

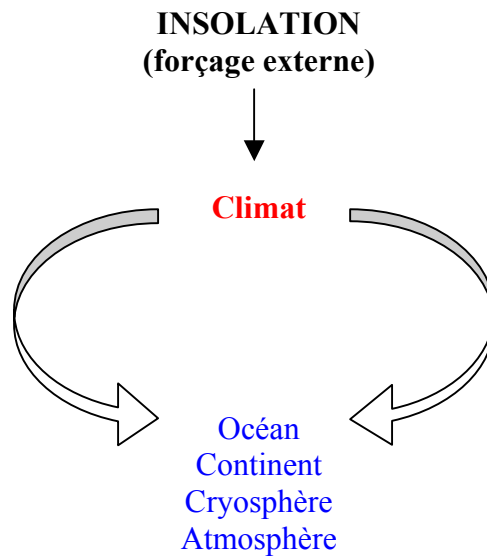
PROXY

Ce que nous dit le passé récent

L'ère quaternaire (1.8 MA à l'actuel)

Variations climatiques importantes entre des périodes glaciaires et des périodes interglaciaires
...

- ⇒ Facteur forçant majeur du climat
- ⇒ Changement de l'atmosphère, des océans, des continents et des glaces.



« Archive » marines, continentales et glaciaires témoignent des changements climatiques.

- ⇒ Reconstitutions précises de l'évolution des paléoenvironnements marins, continentaux et glaciaires du quaternaire en réponse aux changements climatiques.
- ⇒ Nécessité d'indicateurs environnementaux précis.

I: Définition

1- Proxy

Juridique : Procuracy, pouvoir, mandat.

Scientifique ; Outil permettant une quantification, une semi-quantification ou une estimation d'une (ou plusieurs) variable(s) abiotique(s) d'un écosystème donné.

=

Indicateur ou traceur d'un paramètre environnemental (physico-chimique)

Nécessité de « calibration » dans l'actuel de la signification du proxy (ou traceur)

Variable environnemental
=
fonction (proxy)

2- Les proxies (micro-) paléontologiques

- Pollens et spore
- Diatomées
- Coccolithophorides
- Dinoflagellé
- Foraminifères planctoniques
- Foraminifères benthiques
- Ptéropodes
- Ostracodes
- Otolithes

+ Coraux

En Résumé

Organismes fossilisables dans diverses « archives »
Organismes « calibrables » dans l'actuel.

TRES PROXIES (INDICATEURS) PALEONTOLOGIQUES DES CONDITIONS PALEO-ENVIRONNEMENTALES.

3- Les proxies sédimentaires (lithologiques)

- Analyse calorimétrique
- Analyse granulométrique standard
- Analyse aux rayons X
- Identification des microcharbons
- Identification des cendres / verres volcaniques

Analyse calorimétrique

⇒ Détermination des **couleurs** des sédiments à partir de la charte MUNSELL SOIL COLOR CHART.

= **fonction (phase solide minérale et organique)**

⇒ Dépôts marins, margino-littoraux et dulçaquicoles.

Analyse granulométrique standard

⇒ Détermination du **faciès** lithologique et des **classes granulométriques**.
⇒ Dépôts marins, margino-littoraux et dulçaquicoles.

Interprétation en terme d'hydrodynamisme du milieu en terme de processus de dépôts.

Analyse aux rayons X

- ⇒ Détermination des **structures** sédimentaires difficilement détectables à l'œil nu.
- ⇒ Dépôts marins, margino-littoraux et dulçaquicoles.

Interprétation en terme d'hydrodynamisme du milieu en terme de processus de dépôts, en terme de bioturbation.

Identification de microcharbons

- ⇒ Dépôts marins margino-littoraux et aquadulcicoles.

Identification des cendres / verres volcaniques

- ⇒ Dépôts marins margino-littoraux et aquadulcicoles.

4- Les proxies géochimiques

Eléments chimiques mesurés sur le sédiment et la glace.

Eléments chimiques mesurés sur les éléments biogènes.

Eléments chimiques mesurés sur la matière organique particulaire.

5- Les variables abiotiques (environnementales)

Biotopes de différents écosystèmes :

- Biotopes continentaux et cryosphérique
=> température, précipitation, volume glaciaire, transports éoliens ...
- Biotopes pélagiques (marins à aquadulcicoles)
=> température, salinité, production primaire, richesse en nutrilites ...
- Biotopes benthiques (marins à aquadulcicoles)
=> Température, salinité, productivités exportés, processus sédimentaires, dégradation de matières organiques, oxygénations ...

II : Quelques principes d'utilisation

1- Etudes actuelles nécessaires : « calibration »

Etudes écologiques dans l'actuel pour comprendre les exigences écologiques des organismes utilisés comme proxies (traceurs).

ECOLOGIE

Espèces (végétaux / animaux / protistes)
Tempérament écologique défini
Limites de tolérance définies

Etudes sédimentologiques et géochimiques dans l'actuel pour comprendre les processus physico-chimiques de transfert de la matière dans les compartiments atmosphère / océan / continent / glace.

GEOSCIENCES

Transfert des éléments chimiques et de la matière organique et minérale.

2- Les analyses faunistiques / florales classiques

Cible :

Groupe micropaléontologique (proxy)

Etudes écologiques :

- Assemblages faunistiques actuels
- Associations végétales actuelles

Paramètres environnementaux des biotopes.

⇒ Détermination du (des) facteur(s) écologique(s) limitant(s).

3- Les fonctions de transfert

Cible :

Groupe micropaléontologique (proxy)

Bases de données écologiques :

Assemblages faunistiques actuels ou associations florales actuelles + paramètres environnementaux.

Large éventail géographique (échelle mondiale)

Analyse statistique préliminaire :

- (1) Analyse en régression multivariée
- (2) Analyse en composante principale

Comparaisons statistiques entre les assemblages faunistiques ou les associations florales et les paramètres environnementaux.

⇒ Détermination du (des) facteur(s) écologique(s) limitant(s) (corrélation)

⇒ Détermination d'une équation mathématique pour calculer les valeurs de cas facteurs écologiques limitant.

Exemples de fonctions de transfert très utilisées :

Foraminifères planctoniques => Température des eaux de surface

Diatomées => Température des eaux de surface

Pollens / spores => Température atmosphériques et précipitations

III : Quelques proxies cryosphériques

Pour reconstituer :

- La température atmosphérique aux pôles
- Le volume des glaces
- L'extension des banquises
- Les débâcles d'icebergs

1- Constats

Zones polaires continentales
Zones sub-polaires continentale
Zones tempérées continentales

- Calottes glaciaires (Inlandsis)
- Glacier de montagne

⇒ Développement préférentiel hémisphère nord lors des périodes froides.

Variations de la température aux pôles et du volume glaciaire entre les périodes glaciaires et interglaciaires.

2- Le température aux pôles

Hémisphère Nord : Groenland

Pôle sud : Antarctique

Carotte de glace = archive glaciaire jusqu'à 740 000 ans.

Proxy géochimique

Signature isotopique de l'oxygène et de l'hydrogène dans la molécule H₂O (glace).

=

Fonction linéaire de la température atmosphérique moyenne.

⇒ **Reconstitution quantitatives** des valeurs de paléotempérature atmosphériques au niveau des calottes de glace.

3- Le volume des glaces

Proxy géochimique

Signature de l'oxygène dans la molécule de CaCO₃ (foraminifères benthiques),
via signature isotopique de l'oxygène dans la molécule H₂O (eau de mer).

Signature isotopique de l'oxygène dans la molécule H₂O (eau de mer).

Fonction du volume d'eau stocké dans les glaces polaires et les glaciers continentaux.

Les variations de l'oxygène de CaCO₃ des eaux océaniques sont enregistrées par les variations de l'oxygène du CaCO₃ des tests des foraminifères benthiques.

⇒ **Reconstitutions quantitatives** du volume de la cryosphère continentale dans le passé.

4- L'extension de la banquise

La banquise (= glace de mer), se développe d'une façon plus ou moins importante sur le domaine océanique.

Proxy micropaléontologique

Diatomées dites cryophiles associées à la banquise (« épicyrotic »).
Accumulation de frustules dans les sédiments sous-jacents.

Analyse faunistique classique des diatomées fossiles.

⇒ **Reconstitution qualitatives** de l'extension passée des banquise.

6- Les débâcles d'iceberg

Dans le passé, des icebergs détachés des calottes pouvaient migrer dans les zones subtropicales.

⇒ **migration vers les basses latitudes** ⇒ **fonte progressive.**

Décharges des sédiments terrigènes « grossiers » transportés depuis les domaines continentaux dans les bassins océaniques.

IRD, Ice-Rafted Detritus (/Debris)

Proxies sédimentologiques et géochimique :

Analyse **granulométrique**

Analyse de la **susceptibilité magnétique**

Analyse isotopique de certains éléments (terres rares, traces)

⇒ **Reconstitution qualitatives** des événements passés de débâcles d'icebergs et de leur extension.

IV : Quelques proxys marins

Pour reconstituer

- La température des eaux de surface
- La salinité des eaux de surface
- La productivité primaire des eaux de surface
- La productivité exportée au sédiments
- L'oxygénation des eaux de fond

1- La température des eaux de surface

Température et salinité caractérisent les masses d'eau (densité).

A. Analyse sur les alcénones :

Proxies géochimiques

Chaînes polypeptidiques organiques insaturées produites par les coccolithophoridés (et exportées avec les sédiments à la mort des organismes) = **alcénones**.

Indice d'insaturation U_{k37} de la matière organique.



Thermométrie biomoléculaire (SST Sea-Surface Température)

⇒ **Reconstitution quantitative** des paléo-températures des eaux de surface (+/- 1-1,5 °C)

B. Analyse du Mg/Ca des foraminifères planctoniques

Proxies géochimiques

Test d'un foraminifère planctonique en CaCO_3 (calcite) avec éléments-traces.

Substitution du Ca par du Mg dans la calcite en fonction de la température (gradient vers les tropiques).

⇒ **Bonne corrélation positive** entre Température (°C) et Mg/Ca.

⇒ **Reconstitution quantitative** des paléo-températures des eaux de surfaces (+/- 1-1,6 °C)

C. Analyses des assemblages de foraminifères planctoniques

Proxies micropaléontologiques

- Groupe d'espèces d'eaux chaudes (tropicales à sub-tropicales) (SPRUDTS)
- Groupe d'espèces d'eaux froides (sub-polaires à polaires)
- Groupe d'espèces d'eaux tempérées.

⇒ **Reconstitution qualitatives** des paléo-températures des eaux de surfaces.

Fonction de transfert appliquée aux assemblages fossiles (%)

D. Analyses des assemblages de diatomées, de coccolithophoridés et de dinoflagellé.

Assemblages fossiles (%)

⇒ **Reconstitution qualitatives** des paléo-températures des eaux de surfaces.

Fonction de transfert appliquée aux assemblages fossiles (%)

⇒ **Reconstitution quantitatives** des paléo-températures des eaux de surfaces.

2- La salinité des eaux de surfaces et des eaux de fond

Température et salinité caractérisent les masses d'eau (densité)

A. Analyse des assemblages fossiles de diatomées et de dinoflagellés

Proxies micropaléontologiques

Assemblages fossile (%)

Groupes d'organismes euryhalins.

Environnements marins salés => environnements confinés hypo ou hypersalins.

⇒ **Reconstitution qualitatives** des paléo-salinités des eaux de surfaces.

B. Analyse des assemblages fossiles de foraminifère benthiques et d'ostracodes

Proxies micropaléontologiques

Assemblages fossile (%)

Groupes d'organismes euryhalins.

Environnements marins salés => environnements confinés hypo ou hypersalins.

⇒ **Reconstitution qualitatives** des paléo-salinités des eaux de fond.

3- La production primaire et la productivité exportée

Il existe, dans l'actuel, une équation empirique exprimant la productivité exporté (Jz) en fonction de la production primaire (PP) et de la profondeur d'eau (z).

$$Jz = (z \times \sqrt{PP} \times (PP / z)) + ((5 / \sqrt{PP}) \times (PP / \sqrt{z}))$$

A. Pourcentage de carbone organique total

Proxies géochimiques

Corg %

(= % pondéral de carbone organique total dans le sédiment)

Théorie : taux d'accumulation de Corg dans le sédiment proportionnel au flux de Corg, proportionnel à la production primaire.

⇒ **Reconstitution quantitative** des paléo-PP des eaux de surface et des paléo-Jz.

Problèmes :

- **Effet diagénétique ?** Une matière organique résiduelle après plusieurs milliers d'années de dépôts.
- **Source du carbone organique ?** deux source potentielles : source marine, source continentale.
- **Phénomène de « focusing » ?** Matière organique remaniée se concentrant dans une zone de dépôt.
- **Effet anoxique ?** Oxydation des eaux de fond lors du dépôt et efficacité de la respiration benthique.

B. rapport Ba / Al

Proxies géochimiques

Baryum

(normalisé par rapport à Al (argiles) pour avoir les variations de concentration du Ba par rapport à la valeur lithogénique dans les sédiment)

Théorie :

La forme de la biobarite ($Ba SO_4$) dans la matière organique en voie de dégradation.

⇒ **reconstitution qualitatives** des paléo-PP des eaux de surface et des paléo-Jz.

Problème liés à la conservation de la biobarite dans le sédiment au cours du temps.

C. Pourcentage pondéral de SiO_2

Proxies géochimiques

Opale

(= % pondéral de silice des diatomées dans le sédiment)

Théorie : Production primaire siliceuse reflétant en grande partie la production primaire des eaux de surface.

⇒ **Reconstitutions qualitatives** des paléo-PP des eaux de surface et des paléo-Jz.

Problème liés à la préservation du message siliceux lors du dépôt et dans le sédiment, ou « focusing » et l'apport de silice biogénique non associée aux diatomées (radiolaires).

D. Analyse des assemblages de foraminifères benthiques

Proxies micropaléontologiques

Assemblages fossiles typiques de conditions eutrophiques, mésotrophiques ou oligotrophiques (> 150 μm)

Assemblage fossiles typiques d'apports saisonniers (espèces opportunistes, 63 – 150 μm).

Assemblage fossile => paléo-Jz => Paléo-PP
Assemblage fossile => Paléo-saisonnalité des apports et de la PP

- ⇒ **Reconstitutions qualitatives** de la PP des eaux de surface.
- ⇒ **Reconstitution qualitative** de la saisonnalité des dépôts.

4- L'origine de la matière organique détritique

2 sources : source marine + source continentale.

A. Analyse du rapport C/N de la matière organique détritique

Proxies géochimiques

C/N est élevé pour de la matière organique terrestre (> 15) et faible pour la matière organique marine (≥ 5)

- ⇒ **Reconstitutions qualitatives** de l'origine de la matière organique.

B. Analyse de $\delta^{13}C$ de la matière organique détritique

Proxies géochimiques

$\delta^{13}C = 20 \text{ ‰}$ pour le Corg marin, $\delta^{13}C = -30 \text{ ‰}$ pour le Corg continental.

- ⇒ **Reconstitutions qualitatives** de l'origine de la matière organique.

C. Analyse des biomarqueurs

Proxies géochimique

Lignine, cutine, sporopollenine sont des biomarqueurs (biopolymères très résistants à la dégradation) **d'une matière organique terrestre** (végétaux).

- ⇒ **Reconstitutions qualitatives** de l'origine de la matière organique.

5- Les apports terrigènes

2 types de transport : apports latéraux et apports verticaux.

A. Analyse granulométrique classique + R.X

Proxies sédimentologiques

- ⇒ **Reconstitutions qualitatives :**

- De l'hydrodynamisme du milieu de dépôt
- Des apports par courants gravitaires
- Des apports par courants de contours
- Des surfaces d'érosion
- Des laminassions

B. Analyse de la composition isotopique des sédiments terrigènes

Proxies géochimiques

Théorie : certains minéraux intègrent des éléments traces dans leur réseau cristallin et présentent alors une signature spécifique d'une zone géographique d'où ils sont originaires (bouclier)

⇒ **Reconstitutions qualitatives** des zones sources des particules sédimentaires terrigènes.

6- L'oxygénation des eaux de fond

Oxygénation des eaux de fond en fonction (...) de la ventilation de la colonne d'eau et de la production exportée (Jz).

A. Analyse des assemblages de foraminifères benthiques

Proxies micropaléontologiques

Assemblages fossiles typiques d'environnements sous-oxygénés et riches en matière organique (Zone à oxygène minimum ZOM)

Assemblage fossiles typiques d'environnements bien oxygénés.

⇒ **Reconstitution qualitatives** de la paléo-oxygénation des eaux de fond.

B. Analyse des assemblages fossiles d'ostracodes

Proxies micropaléontologiques

Assemblages fossiles typiques d'environnement sous-oxygénés.

Ostracodes à gros vestibule.

⇒ **Reconstitutions qualitatives** de la paléo-oxygénation des eaux de fond.

C. Analyse de $\delta^{13}\text{C}$ des foraminifères benthiques

Proxies géochimiques

Les eaux de fond océaniques en se déplaçant, « vieillissent » et s'enrichissent en ^{12}C par dégradation de la matière organique exportée (Jz)

La **signature $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 dissout** dans les eaux de fond change en fonction de l'âge des eaux de fond et en fonction de la **teneur en oxygène** des eaux de fond ...

⇒ **Les teneurs en oxygène dissout diminuent par rapport à la concentration en oxygène à saturation (AOU augmente)**

AOU = Oxygène à saturation – oxygénation réelle (Apparent Oxygen Utilization en ml/l)

⇒ **Relation empirique en $\delta^{13}\text{C}$ des eaux de fond et AOU.**

$$\delta^{13}\text{C} = 1.54 - (0.0074 \times \text{AOU})$$

Les variations du $\delta^{13}\text{C}$ des eaux océaniques de fond sont enregistrées par la $\delta^{13}\text{O}$ du CaCO_3 des tests de certaines espèces des **foraminifères benthiques**.

- ⇒ **Reconstitutions qualitatives** de la paléo-oxygénation (ventilation) des eaux de fond.
- ⇒ **Reconstitutions quantitatives** de la paléo-AOU dans les eaux de fond.

V : Quelques proxies continentaux

Pour reconstituer :

- **Les températures atmosphériques**
- **Les précipitations**

1- Analyses des pollens et des spores : les spectres polliniques

- (1) Capacité de dispersion des pollens et des spores plus ou moins importante en fonction des taxons.
- (2) Quantité de pollens / spores produits varie en fonction des espèces
- (3) Pollens et spores analysables dans carottes de sédiments, carottes de tourbe.

**Analyse pollinique d'un enregistrement :
Spectre pollinique d'une végétation.**

1 type de végétation = fonction (température, précipitation)

- ⇒ **Reconstitutions qualitatives** des paléo-températures atmosphérique et des paléo-précipitations à l'échelle locale ou régionale.

CONCLUSION

**Très grand nombre de proxies (traceurs / indicateurs)
pour reconstituer les paléo-environnements.**

**« Calibrations »
Toujours en cours
(Géologie / écologie)**

Bon proxies = outil de quantification précis et juste.

**Nécessité d'analyses multi-proxies (multi-traceurs)
pour reconstituer les relations passées entre
océan / continent / atmosphère / glace / climat.**

**Comprendre les paléoclimats
=
Comprendre les climats futurs.**