

CHAPITRE III : L'EMAGRAMME



Une sonde basse couche (S.B.C.),
sur le Super-Dimona de l' Association Aéronautique du Val d'Essonne.

Cliché J.P. Lartigue

et ses applications à la prévision Vol à

Chapitre III: L 'émagramme et ses applications pour la prévision Vol à Voile.

III-1: Présentation de l 'émagramme

III-2: La Prévision des ascendances

**III-3: Représentation de l 'humidité de l 'air et prévision
de la condensation de la vapeur d 'eau**

**III-4: Mesure de l 'humidité et détermination du point
de rosée et du point de condensation
(base des cumulus)**

III-5: La masse d 'air en un « clin d 'œil »

III-6: L'émagramme 761 de Météo-France et quelques



L'émagramme est un graphique permettant de représenter l'état de l'atmosphère

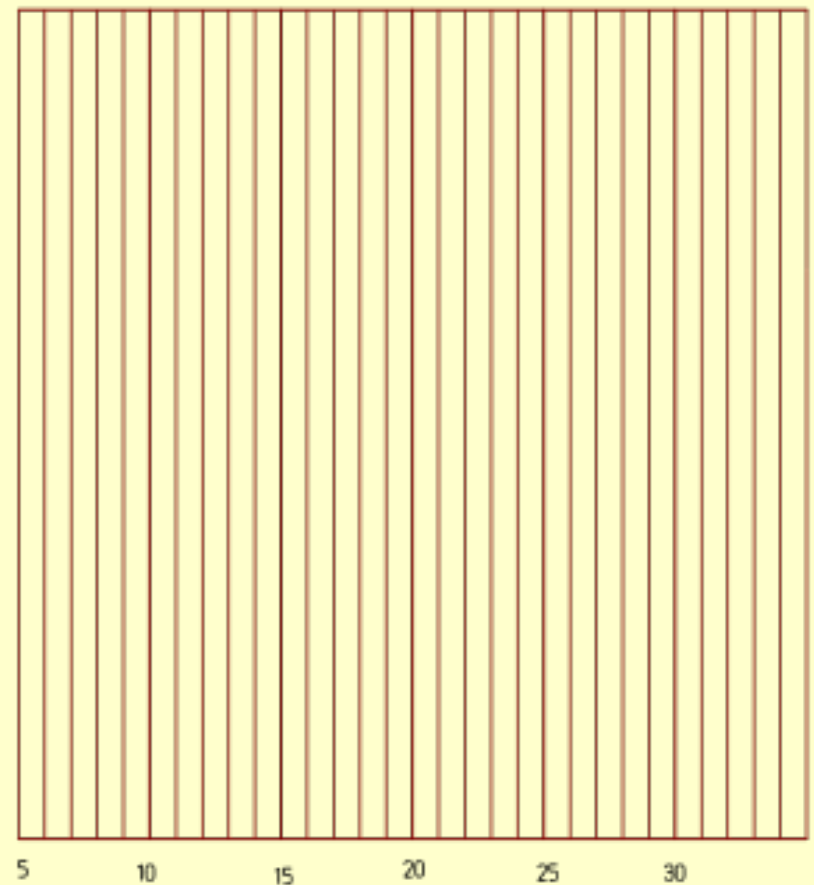
- en un lieu donné,
- à différents niveaux,

et d'en prédire l'évolution probable au cours de la journée.

CONSTRUCTION DE L'EMAGRAMME

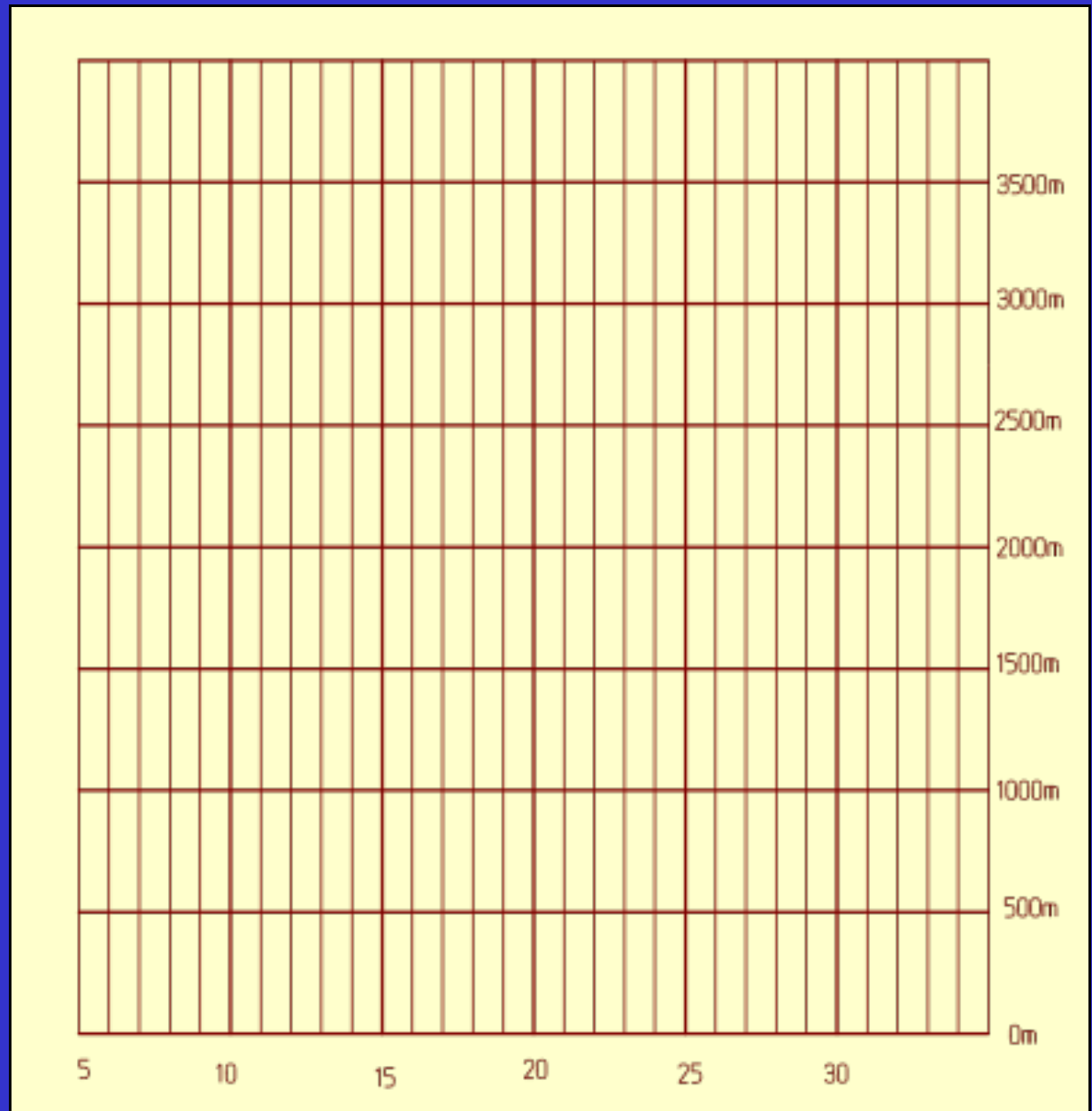
1. échelle des altitudes
(ou des niveaux de pression)

2. échelle de températures

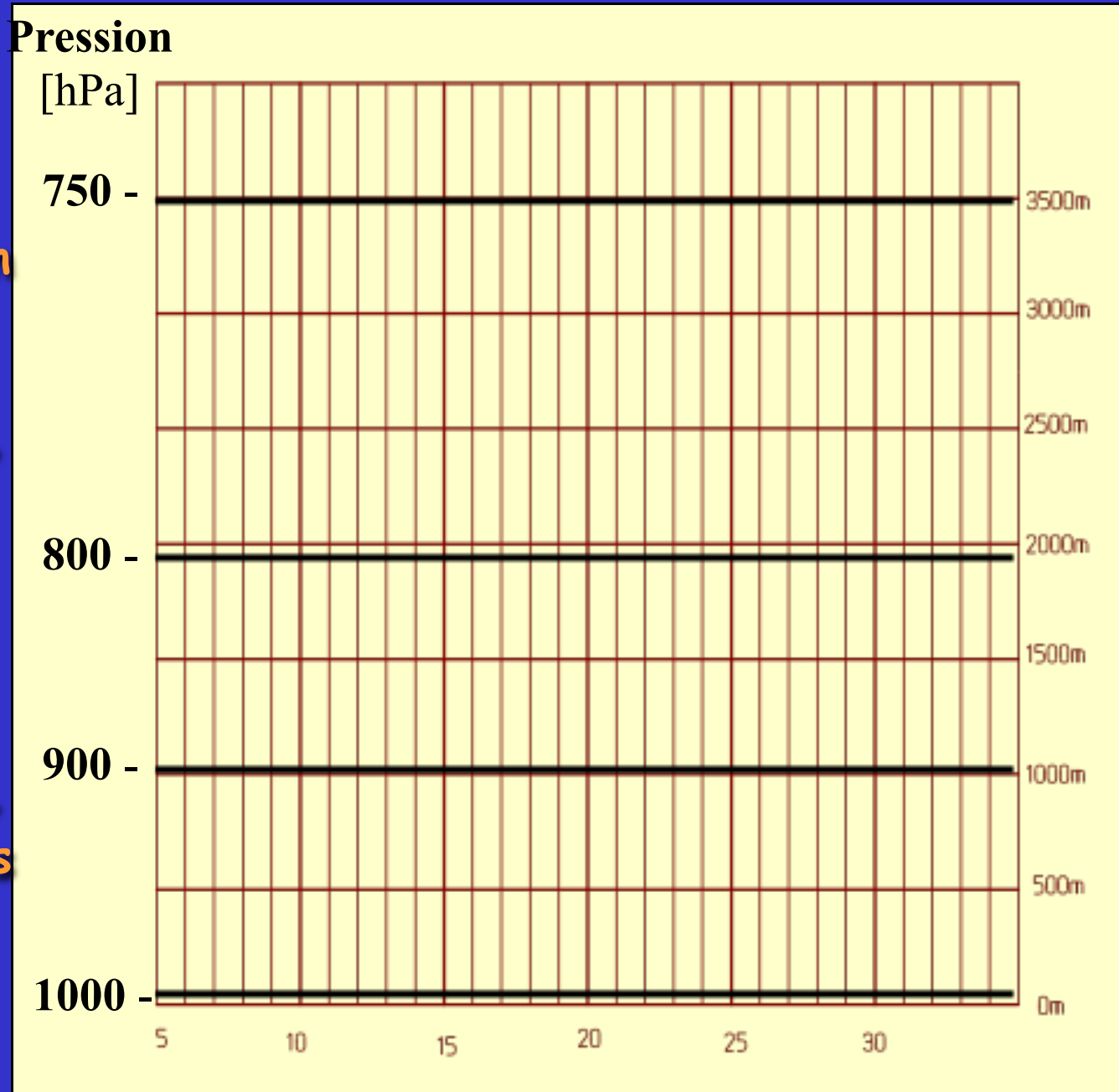


L'EMAGRAMME à 90°

L'émagramme est une grille, qui est résultat de l'assemblage des échelles d'altitudes (ou de pression) et de températures.



L'EMAGRAMME à 90°



En fait, sur les émagrammes classiques, les altitudes sont cotées en niveaux de pression.

En effet, l'état d'un gaz, tel que l'air, peut être défini par deux des trois variables:

- pression P
- température T ,
- masse volumique ρ_a ,

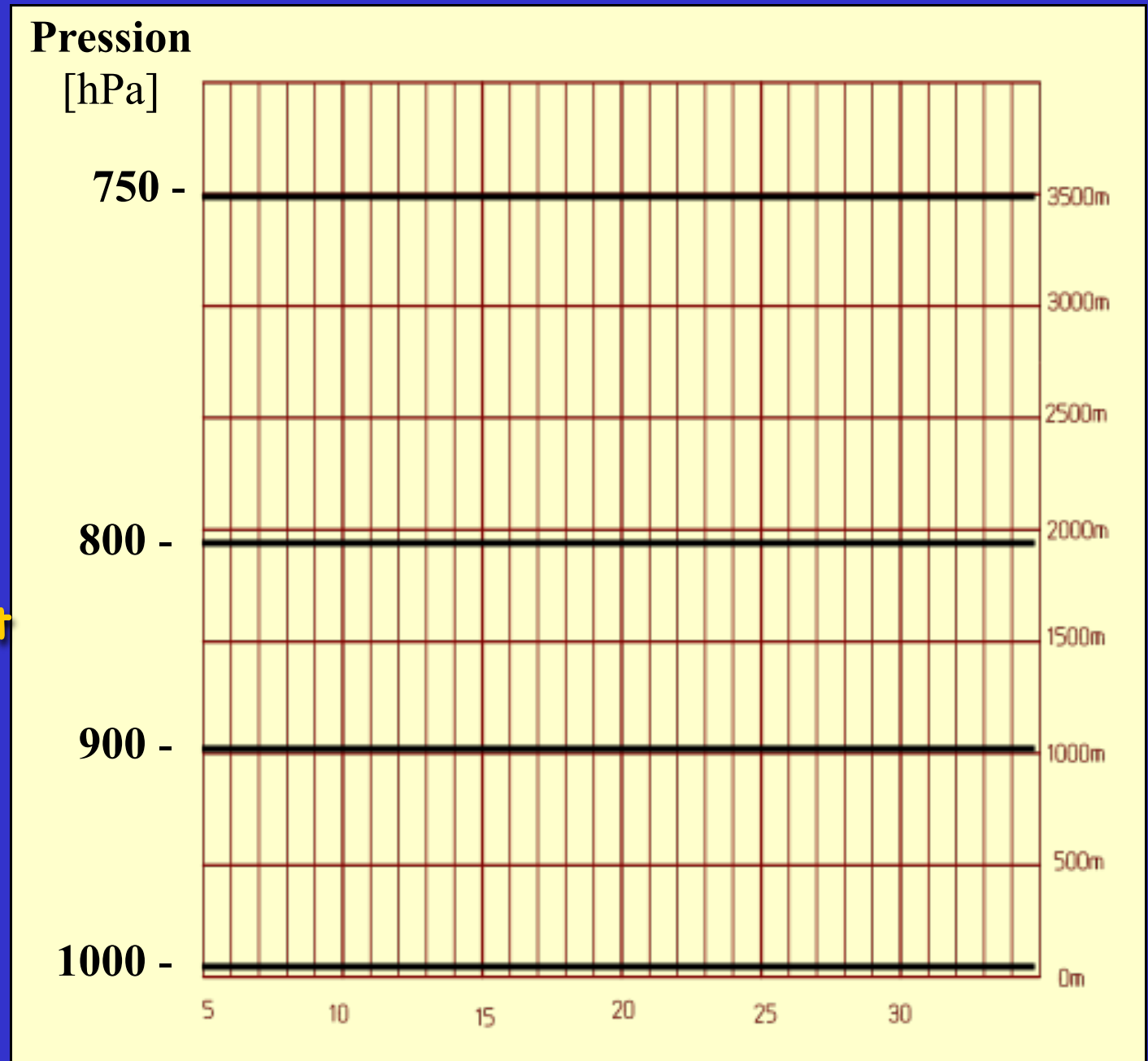
sachant que ces trois variables sont reliées par l'équation d'Etat:

$$P = \rho_a R_a T$$

L'EMAGRAMME à 90°

Mais les niveaux de pression ne sont pas régulièrement espacés.

Aussi, pour la suite de cet exposé, nous travaillerons tout d'abord avec une échelle altimétrique.



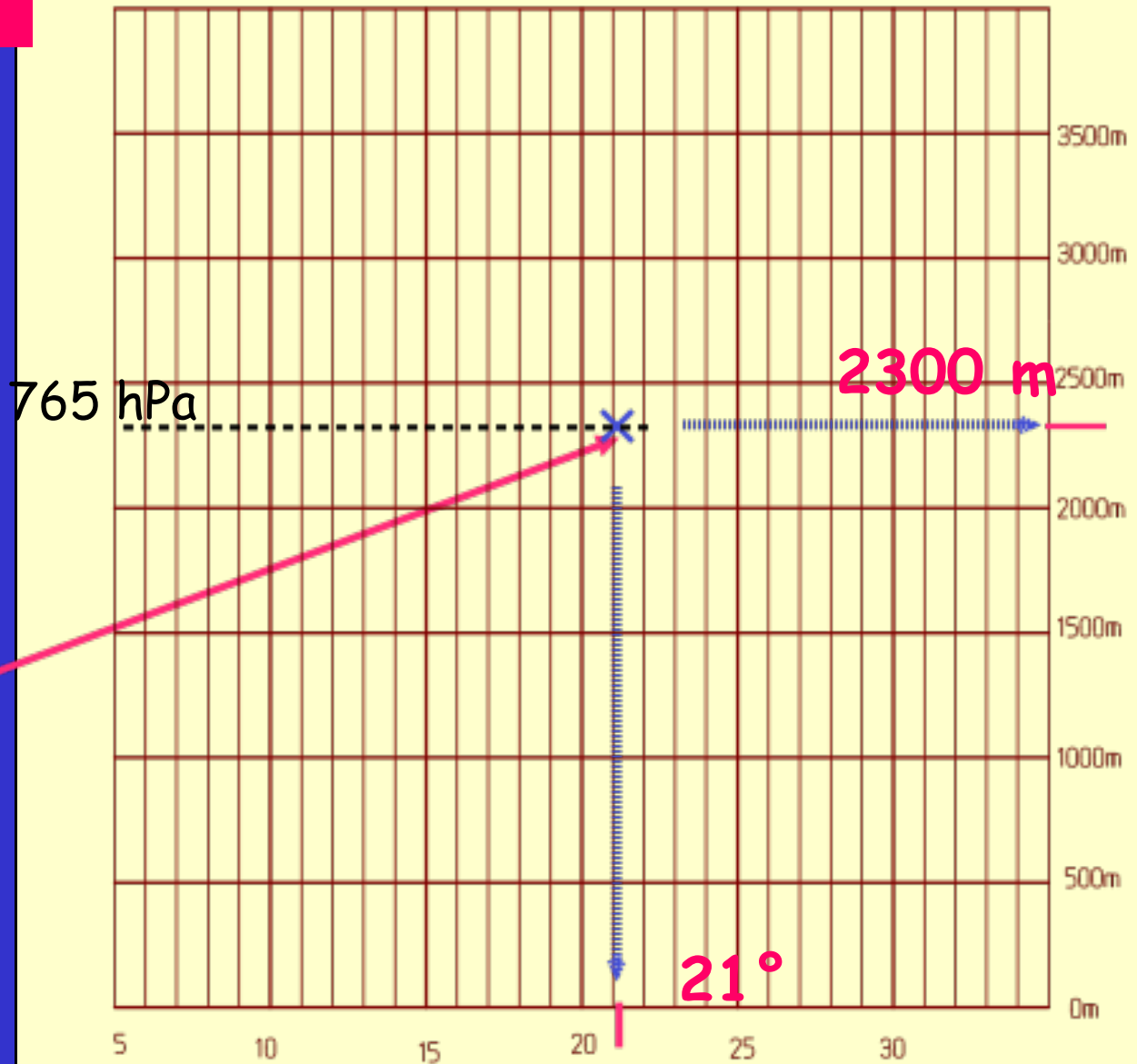
L'EMAGRAMME à 90°

On appelle

« Point d'état »

un point mis en place sur le diagramme et qui correspond à la mesure de la température à un niveau de pression ou à une altitude donnée

Point d'état.

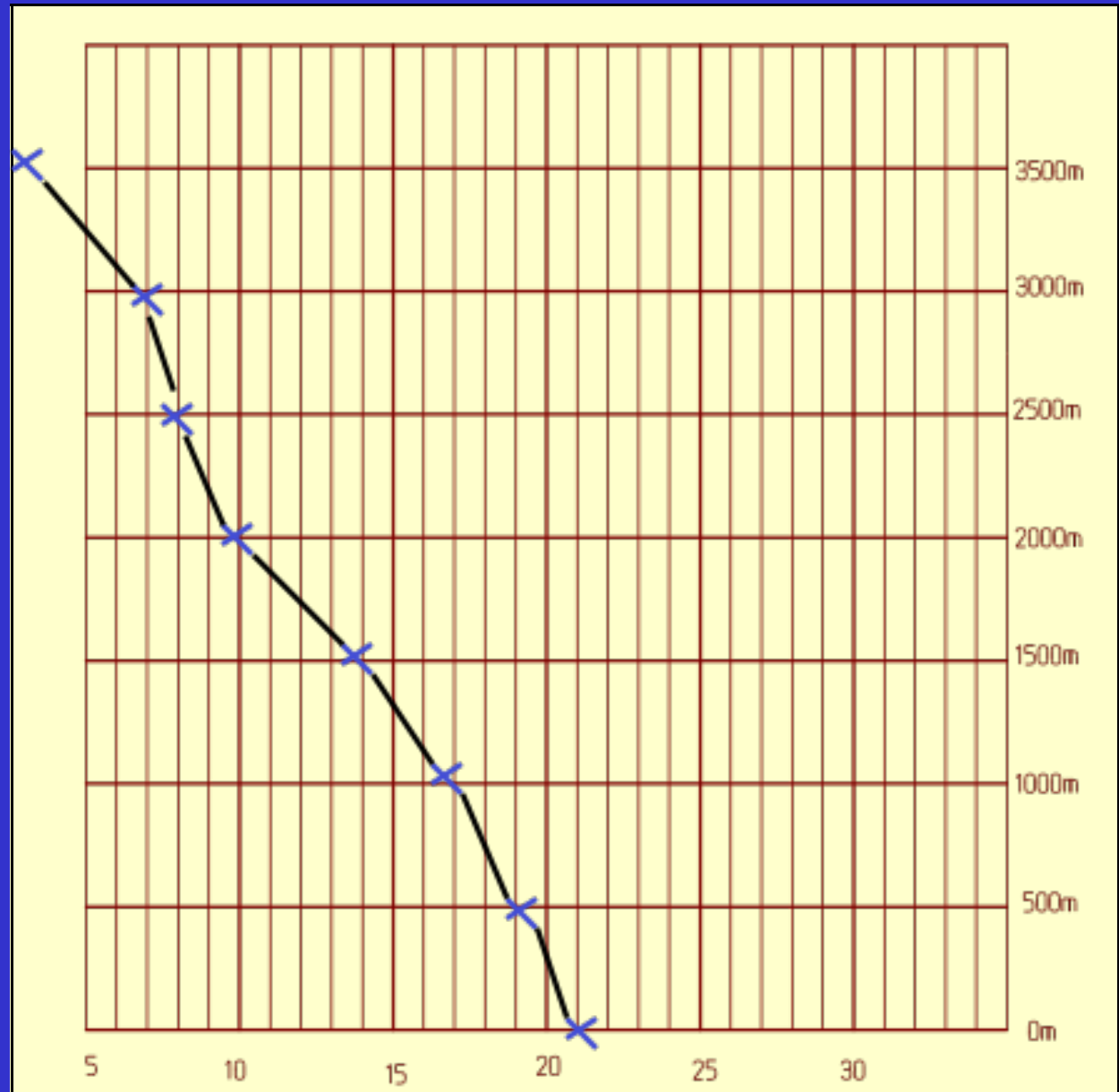


L'EMAGRAMME à 90°

La ligne brisée
qui relie
l'ensemble des
points d'état

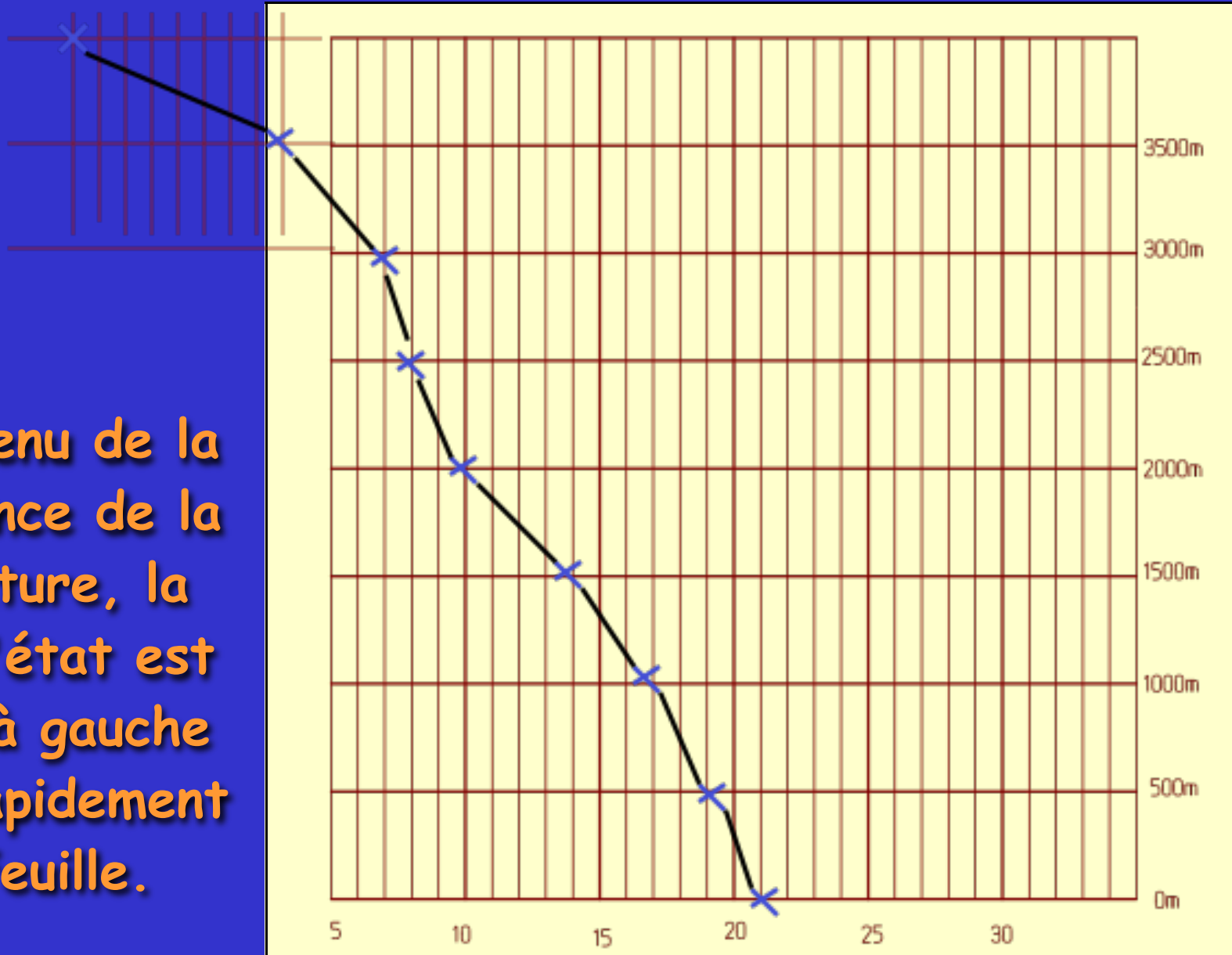
"courbe d'état".

Elle constitue la
première image
de la masse
d'air.



L'EMAGRAMME A 90°

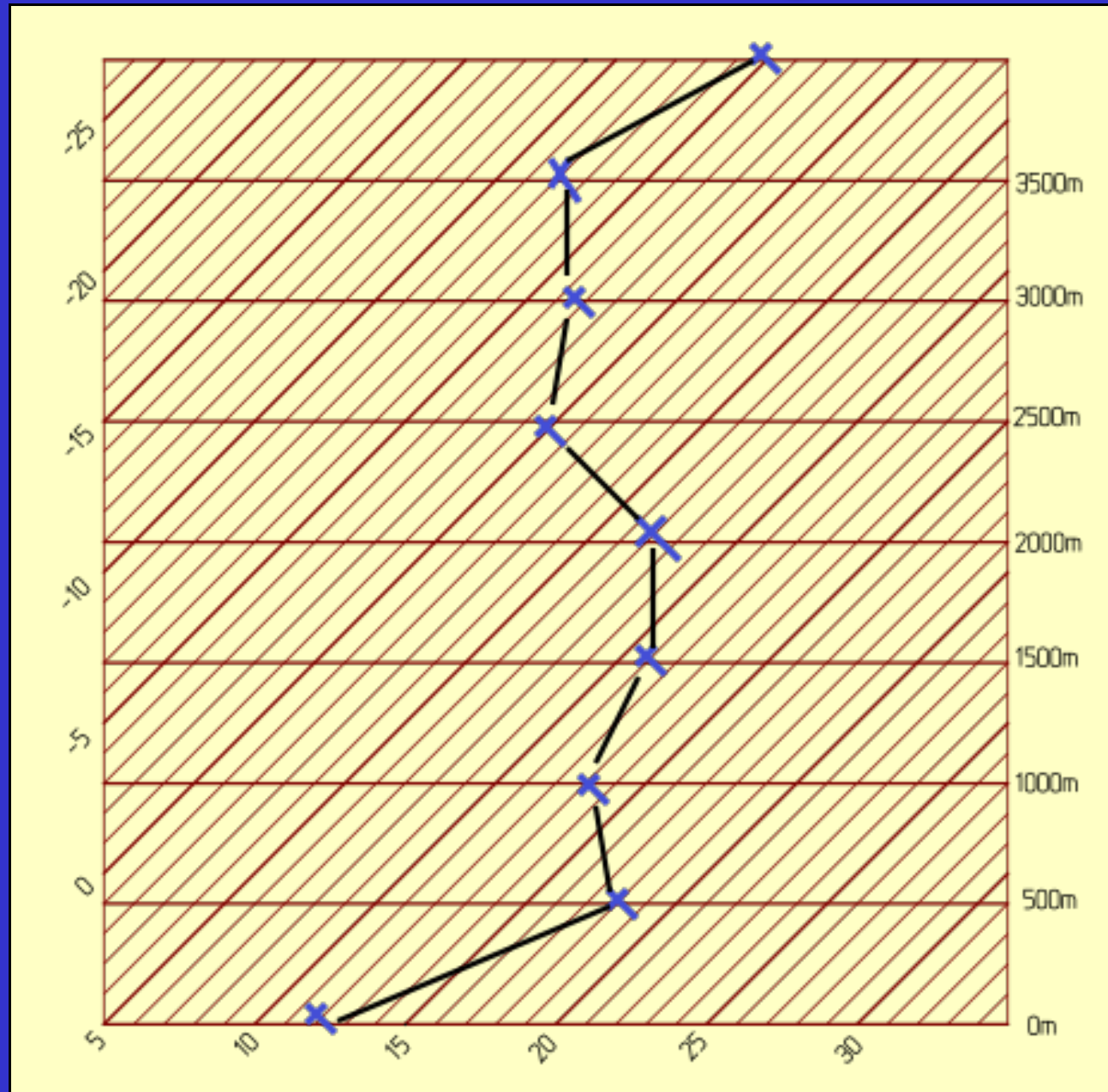
Compte tenu de la décroissance de la température, la courbe d'état est penchée à gauche et sort rapidement de la feuille.



L'EMAGRAMME A ~~90°~~ 45°

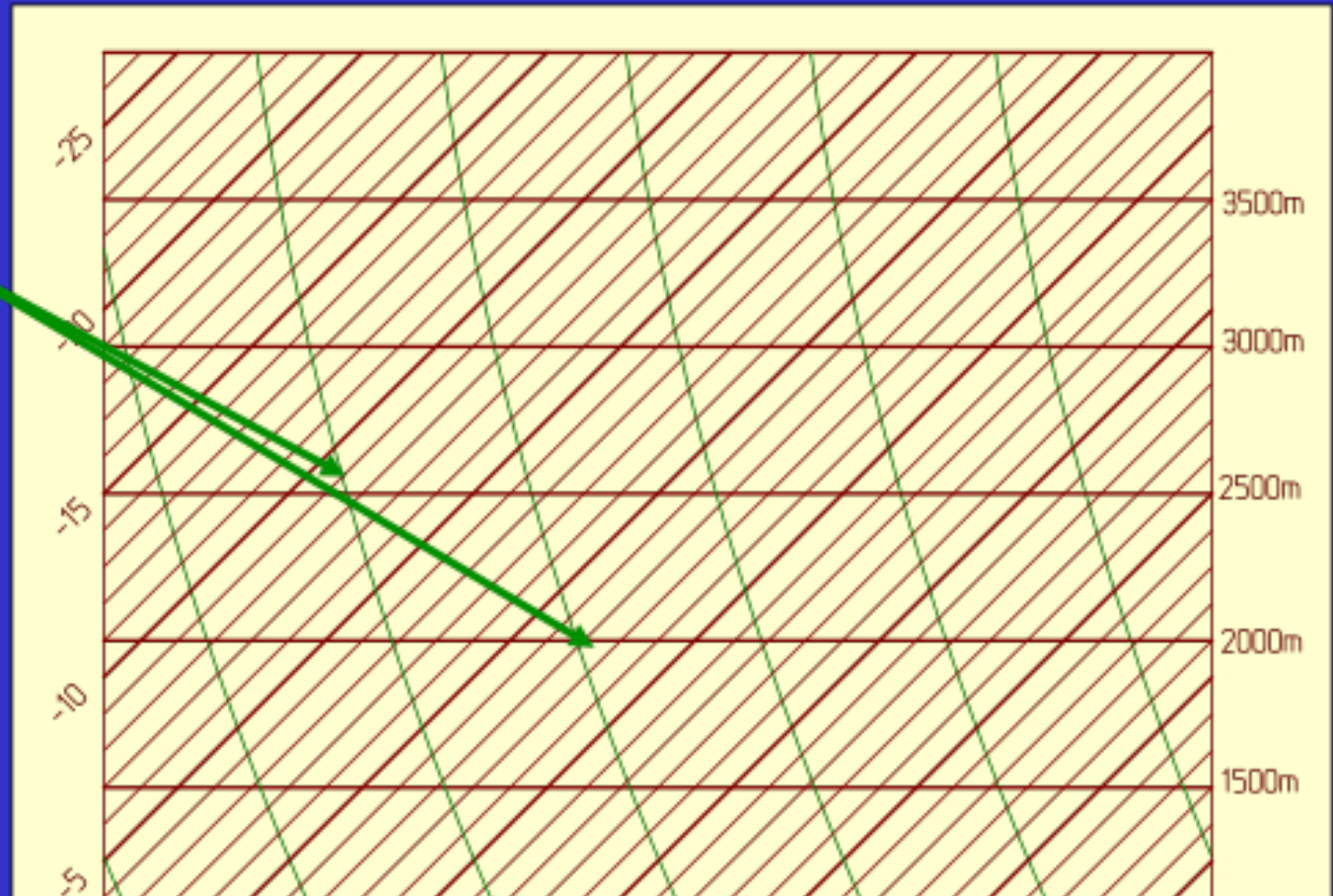
Pour que la courbe d'état soit sensiblement verticale, l'homme intelligent a inventé l'émagramme oblique .

L'axe des températures est incliné à 45° .



L'EMAGRAMME A 45°

Le graphique est complété par un réseau de courbes vertes en trait continu. Elle permettent de déterminer la variation de température d'une particule non saturée subissant une détente ou une



Notons que, sur ce graphique et sur les graphiques suivants, les adiabatiques ne sont représentées que de façon qualitative. Les résultats numériques obtenus par la suite pourront donc différer de ceux que l'on pourrait obtenir avec un émagramme opérationnel ou par simple calcul.

cela ne sert à rien pour la compréhension de l'émagramme

L'EMAGRAMME A 45°

Exemple :

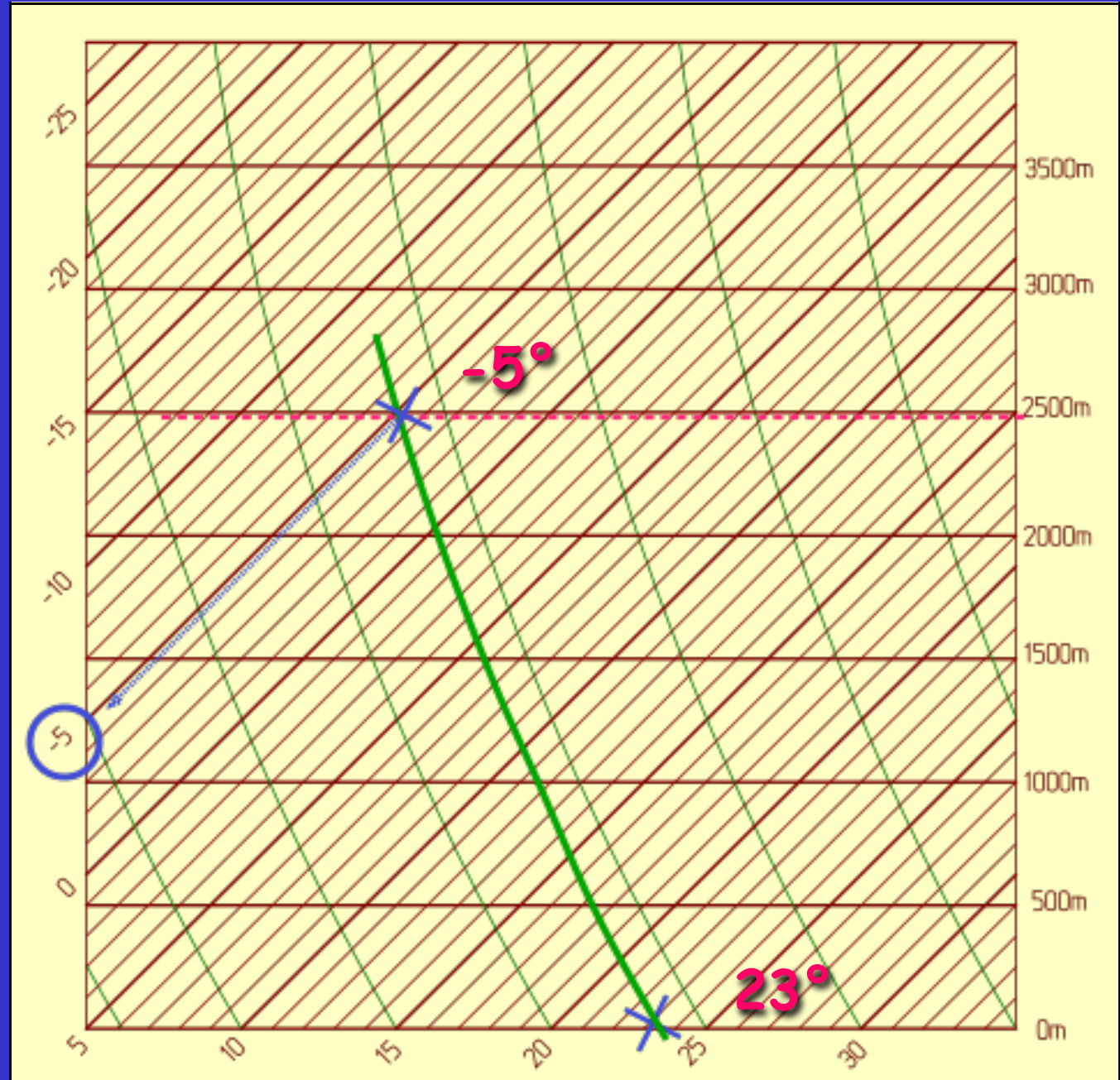
Soit une particule d'air sec
(0 m , 23°)

Quelle sera sa
température si elle
s'élève de façon
adiabatique jusqu'à
2500 m ?

Réponse :

-5°

Par le calcul
on obtient : -2°.



L'EMAGRAMME A 45°

Autre exemple :

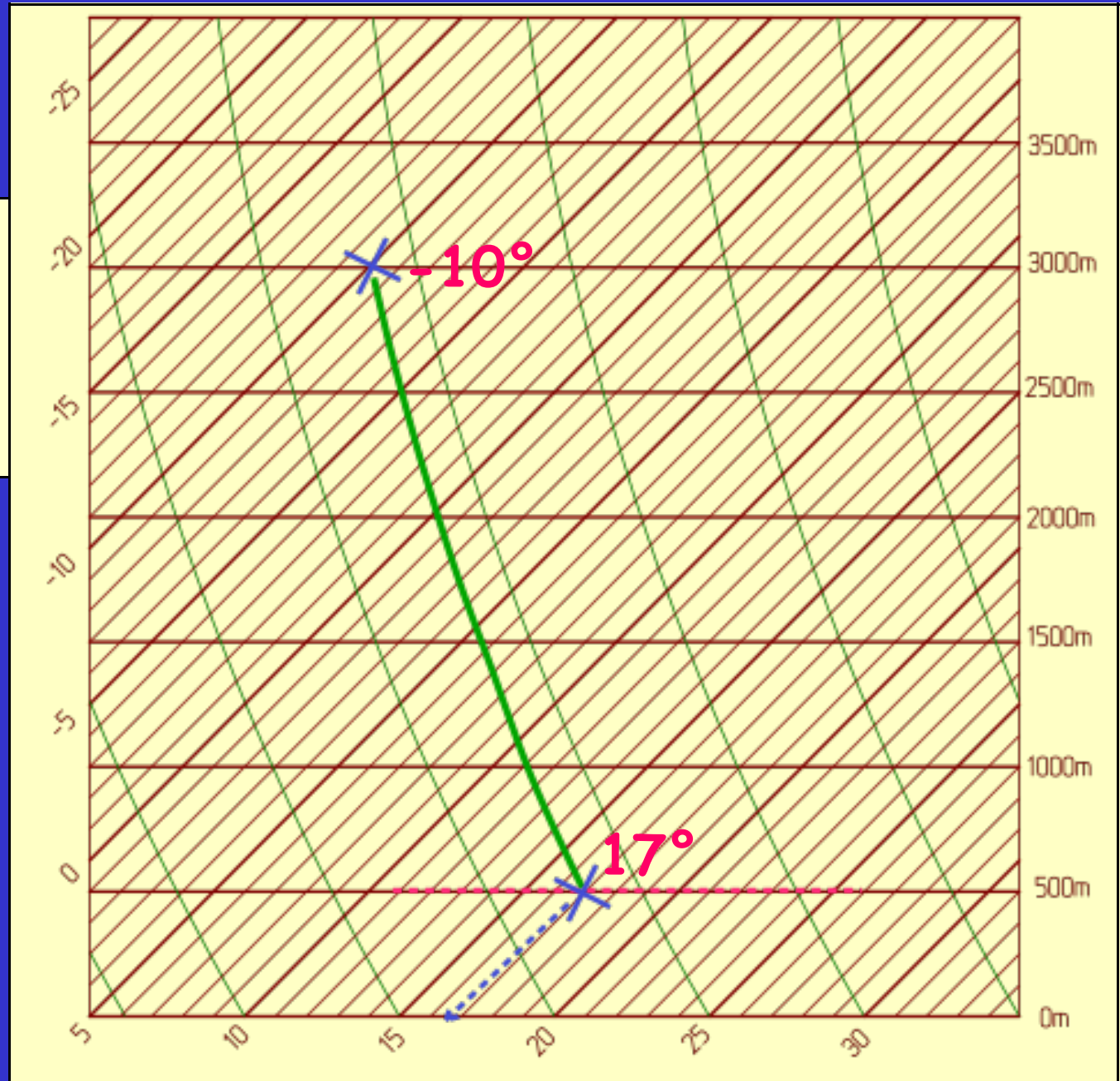
Soit une particule
(3000 m, -10°)

Quelle sera sa température
si elle descend à 500m ?

Réponse :

17°

Par le calcul,
on obtient 15°



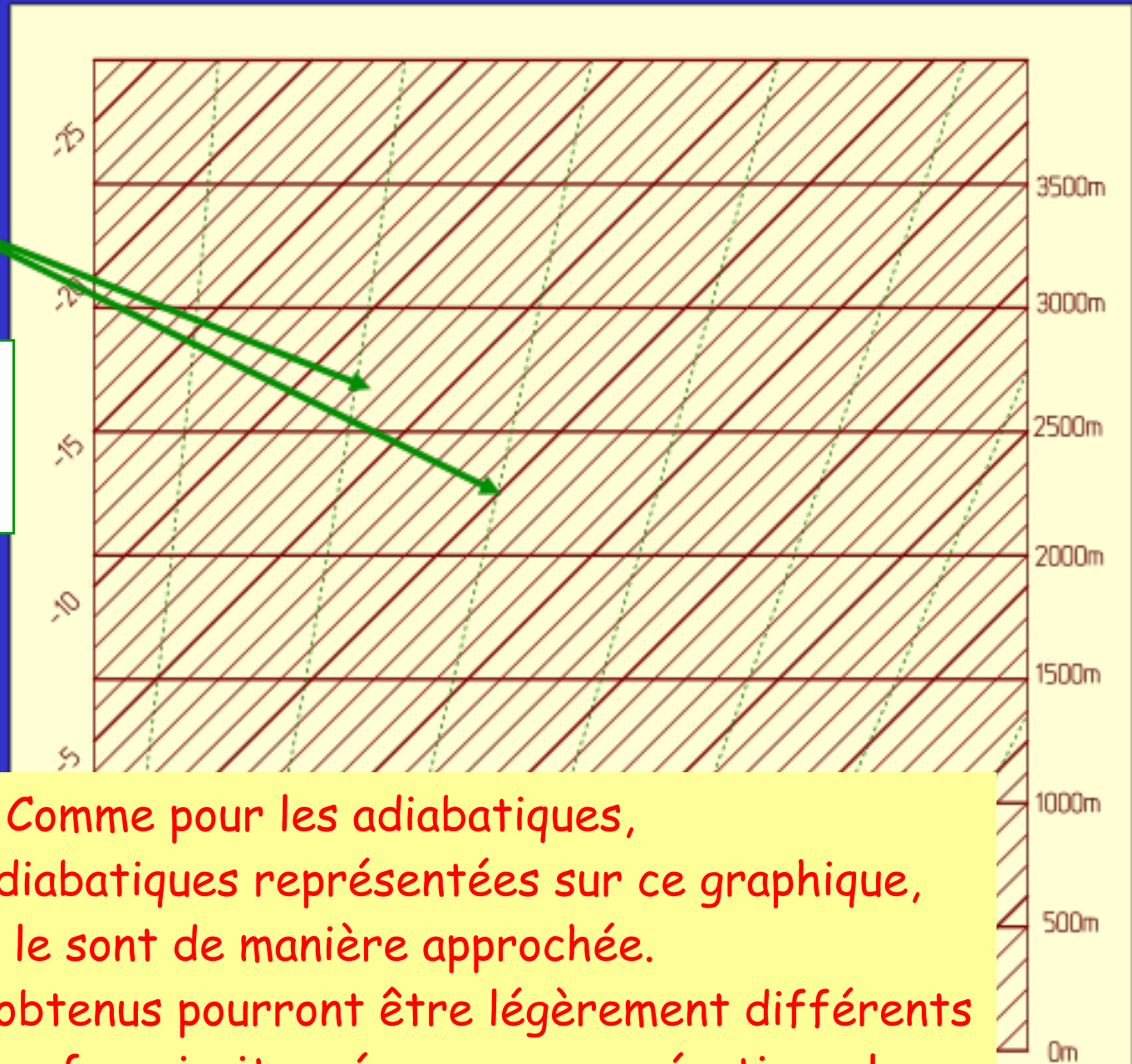
L'EMAGRAMME A 45°

Le graphique reçoit aussi un réseau de courbes vertes en traits tiretés.

Ces courbes représentent des pseudo-adiabatiques.

Elles permettent de déterminer l'évolution de la température

pour les
saturation
une détente
compression



Comme pour les adiabatiques, les pseudoadiabatiques représentées sur ce graphique, le sont de manière approchée.

Les résultats obtenus pourront être légèrement différents de ceux que fournirait un émagramme opérationnel

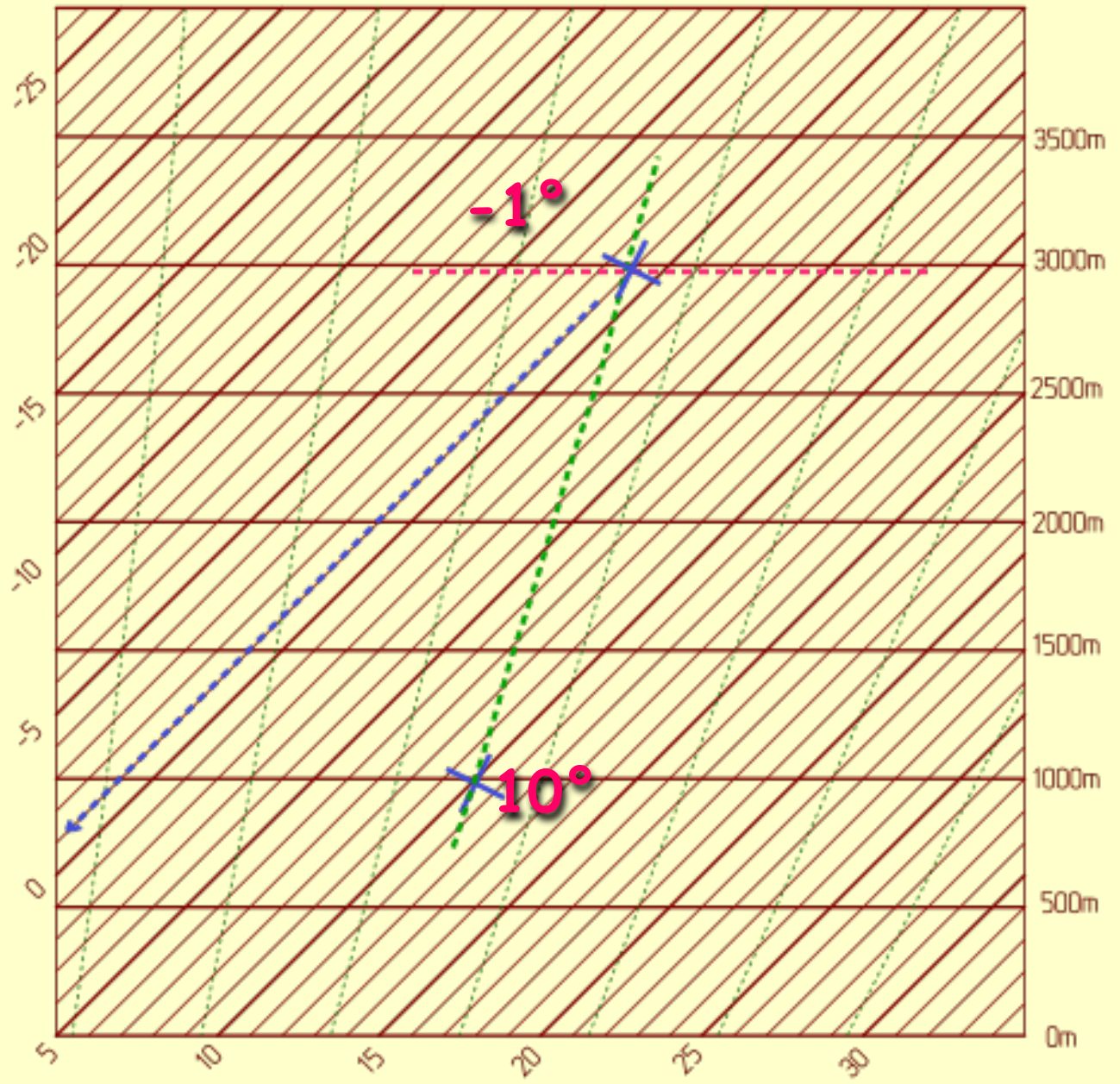
L'EMAGRAMME A 45°

Exemple :

Soit une particule saturée
(1000 m , 10°),
Quelle sera sa température
si elle s'élève à 3000 m ?

Réponse :

-1°

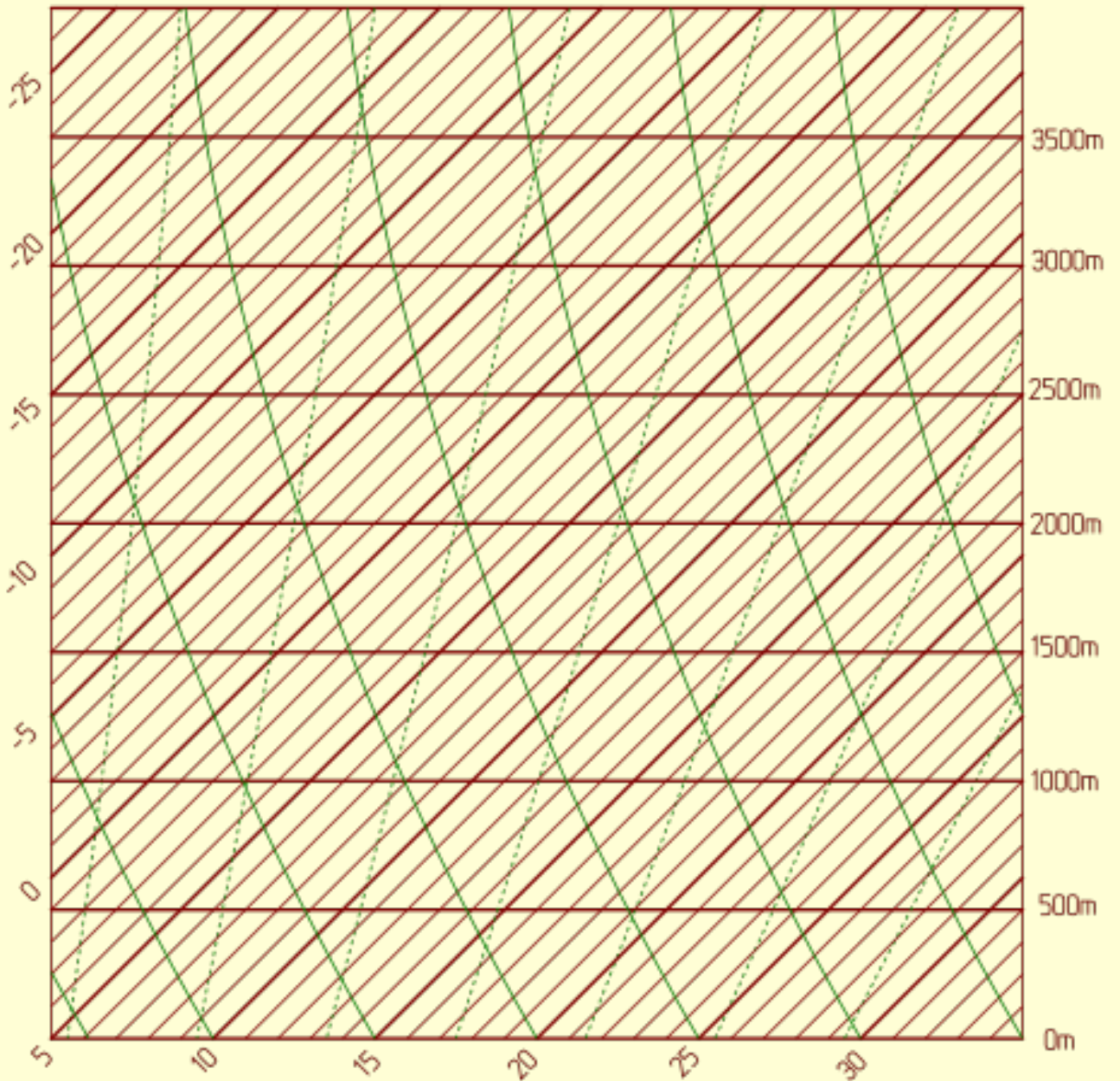


L'EMAGRAMME A 45°

L'émagramme rassemble :

les adiabatiques et les pseudoadiabatiques.

Elles permettent de déterminer la température d'une particule avant et après sa saturation.



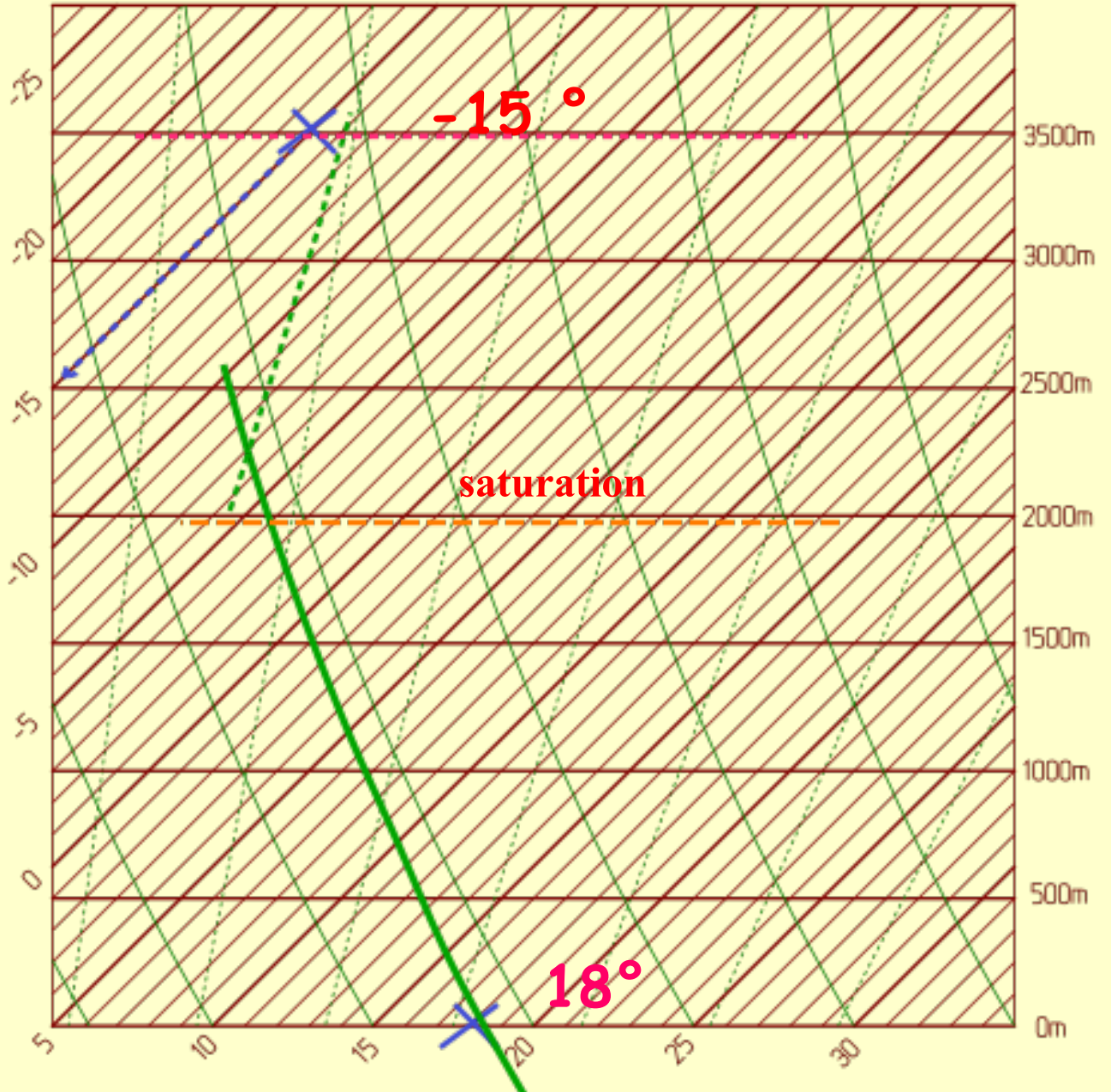
L'EMAGRAMME A 45°

Exemple :

Soit une particule
(0 m, 18°)
Quelle sera sa
température à 3500 m
si elle se sature
à 2000 m ?

Réponse :

- 15°



Chapitre III: L 'émagramme

et ses applications pour la prévision Vol à Voile

III-1: Présentation de l 'émagramme

III-2: La Prévision des ascendances

III-3: Représentation de l 'humidité de l 'air et prévision de la condensation de la vapeur d 'eau

III-4: Mesure de l 'humidité et détermination du point de rosée et du point de condensation (base des cumulus)

III-5: La masse d 'air en un « clin d 'œil »

Le rayonnement solaire ne change pas sensiblement le profil des températures de l'air.

Par contre, les particules atmosphériques reçoivent de la chaleur du sol.



En s'échauffant, certaines d'entre elles deviennent moins denses que l'air ambiant et s'élèvent...



jusqu'à ce que leur température devienne égale à celle de l'air qui les entoure.

Sur l'épigramme,
le point représentatif de la
particule d'air non saturé suivra
une adiabatique « sèche »...

... jusqu'au croisement avec la
la courbe d'état.

Un sondage « pointé » sur un émagramme devrait permettre de déterminer l'évolution diurne de la convection :

- l'heure de déclenchement des mouvements convectifs ,
- Le plafond des ascendances,
- la base et le sommet des cumulus, etc.

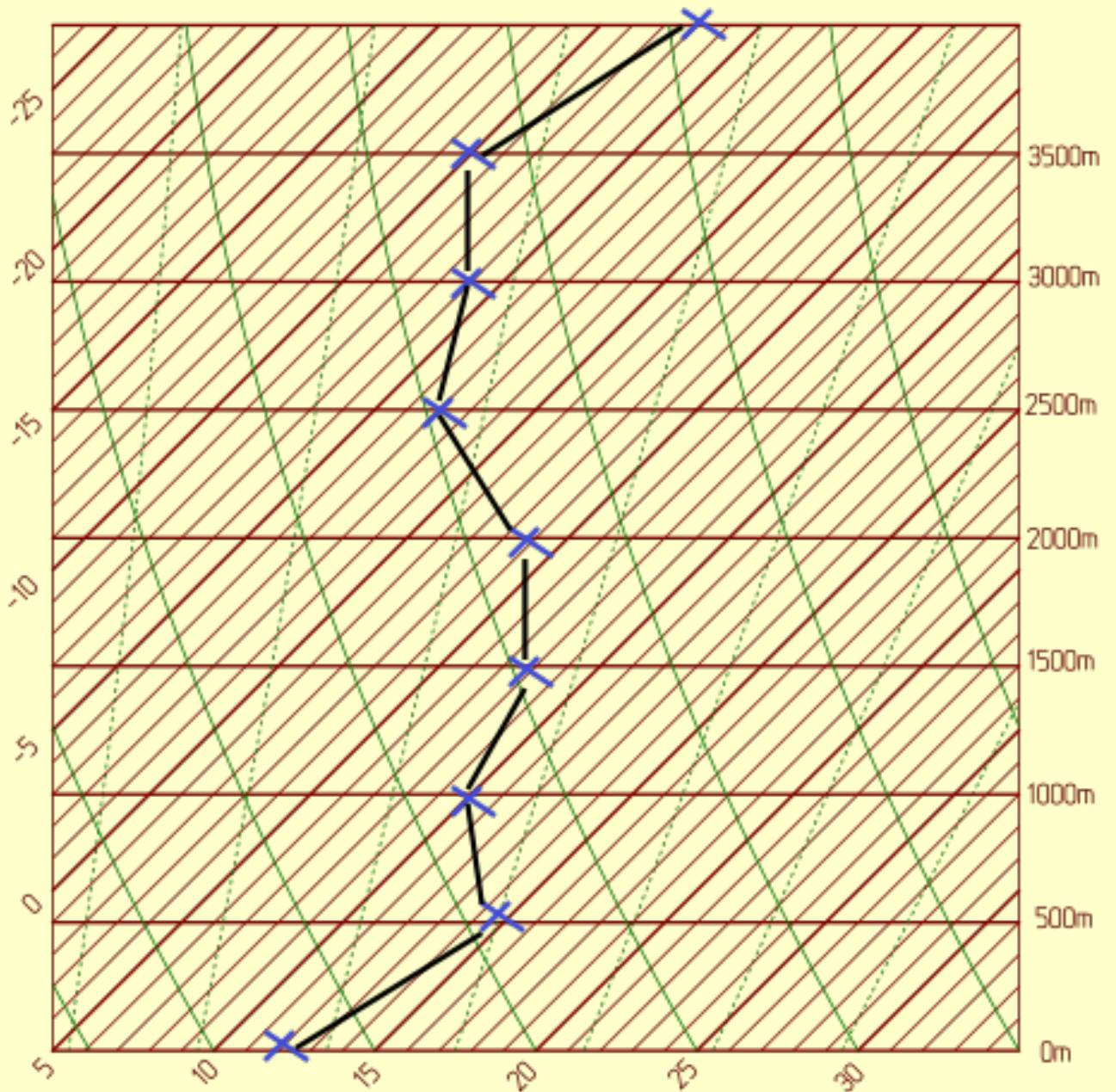
Les éléments de départ sont :

- le sondage de la masse d'air,
- la prévision des températures au sol.

Courbe d'état

Températures
prévues au sol:

heures	T° C
8h (sondage)	12°
10h	20°
12h	24°
14h	26°
16h maxi de T°	28°



Prévision du sommet des ascendances

Exemples :

T° prévue = 24° .

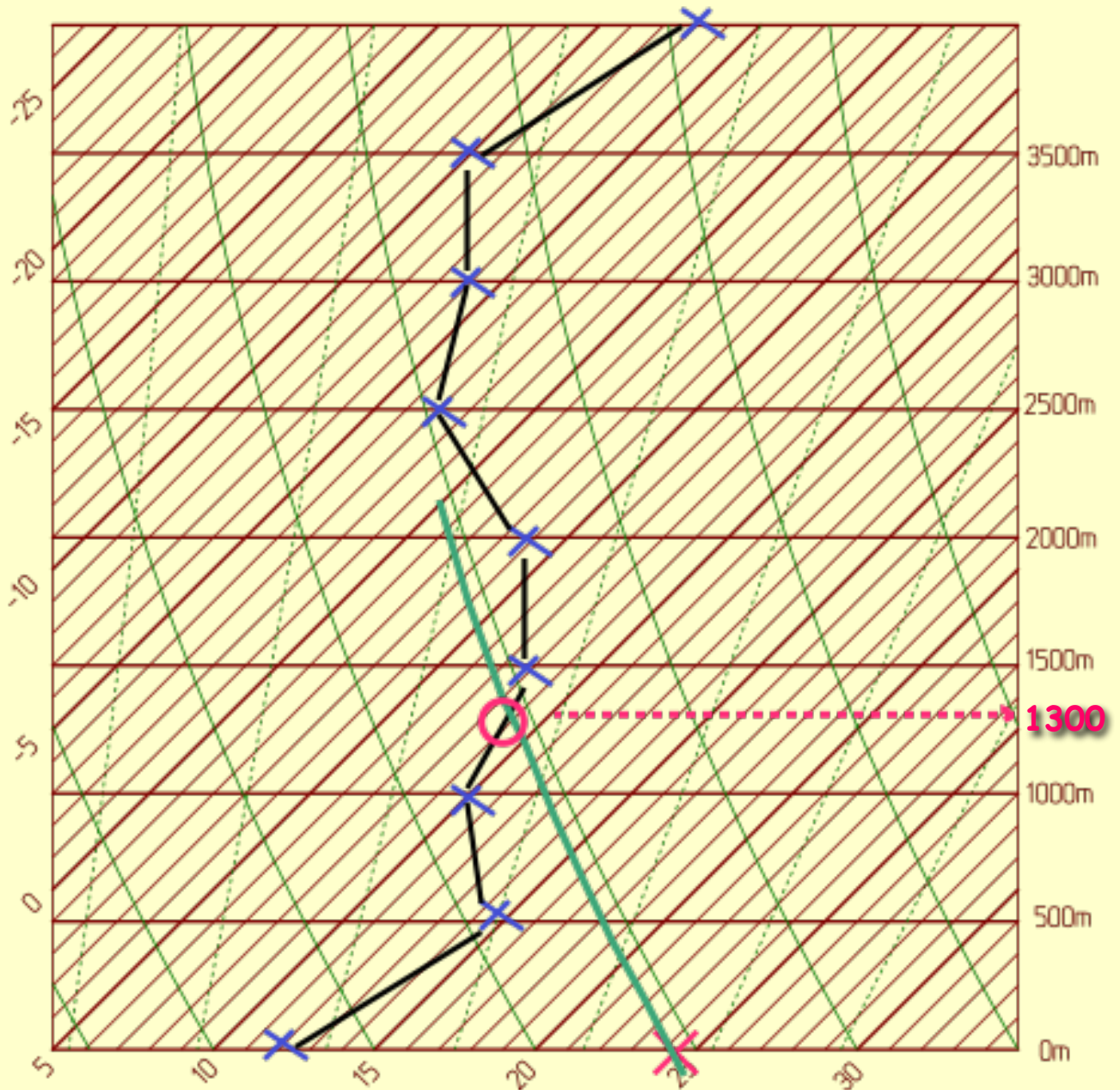
Plafond à 12 h ,
en l'absence de
condensation ?

On trace une
adiabatique passant par
la température prévue.

L'égalité de
température entre l'air
ambiant et la particule
en ascension est
atteinte au croisement
avec la courbe d'état.

Réponse :

1300 m



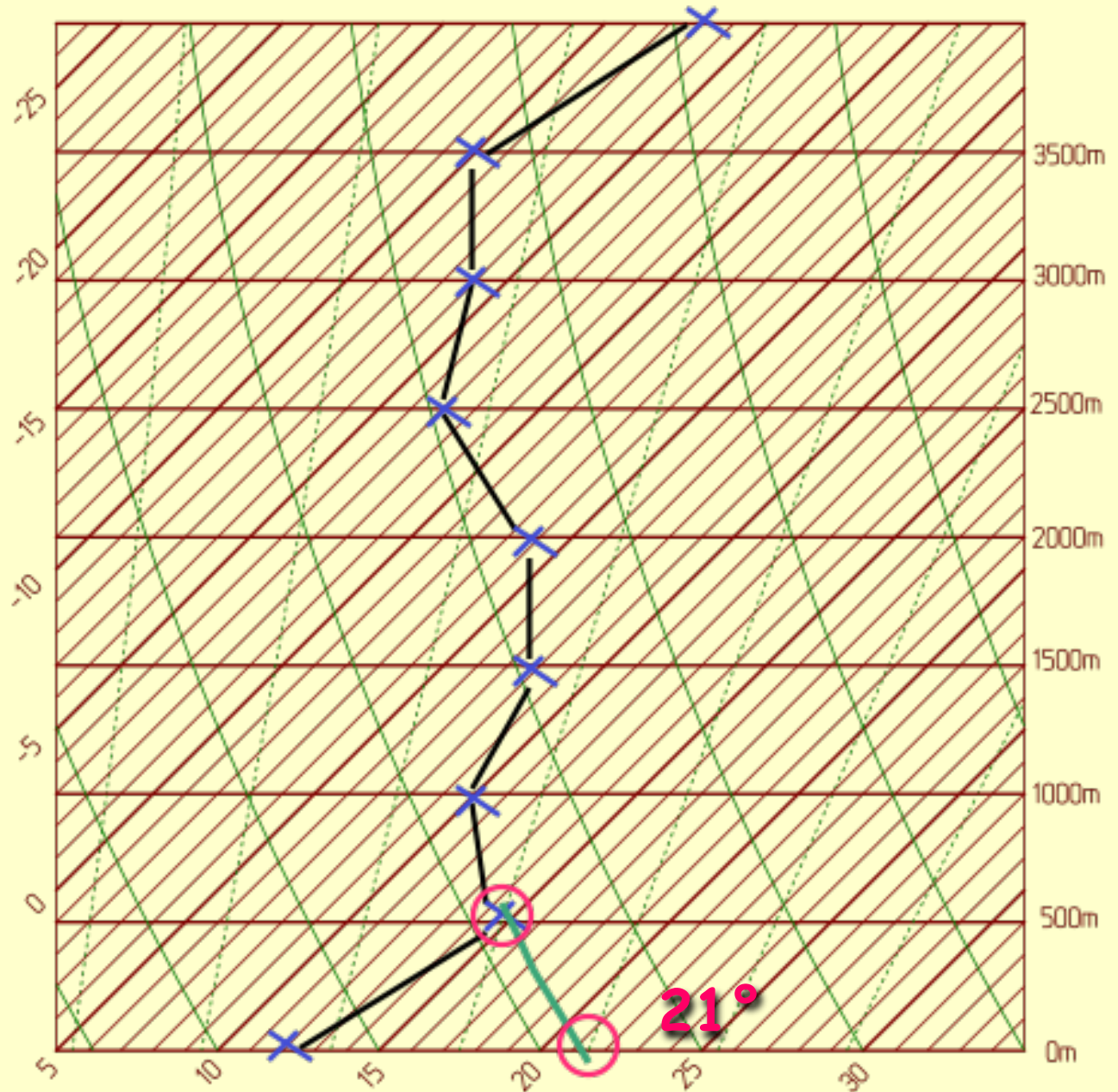
Résorption de l'inversion nocturne

Pour quelle température l'inversion sera-t-elle résorbée ?

A partir du sommet de l'inversion, on trace une adiabatique. La température recherchée est repérée au croisement avec l'altitude du lieu.

Réponse :

21°



Base et sommet des cumulus

La démarche est identique...

... mais il faut connaître l'altitude à laquelle la saturation sera atteinte.

Cette connaissance nécessite une opération supplémentaire que l'on étudiera plus tard.

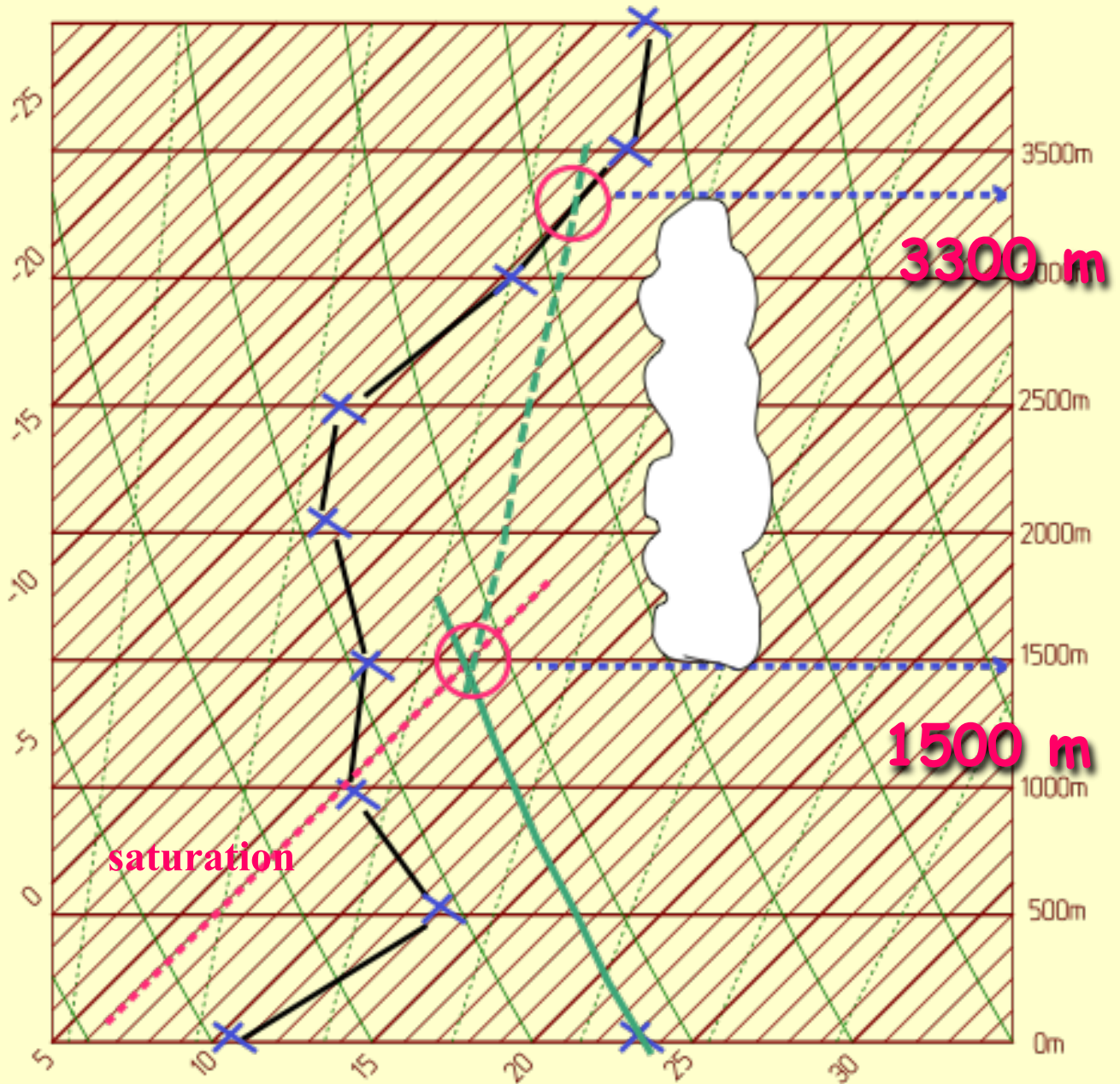
Base et sommet des cumulus

Base et sommet des cumulus à 15 h ?
 t° prévue : 23°
saturation prévue pour 6° .

De la t° prévue, on trace une adiabatique jusqu'au niveau de saturation.

On poursuit par une pseudo-adiabatique jusqu'au croisement avec la courbe d'état.

Base : 1500 m
Sommet : 3300 m



Chapitre III: L'épigramme

et ses applications pour la prévision Vol à Voile

I-1: Présentation de l'épigramme

I-2: La Prévision des ascendances

I-3: Représentation de l'humidité de l'air et prévision de la condensation de la vapeur d'eau

I-4: Mesure de l'humidité et détermination du point de rosée et du point de condensation (base des cumulus)

I-5: La masse d'air en un « clin d'œil »

L'humidité sur l'émagramme

L'émagramme est complété par des lignes tiretées bistres. Elles

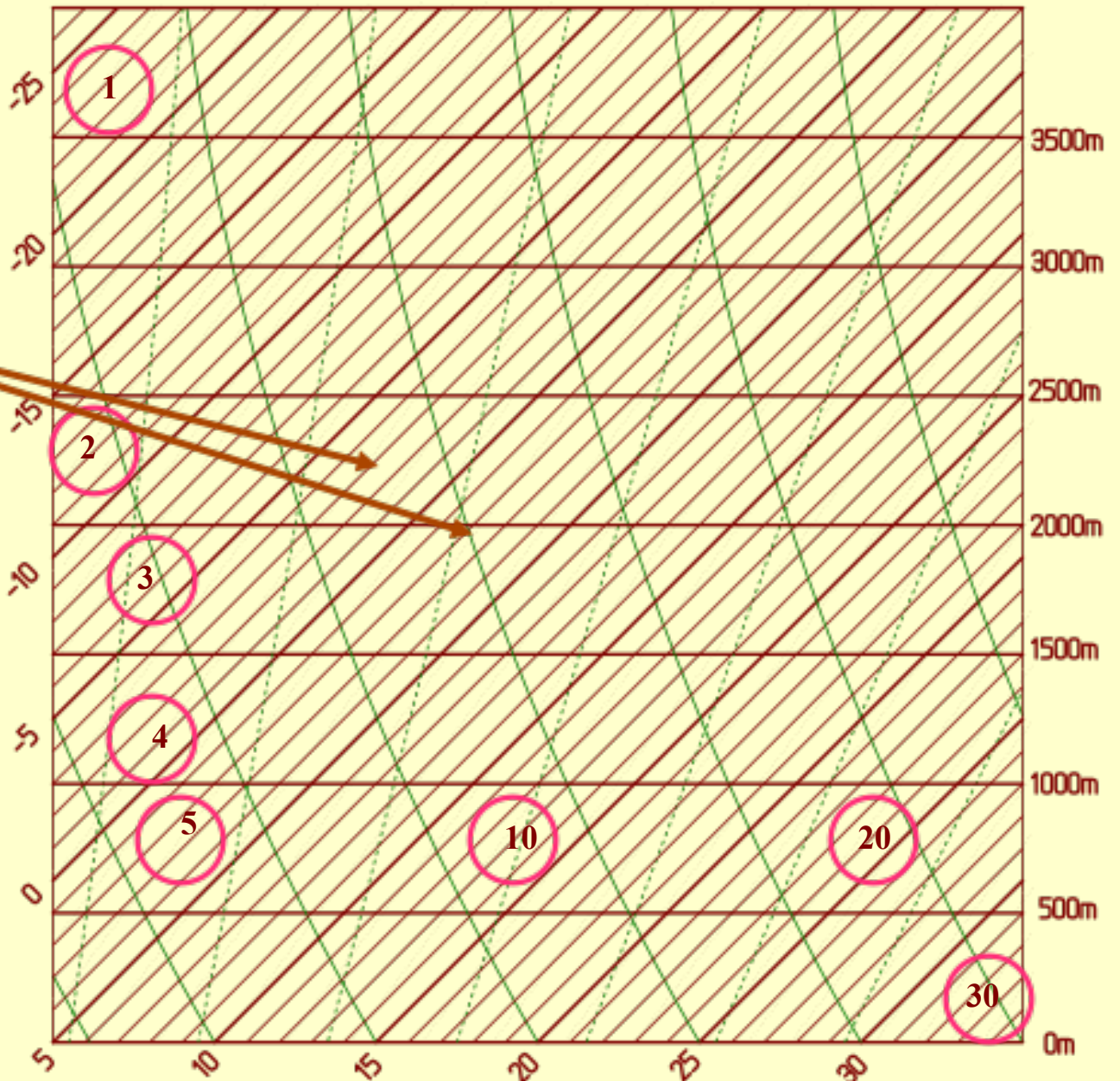
représentent des lignes d'égal rapport de mélange saturant

rs

et sont cotées

Remarque :

rs est souvent noté



L'humidité sur l'épigramme

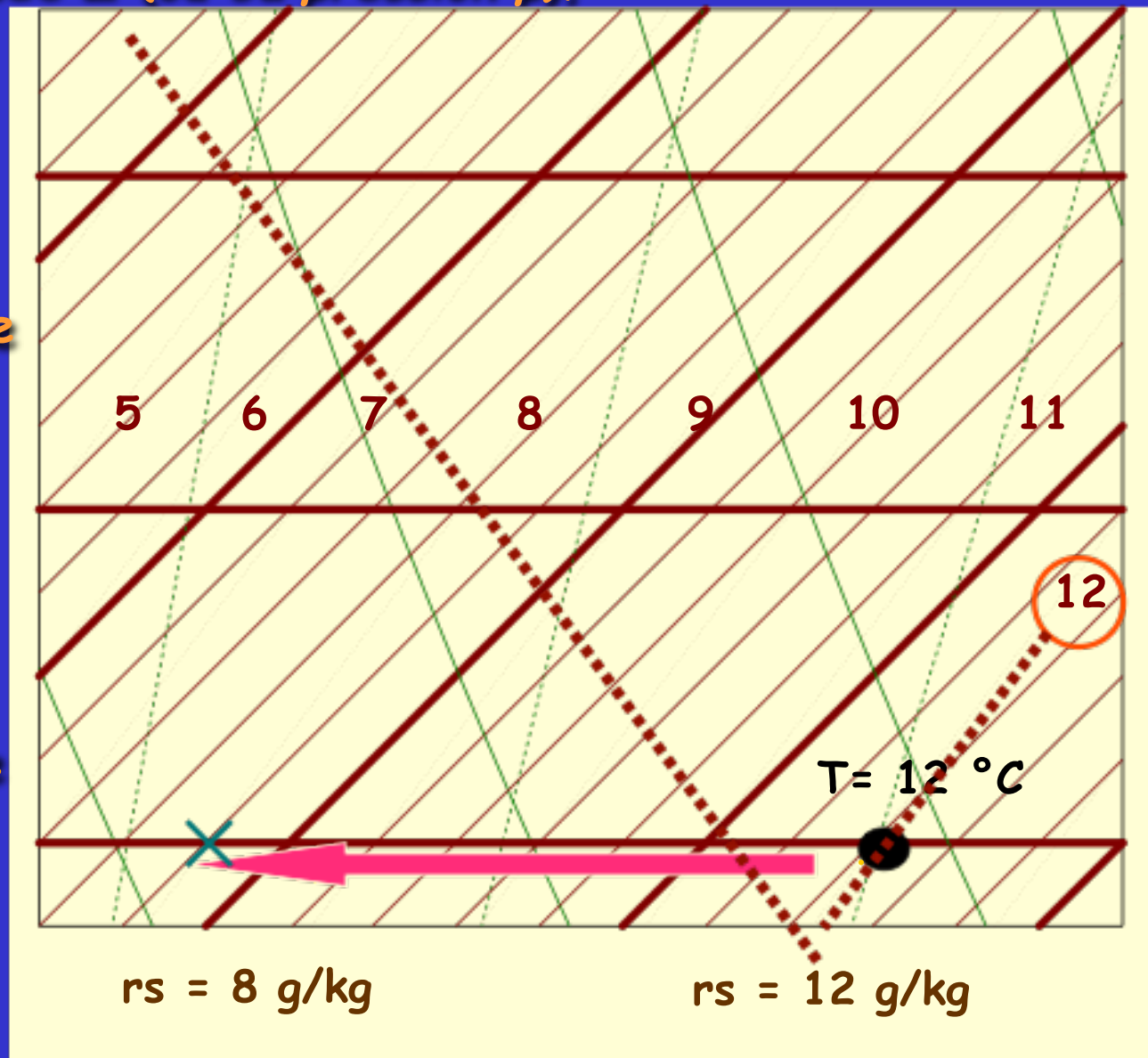
La particule définie par : sa température $t = 12^{\circ}\text{C}$

et son altitude Z (ou sa pression p),
serait saturée si

son rapport de mélange
était égal à 12 g/kg .

Si son rapport de mélange
réel est
 $r = 8\text{ g/kg}$,

on place une croix
à l'intersection de
l'horizontale
correspondant à l'altitude
 z
et de la ligne d'égal
rapport
de mélange saturant



L'humidité sur l'épigramme

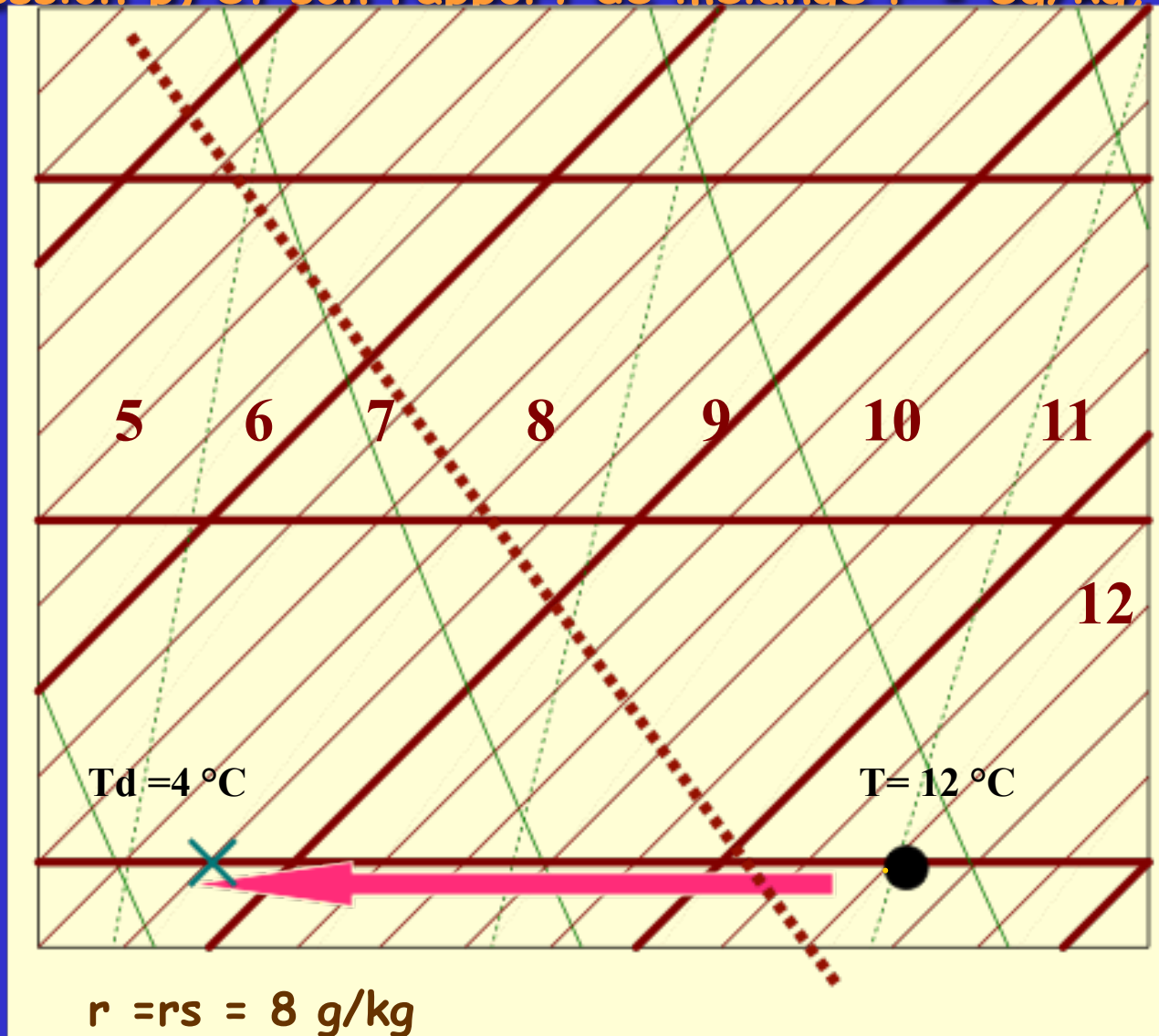
En effet, la particule définie par : sa température $t = 12^\circ\text{C}$,
son altitude Z (ou sa pression p) et son rapport de mélange $r = 8\text{ g/kg}$,

sera saturée
si l'on abaisse sa
température,
à pression constante
(même altitude),
jusqu'à $t = 4^\circ\text{C}$
où $r = r_s = 8\text{ g/kg}$.

Cette température
est appelée :
« température
du point rosée »

ou T_d .

Ici, $T_d = 4$



L'humidité sur l'évagramme

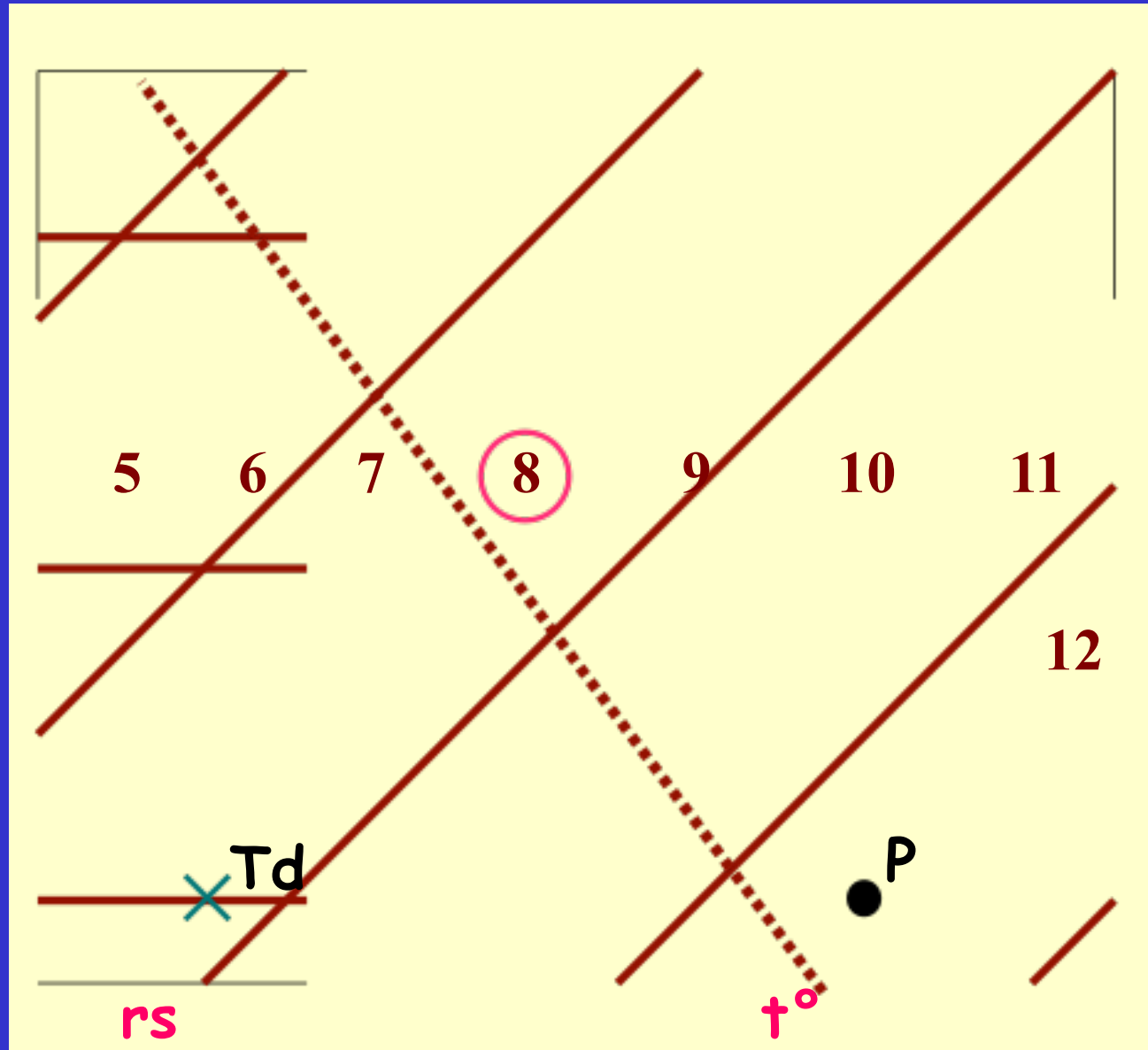
Sur l'évagramme, une particule d'air sera ainsi représentée au moyen de ces deux températures:

1-Le point d'état P défini par :

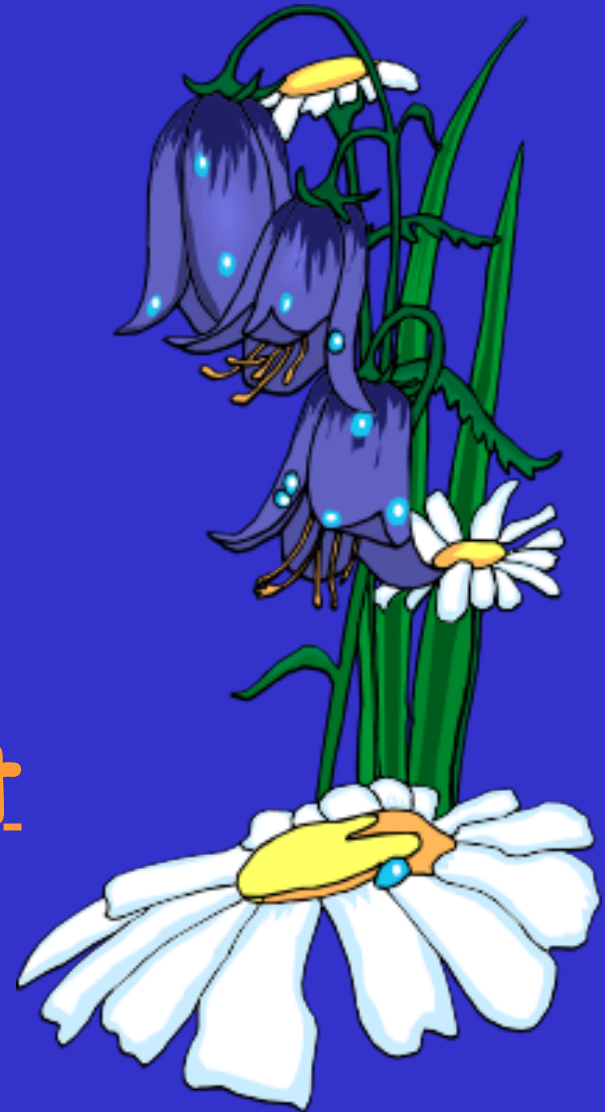
$$T = 12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

et Z (ou p),

2-Td qui correspond à l'intersection de la ligne d'égal rapport saturant r_s égal à $r = 8 \text{ g/kg}$ avec la ligne Z (ou P) = constante.



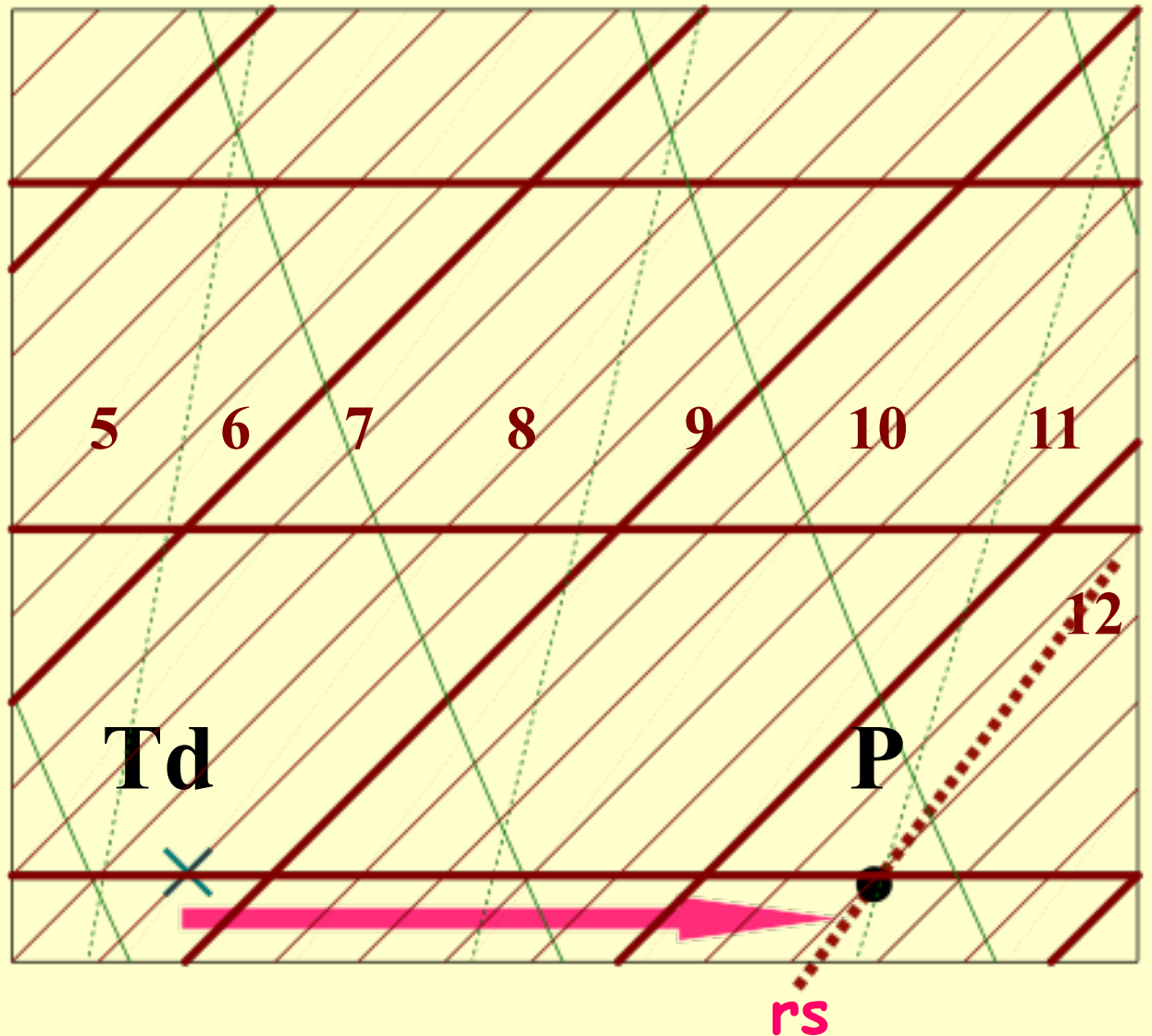
La température du point
de rosée
est la température pour
laquelle une particule
devient saturée,
lors d'un refroidissement
à pression constante.

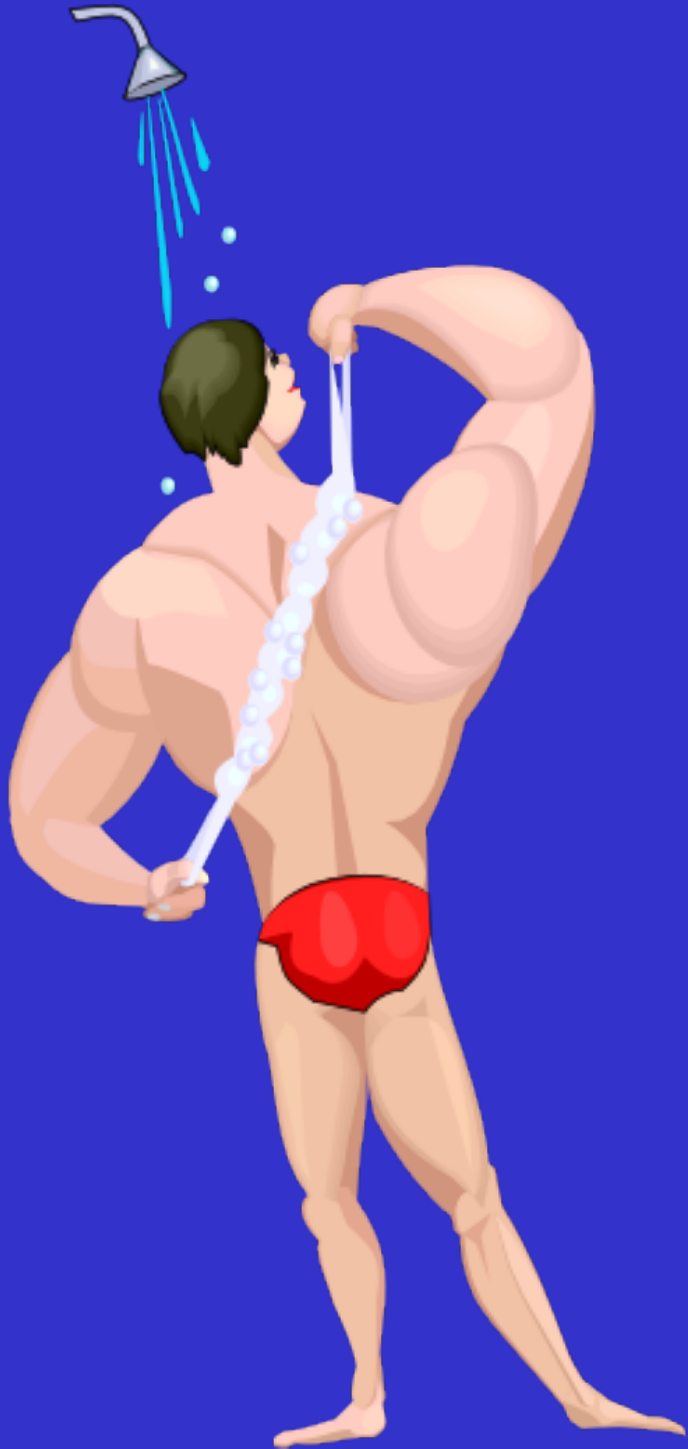


L'humidité sur l'évagramme

Si, par un apport d'humidité, le rapport de mélange passait de 8 à 12g/kg, la particule atteindrait aussi la saturation.

12g/kg est le rapport de mélange saturant r_s .





C'est ce qui se
passe lorsque
vous prenez
votre douche et
que l'aération
est insuffisante.

L'humidité sur l'épigramme

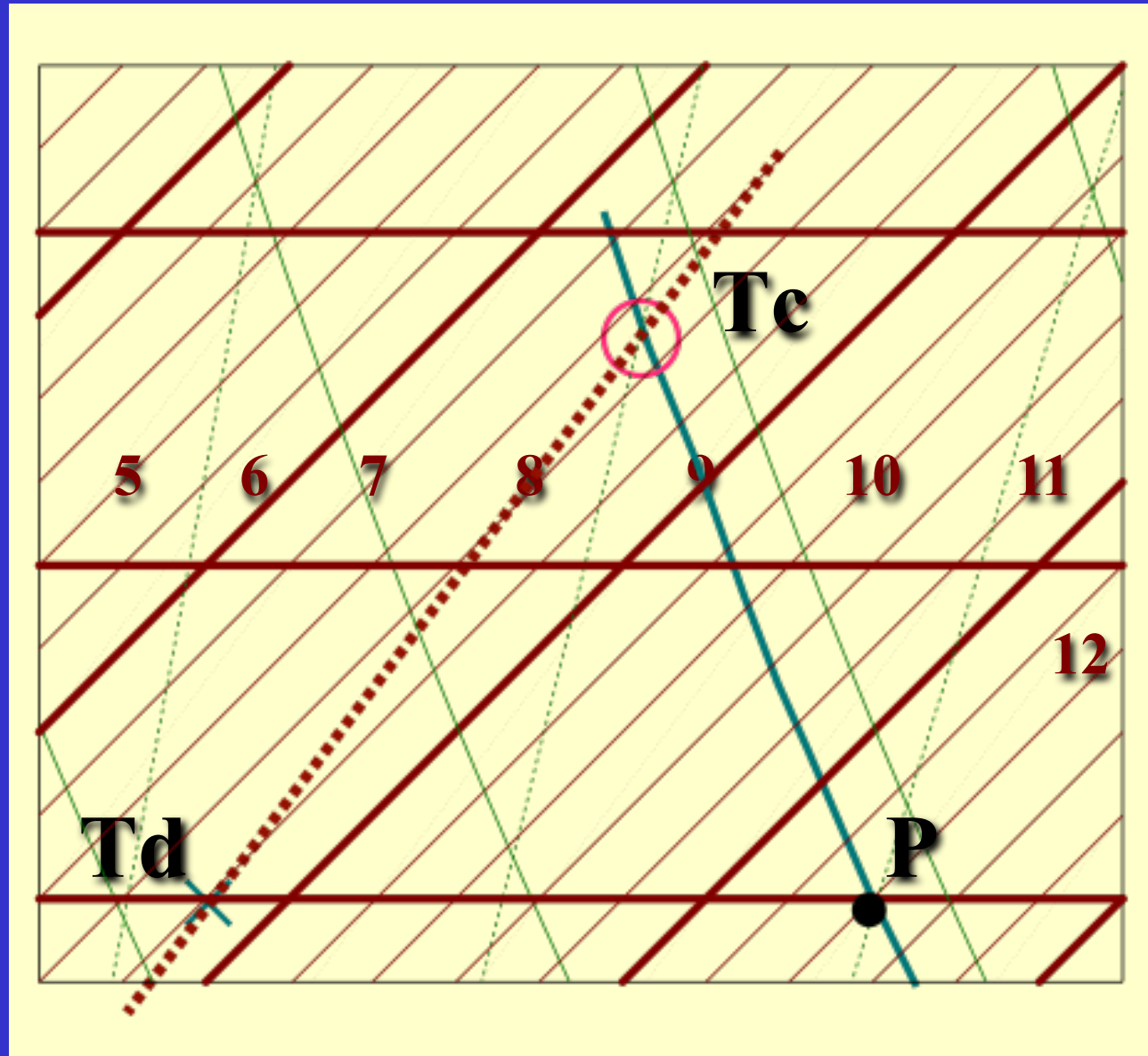
Si la particule est soulevée, elle arrivera à saturation pour une température et une pression correspondant à la valeur saturante de

Le point de condensation correspond à l'intersection de la ligne de rapport de mélange saturant

$r=8 \text{ g/kg}$)

et de l'adiabatique sèche passant par E.

Tc est la température du point de Condensation.



**Le point de
condensation est
celui pour lequel
une particule devient
saturée,
après avoir subi une
détente adiabatique.**



Si l'on connaît le rapport de mélange moyen « r_m » de la tranche d'air convective, il est facile de déterminer la base des cumulus et leur sommet.

Base et sommet des cumulus

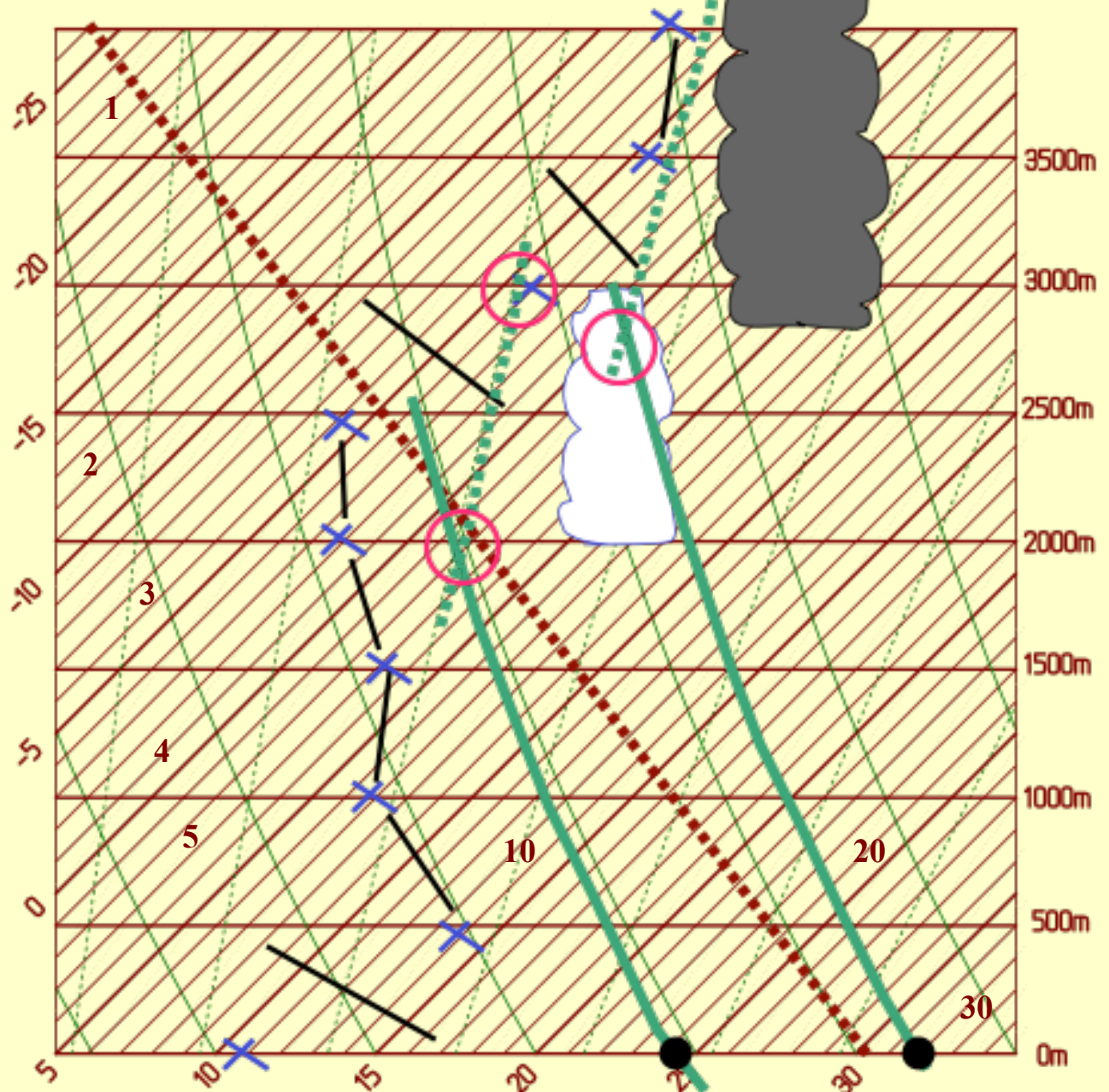
On suppose que le rapport de mélange moyen r_m entre 0 et 3000 m est de 6 g/kg .
Base et sommet des cumulus pour $t=24^\circ$ à $z=0$?

base = 2000 m
sommet = 3000 m

Et pour 32° ?

base = 2700 m
sommet = tropopause

si aucune inversion ne vient stopper la particule dans son ascension !



L'émagramme à l'heure de l'apéro

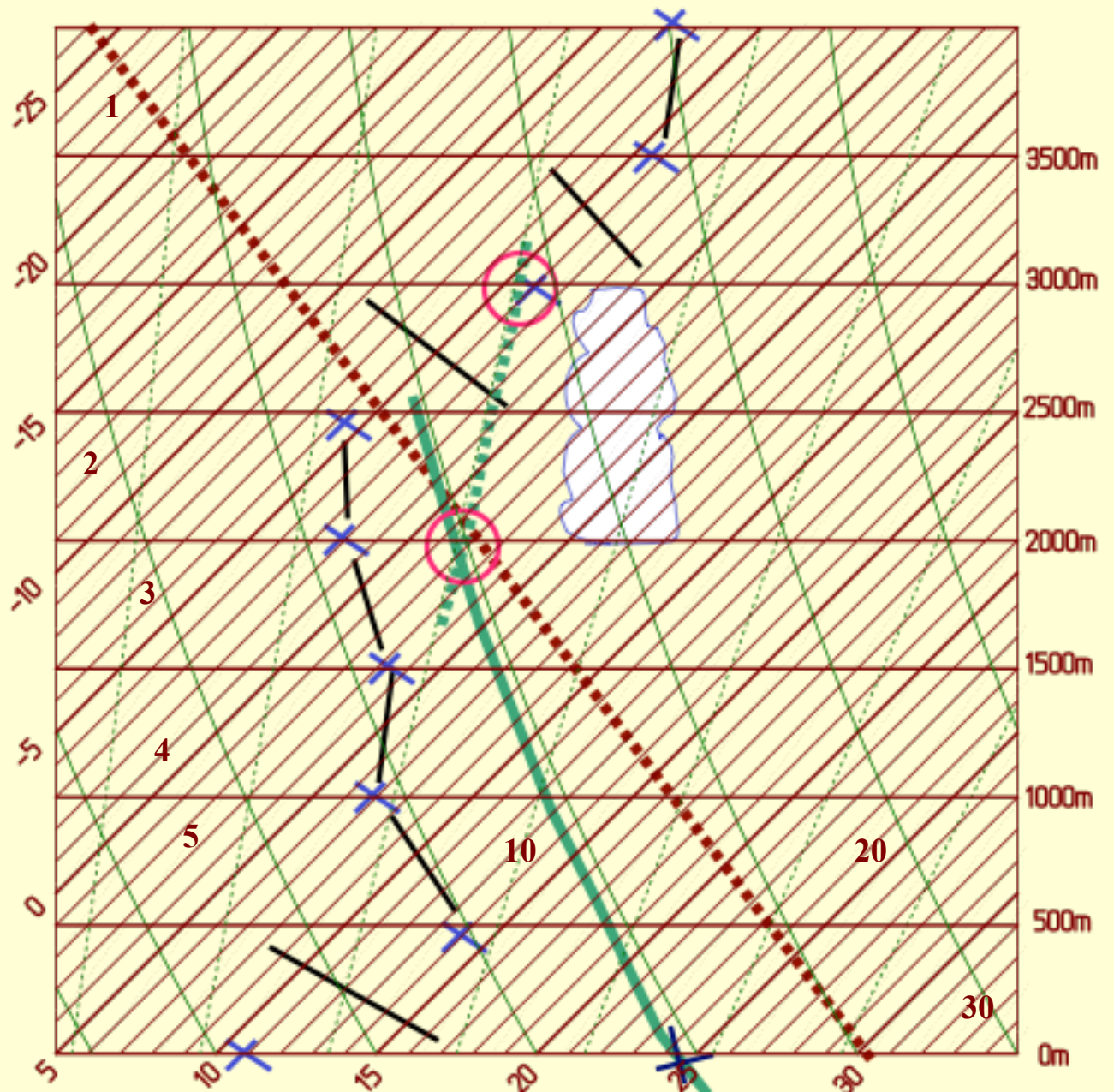
Combien faut-il de bouteilles de pastis pour traiter l'eau contenue dans ce cumulus ?

dilution : 1 volume de pastis pour 5 volumes d'eau.
À la base, $r = 6 \text{ g/kg}$,
au sommet, $r = 4 \text{ g/kg}$.

2 g/kg de vapeur sont transformés en eau liquide et en glaçons.

($t = -5^\circ$ au sommet)

Volume du Cu :
Environ 100 000 000 m³
Eau condensée :
75 000 l



Réponse :
Environ 15 000
bouteilles !



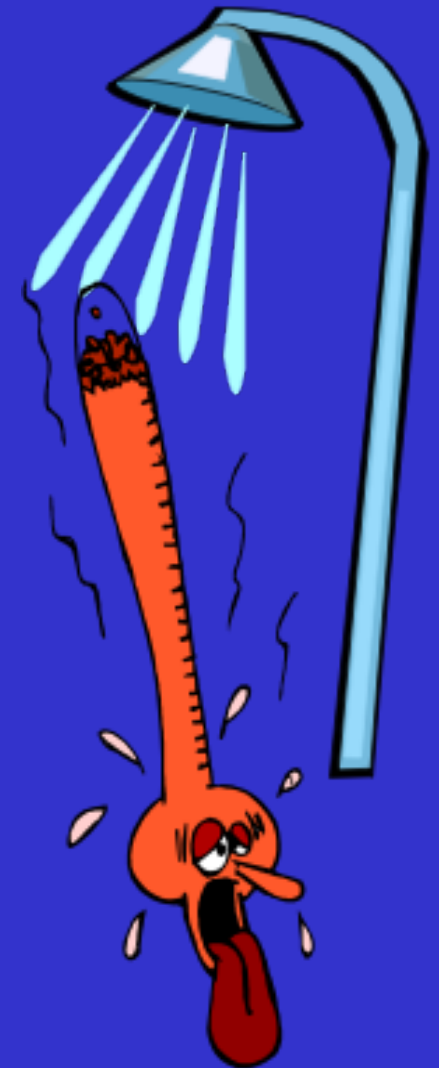
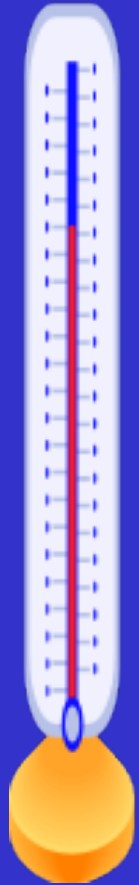
Pour mesurer l'humidité de l'air, on peut utiliser un « psychromètre ».

C'est un appareil composé d'un thermomètre « sec », dont on relève la température

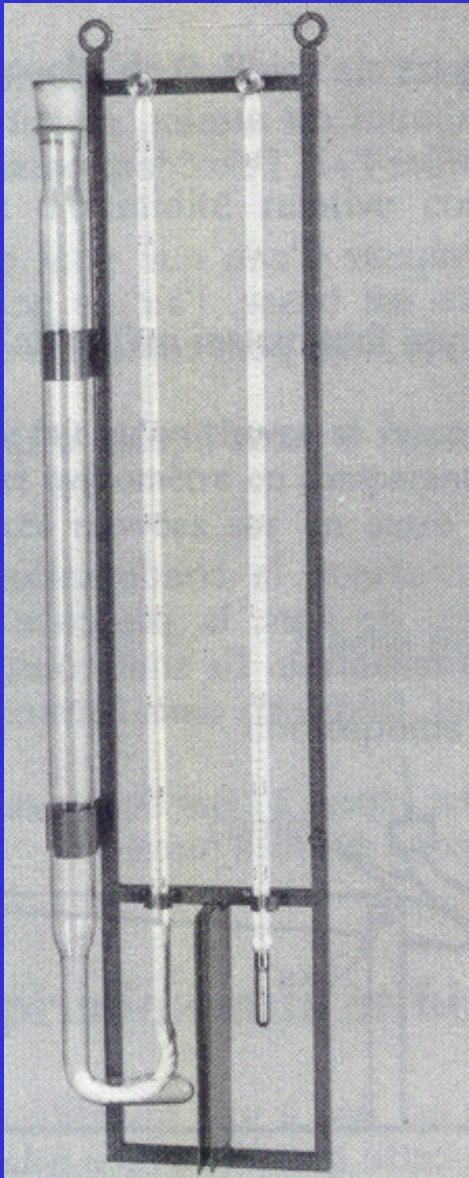
T ,

et d'un thermomètre « mouillé », dont on relève la température

T_m .



Voici un classique psychromètre
d'abri météorologique.



R. Vaillant

Le thermomètre mouillé
est un thermomètre
dont le réservoir est maintenu mouillé
à l'aide d'une mousseline alimentée en
eau.

Pour plus de détails

Si l'air ambiant est humide,
il y a peu d'évaporation...

... et peu de refroidissement
au niveau
du thermomètre mouillé.

T_m et T sont alors très
voisines.

Si, au contraire, l'air ambiant est sec,
il y a beaucoup d'évaporation...

... et beaucoup de refroidissement
au niveau
du thermomètre mouillé.

T_m et T sont alors très
différentes.

Pendant
longtemps,

Le Psychromètre

a été l'instrument de base
utilisé pour les sondages par
avion.



Maintenant, on utilise plutôt un hygromètre électronique
dont les mesures
permettent d'obtenir la température du point de rosée.

Grâce au sondage, les éléments connus pour chaque altitude (ou niveau de pression) vont être :

La température T

et le point de rosée, T_d

(donné par un hygromètre)

ou la température du thermomètre mouillé T_m

(donnée par un psychromètre)

Avec l'émagramme il sera alors possible de déterminer (sans calcul) :

Le point de condensation T_c

Détermination du point de condensation à partir de la mesure de T et Td

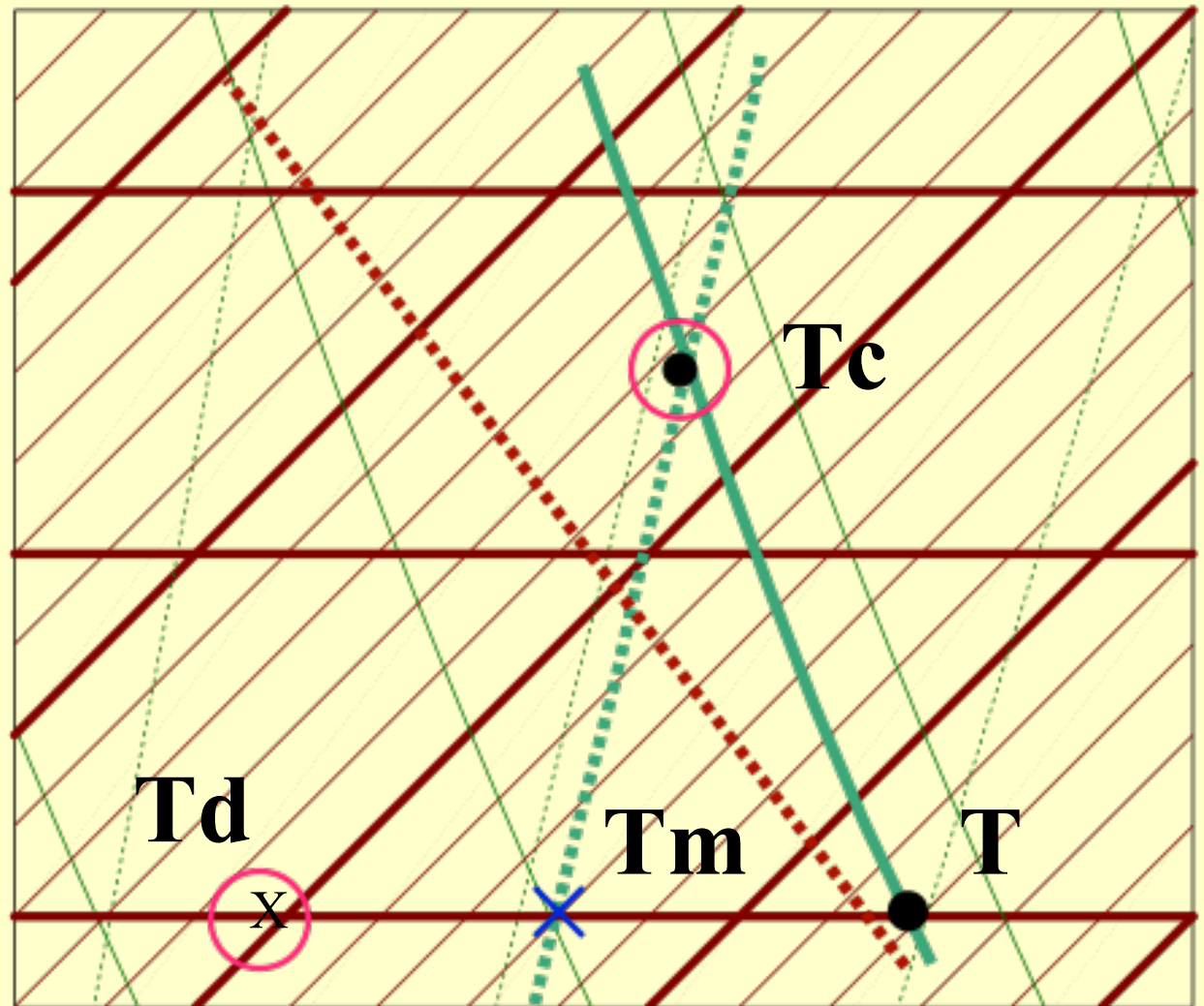
On porte T et

On trace l'adiabatique passant par T

et la ligne d'égal rapport de mélange saturant passant par Td

Tc se situe à l'intersection des deux courbes.

En revenant au niveau de départ selon la pseudoadiabatique passant par Tc, on



Détermination du rapport de mélange à partir de la mesure de T et Tm

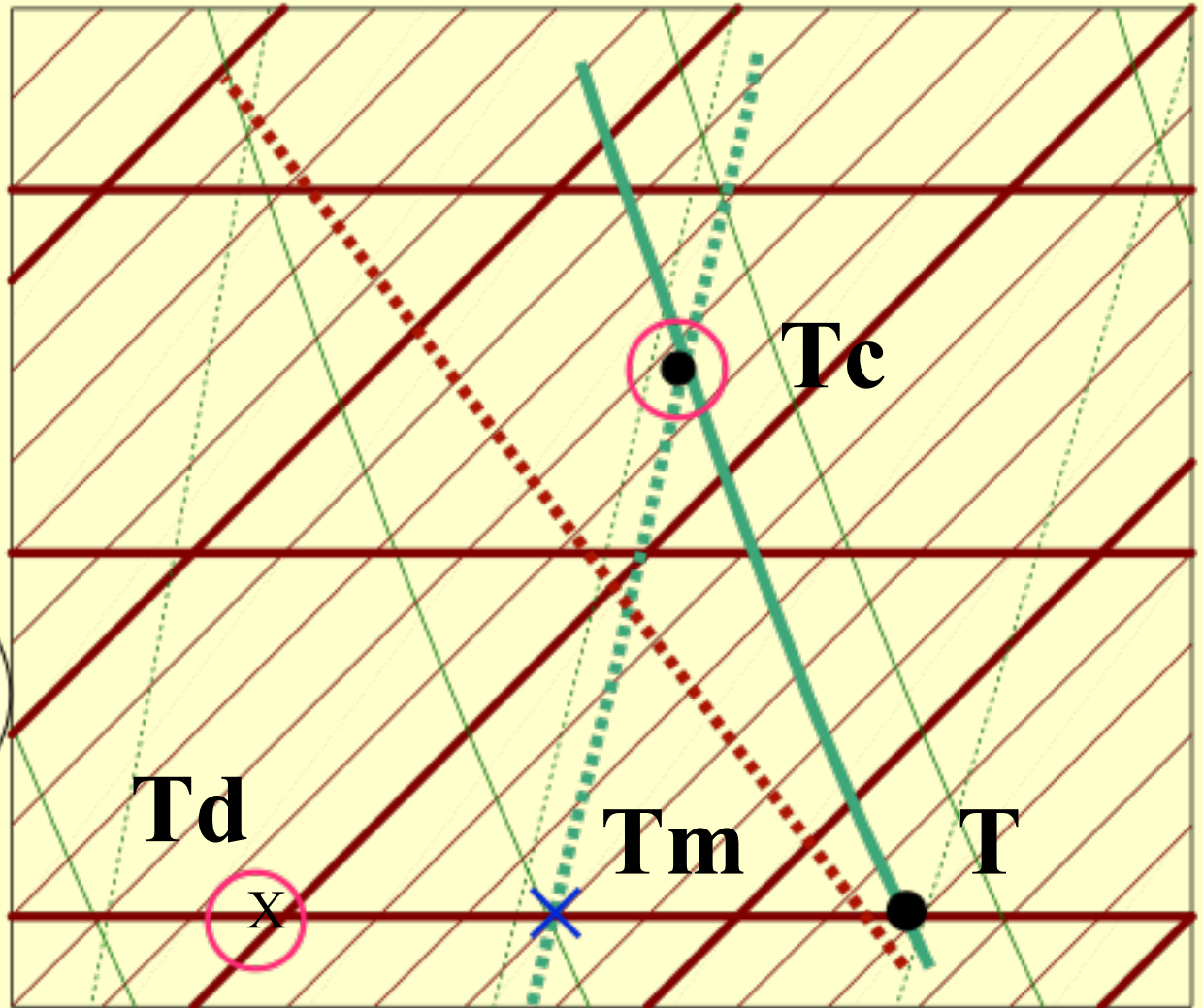
On porte T et Tm.

On trace l'adiabatique passant par T et la pseudoadiabatique passant par Tm.

Tc se situe à l'intersection des deux courbes.

"r"
(rapport de mélange) est donné par la ligne d'égal rapport de mélange saturant passant par Tc.

En suivant « rs »



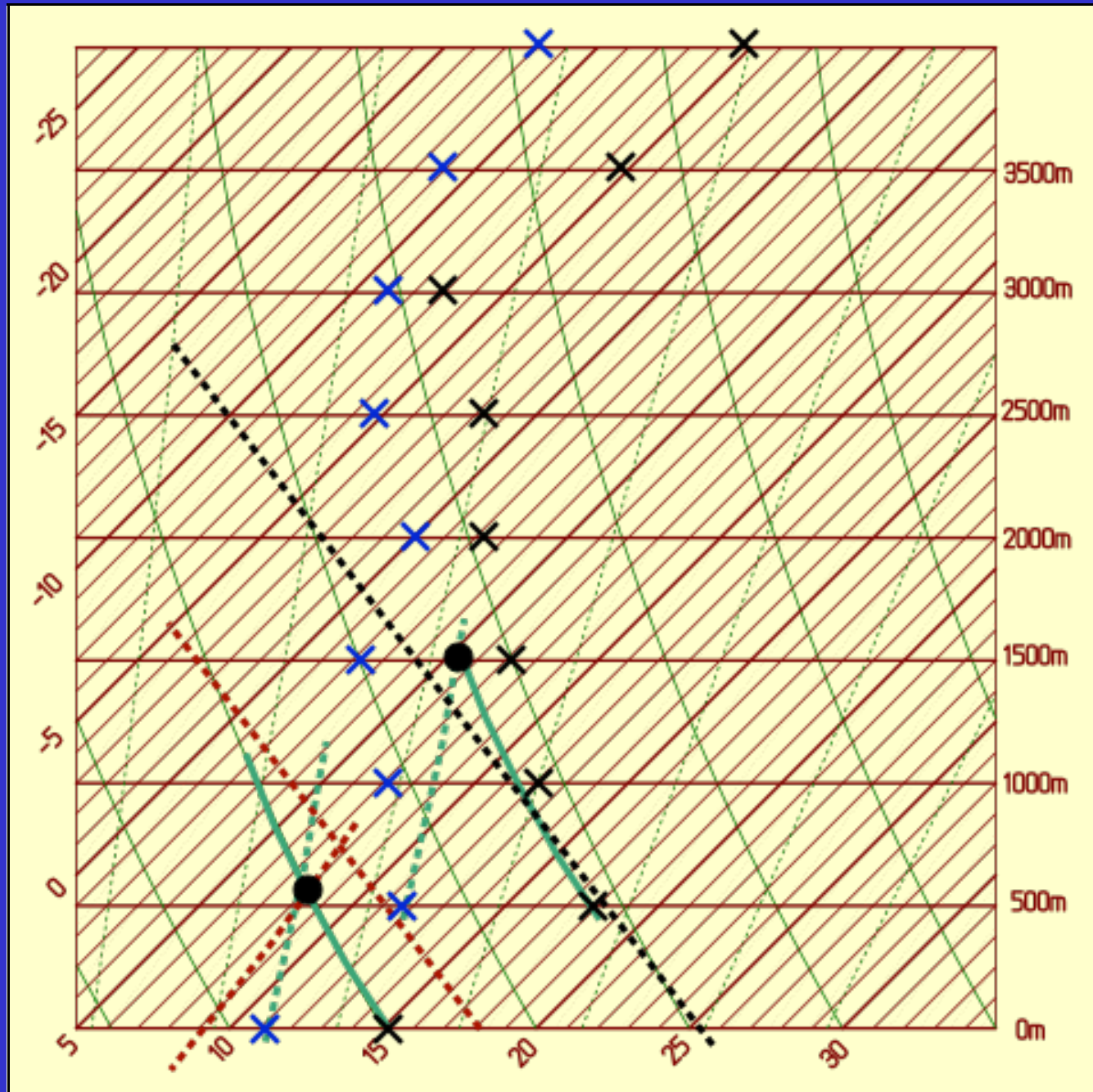
Détermination du rapport de mélange moyen à partir de T et Tm

On détermine Td pour quelques points de mesure (dans les basses couches).

Il est ainsi possible de déterminer

"r" moyen,

... plus rigoureux pour la prévision des cumulus !



Chapitre III: L 'émagramme

et ses applications pour la prévision Vol à Voile

III-1: Présentation de l 'émagramme

III-2: La Prévision des ascendances

III-3: Représentation de l 'humidité de l 'air et prévision de la condensation de la vapeur d 'eau

III-4: Mesure de l 'humidité et détermination du point de rosée et du point de condensation (base des cumulus)

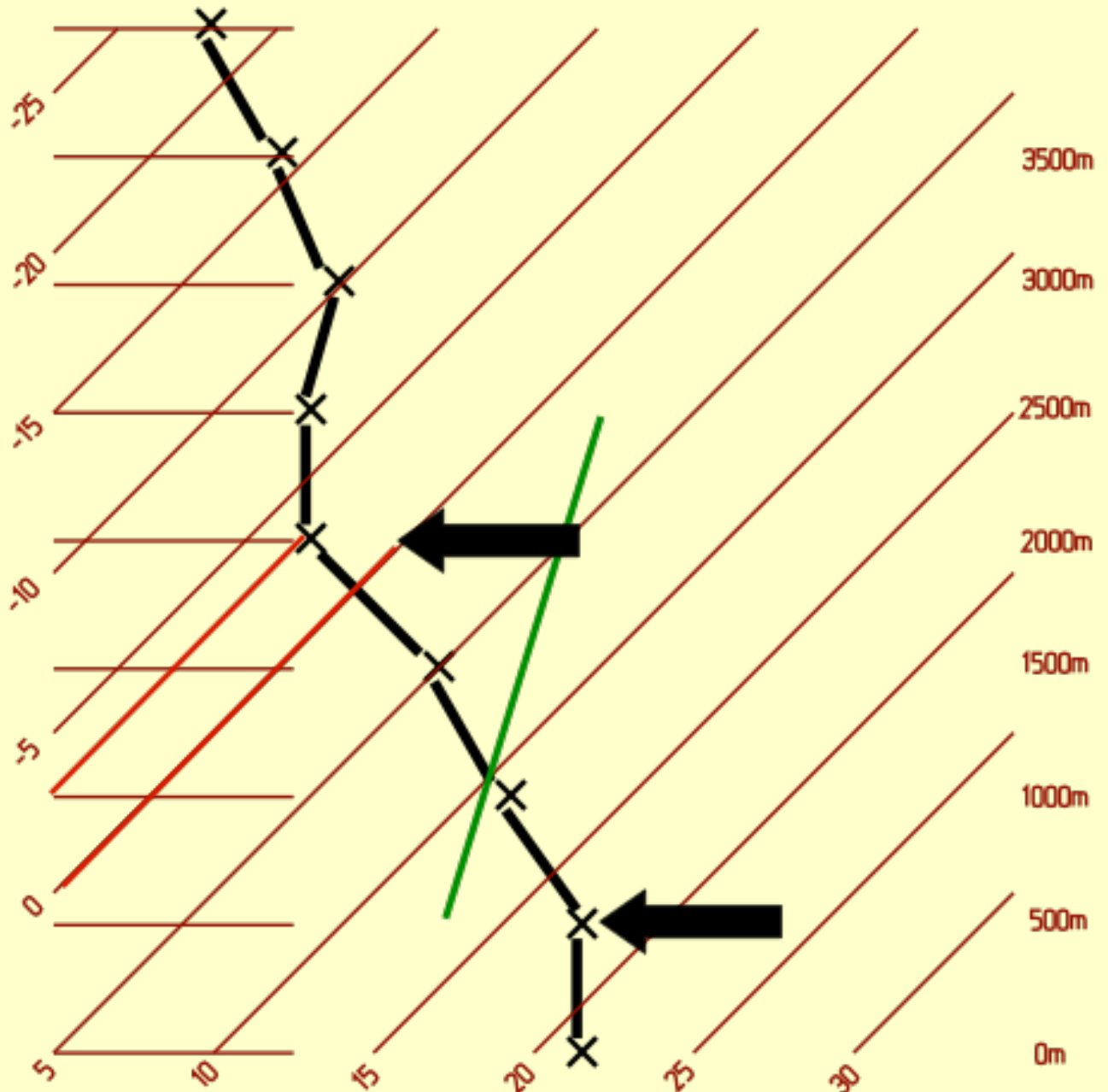
III-5: La masse d 'air en un « clin d 'œil »

Instabilité d'une particule d'air non saturé

Soit une particule d'air « sec » ($17,5^{\circ}$ à 500m), soulevée adiabatiquement jusqu'à 2000 m.

Elle aura, à ce niveau, une température de 0°C .

L'air environnant à ce niveau est à la température de -3°C .
Abandonnée à ce niveau, la particule, plus chaude, donc plus légère que l'air environnant, ne reviendra pas vers son niveau de départ, mais, au contraire, elle continuera à s'élever.



Instabilité d'une particule d'air non saturé

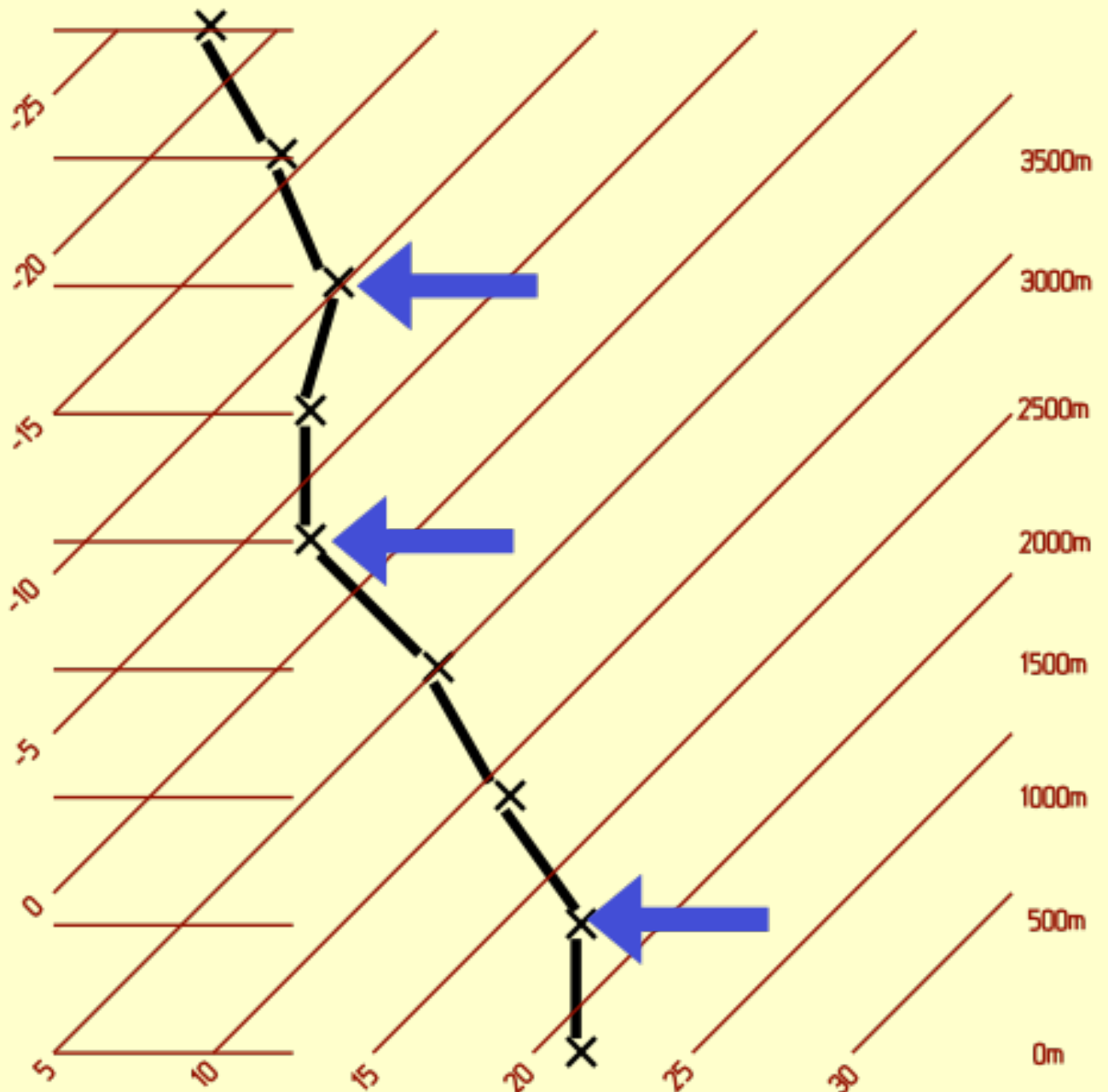
Donc, pour de l'air sec,
lorsque, dans une couche
atmosphérique donnée,
la courbe d'état
est « à gauche » de
l'adiabatique sèche issue

de la base de la couche,
**cette couche est
dite
«INSTABLE».**

Exemple:

Les tranches comprises
entre 500m et 2000m,

et celles situées
au dessus de 3000



Instabilité d'une particule d'air saturé

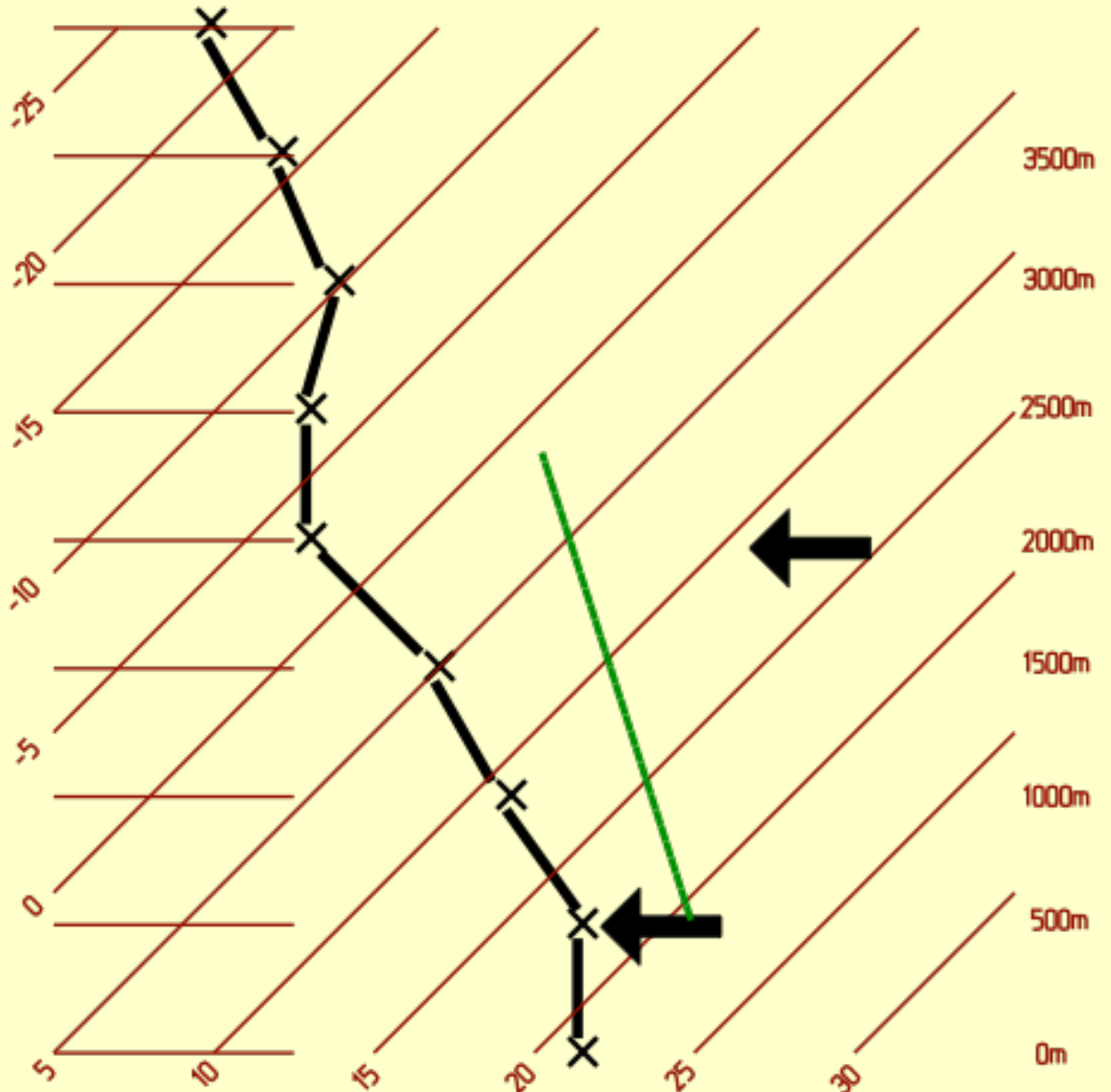
Si la particule d'air
(17,5° à 500) est
saturée

et qu'elle soulevée
pseudoadiabatiquement
jusqu'à 2000m,

elle aura, à ce niveau,
une température de
11°C.

L'air environnant à ce
niveau est à la
température de -3°C.

Abandonnée à ce niveau,
la particule, beaucoup
plus chaude, donc
beaucoup plus légère
que l'air environnant, ne
reviendra pas
vers son niveau de départ
mais au contraire,
continuera à s'élever



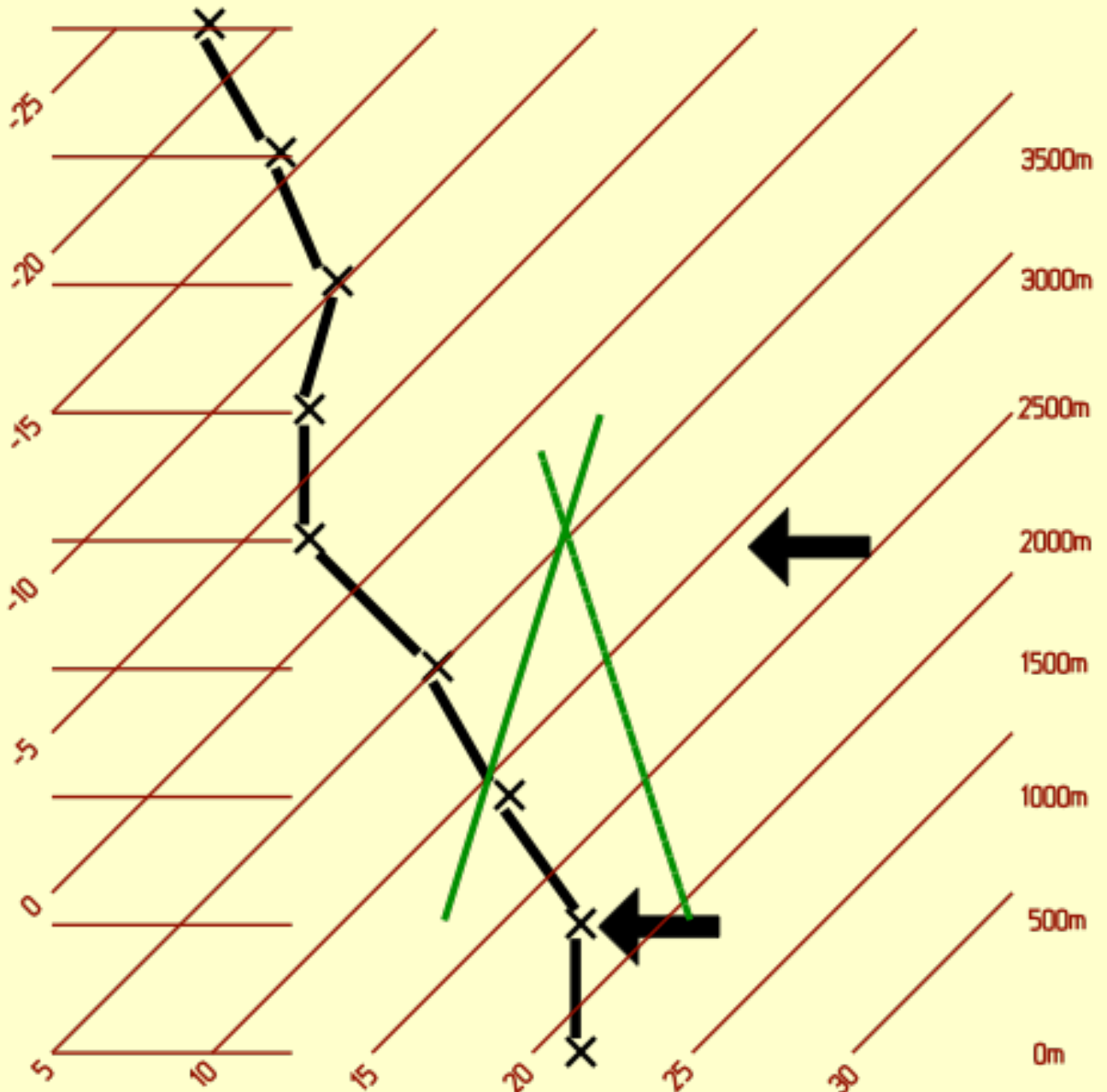
Instabilité absolue

La tranche atmosphérique de 500 à 2000 m est instable que l'air soit sec ou saturé.

Cette tranche est dite « absolument instable ».

Donc, dans une tranche atmosphérique donnée, lorsque la courbe d'état est « à gauche » des adiabatiques sèches et saturées,

il y a instabilité absolue.



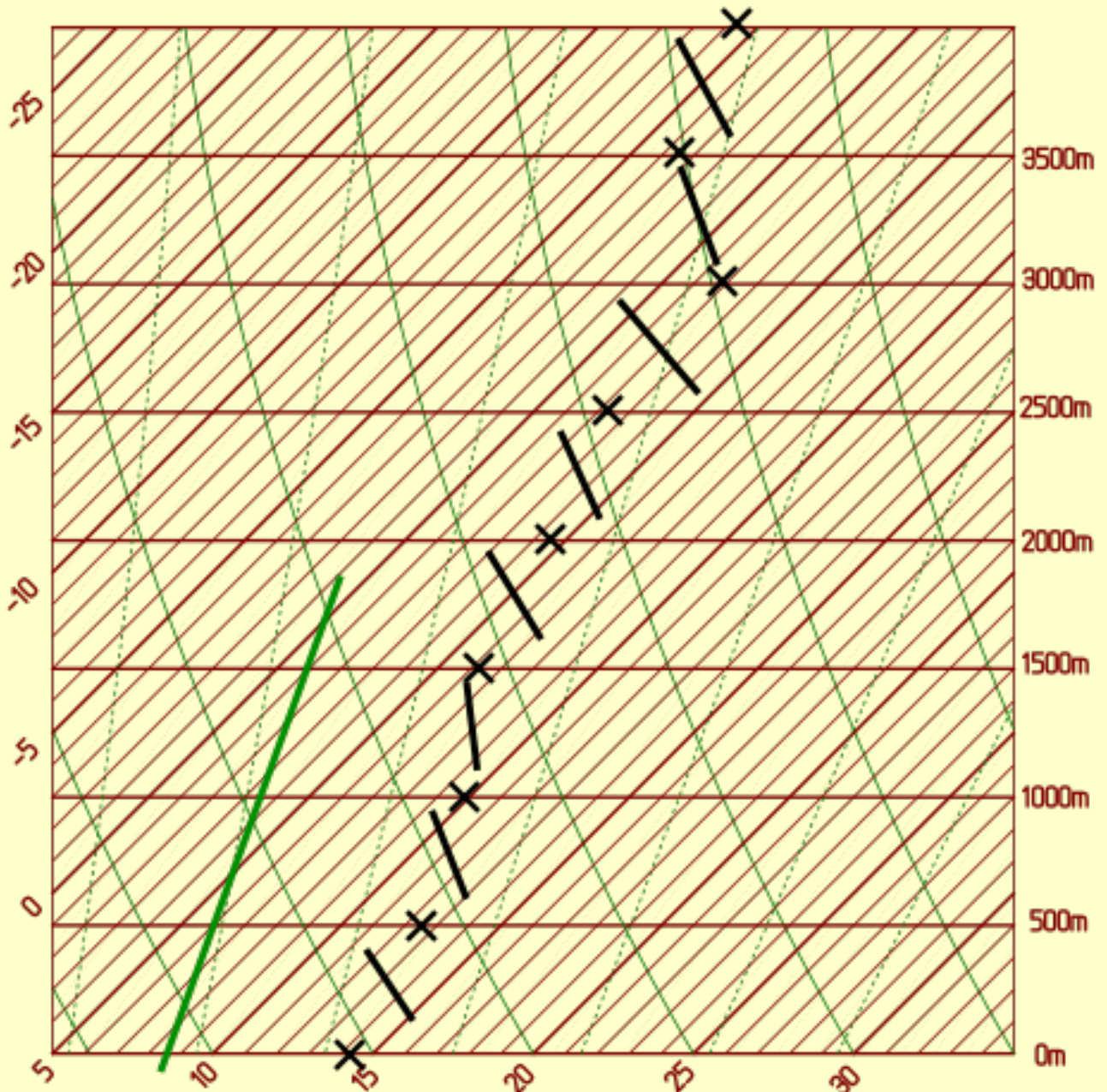
Stabilité d'une particule d'air non saturé

Une particule d'air « sec », à 14 °C, soulevée adiabatiquement à partir du sol,

est constamment plus froide, donc plus dense que l'air environnant.

Quel que soit le niveau où elle est abandonnée, elle reviendra à son niveau de départ.

L'air est dit
Stable.



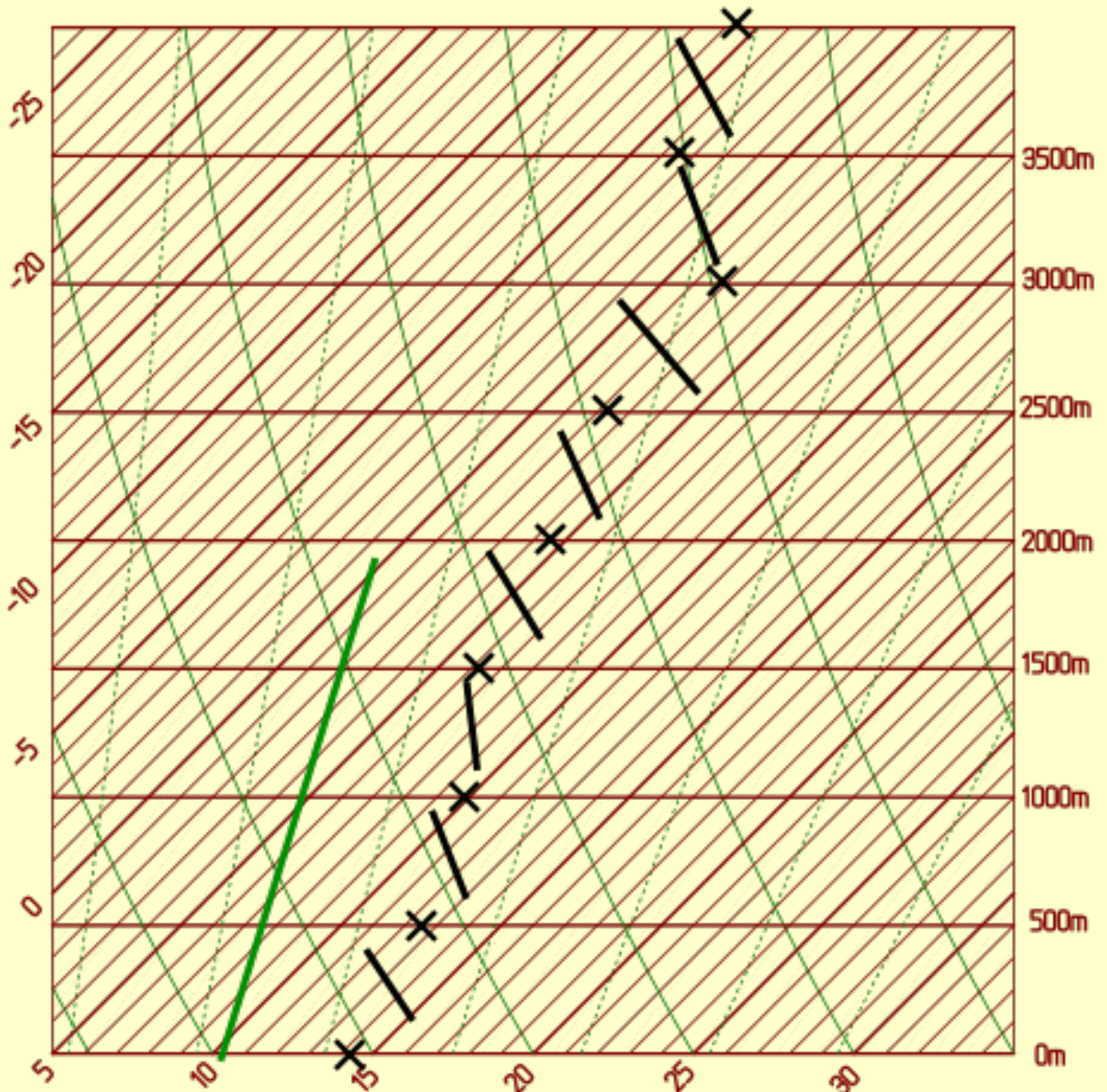
Stabilité d'une particule d'air non saturé

Pour de l'air sec,
lorsque dans une couche
atmosphérique donnée,
la courbe d'état se
situe à droite de
l'adiabatique sèche
partant de sa base,

**l'air est dit
Stable.**

Ici:
du sol 3000

m



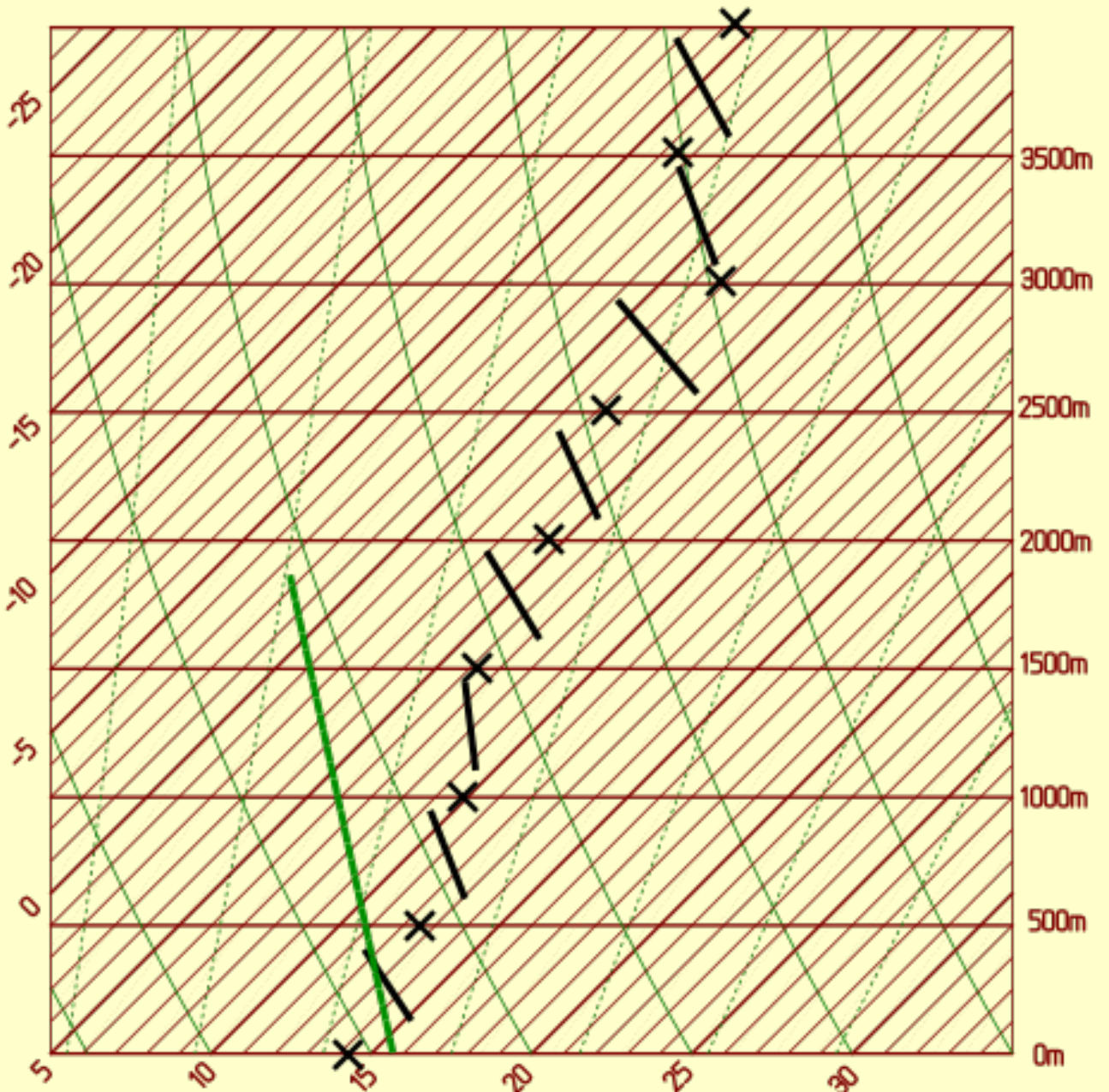
Stabilité d'une particule saturée

Dans ce cas, lorsqu'une particule d'air saturé est soulevée pseudoadiabatiquement à partir du sol,

elle est constamment plus froide, donc plus dense que l'air environnant.

Quel que soit le niveau où elle est abandonnée,

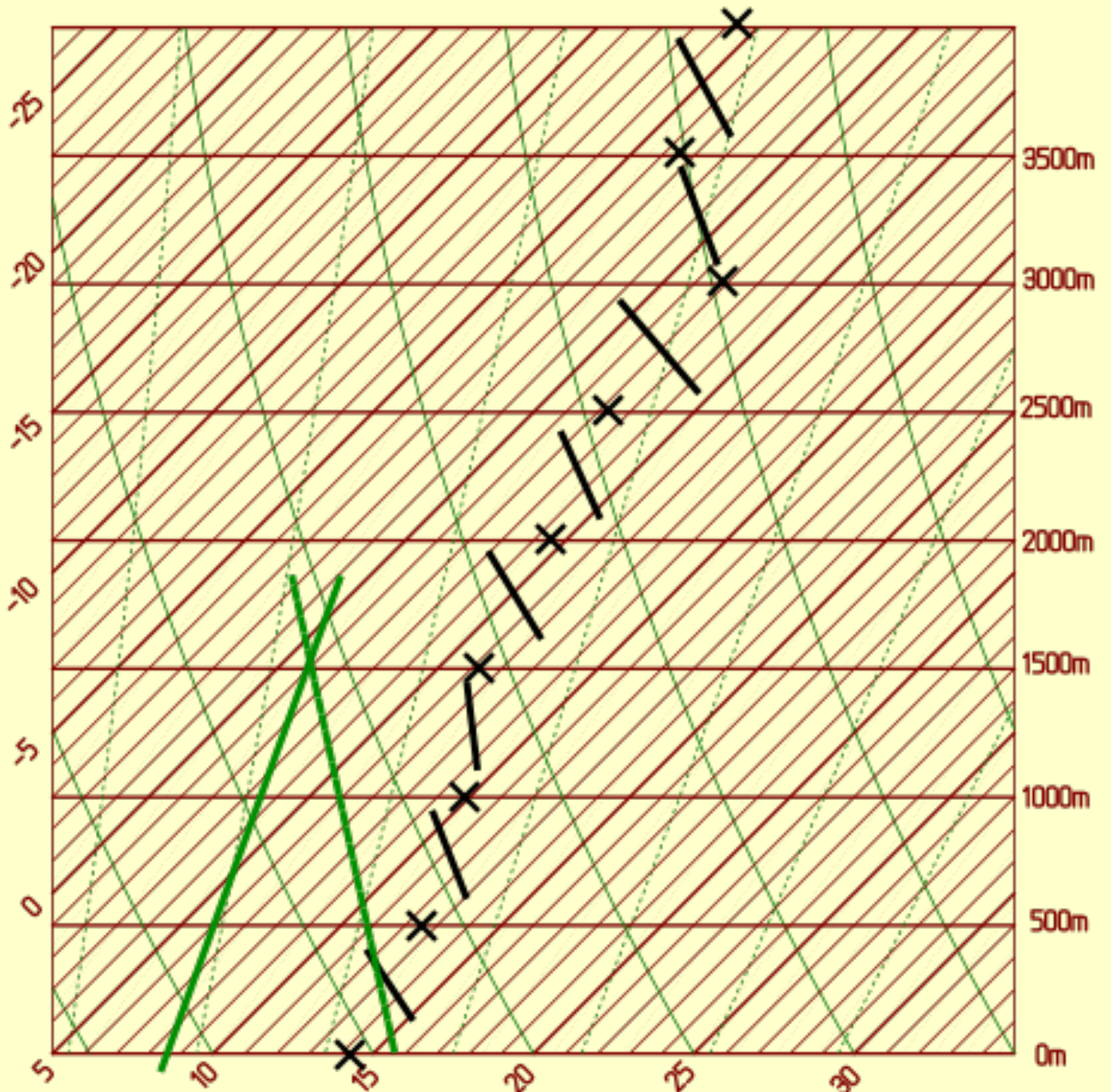
L'air est dit Stable.



Stabilité absolue

Lorsque, dans une tranche atmosphérique donnée, la courbe d'état est « à droite » des adiabatiques sèches et saturées,

il y a stabilité absolue.



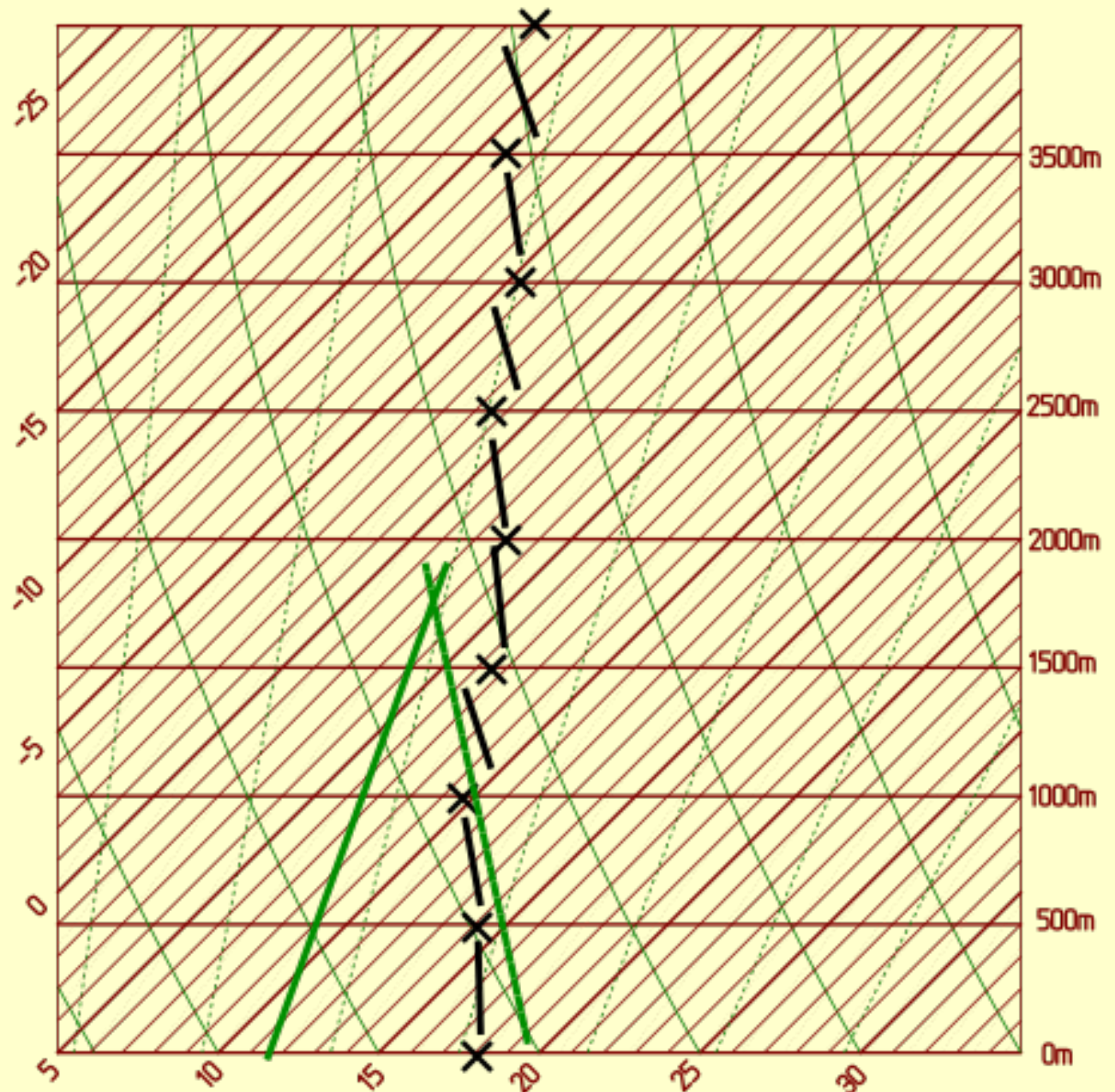
Instabilité conditionnelle

Lorsque, dans une couche donnée, la pente de la courbe d'état est comprise entre celle de l'adiabatique et celle de la

pseudo-adiabatique,

On parle d'instabilité conditionnelle.

L'instabilité n'apparaît en effet que si l'air se sature au cours de son soulèvement.



L'émagramme en un clin d'œil...

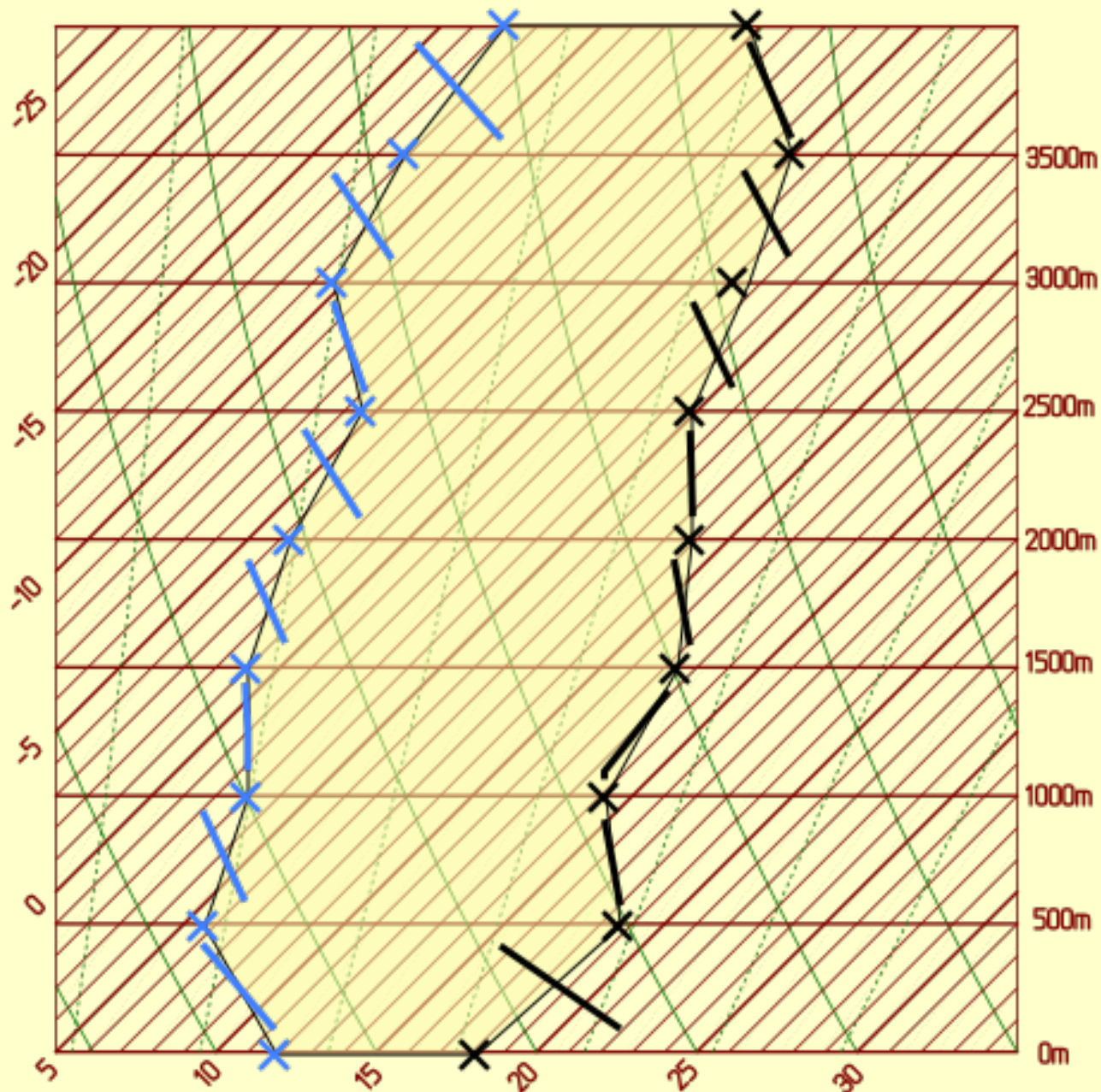
- Un sondage peut souvent être analysé rapidement, dans ses grandes lignes, lorsqu'il est typique d'une situation météo bien marquée:
 - air trop sec ou trop humide,
 - changement de masse d'air,
 - conditions anticycloniques diverses,
 - et enfin... le sondage matinal idéal !

L'émagramme en un clin d'œil

Gros écart
entre T et Tm:

AIR SEC,

**Thermiques
purs.**



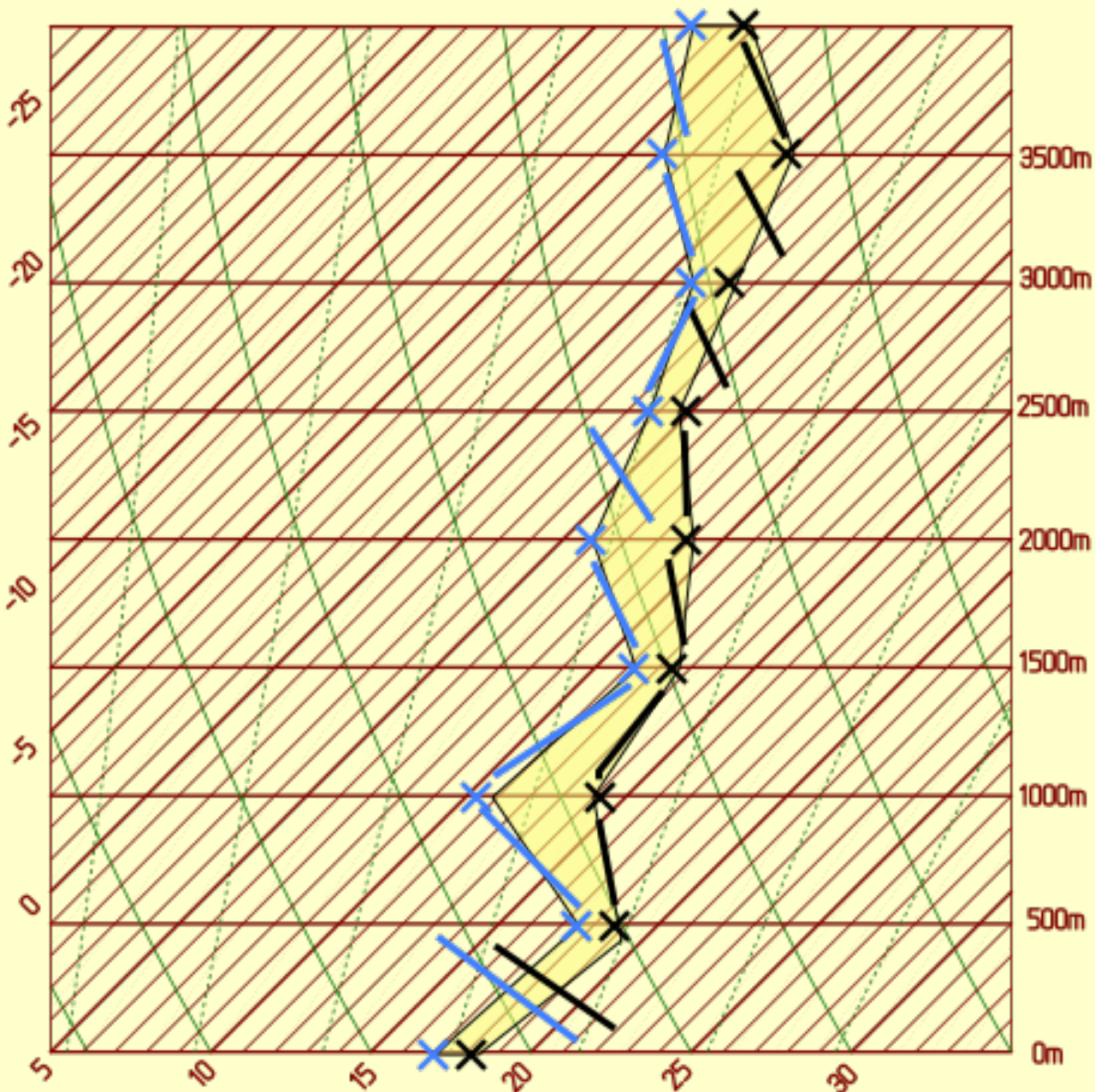
L'émagramme en un clin d'œil

Faible écart
entre T et Tm:

**AIR
HUMIDE:**

ciel chargé,

plafond bas.



L'inversion de « subsidence ».

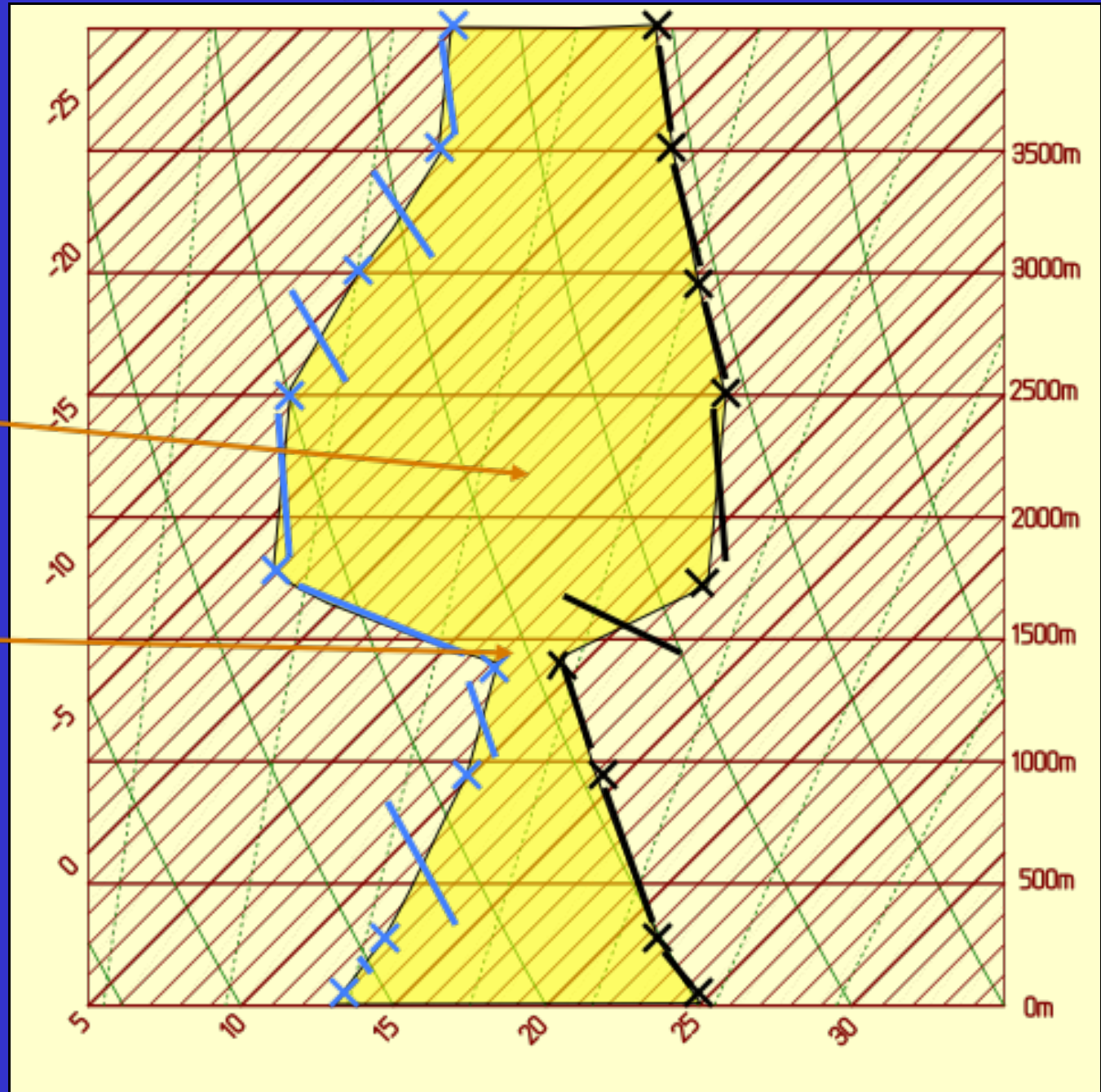
Apparaît lorsque des hautes pressions sont présentes en altitude.

Reconnaissable à la présence:

- * d'air relativement chaud et sec en altitude.

- * d'une inversion bien marquée avec assèchement simultané (T et T_m s'écartent).

**aucun risque
d'orage!**

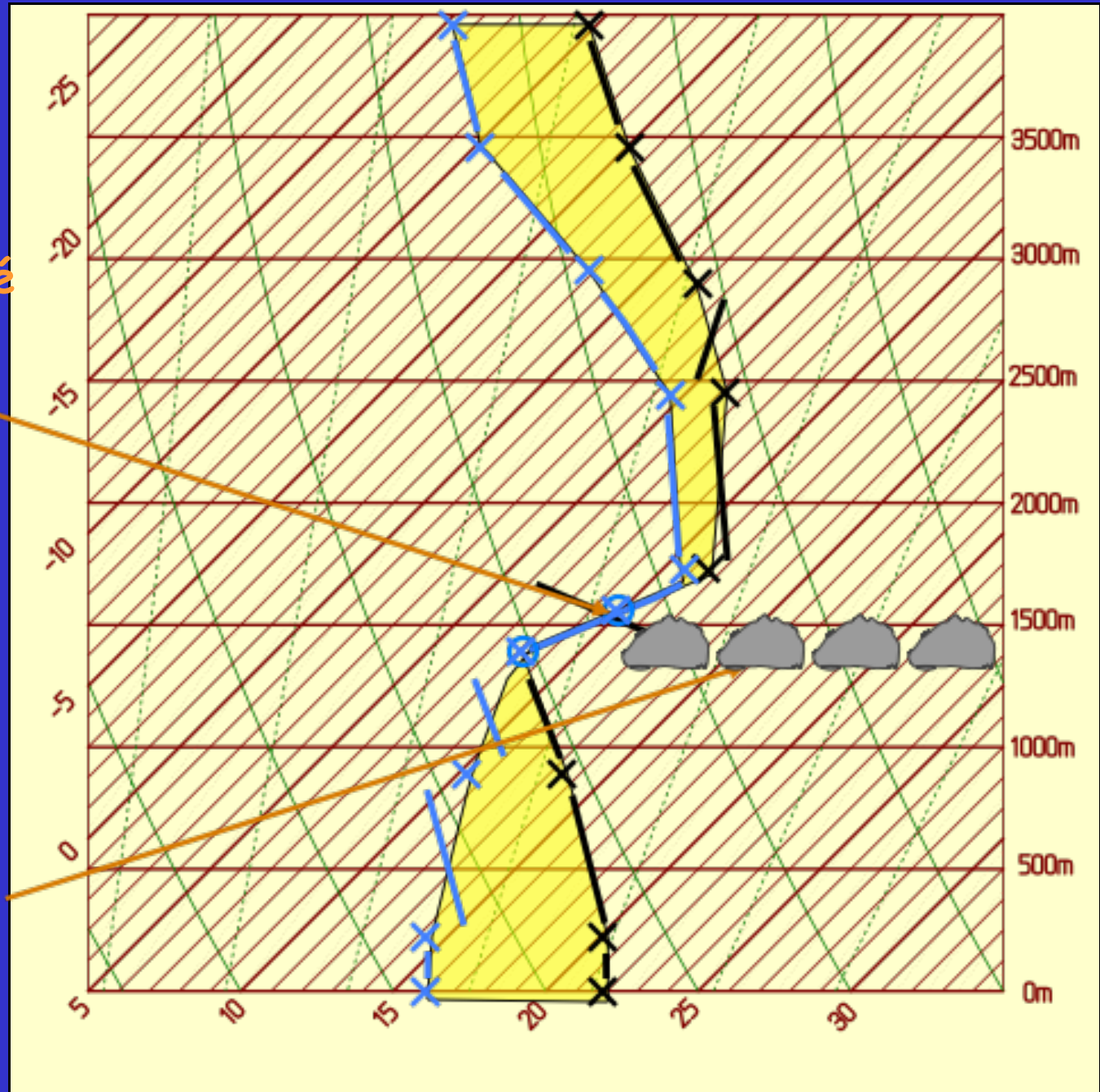


L'inversion de changement de masse d'air en altitude

Reconnaissable à l'augmentation simultanée de l'humidité dans la couche d'inversion (T et T_m proches et parallèles).

Inconvénient: elle est souvent accompagnée de nuages, pouvant gêner ou empêcher la con

Présence de nuages type Stratocumulus

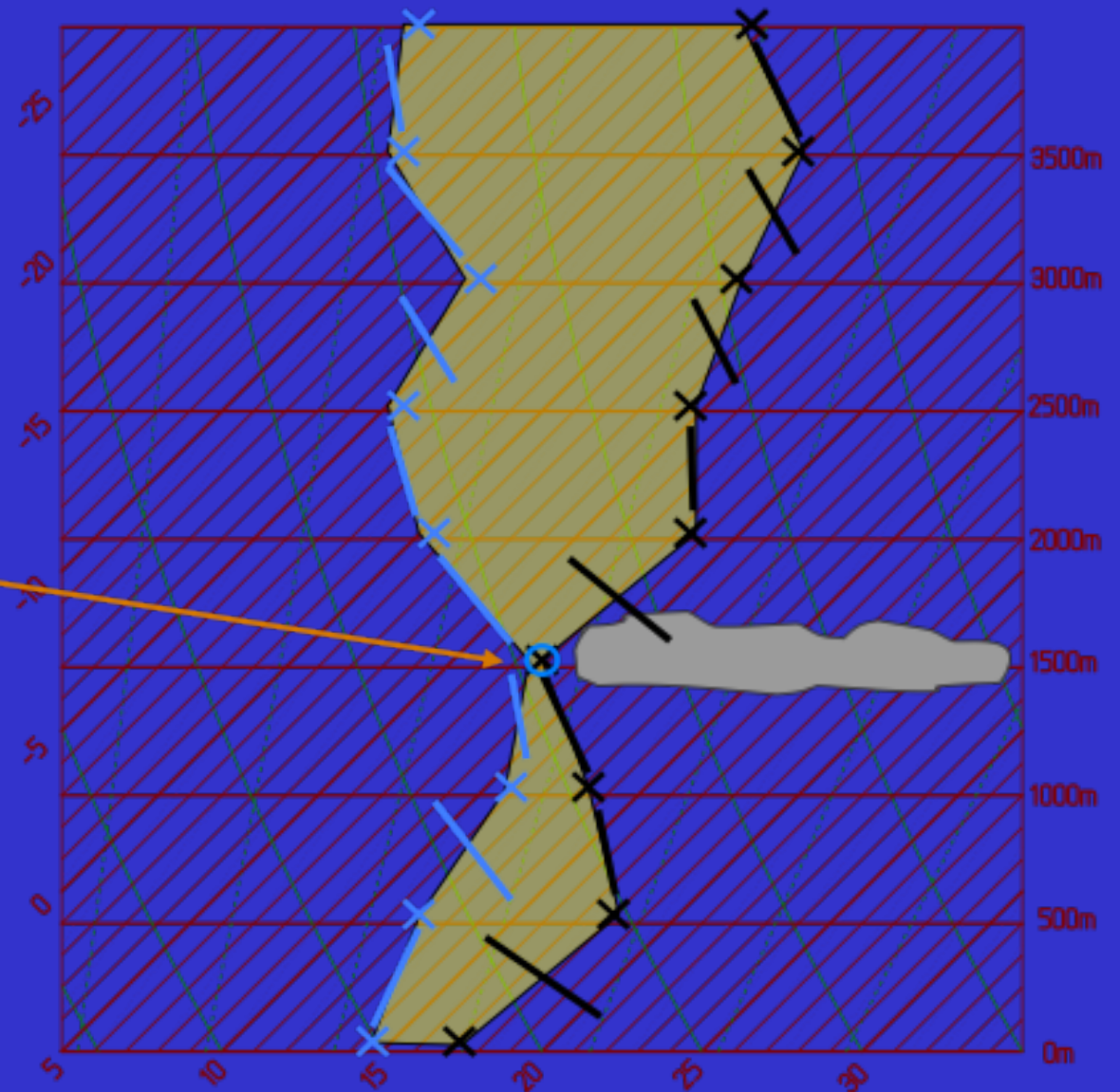


Atmosphère trop humide sous l'inversion

Si la différence entre T et T_m est trop faible dans les couches situées au-dessous de l'inversion d'altitude, il peut y avoir des...

ETALEMENTS

en cours d'après-midi.



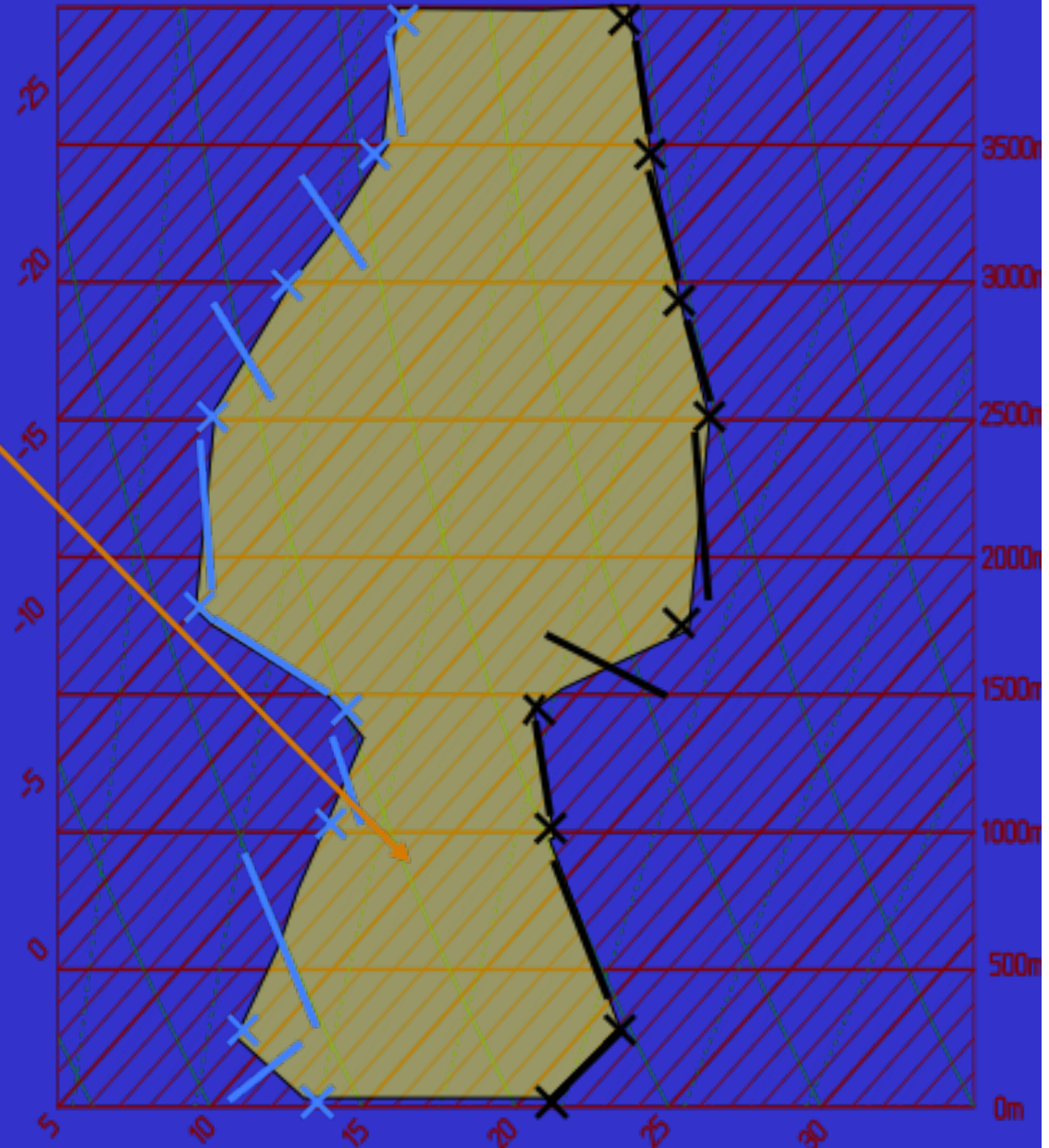
Atmosphère trop sèche sous l'inversion.

Courbes de T et Tm
très écartées l'une
de l'autre (air très
sec)

=

convection sans Cumulus

thermiques
purs...



Le sondage matinal « idéal » !

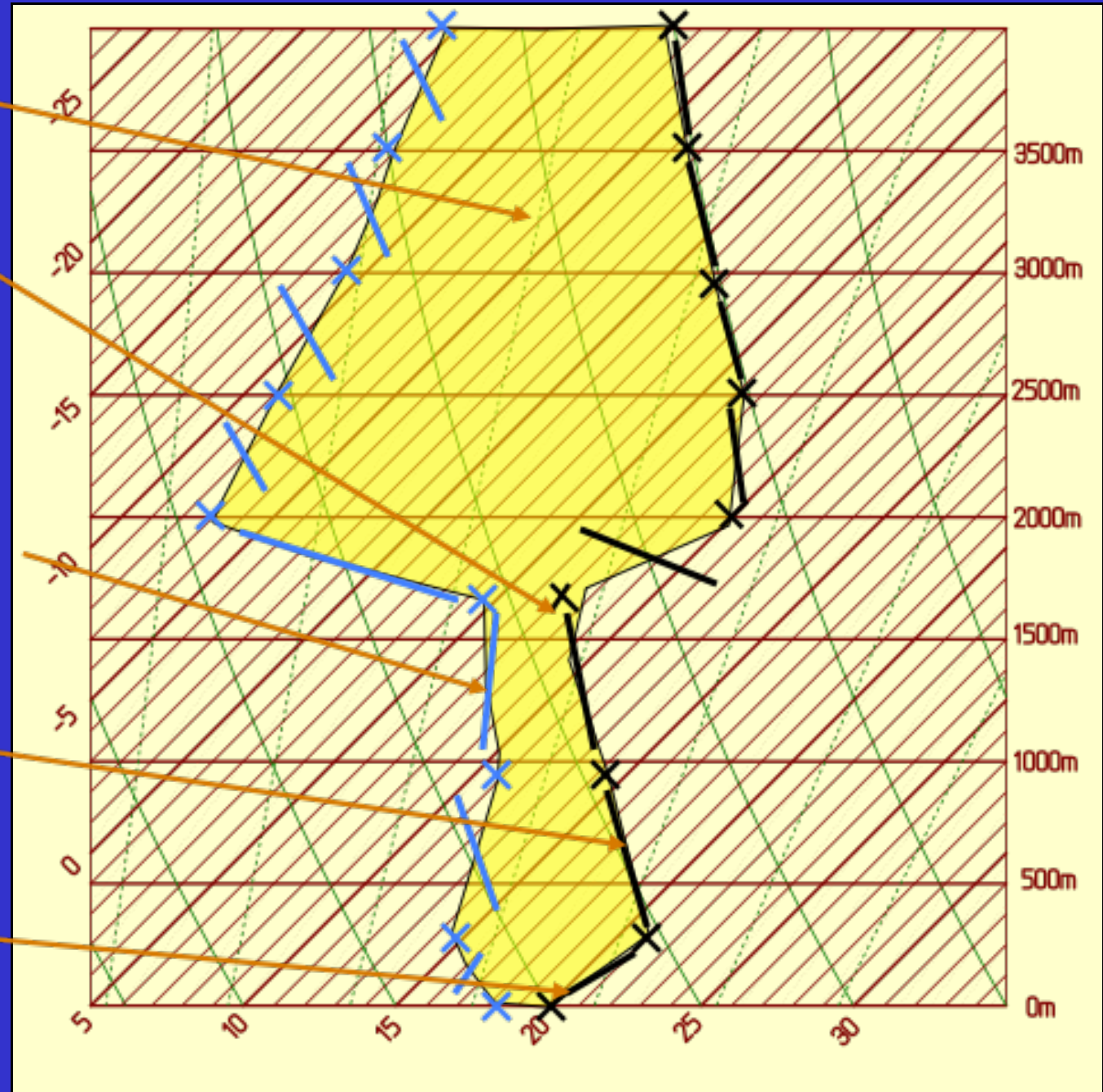
Air sec en altitude
(pas de nuage
gênant la convection).

Inversion de subsidence
bien marquée et assez
élevée.

Courbe des Tm idéale
(formation de Cumulus
possible, avec base
élevée et faible
nébulosité, sans risque
d'étalement).

Courbe d'état « lisse »,
inclinée entre
adiabatique sèche et
saturée (convection
régulière et peu
turbulente).

Inversion nocturne peu
épaisse (rapidement
résorbée par le
réchauffement diurne).



Chapitre III: L 'émagramme

et ses applications pour la prévision Vol à Voile

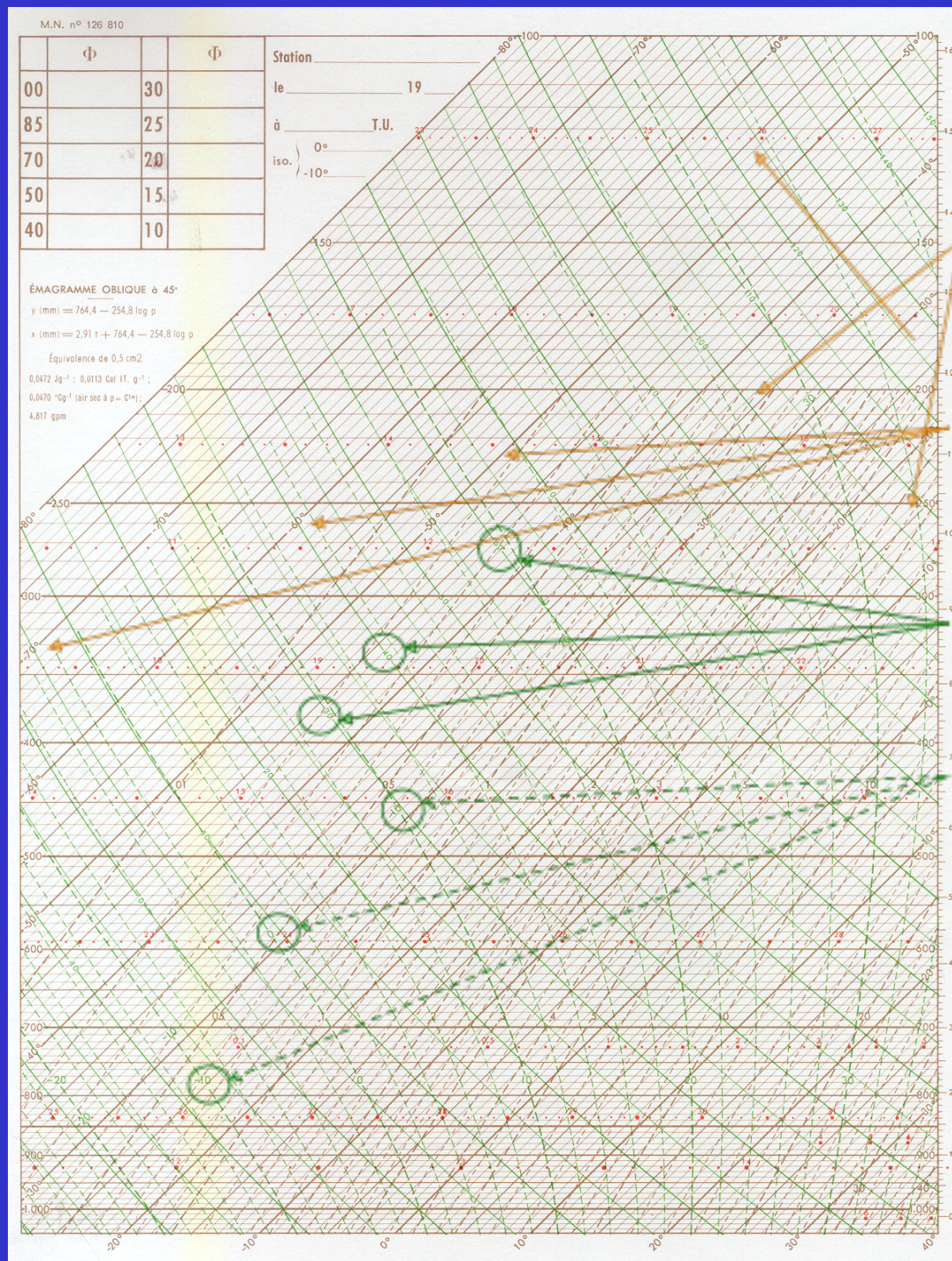
III-1: Présentation de l 'émagramme

III-2: La Prévision des ascendances

III-3: Représentation de l 'humidité de l 'air et prévision de la condensation de la vapeur d 'eau

III-4: Mesure de l 'humidité et détermination du point de rosée et du point de condensation (base des cumulus)

III-5: La masse d 'air en un « clin d 'œil »



Les variables d'état sont :

- la pression ,
- et la température.

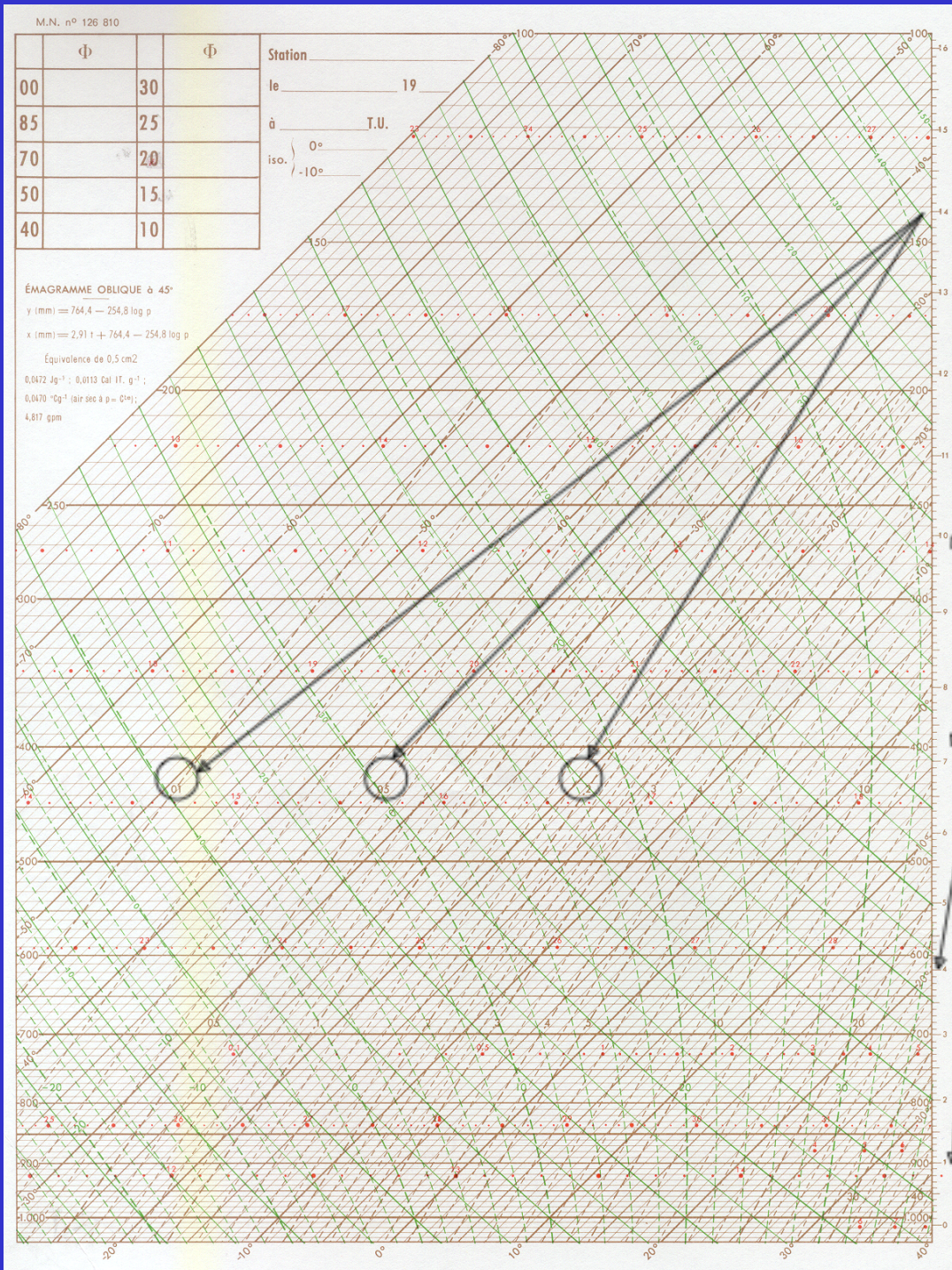
Les isobares sont représentées par des droites horizontales de couleur bistre.

Les isothermes sont représentées par des droites inclinées à 45° et de couleur bistre également.

Les adiabatiques « sèches » sont des courbes vertes en traits continus.

Les pseudoadiabatiques sont représentées en tiretés verts.

Adiabatiques et Pseudoadiabatiques sont cotées par la température du point correspondant à leur intersection avec l'isobare 1000 hPa.



Les lignes d'égal rapport de mélange saturant (iso-rs) sont représentées par des droites inclinées en tiretés bistres.

Elles sont cotées en gramme de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec.

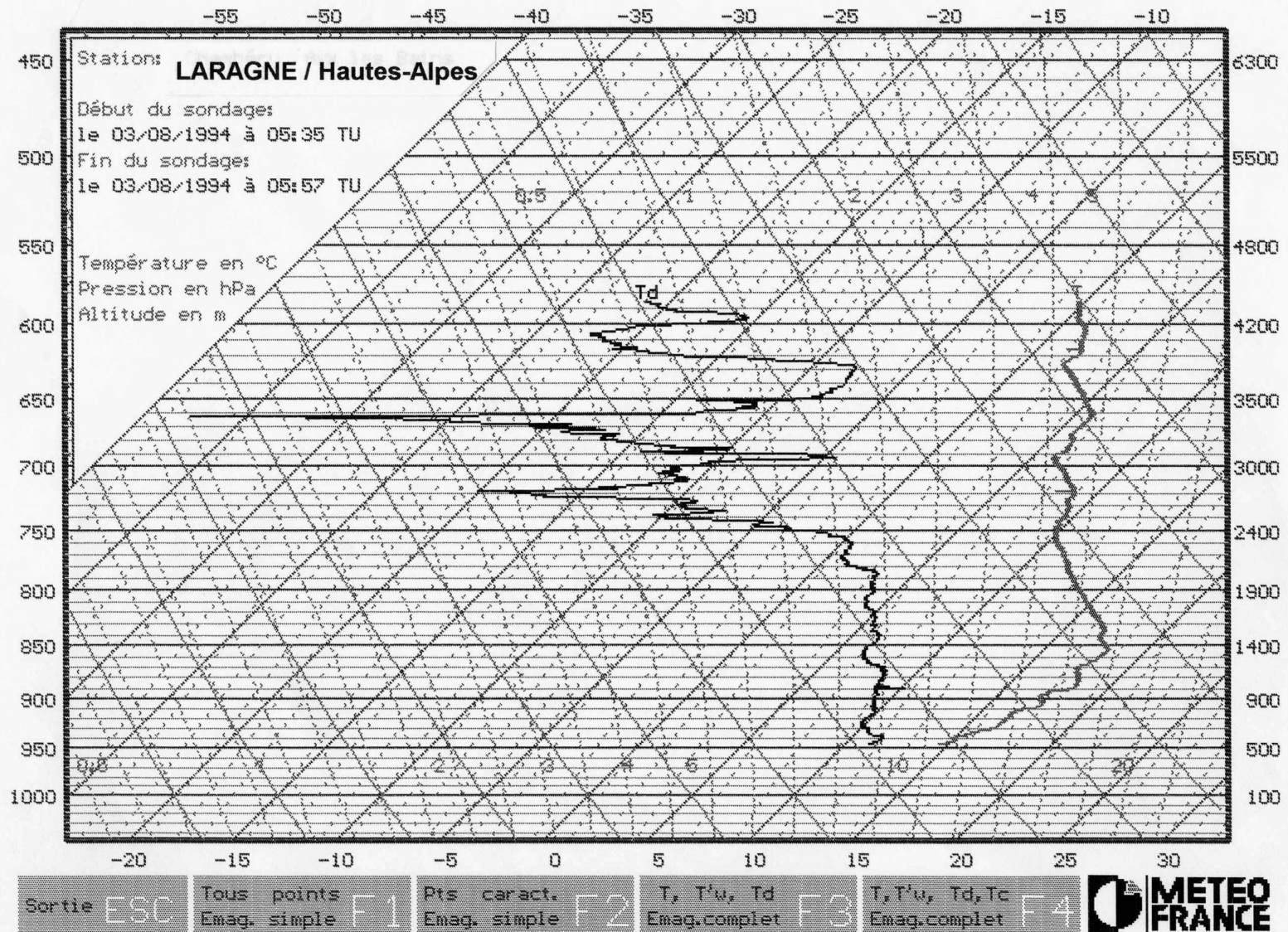
L'échelle altimétrique placée en bordure droite du diagramme, est calculée pour une atmosphère standard, exempte de vapeur d'eau.

Quelques exemples typiques de sondages basses couches

Bien noter que les courbes données sur ces sondages sont :

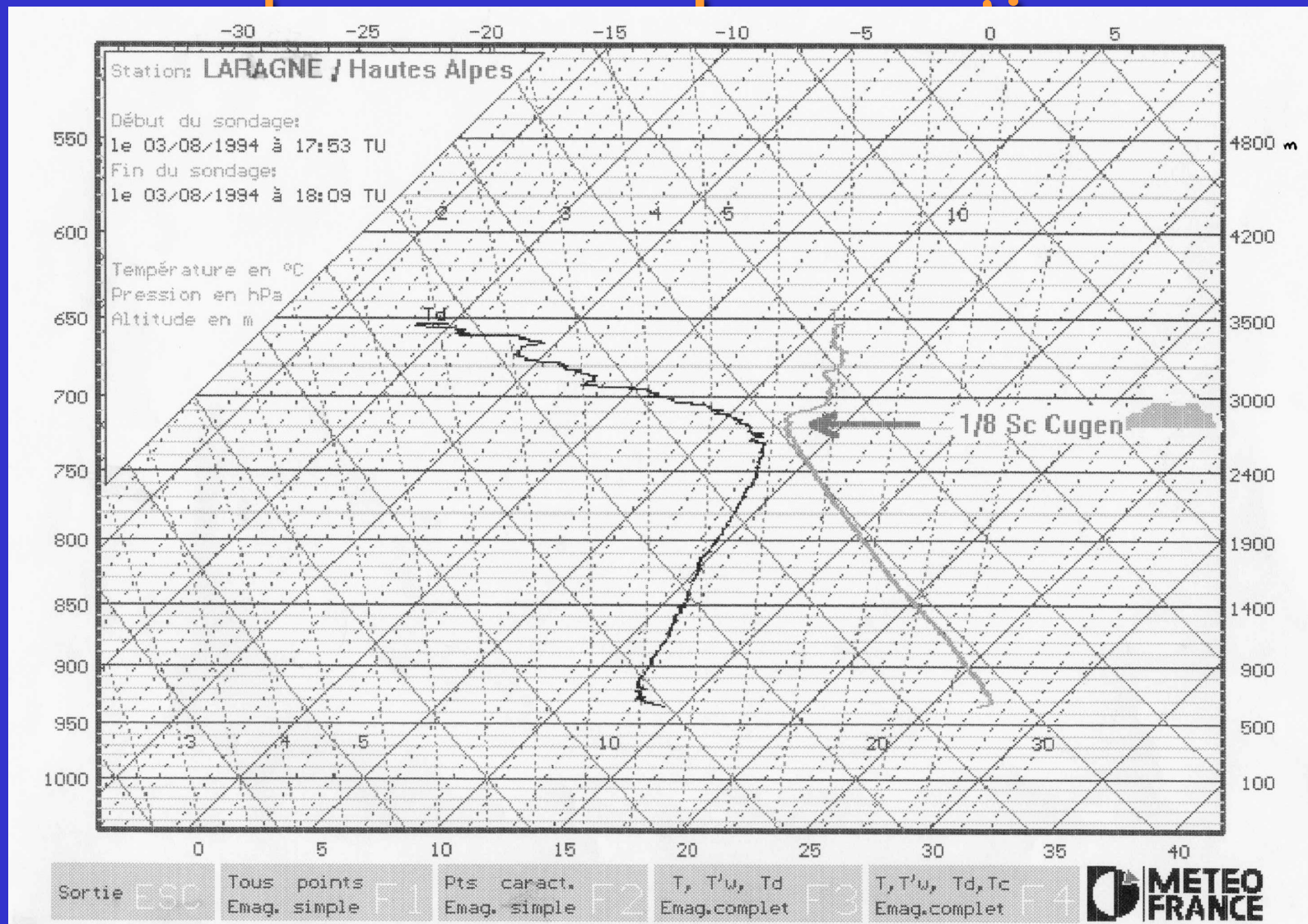
- La courbe d'état ($t^{\circ} C$ en fonction de la pression),
- La courbe des températures du point de rosée (Td en fonction de la pression).

Sondage basse couche matinal



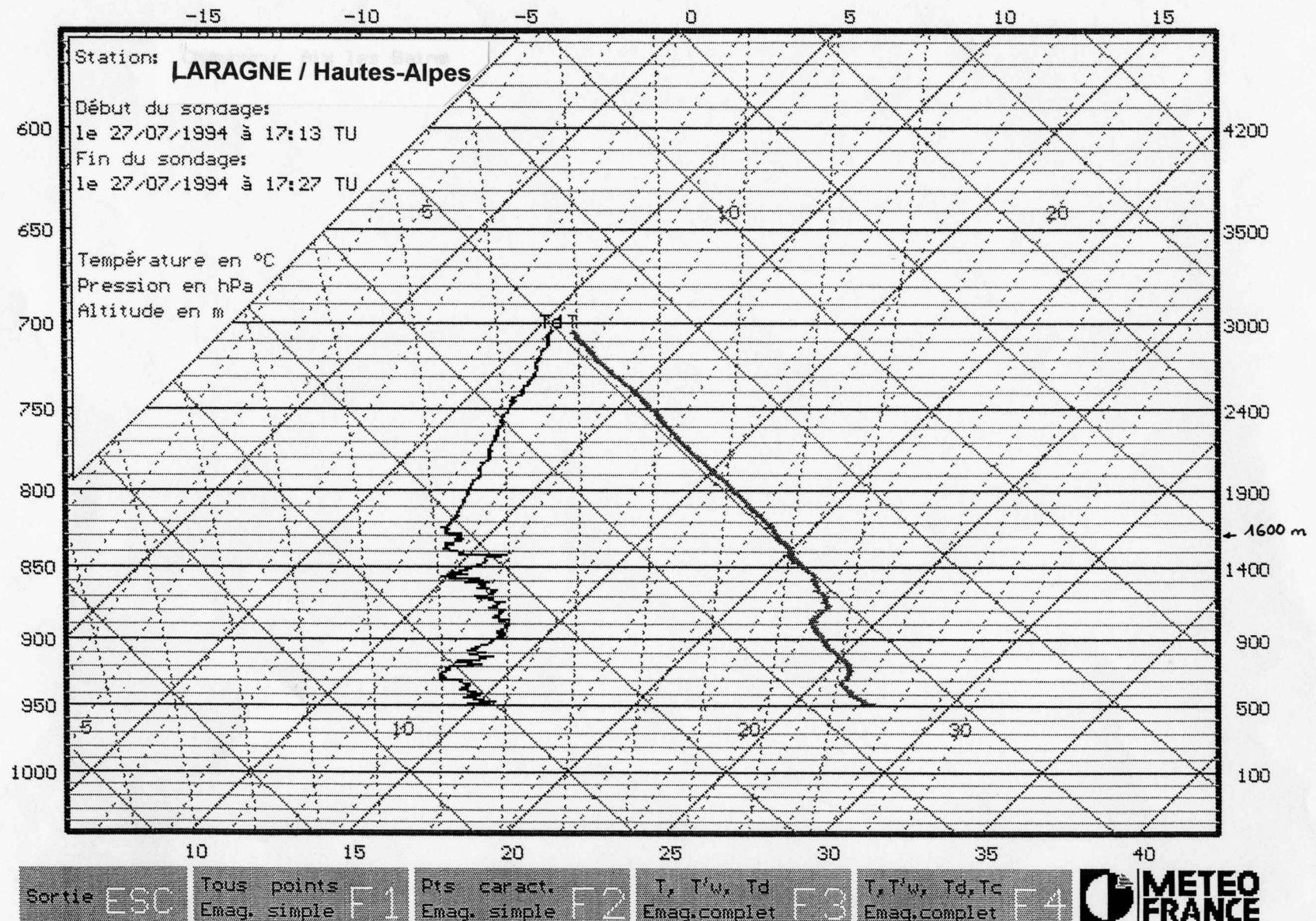
Noter l'inversion nocturne au voisinage du sol
et, en altitude, les fluctuations rapides de l'humidité d'un niveau à un autre.

Sondage à la fin de la même journée, après



Remarquer le profil quasi-adiabatique de la température et l'homogénéité du rapport de mélange dans la couche brassée par la convection (de 600 m jusqu'à la base des nuages)

Sondage, en fin d'après midi, dans une ascendance.



Dans l'ascendance (de 1600 à 3000 m).

les profils de T et Td sont lissés par brassage convectif.

FIN

du Chapitre

III

Annexe 3 :

La formule psychrométrique

On peut évaluer l'humidité de l'air en écrivant:

- que la quantité de chaleur nécessaire pour évaporer l'eau de la mousseline est empruntée à l'air qui circule autour du thermomètre mouillé:

$$\text{soit: } dQ = c_{pa} (T -$$

- et que la chaleur cédée saturé cet air à la température du thermomètre mouillé :

$$\text{soit : } dQ = Lv(T_m)[r_s(T_m) -$$

$$\text{mais } dQ \neq Lv(T_m) \frac{r [(e_s(T_m) - e)] 0,622}{p}$$



D'où la relation :

$$\frac{e_s(T_m) - e}{(T - T_m)} = A$$

Avec $a = c_{pa}/0,622$

et $L_v = 0,00066 (\text{°C})^{-1}$