

# Spécificités du milieu montagnard



François Nicot

<http://securite-en-montagne.e-monsite.com>

# Les déterminants du milieu montagnard

A grayscale photograph of a mountain valley. A river flows through the center of the valley, surrounded by steep, rocky slopes. The sky is overcast, and the overall scene is desolate and rugged.

## Éléments fondamentaux

- Conditions météo (température, brouillard, vent, précipitations, orages)
- Orientation, cartographie, boussole + altimètre
- Nature du terrain (topographie)
- Altitude
- Éléments de sécurité en progression

## L'être humain dans ce contexte

- Réponse physiologique (accommodation / acclimatation)
- Adaptations comportementales (équipement, acte moteur, apprentissage)

# Éléments météorologiques

## La température

Elle décroît avec l'altitude. On admet en moyenne :

1 ° C / 100 m (air sec)

0.5 ° C / 100 m (air saturé : pluie, brouillard, neige)

Limite pluie/neige : 300 m en dessous de l'isotherme '*zéro degré*'

**Ex.** Grenoble (alt. 200 m) :  
t° = +4 ° C  
Météo = pluie

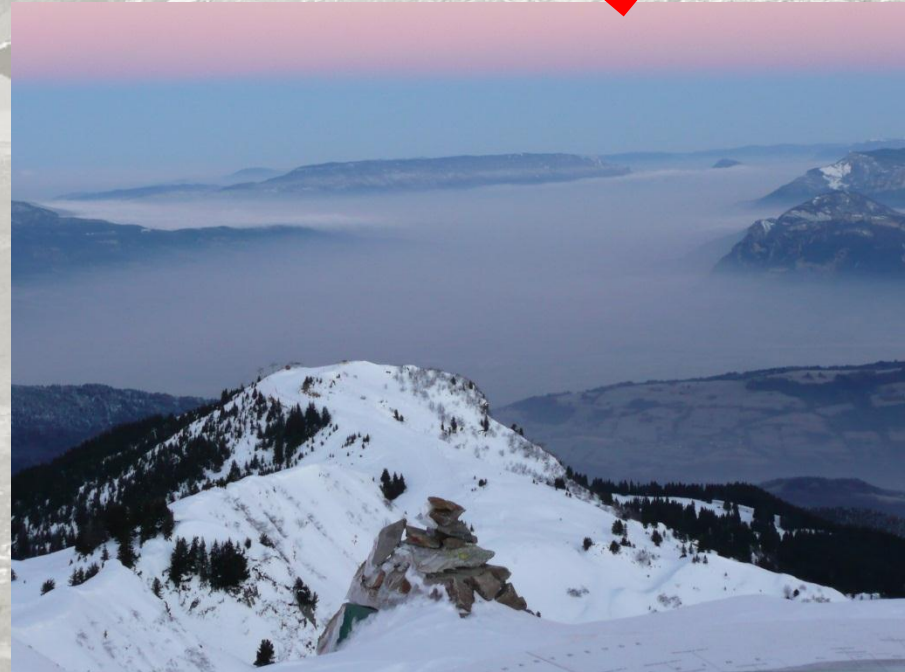
Au col du Barioz (alt. 1050 m) :  
(1050 – 200) x 0.5 ~ 4 ° C  
t° = 0 ° C  
Limite pluie/neige : vers 750 m d'altitude  
Météo attendue au col = neige

# Éléments météorologiques

## La température

La décroissance régulière de la température avec l'altitude (modèle d'atmosphère standard) n'est pas toujours vérifiée. Le profil de température peut être fortement perturbé dans les cas suivants (en particulier) :

- Inversion de température : effet de subsidence, donnant lieu à une mer de nuages (phénomène fréquent l'hiver, dans les vallées montagnardes)
- Fortes instabilités convectives (*cumulonimbus* par temps orageux)
- Cas de plusieurs masses d'air différentes superposées
- Invasion en altitude d'une masse d'air chaude (arrivée d'un *front chaud*)
- Influence de la température du sol dans la partie basse de la couche



# Éléments météorologiques



## Effets physiologiques de la température

### Températures basses :

- Refroidissement de la peau par conduction (ou convection si déplacement (vélo, ski) ou vent)
- Dissipation de la chaleur produite par l'effort
- Risque de gelures aux extrémités
- Risque d'hypothermie
- Métabolisme amplifié (mécanismes de lutte contre le froid)

### Températures élevées :

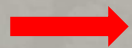
- Chaleur transmise au corps par la peau, s'ajoutant à celle produite par l'effort (*thermogenèse*)
- Sudation plus importante : pertes d'eau majorées
- Risque de déshydratation, puis d'hyperthermie

# Thermorégulation (1)

L'organisme émet de la transpiration au travers de la peau par les *glandes sudoripares*

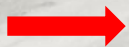
Cela représente une perte d'eau pour l'organisme

Le refroidissement s'effectue uniquement par **évaporation** de la transpiration



On dissipe 580 Kcal de chaleur par litre de transpiration évaporée

- Quand la transpiration coule sur la peau et tombe au sol, c'est de l'eau perdue pour rien. Elle ne permet pas de refroidir le corps.
- L'évaporation est d'autant plus efficace que l'air est sec.
- Difficulté des efforts physiques en ambiance chaude **ET** humide.
- On refroidit également la peau par convection directe avec l'air lorsqu'il y a un déplacement suffisamment rapide (vélo) ou du vent, sans phénomène d'évapotranspiration.
- L'effort induit une augmentation résiduelle (de 1 à 2 deg) de la t° corporelle quelle que soit la thermorégulation. Elle est nécessaire au fonctionnement musculaire et à l'ensemble des réactions du métabolisme.



Importance de l'échauffement avant un effort intense

# Thermorégulation (2)

Ex. Poids 60 Kg, course de 15 Km : MI = 900 Kcal (Métabolisme Induit)

Energie dissipée en chaleur :  $900 \times 0.75 = 675$  Kcal

Augmentation de la t° corporelle : 13.5 °C

Durée de course ~ 1 heure

Evapotranspiration : 1 litre → dissipe 580 Kcal

Bilan :  $675 - 580 = 95$  Kcal →  $95 / 0.83 / 60 = 1.9$  °C

Il faut **0.83** Kcal pour élever la t° d'**1** Kg de poids corporel de **1** degré



Augmentation de la t° corporelle de 2 °C



Les pertes en eau sont majorées en altitude par la respiration (*hyperventilation*)

Toute perte d'eau par transpiration doit être compensée par la boisson

Négliger l'hydratation expose :

- A la contre-performance (chute de la VMA)
- A l'hyperthermie



**DANGER !**

# Éléments météorologiques



## L'effet du vent

Déplacement de la masse d'air par rapport au corps

- Refroidissement par convection (sans l'intermédiaire de la sudation)
- Effet *windchill* : la température ressentie par l'organisme est inférieure à celle qu'il ressentirait sans vent, avec la même température extérieure
- Refroidissement par évapo-transpiration (rôle de la sudation)

## En résumé

- Effet favorable en ambiances chaudes
- Effets désagréables à dangereux en ambiances froides
- Résistance à l'avancement face au vent
- Effet mécanique déstabilisant



# Éléments météorologiques

## Effet Windchill

vent/temp	+ 5 °c	+ 0 °c	- 5 °c	- 10 °c	- 15 °c	- 20 °c	- 25 °c	- 30 °c	- 35 °c
5 km/h	+ 4 °c	- 1 °c	- 6 °c	- 11 °c	- 16 °c	- 21 °c	- 26 °c	- 31 °c	- 36 °c
10 km/h	+ 2 °c	- 4 °c	- 10 °c	- 14 °c	- 20 °c	- 25 °c	- 30 °c	- 36 °c	- 42 °c
15 km/h	+ 0 °c	- 8 °c	- 13 °c	- 17 °c	- 25 °c	- 30 °c	- 37 °c	- 43 °c	- 51 °c
20 km/h	- 1 °c	- 9 °c	- 16 °c	- 22 °c	- 29 °c	- 35 °c	- 41 °c	- 48 °c	- 55 °c
25 km/h	- 3 °c	- 11 °c	- 19 °c	- 25 °c	- 32 °c	- 39 °c	- 45 °c	- 53 °c	- 59 °c
30 km/h	- 5 °c	- 13 °c	- 20 °c	- 27 °c	- 34 °c	- 41 °c	- 47 °c	- 56 °c	- 62 °c
35 km/h	- 7 °c	- 14 °c	- 22 °c	- 29 °c	- 36 °c	- 43 °c	- 50 °c	- 58 °c	- 65 °c
40 km/h	- 9 °c	- 15 °c	- 23 °c	- 30 °c	- 37 °c	- 45 °c	- 52 °c	- 61 °c	- 68 °c
45 km/h	- 11 °c	- 16 °c	- 25 °c	- 32 °c	- 39 °c	- 47 °c	- 54 °c	- 63 °c	- 70 °c
50 km/h	- 12 °c	- 17 °c	- 26 °c	- 33 °c	- 40 °c	- 48 °c	- 55 °c	- 64 °c	- 72 °c
55 km/h	- 12 °c	- 18 °c	- 26 °c	- 34 °c	- 40 °c	- 49 °c	- 56 °c	- 65 °c	- 74 °c
60 km/h	- 12 °c	- 19 °c	- 27 °c	- 36 °c	- 41 °c	- 50 °c	- 57 °c	- 66 °c	- 74 °c
65 km/h	- 12 °c	- 20 °c	- 28 °c	- 36 °c	- 43 °c	- 51 °c	- 58 °c	- 68 °c	- 75 °c

La sensation de froid par une température de 0° C et avec un vent de 20 km/h est la même que par une température négative de - 9° C sans vent

# Éléments météorologiques

## Effet de l'humidité

Précipitations (pluie, neige)  
Brouillard, bruines

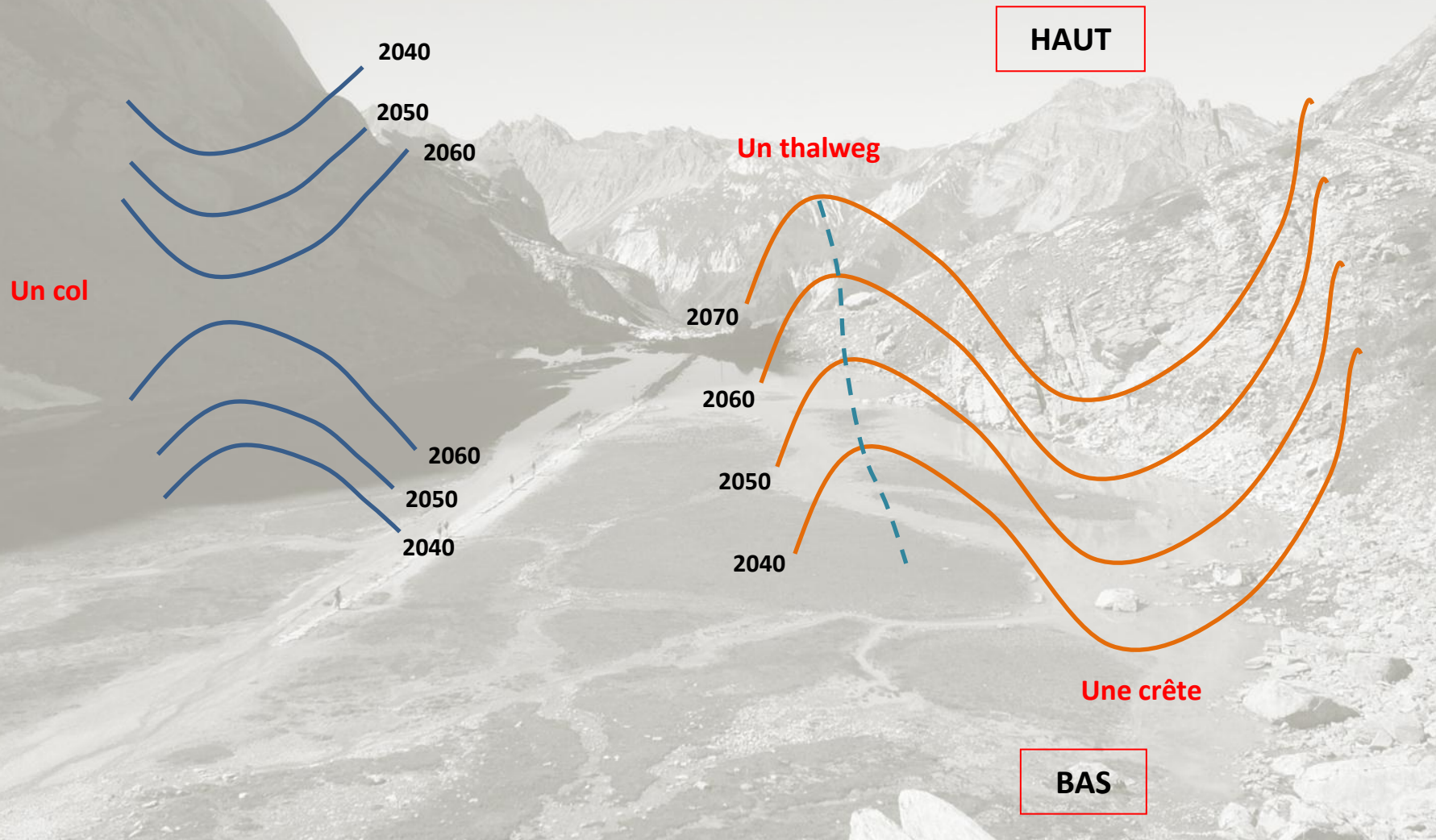
- Favorise le refroidissement  
(le corps échange plus facilement de la chaleur avec l'eau qu'avec l'air)
- Effet très favorable par températures élevées
- Attention toutefois à l'augmentation de l'humidité de l'air, compromettant l'évapotranspiration
- Des habits mouillés représentent un danger potentiel  
(source de refroidissement lors de l'arrêt de l'activité)

## Conséquences :

- Importance du choix des vêtements
- Première couche respirante
- Dernière couche (si précipitations ou vent) étanche et *windstopper*)
- Affaires de rechange (première couche)

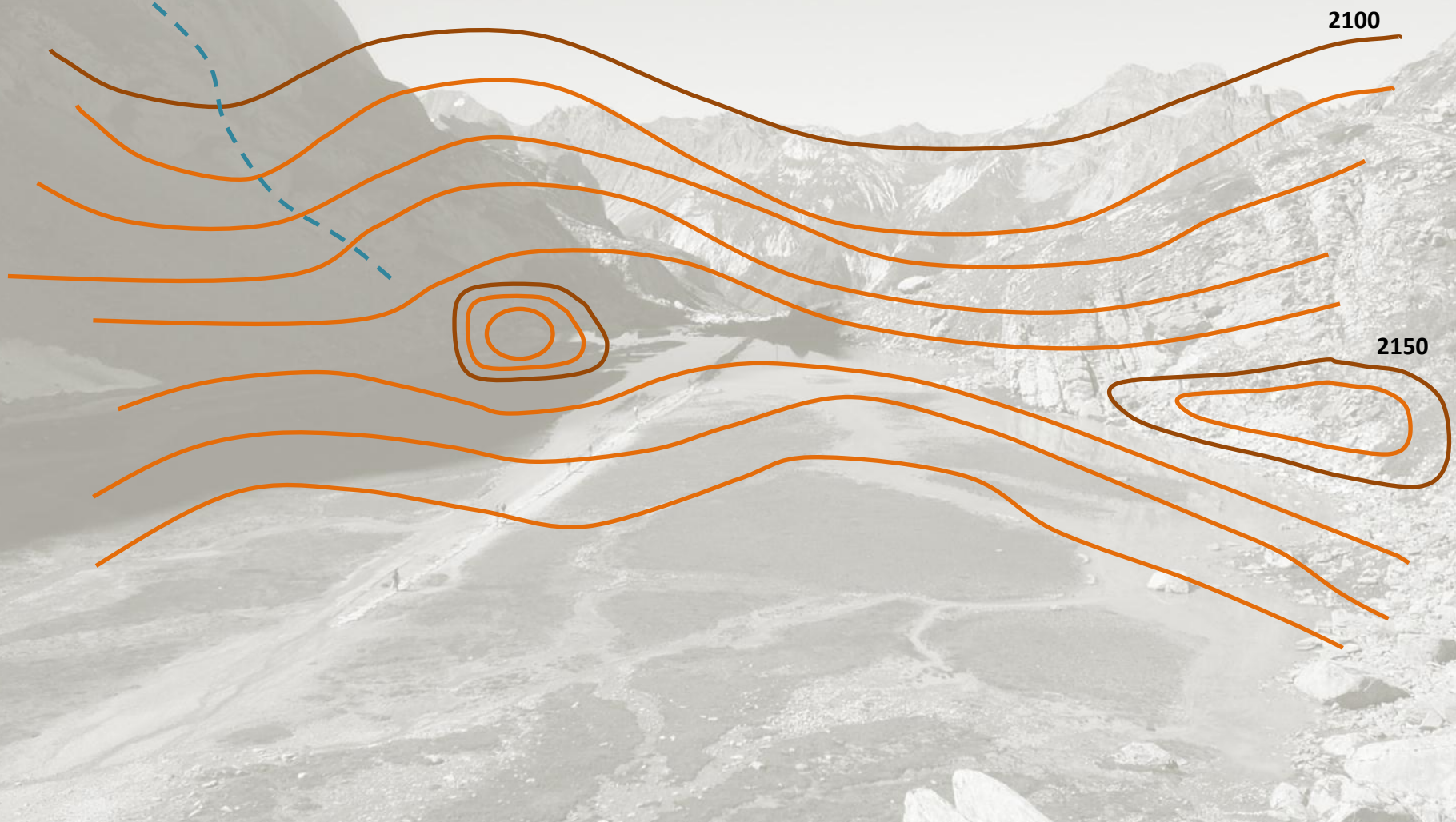
# Éléments de cartographie

## 1- Reconnaître les éléments caractéristiques du relief



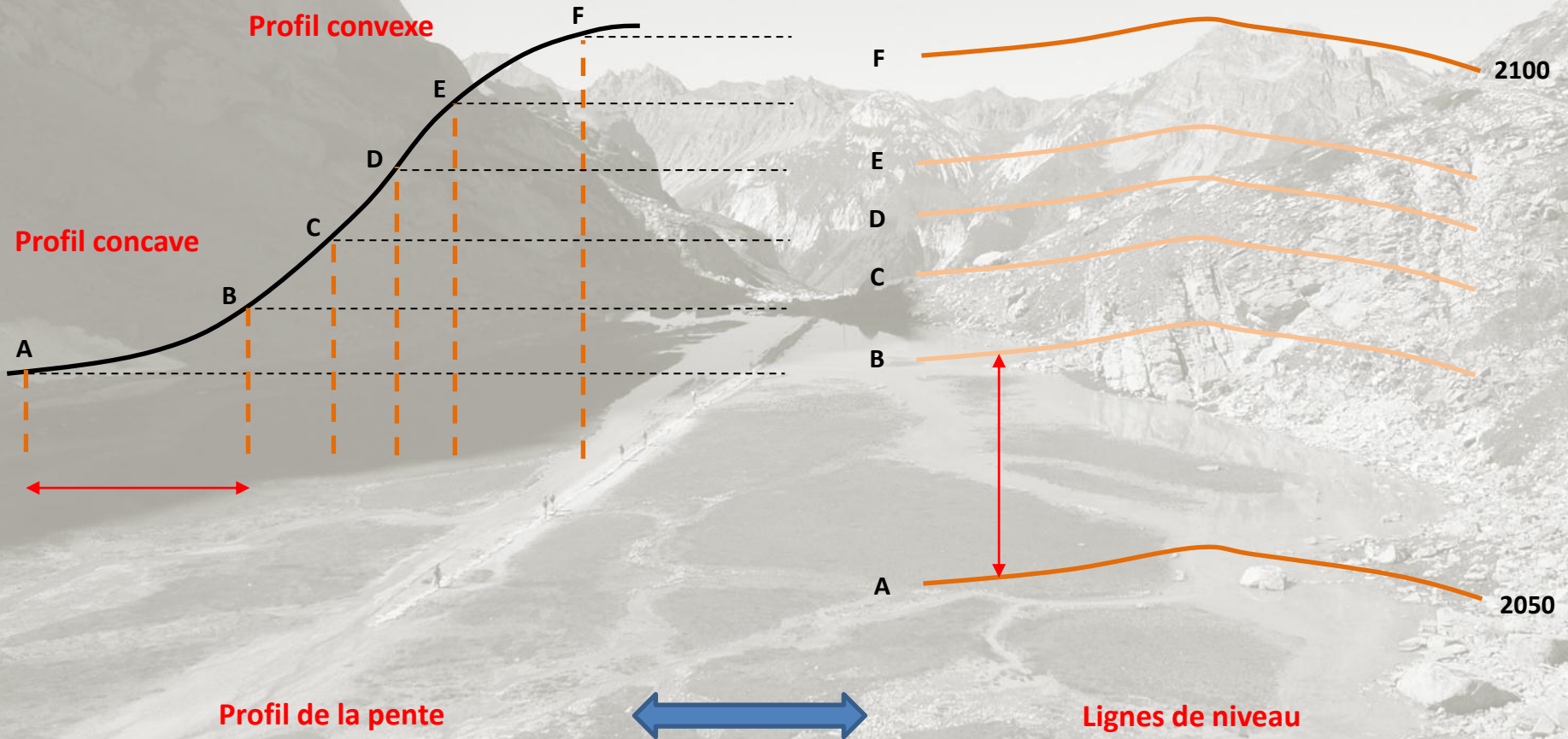
# Éléments de cartographie

## 2- Construire la relation carte / terrain



# Éléments de cartographie

## 3- Lignes de niveau et profil de pente

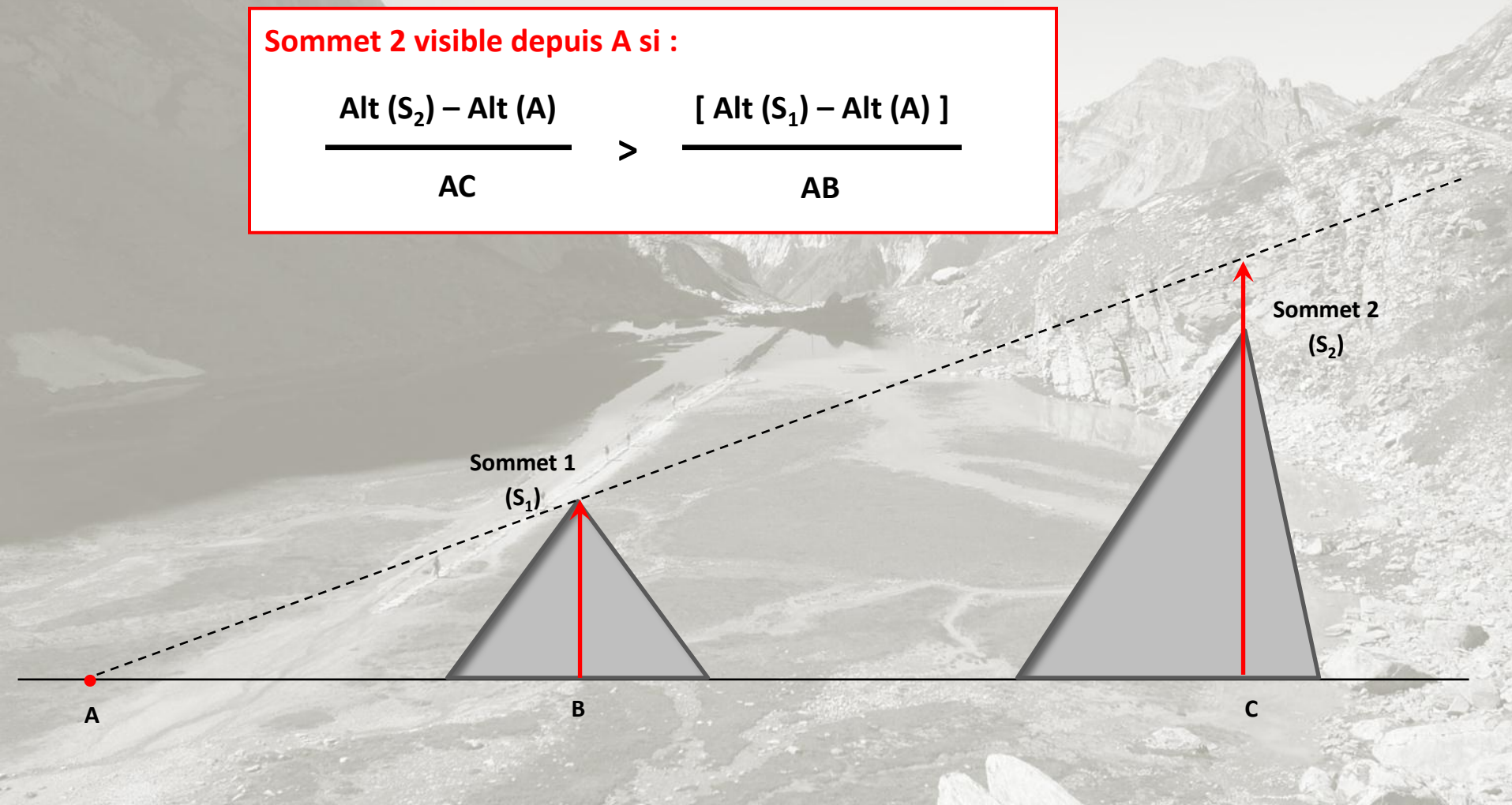


# Éléments de cartographie

## 4- Lecture du relief

**Sommet 2 visible depuis A si :**

$$\frac{\text{Alt}(S_2) - \text{Alt}(A)}{AC} > \frac{[\text{Alt}(S_1) - \text{Alt}(A)]}{AB}$$



# Mesures altimétriques (1)

## Altimètres GPS

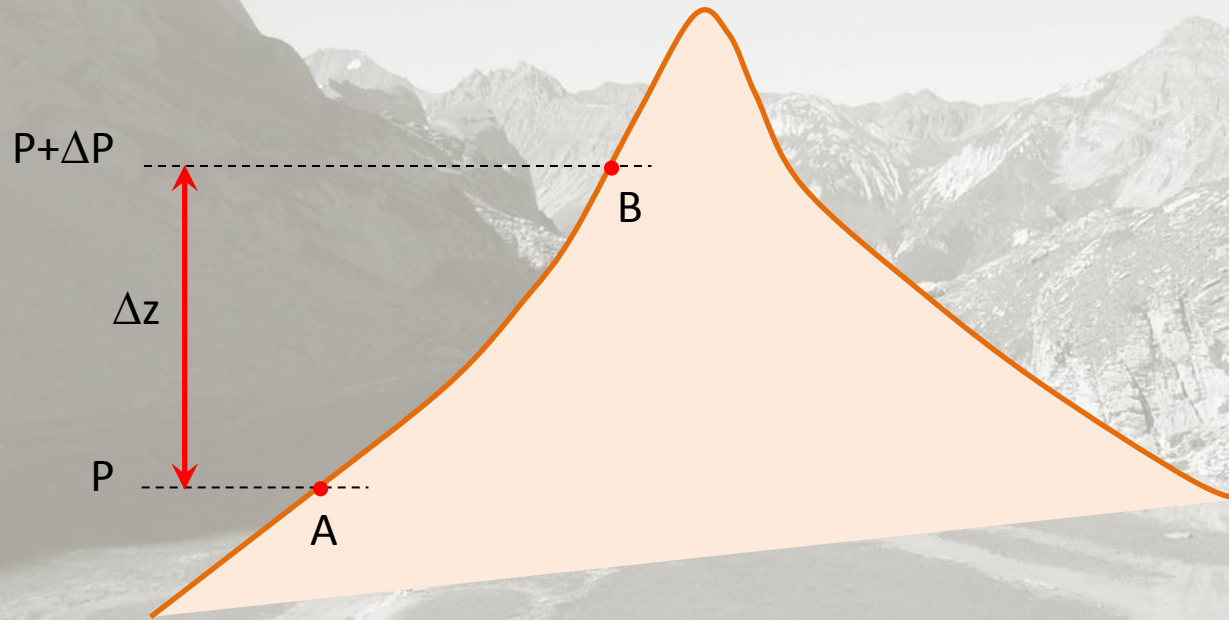
- Indépendants des conditions météo (pression, température)
- Pas besoin de recalage
- Perturbés par la présence d'une couverture forestière
- Nécessitent de pouvoir capter une constellation de satellites (effet écran dû aux sommets environnants)

## Altimètres barométriques

- Ne nécessitent pas d'intermédiaires (satellites, etc.)
- Dépendent directement des conditions météo, et de leur évolution
- Sensibilité de la mesure vis-à-vis de la température, de l'hygrométrie
- Exigent un recalage permanent

# Mesures altimétriques (2)

Différence de pression  $\Delta P$  entre deux points A et B situés à une différence d'altitude  $\Delta z$



Pour une masse d'air donnée, au repos et à l'équilibre

$$\Delta P = - \rho g \Delta z$$



# Mesures altimétriques (3)

$$\Delta P = - \rho g \Delta z$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Cette relation est d'autant plus précise que  $\Delta z$  est petit (quelques mètres)  
La masse volumique de l'air,  $\rho$ , dépend de la température  $T$  !

Loi des gaz parfaits :

$$P = \rho R T$$

$$R = 287.05 \text{ (u.i.)}$$



$$\frac{\Delta P}{P} = - \frac{g}{R T} \Delta z$$

Ex.  $P = 800 \text{ hPa}$ ,  $\Delta z = 10 \text{ m}$ ,  $T = 0^\circ \text{ C}$

  $\Delta P = 1 \text{ hPa}$

**Attention, dans les calculs il faut prendre la température en ° Kelvin (K), en ajoutant 273 à la température en ° Celsius (C)**

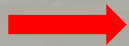
# Mesures altimétriques (4)

## Modèle barométrique des altimètres

Ce modèle est le modèle standard de l'atmosphère : masse d'air au repos  
Il indique que la pression décroît avec l'altitude selon une loi précise

$$\frac{\Delta P}{P} = - \frac{g}{R T} \Delta z$$

Les **altimètres barométriques** utilisent ce modèle dans le **sens inverse** :



Pour : - une variation de pression donnée  $\Delta P$   
- une température donnée  $T$

on peut en déduire la variation d'altitude correspondante

$$\Delta z = - \frac{R T}{g} \frac{\Delta P}{P}$$

C'est le modèle qu'utilisent les  
altimètres barométriques

# Mesures altimétriques (5)

Utilisation pratique du modèle

$$\Delta z = - \frac{R T}{g} \frac{\Delta P}{P}$$

A l'instant  $t_1$ , l'altimètre a mesuré la pression  $P_1$ , et calculé l'altitude  $z_1$

A l'instant  $t_2$ , l'altimètre a mesuré la pression  $P_2$

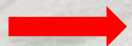
La température moyenne entre  $t_1$  et  $t_2$  est  $T$

L'altimètre calcule à l'instant  $t_2$  une nouvelle altitude  $z_2$  :



$$z_2 = z_1 - \frac{R T}{g} \frac{P_2 - P_1}{P_1}$$

Ex.  $P_1 = 800 \text{ hPa}$ ,  $z_1 = 2000 \text{ m}$   
 $P_2 = 810 \text{ hPa}$ ,  $T = 0^\circ \text{ C}$



$z_2 = 1901 \text{ m}$

Un cycle de calcul dure quelques secondes ( $t_2 - t_1$ )

Un altimètre réalise en une heure de nombreux cycles de calcul !

# Mesures altimétriques (6)

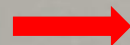
## Question 1

Que se passe-t-il lorsque les conditions météo évoluent ?

L'évolution des conditions météo est liée à l'évolution du champ de pression par déplacement des centres d'action (*anticyclones, dépressions*)

En un point donné, la pression **P** peut augmenter (régime anticyclonique) ou diminuer (régime dépressionnaire) au cours du temps

$$\Delta z = - \frac{R T}{g} \frac{\Delta P}{P}$$



En un même point, l'altimètre affiche entre deux instants donnés une variation d'altitude  $\Delta z$   
Cette variation est d'autant plus importante que l'évolution météo est marquée

## Conclusion

- A chaque cycle de calcul, l'altimètre commet une erreur lorsque les conditions météo changent
- Ces erreurs sur le calcul de l'altitude se cumulent au fil des cycles
- Nécessité de **recaler fréquemment** les altimètres barométriques (lorsqu'on connaît l'altitude du point où l'on se trouve)

# Mesures altimétriques (7)

## Question 2

Ordre de grandeur de l'erreur engendrée lorsque les conditions météo évoluent

Typiquement, à l'approche d'un *front perturbé*, on peut observer en deux heures une baisse de pression  $\Delta P$  de 5 hPa

Ex.  $P_1 = 800 \text{ hPa}$ ,  $z_1 = 2000 \text{ m}$   
 $\Delta P = 5 \text{ hPa}$ ,  $T = 0^\circ \text{ C}$

  $\Delta z = 50 \text{ m}$

L'erreur engendrée est donc significative !!!

# Mesures altimétriques (8)

## Question 3

### Effet de la température

- Une variation de température sans variation de pression n'engendre pas de variation d'altitude
- Mais, pour une même variation de pression, la variation d'altitude est d'autant plus forte que la température est élevée et que l'altitude est importante

Altitude  $z = 0$  m

Altitude  $z = 2000$  m

Température (° C)	$\Delta z$ (m)	$\Delta z$ (m)
-10	7.61	9.68
0	7.89	10.05
10	8.17	10.42
20	8.46	10.78

$\Delta P = 1$  hPa

# Mesures altimétriques (9)

## Question 4

Tous les altimètres prennent-ils en compte la température ?

- En principe **oui**
- Mais tous ne prennent pas en compte la température qu'ils mesurent. Cette mesure est entachée d'erreurs :
  - Effet de l'insolation directe
  - Influence de la  $t^\circ$  corporelle

Ces altimètres s'appuient sur un modèle standard de l'atmosphère :

La température décroît régulièrement avec l'altitude, depuis le niveau de la mer (15 °C), de 0.65 °C tous les 100 m.

A une altitude  $z$    $T$  (en °C) =  $15 - 0.0065 \times z$

Le modèle altimétrique devient alors :

$$\Delta z = - \frac{R}{g} (288 - 0.0065 z) \frac{\Delta P}{P}$$

# Effets de l'altitude

## Incidences physiques de l'altitude

- Diminution de la pression partielle d'Oxygène de l'air
- Elle est directement proportionnelle à la diminution de la pression avec l'altitude

$$\frac{\Delta P}{P} = - \frac{g}{R T} \Delta z$$

## Conséquences physiologiques

- Phase d'accommodation  
Dans les premières heures qui suivent l'exposition  
Hyperventilation, augmentation du rythme cardiaque
- Phase d'acclimatation (pour tendre vers un état d'acclimatement)



# Effets de l'altitude

## Loi fondamentale de l'hémodynamique : la loi de Fick

$$VO_2 = \text{Débit cardiaque} \times (CaO_2 - CvO_2)$$

### *Facteur central*

(implication de la pompe cardiaque)

$$Q = F_c \times V_e$$

Q : débit cardiaque

$F_c$  : fréquence cardiaque

$V_e$  : volume d'éjection systolique

### *Facteur périphérique*

(utilisation de l'oxygène par les muscles)

$CaO_2 - CvO_2$  : différence artério-veineuse

$CaO_2$  : contenu artériel en  $O_2$

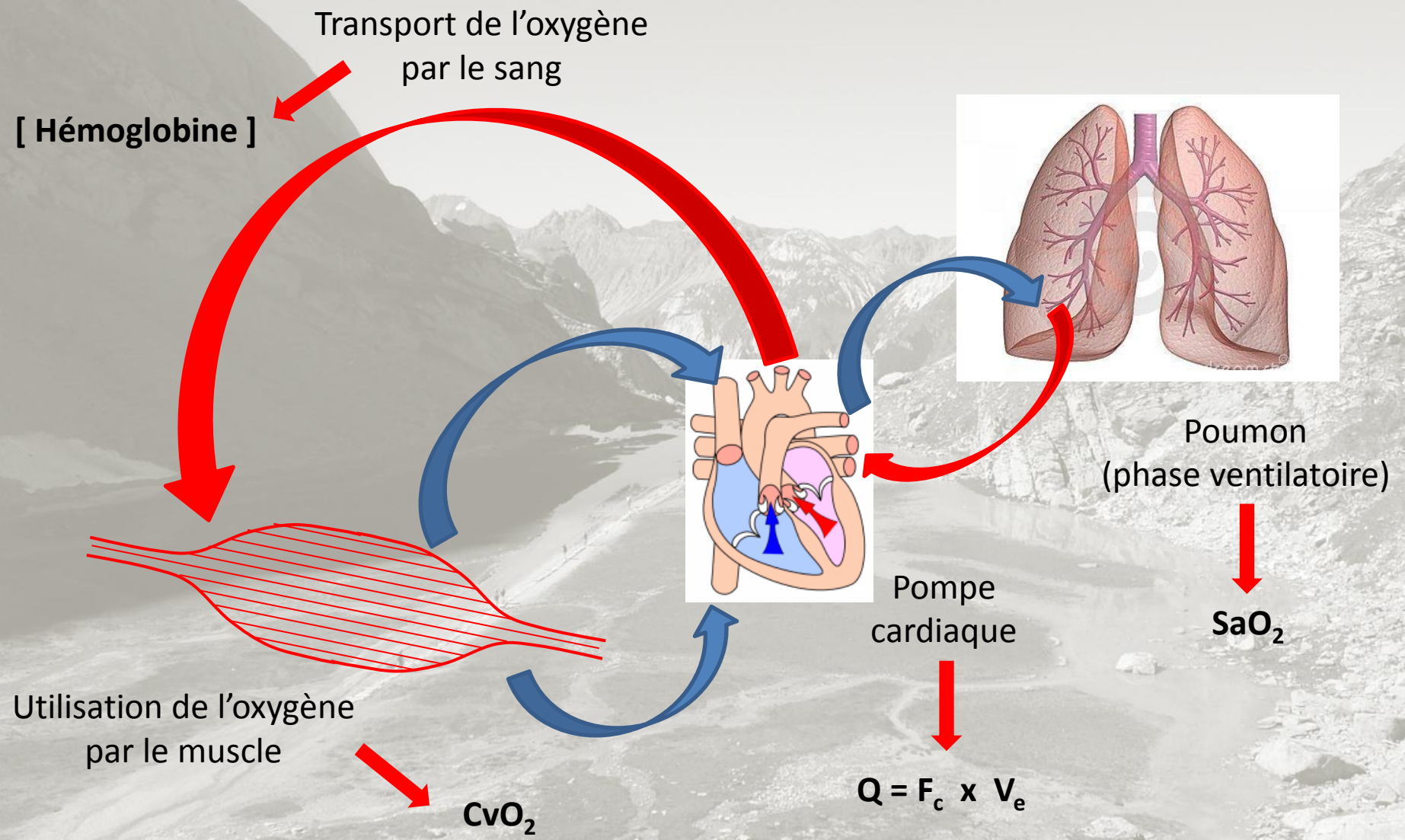
$CvO_2$  : contenu veineux en  $O_2$

$$CaO_2 = SaO_2 \times \text{Transport}_{O_2}$$

Saturation artérielle en  $O_2$

Concentration en  
hémoglobine

# Effets de l'altitude



# Effets de l'altitude

$$\begin{aligned} \text{VO}_2 &= \text{Débit cardiaque} \times (\text{CaO}_2 - \text{CvO}_2) \\ \text{CaO}_2 &= \text{SaO}_2 \times \text{Transport\_O}_2 \\ Q &= F_c \times V_e \end{aligned}$$

Effet de l'hypoxie (baisse de la pression partielle d'O<sub>2</sub>) : SaO<sub>2</sub>

VO<sub>2</sub>

## Mécanismes d'adaptation

### 1- Accommodation

Délai de mise en place : quelques heures

Paramètres modifiés :

F<sub>c</sub>

Q

Hyperventilation

SaO<sub>2</sub>

**Conclusions :**

Permet de ramener VO<sub>2</sub> à sa valeur initiale

**Mais** mécanismes coûteux (au niveau du cœur)

# Effets de l'altitude

$$\begin{aligned} \text{VO}_2 &= \text{Débit cardiaque} \times (\text{CaO}_2 - \text{CvO}_2) \\ \text{CaO}_2 &= \text{SaO}_2 \times [\text{Hémoglobine}] \\ Q &= F_c \times V_e \end{aligned}$$

## Mécanismes d'adaptation

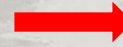
### 2- Acclimatation

Délai de mise en place : plusieurs semaines  
Paramètres modifiés :

[Hémoglobine]

$F_c$

Ventilation



$\text{CaO}_2$

**Conclusions :** Permet de maintenir  $\text{VO}_2$  de manière économique

# Effets de l'altitude

## Altitude et performance sportive

### Scénario 1 : séjour bref en altitude (week-end)

- Phase d'accommodation (*hypoxie aigue*)
- Arythmie cardiaque, hyperventilation
- Réduction de  $F_c^{\max}$  (réponse cardiaque au *stress hypoxique*)

➔ Réduction de  $VO_2^{\max}$ , proportionnelle à l'altitude  
(plus aigue chez les sportifs de haut niveau ( $VO_2^{\max}$  élevé))

➔ Cette réduction est effective à partir de 1600 m. Elle est de 1%  
par élévation de 100 m

**Exemple :**  $VO_2^{\max} = 70$  ml/Kg/min (au niveau de la mer)  
Effort mené à l'altitude de 2500 m

$$VO_2^{\max} = 70 \times (1 - 0.01 \times (2500 - 1600) / 100) = 63.7$$

(réduction de 10 % des capacités maximales)

# Effets de l'altitude

## Altitude et performance sportive

### Scénario 2 : séjour prolongé en altitude (3500 m, 3 semaines)

- Phase d'acclimatation (*hypoxie chronique*)
- La ventilation et le rythme cardiaque **au repos** reprennent des valeurs normales (*normoxie*)
- Une *polyglobulie* (globules rouges) se met en place
  - Augmentation de *l'hématocrite* (par augmentation de l'EPO ...)
  - Augmentation de la viscosité du sang (importance de l'hydratation)
  - Risques accrus d'accidents thromboemboliques
  - Susceptibilité plus forte aux gelures
- Réduction de  $F_c^{\max}$  (la réponse cardiaque au stress hypoxique demeure)

### Conclusion :

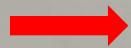
Mise en place de mécanismes de réponse plus économiques  
Réduction de  $VO_2^{\max}$ , proportionnelle à l'altitude  
La performance à l'effort demeure altérée  
Attention à l'augmentation de la viscosité du sang

# Effets de l'altitude

## Altitude et performance sportive

### Question récurrente 1 :

Peut-on « s'acclimater » à l'altitude (stress hypoxique) par des séjours en altitude brefs (week-end) et répétés (tous les 8/10 jours) ?



Clairement **NON** !!!

Les adaptations physiologiques durables à l'altitude exigent un séjour de plusieurs semaines. Les effets sont d'autant plus marqués que le séjour est long, et l'altitude de résidence élevée.

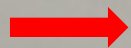
Les effets (polyglobulie) disparaissent une fois le sujet redescendu après 3 à 4 semaines.

# Effets de l'altitude

## Altitude et performance sportive

Question récurrente 2 :

Existe-t-il un intérêt à s'entraîner régulièrement en altitude (2500 m)?



A priori **NON** !!!

Il n'existe pas aujourd'hui d'éléments en faveur de cette stratégie, essentiellement à cause de la réduction de  $VO_2^{\max}$

La stratégie recommandée est :

**Vivre HAUT – S'entraîner BAS**