnement (Figure 1.5).

■ La **conduction** est le mode de transfert par contact et/ou à travers la matière.

Exemple : si vous ressentez une brûlure en tenant le manche métallique d'une casserole posée sur un feu c'est que cette dernière lui a transmis de la chaleur par conduction.

■ La **convection** est le mode de transfert par brassage de fluide, liquide ou gazeux.

Exemple : l'air chaud circulant dans une pièce utilisant un chauffage électrique mural (convecteur). On peut aussi visualiser directement les mouvements d'un liquide dans une casserole placée sur un feu.

■ Le **rayonnement** est un mode sans contact, donc plus difficile à appréhender pour l'homme, basé sur l'émission d'ondes électromagnétiques (principalement des infrarouges).

Exemple : vous pouvez détecter la présence de braises les yeux fermés uniquement par le ressenti du rayonnement infrarouge reçu par vos mains. C'est aussi de cette manière, par rayonnement, que le Soleil transmet une partie de l'énergie qu'il libère vers la Terre.

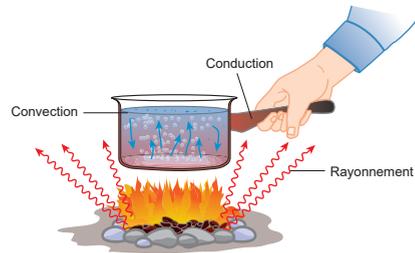


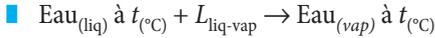
Figure 1.5 – Les trois modes de transmission de la chaleur

◆ L'importance du rôle thermodynamique des changements d'états de l'eau

Pour cuisiner vous avez versé un litre d'eau froide, à 20 °C, dans une casserole posée sur une plaque chauffante. Pour porter cette eau à ébullition (c'est-à-dire à 100 °C), la plaque chauffante doit fonctionner quelques minutes à pleine puissance. Si vous oubliez ensuite de réduire le chauffage et que vous revenez dix minutes plus tard vous observerez que l'eau est toujours en ébullition et que le niveau a très légèrement baissé.

Ces dix minutes de chauffage à pleine puissance n'ont servi qu'à la transformation de quelques grammes d'eau liquide en vapeur d'eau (à 100 °C). On peut en conclure que la transformation

liquide → vapeur à température constante (ici 100 °C) nécessite une très grande quantité d'énergie ! Cette grandeur, notée L , est appelée enthalpie de changement d'état (également appelée chaleur latente de changement d'état ou chaleur de transition de phase). Pour l'eau, la valeur de $L_{\text{liq-vap}}$ est considérable (2 265 kJ/kg).



Considérons un autre exemple. En vous baignant un jour de grand vent, votre sortie de l'eau s'est accompagnée d'une intense sensation de froid. L'eau sur votre corps s'est rapidement évaporée et cette transformation a nécessité, là encore, un important apport énergétique $L_{\text{liq-vap}}$, que l'eau liquide a dû prélever sur son environnement et notamment sur vous ! Si c'est la transformation inverse qui se produit et que de l'eau vapeur se condense en eau liquide, l'eau va restituer à son environnement la même quantité d'énergie $L_{\text{liq-vap}}$. Ces transformations, dans un sens (vaporisation), ou dans l'autre (condensation), sont très fréquentes dans notre atmosphère, et ces deux exemples de la vie courante permettent de mieux comprendre pourquoi les échanges d'énergie associés à ces changements d'état de l'eau vont fortement impacter la température des masses d'air dans lesquelles ils se produisent.

Les corps comme l'eau peuvent évoluer entre les trois états de la matière (solide, liquide, gazeux). Il est important de savoir nommer les six transformations possibles (Figure 1.6). Une enthalpie de changement d'état correspond à chacune d'entre elles.

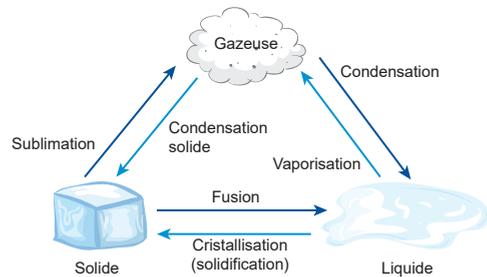


Figure 1.6 – Les changements d'état de l'eau

Nous retiendrons que des quantités importantes de chaleur peuvent être prises sur l'environnement, même pour une simple évaporation, et qu'à l'inverse, la condensation de vapeur en gouttelettes d'eau, simplement lorsqu'un nuage se forme, restitue toute cette chaleur à l'environnement. **Les changements d'état de l'eau ont une importance capitale en météorologie.**

Ce phénomène est général à tous les changements d'état même si l'eau nécessite des énergies bien plus importantes que la plupart des autres corps.

♦ L'énergie reçue par la surface terrestre

L'énergie reçue par le sol terrestre est quasi exclusivement d'origine solaire¹ (Figure 1.7). Le flux de rayonnement solaire étant constant, il faut bien comprendre que l'énergie reçue par 1 m² de sol terrestre dépend de son orientation par rapport à ce flux. Si le rayonnement arrive perpendiculairement au sol, il est maximum. Il diminue si le rayonnement solaire arrive de manière oblique, soit du fait de l'heure de la journée soit parce que l'on se trouve à des latitudes élevées. Il devient évidemment nul pendant la nuit.

Une même quantité de rayonnement solaire, mesuré perpendiculairement au flux, vient s'étaler sur de plus grandes surfaces lorsque l'on s'éloigne de l'équateur vers les pôles. L'inclinaison des

1. La géothermie est négligeable par rapport à l'énergie solaire reçue par le sol.

rayons solaires fait que la quantité d'énergie par mètre carré reçue par la Terre diminue fortement lorsque l'on s'approche des pôles (Figure 1.8). Ceci explique les grandes différences de température observées à la surface de la Terre.

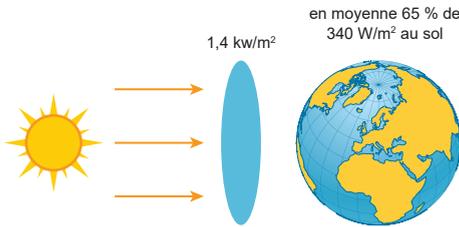


Figure 1.7 – Le rayonnement solaire reçu par la Terre (température à la surface de la terre, rôle de la latitude et variations saisonnières)

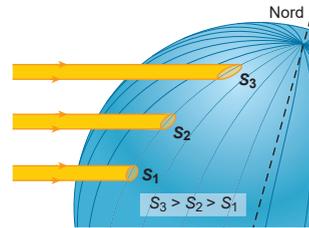


Figure 1.8 – Variation de l'éclairement en fonction de la latitude

♦ Température et alternance des saisons

L'inversion des saisons entre les hémisphères Nord et Sud implique que, contrairement à des croyances populaires, ce n'est pas la distance Terre-Soleil qui crée cette alternance mais l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre (Figure 1.9).

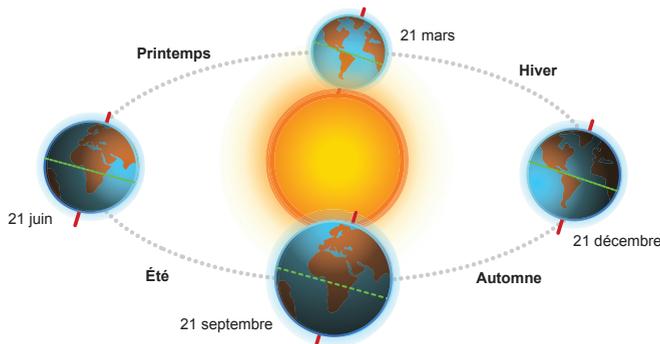


Figure 1.9 – Le cycle des saisons

L'alternance des saisons résulte de l'inclinaison de 23° de l'axe nord/sud de rotation de la Terre par rapport à la normale au plan de l'orbite Terre-Soleil.

Cette inclinaison importante de l'axe de rotation de la Terre, influe sur l'incidence du rayonnement solaire qui est donc reçu différemment selon les saisons. Vu depuis le sol, le soleil passe très bas sur l'horizon à midi en hiver, et très haut en été. Cette variation d'éclairement modifie énormément l'énergie reçue par mètre carré tout au long de l'année (Figure 1.10).

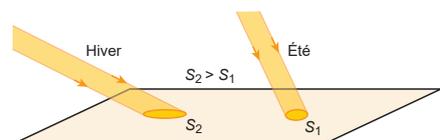


Figure 1.10 – La variation saisonnière de l'éclairement

Le rayonnement reçu dépend donc du lieu géographique (latitude), de la saison et de l'heure de la journée. L'absorption de ce rayonnement dépend par ailleurs de la nature du sol, caractérisée, entre autres, par son albédo (pouvoir réfléchissant), mais aussi par la nature de sa couverture végétale ou minérale.

- Pour les curieux, l'orbite de la Terre n'est pas tout à fait circulaire. C'est une ellipse dont le foyer est placé au niveau du centre d'inertie du système solaire, et cette ellipse n'est pas parcourue à vitesse constante. Tout ceci restant en accord avec les lois de Kepler.

♦ Albédo et effets de surface

L'**albédo** est le pouvoir de réflexion d'un corps. Il dépend de sa couleur mais aussi de sa nature. Celui de la neige fraîche (d'environ 0,8 ou 80 %) est deux fois plus important que celui d'un gros rocher calcaire (de 0,4 ou 40 %) et vaut huit fois celui d'une épaisse forêt de sapins (0,1 ou 10 %). Cela signifie que la neige absorbe 20 % de l'énergie et en réfléchit 80 %, tandis que la forêt en absorbe 90 % et en réfléchit 10 %.

Pour ce qui est des échanges thermiques entre le sol et l'atmosphère, il faudra se préoccuper de l'utilisation de l'énergie. Reprenons l'exemple d'une forêt de sapins que l'on va comparer à un parking goudronné. Leurs albédos respectifs sont similaires : 10 % de réflexion et 90 % d'absorption. Mais, alors que la forêt va utiliser une grande quantité de cette énergie pour sa croissance et ses échanges physicochimiques (absorption de CO_2 et rejet de vapeur d'eau), le sol du parking va se contenter de devenir brûlant et échangera par conduction cette énergie avec l'air atmosphérique situé à son contact. Au final, le parking va former des bulles d'air chaud qui vont se développer en ascendances alors qu'à l'inverse la forêt va rester fraîche car elle a dissipé une importante quantité de chaleur dans la formation de vapeur d'eau (encore $L_{\text{liq-vap}}$), et sera plutôt le siège de descendances (Figure 1.11).



Figure 1.11 – Ascendances et descendances locales

L'analyse thermique du sol au voisinage duquel peut évoluer un drone dépend donc de nombreux facteurs (albédo, végétaux, couleur, etc.) que le télépilote devra évaluer.

♦ Les nuages et le rayonnement terrestre

Le rayonnement est un transfert d'énergie par le biais d'ondes électromagnétiques. Tous les corps chauds rayonnent : par exemple, le Soleil émet un rayonnement lumineux, et la Terre émet un rayonnement obscur de type IR (infrarouge). Les nuages influent sur la température locale du fait qu'ils sont composés d'eau et que cela leur donne un important pouvoir d'absorption du rayonnement infrarouge que libère la Terre. Ce blocage de rayonnement et sa restitution partielle vers le sol font qu'une nuit nuageuse est beaucoup plus chaude qu'une nuit de ciel clair.

Analysons les différents cas proposés sur la figure 1.12 :

- **Cas 1 (ciel clair le jour)** : le rayonnement terrestre est compensé par le rayonnement solaire, et celui-ci étant prépondérant, la température augmente rapidement.
- **Cas 2 (nuit claire)** : le Soleil n'apporte plus son énergie, le rayonnement terrestre se perd dans l'espace et la Terre se refroidit considérablement.

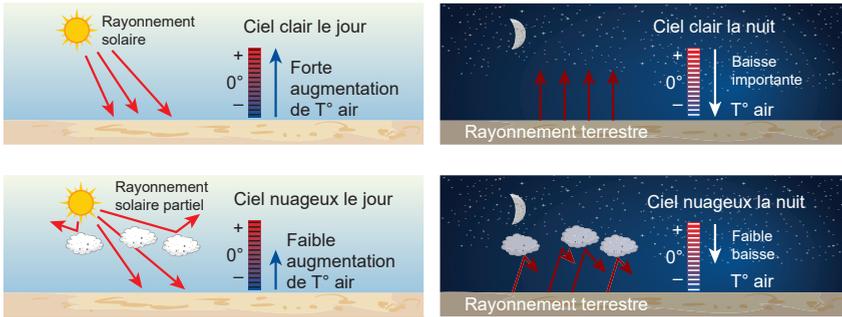


Figure 1.12 – Variations diurnes et nocturnes

- **Cas 3 (ciel couvert le jour)** : le rayonnement solaire est intercepté par les nuages qui en absorbent beaucoup et qui en réfléchissent une grande partie vers l'espace. Le rayonnement infrarouge terrestre est lui aussi piégé par les nuages et revient partiellement vers la Terre. On n'observe donc qu'une très faible augmentation de température au cours de la journée.
- **Cas 4 (ciel couvert la nuit)** : le rayonnement terrestre se réfléchit sur la couche nuageuse et une grande partie revient vers la Terre. La baisse de température observée est faible.

✦ Les variations diurnes

Pour un lieu donné et une couverture nuageuse sans influence notable, la température va varier en fonction du rayonnement solaire reçu au cours de la journée et du rayonnement infrarouge perdu par le sol au cours de la nuit.

On observe donc une oscillation diurne de la température dont le minimum se situe environ une demi-heure après le lever du Soleil, et le maximum environ deux heures après le passage du Soleil au méridien (Figure 1.13). L'analyse de la situation, prenant en compte la saison, l'heure, les nuages, le vent et l'observation de l'environnement local donnera des indications très utiles sur l'évolution de la température à prévoir.

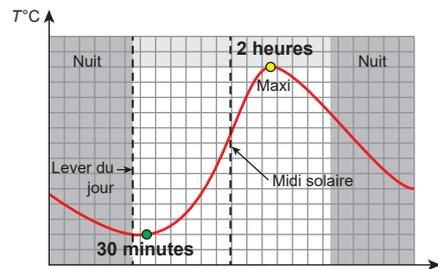


Figure 1.13 – Oscillation journalière de la température

1.5 La pression

✦ Définition macroscopique de la pression

La pression correspond à l'**action d'une force sur une surface**. Elle augmentera si la force augmente, ou si sa zone d'action est plus concentrée c'est-à-dire si la surface a diminué.

La pression P est donc par définition un rapport $P = F/S$ où F est une force (en N) et S une surface (en m^2). Le résultat obtenu s'exprime en pascal (Pa) et on a $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/m^2$.

On peut ainsi considérer que la pression atmosphérique correspond au poids de la colonne d'air qui appuie sur un mètre carré de surface au sol (Figure 1.14). La masse d'air ainsi définie est

d'environ 10 tonnes soit 10^4 kg. La force exercée sur le sol est donc 100 000 N ($P = m \times g$ avec $g \approx 10 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$) ce qui nous amène pour la pression à $100\,000 \text{ N}/\text{m}^2$ soit 10^5 Pa .

En remplaçant la colonne d'air de 100 km de haut par une colonne de mercure, on obtient la même pression avec 76 cm de ce liquide très dense. Ce qui a permis à Torricelli d'inventer le baromètre à mercure en 1643 (Figure 1.15).

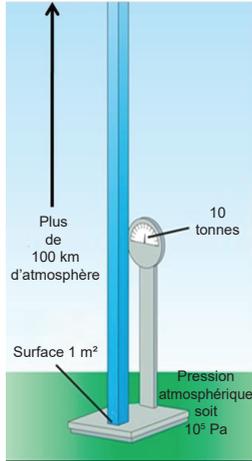


Figure 1.14 – La pression atmosphérique

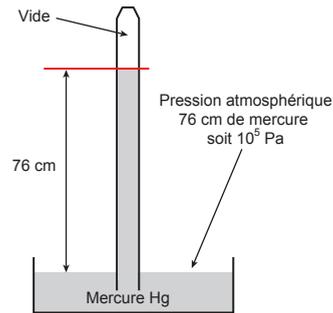


Figure 1.15 – Le baromètre à mercure inventé par Torricelli

En pratique, l'unité utilisée par les météorologues est l'**hectopascal** noté hPa ($1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$) qui vaut exactement un millibar, noté mb ou mbar. Ce choix a permis aux météorologues d'effectuer une transition entre les hPa et l'ancienne unité utilisée, le mb, avec une valeur numérique inchangée. **La pression atmosphérique au sol vaut donc environ 1 000 hPa.**

♦ Définition microscopique de la pression

En réalité, la pression exercée par un fluide sur une paroi est due à la multitude de chocs des atomes ou des molécules constituant le fluide sur cette paroi (des milliards de milliards par centimètre carré et par seconde !). Première conséquence, une paroi verticale ou oblique est soumise à la même pression qu'une paroi horizontale située dans le même lieu.

♦ Les variations de pression atmosphérique

À l'instar de la température, la pression atmosphérique subit une variation diurne mais celle-ci est d'amplitude extrêmement faible (environ 1 hPa) et est masquée par des variations beaucoup plus irrégulières et plus importantes dues au passage des perturbations (Figure 1.16). Un baromètre permet un suivi de l'évolution des pressions ce qui permet de prévoir le temps. Tous les aéronefs emportent un moyen de

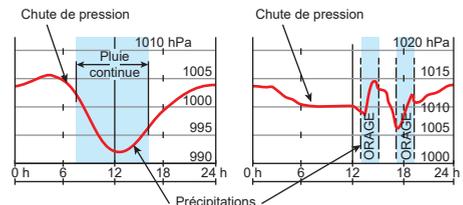


Figure 1.16 – Suivi de pression lors du passage d'une perturbation

mesurer la pression atmosphérique. Pour les drones, des capteurs électroniques miniatures remplacent avantageusement (gain de poids et d'encombrement) les capsules anéroïdes qui mesureraient mécaniquement cette pression dans les avions.

1.6 Les cartes de pression

♦ Comment construire une carte de pression à l'altitude zéro ?

L'évolution des conditions météorologiques est principalement dépendante de la pression atmosphérique. Les prévisions météorologiques s'appuient donc sur des cartes permettant de repérer les zones de haute pression (beau temps) et de basse pression (perturbations) ainsi que leurs déplacements. Pour être utilisables, ces cartes doivent être construites à altitude constante. Pour tracer la carte à l'altitude zéro, il faut s'affranchir du relief. La pression atmosphérique est donc mesurée en différents points du sol puis subit une correction altimétrique (1 hPa/28 ft à basse altitude, voir section 1.7) afin d'extrapoler chaque mesure de pression au niveau de la mer (Figure 1.17).

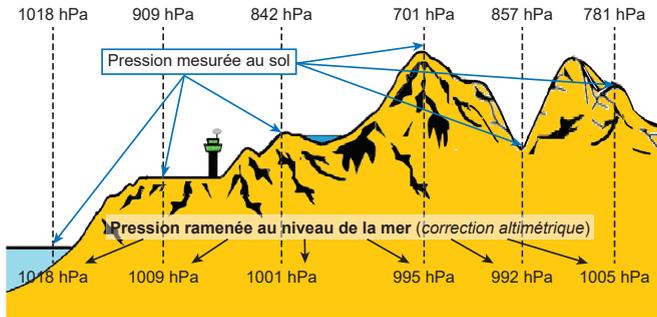


Figure 1.17 – Relevé de pression et ajustement au niveau de la mer

On pourra alors tracer les lignes appelées **isobares** en reliant les points d'égale pression. Sur les cartes météorologiques, **on trace ces isobares tous les 5 hPa**. La carte obtenue sera un des éléments permettant de prévoir le temps.

♦ Analyse d'une carte de pression

La carte de pression s'analyse comme celle d'un relief sur une carte topographique. Un **anticyclone** est une zone de haute pression (A en français, H pour High en anglais). Une **dépression** est une zone de basse pression (D en français, L pour Low en anglais). Un **thalweg** est une vallée de basse pression. Une **dorsale** anticyclonique est une crête de haute pression. Un **marais barométrique** est une zone où la pression varie peu. Sous nos latitudes, les pressions varient entre 950 hPa et 1 050 hPa.

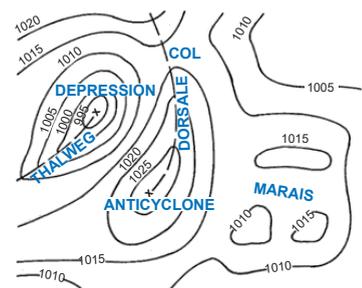


Figure 1.18 – Carte de pression isobares

Un fort resserrement de ces lignes indiquera des variations importantes de pressions et donc une évolution rapide du temps.