

DS n°5 – Eléments de correction

PARTIE A – GEOLOGIE

Thème 1 – Etude de structures tectoniques à l'échelle de l'affleurement et de l'échantillon

Extrait du sujet du Concours A Agro-Véto session 2020

**1. Etude d'un affleurement**

**1.1 Définissez les termes de déformation élastique, plastique et cassante d'une roche.**

Une déformation correspond au changement de forme d'un objet (ici géologique) soumis à des contraintes anisotropes : elle est le résultat de mouvements de matière au sein même de l'objet.

Une **déformation élastique** est **continue et réversible** : l'objet déformé par les contraintes revient à l'état initial lorsque celles-ci sont levées.

Une **déformation plastique** est **irréversible** : l'objet demeure déformé sans fracture lorsque les contraintes sont levées. Une déformation finie plastique est de type **continue** (homogène ou hétérogène : l'objet n'est pas fracturé par la déformation). Une telle déformation est possible lorsque la contrainte différentielle dépasse le seuil de plasticité.

Une **déformation cassante** est **irréversible**. Une déformation finie cassante est de type **discontinu** : l'objet est fracturé (failles, fentes de tension) par la déformation. Une telle déformation est possible lorsque la contrainte différentielle dépasse le **seuil de rupture**.

**1.2 Définissez la notion de contrainte. Dans quel cas les contraintes sont-elles à l'origine d'une déformation ?**

Une contrainte est une **pression orientée**, elle est décrite par un vecteur. On définit une contrainte comme la valeur limite du rapport  $\frac{dF}{dS}$  quand  $S \rightarrow 0$

Lorsque les contraintes auxquelles est soumis l'objet sont **anisotropes** (par exemple dans un contexte géodynamique soumettant les roches à une **force tectonique** orientée), un mouvement relatif de matière au sein de l'objet est possible : il se **déforme**. On définit alors une **contrainte différentielle** :  $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$

**1.3 Réalisez un schéma titré et légendé de l'affleurement photographié dans le document 1. Schématisez également l'ellipsoïde des déformations finies, en justifiant.**

Extrait du rapport de jury *Il est attendu d'un schéma qu'il soit **ressemblant**, qu'il mette en valeur les **éléments importants** de l'image (plan de faille, quelques bancs repères, crochon de faille) et qu'il possède un **titre** et une **légende correcte**. Penser aussi à l'échelle. L'emploi de **couleur** (stylos ou feutres fins) est recommandé !*

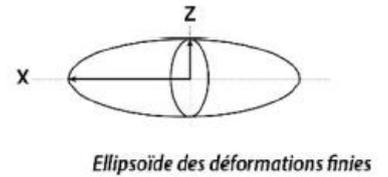
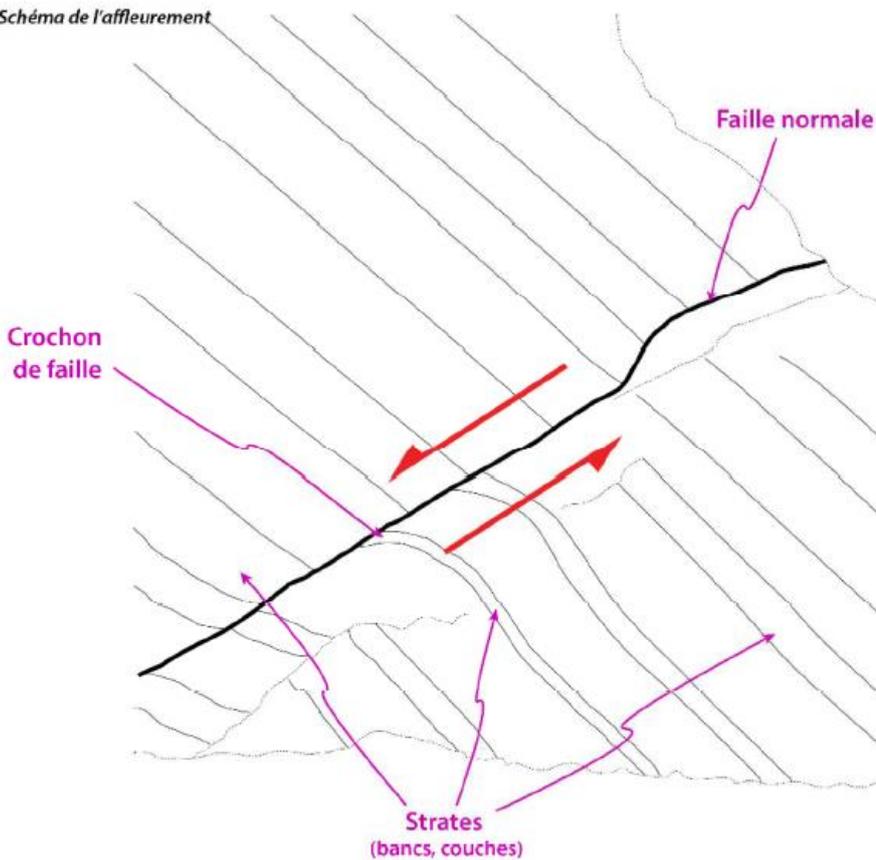
On remarque au niveau de l'affleurement une stratification et la présence d'une strate remarquable grise qui nous servira de **banc-repère**. Ce banc repère est affecté par une **faille** qui traverse l'image du coin supérieur droit au coin inférieur gauche. Le banc-repère n'est pas continu de part et d'autre de la faille (il est d'ailleurs perdu au niveau du toit) : la déformation est qualifiée de **discontinue/cassante**. Le banc-repère est difficilement repérable au niveau du toit ce qui nous invite à exploiter d'autres éléments pour caractériser le mouvement relatif des deux blocs.

On déduit de l'analyse du **crochon de faille** au niveau du banc-repère gris que la faille est **normale** : le toit est descendu relativement au mur ce qui a conduit à un **allongement horizontal**. On positionne alors l'axe d'allongement maximal **Ox** à l'**horizontale** dans le plan de l'affleurement (angle de 60° par rapport à la faille).

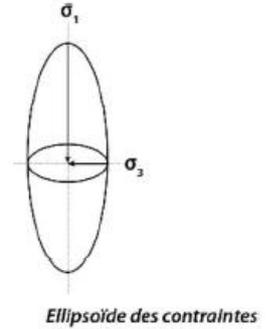
L'axe de raccourcissement maximal dans le cas d'une faille normale est orienté à 30° par rapport à la faille : **Oz est vertical et dans le plan de l'affleurement**. L'axe intermédiaire **Oy est horizontal et perpendiculaire au plan de l'affleurement**.

Voir schéma en page suivante.

Schéma de l'affleurement



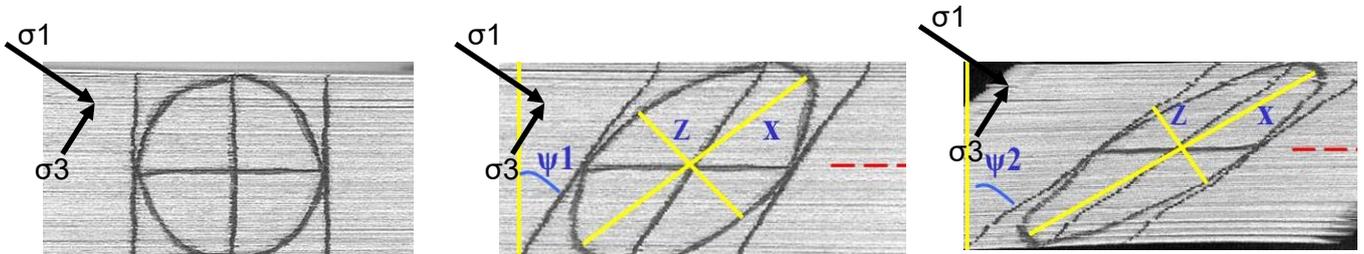
Ellipsoïde des déformations finies



Ellipsoïde des contraintes

#### 1.4 A quelle condition peut-on déduire l'ellipsoïde des contraintes à partir de l'ellipsoïde des déformations finies ?

Il n'est possible de déduire l'ellipsoïde des contraintes à partir de l'ellipsoïde des déformations finies que dans le cas d'une **déformation coaxiale** c'est-à-dire lorsque les déformations incrémentales se font **sans rotation** si bien que les axes de déformations finies adoptent toujours la même relation géométrique avec les vecteurs contraintes. C'est le cas lors d'un cisaillement pur ou d'une déformation cassante (faille).



Dans ce schéma, la déformation incrémentale de type cisaillement simple conduit à la rotation du plan  $Oxy$  qui tend vers le plan de cisaillement (représenté par des pointillés).

#### 1.5 Représentez l'ellipsoïde des contraintes sur votre schéma. Vous préciserez la signification de $\sigma_1$ , $\sigma_2$ et $\sigma_3$ . L'absence d'indices de rotation nous permet de qualifier la déformation de **coaxiale** et de déduire l'ellipsoïde des contraintes à partir de l'ellipsoïde des déformations finies. La construction est réalisée de la manière suivante : la **contrainte maximale $\sigma_1$** est parallèle à l'axe $Oz$ , la **contrainte minimale $\sigma_3$** est parallèle à $Ox$ et la **contrainte intermédiaire $\sigma_2$** est perpendiculaire à $Oy$ .

Voir schéma ci-dessus.

On sera vigilant en représentant les contraintes comme des vecteurs orientés !

## 2. Etude de microstructures tectoniques

### 2.1 Nommez chaque microstructure tectonique du document 2. Vous préciserez si la déformation est cassante et/ou ductile.

(1) **Pli** présentant des **fentes de tension** remplies de calcite à l'**extrados** (et faille inverse à l'intrados ?).

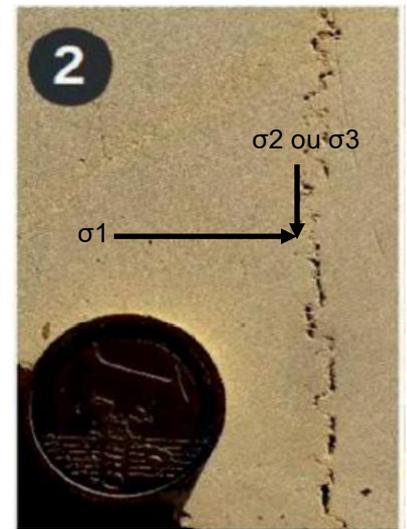
Le pli est le résultat d'une **déformation ductile** alors que les fentes de tension résultent d'une **déformation cassante**.

(2) **Joint stylolithique**. Cette microstructure tectonique est le résultat d'une **déformation cassante**.

(3) **Fentes de tension disposées en échelon.** Ces microstructures tectoniques sont le résultat d'une **déformation cassante**.

## 2.2 Ajoutez, sur le document 2.2 reproduit en annexe (p. 17), l'ellipsoïde des déformations finies correspondant à l'échantillon 2.

La **surface** irrégulière du joint stylolithique (ici vue en coupe transversale) correspond au **plan d'aplatissement** (plan Oxy). Les pics stylolithiques sont eux parallèles à l'**axe de raccourcissement maximal** (Oz). On construit alors l'ellipsoïde des déformations finies avec une incertitude Ox-Oy qui pourrait être levée si l'échantillon présentait des linéations d'allongement ou des fentes de tension par exemple. La déformation étant **coaxiale** (absence d'indices de rotation) on en déduit alors l'ellipsoïde des contraintes en plaçant  **$\sigma_1$  perpendiculairement au joint et  $\sigma_2/\sigma_3$  dans le plan du joint stylolithique.**



## 2.3 Discutez de la diversité des déformations observables dans le document 2.

On remarque que visiblement seul l'échantillon (1) a été plissé témoignant d'un comportement ductile de la roche.

Un tel comportement pourrait être expliqué par des **conditions de pression / température** telles que celles retrouvées à profondeur importante (la pression lithostatique et la température élevées font reculer le seuil de rupture et abaissent le seuil de plasticité rendant alors les roches plus ductiles).

Cependant, le pli visiblement isopaque et associé à des microstructures résultant d'une déformation cassante donne peu de crédit à cette hypothèse.

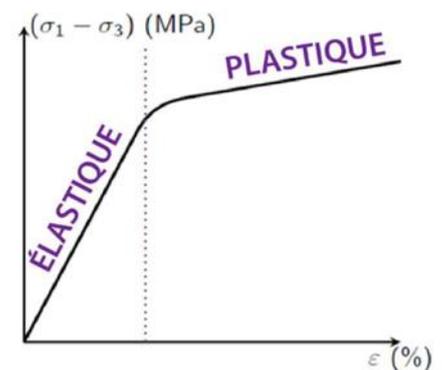
On pourrait alors expliquer cette différence par une différence de **compétence** de cette roche carbonatée. La roche serait moins compétente que les roches des échantillons (2) et (3).

## 3. Les apports des données expérimentales

### 3.1 Identifiez le domaine élastique et le domaine plastique sur le graphique du document 3 représenté sur l'annexe (p. 17).

Le **domaine élastique** se caractérise par une fonction linéaire de la quantité de déformation ( $\epsilon$ ) en fonction de la contrainte différentielle ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) ainsi que par une faible variation de la quantité de déformation pour une forte variation de la contrainte différentielle.

Le domaine **plastique** débute lorsque le **seuil de plasticité** est atteint ce qui se manifeste graphiquement par une inflexion de la courbe. Le domaine plastique se caractérise lui par une forte variation de la quantité de déformation pour une faible variation de contrainte différentielle.



### 3.2 Analysez le document 4 afin de caractériser l'effet de la température sur la déformation du cylindre de roche.

(1) On remarque que plus la température est élevée, plus la quantité de déformation avant rupture est importante (le **seuil de rupture** est repoussé), passant de 4 % à une température de 300 °C à 6 % lorsque la température est de 500 °C. A 600 °C, le seuil de rupture n'est pas atteint dans la gamme de déformation expérimentalement testée.

(2) On remarque par ailleurs que plus la température est élevée, plus le **seuil de plasticité** est faible passant de 400 MPa à 300°C à 200 MPa à 600°C.

Ces deux observations montrent qu'à haute température le **comportement des roches est plus ductile**.

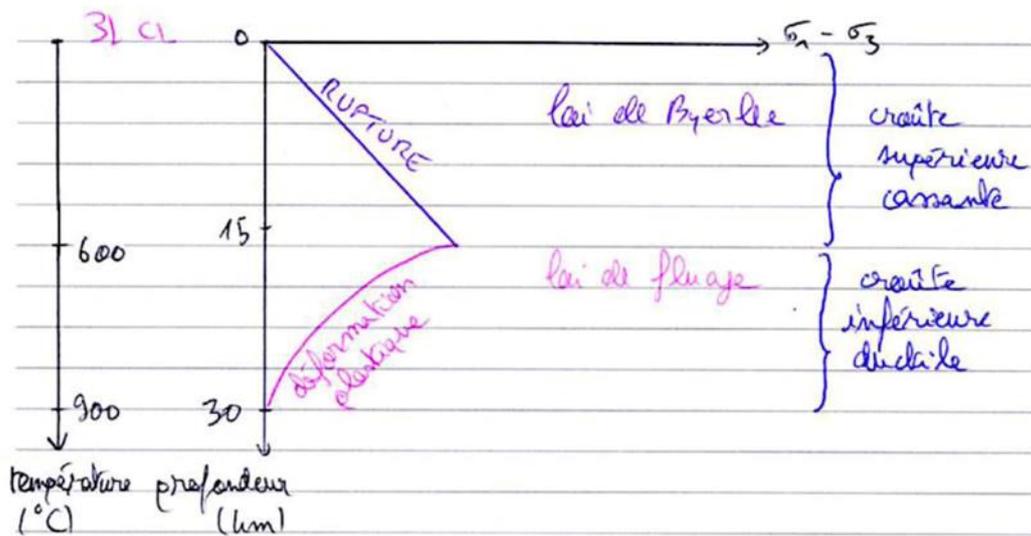
### 3.3 Présentez et expliquez le profil rhéologique de la croûte continentale en utilisant les données expérimentales du document 4 et vos connaissances.

Dans la croûte supérieure, à une profondeur supérieure à 15 km, les roches sont soumises à des températures (inférieures à 600°C) et pressions lithostatiques modérées, si bien qu'elles ont un comportement plus cassant (cf document 4) : le seuil de rupture est atteint avant le seuil de plasticité. C'est la croûte « sismique » dans laquelle se produisent les séismes.

Le comportement rhéologique de la croûte supérieure est alors décrit par la loi de Byerlee, et la courbe modélisant le seuil de rupture en fonction de la profondeur est une droite.

Dans la croûte inférieure, à une profondeur supérieure à 15 km, les roches sont soumises à des températures (supérieures à 600°C) et pressions lithostatiques plus élevées, si bien qu'elles ont un comportement plus ductile (cf document 4). C'est la croûte « asismique ».

Le comportement rhéologique de la croûte inférieure est alors décrit par la loi de fluage et la courbe modélisant le seuil de plasticité en fonction de la profondeur est une portion d'hyperbole.



**Profil rhéologique de la croûte**

**Thème 2 – Etude d'un séisme dans la région Nord-Ouest Pacifique**

**1. Définissez les termes de séisme, de foyer et d'épicentre.**

Un **séisme** correspond à la relaxation de l'énergie élastique accumulée au cours du temps par des roches sous contrainte. La relaxation est brutale et se fait par glissement de blocs de part et d'autre d'une faille. L'énergie est libérée sous forme de vibrations élastiques, les ondes sismiques.

Le **foyer** (ou hypocentre) correspond au point de relaxation de l'énergie élastique : il est situé dans le plan de faille. Sa projection à la surface est appelée **épicentre**.

**2. Explicitez les différentes ondes sismiques que vous connaissez. Quels sont les points communs et les différences entre les ondes P et S ?**

On distingue parmi les ondes sismiques les **ondes de volume** (P et S ; point commun) et les **ondes de surface** (ondes L et R).

Les ondes P se propagent à une vitesse plus élevée que les ondes S et sont donc les premières enregistrées par un sismographe suite au séisme (différence).

Les ondes P sont des ondes de compression – dilatation (mouvements du sol parallèles à la trajectoire de l'onde) alors que les ondes S sont des ondes de cisaillement (mouvements du sol perpendiculaires à la trajectoire de l'onde) (différence).

**3. Commentez précisément et annotez (sur le document reproduit en annexe p. 17) l'enregistrement sismique présenté sur le document 5.**

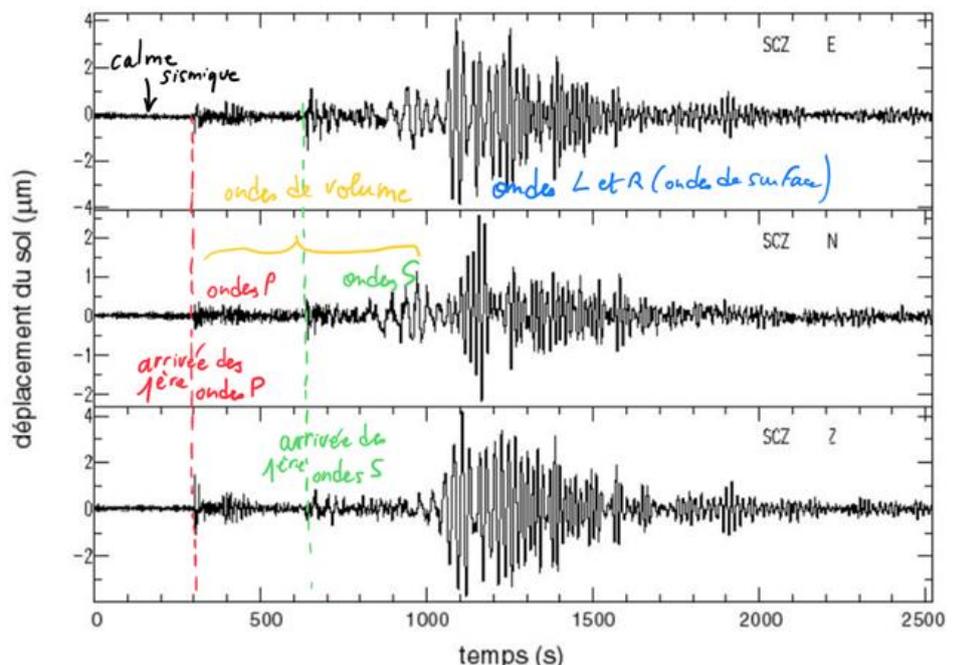
Les 3 sismogrammes correspondent à l'enregistrement de deux sismographes l'un enregistrant les mouvements verticaux et l'autre enregistrant les mouvements horizontaux selon les directions N-S et E-W.

Les trains d'ondes arrivent au même moment sur les 3 sismogrammes.

Le premier train d'ondes qui perturbe le calme sismique est associé à des mouvements maximums du sol modérés (moins de 1  $\mu\text{m}$  horizontalement et moins de 2  $\mu\text{m}$  verticalement) et correspond aux ondes P.

Le second train d'ondes associé à un mouvement maximum du sol légèrement plus important correspond aux ondes S.

Le dernier train d'onde associé à un important mouvement du sol (près de 4  $\mu\text{m}$  dans toutes les directions) correspond aux ondes de surface, les plus dévastatrices.



**4. Etablissez la relation qui permet de calculer la distance  $d$  qui sépare l'épicentre d'un séisme de la station sismique à laquelle il est enregistré, à partir de la vitesse de propagation des ondes P  $V_P$  et des ondes S  $V_S$  et du délai d'arrivée des ondes S par rapport aux ondes P  $t_{S-P}$ .**

Soit  $d$  la distance épacentrale,  $V_P$  la vitesse des ondes P,  $V_S$  la vitesse des ondes S, telles que  $V_P > V_S$ , on définit le temps de parcours de la distance épacentrale par les ondes P et S ainsi :

$$t_P = d/V_P \text{ et } t_S = d/V_S$$

Le délai d'arrivée des ondes S par rapport aux ondes P, noté  $t_{(S-P)}$  est alors égal à :

$$t_{(S-P)} = t_S - t_P = d(1/V_S - 1/V_P)$$

**5. A partir de la relation établie à la question 4, calculez la pente de la courbe  $d = f(t_{S-P})$  dans la région considérée, où  $V_P = 7,74 \text{ km/s}$  et  $V_S = 4,32 \text{ km/s}$ .**

A.N. :

$$t_{(S-P)} = d \times (1/7,74 - 1/4,32) = d \times (0,231 - 0,129) = 0,1 \times d \text{ soit : } d = 9,78 \times t_{(S-P)}$$

La pente vaut alors **9,78 km/s**.

**6. Calculez alors la distance de chaque station sismique à l'épicentre.**

Il suffit alors de multiplier par 10 km/s le délai d'arrivée (en secondes) des ondes S par rapport aux ondes P pour obtenir la distance épacentrale (en km).

Ainsi :

$$PET = 48 \times 9,78 = 469 \text{ km}$$

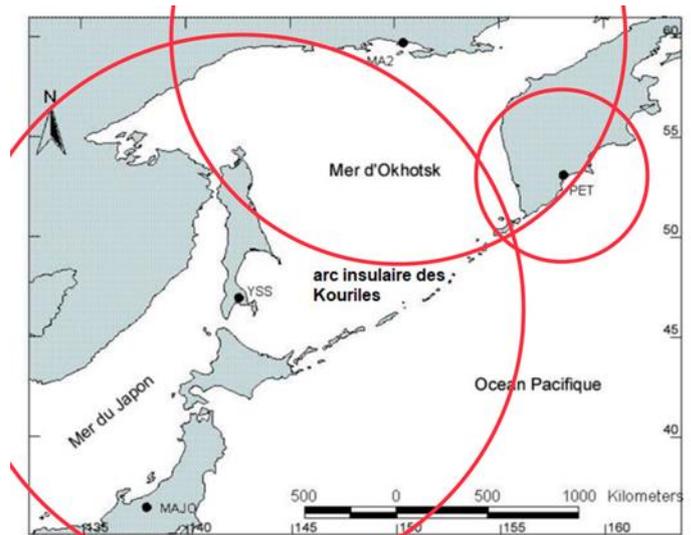
$$MA2 = [6 + 2 \times 60] \times 9,78 = 1232 \text{ km}$$

$$YSS = [35 + 2 \times 60] \times 9,78 = 1515 \text{ km}$$

$$MAJO = [15 + 4 \times 60] \times 9,78 = 2493 \text{ km}$$

**7. Localisez précisément l'épicentre du séisme sur la carte en annexe (p. 18), que vous rendrez avec votre copie.**

On localise l'épicentre du séisme par une technique de triangulation. Pour chaque station, on trace un cercle centré sur la station et de rayon égal à la distance épacentrale en s'attachant à respecter l'échelle donnée sur la figure. L'intersection des cercles correspond à la région dans laquelle est située le séisme.



**8. A partir de votre connaissance du contexte géologique de la région, expliquez l'origine de ce séisme.**

Le Nord-Ouest du Pacifique tout comme la plupart des bordures de l'océan Pacifique est une zone de subduction. La présence d'un arc insulaire légendé sur le document 7 le confirme.

Dans un tel contexte géodynamique, les mécanismes au foyer des séismes sont variables et témoignent de mouvement en compression ou en extension. Les séismes ayant pour origine la relaxation d'une énergie élastique accumulée sous l'effet de force de traction ont leur épicentre généralement localisé à l'arrière de l'arc. Au contraire, les séismes ayant pour origine la relaxation d'une énergie élastique accumulée sous l'effet d'une force de compression ont leur épicentre localisé proche de la fosse et de l'arc insulaire, ce qui est le cas ici.

**9. Calculez la magnitude de ce séisme à partir du document 6.**

La magnitude de Richter n'est applicable qu'à une distance épacentrale comprise entre 200 et 600 km. Le seul sismogramme dont nous disposons à une telle distance épacentrale est celui de la **station PET** situé à **469 km** de l'épicentre et pour lequel le mouvement maximal du sol a été d'après le document 4 de **3,67 mm**.

AN :

$$M_L = \log(3,67) - \log([13,435/469]^{3,002}) = 0,56 - \log(0,0279^{3,002}) = 0,56 - \log(0,0000215) = 0,56 + 4,66 = 5,2$$

Le séisme a une magnitude locale de 5,2 sur l'échelle de Richter à une distance épacentrale comprise entre 200 et 600 km.

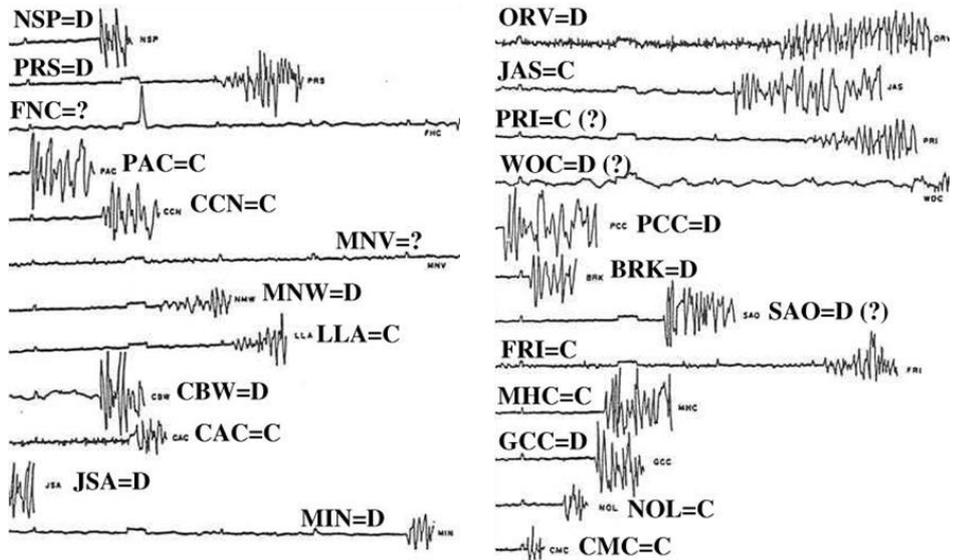
**10. Déterminez l'heure (en UTC) à laquelle s'est produit le séisme.**

Sachant que les ondes P se propagent à 7,74 km/s dans la région, elles ont parcouru les 469 km séparant l'épicentre de la station PET en  $469/7,74 = 61$  secondes.

Sachant que les ondes P sont arrivées à 3:02:04 UTC à la station P, le séisme a donc eu lieu 61 secondes plus tôt soit à 3:01:03 UTC.

**1. Localisation de l'épicentre et détermination du mécanisme au foyer du séisme du 29 avril 1979**

**1.1** Après avoir caractérisé le sens du premier mouvement du sol (en compression ou en dilatation) sur chacun des sismogrammes, reportez cette information sur la carte reproduite en annexe (p. 18) pour chacune des stations sismologiques. Par convention, on noircit le cercle des sites en compression et on maintient le cercle vide pour les zones en dilatation.



Voir ci-contre l'interprétation des sismogrammes (si le premier pic est vers le bas : dilatation, s'il est vers le haut : compression).

**1.2** Localisez alors la faille sur laquelle le séisme s'est produit et, aussi précisément que possible, l'épicentre du séisme.

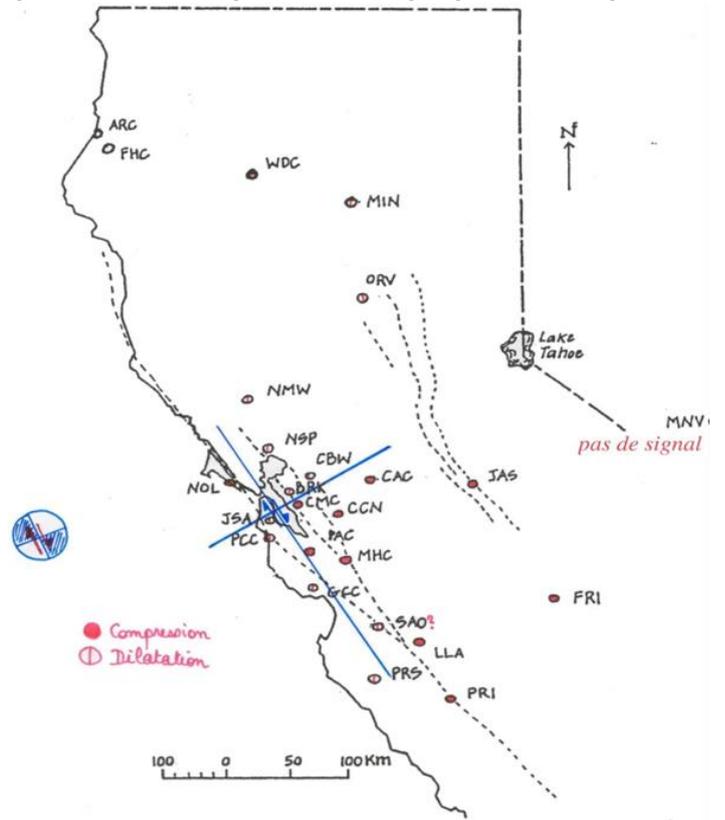
On trace deux droites perpendiculaires l'une à l'autre, dont le point d'intersection correspond à la localisation de l'épicentre du séisme, et séparant les quadrants contenant les sites en compression des quadrants contenant les sites en dilatation.

L'une de ces droites correspond au plan de faille, l'autre au plan auxiliaire.

Pour pouvoir déterminer lequel des deux est le plan de faille, on observe la répartition des séismes sur le document 7 : la plupart d'entre eux sont localisés sur un axe Nord-Ouest – Sud-Est, qui correspond donc à la faille de San Andreas. Sur le schéma c'est donc l'axe NW – SE qui correspond au plan de faille.

**1.3** Déterminez le mécanisme au foyer de ce séisme et précisez la nature de la faille qui a joué lors de ce séisme.

Le plan de faille étant identifié, on peut représenter la sphère focale correspondant au mécanisme au foyer, avec le déplacement relatif des compartiments de part et d'autre de la faille : il s'agit d'un mécanisme de coulissage dextre, et la faille est une faille décrochante dextre.



**2. Prévoir les séismes en Californie ?**

**2.1** Analysez la répartition spatiale des séismes en Californie sur le document 7 et interprétez cette répartition.

De nombreux séismes ont eu lieu entre 1769 et 2000, et ils sont alignés comme dit précédemment selon un axe NW – SE. On peut donc proposer que la faille de San Andreas est une frontière de plaques. C'est le mouvement relatif des deux plaques l'une par rapport à l'autre qui explique le nombre élevé de séismes.

**2.2** Rappelez quelle est la signification de l'intensité d'un séisme.

Sur la carte (document 10) on constate que l'épicentre du séisme de Parkfield correspond à une zone d'intensité VI, et le tableau mentionne une perception de secousses sévères lors du séisme.

L'intensité mesure les effets et dommages du séisme en un lieu donné, c'est-à-dire la manière dont le séisme se traduit en surface et dont il est perçu. Elle est basée sur une classification empirique, pour laquelle il existe plusieurs échelles d'intensité. On utilise habituellement l'échelle EMS 98 ou MSK, qui comporte douze degrés (I à XII). Le début de dégâts notables correspond à l'intensité VI.

### 2.3 Exploitez les données du document 11 pour expliquer le contexte géodynamique à l'origine de ce séisme.

La station P295 localisée à l'Ouest de Parkfield (et donc de la faille) présente un déplacement absolu d'environ 21,6 mm/an vers le Nord et de 38,9 mm/an vers l'Ouest.

La station P296 localisée au Nord-Nord-Ouest de Parkfield (et donc à l'Est de la faille) présente un déplacement absolu de 3,4 mm/an vers le Nord et de 21,1 mm/an vers l'Ouest.

La station P295 se déplace plus rapidement vers le NW (le tracé des vecteurs déplacement n'était pas explicitement demandé, mais il permet de comparer aisément les mouvements absolus et d'en déduire le mouvement relatif entre les stations).



Le mouvement relatif entre les stations, compte tenu de leur localisation relative, est un décrochement dextre, ce qui est cohérent avec le mécanisme au foyer déterminé plus haut.

La faille de San Andreas est donc bien une frontière de plaque : c'est une faille transformante.

### 2.4 Analysez les données d'interférométrie présentées dans le document 12 et proposez une hypothèse pour expliquer la sismicité importante dans la zone de Parkfield.

Ici, les mesures effectuées ont permis de calculer la déformation 3D cumulée sur une période de 10 ans (période intersismique). Le nombre de franges permet de quantifier la déformation (ici une frange représente un déplacement de 28,28 mm selon la direction de ligne de visée du satellite).

Ici, les franges sont très resserrées sur un axe NW-SE entre 35,9°N et 36,6°N, au point qu'il est difficile de les dénombrer même sur le zoom du document 12b. Cela indique des déformations du sol très importantes en période intersismique dans ce secteur, qui coïncide avec la faille de San Andreas.

En revanche, plus au Sud et plus au Nord, les franges sont beaucoup moins resserrées selon ce même axe, les déformations du sol sont donc bien plus réduites le long de la faille en période intersismique.

En repérant la localisation de Parkfield sur le document 10, on constate que la ville est située à 35,9°N, justement au niveau d'un relais entre un segment de faille qui présente des déformations importantes et un segment dont les déformations sont faibles. On peut faire l'hypothèse qu'il s'agit d'une zone de « blocage » où les contraintes liées au déplacement relatif des plaques de part et d'autre de la faille s'accumulent, ce qui pourrait expliquer la sismicité importante dans la zone de Parkfield.

### 2.5 En quoi les données présentées dans ces documents pourraient-elles contribuer à l'estimation de l'aléa sismique en Californie ?

L'aléa sismique est la probabilité d'occurrence des séismes, qui résultent d'une déformation cassante de roches.

La géodésie spatiale (GPS) permet de quantifier de manière très précise les déplacements de part et d'autre des failles actives, comme on l'a vu avec le document 11. On peut ainsi suivre en continu les déplacements le long de la faille de San Andreas. Ces déplacements sont à l'origine de contraintes qui s'appliquent notamment sur la croûte, qui se déforme.

L'interférométrie radar dont les résultats sont présentés sur le document 12 permet de mesurer de faibles déformations de la surface du sol. Or on sait que la déformation de la croûte superficielle est élastique jusqu'au seuil de rupture, et qu'un séisme se produit lorsque ce seuil est atteint. On voit donc l'intérêt de quantifier des déformations de la croûte en période intersismique pour évaluer la probabilité d'occurrence d'un séisme.

La confrontation de ces deux types de données entre elles peut permettre de modéliser l'accumulation des contraintes qui contribue à évaluer la probabilité d'occurrence d'un séisme.

### 2.6 A partir de l'analyse du document 12, dégagez les arguments qui ont conduit les chercheurs à prévoir qu'un séisme important se produirait à Parkfield pendant la période 1988 – 1993.

La répartition sur une droite de 5 des 6 séismes étudiés dans le document 12b met en évidence une récurrence régulière au cours du temps à laquelle le séisme de 1934 semble déroger.

Sur le document 12a chaque séisme semble coïncider avec le seuil de contrainte (différentielle)  $\sigma_1$  qui pourrait correspondre à un seuil de rupture atteint à intervalle de temps régulier par suite de l'accumulation de contraintes liées au déplacement des plaques de part et d'autre de la faille de San Andreas. Là encore, le séisme de 1934 se distingue des autres, il s'est produit pour un seuil de contrainte  $\sigma_2$  inférieur à  $\sigma_1$ .

La récurrence observée des séismes indique que le fonctionnement d'une faille active s'organise suivant un cycle sismique. Entre deux séismes, la faille est bloquée : la déformation élastique s'accumule sans que le seuil de rupture ne soit atteint. Lorsque le seuil de rupture est atteint, il se produit un glissement instantané le long du plan de faille, et

la valeur de la contrainte chute brutalement, puis augmente à nouveau après l'arrêt du déplacement, ce qui initie un nouveau cycle, à l'issue duquel on peut s'attendre à un séisme.

Ainsi, c'est la mise en évidence de cycles sismiques pour la faille de San Andreas et la détermination de la durée de ce cycle à l'aide des séismes passés qui a conduit les chercheurs à prévoir un séisme à Parkfield entre 1988 et 1993.

### **2.7 Que vous apportent ces éléments au sujet de la prévision de l'aléa sismique en Californie ?**

Comme le montre le modèle de récurrence de Parkfield présenté dans le document 12a, la connaissance des cycles sismiques pour une faille active peut contribuer à évaluer la probabilité d'occurrence d'un nouveau séisme.

Cependant, on peut relever que le séisme de 1934 ne répond pas exactement au modèle, et qu'il n'y a pas eu de séisme à Parkfield entre 1988 et 1993 : celui-ci s'est produit plus tardivement, en 2004.

Ainsi, 2 séismes sur 7 depuis 1857, soit environ 150 ans, ne suivent pas précisément le modèle proposé.

On peut en conclure que ce modèle seul ne peut pas suffire à estimer la probabilité d'occurrence d'un nouveau séisme dans la région de Parkfield, ou plus généralement en Californie. D'autres données comme celles issues de la géodésie et de l'interférométrie radar sont nécessaires pour pouvoir affiner l'estimation de l'aléa, mais à ce jour on ne sait pas prévoir un événement sismique.

### **3. De l'aléa au risque sismique en Californie**

**En intégrant l'exploitation des documents 13, 14 et 15, discutez les notions d'aléa et de risque sismique en Californie.**

Le document 13 présente une évaluation de l'aléa sismique en Californie qui présente la probabilité qu'un séisme de magnitude  $\geq 6,7$  se produise en Californie dans un délai de 30 ans. Cette probabilité a été estimée pour chaque segment de faille et l'on constate que de très nombreux segments alignés sur un axe NW – SE et passant par le secteur de San Francisco et de Los Angeles présentent une probabilité  $\geq 10\%$ . Les segments situés les plus au SE de la Californie présentent même une probabilité de plus de 50 %.

Le document 14 montre plus précisément la probabilité d'occurrence d'un séisme de magnitude  $\geq 6,7$  avant 2032, et l'on constate des valeurs variant de 3 à 27 % selon les segments de faille. Cependant, il est indiqué une probabilité de 62 % qu'un ou plusieurs séismes de magnitude  $\geq 6,7$  se produise dans la région de la baie de San Francisco en prenant en compte 14 % de risques liés à des séismes se produisant ailleurs que sur les failles connues actuellement.

Ces deux documents présentent une cartographie de l'aléa sismique, qui doit être confronté aux enjeux pour estimer un risque sismique.

Les enjeux sont représentés par les populations, les infrastructures et activités humaines. Ils peuvent être discutés ici à l'aide du document 15 qui cartographie la densité de la population en Californie en 2010.

On constate que de vastes secteurs présentent une densité de population très faible,  $\leq 1$  habitant/mile<sup>2</sup> et que la population est concentrée autour de certaines villes comme San Francisco, Sacramento ou Los Angeles qui présentent une densité de population  $\geq 5000$  1 habitant/mile<sup>2</sup>. En particulier, on observe une densité importante de population tout autour de la baie de San Francisco.

Les enjeux sont donc très importants dans des zones qui sont concernées par un aléa sismique fort, le risque sismique est donc élevé pour ces zones. Un moyen de faire diminuer ce risque est de diminuer la vulnérabilité, c'est-à-dire l'exposition des enjeux à l'aléa, en établissant un plan de prévention du risque (règles de construction antisismiques, information des populations, plans d'intervention des secours...).

A partir de l'exploitation du document 1 :

**1. Analysez l'effet de la température sur l'activité métabolique des poissons et proposez une hypothèse explicative.**

A 10 °C, la consommation d'O<sub>2</sub> est de 10 L/g/h pour les poissons acclimatés à 24 °C, de 40 L/g/h pour ceux acclimatés à 4 °C, alors qu'à une température de 20 °C, elle est de 20 L/g/h pour les poissons acclimatés à 24 °C et de 80 L/g/h pour ceux acclimatés à 4 °C : plus la température est élevée, plus l'activité métabolique des poissons est importante.

Comme l'activité métabolique d'un organisme dépend de la vitesse des réactions du métabolisme catalysées par des enzymes, on peut faire l'hypothèse que c'est l'effet de la température sur l'activité enzymatique qui explique ces résultats : plus la température est élevée, plus l'activité enzymatique l'est aussi (jusqu'à une température optimale en général de l'ordre de 35 °C) en raison de l'augmentation de l'agitation moléculaire qui favorise la rencontre enzyme – substrat.

**2. Confrontez les résultats obtenus chez le poisson acclimaté à 4 °C et chez le poisson acclimaté à 24 °C et montrez qu'il y a une acclimatation.**

Quelle que soit la température, la consommation d'O<sub>2</sub> – donc l'activité métabolique – du poisson acclimaté à 4 °C est plus élevée que celle du poisson acclimaté à 24 °C. On peut également remarquer que lorsque la température coïncide avec la température d'acclimatation, la consommation d'O<sub>2</sub> est d'environ 22,5 L/g/h pour les deux groupes de poissons.

L'activité métabolique semble donc ajustée à la température d'acclimatation.

**3. A partir de vos connaissances sur les agents impliqués dans les processus cellulaires du métabolisme, proposez une hypothèse expliquant cette acclimatation.**

Les agents impliqués dans les processus cellulaires du métabolisme sont les enzymes.

On peut faire l'hypothèse que l'acclimatation repose soit sur la synthèse d'enzymes différentes, soit sur un contrôle de l'activité enzymatique en lien avec la température, avec pour conséquence une température optimale d'activité des enzymes décalée vers des températures plus faibles lorsque les poissons sont acclimatés au froid, ou vers des températures plus élevées lorsque les poissons sont acclimatés au chaud.

**4. A partir des données précédentes et des informations issues de l'exploitation du document 2, identifiez les contraintes du milieu aquatique en hiver et en été.**

La quantité d'O<sub>2</sub> dissous dans l'eau est de 8 g/L à 8 °C et de 6 g/L à 30 °C. Elle est donc d'autant plus faible que la température est élevée.

En été, alors que l'eau est plus chaude, la contrainte est donc une limitation de la disponibilité en O<sub>2</sub> dans le milieu.

En hiver, la température du milieu plus faible a pour conséquence une température corporelle plus faible également puisque les poissons Téléostéens sont ectothermes. Or la température limite la vitesse des réactions du métabolisme. Elle représente donc une contrainte du milieu en hiver.

**5. A partir de l'exploitation du document 3, dégagez l'effet de la température sur l'hémoglobine et proposez une hypothèse pour justifier l'avantage d'un tel comportement de la protéine à la température.**

Il s'agit ici de comparer pour les deux groupes de poissons la P<sub>50</sub> de l'hémoglobine à 9 °C et à 24 °C.

Pour une température de 9 °C, la P<sub>50</sub> (pression partielle en O<sub>2</sub> pour laquelle 50 % des molécules d'hémoglobine ont fixé du O<sub>2</sub>) est de 2,5 mm Hg pour les poissons acclimatés au chaud, de 4 mm Hg pour les poissons acclimatés au froid, alors qu'à une température de 24 °C elle est de 8 mm Hg pour les premiers et 12,5 mm Hg pour les seconds.

Pour les deux groupes de poissons, plus la température est élevée et plus la P<sub>50</sub> est faible, ce qui traduit une moindre affinité de l'Hb pour O<sub>2</sub>.

L'hémoglobine délivre donc davantage d'O<sub>2</sub> aux tissus lorsque la température est plus élevée. Cette propriété de l'hémoglobine permet une consommation d'O<sub>2</sub> plus importante à température élevée comme on l'a constaté dans le document 1.

**6. Montrez les conséquences de l'acclimatation au froid et au chaud sur le fonctionnement de l'hémoglobine lorsque les températures sont estivales et hivernales. Discutez des avantages conférés par l'acclimatation.**

La comparaison est ici effectuée entre le groupe de poissons acclimatés au froid et ceux acclimatés au chaud.

Que ce soit en milieu chaud ou froid, la  $P_{50}$  de l'hémoglobine des poissons acclimatés au froid est plus élevée que celle des poissons acclimatés au chaud.

Ce constat peut être mis en relation avec les observations effectuées sur le document 1 : on a vu que pour une même température, la consommation d' $O_2$  est plus importante chez les poissons acclimatés au froid, or si la  $P_{50}$  est plus faible, l'hémoglobine délivre davantage d' $O_2$  aux tissus, ce qui permet cette consommation accrue.

### **7. Proposez des hypothèses de mécanisme de l'acclimatation saisonnière constatée au niveau de l'hémoglobine des poissons.**

L'affinité de l'hémoglobine pour l' $O_2$  dépend de facteurs du milieu tels que la température, la présence d'effecteurs allostériques ( $CO_2$ , pH, 2-3 DPG chez les Mammifères). On sait que chez les Mammifères, la modulation de la concentration en 2-3 DPG est un moyen de contrôle de la quantité d' $O_2$  prise en charge dans le sang. Il pourrait y avoir un mécanisme comparable chez les poissons Téléostéens.

D'autre part, la quantité d' $O_2$  prise en charge par le sang peut être modulée par la quantité d'hémoglobine présente. Mais cela n'expliquerait pas les modifications de  $P_{50}$  constatées dans le document 3.

Enfin, une modification portant sur les chaînes de globines constituant l'hémoglobine pourrait avoir un effet sur la  $P_{50}$ .

### **8. Analysez et interprétez les modifications des paramètres physiologiques mises en évidence dans le document 4.**

La prise en compte des écarts-type montre qu'il n'y a pas de différence significative pour les différents paramètres physiologiques mesurés – concentration sanguine en Hb et concentration sanguine en nucléotides triphosphates, qui jouent le même rôle que le 2-3 DPG des Mammifères.

Ainsi, ni la concentration en hémoglobine, ni la concentration en nucléotide triphosphate, effecteur allostérique de l'hémoglobine, ne peuvent expliquer les résultats présentés dans le document 3. Ces hypothèses sont donc réfutées.

### **9. Analysez et interprétez les résultats présentés dans les documents 5a et 5b.**

L'électrophorèse présentée dans le document 5a montre 14 bandes différentes (bien que peu visible pour C2), or l'électrophorèse a été réalisée en conditions non dénaturantes, ce qui signifie que les sous-unités de l'hémoglobine n'ont pas été séparées. Il existe donc 14 formes différentes d'hémoglobine chez les truites étudiées, dont l'abondance est variable.

On nous indique que ces molécules sont différents isoformes de l'hémoglobine, c'est-à-dire des variétés différentes qui présentent des propriétés physiologiques semblables mais de faibles différences dans leurs séquences d'acides aminés. Ces faibles différences pourraient expliquer une affinité différente pour  $O_2$ , donc une  $P_{50}$  différente d'une molécule à l'autre.

La comparaison de l'abondance des différents isoformes présents chez les truites acclimatées à 10 et à 20 °C présentée dans le document 5b montre qu'il n'y a pas de différence significative pour les isoformes A8, A7, A5, A2, A1, C1, C2, C3, C4 (les barres d'erreurs se chevauchent).

En revanche, pour les isoformes A6, A4, A3, C5 et C6, les barres d'erreurs ne se chevauchent pas : il y a significativement plus d'isoformes C5 et C6 chez les truites acclimatées au froid et plus d'isoformes A6 (différence faible néanmoins), A4 et A3 chez les truites acclimatées à 20 °C.

### **10. Quelle hypothèse pouvez-vous retenir concernant le mécanisme de l'acclimatation saisonnière constatée au niveau de l'hémoglobine des poissons ?**

On peut donc retenir l'hypothèse que c'est la synthèse de certains isoformes différents de l'hémoglobine selon que le poisson est acclimaté au chaud ou au froid qui explique les différences de  $P_{50}$  constatées dans le document 3.

### **11. A partir de l'analyse du document 6, dégagez les modifications histologiques liées à l'acclimatation saisonnière.**

Chez les poissons acclimatés à 28 °C, on trouve de 0 à 6 capillaires sanguins par fibre musculaire, et en majorité – près de 40 % – elles en contiennent deux.

En revanche, chez les poissons acclimatés à 2 °C, on observe de 2 à 8 capillaires sanguins par fibre musculaire, et en majorité – environ 25 % – elles en contiennent 4.

La vascularisation des fibres musculaires est donc plus développée chez les poissons acclimatés au froid.

Chez les poissons acclimatés à 28 °C, les mitochondries occupent de 0 à 25 % du volume des fibres musculaires et très majoritairement de 5 à 15 %

En revanche, chez les poissons acclimatés à 2 °C, les mitochondries occupent de 15 à 55 % du volume des fibres musculaires et majoritairement entre 20 et 35 %.

Les mitochondries sont donc bien plus nombreuses dans les fibres musculaires des poissons acclimatés au froid.

## **12. Confrontez ces constats aux données du document 1.**

Les deux modifications histologiques constatées chez les poissons acclimatés au froid permettent d'une part un meilleur approvisionnement en O<sub>2</sub> puisque les fibres musculaires sont davantage vascularisées, et d'autre part une utilisation accrue d'O<sub>2</sub> puisque les mitochondries sont les organites qui réalisent la respiration cellulaire.

Ces deux constats expliquent la consommation plus importante d'O<sub>2</sub> chez les poissons acclimatés au froid, comme on l'a constaté dans le document 1.

## **13. A partir de l'exploitation des documents 7a et 7b, montrez l'influence de l'acclimatation saisonnière sur les conditions de diffusion du dioxygène vers les cellules musculaires.**

Chez les bars rayés, comme le montre le document 7a, le dioxygène cellulaire est lié à la myoglobine, protéine de la fibre musculaire qui a la propriété de fixer l'O<sub>2</sub> grâce à un hème, comme le fait chacune des sous-unités de l'hémoglobine. Cette protéine se distingue cependant de l'hémoglobine par sa courbe de saturation pour l'O<sub>2</sub>, qui est une hyperbole à asymptote horizontale représentant le plateau de saturation (cette cinétique est celle d'une protéine à structure tertiaire). Elle est capable de fixer le dioxygène même pour des PO<sub>2</sub> très faibles, ce qui lui confère un rôle de molécule de stockage du dioxygène.

Globalement, la quantité de myoglobine ayant fixé du O<sub>2</sub> en fonction de la PO<sub>2</sub> est assez similaire que les bars aient été acclimatés à 25 °C ou à 5 °C. La différence concerne le seuil maximal qui est d'environ 35 % chez les premiers et de près de 45 % chez les seconds.

Le stockage d'O<sub>2</sub> dans les cellules musculaires grâce à la myoglobine sera donc plus important en hiver qu'en été.

D'autre part, le document montre que l'O<sub>2</sub> peut aussi être lié aux lipides intracellulaires. Il y a une proportionnalité entre la PO<sub>2</sub> et la quantité d'O<sub>2</sub> lié aux lipides dans les deux cas, cependant pour une P<sub>50</sub> de 0,03 atm, chez les poissons acclimatés à 25 °C il y a environ 5 nmol d'O<sub>2</sub> lié par gramme de lipides alors qu'il y en a environ 40 nmol chez ceux acclimatés à 5 °C.

Chez les poissons acclimatés au froid, les lipides sont capables de fixer environ 8 fois plus d'O<sub>2</sub> que chez les poissons acclimatés au chaud.

Le document 7b montre que la fraction cellulaire occupée par les lipides est d'environ 0,008 chez les poissons acclimatés à 25 °C et de 0,08 chez les poissons acclimatés à 5 °C, soit 10 fois plus.

Il y a donc beaucoup plus de lipides (la différence est très significative : les barres d'erreurs ne se chevauchent pas) chez les poissons acclimatés à 5 °C.

Or, comme on l'a vu précédemment, l'O<sub>2</sub> peut s'associer aux lipides, et ce davantage chez les poissons acclimatés à 5 °C. En conséquence, une quantité accrue d'O<sub>2</sub> est disponible dans la cellule musculaire chez les poissons acclimatés à 5 °C.

NB : La part importante du volume cellulaire occupé par les mitochondries, organites riches en endomembranes contenant des lipides, peut expliquer en partie l'augmentation de la quantité de lipides intracellulaires.

La solubilité de l'O<sub>2</sub> dans les tissus musculaires est presque deux fois plus élevée chez les poissons acclimatés à 5 °C que chez les poissons acclimatés à 25 °C. Là encore, les barres d'erreurs ne se chevauchent pas : les différences sont significatives.

Cette solubilité accrue facilite la mise à disposition de l'O<sub>2</sub> pour son utilisation dans la cellule musculaire.

Ainsi, les différentes caractéristiques étudiées ici concourent à la mise à disposition accrue d'O<sub>2</sub> pour le métabolisme énergétique de la cellule musculaire chez les poissons acclimatés à l'hiver.