

VOLUME 3

Nuages, précipitations et humidité

Le parcours de l'eau dans l'atmosphère, de la vapeur aux précipitations

COLLECTION ATMOSPHÈRE - VERSION SIMPLIFIÉE

Édition du 10 octobre 2026

Pourquoi un nuage ne tombe-t-il pas ? Comment une gouttelette invisible devient-elle une goutte de pluie ? Pourquoi neige-t-il au village et pleut-il dans la vallée, 300 m plus bas ? Ce cours suit l'eau dans l'atmosphère, de l'évaporation à la précipitation, avec des chiffres vérifiés et des calculs simples.

Dans chaque chapitre : des explications avec des exemples, deux questions de quiz, un exercice et les réponses. Puis : dix études de cas pratiques corrigées, un quiz de dix questions, un glossaire et un défi avancé sur un épisode hivernal.

Un crayon et une calculatrice suffisent. Les constantes physiques sont réelles et arrondies ; les données des exercices sont inventées pour apprendre. Elles ne décrivent pas la météo actuelle.

Objectif : savoir dire combien d'eau l'air contient, à quelle hauteur un nuage se forme, pourquoi il pleut ou neige, et comment on mesure ce qui tombe.

Comment utiliser ce cours ?

Une notion, un calcul, un corrigé

Lisez l'explication. Faites le quiz et l'exercice avant de regarder le corrigé. Les chapitres suivent l'eau dans l'ordre : vapeur, saturation, gouttelettes, nuages, brouillard, gouttes, précipitations, mesure.

Chapitre	Vous allez apprendre à...
1. L'eau dans l'air	Dire combien de vapeur l'air peut contenir
2. Point de rosée et saturation	Prévoir quand la vapeur se condense
3. Noyaux et naissance des nuages	Expliquer pourquoi et où un nuage se forme
4. Reconnaître les nuages	Nommer les dix genres et lire le ciel
5. Le brouillard	Prévoir sa formation et sa dissipation
6. Des gouttelettes aux gouttes	Comprendre comment la pluie se fabrique
7. Pluie, neige, grésil, grêle	Déduire le type de précipitation du profil vertical
8. Mesurer la pluie	Lire un pluviomètre, un radar et le cycle de l'eau

Les repères utilisés

Grandeur	Valeur arrondie
Chaleur latente de vaporisation	$2,5 \times 10^6$ J/kg
Chaleur latente de fusion	$3,34 \times 10^5$ J/kg
Gradient adiabatique sec, puis saturé	9,8 °C/km, puis environ 6 °C/km
Hauteur de la base d'un cumulus	125 m par degré d'écart entre T et le point de rosée
1 mm de pluie	1 litre par m ² , 10 m ³ par hectare
Brouillard	Visibilité inférieure à 1 km
Relation radar de Marshall-Palmer	$Z = 200 \times R^{1,6}$

Force 1/3 : facile. Force 2/3 : intermédiaire, plusieurs étapes. Force 3/3 : avancé, croiser les données et discuter les limites. Les gradients et la chaleur latente sont présentés au volume 2 ; ils sont rappelés ici quand c'est utile.

1. L'eau dans l'air

Trois états, un seul composant

L'eau est le seul composant de l'air présent sous ses trois états : vapeur, gouttelettes liquides et cristaux de glace. La vapeur est un gaz invisible. Ce que l'on voit dans un nuage, une haleine ou au-dessus d'une casserole, ce sont des gouttelettes déjà condensées. La vapeur représente de 0 à 4 % du volume de l'air, bien plus près du sol sous les tropiques que dans l'air froid des pôles ou de la haute troposphère.

Chaque changement d'état échange de l'énergie : évaporer 1 kg d'eau consomme 2,5 millions de joules, que la condensation restitue à l'air. C'est ce qui alimente les nuages convectifs et c'est pourquoi l'humidité n'est pas seulement une affaire de confort.

Combien d'eau l'air peut-il contenir ?

La quantité maximale de vapeur dépend presque uniquement de la température. La pression de vapeur saturante double à peu près tous les 10 °C : environ 7 % de plus par degré. Un air saturé à 30 °C contient sept fois plus de vapeur qu'un air saturé à 0 °C.

Température	Pression de vapeur saturante	Rapport de mélange saturant à 1 013 hPa
-10 °C	2,9 hPa	1,8 g/kg
0 °C	6,1 hPa	3,8 g/kg
10 °C	12,3 hPa	7,6 g/kg
20 °C	23,3 hPa	14,7 g/kg
30 °C	42,3 hPa	27,1 g/kg

Le rapport de mélange est la masse de vapeur par kilogramme d'air sec. Il ne change pas quand l'air se déplace ou change de température, tant qu'il n'y a ni condensation ni évaporation : c'est une bonne étiquette pour suivre une masse d'air.

Humidité relative : une proportion, pas une quantité

L'humidité relative compare la vapeur présente à la vapeur maximale possible à la même température. Un air qui contient 10 g/kg est à 68 % d'humidité relative à 20 °C, mais à 37 % seulement à 30 °C : même eau, autre température. Chauffer une pièce fait baisser son humidité relative sans retirer une goutte d'eau ; refroidir l'air la fait monter jusqu'à 100 %, la saturation.

On mesure l'humidité avec un hygromètre capacitif, ou avec un psychromètre : deux thermomètres, dont l'un est entouré d'une mèche mouillée. Plus l'air est sec, plus l'évaporation refroidit le thermomètre mouillé, et plus l'écart entre les deux est grand.

Chapitre 1 : quiz et exercice

Quiz

1. La vapeur d'eau est-elle visible ?
2. À quantité de vapeur égale, l'humidité relative est-elle plus élevée dans un air chaud ou dans un air froid ?

Exercice

Difficulté : Force 1/3 - facile

VALEURS FICTIVES. Une masse d'air contient 7,6 g de vapeur par kilogramme d'air sec. Avec le tableau du chapitre, calculez son humidité relative à 10 °C, à 20 °C puis à 30 °C. À quelle température est-elle saturée ?

Corrigé

Quiz : 1. Non, la vapeur est un gaz invisible ; les gouttelettes et les cristaux sont visibles. 2. Dans l'air froid, qui peut contenir moins de vapeur avant d'être saturé.

Exercice : À 10 °C, $7,6 / 7,6 = 100 \%$: l'air est saturé. À 20 °C, $7,6 / 14,7 = 52 \%$. À 30 °C, $7,6 / 27,1 = 28 \%$. La quantité d'eau ne change pas ; seule la proportion par rapport au maximum possible varie.

À retenir : L'humidité relative dépend autant de la température que de la quantité de vapeur.

2. Point de rosée et saturation

Un thermomètre de l'humidité

Le point de rosée est la température à laquelle il faudrait refroidir l'air, sans changer sa pression ni sa vapeur, pour qu'il devienne saturé. Il est toujours inférieur ou égal à la température de l'air. Quand les deux sont égaux, l'humidité relative est de 100 % : brouillard, nuage ou rosée sont possibles.

Le point de rosée dit directement combien de vapeur l'air contient. Un point de rosée de 20 °C signale un air très humide, près de 15 g/kg, typique des journées lourdes d'été. Un point de rosée négatif signale un air sec, quelle que soit la température. L'écart entre température et point de rosée se lit comme une humidité relative approchée : environ 5 % de moins par degré d'écart.

Air à 20 °C, point de rosée	Humidité relative
20 °C	100 %
15 °C	73 %
10 °C	53 %
5 °C	37 %
0 °C	26 %

Trois chemins vers la saturation

Refroidir l'air est le chemin le plus courant : nuit claire, contact avec une surface froide ou ascension. Ajouter de la vapeur est le second : une surface d'eau plus chaude que l'air s'évapore dans un air qui sature vite, d'où les « fumées » au-dessus d'un lac en automne. Mélanger deux airs est le troisième : l'haleine par temps froid ou la traînée d'un avion mélangent un air chaud et humide à un air froid, et le mélange dépasse la saturation même si aucun des deux ne la dépassait.

Rosée, gelée blanche et givre

Par nuit claire et calme, le sol et les objets se refroidissent plus vite que l'air. Dès que leur température passe sous le point de rosée, la vapeur se dépose : c'est la rosée. Si le point de rosée est négatif, la vapeur passe directement à l'état de glace : c'est la gelée blanche. Le givre, lui, vient de gouttelettes de brouillard surfondues qui gèlent au contact.

Le point de rosée du soir donne un repère pour la nuit : la température descend rarement beaucoup en dessous, car la condensation libère de la chaleur et freine le refroidissement. Un soir à 12 °C avec un point de rosée de 4 °C annonce un minimum plus bas qu'un soir à 12 °C avec un point de rosée de 10 °C.

Chapitre 2 : quiz et exercice

Quiz

1. Si la température de l'air est égale au point de rosée, quelle est l'humidité relative ?
2. Le point de rosée peut-il être supérieur à la température de l'air ?

Exercice

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. En fin de journée, l'air est à 12 °C avec un point de rosée de 4 °C. Les pressions de vapeur saturante valent 14,0 hPa à 12 °C et 8,1 hPa à 4 °C. Calculez l'humidité relative exacte, puis avec la règle des 5 % par degré. La nuit s'annonce claire et calme : à quelle température la rosée peut-elle apparaître ? Une gelée blanche est-elle possible ?

Corrigé

Quiz : 1. 100 %, l'air est saturé. 2. Non : il est au plus égal à la température de l'air.

Exercice : Humidité relative exacte : $8,1 / 14,0 = 58 \%$. Règle : $100 - 5 \times (12 - 4) = 60 \%$, une bonne approximation. La rosée peut se déposer dès que les surfaces passent sous 4 °C. Une gelée blanche demande un point de rosée négatif : avec 4 °C, c'est peu probable, sauf si la rosée déjà déposée gèle en cas de forte baisse.

À retenir : Le point de rosée mesure la vapeur présente ; l'écart avec la température mesure ce qu'il manque pour saturer.

3. Noyaux et naissance des nuages

Il faut des noyaux

Dans un air parfaitement pur, la vapeur ne se condense qu'à plusieurs centaines de pour cent d'humidité relative : les molécules d'eau n'arrivent pas à former une gouttelette stable. L'air réel contient des milliers de particules par centimètre cube : sel marin, sulfates, poussières, suies, pollens. Les plus grosses et les plus solubles servent de noyaux de condensation. Grâce à elles, la condensation commence dès que l'humidité dépasse 100 % de quelques dixièmes de pour cent.

Le nombre de noyaux change le nuage. Dans l'air marin, un nuage compte 100 à 300 gouttelettes par cm^3 ; dans l'air continental pollué, 500 à plus de 1 000. Pour la même quantité d'eau, le nuage continental a des gouttelettes plus petites et plus nombreuses : il réfléchit davantage la lumière et donne plus difficilement de la pluie.

Quatre façons de soulever l'air

Un nuage se forme presque toujours parce que de l'air monte, se détend et se refroidit de $9,8\text{ }^\circ\text{C}$ par kilomètre jusqu'à saturation. La base du nuage se trouve au niveau de condensation, à environ 125 m par degré d'écart entre la température et le point de rosée au sol.

Mécanisme de soulèvement	Situation	Nuages typiques
Convection	Sol chauffé par le Soleil, air instable	Cumulus, cumulonimbus
Relief	Vent qui aborde une montagne	Nuages de versant, pluies renforcées au vent
Front	Air chaud qui glisse sur un air plus froid	Nappes étendues : altostratus, nimbostratus
Convergence	Dépression, brise de mer, ligne de rencontre des vents	Nuages étendus et averses

Deux autres chemins existent sans soulèvement : le refroidissement par rayonnement, qui donne le brouillard et certains stratus, et le mélange d'airs différents.

Ce que contient un nuage

Les gouttelettes mesurent 10 à 30 micromètres de diamètre, 20 en moyenne. Un stratus contient 0,1 à 0,5 g d'eau liquide par m^3 , un cumulus 0,5 à 1 g, un cumulonimbus jusqu'à 3 g. Un cumulus d'un kilomètre cube à $0,5\text{ g/m}^3$ contient donc 500 tonnes d'eau. Il ne tombe pas : une gouttelette de 20 micromètres chute à 1,2 cm/s, soit 23 heures pour 1 000 m, et la moindre ascendance la porte. Au-dessous de $0\text{ }^\circ\text{C}$, les gouttelettes restent souvent liquides, en surfusion, jusque vers $-15\text{ }^\circ\text{C}$, et parfois jusqu'à $-40\text{ }^\circ\text{C}$; les cristaux de glace deviennent majoritaires dans les nuages les plus froids.

Chapitre 3 : quiz et exercice

Quiz

1. Quel mécanisme forme les cumulus d'un après-midi d'été ?
2. Une gouttelette de nuage de 20 micromètres tombe-t-elle rapidement vers le sol ?

Exercice

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. À 14 h, l'air au sol est à 24 °C avec un point de rosée de 16 °C. Estimez la hauteur de la base des cumulus, puis la température à cette base avec 9,8 °C/km. Un cumulus de 1 km × 1 km × 1 km contient 0,5 g d'eau par m³ : quelle masse d'eau cela représente-t-il ? Pourquoi cette eau ne tombe-t-elle pas ?

Corrigé

Quiz : 1. La convection : le sol chauffé fait monter des bulles d'air. 2. Non, à 1,2 cm/s elle mettrait près d'une journée à descendre de 1 000 m ; les ascendances la maintiennent.

Exercice : Écart 24 - 16 = 8 °C, base vers $125 \times 8 = 1\,000$ m. Température à la base : 24 - 9,8 = 14,2 °C. Volume : 10⁹ m³ ; masse : $10^9 \times 0,5 \text{ g} = 5 \times 10^8 \text{ g}$, soit 500 tonnes. Les gouttelettes sont trop petites pour tomber vite et l'air monte dans le cumulus plus vite qu'elles ne chutent.

À retenir : Un nuage est fait d'eau condensée sur des noyaux, maintenue en l'air par sa petitesse et par les ascendances.

4. Reconnaître les nuages

Dix genres, trois étages

L'Atlas international des nuages de l'OMM (édition 2017) distingue dix genres selon la hauteur de la base et la forme. Aux latitudes tempérées : étage bas du sol à 2 km, moyen de 2 à 7 km, haut de 5 à 13 km ; plus haut sous les tropiques, plus bas près des pôles.

Genre	Étage et base	Aspect	Précipitations
Cirrus (Ci)	Haut, 5 à 13 km	Filaments blancs de glace	Aucune
Cirrocumulus (Cc)	Haut	Petits flocons en bancs	Aucune
Cirrostratus (Cs)	Haut	Voile fin, halo	Aucune
Alto cumulus (Ac)	Moyen, 2 à 7 km	Galets gris et blancs	Rares
Altostratus (As)	Moyen	Voile gris, Soleil deviné	Faibles
Nimbostratus (Ns)	Moyen, très épais	Couche sombre et uniforme	Pluie ou neige continues
Stratocumulus (Sc)	Bas, sous 2 km	Rouleaux ou bancs gris	Bruine, faibles
Stratus (St)	Bas, souvent sous 500 m	Couche grise uniforme	Bruine
Cumulus (Cu)	Bas, extension verticale	Base plate, sommets bourgeonnants	Averses si développé
Cumulonimbus (Cb)	Bas à 10-15 km	Enclume, sommet fibreux	Averses, grêle, orage

Nappes ou bourgeons

Un air stable donne des nappes, les nuages stratiformes : stratus, altostratus, nimbostratus. Un air instable donne des bourgeons, les nuages cumuliformes : cumulus et cumulonimbus. Le suffixe « nimbus » signale la précipitation. La base plate d'un cumulus marque le niveau de condensation ; son sommet, la hauteur où la particule cesse d'être plus chaude que l'air.

Lire le ciel comme un bulletin

Une perturbation atlantique s'annonce par des cirrus, parfois 12 à 24 heures avant la pluie, puis un cirrostratus avec halo, un altostratus de plus en plus sombre, enfin un nimbostratus et sa pluie continue. Derrière le front froid, l'air instable donne cumulus, cumulonimbus et averses. C'est la succession des genres qui renseigne, pas un nuage isolé.

Chapitre 4 : quiz et exercice

Quiz

1. Quel genre de nuage est associé aux orages et à la grêle ?
2. Un halo autour du Soleil signale le plus souvent quel nuage ?

Exercice

Difficulté : Force 1/3 - facile

OBSERVATIONS FICTIVES. Le matin : ciel gris uniforme, base vers 300 m, bruine. L'après-midi : voile gris continu, base vers 2 500 m, Soleil deviné, pluie faible. Nommez les deux genres observés. Quel genre peut suivre si la pluie devient continue et le ciel plus sombre ?

Corrigé

Quiz : 1. Le cumulonimbus. 2. Le cirrostratus, fait de cristaux de glace.

Exercice : Le matin, un stratus : couche basse, uniforme, bruine. L'après-midi, un altostratus : voile gris de l'étage moyen, Soleil deviné, pluie faible. Si la pluie devient continue et la couche plus sombre, le nimbostratus prend la suite.

À retenir : L'étage de la base et la forme suffisent à nommer la plupart des nuages.

5. Le brouillard

Un nuage posé sur le sol

Le brouillard est un nuage dont la base touche le sol et qui réduit la visibilité à moins de 1 km ; entre 1 et 5 km, on parle de brume. Il est fait de gouttelettes de 1 à 20 micromètres, avec 0,05 à 0,5 g d'eau par m³. Quand sa température est négative, les gouttelettes surfondues gèlent sur les surfaces : c'est le brouillard givrant, redouté sur les routes. Sous 200 m de visibilité, les bulletins parlent souvent de brouillard dense.

Type	Formation	Conditions favorables
Rayonnement	Le sol se refroidit par nuit claire, l'air au contact sature	Ciel dégagé, vent faible, air humide, nuit longue
Advection	Un air doux et humide glisse sur une surface froide : mer, sol enneigé	Vent modéré et persistant
Évaporation	Une eau plus chaude que l'air s'évapore dans un air froid	Grand écart entre l'eau et l'air, automne
Pente	L'air monte le long d'un versant et se refroidit	Vent dirigé vers le relief
Précipitations	La pluie s'évapore dans un air froid sous le front	Pluie sur un air froid stable

Pourquoi la nuit claire fabrique le brouillard

Par ciel dégagé, le sol perd par rayonnement infrarouge bien plus qu'il ne reçoit : de l'ordre de 50 à 100 W/m² nets. Il se refroidit, refroidit l'air au contact, et une inversion de température se forme. Dès que l'air du bas passe sous son point de rosée, la vapeur se condense. Un vent faible, de 2 à 10 km/h, aide en mélangeant une couche un peu plus épaisse ; un vent fort disperse le refroidissement et empêche le brouillard. Un sol mouillé par une pluie récente fournit la vapeur.

Prévoir sa dissipation

Le Soleil chauffe le sol à travers le brouillard, puis l'air par le bas : le brouillard s'évapore depuis la base, se soulève en stratus et disparaît. Une nappe de 100 à 200 m d'épaisseur se dissipe souvent en fin de matinée. En décembre, avec un Soleil bas et une nappe de 400 m, il peut persister toute la journée sous un anticyclone : c'est la grisaille hivernale des plaines et des vallées. Le brouillard d'advection, lui, résiste tant que l'air doux continue d'arriver sur la surface froide.

Chapitre 5 : quiz et exercice

Quiz

1. En dessous de quelle visibilité parle-t-on de brouillard ?
2. Quel type de brouillard se forme par nuit claire et calme après une journée humide ?

Exercice

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

SITUATION FICTIVE. À 21 h, l'air est à 6 °C avec un point de rosée de 5 °C ; ciel dégagé, vent de 5 km/h, sol humide. La température minimale prévue est de 2 °C vers 7 h. Un brouillard est-il probable ? À partir de quelle température ? Sera-t-il givrant ? Que se passerait-il avec une température minimale de -1 °C ?

Corrigé

Quiz : 1. Moins de 1 km. 2. Un brouillard de rayonnement.

Exercice : Oui, les conditions sont réunies : air presque saturé, ciel clair, vent faible, sol humide. Le brouillard se forme dès que l'air passe sous 5 °C, probablement avant minuit. À 2 °C, il n'est pas givrant. Avec un minimum de -1 °C, les gouttelettes surfondues gèleraient sur les surfaces : brouillard givrant et routes glissantes.

À retenir : Ciel clair, vent faible, air humide et nuit longue : les quatre ingrédients du brouillard de rayonnement.

6. Des gouttelettes aux gouttes

Un million de gouttelettes pour une goutte

Une gouttelette de nuage mesure environ 20 micromètres ; une goutte de pluie, 2 mm, soit cent fois plus. Son volume est donc un million de fois plus grand : il faut réunir un million de gouttelettes pour faire une goutte. La condensation seule n'y parvient pas : elle ralentit à mesure que la gouttelette grossit, et il faudrait des heures pour dépasser 50 micromètres. Deux autres processus prennent le relais.

Particule	Diamètre	Vitesse de chute
Gouttelette de nuage	0,02 mm	1,2 cm/s
Goutte de bruine	0,5 mm	2 m/s
Goutte de pluie	2 mm	6,5 m/s
Grosse goutte	5 mm	9 m/s
Flocon de neige	5 à 20 mm	1 à 2 m/s
Grêlon	50 mm	≈ 37 m/s, soit 135 km/h

Le processus chaud : collision et coalescence

Dans un nuage entièrement liquide, quelques gouttelettes plus grosses, nées sur de gros noyaux comme le sel marin, tombent plus vite que les autres. Elles percutent les petites et les absorbent : c'est la coalescence. Plus une goutte grossit, plus elle tombe vite et plus elle collecte. Ce processus est efficace dans les nuages maritimes et tropicaux, et dans les cumulus dont le sommet reste au-dessus de 0 °C : il peut donner une averse en 20 à 30 minutes. Au-delà de 5 à 6 mm, une goutte se déforme et se brise.

Le processus froid : Bergeron et Findeisen

Entre -5 et -30 °C, un nuage contient à la fois des gouttelettes surfondues et quelques cristaux de glace. Or la pression de vapeur saturante est plus basse sur la glace que sur l'eau : à -15 °C, 1,65 hPa contre 1,92 hPa. Un air saturé par rapport à l'eau est donc sursaturé de 16 % par rapport à la glace. Les cristaux grossissent aux dépens des gouttelettes, qui s'évaporent pour les nourrir. Les cristaux s'assemblent en flocons ou capturent des gouttelettes qui gèlent sur eux : neige roulée, puis grêle dans les ascendances fortes. Aux latitudes tempérées, la plus grande partie de la pluie naît ainsi sous forme de neige, qui fond en traversant l'air plus chaud.

Chapitre 6 : quiz et exercice

Quiz

1. Les gouttelettes de nuage tombent-elles telles quelles sous forme de pluie ?
2. À -15 °C, la pression de vapeur saturante est-elle plus basse au-dessus de la glace ou au-dessus de l'eau liquide ?

Exercice

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. La base d'un nuage est à 1 300 m. Une goutte de 2 mm tombe à 6,5 m/s : combien de temps met-elle pour atteindre le sol ? Une gouttelette de 20 micromètres tombe à 1,2 cm/s : combien de temps mettrait-elle ? Combien de gouttelettes de 20 micromètres faut-il pour former la goutte de 2 mm ?

Corrigé

Quiz : 1. Non, elles sont trop petites et trop lentes ; il faut la coalescence ou le processus de Bergeron. 2. Au-dessus de la glace : 1,65 hPa contre 1,92 hPa.

Exercice : Goutte : $1\,300 / 6,5 = 200$ s, soit un peu plus de 3 minutes. Gouttelette : $1\,300 / 0,012 = 108\,000$ s, soit 30 heures, sans compter l'évaporation qui la ferait disparaître bien avant. Rapport des diamètres $2 / 0,02 = 100$, donc rapport des volumes $100^3 = 10^6$: un million de gouttelettes.

À retenir : La pluie demande un processus de croissance rapide ; la condensation seule fait un nuage, pas une averse.

7. Pluie, neige, grésil, grêle

Ce qui décide du type au sol

Aux latitudes tempérées, la précipitation naît le plus souvent sous forme de neige dans le nuage ; ce qui arrive au sol dépend du profil de température traversé. Un flocon met environ 300 m d'air positif à fondre entièrement : il neige si l'isotherme 0 °C est à moins de 300 m au-dessus du sol, il pleut si la couche positive dépasse 400 à 500 m. Un air sec aide la neige, car l'évaporation refroidit les flocons : il peut neiger par 2 ou 3 °C sous abri.

Type	Profil vertical typique	Au sol
Neige	Air négatif jusqu'au sol, ou couche positive < 300 m	Flocons, jusqu'à 2 ou 3 °C
Pluie et neige mêlées	Isotherme 0 °C à 200-400 m du sol	Flocons mouillés et gouttes
Pluie	Couche positive > 400-500 m	Gouttes
Pluie verglaçante	Couche chaude en altitude, couche négative < 300 m au sol	Gouttes surfondues qui gèlent au contact : verglas
Grésil, granules de glace	Couche chaude mince, puis couche négative > 600 m	Billes de glace qui rebondissent
Grêle	Cumulonimbus, ascendances > 20 m/s	Grêlons de 5 mm et plus

La neige, de l'eau en volume

Une neige fraîche pèse 50 à 150 kg/m³, dix fois moins que l'eau. La règle courante est de 1 cm de neige pour 1 mm d'eau, de 5 pour 1 pour une neige humide à 20 pour 1 pour une neige froide et sèche. Sur un toit, 1 m de neige tassée à 300 kg/m³ pèse 300 kg par m². Les relevés distinguent la hauteur de neige fraîche et l'équivalent en eau.

La grêle et le verglas

Un grêlon grossit dans le cumulonimbus en traversant plusieurs fois des zones de gouttelettes surfondues, d'où ses couches. Un grêlon de 5 cm tombe à près de 37 m/s, 135 km/h : l'ascendance qui l'a porté dépassait cette vitesse. Le grêlon le plus lourd reconnu par l'OMM pesait 1,02 kg, à Gopalganj, au Bangladesh, le 14 avril 1986. La pluie verglaçante accumule parfois plusieurs centimètres de glace : jusqu'à 100 mm au Québec et en Ontario en janvier 1998.

Chapitre 7 : quiz et exercice

Quiz

1. Dans quel nuage la grêle se forme-t-elle ?
2. Lors d'une pluie verglaçante, les gouttes gèlent-elles en l'air ou au contact du sol ?

Exercice

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

PROFILS FICTIFS. Station A : 1 °C au sol, 0 °C à 300 m au-dessus du sol, -6 °C à 1 500 m.

Station B : 4 °C au sol, 0 °C à 700 m, -5 °C à 1 500 m. Station C : -2 °C au sol, +3 °C à 500 m, -4 °C à 1 500 m. Pour chaque station, quel type de précipitation est le plus probable ? Justifiez avec l'épaisseur des couches.

Corrigé

Quiz : 1. Le cumulonimbus. 2. Au contact : elles arrivent liquides et surfondues, puis gèlent sur les surfaces.

Exercice : A : couche positive de 300 m seulement et 1 °C au sol : neige, éventuellement mêlée de pluie. B : couche positive de 700 m et 4 °C au sol : pluie, les flocons ont le temps de fondre. C : couche chaude entre environ 200 et 900 m qui fait fondre les flocons, puis une couche négative mince au sol : pluie verglaçante et verglas.

À retenir : Épaisseur de la couche positive et température au sol : les deux clés du type de précipitation.

8. Mesurer la pluie et suivre le cycle de l'eau

Le pluviomètre

Un millimètre de pluie est une lame d'eau de 1 mm sur toute la surface : 1 litre par m², 10 m³ par hectare. Le pluviomètre recueille cette lame dans un collecteur normalisé, placé à environ 1 m du sol, sur un site dégagé. Les stations automatiques utilisent des augets basculeurs qui comptent 0,2 mm à chaque basculement. En France, le cumul journalier va de 06 h à 06 h UTC. Le vent fait perdre une partie de la pluie, de 2 à 10 %, et jusqu'à 20 à 50 % de la neige.

Intensité	Taux horaire	Repères
Faible	Moins de 2,5 mm/h	Bruine, pluie fine
Modérée	2,5 à 10 mm/h	Pluie continue d'un nimbostratus
Forte	10 à 50 mm/h	Averse d'orage
Violente	Plus de 50 mm/h	Orage sévère, épisode méditerranéen

Repères reconnus par l'OMM : 305 mm en une heure à Holt, dans le Missouri, le 22 juin 1947 ; 1 825 mm en 24 heures à Foc-Foc, à La Réunion, les 7 et 8 janvier 1966, pendant le cyclone Denise. En France hexagonale, les épisodes cévenols dépassent parfois 300 mm en 24 heures. Le lieu le plus arrosé en moyenne, Mawsynram, en Inde, reçoit près de 11 900 mm par an ; Arica, au Chili, moins de 1 mm.

Le radar

Le radar émet une impulsion et mesure l'écho renvoyé par les gouttes : la réflectivité Z, exprimée en dBZ. La relation de Marshall-Palmer, $Z = 200 \times R^{1,6}$, convertit cet écho en intensité R : 20 dBZ donnent 0,6 mm/h, 30 dBZ 2,7 mm/h, 40 dBZ 11,5 mm/h et 50 dBZ 49 mm/h. Le radar voit la pluie en altitude, pas au sol : évaporation sous le nuage, fusion des flocons qui exagère l'écho, grêle, masques du relief et calibration imposent de le corriger avec les pluviomètres. Son atout est la couverture : une image toutes les cinq minutes sur des centaines de kilomètres.

Le cycle de l'eau

Chaque année, environ 500 000 km³ d'eau s'évaporent et retombent, soit près de 1 000 mm en moyenne sur le globe. Les océans fournissent 85 % de l'évaporation et reçoivent 77 % des précipitations ; l'excédent, près de 40 000 km³, revient à la mer par les fleuves. L'atmosphère ne contient que 25 mm d'eau précipitable en moyenne : une molécule de vapeur y séjourne environ neuf jours. Avec le réchauffement, l'air peut contenir 7 % de vapeur de plus par degré : les pluies les plus intenses s'en trouvent renforcées.

Chapitre 8 : quiz et exercice

Quiz

1. À quoi correspond 1 mm de pluie sur 1 m² ?
2. Le radar mesure-t-il directement la pluie tombée au sol ?

Exercice

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. Le radar indique 40 dBZ pendant 30 minutes au-dessus d'un bassin de 12 km². Avec 11,5 mm/h, quel cumul estime-t-on ? Quel volume d'eau cela représente-t-il sur le bassin ? Le pluviomètre du bassin a mesuré 6,5 mm : quel est l'écart en pourcentage, et quelles causes peut-on citer ?

Corrigé

Quiz : 1. 1 litre d'eau. 2. Non, il mesure un écho en altitude que l'on convertit en intensité.

Exercice : $11,5 \times 0,5 = 5,75$ mm, arrondi à 5,8 mm. Volume : $0,0058 \text{ m} \times 12 \times 10^6 \text{ m}^2 = 69\,600 \text{ m}^3$, soit près de 70 000 m³. Écart : $(6,5 - 5,8) / 6,5 = 11 \%$. Causes possibles : relation Z-R approximative, pluie plus intense au sol qu'en altitude, pluviomètre représentatif d'un seul point, sous-captation par le vent.

À retenir : Pluviomètre et radar se complètent : l'un est précis en un point, l'autre couvre une région.

Dix études de cas pratiques

Cas 1 et 2 : humidité et rosée

Étude de cas 1 - L'humidité d'une salle de classe

Difficulté : Force 1/3 - facile

VALEURS FICTIVES. La salle est à 22 °C avec un point de rosée de 10 °C. Pressions de vapeur saturante : 26,4 hPa à 22 °C, 12,3 hPa à 10 °C, 31,6 hPa à 25 °C.

1. Calculez l'humidité relative exacte, puis avec la règle des 5 % par degré.
2. Quel est le rapport de mélange de cet air ? Utilisez le tableau du chapitre 1.
3. Le chauffage porte la salle à 25 °C sans changer la vapeur. Nouvelle humidité relative ?
4. Pour ramener l'humidité à 50 % à 25 °C, faut-il retirer ou ajouter de la vapeur ?

Étude de cas 2 - Rosée ce soir ?

Difficulté : Force 1/3 - facile

VALEURS FICTIVES. En fin de journée, 15 °C et un point de rosée de 9 °C ; ciel clair, vent faible. Minimum prévu : 7 °C. Pressions de vapeur saturante : 17,0 hPa à 15 °C, 11,5 hPa à 9 °C.

1. Calculez l'humidité relative de l'après-midi.
2. La rosée se déposera-t-elle ? À partir de quelle température des surfaces ?
3. Une gelée blanche est-elle possible ? Et si le point de rosée était de -2 °C avec un minimum de -3 °C ?
4. Pourquoi le minimum prévu reste-t-il proche du point de rosée ?

Dix études de cas pratiques

Cas 3 et 4 : cumulus et identification

Étude de cas 3 - La base des cumulus

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. À 14 h, 27 °C au sol et un point de rosée de 13 °C. Pressions de vapeur saturante : 35,6 hPa à 27 °C, 15,0 hPa à 13 °C. Les sommets des cumulus sont observés vers 2 500 m.

1. Calculez l'humidité relative au sol.
2. Estimez la hauteur de la base des cumulus et la température à cette base, avec 9,8 °C/km.
3. Au-dessus de la base, la particule se refroidit de 6 °C/km. À quelle altitude atteindrait-elle 0 °C ?
4. Ces cumulus contiennent-ils de la glace ? Par quel processus pourraient-ils donner une averse ?

Étude de cas 4 - Quatre ciels à nommer

Difficulté : Force 1/3 - facile

OBSERVATIONS FICTIVES. Nommez le genre de chaque nuage, puis répondez.

- A : voile blanchâtre très haut, Soleil visible entouré d'un halo.
- B : bancs de gros galets gris et blancs vers 3 000 m, ciel bleu entre eux.
- C : base plate vers 1 200 m, sommets bourgeonnants, larges trouées bleues.
- D : masse sombre, sommet étalé en enclume, coups de tonnerre.

1. Quel nuage annonce parfois une perturbation pour les 12 à 24 heures suivantes ?
2. Lequel donne des averses, de la grêle et des rafales ?
3. Lequel est fait uniquement de cristaux de glace ?

Dix études de cas pratiques

Cas 5 et 6 : brouillard et neige

Étude de cas 5 - Brouillard sur l'autoroute

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

SITUATION FICTIVE, en janvier. À 22 h : 4 °C, point de rosée 3 °C, vent de 3 km/h, ciel dégagé, sol humide après la pluie de la veille. Le Soleil se lève à 8 h 20 et reste bas.

1. Quels ingrédients du brouillard de rayonnement sont réunis ?
2. À quelle température le brouillard se forme-t-il ? Peut-il devenir givrant ?
3. À quelle heure peut-on espérer sa dissipation ? Qu'est-ce qui pourrait le faire durer toute la journée ?
4. Quel conseil donner aux automobilistes de 7 h ?

Étude de cas 6 - Pluie ou neige au village ?

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

PROFIL FICTIF. Une station de plaine à 100 m d'altitude mesure 4 °C ; le radiosondage place l'isotherme 0 °C à 700 m d'altitude et donne -6 °C à 1 700 m. Un village se trouve à 600 m d'altitude, un col à 1 000 m. La précipitation naît sous forme de neige dans le nuage.

1. Calculez le gradient de température entre 100 m et 700 m, en °C/km.
2. Quelle est l'épaisseur de la couche positive au-dessus de la plaine ? Quel type de précipitation y tombe ?
3. Estimez la température et l'épaisseur de la couche positive au-dessus du village. Pluie ou neige ?
4. Et au col ?

Dix études de cas pratiques

Cas 7 et 8 : verglas et radar

Étude de cas 7 - Pluie verglaçante

Difficulté : Force 3/3 - avancé

PROFIL FICTIF, mesuré au-dessus d'une plaine.

Altitude	Température
Sol	-2 °C
300 m	-1 °C
800 m	+3 °C
1 500 m	+1 °C
2 500 m	-5 °C

1. Par interpolation, à quelles altitudes la température passe-t-elle par 0 °C ?
2. Quelle est l'épaisseur de la couche positive ? Les flocons venus de 2 500 m fondent-ils entièrement ?
3. Quelle est l'épaisseur de la couche négative au sol ? Quel type de précipitation en résulte ?
4. Que se passerait-il si la couche négative atteignait 900 m avec -8 °C au sol ? Et si le sol passait à +1 °C ?

Étude de cas 8 - Lire une image radar

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. Trois points de l'image radar indiquent 25, 38 et 48 dBZ pendant 20 minutes. Relation de Marshall-Palmer : $R = (Z / 200)^{(1/1,6)}$, avec $Z = 10^{(dBZ/10)}$.

1. Calculez Z puis R pour chaque point.
2. Quel cumul estime-t-on en 20 minutes à chaque point ?
3. Classez les trois intensités avec le tableau du chapitre 8.
4. À 48 dBZ, quelle précaution d'interprétation s'impose ?

Dix études de cas pratiques

Cas 9 et 10 : pluviomètre et neige

Étude de cas 9 - Le pluviomètre et le bassin

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. Un pluviomètre mesure 35 mm en 6 heures par vent fort. Le bassin versant qu'il représente couvre 12 km^2 . On estime la perte par le vent à 10 % de la pluie réelle.

1. Calculez l'intensité moyenne en mm/h et classez-la.
2. Quel volume d'eau, en m^3 , est tombé sur le bassin d'après la mesure ?
3. Estimez la pluie réelle en corrigeant la sous-captation.
4. Combien de litres sont tombés sur un toit de 100 m^2 ? Toute cette eau rejoint-elle la rivière ?

Étude de cas 10 - La neige sur le toit

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. Il est tombé 25 cm de neige fraîche de masse volumique 80 kg/m^3 sur un toit plat de 50 m^2 . Trois jours plus tard, sans nouvelle chute, la couche s'est tassée à 12 cm avec une masse volumique de 170 kg/m^3 .

1. Quel est l'équivalent en eau de la neige fraîche, en mm ?
2. Quelle masse de neige le toit porte-t-il ?
3. Après tassement, quel est l'équivalent en eau ? La masse a-t-elle changé ?
4. Un redoux apporte 80 W/m^2 nets : combien de temps faut-il pour faire fondre toute la neige, avec $3,34 \times 10^5 \text{ J/kg}$?

Corrigés des études de cas

Cas 1 à 4

Cas 1. 1. $12,3 / 26,4 = 47 \%$; règle : $100 - 5 \times 12 = 40 \%$, approximation moins bonne quand l'écart dépasse 10°C . 2. Au point de rosée de 10°C , l'air contient $7,6 \text{ g/kg}$. 3. À 25°C : $12,3 / 31,6 = 39 \%$. 4. À 50% et 25°C , il faudrait $15,8 \text{ hPa}$ de vapeur : il faut en ajouter, par exemple avec un humidificateur.

Cas 2. 1. $11,5 / 17,0 = 68 \%$. 2. Oui : par ciel clair et vent faible, les surfaces passeront sous 9°C , où la rosée commence. 3. Non, le point de rosée est positif. Avec -2°C de point de rosée et -3°C de minimum, la vapeur se déposerait directement en glace : gelée blanche. 4. La condensation libère de la chaleur et freine le refroidissement : le minimum descend rarement beaucoup sous le point de rosée.

Cas 3. 1. $15,0 / 35,6 = 42 \%$. 2. Écart 14°C , base vers $125 \times 14 = 1\,750 \text{ m}$; température $27 - 9,8 \times 1,75 = 9,9^\circ\text{C}$. 3. Il faut perdre $9,9^\circ\text{C}$ à 6°C/km : $1,65 \text{ km}$ de plus, soit vers $3\,400 \text{ m}$. 4. Avec des sommets à $2\,500 \text{ m}$, le nuage reste au-dessus de 0°C : pas de glace. Seule la coalescence pourrait donner une averse, peu probable dans un cumulus aussi peu épais.

Cas 4. A : cirrostratus. B : altocumulus. C : cumulus. D : cumulonimbus. 1. Le cirrostratus, souvent suivi d'un altostratus puis d'un nimbostratus. 2. Le cumulonimbus. 3. Le cirrostratus.

Corrigés des études de cas

Cas 5 à 7

Cas 5. 1. Air presque saturé, ciel dégagé, vent faible, sol humide, nuit longue de janvier : tous les ingrédients. 2. Dès que l'air passe sous 3 °C, probablement avant minuit. Si le refroidissement continue sous 0 °C, le brouillard devient givrant : le risque existe en janvier. 3. Pas avant 10 h, le temps que le Soleil bas chauffe le sol ; une nappe épaisse ou un anticyclone persistant peut le maintenir toute la journée. 4. Visibilité réduite, chaussée peut-être glissante : ralentir, allumer les feux, augmenter les distances.

Cas 6. 1. $(4 - 0) / 0,6 = 6,7$ °C/km. 2. $700 - 100 = 600$ m de couche positive, avec 4 °C au sol : pluie. 3. Au village, à 600 m : $4 - 6,7 \times 0,5 = 0,7$ °C ; couche positive de 100 m seulement : neige, éventuellement mêlée. 4. Au col, à 1 000 m : -3 °C environ et aucune couche positive : neige.

Cas 7. 1. Entre 300 m et 800 m : 0 °C vers $300 + 500 \times 1 / 4 = 425$ m. Entre 1 500 m et 2 500 m : 0 °C vers $1 500 + 1 000 \times 1 / 6 \approx 1 670$ m. 2. Couche positive de 425 à 1 670 m, soit environ 1 250 m, avec jusqu'à +3 °C : les flocons fondent entièrement. 3. Couche négative de 425 m au sol, peu épaisse et peu froide : les gouttes restent liquides et surfondues, puis gèlent au contact : pluie verglaçante et verglas. 4. Avec 900 m et -8 °C, les gouttes regèleraient en l'air : grésil. Avec +1 °C au sol, simple pluie froide.

Corrigés des études de cas

Cas 8 à 10

Cas 8. 1. 25 dBZ : $Z = 316$, $R = (316 / 200)^{0,625} = 1,3$ mm/h. 38 dBZ : $Z = 6\,310$, $R = (31,5)^{0,625} = 8,6$ mm/h. 48 dBZ : $Z = 63\,100$, $R = (315)^{0,625} = 36,5$ mm/h. 2. En 20 minutes, soit un tiers d'heure : 0,4 mm, 2,9 mm et 12,2 mm. 3. Faible, modérée, forte. 4. À 48 dBZ et plus, l'écho peut venir de grêle ou de la fusion des flocons : l'intensité réelle peut être très différente ; il faut comparer aux pluviomètres.

Cas 9. 1. $35 / 6 = 5,8$ mm/h : modérée. 2. $0,035 \text{ m} \times 12 \times 10^6 \text{ m}^2 = 420\,000 \text{ m}^3$. 3. La mesure représente 90 % de la pluie réelle : $35 / 0,9 = 38,9$ mm. 4. $35 \times 100 = 3\,500$ litres. Non : une partie s'évapore, s'infiltre ou est retenue par la végétation et le sol ; seule une fraction ruisselle vers la rivière.

Cas 10. 1. $0,25 \text{ m} \times 80 \text{ kg/m}^3 = 20 \text{ kg/m}^2$, soit 20 mm d'équivalent en eau. 2. $20 \text{ kg/m}^2 \times 50 \text{ m}^2 = 1\,000 \text{ kg}$. 3. $0,12 \times 170 = 20,4 \text{ kg/m}^2$, soit environ 20 mm : la neige s'est tassée sans perdre d'eau, aux arrondis près. 4. Énergie : $20 \text{ kg} \times 3,34 \times 10^5 = 6,7 \times 10^6 \text{ J par m}^2$. Durée : $6,7 \times 10^6 / 80 = 83\,500 \text{ s}$, soit près de 23 heures de redoux continu.

Quiz final

Dix questions pour revoir l'essentiel

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

Chaque question peut valoir 1 point, pour un total sur 10. Répondez avant de regarder le corrigé.

1. Quelle est la pression de vapeur saturante de l'air à 20 °C, approximativement ?
2. Quelle est l'humidité relative quand la température est égale au point de rosée ?
3. Un air saturé à 30 °C contient environ combien de fois plus de vapeur qu'un air saturé à 0 °C ?
4. À quelle hauteur se forme la base d'un cumulus si l'écart entre température et point de rosée est de 8 °C ?
5. En dessous de quelle visibilité parle-t-on de brouillard ?
6. Quel genre de nuage donne une pluie continue de plusieurs heures ?
7. Dans le processus de Bergeron, qui grossit aux dépens de qui ?
8. Quel profil vertical produit de la pluie verglaçante ?
9. À combien de mètres cubes correspond 1 mm de pluie sur 1 hectare ?
10. Combien de temps une molécule de vapeur d'eau séjourne-t-elle en moyenne dans l'atmosphère ?

Après le quiz

Pour chaque erreur, retrouvez le chapitre concerné. Reformulez l'idée avec vos mots. Le score sert à repérer les notions à revoir, pas à certifier une compétence professionnelle.

Corrigé du quiz final

Les réponses

Question	Réponse
1	Environ 23 hPa
2	100 %
3	Environ 7 fois : 27,1 g/kg contre 3,8 g/kg
4	Environ 1 000 m, avec 125 m par degré
5	Moins de 1 km
6	Le nimbostratus
7	Les cristaux de glace grossissent aux dépens des gouttelettes surfondues
8	Une couche chaude en altitude au-dessus d'une fine couche négative au sol
9	10 m ³
10	Environ 9 jours

Trois erreurs fréquentes

Confondre humidité relative et quantité de vapeur : 100 % dans un air à 0 °C représente moins d'eau que 30 % dans un air à 30 °C.

Croire qu'un nuage « tient » parce que ses gouttelettes sont légères : elles tombent, mais si lentement que la moindre ascendance les porte.

Déduire le type de précipitation de la seule température au sol : c'est le profil vertical, et l'épaisseur des couches, qui décident.

Une notion comprise : _____

Une notion à revoir : _____

Les mots à retenir

Un petit glossaire

Mot	Explication simple
Humidité relative	La vapeur présente, en pourcentage du maximum possible à cette température
Point de rosée	La température à laquelle l'air deviendrait saturé en se refroidissant
Rapport de mélange	La masse de vapeur par kilogramme d'air sec, en g/kg
Pression de vapeur saturante	La pression de vapeur maximale à une température donnée ; elle double tous les 10 °C environ
Noyau de condensation	Une particule sur laquelle la vapeur se condense en gouttelette
Niveau de condensation	La hauteur où une particule soulevée devient saturée : la base du nuage
Surfusion	L'état d'une gouttelette liquide à température négative
Coalescence	La croissance d'une goutte qui capture les gouttelettes qu'elle percute
Processus de Bergeron	La croissance des cristaux de glace aux dépens des gouttelettes surfondues
Isotherme 0 °C	L'altitude où la température passe par 0 °C
Réflectivité radar	L'écho renvoyé par les précipitations, en dBZ, converti en intensité
Eau précipitable	La lame d'eau que donnerait toute la vapeur d'une colonne d'air : 25 mm en moyenne

Pour continuer

Pendant une semaine, notez chaque jour la température, le point de rosée s'il est disponible, les genres de nuages observés et la pluie mesurée. Comparez les jours de brouillard avec le ciel et le vent de la veille au soir.

La bonne habitude : une quantité de vapeur en g/kg ou un point de rosée, une humidité relative en pourcentage, une hauteur de base calculée, un profil vertical avant d'annoncer la neige.

Défi avancé : un épisode hivernal, du brouillard à la neige

Une station de plaine à 200 m d'altitude

Difficulté : Force 3/3 - avancé

Durée conseillée : 40 à 50 minutes. Calculatrice autorisée. Données entièrement fictives.

Pressions de vapeur saturante : 6,6 hPa à 1 °C, 7,6 hPa à 3 °C, 8,1 hPa à 4 °C, 8,7 hPa à 5 °C.

Heure	Température	Point de rosée	Temps observé	Vent
06 h	1 °C	1 °C	Brouillard, visibilité 300 m	Calme
11 h	4 °C	3 °C	Stratus, base 150 m	5 km/h
15 h	5 °C	4 °C	Nimbostratus, pluie faible, 0,5 mm/h	15 km/h de sud-est
20 h	2 °C	1 °C	Pluie et neige mêlées, 2 mm/h	20 km/h d'est
02 h	-1 °C	-2 °C	Neige, 3 cm/h	25 km/h de nord-est

Radiosondage de 20 h : 2 °C au sol à 200 m, 0 °C à 500 m, -3 °C à 1 000 m, -9 °C à 2 000 m. Le radar indique 32 dBZ au-dessus de la station à 20 h.

Questions

1. Calculer l'humidité relative à 06 h, 11 h et 15 h. Nommer le type de brouillard de 06 h et expliquer sa transformation en stratus.
2. Avec le sondage de 20 h : altitude de l'isotherme 0 °C au-dessus du sol, épaisseur de la couche positive, et justification du type de précipitation observé à 20 h.
3. Convertir 32 dBZ en intensité avec $Z = 10^{(\text{dBZ}/10)}$ et $R = (Z / 200)^{0,625}$. Comparer à la mesure de 2 mm/h et proposer deux causes de l'écart.
4. À 02 h, il tombe 3 cm de neige par heure pendant 5 heures, avec 1 mm d'eau pour 1 cm de neige. Calculer l'équivalent en eau total, puis la masse de neige sur un toit de 80 m² avec 100 kg/m³.
5. Le lendemain, un redoux apporte 60 W/m² nets. Calculer le temps nécessaire pour faire fondre cette neige, avec $3,34 \times 10^5$ J/kg.
6. Rédiger une synthèse de 60 à 90 mots donnant la chronologie, les principaux résultats et au moins deux limites de la méthode.

Corrigé du défi avancé

Démarche et explications, questions 1 à 3

1. À 06 h, température et point de rosée sont égaux : 100 %. À 11 h : $7,6 / 8,1 = 94$ %. À 15 h : $8,1 / 8,7 = 93$ %. Le brouillard de 06 h est un brouillard de rayonnement : nuit claire, vent calme, air saturé. Dans la matinée, le Soleil chauffe le sol et l'air par le bas ; la base du brouillard s'évapore et se soulève à 150 m, ce qui donne un stratus. L'arrivée d'un vent de sud-est et la baisse de pression annoncent la perturbation.

2. L'isotherme 0 °C est à 500 m d'altitude, soit 300 m au-dessus du sol : la couche positive mesure 300 m, avec 2 °C au sol. C'est l'épaisseur limite de fusion des flocons : une partie fond, une partie arrive sous forme de neige mouillée. Le mélange pluie et neige observé à 20 h est cohérent. Avec 2 °C au sol et un vent d'est qui apporte de l'air plus froid, la neige va l'emporter.

3. $Z = 10^{3,2} = 1\,585$; $R = (1\,585 / 200)^{0,625} = 7,9^{0,625} = 3,6$ mm/h. Le radar surestime la mesure de 2 mm/h d'un facteur 1,8. Deux causes possibles : la bande brillante, car les flocons en cours de fusion renvoient un écho exagéré, et une relation Z-R établie pour la pluie, inadaptée à la neige mouillée. Le vent peut aussi réduire la captation du pluviomètre.

Démarche et explications, questions 4 à 6

4. Neige : $3 \text{ cm/h} \times 5 \text{ h} = 15 \text{ cm}$, soit 15 mm d'équivalent en eau, ou 15 kg/m^2 . Masse sur le toit : $0,15 \text{ m} \times 80 \text{ m}^2 \times 100 \text{ kg/m}^3 = 1\,200 \text{ kg}$. On retrouve $15 \text{ kg/m}^2 \times 80 \text{ m}^2 = 1\,200 \text{ kg}$.

5. Énergie de fusion : $15 \text{ kg/m}^2 \times 3,34 \times 10^5 \text{ J/kg} = 5,0 \times 10^6 \text{ J/m}^2$. Durée : $5,0 \times 10^6 / 60 = 83\,500 \text{ s}$, soit environ 23 heures de redoux continu. En réalité, le flux net est nul ou négatif la nuit : la fonte complète demande plutôt deux ou trois jours.

6. Exemple de synthèse : « La journée fictive commence par un brouillard de rayonnement saturé, soulevé en stratus dans la matinée, puis une perturbation apporte une pluie faible à 15 h. À 20 h, l'isotherme 0°C n'est qu'à 300 m au-dessus du sol : pluie et neige se mêlent, puis la neige s'impose avec l'air froid d'est. Cinq heures à 3 cm/h donnent 15 mm d'équivalent en eau et 1 200 kg sur un toit de 80 m^2 . Limites : relation Z-R inadaptée à la neige, rapport neige-eau fixé à 10, profil interpolé entre quatre niveaux, flux de fonte supposé constant. »

Barème proposé sur 20

Travail	Points
Humidités relatives et transformation du brouillard	4
Isotherme 0°C et type de précipitation	4
Conversion radar et causes de l'écart	3
Équivalent en eau et masse sur le toit	3
Énergie et durée de fonte	3
Synthèse claire et limites	3

Une démarche correcte avec une erreur d'arrondi peut recevoir une partie des points. Ce barème sert à l'entraînement.