

La migration verticale du plancton

Jean-Philippe Labat
RdV de la Biodiversité
CPIE Littoral Basque
22/07/2021



Qu'est que c'est une migration ?

La migration animale est un déplacement qu'accomplissent certaines espèces d'un endroit à un autre, à plus ou moins grande échelle, pour différentes raisons. Elle implique un retour régulier dans la région de départ.

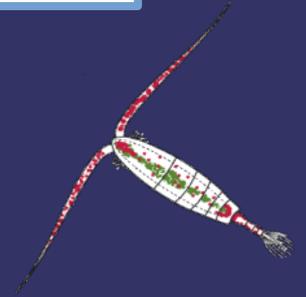
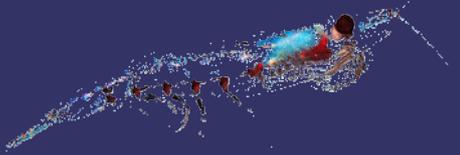
Étymologie de « migration » : du latin *mīgrātīo* n.f. : déplacement, transfèrement, émigration, passage.



Les moteurs des migrations

- Se nourrir : Recherche de la disponibilité de la nourriture végétale ou animale.
- Se protéger des prédateurs et des contraintes du milieu.
- Se retrouver pour s'apparier dans un endroit propice à la fécondation, la survie et la dispersion de sa progéniture.

La migration verticale du plancton



Les acteurs : organismes du plancton, «*Lato sensu*»



Qu'est que c'est que le plancton ?

Plancton
Lato
sensu

Le plancton est l'ensemble des organismes vivant dans la masse d'eau, le plus souvent en suspension et apparemment passivement.

Christian Andreas Victor Hensen, zoologiste allemand, 1887.

Étymologie de « Plancton » : qui est errant, vagabond, du grec ancien : errant, instable.

Le necton est un ensemble d'organismes vivant dans la masse d'eau et ayant la capacité de nage telle qu'ils peuvent se déplacer.

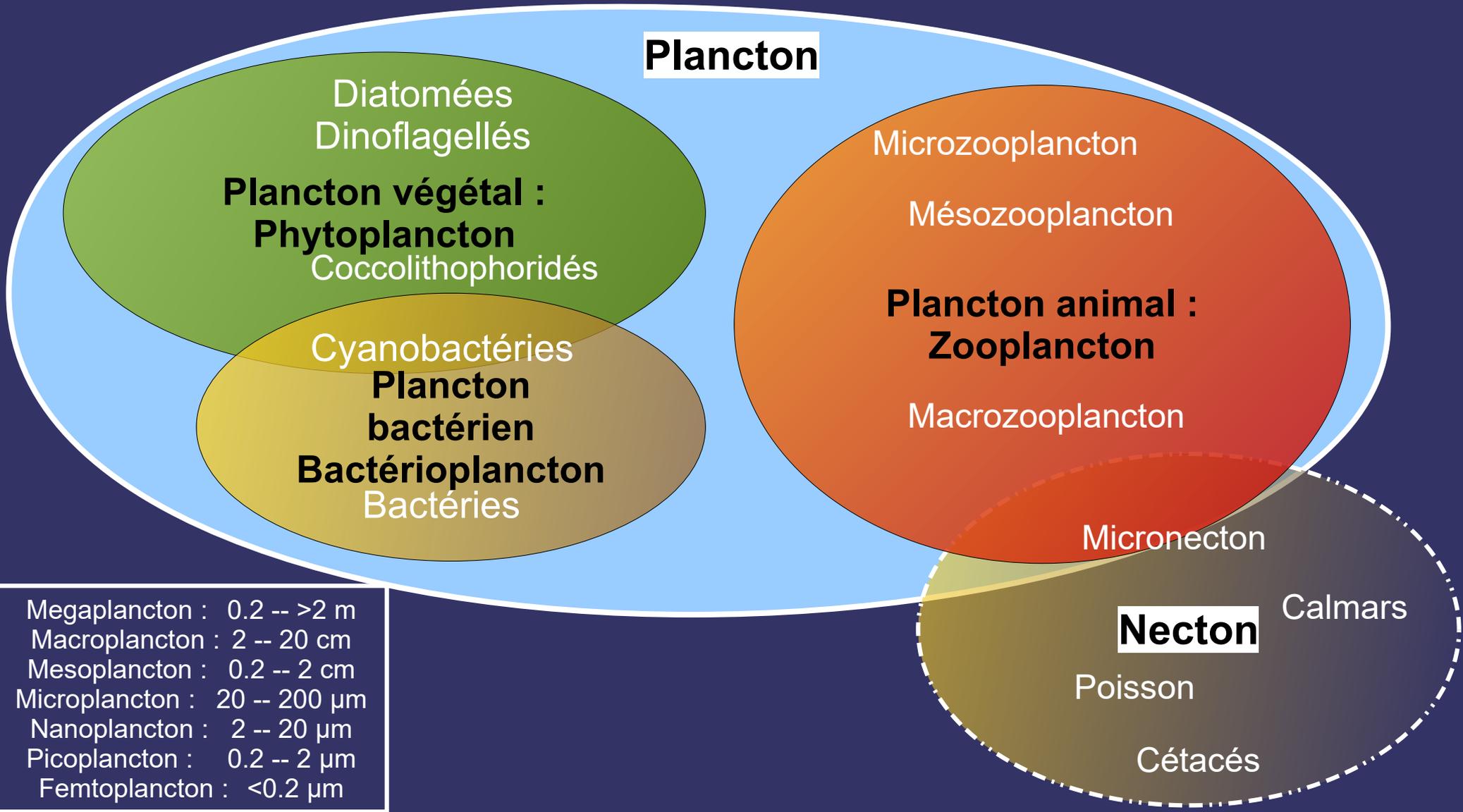
Une
partie

Ernst Haeckel, zoologiste allemand, 1890.

Étymologie du grec ancien «qui nage»

Continuum du critère déplacement

Diversité biologique du plancton «lato sensu»



Exemple d'organismes participant à la migration



Copépodes



Méduses



Cténophores



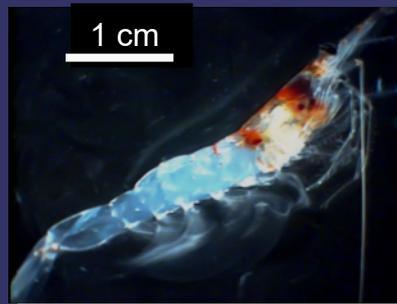
Calmars



« krill »



Mollusque ptéropode



Crevettes

ETC.

Macroplancton : 2 -- 20 cm

Mesoplancton : 0.2 -- 2 cm

Micronecton : 2 – 10 cm

Que représente la biomasse du zooplancton ?

« *The global total of mesozooplankton carbon biomass in the top 200 m of the ocean was estimated at **0.19 Pg C.** »*

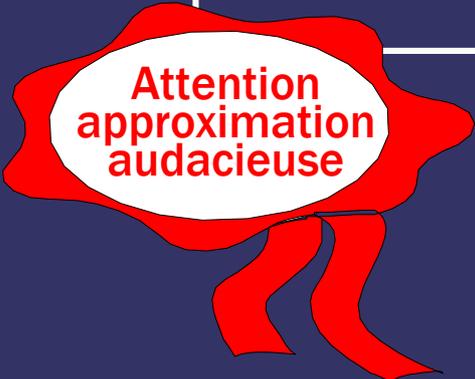
Moriarty, R. & O'Brien, T. D. Distribution of mesozooplankton biomass in the global ocean. *Earth Syst. Sci. Data* 5, 45–55 (2013).

Zooplancton

0,19 Petagrammes de Carbone ($0,19 \times 10^{15}$ g. C)

0,19 Gigatonnes de carbone (190 000 000 tonnes)

\cong 5 000 000 000 tonnes poids humide



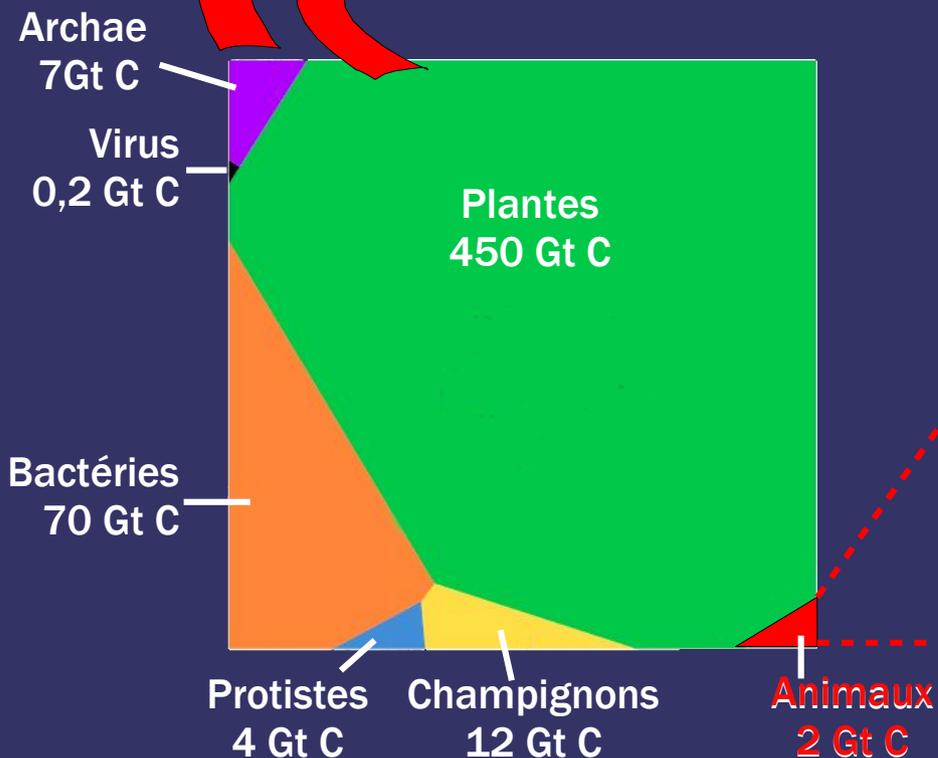
**Attention
approximation
audacieuse**

Que représente la biomasse du zooplancton ?

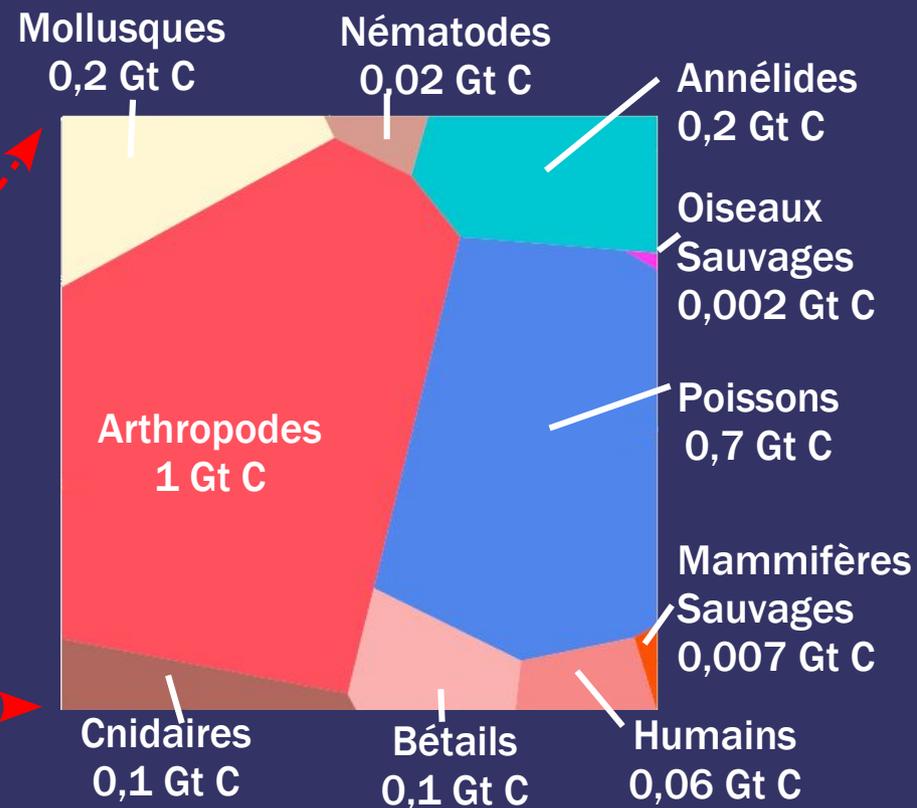
Zooplancton :
0,19 Gigatonnes de carbone

Attention
approximation
audacieuse

Biosphère 550 Gt C

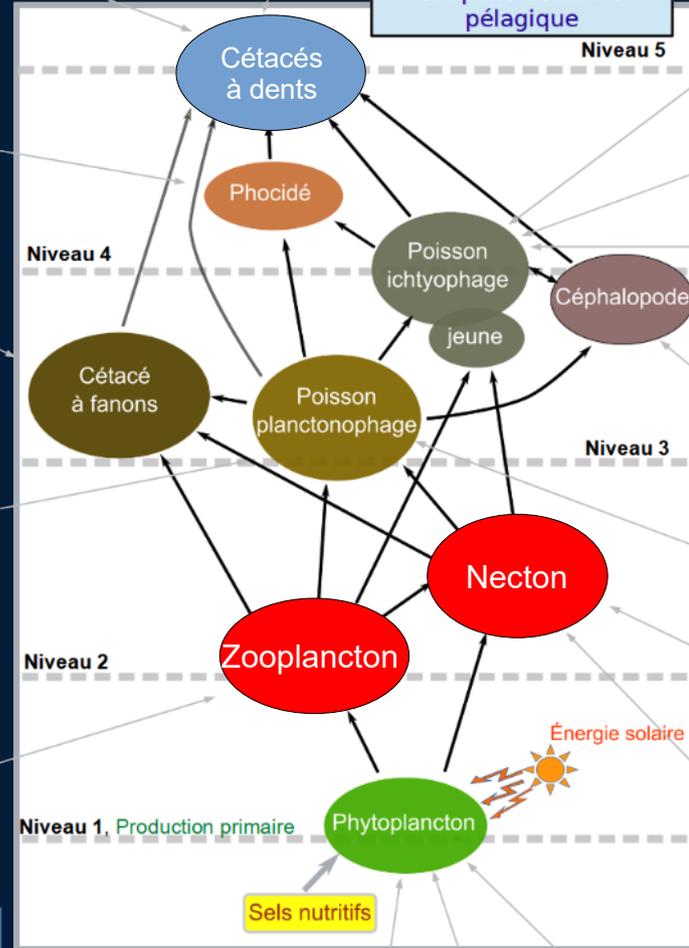


Animaux 2 Gt C



Du plancton aux cétacés dans le golfe de Gascogne

Réseau trophique simplifié domaine pélagique

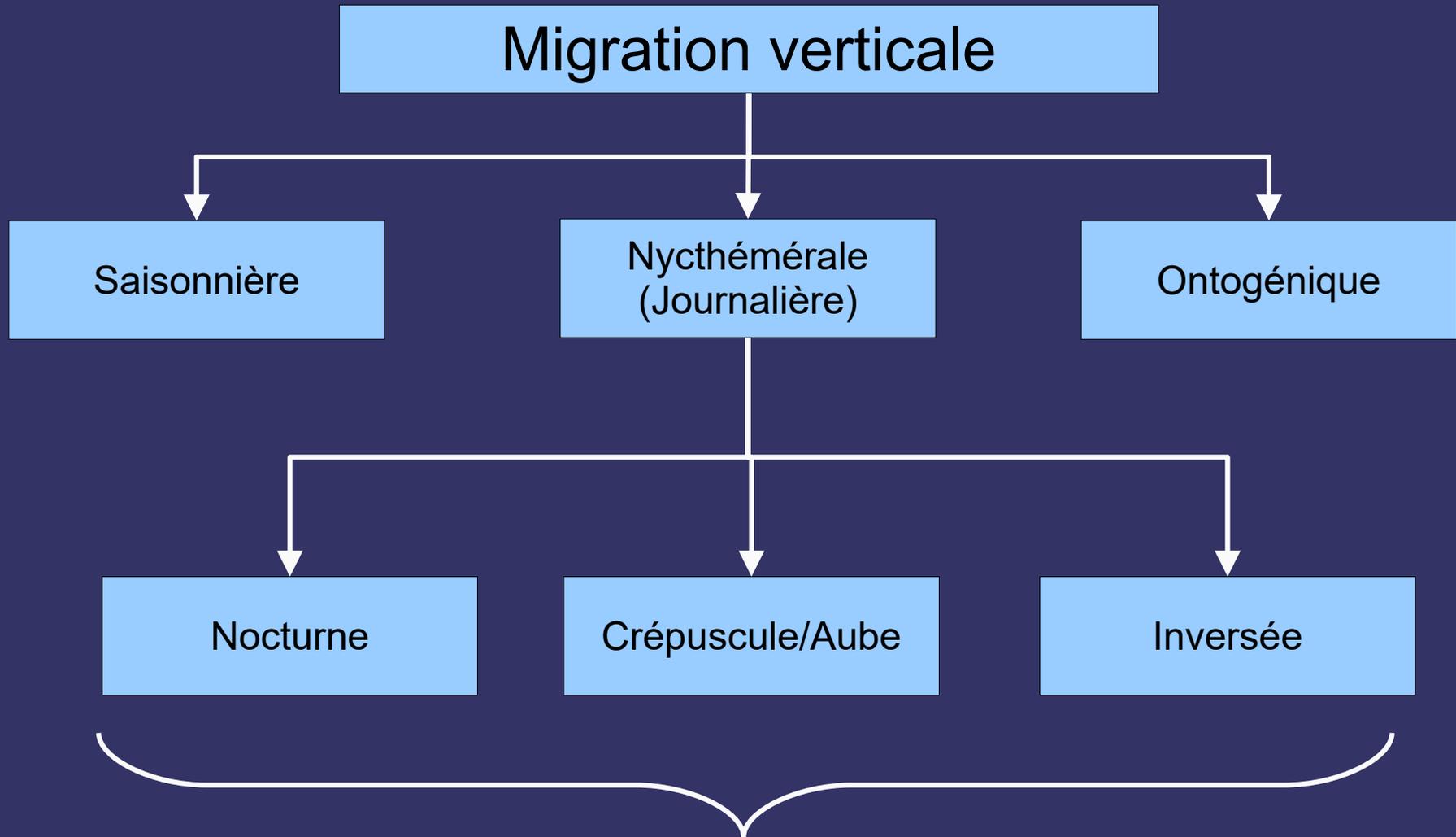


Le plancton :
Une place « centrale »
dans les écosystèmes
pélagiques.

This block contains various images of organisms from the trophic network:

- Cetaceans:** Photos of a group of cetaceans (Cetacés à dents), a common porpoise (Phoca vitulina - Phocidé commun), a common dolphin (Rorqual commun), a blue whale (Baleenoptère physeter), and a herring (Andros - Engraulis encrassolus).
- Fish:** Images of a red mullet (Thor rouge - Thunnus thynnus), a merluccius (Merlu - Merluccius merluccius), a morue (Morue - Gadus morhua), and a sardine (Sardine - Sardine pilchardus).
- Plankton and Invertebrates:** Images of a copepod (Copépode), a ctenophore (Cténophore), a common squid (Calmar - Loligo vulgaris), and a Norwegian krill (Megargyphanes norvegica).
- Microscopic Organisms:** Images of Ceratium sp., Prochlorococcus, Diatomée perinée, and Diatomée centrique.
- Other:** A small image of a Phronima sp. (amphipod).

Plusieurs types de migration verticale chez le plancton



MNV : migration nycthémérale verticale

DVM : « Diel Vertical Migration »

Que représente la migration verticale du zooplancton ?

*« À mon avis, le type de migration animale le plus important...
est la migration verticale diurne du zooplancton.*

*Qu'elles soient considérées en termes de nombre d'espèces
impliquées, de nombre d'animaux-kilomètres parcourus par an,
ou simplement de biomasse brute qui est transportée, ces
migrations verticales sont probablement les plus
impressionnantes des mouvements de masse d'animaux
temporellement coordonnés connus de la science. »*

Enright (1978)

Que représente le zooplancton

Zooplancton 5 000 000 000 tonnes poids humide

Que représente la migration du zooplancton :

≈20 % des organismes du zooplancton migrent
0,038 Gigatonnes de carbone (38 000 000)
L'ordre de grandeur :
1 000 000 000 tonnes poids humide
tous les jours.



Attention
approximation
audacieuse

2×10^6 Gnous de 0,2 t = 400 000 tonnes

Comment a t-on découvert ce phénomène ?

Le concept de migration verticale du zooplancton est né au 19^e siècle, sur la base des observations d'apparition et de disparition périodiques de crustacés pélagiques dans les eaux proches de la surface des lacs d'eau douce (**Cuvier, 1817**) et des océans (**Schmidtlein, 1879**).

Des enquêtes sur le terrain menées à la fin du 19^e siècle ont indiqué que ces modèles périodiques sont le résultat de la migration active du zooplancton dans la colonne d'eau (**Fuchs, 1882; Chun, 1888**).

Comment a t-on découvert l'ampleur du phénomène ?

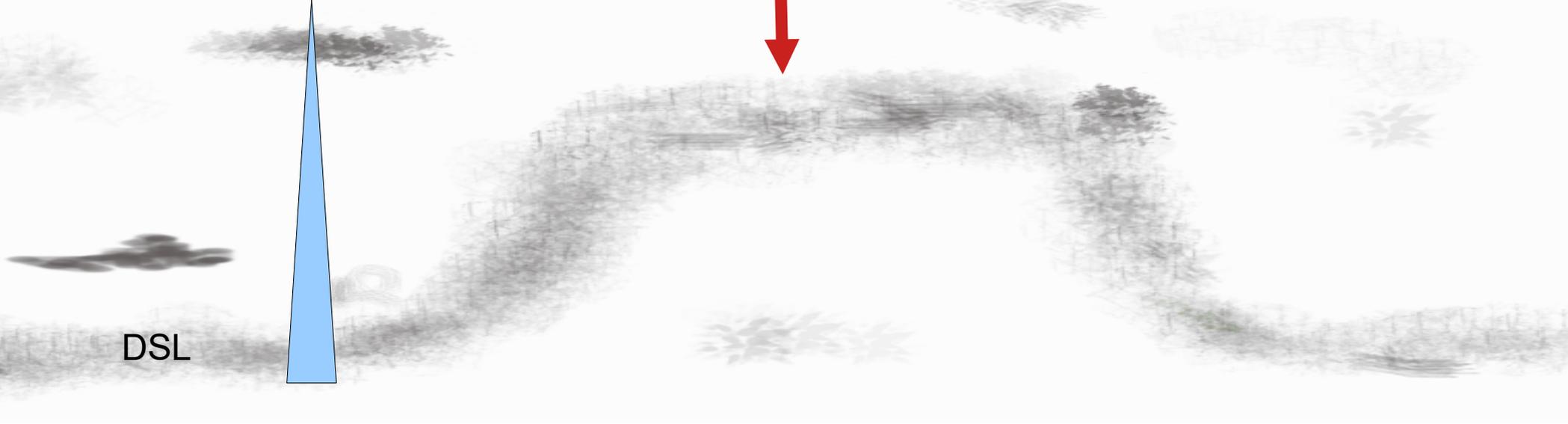
Pendant la Seconde Guerre mondiale, la marine américaine effectuait des essais de sonar lorsqu'elle a découvert la couche de diffusion profonde (DSL : « *Deep Scatting Layer* »).



Nuit



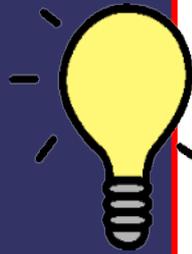
Fond fantôme ('phantom seabed')



DSL

Comment a t-on découvert l'ampleur du phénomène ?

La collaboration avec des biologistes a confirmé que les réverbérations observées par l'écho-sondeur étaient en fait liées à la migration verticale journalière d'animaux marins.

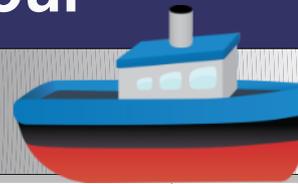


Mais c'est bien sur !!!
Dans l'océan il y a un déplacement vertical journalier d'organismes, important, régulier !

Jour

Nuit

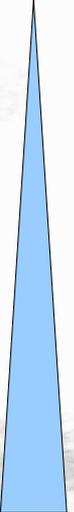
Jour



DSL

DSL

DSL



Comment étudier le phénomène ?

Répondre à la question : QUI est OU et QUAND

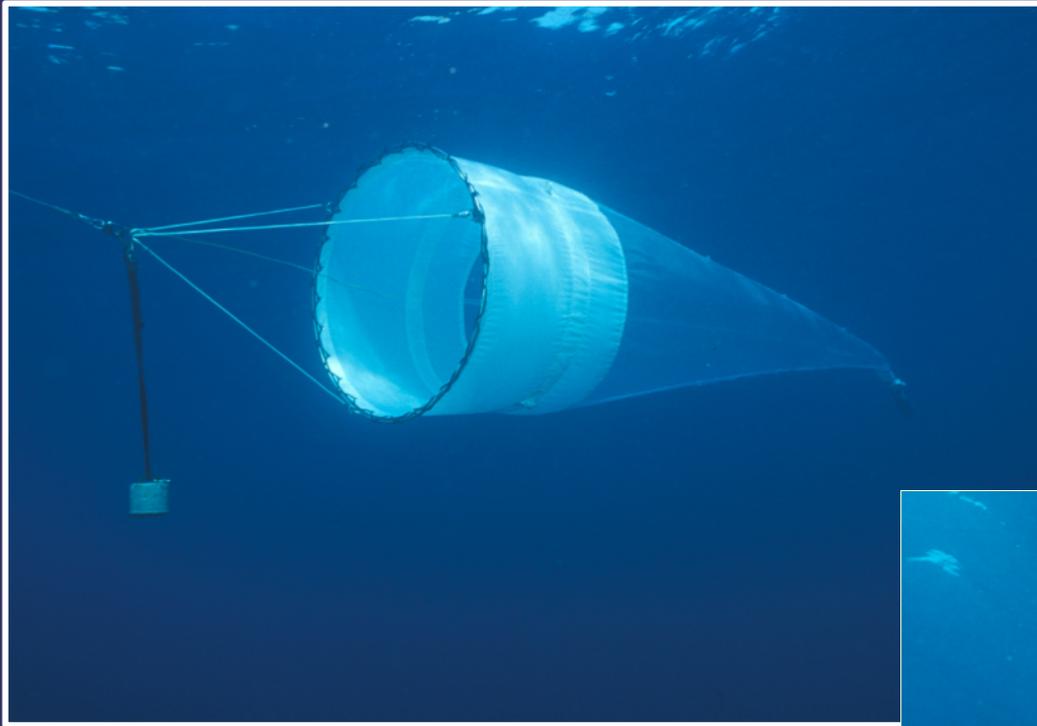
Souvent la réponse est partielle car une information fréquente dans le temps et abondante dans l'espace est difficile à obtenir notamment dans un espace à 3 dimensions comme l'océan

Digression sur les méthodes échantillonnages

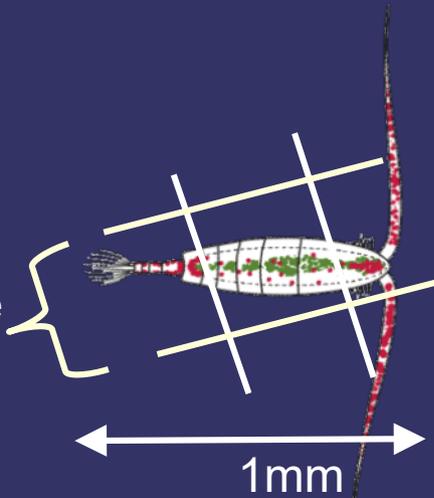
- Filets à plancton
- Écho-sondeurs (et sonar)
- ...

Qui est là ?

Filets pour l'échantillonnage du plancton



Filets :
Vide de maille
adapté à la taille
des organisme
recherchés

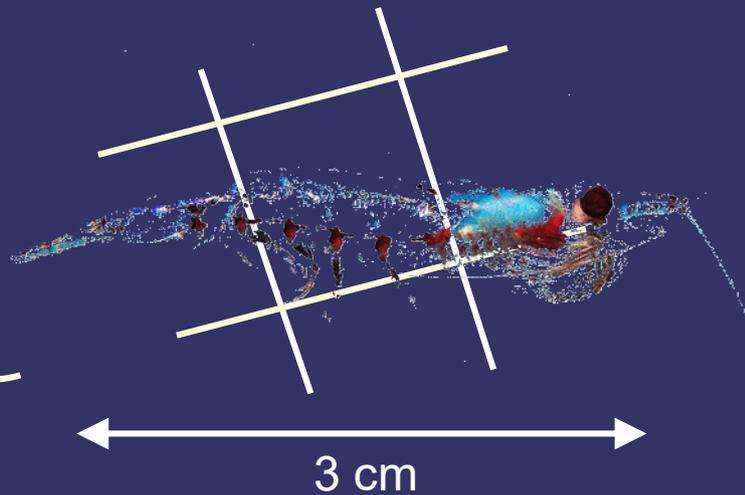


Qui est là ?

Les filets à micronecton

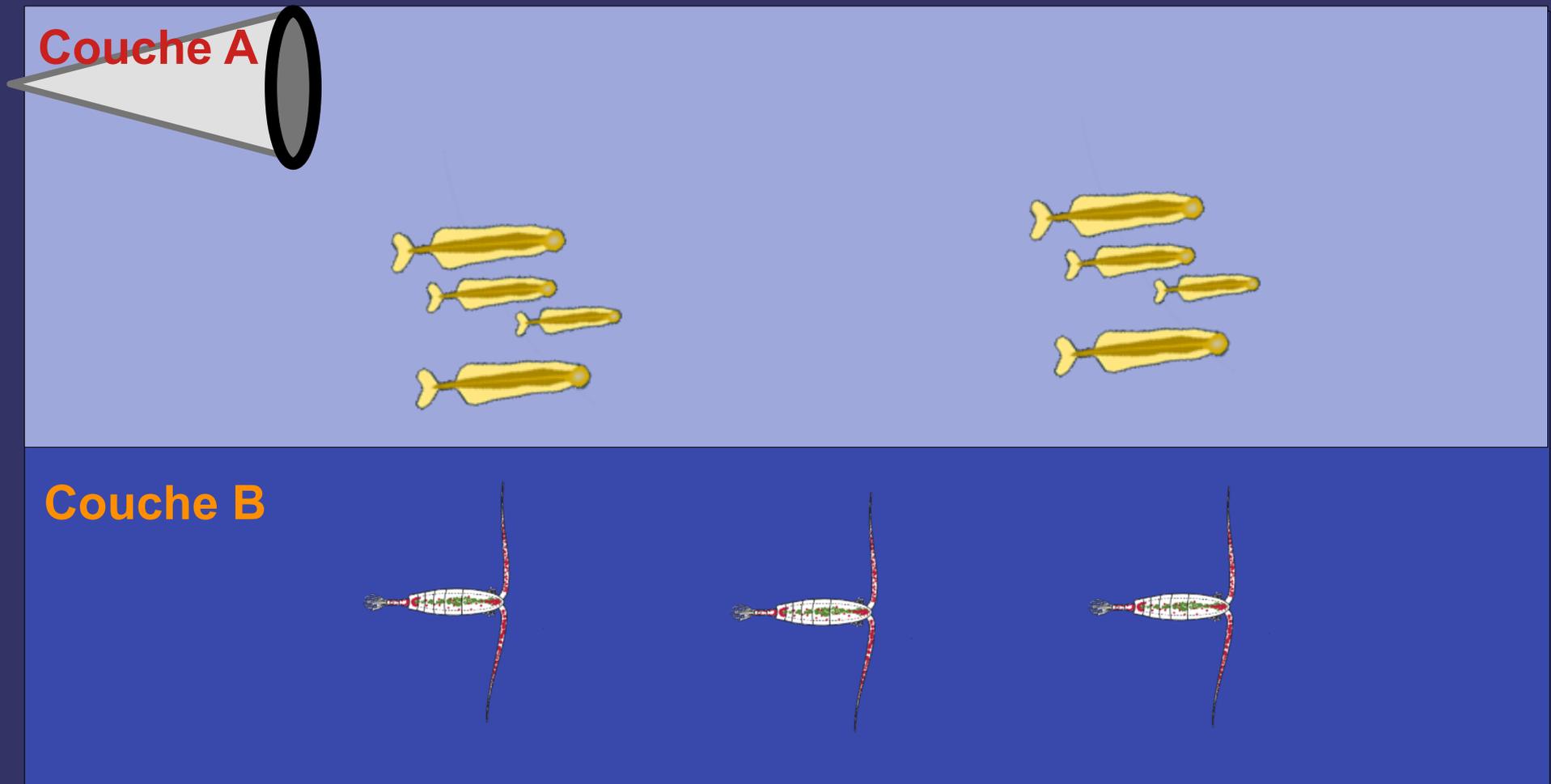


Filets :
Vide de maille
adapté à la taille
des organisme
recherchés



QUI est OU !

Une contrainte : prélever uniquement à une profondeur donnée

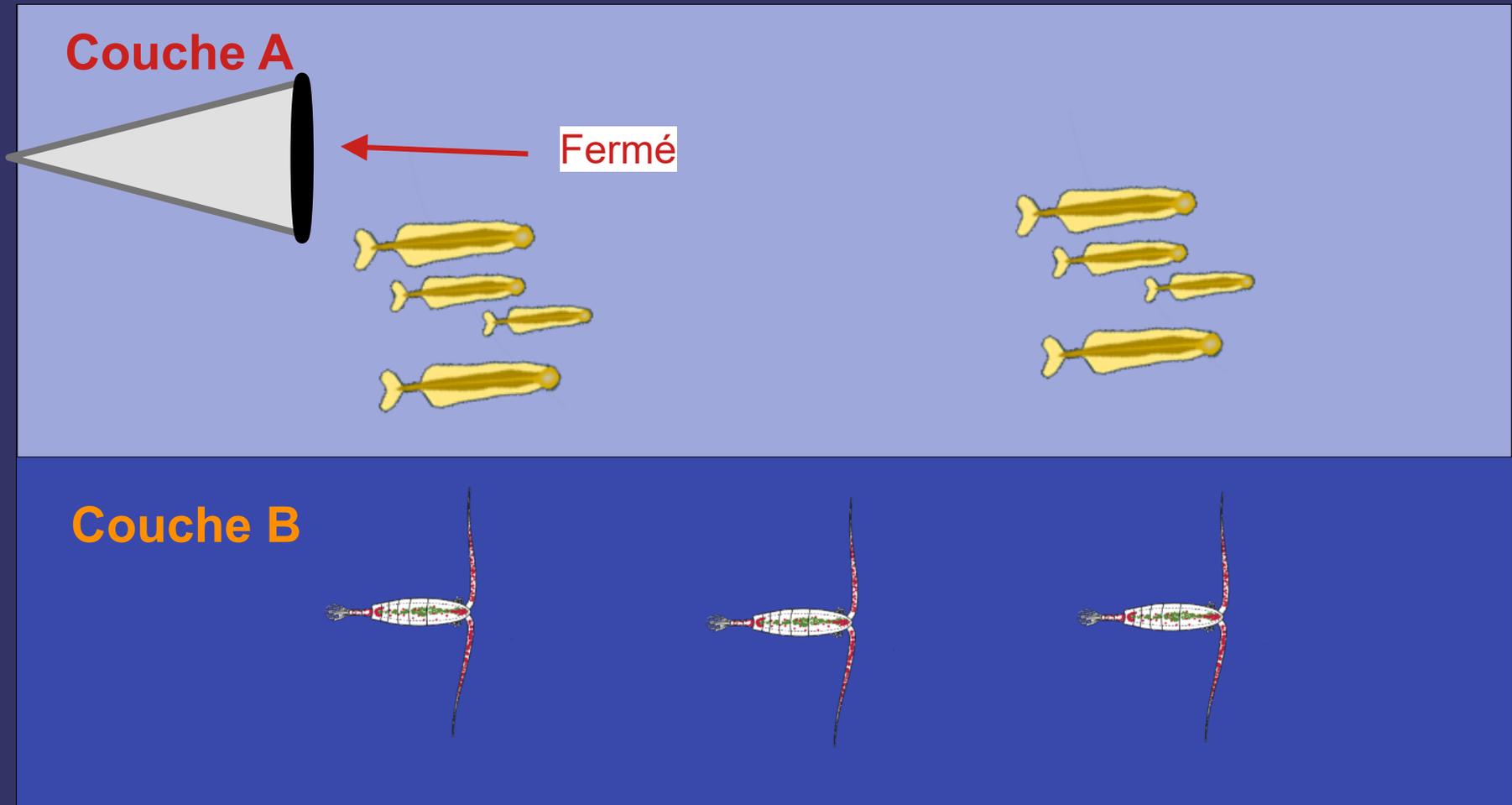


Pas bon ! on ne fait pas la différence entre les animaux venant de la couche A et B



Filets à plancton spéciaux

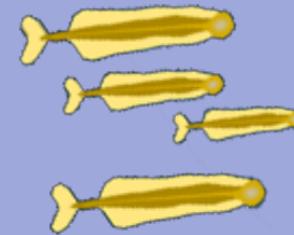
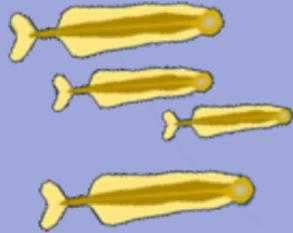
Une contrainte : prélever uniquement à une profondeur donnée



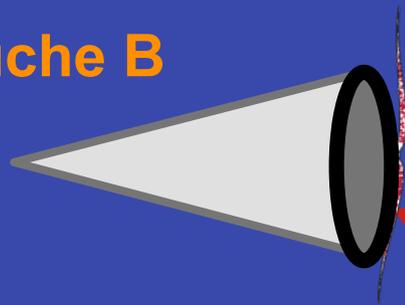
Filets à plancton spéciaux

Une contrainte : prélever uniquement à une profondeur donnée

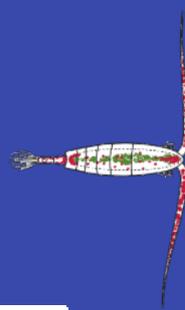
Couche A



Couche B



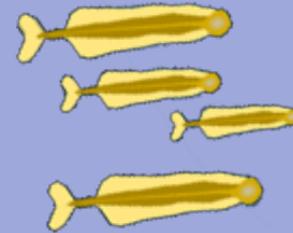
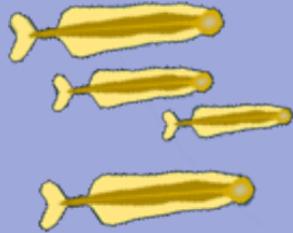
Ouvert



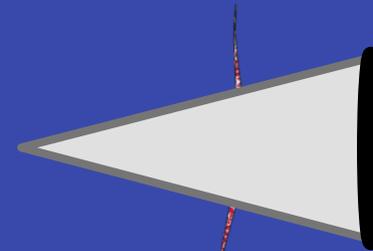
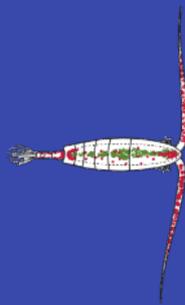
Filets à plancton spéciaux

Une contrainte : prélever uniquement à une profondeur donnée

Couche A



Couche B



Fermé

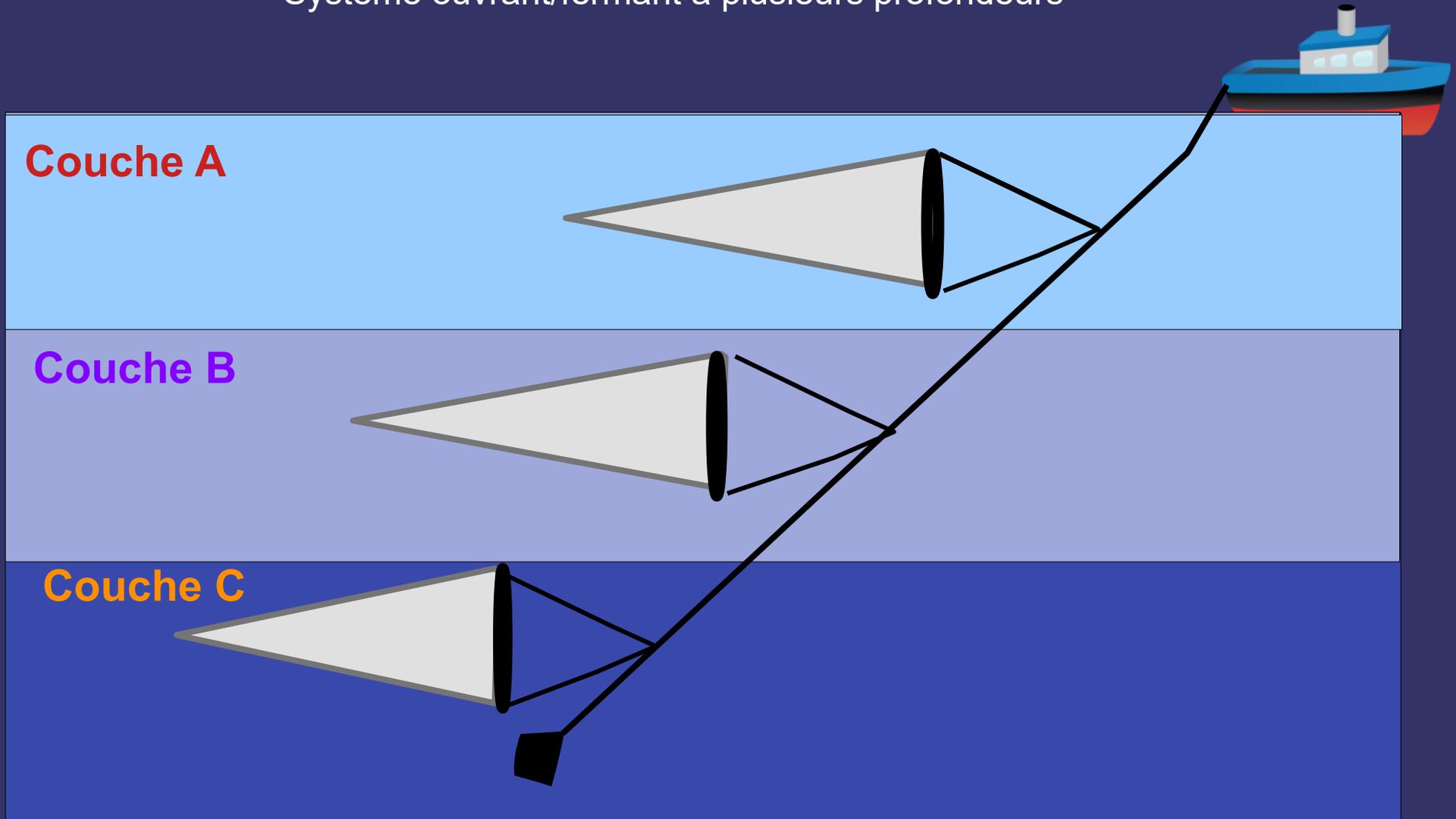
Bon ! on ne prélève que les animaux venant de la couche B

Dans le filet :



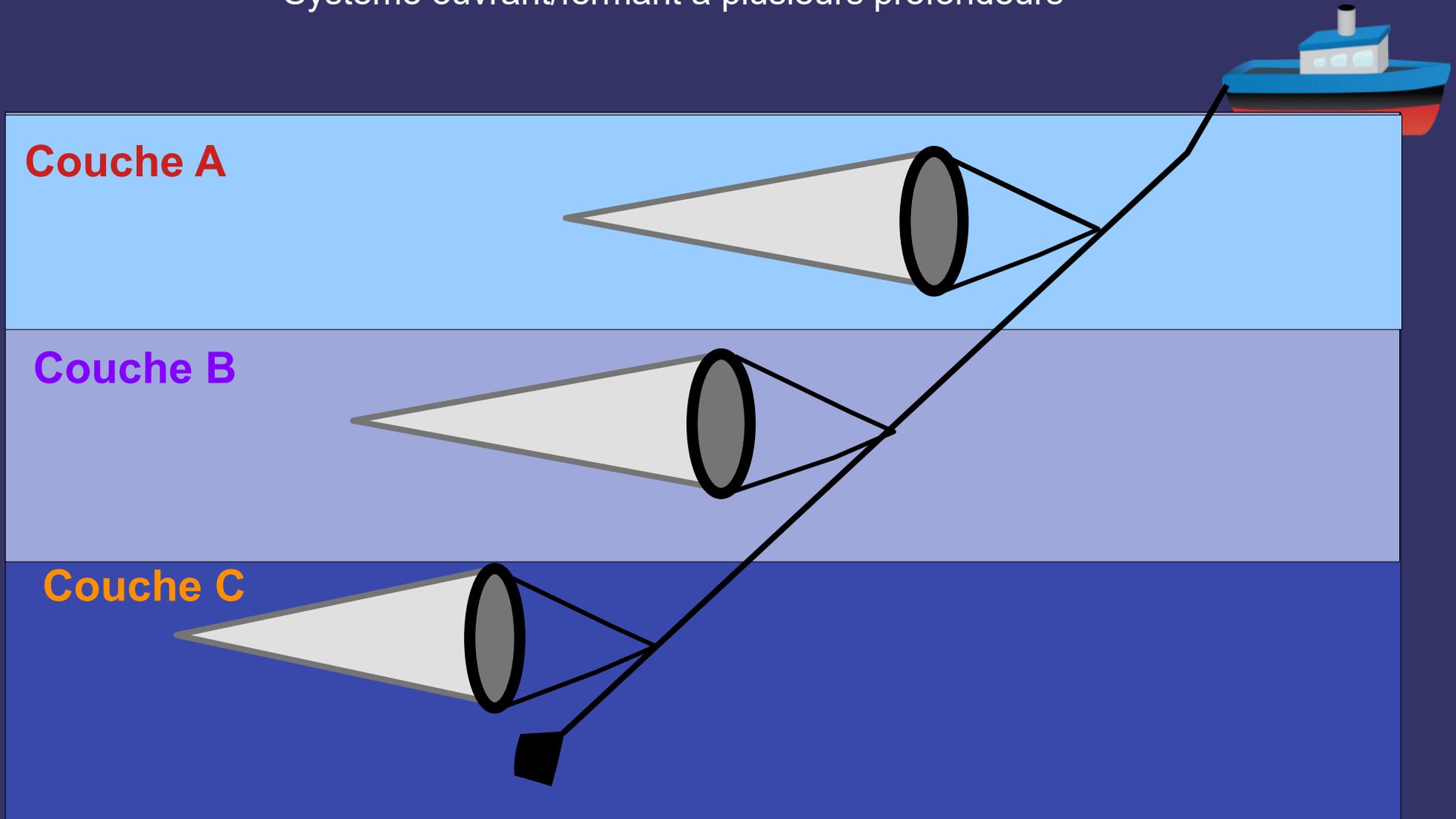
Filets à plancton spéciaux

Système ouvrant/fermant à plusieurs profondeurs



Filets à plancton spéciaux

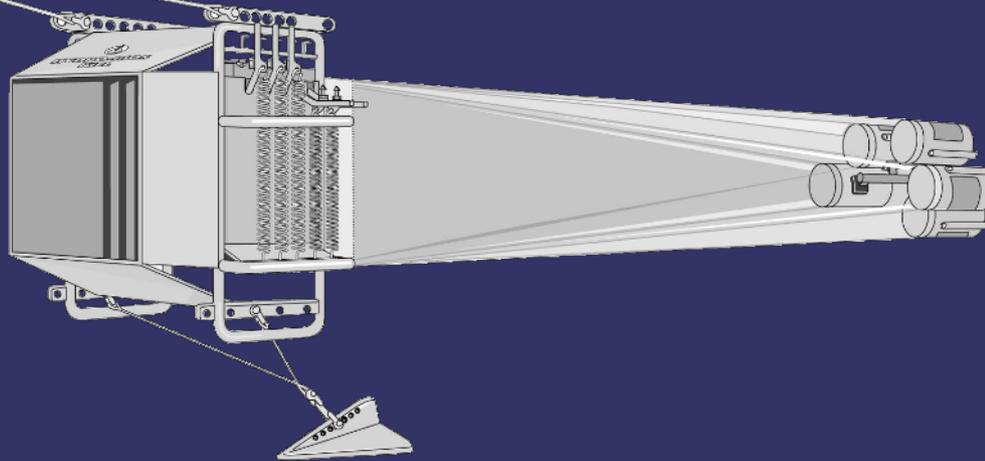
Système ouvrant/fermant à plusieurs profondeurs



Filets à plancton spéciaux

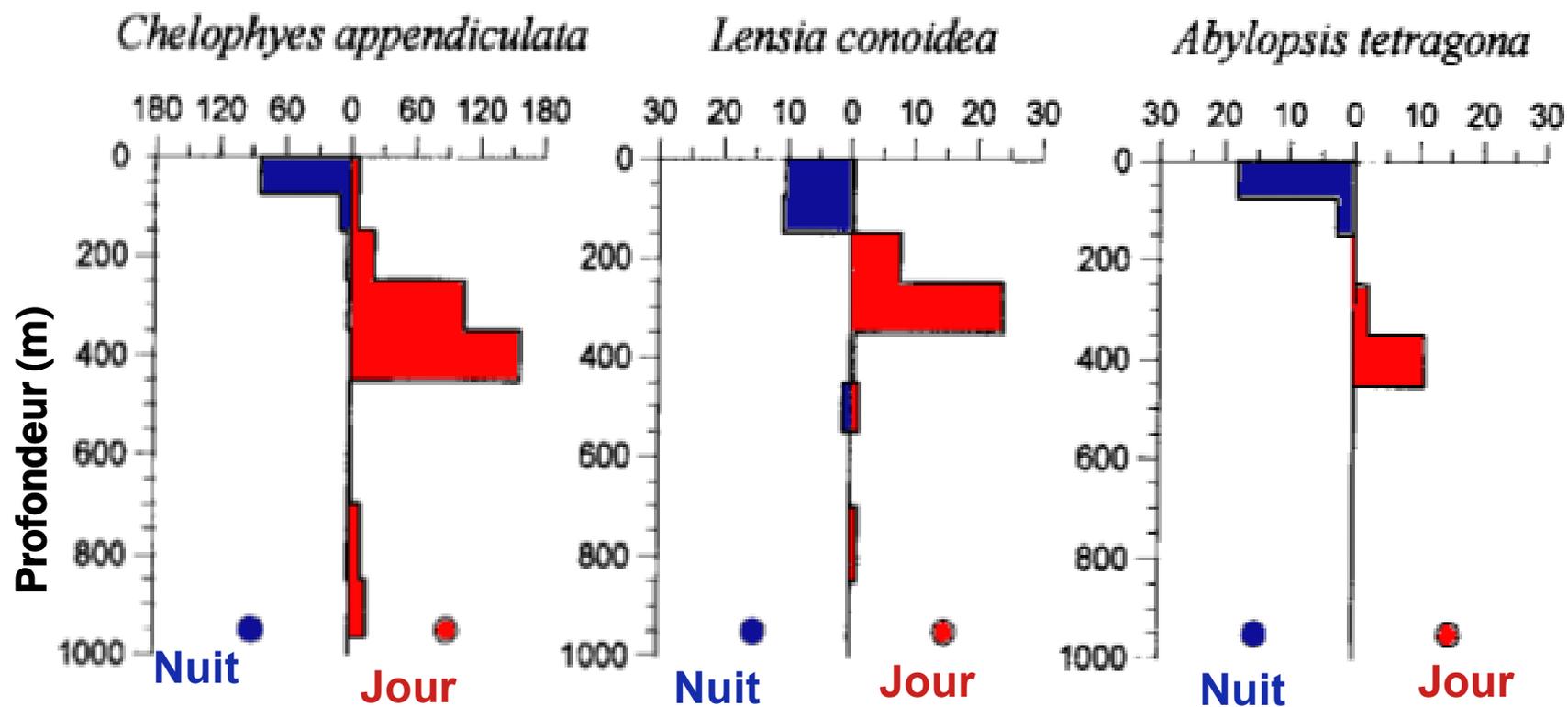


Filet multinappe

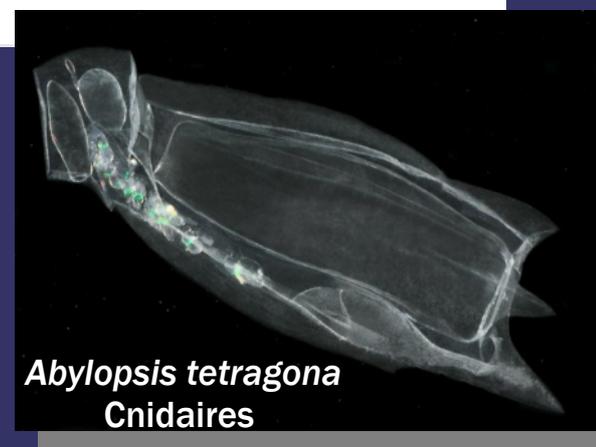
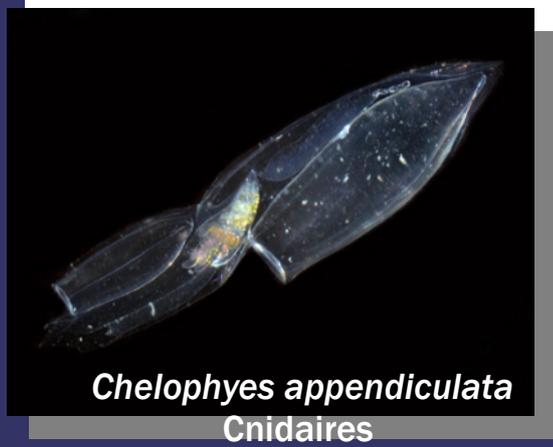


Exemples

Nombre d'individus par 1000 m³

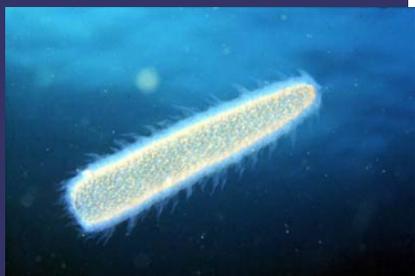


n/10³m³



WoRMS
image

Exemples



Pyrosoma atlanticum
Tunicier Thaliacea



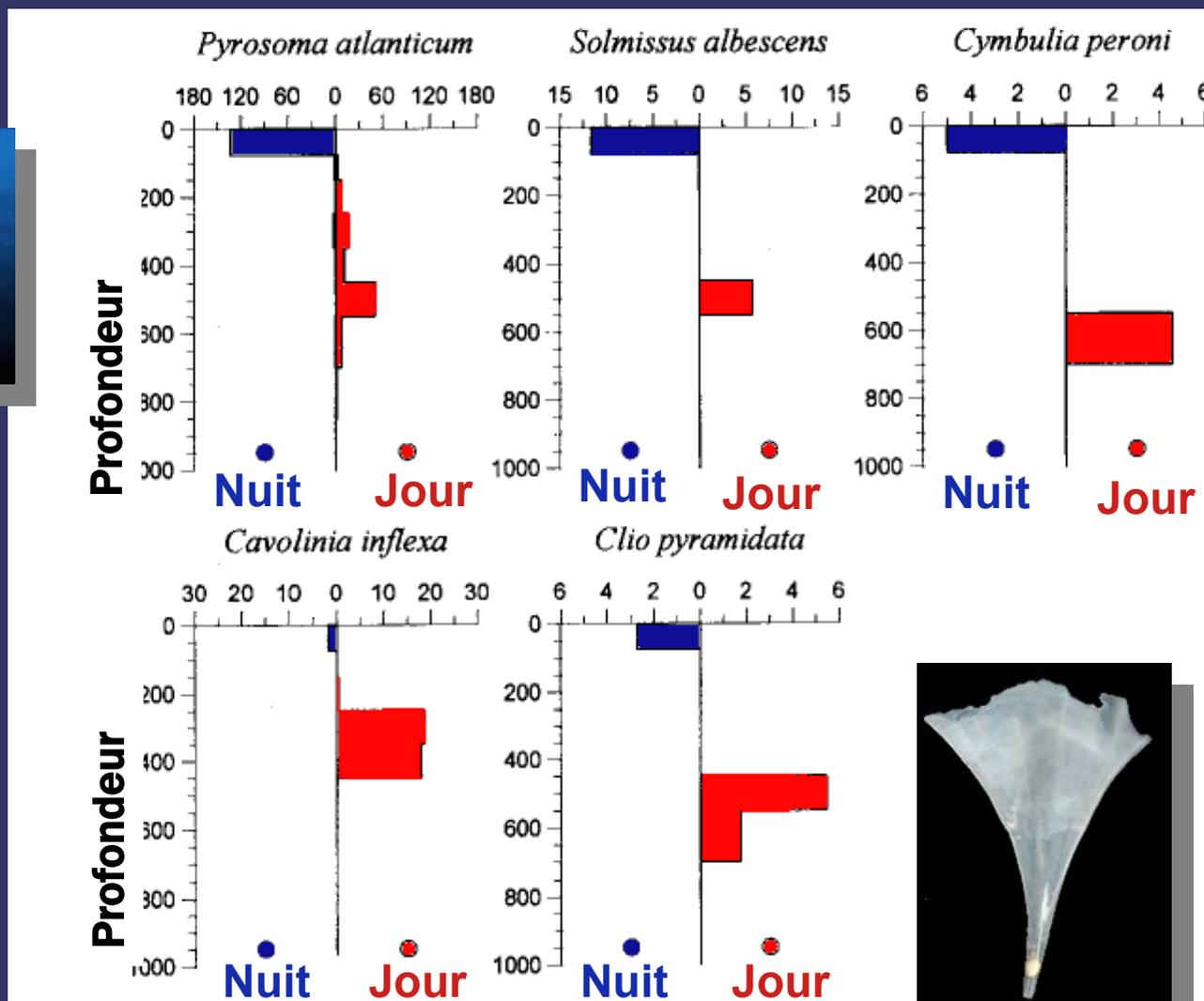
Cavolinia inflexa
Mollusque ptéropode



Clio pyramida
Mollusque ptéropode



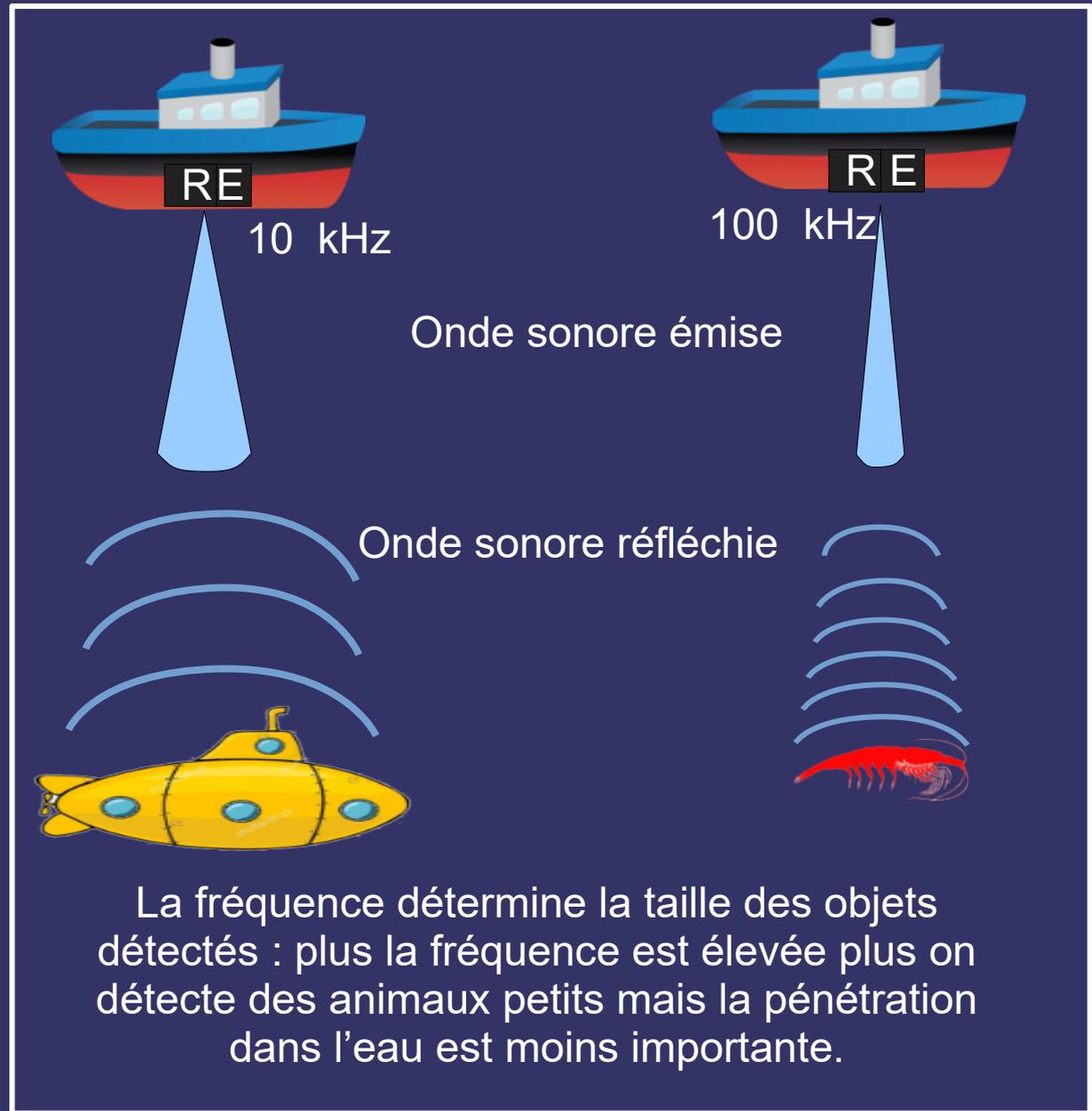
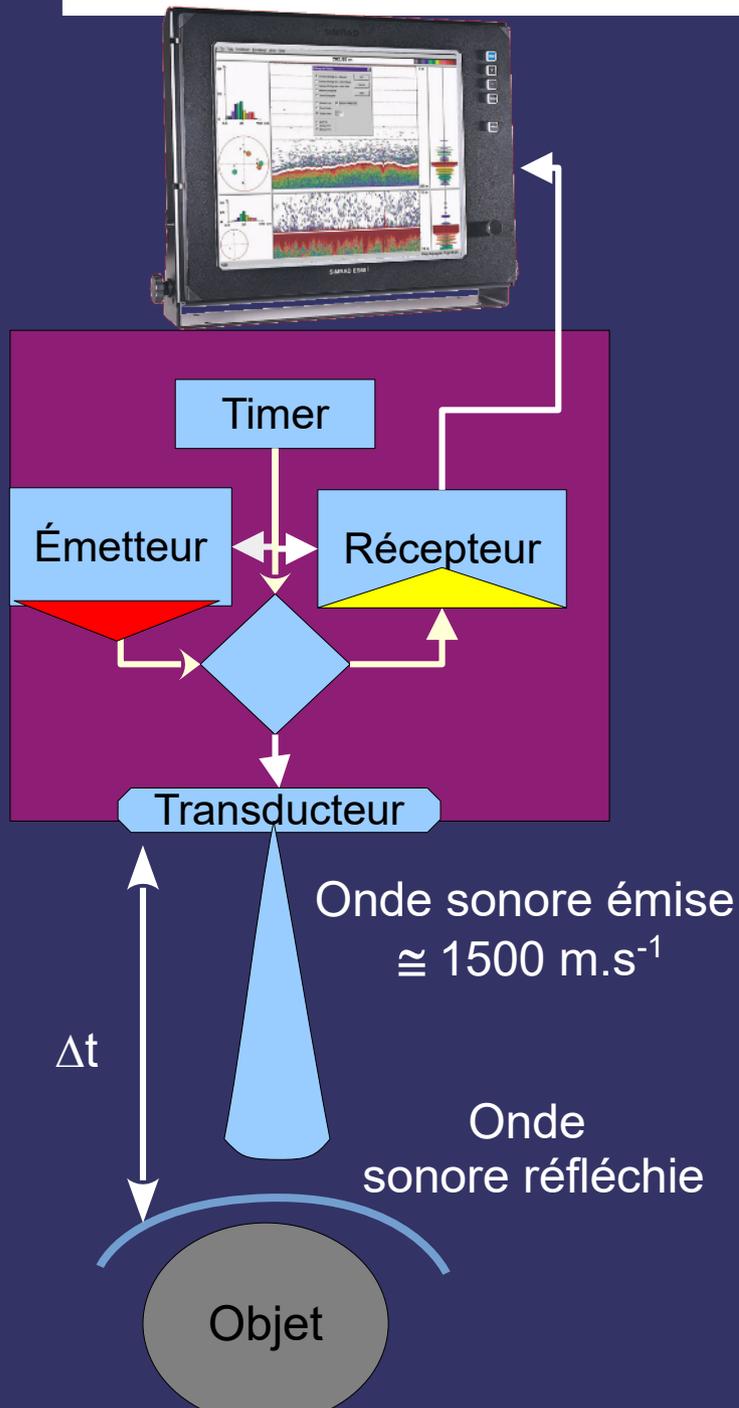
Cymbulia peroni
Mollusque ptéropode



n/10³m³

WoRMS image

Comment étudier le phénomène : Les écho-sondeurs

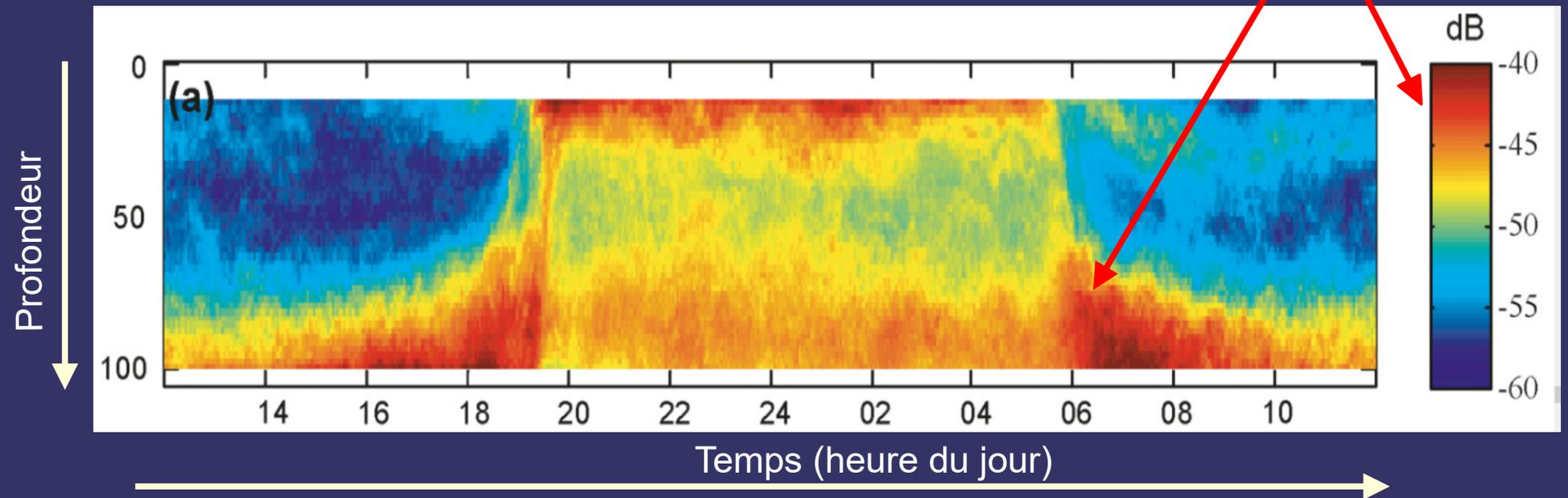


Δt temps entre l'émission et la réception \rightarrow distance = $(\Delta t * 1500) / 2$

Comment étudier le phénomène : Les écho-sondeurs

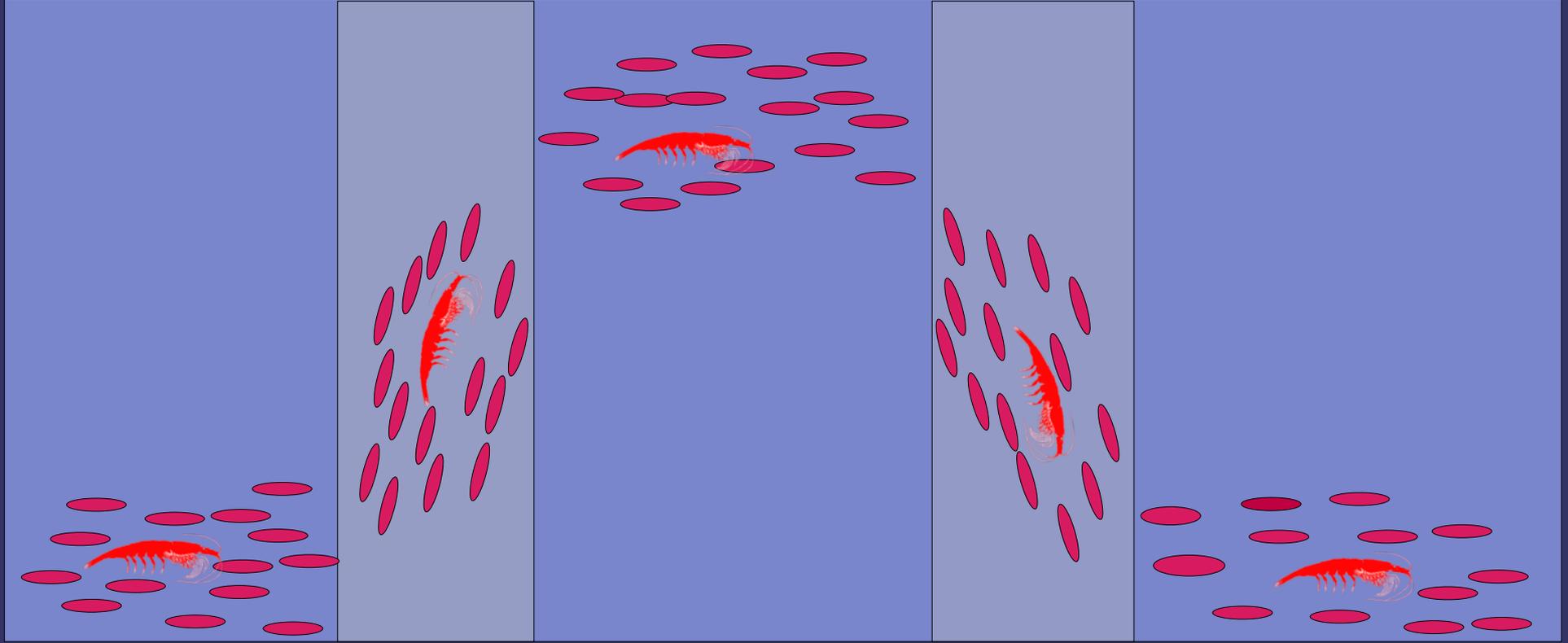
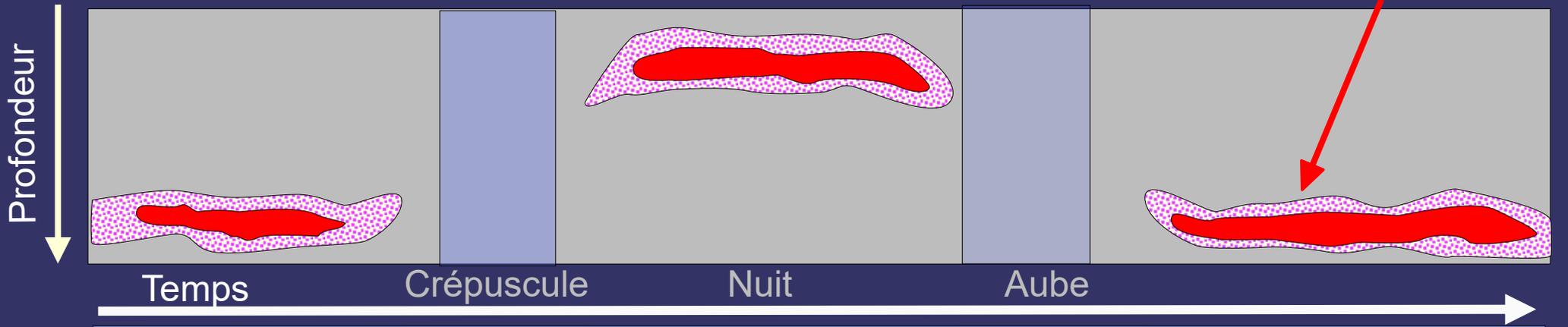
Echogramme ADCP à 307 khz

Intensité de la réponse



Echogramme : parfois une apparence trompeuse, un piège classique : la position de la cible

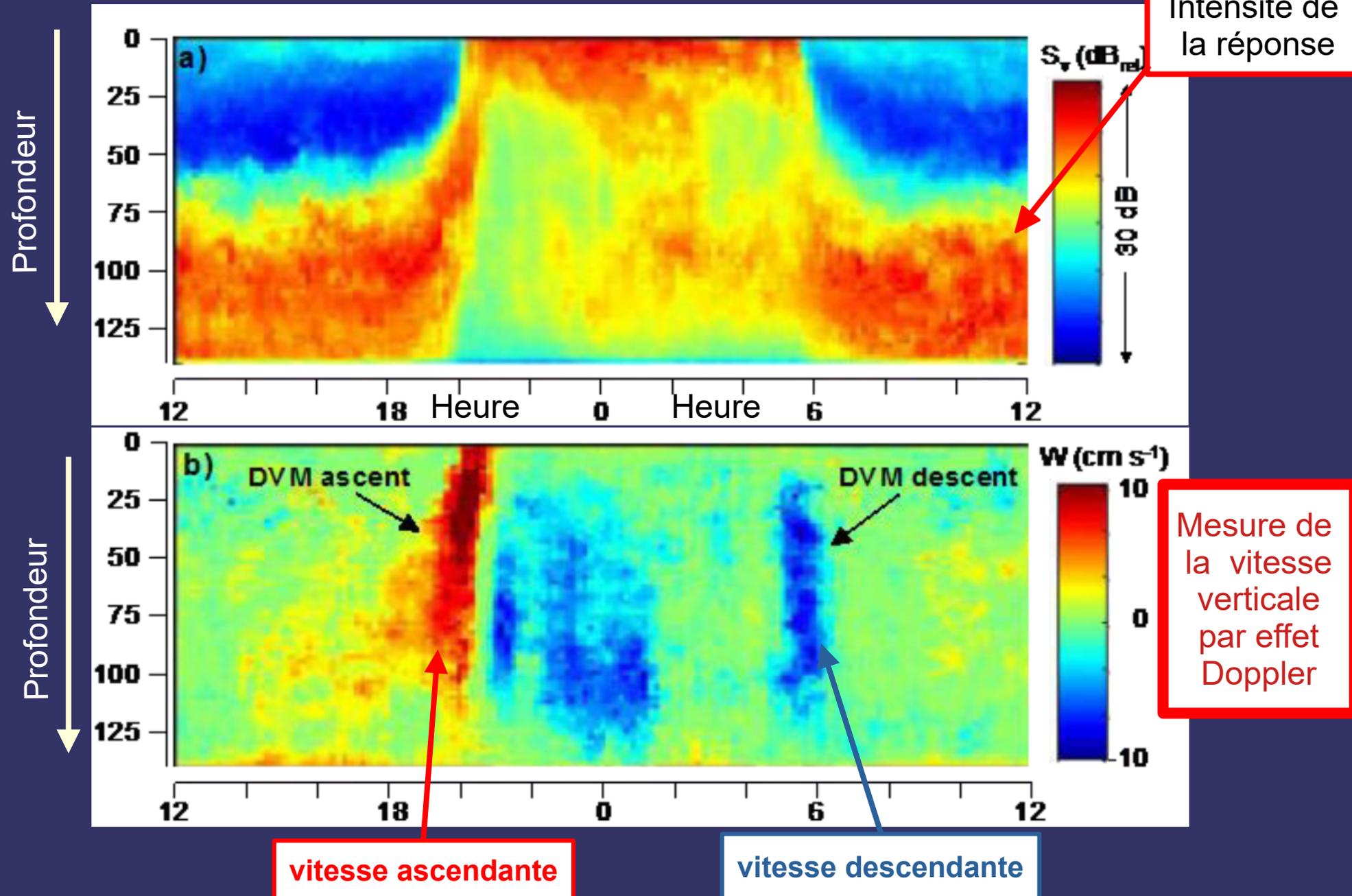
Intensité de la réponse



Dimension apparente de la cible



Migration du krill, Golfe du Saint Laurent, Canada 300 kHz Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)



Mais pourquoi et comment le plancton migre t-il ?

Le moteur : des stratégies adaptatives

**« Migration of marine invertebrates :
a potpourri of strategies »
JT Enright (1978)**

Mais pourquoi le plancton migre t-il ?

La situation standard :

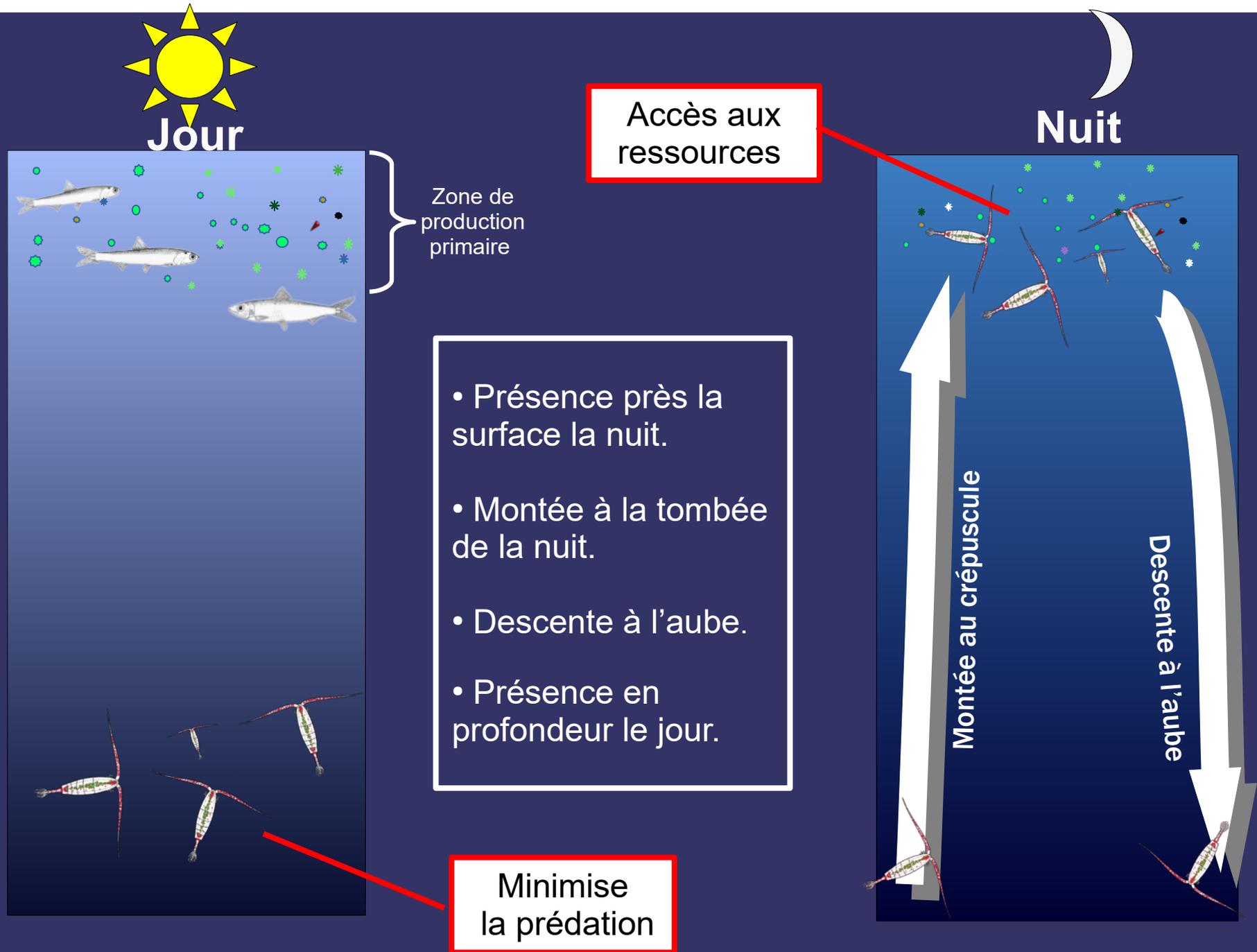
- La ressource, le plancton végétal près de la surface.
- Des prédateurs visuels dans cette zone éclairée.

Motivations contradictoires :

- Accès à la nourriture près de la surface.
- Évitement des prédateurs par la recherche de l'obscurité.

**La migration verticale journalière :
stratégie adaptative pour maximiser l'accès aux
ressources tout en minimisant la pression de prédation.**

Schéma standard





Un exemple de migration verticale

Meganyctiphanes norvegica
le « krill nordique »



Migration verticale de *Meganyctiphanes norvegica*



Meganyctiphanes norvegica
Le « Krill » de l'hémisphère nord.

Le « krill », *Meganyctiphanes norvegica*, présent entre 30 et 60° de latitude nord, dans l'Atlantique nord et la Méditerranée est une source importante de nourriture pour de nombreux organismes marins comme les thons ou les baleines. Il se nourrit de plancton végétal (phytoplancton) ou de petits zooplanctons.

Dans les zones océaniques où les fonds sont importants, quotidiennement il migre verticalement sur près de 600 m (Ramener à notre taille cela représenterait un déplacement vertical de 25 km aller et 25 km retour).



Schéma général de la Migration verticale de *Meganyctiphanes norvegica*

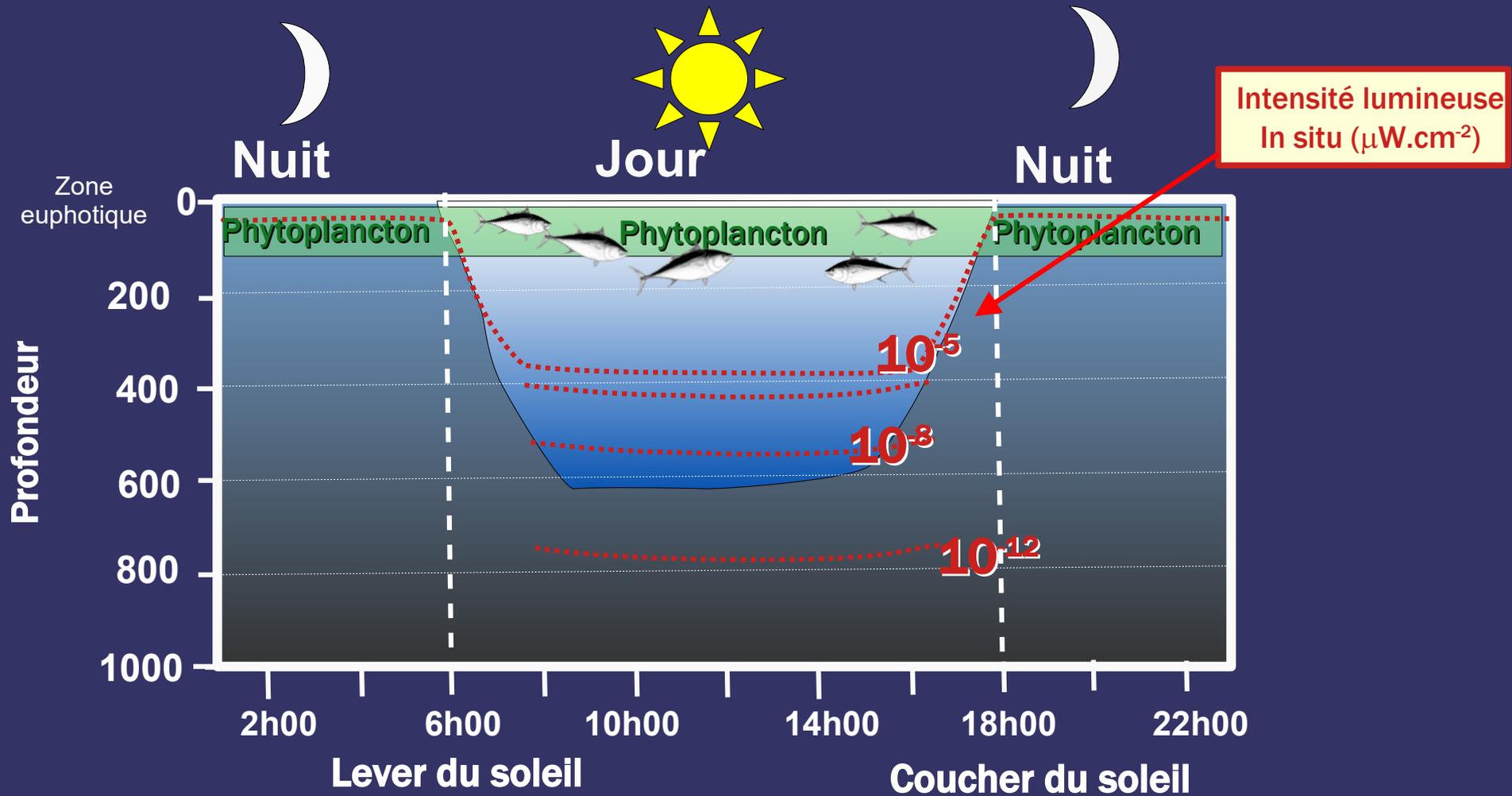
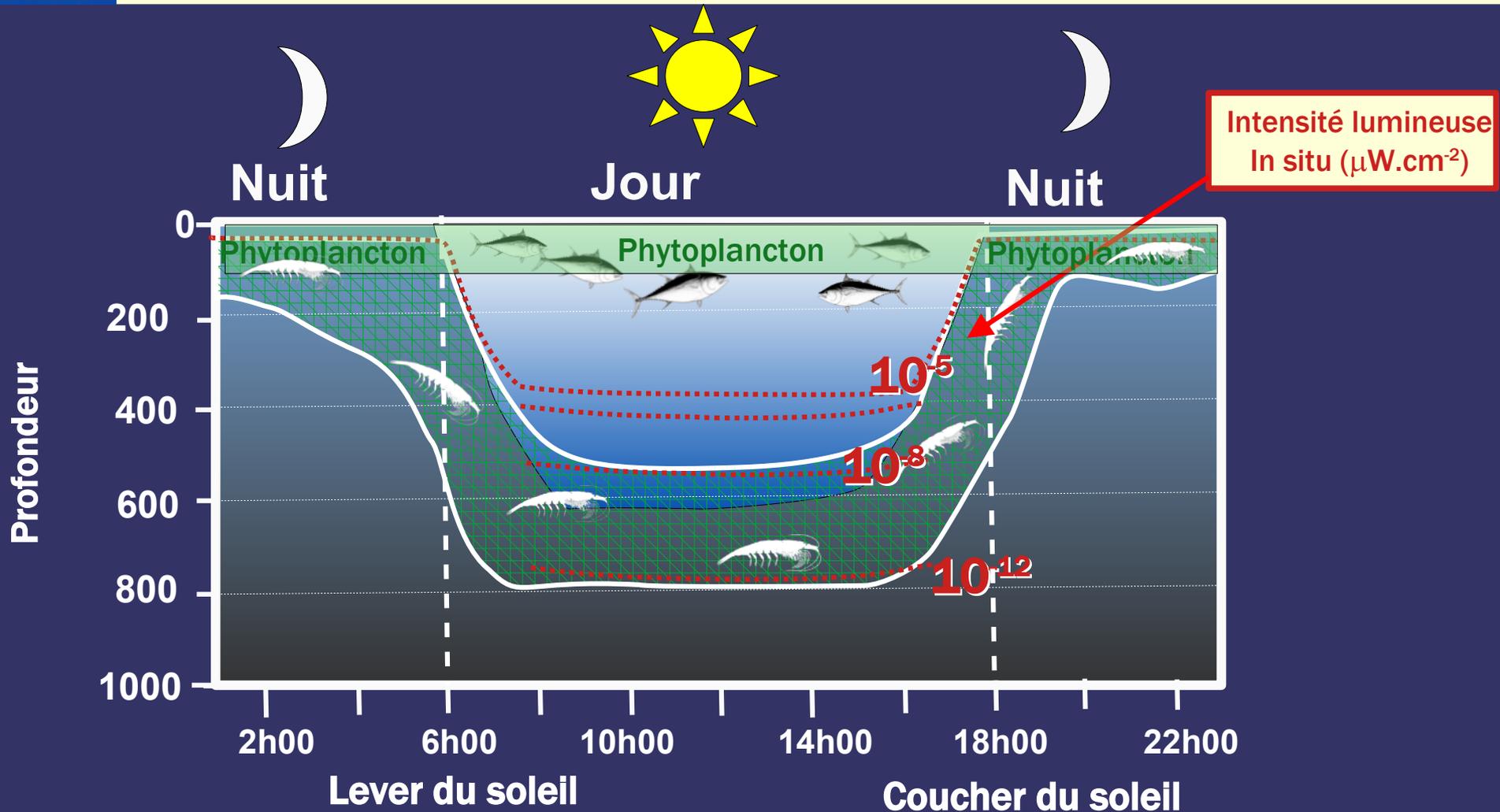




Schéma général de la Migration verticale de *Meganyctiphanes norvegica*



La nuit, la présence de *M. norvegica* près de la surface pour se nourrir est contrôlée par l'intensité lumineuse du ciel nocturne et de la lune. A l'aube l'augmentation de l'intensité lumineuse déclenche la migration descendante.

En profondeur, vers 600 m, où la lumière, est indétectable par l'animal, le déclencheur de la remontée est une horloge interne.



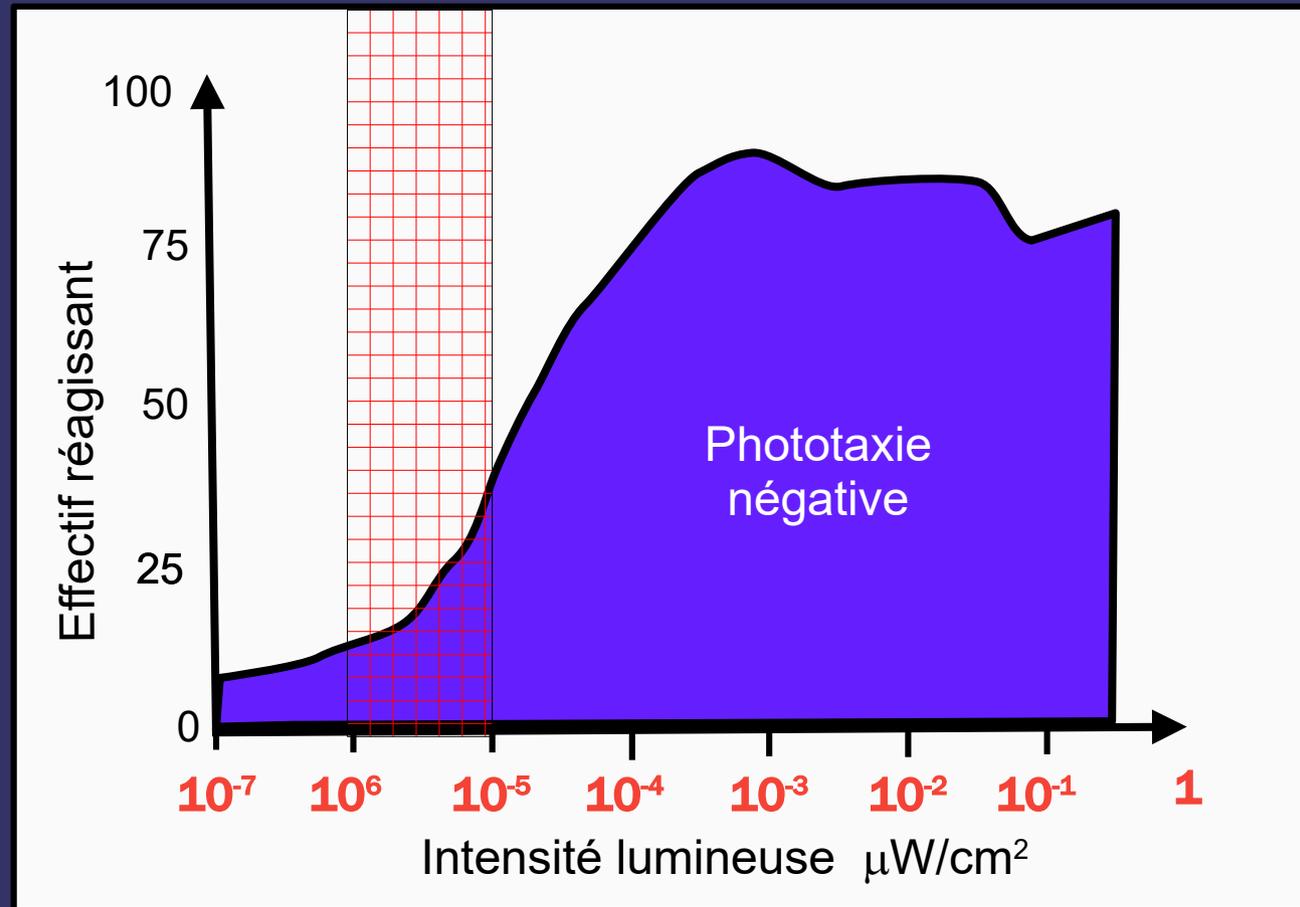
Réaction à la lumière



Phototaxie négative (fuite à la lumière) pour une intensité $>$ à $10^{-5} \mu\text{W.cm}^{-2}$



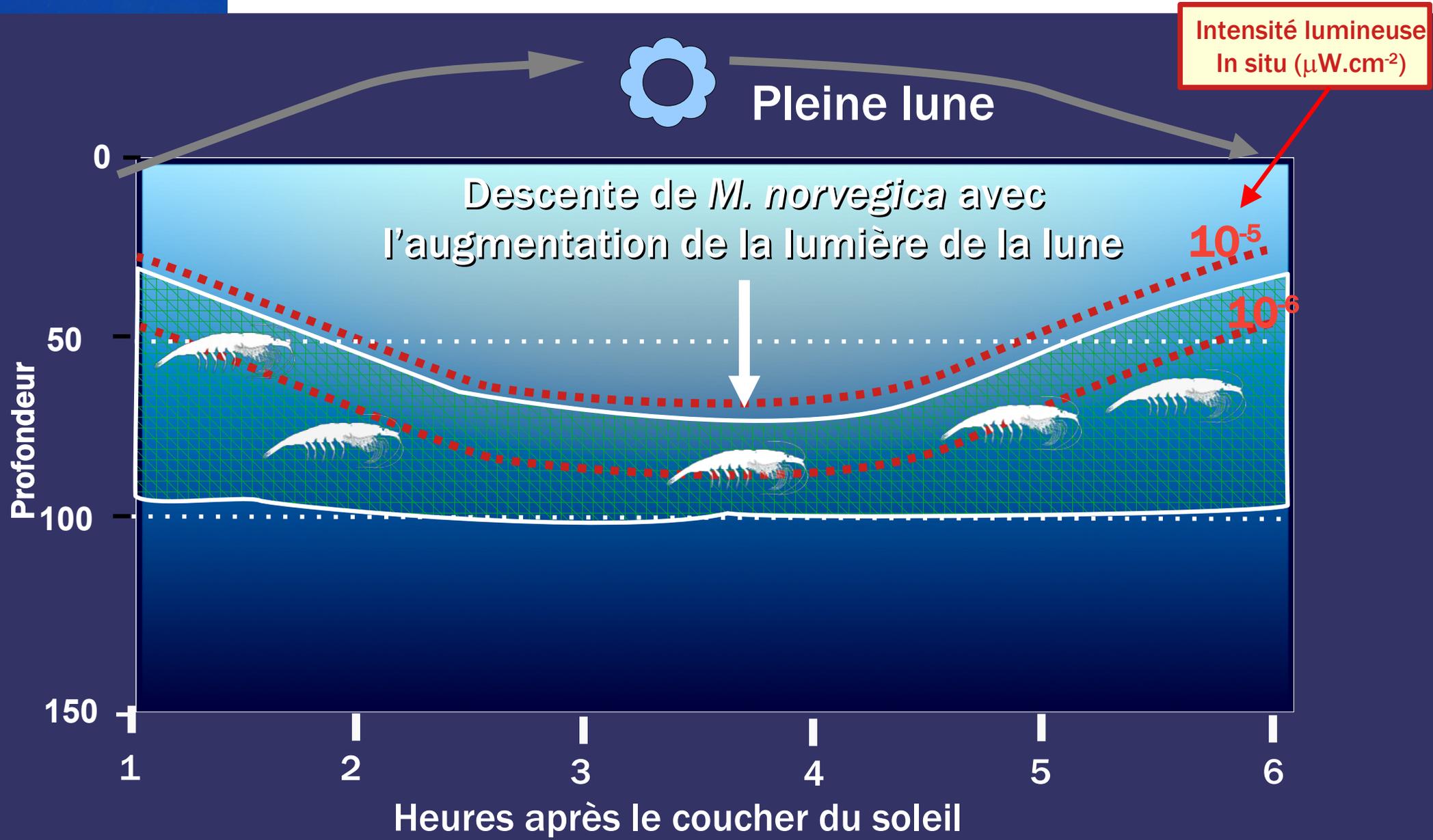
Réaction à la lumière



Phototaxie négative : réaction négative à la lumière



Effets des changements de luminosité nocturne



La nuit *M. norvegica* s'adapte au changement de l'éclairage du ciel ou de la lune.



Effets sur la migration des variations lumineuses liées à une éclipse de lune.

16/09/1995

18h30

19 :08 h

Eclipse

22 :25 h

Pleine lune



Pleine lune



0 m

Profondeur (m)

50 m

Zone de présence
M. norvegica

150 m

Montée de *M. norvegica* avec
la disparition de la lumière de
la lune



Quel est le déclencheur de la remontée ?

Si la sensibilité à la lumière explique bien le déclenchement de la descente, le déclenchement de la remontée ne peut s'expliquer pas un déclencheur lumineux

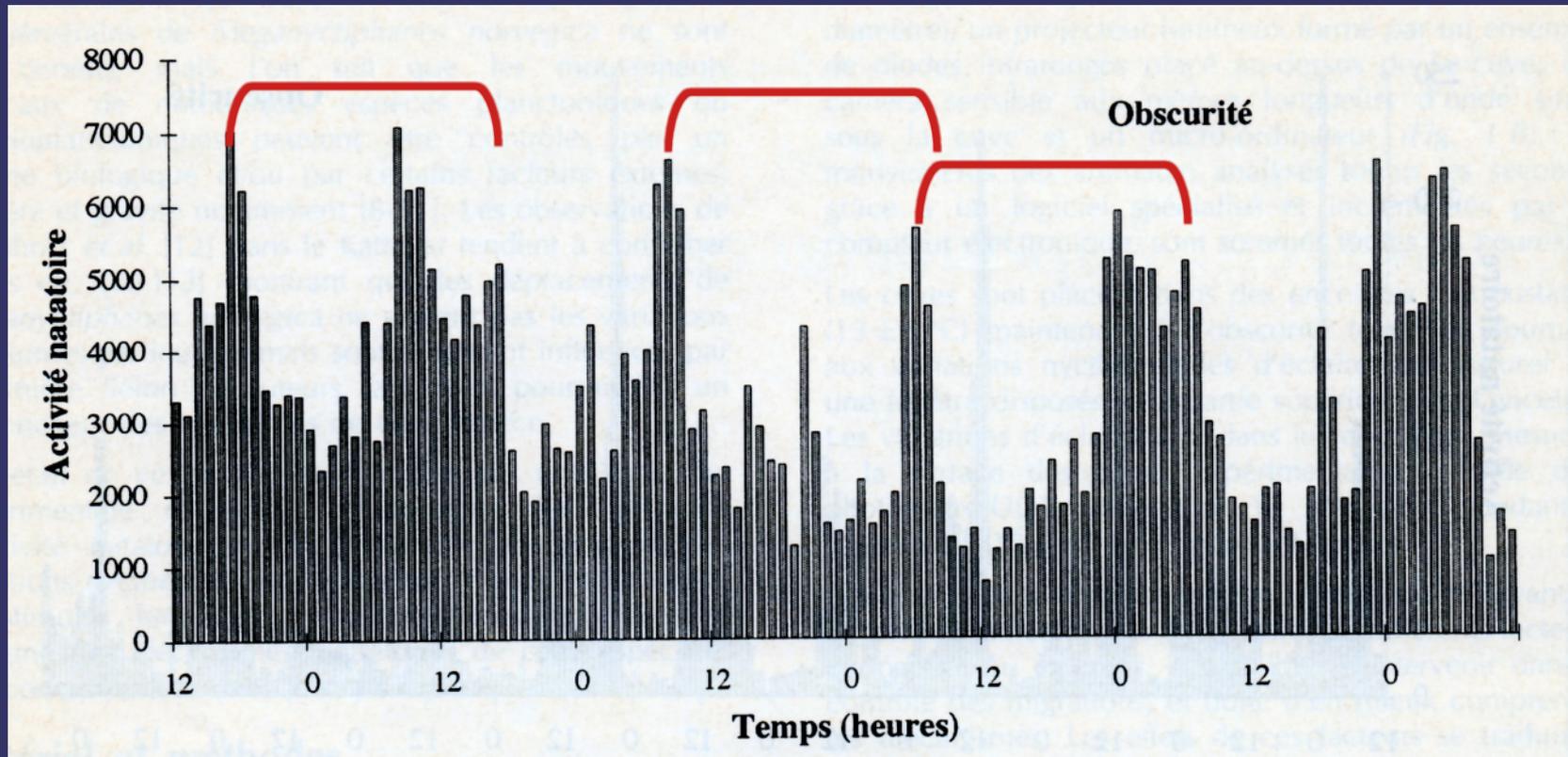
vers 500 m de profondeur, là où est *M. norvegica* le jour, l'intensité lumineuse est entre 10^{-8} et 10^{-12} $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ valeurs trop basses pour être détectées par *M. norvegica*

Alors pourquoi remontent elles ?



Horloge interne (Rythme circadien endogène : Zeitgeber)

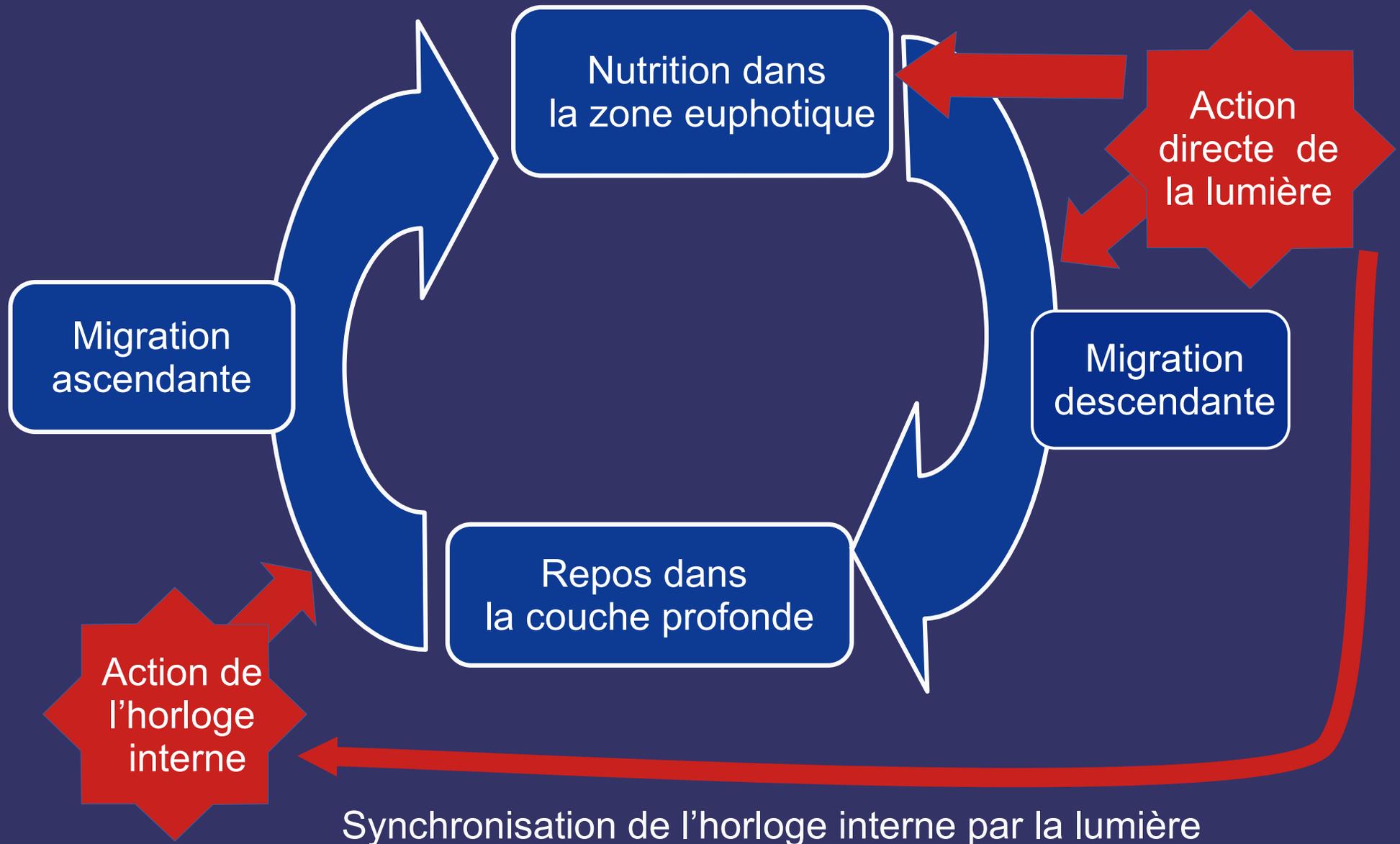
Activité natatoire de *M. norvegica* à l'obscurité totale



Existence d'un rythme d'activité endogène dont la période moyenne calculée est de 22 h 42



Mécanismes de contrôle de la migration



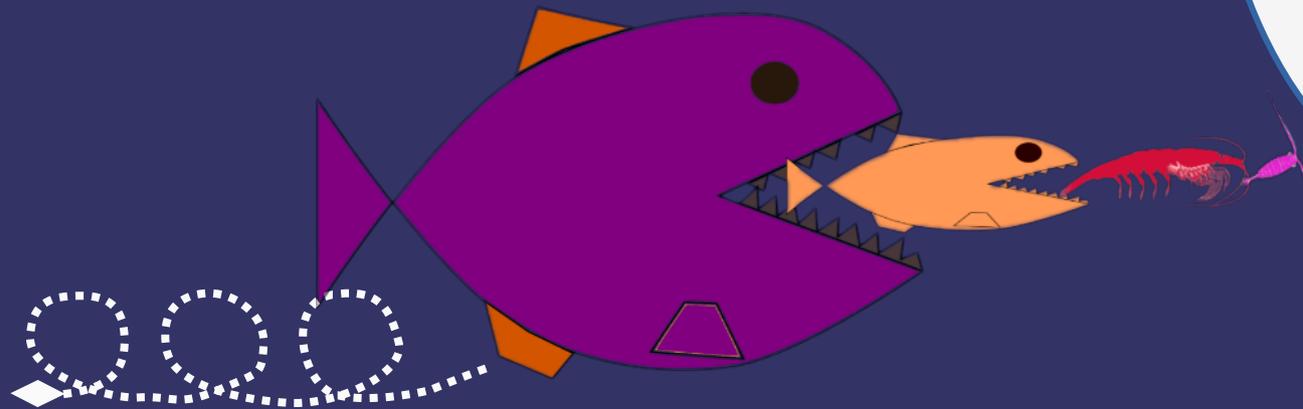


Plasticité du comportement migratoire de *M. norvegica*

- Modification des limites verticales par changement de la stratification (thermocline) .
- Migration vers le sédiment : côte du Canada et embouchure de la Clyde.
- Utilisation des courants contraires dans le Kattegat .
- *M. norvegica* ayant fraîchement mué reste en profondeur tout au long du cycle diurne.
- Une partie de la population peut ne pas migrer toutes les nuits

Les stratégies adaptatives dans les migrations du zooplancton

A partir des facteurs essentiels (accès aux ressources trophiques près de la surface, éviter les prédateurs visuels près de la surface de jour), les populations vont adapter leurs stratégies pour optimiser la réponse à d'autres contraintes : autres prédateurs, conditions environnementales, cycles de vie etc. Les stratégies des espèces coévoluent les unes en fonction des autres. C'est la théorie de «**l'Hypothèse de la Reine rouge**».



Ici, vois-tu, on est obligé de courir tant qu'on peut pour rester au même endroit.



Les stratégies adaptatives dans migrations du zooplancton

Théorie écologique dite de « **l'Hypothèse de la Reine rouge** » : « **l'évolution permanente d'une espèce est nécessaire pour maintenir son aptitude face aux évolutions des espèces avec lesquelles elle coévolue** ».

Dans le cas des migrations verticales du plancton :
Les populations de prédateurs s'adaptent aux migrations des herbivores en les rejoignant la nuit près de la surface. En réponse, les herbivores développent des stratégies adaptatives pour y répondre.

Par exemple en privilégiant des réponses parfois contradictoires :

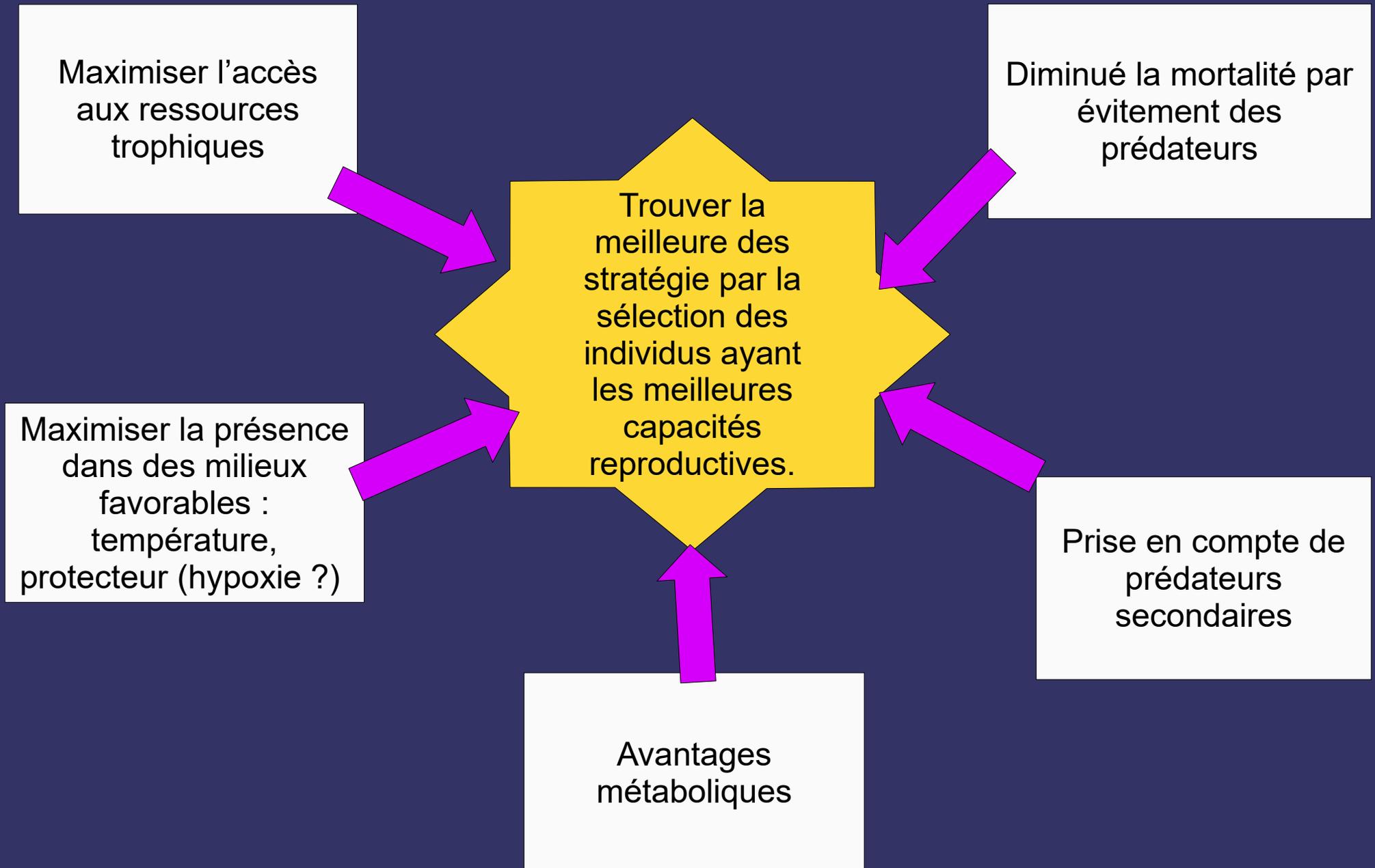
- « **Plutôt mort que affamé** » : Une espèce va privilégier l'abondance de la ressource donc indirectement celle de sa descendance pour lutter contre une prédation accrue.
- « **Plutôt affamé que mort** » : Une espèce va privilégier la survie de ses individus au détriment la quantité de la ressource disponible.

Ohman M. D.(1990). The demographic benefits of diel vertical migration by zooplankton. Ecological Monographs 60: 257-281

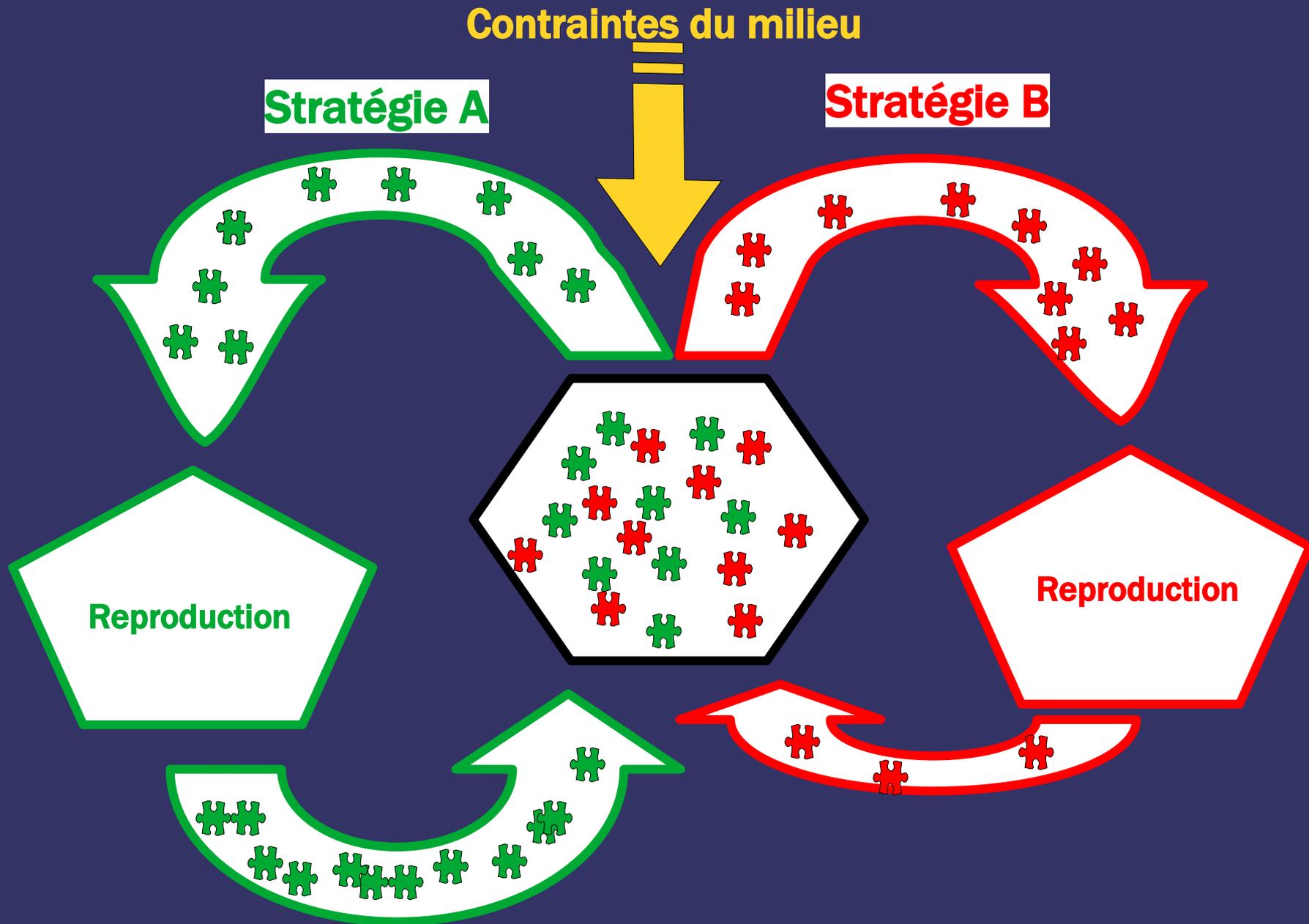
Tarling, G., Jarvis, T., Emsley, S. & Matthews, J. Midnight sinking behaviour in *Calanus finmarchicus*: a response to satiation or krill predation? Mar. Ecol. Prog. Ser. 240, 183–194 (2002).

Mise en place d'une stratégie adaptative

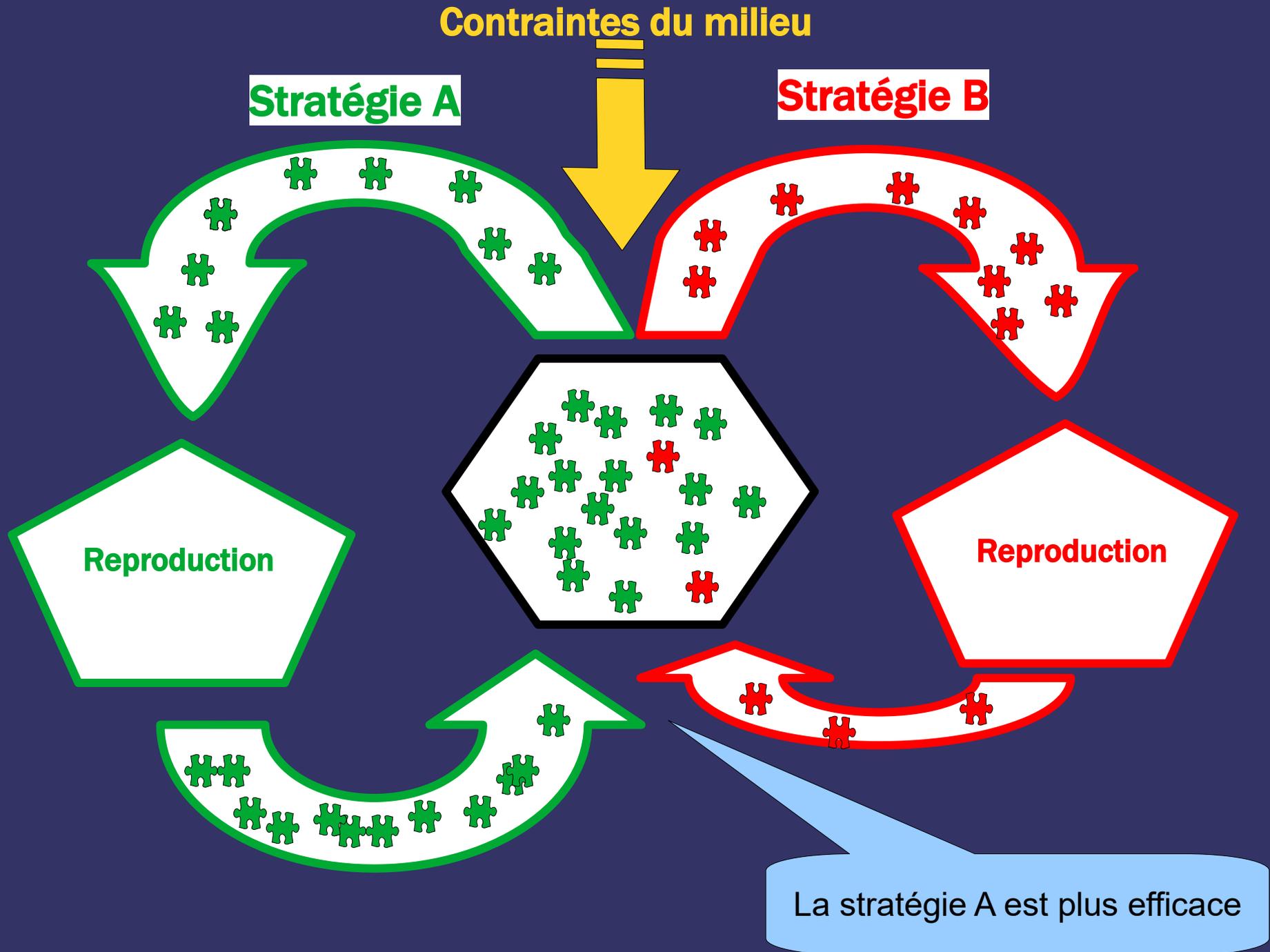
Réponse à des contraintes multiples parfois contradictoires



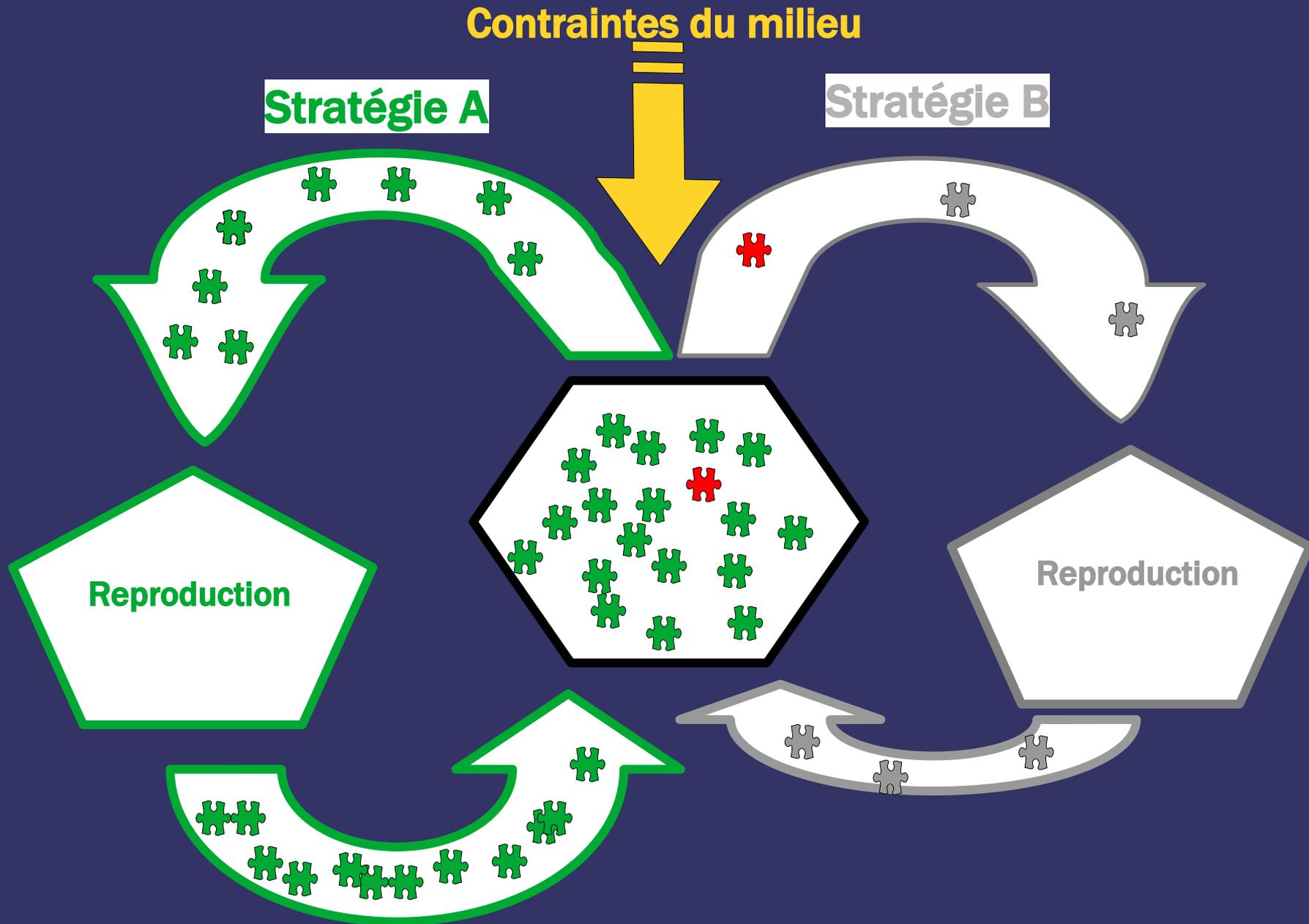
Mise en place d'une stratégie adaptative



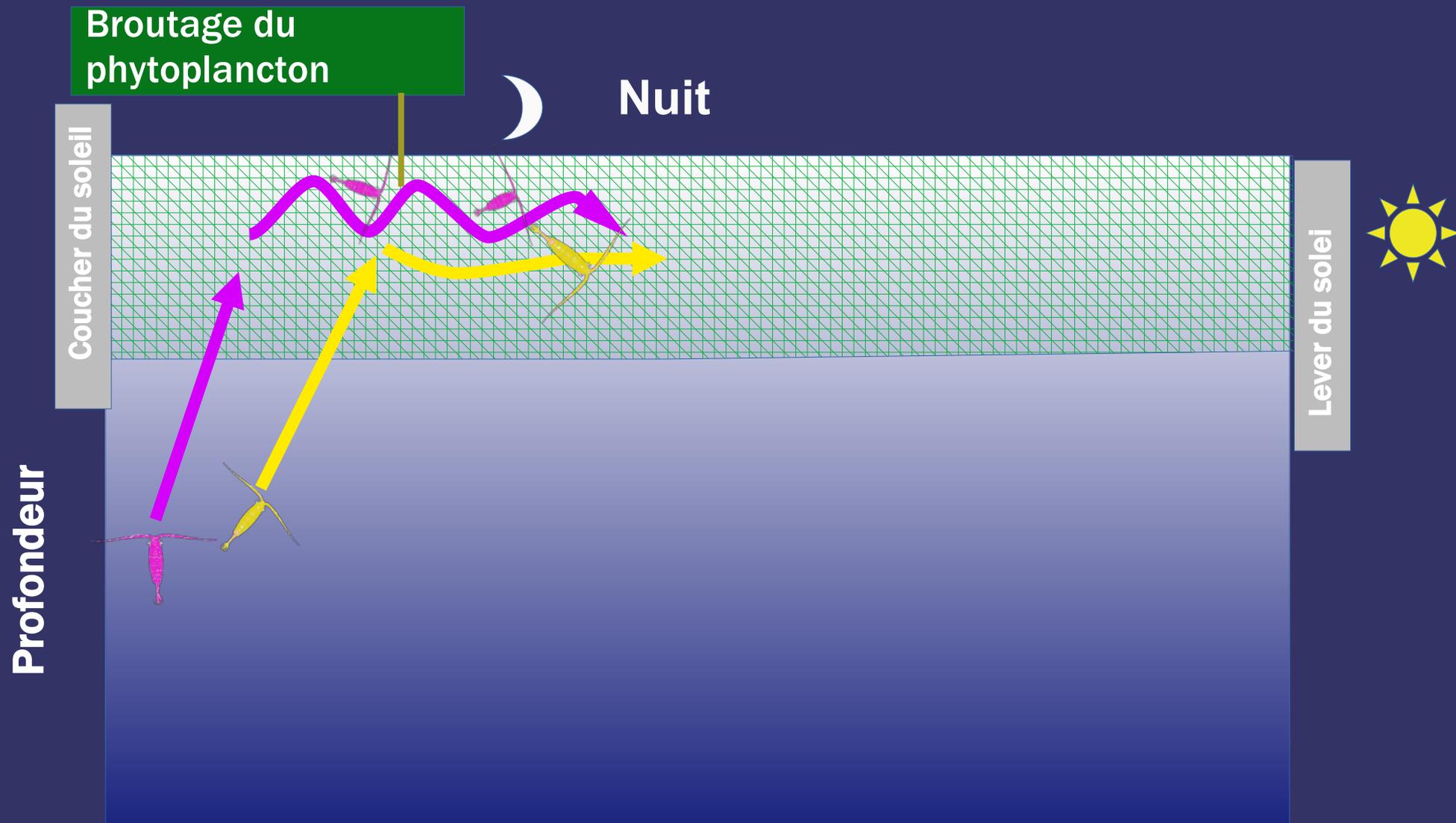
Mise en place d'une stratégie adaptative



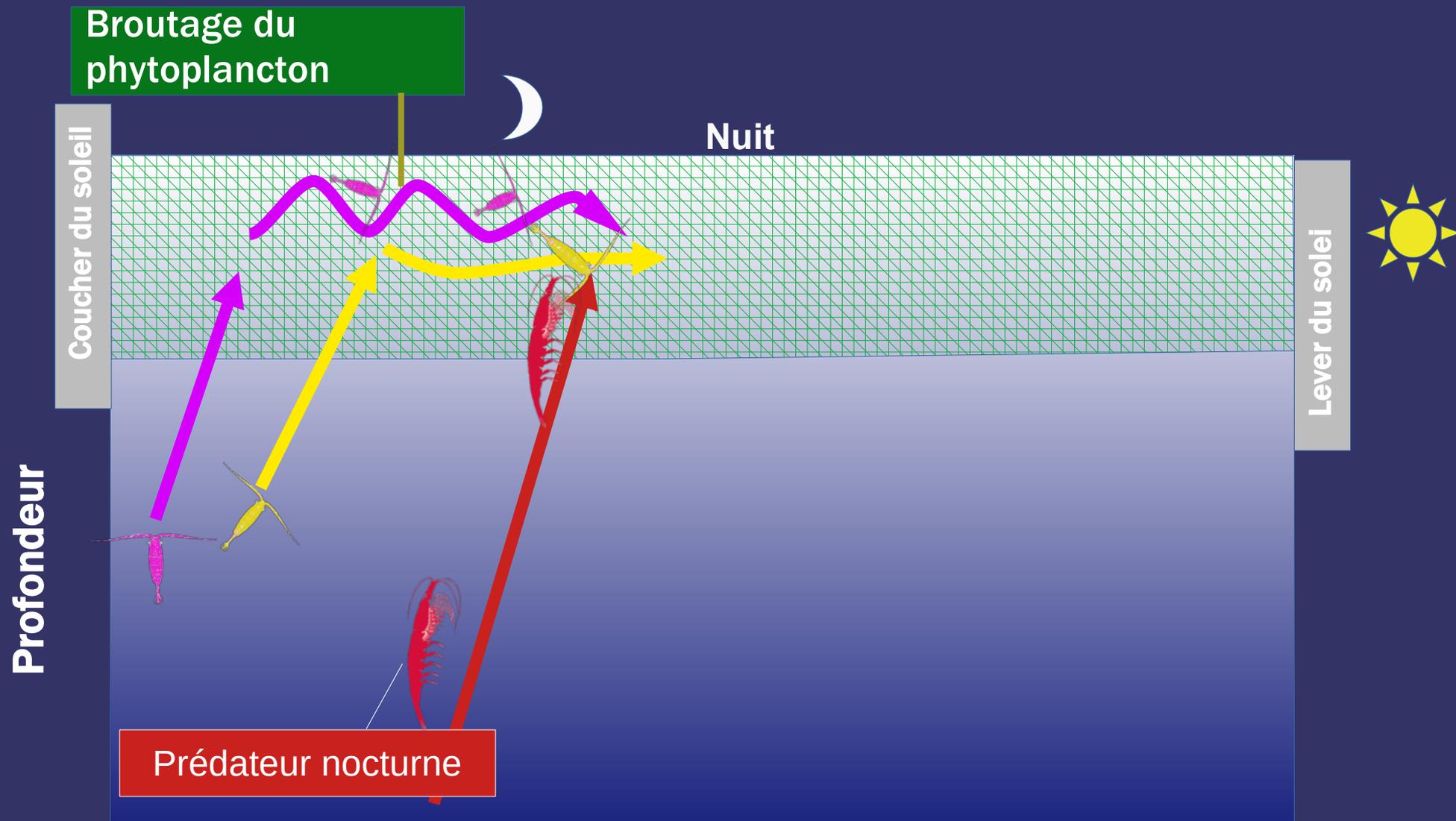
Mise en place d'une stratégie adaptative



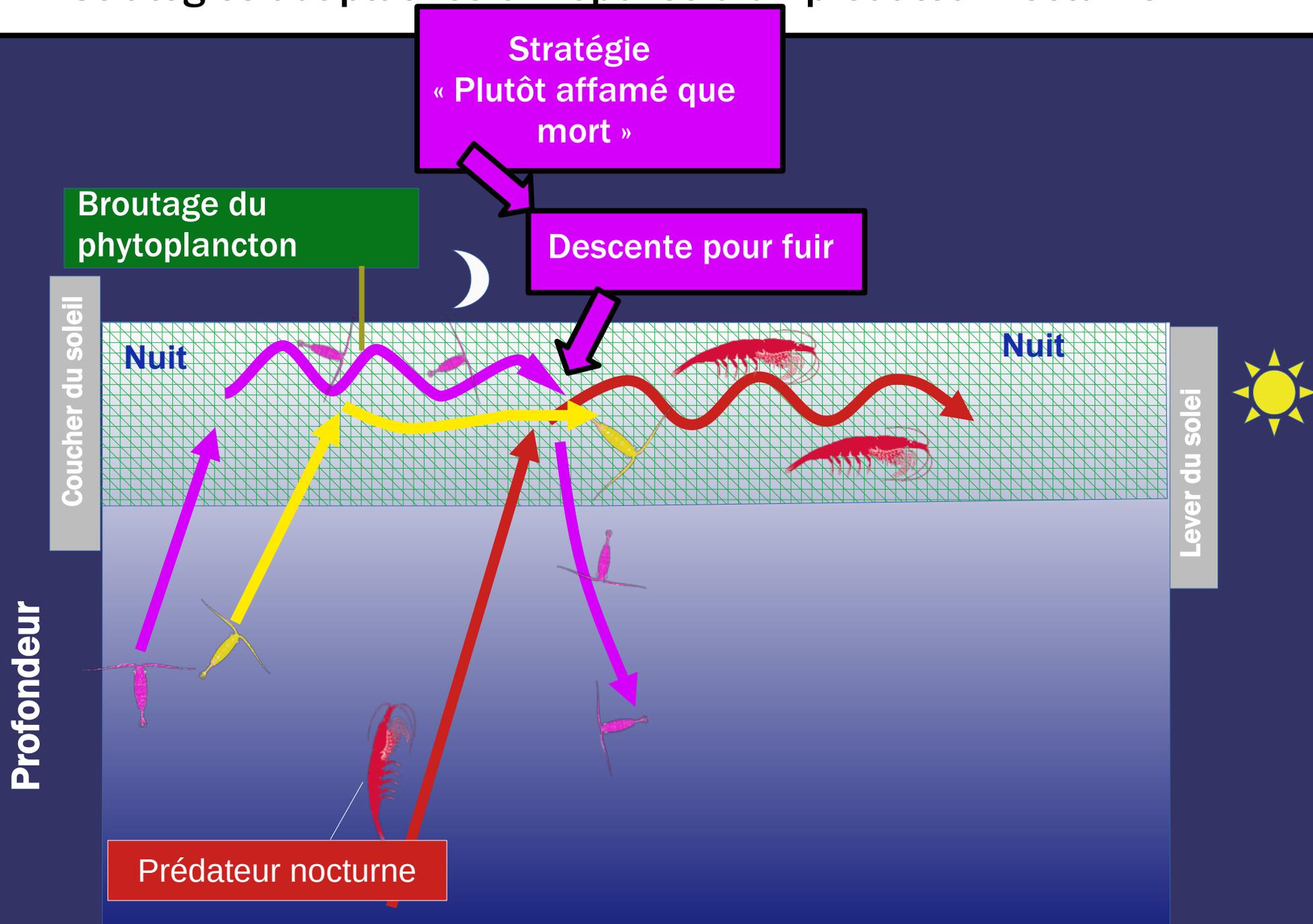
Stratégies adaptatives en réponse à un prédateur nocturne



Stratégies adaptatives en réponse à un prédateur nocturne



Stratégies adaptatives en réponse à un prédateur nocturne

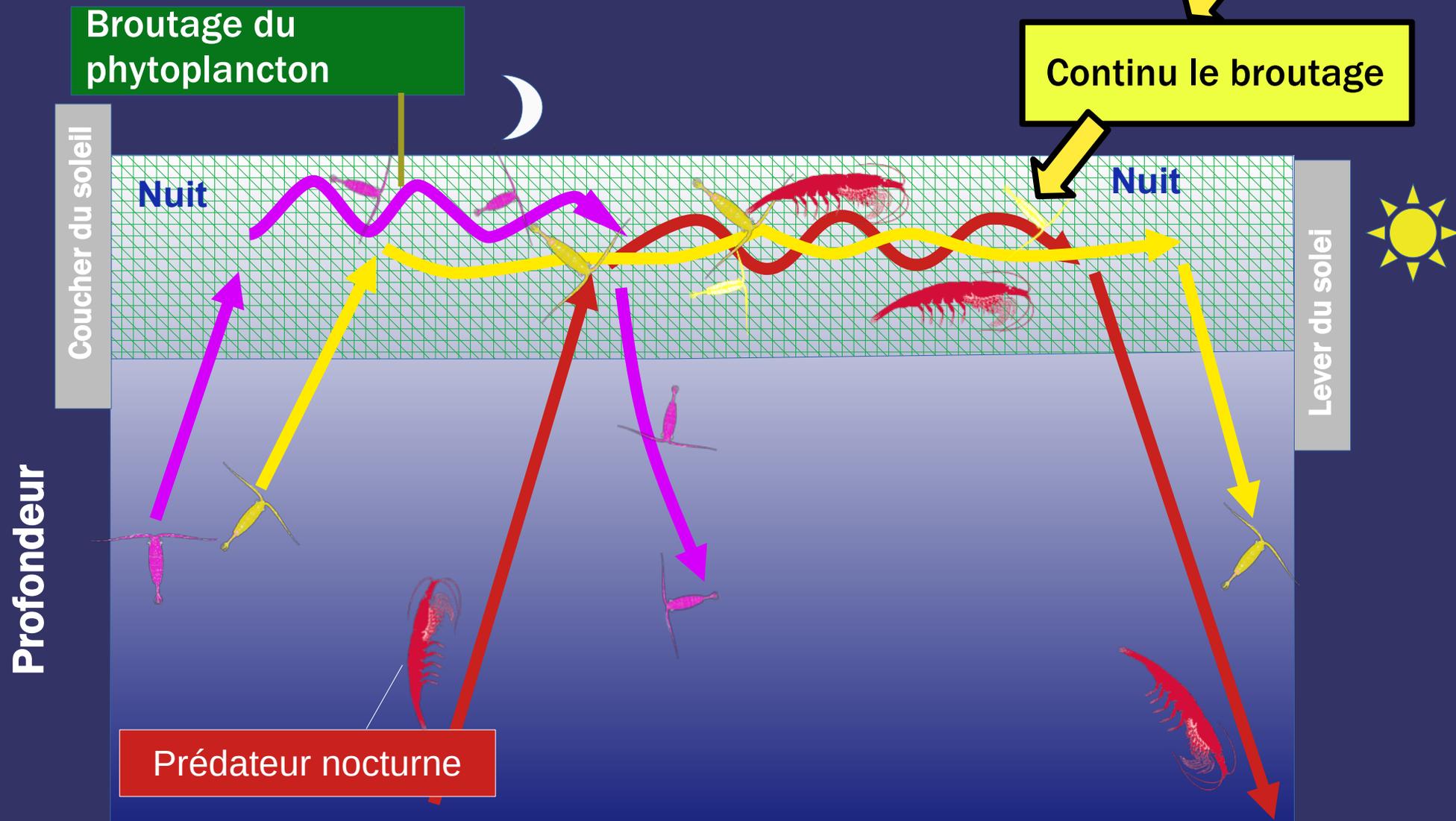


Stratégies adaptatives en réponse à un prédateur nocturne

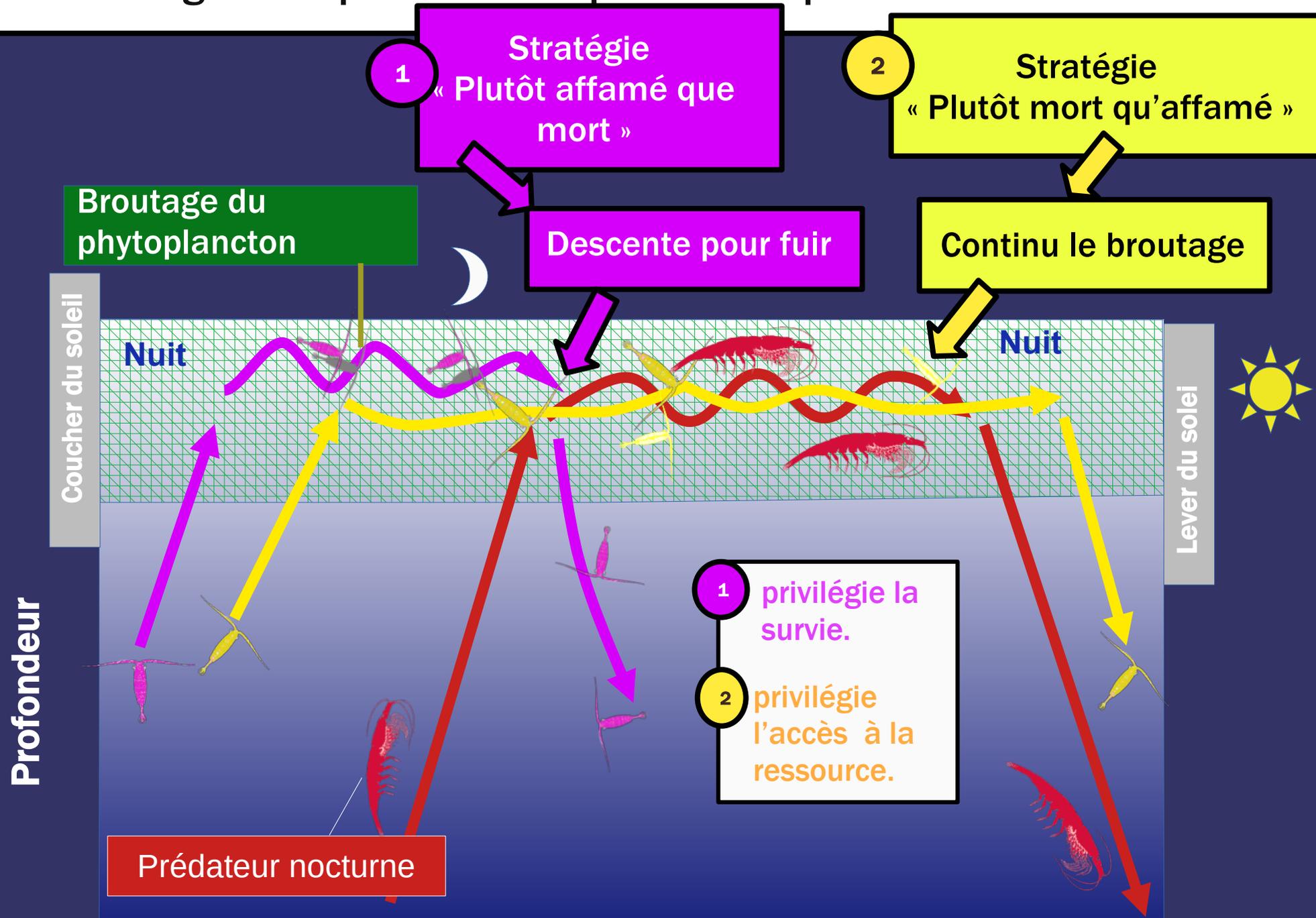
2

Stratégie
« Plutôt mort qu'affamé »

Continu le broutage



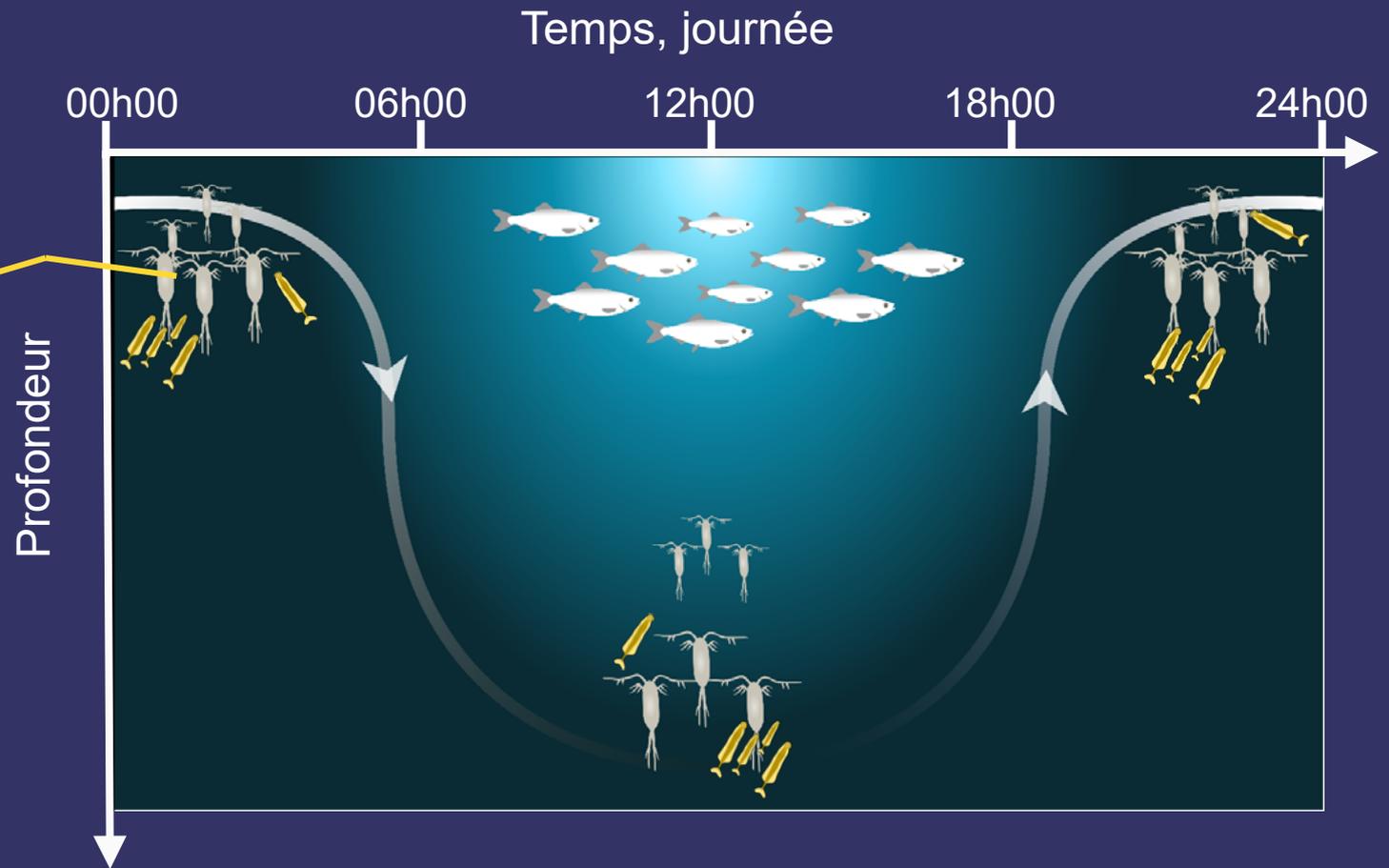
Stratégies adaptatives en réponse à un prédateur nocturne



Stratégies adaptatives : schéma standard

Migration standard :
'Gros' zooplancton
fuit les prédateurs
visuels (poisson)

'Gros' zooplancton :
Sagitta elegans
Euchaeta elongata
Euphausia pacifica



Puget Sound, Washington (47°45'N, 122°49'W),

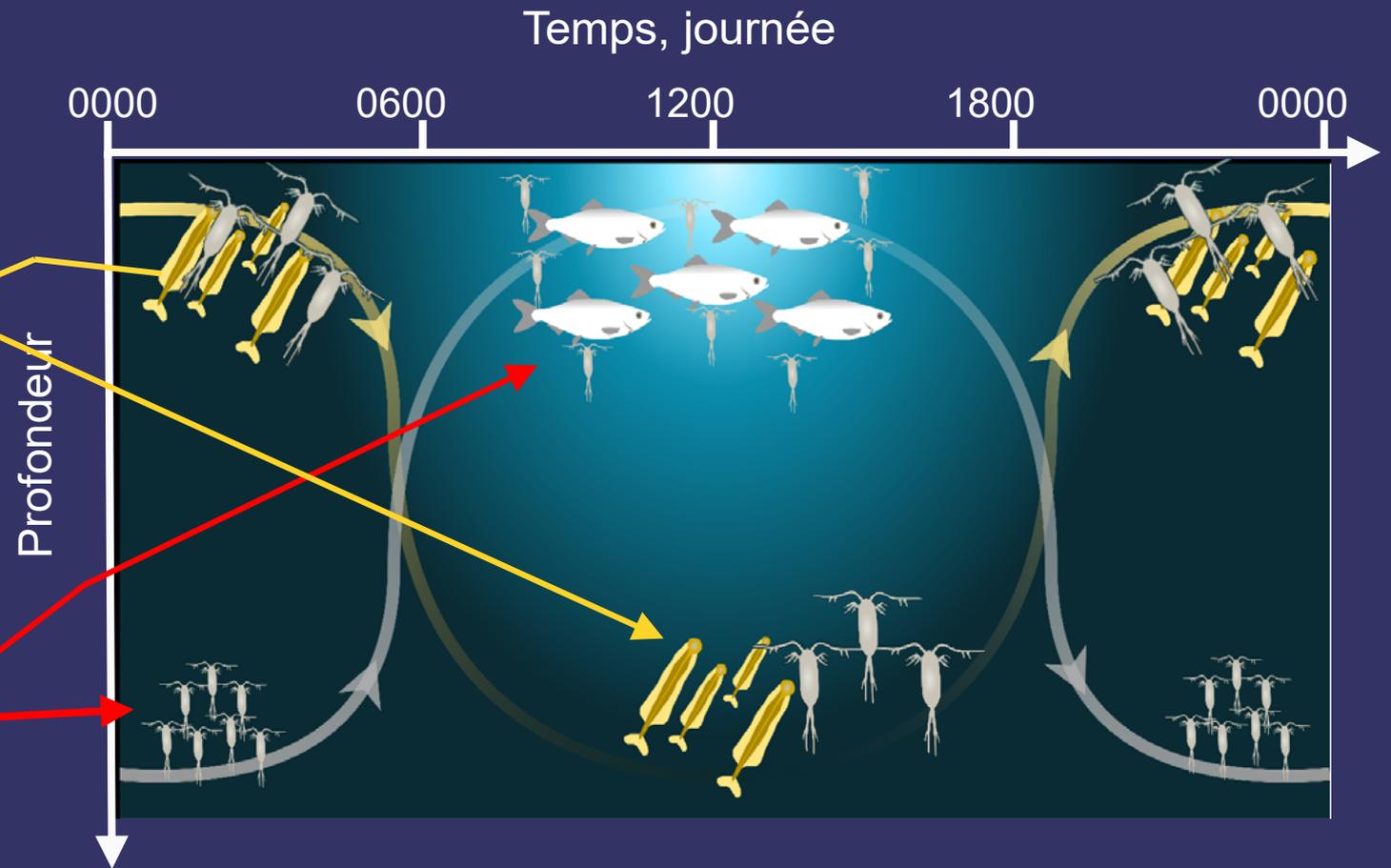
Ohman, M. D., Frost, B. W. & Cohen, E. B. Reverse Diel Vertical Migration: An Escape from Invertebrate Predators. *Science* 220, 1404–1407 (1983).

Bandara, K., Varpe, Ø., Wijewardene, L., Tverberg, V. & Eiane, K. Two hundred years of zooplankton vertical migration research. *Biol Rev* brv.12715 (2021) doi:10.1111/brv.12715.

Stratégies adaptatives : Migration inversé

Migration standard :
Gros zooplancton fuit
les prédateurs
visuels (poisson)

Migration inversée :
Le petit copépode
Pseudocalanus est
surtout impacté par
la prédation du gros
zooplancton



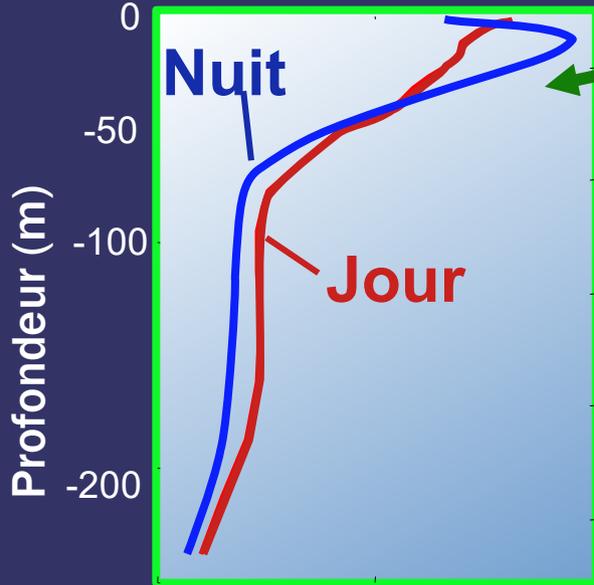
Puget Sound, Washington (47°45'N, 122°49'W),

Ohman, M. D., Frost, B. W. & Cohen, E. B. Reverse Diel Vertical Migration: An Escape from Invertebrate Predators. *Science* 220, 1404–1407 (1983).

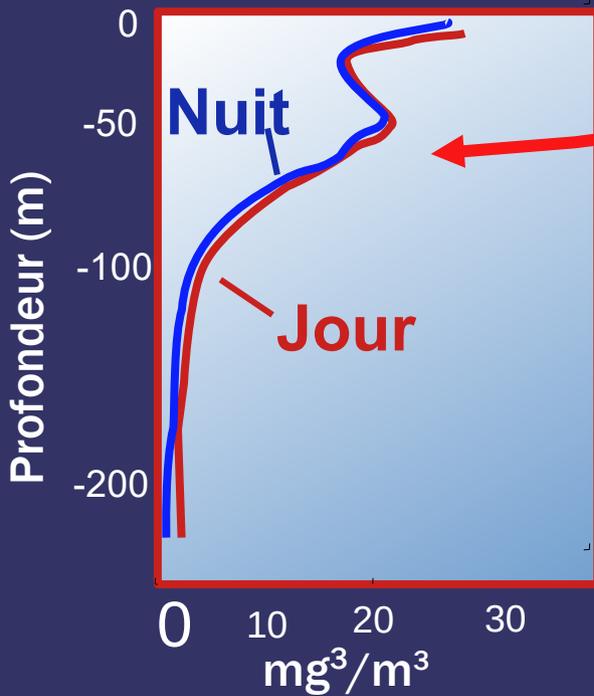
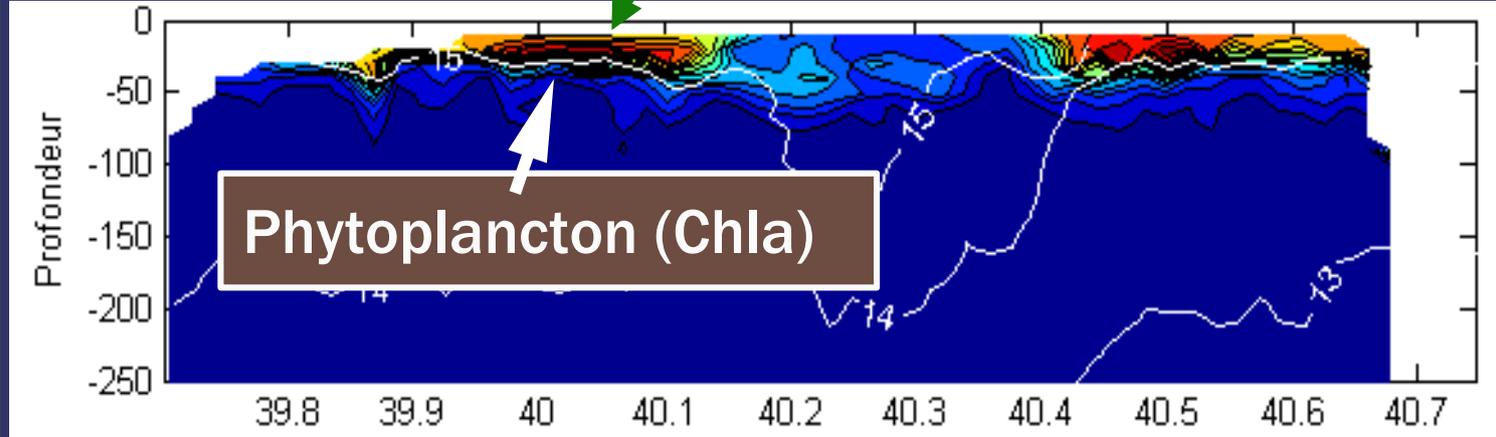
Bandara, K., Varpe, Ø., Wijewardene, L., Tverberg, V. & Eiane, K. Two hundred years of zooplankton vertical migration research. *Biol Rev* brv.12715 (2021) doi:10.1111/brv.12715.

Adaptation en fonction de l'environnement trophique

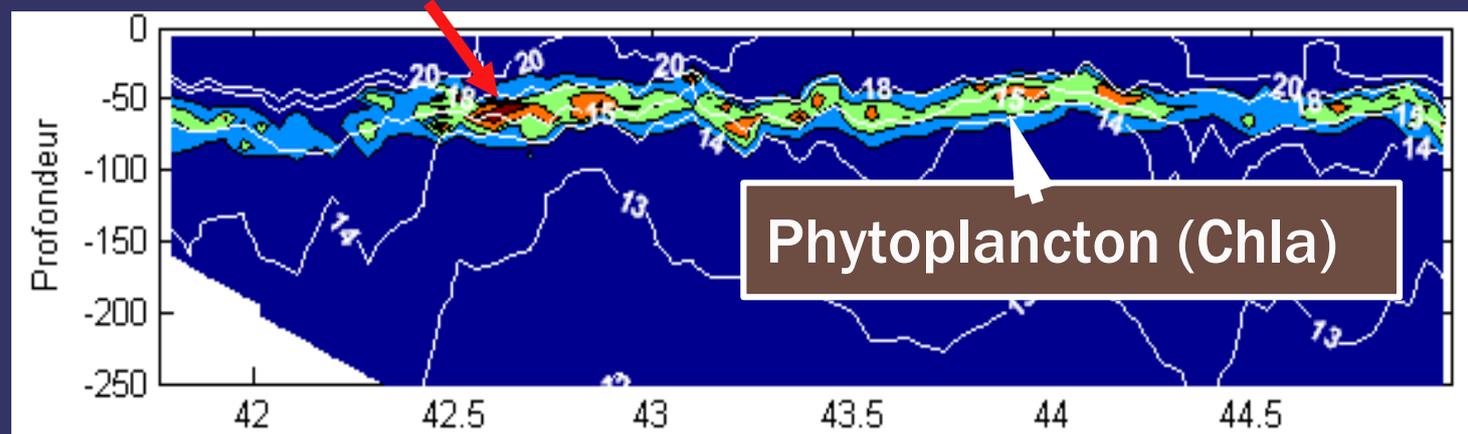
Biomasse du zooplancton



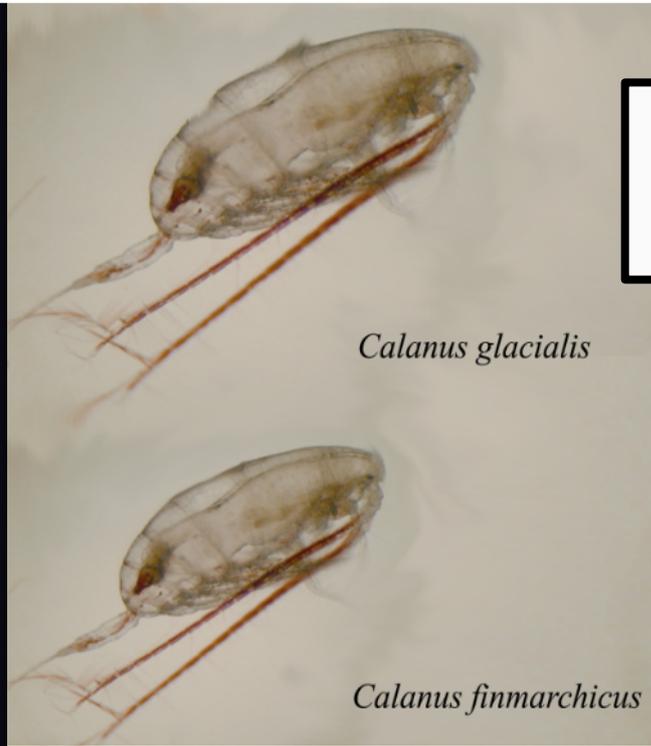
Au printemps :
Nourriture en surface → migration vers la surface la nuit.



A la fin de l'été :
Nourriture plus profonde (-60m) → pas de déplacement verticaux.

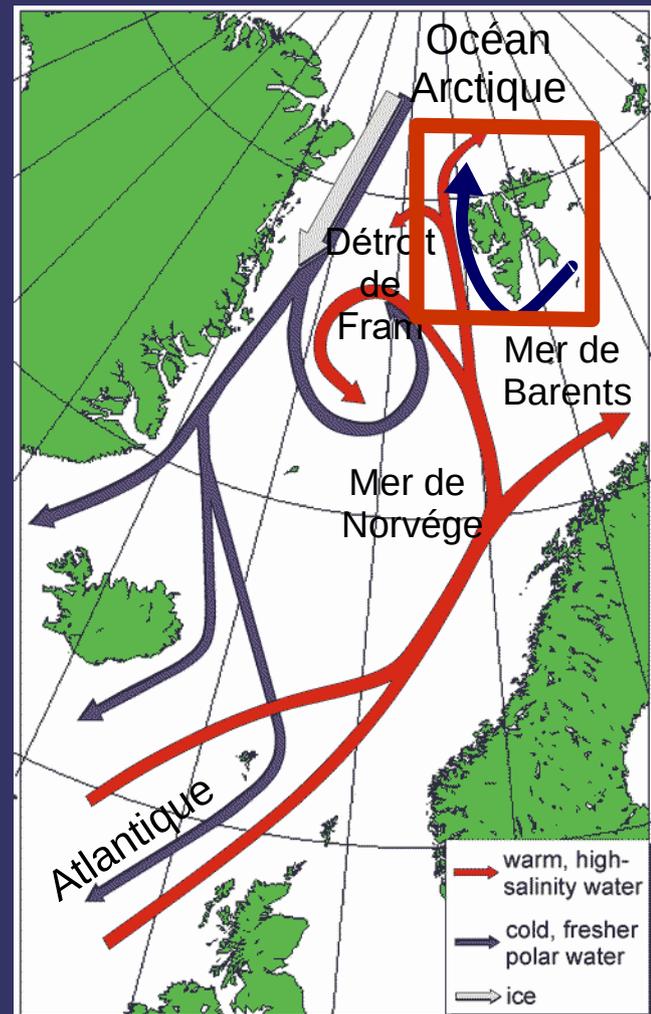
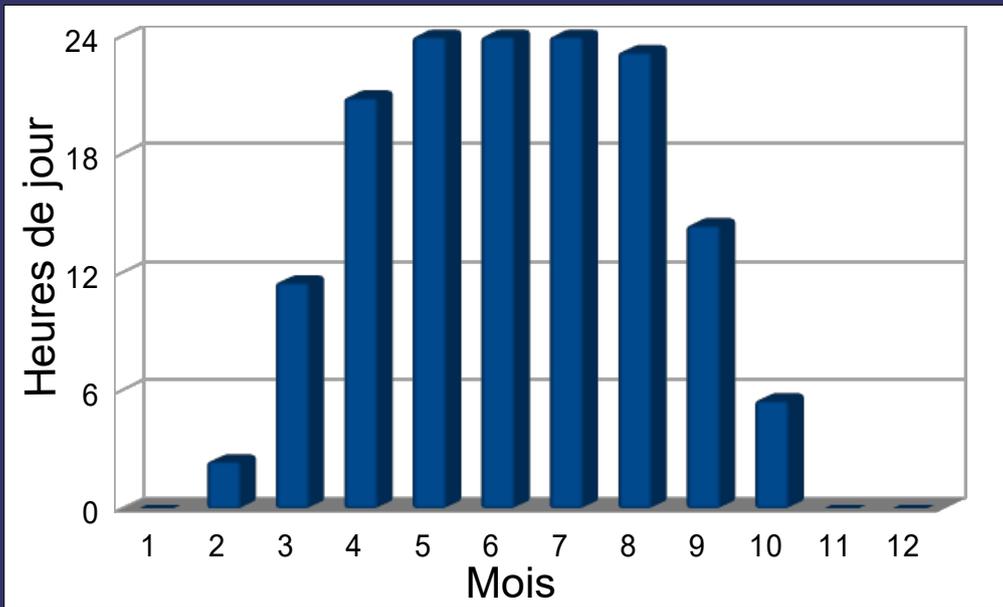


Désynchronisation de la migration : *Calanus glacialis* *C. finmarchicus*



Calanus glacialis
C. finmarchicus

Spitzberg
79 °N

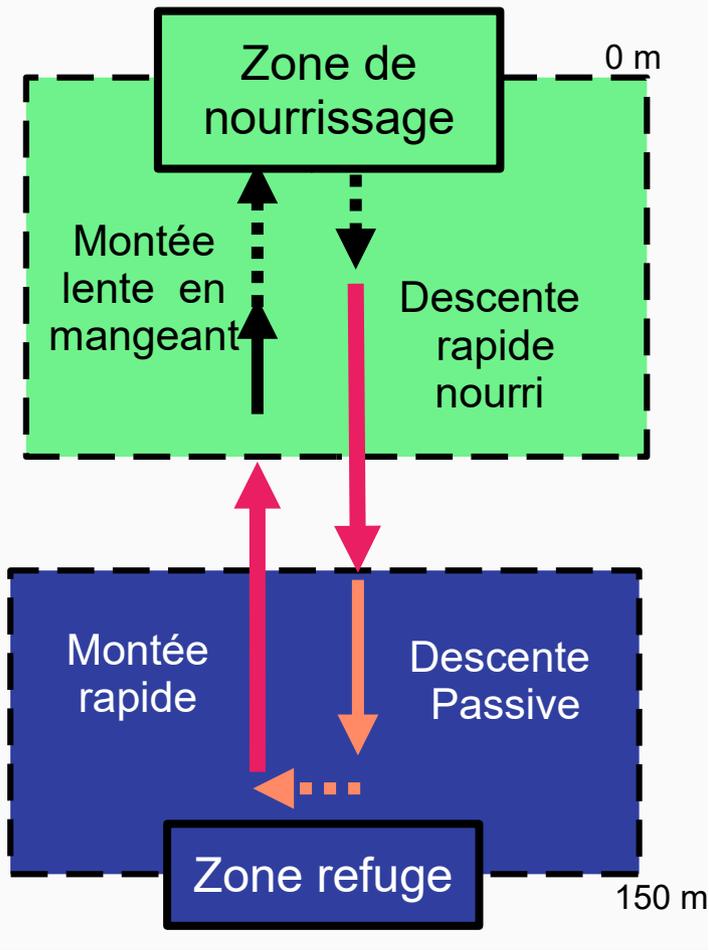


Désynchronisation de la migration

Adaptation à un éclairage permanent

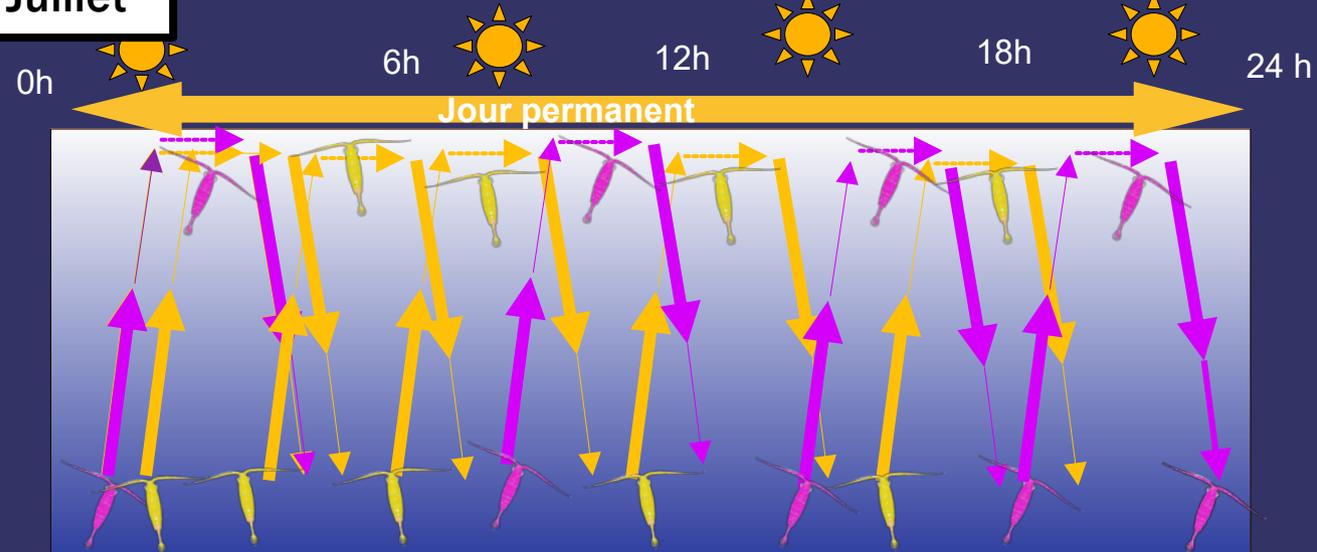
Calanus glacialis
C. finmarchicus

Schéma migratoire



Juillet

Désynchronisation pendant le jour polaire permanent

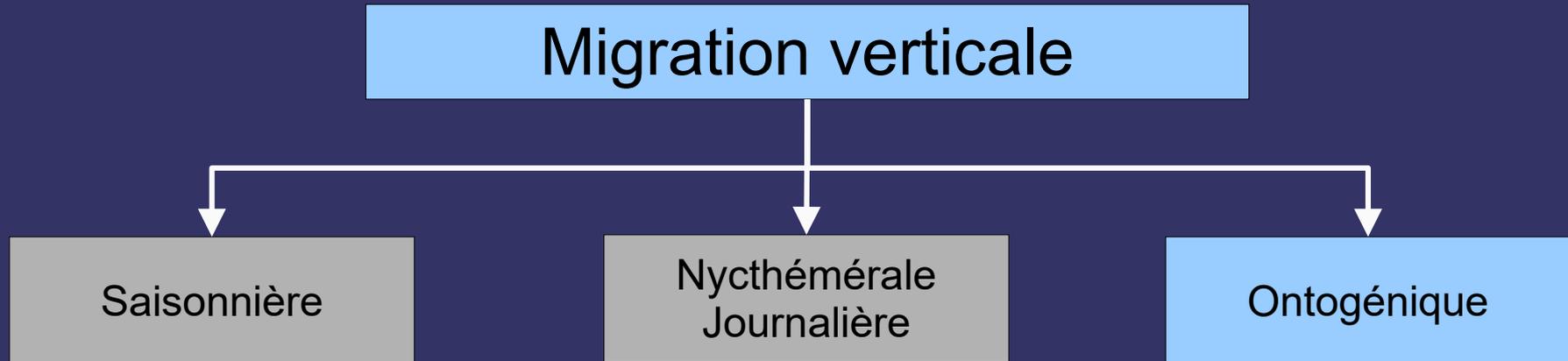


Septembre

Resynchronisation avec l'alternance jour/nuit

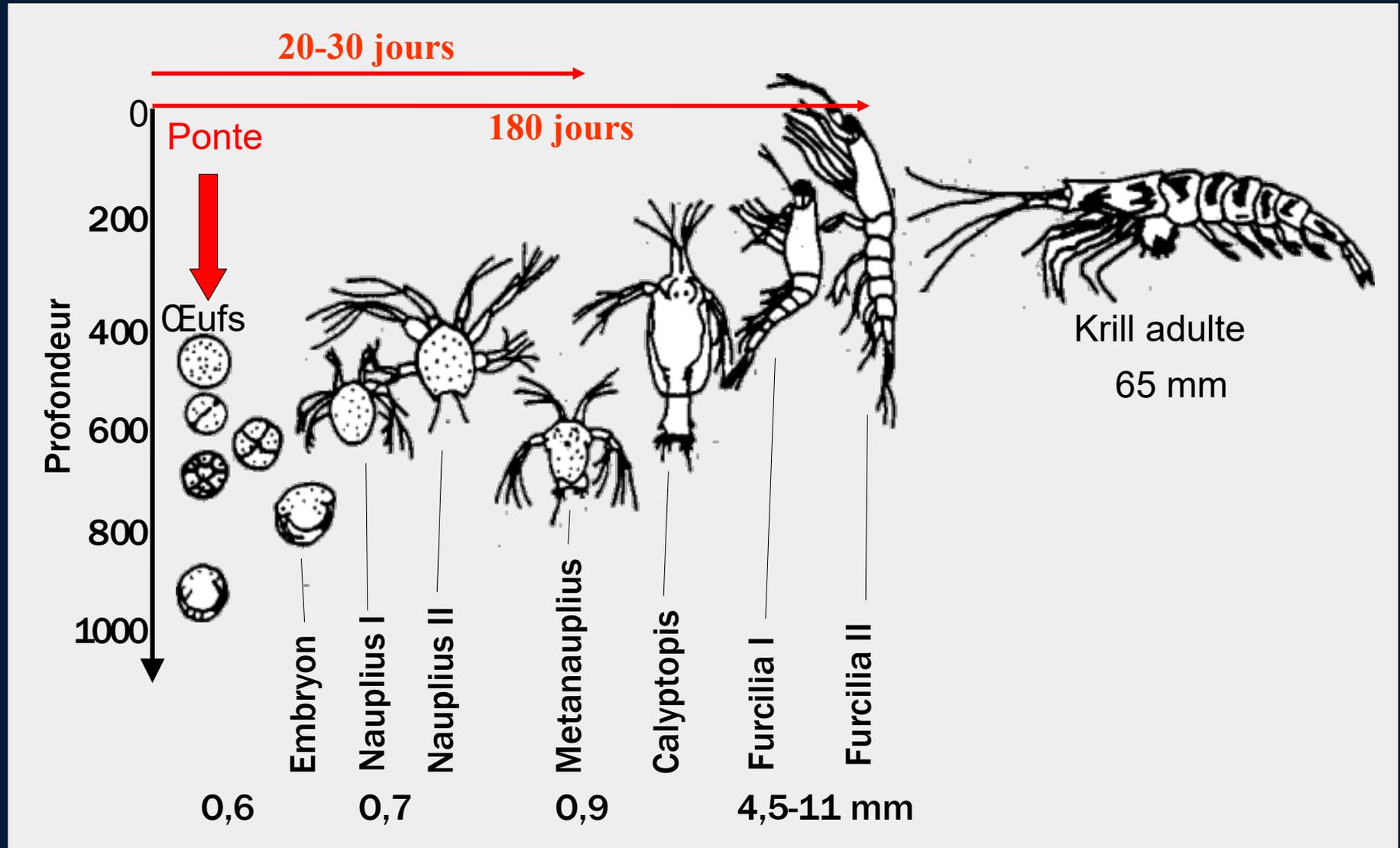


Migrations verticales ontogéniques

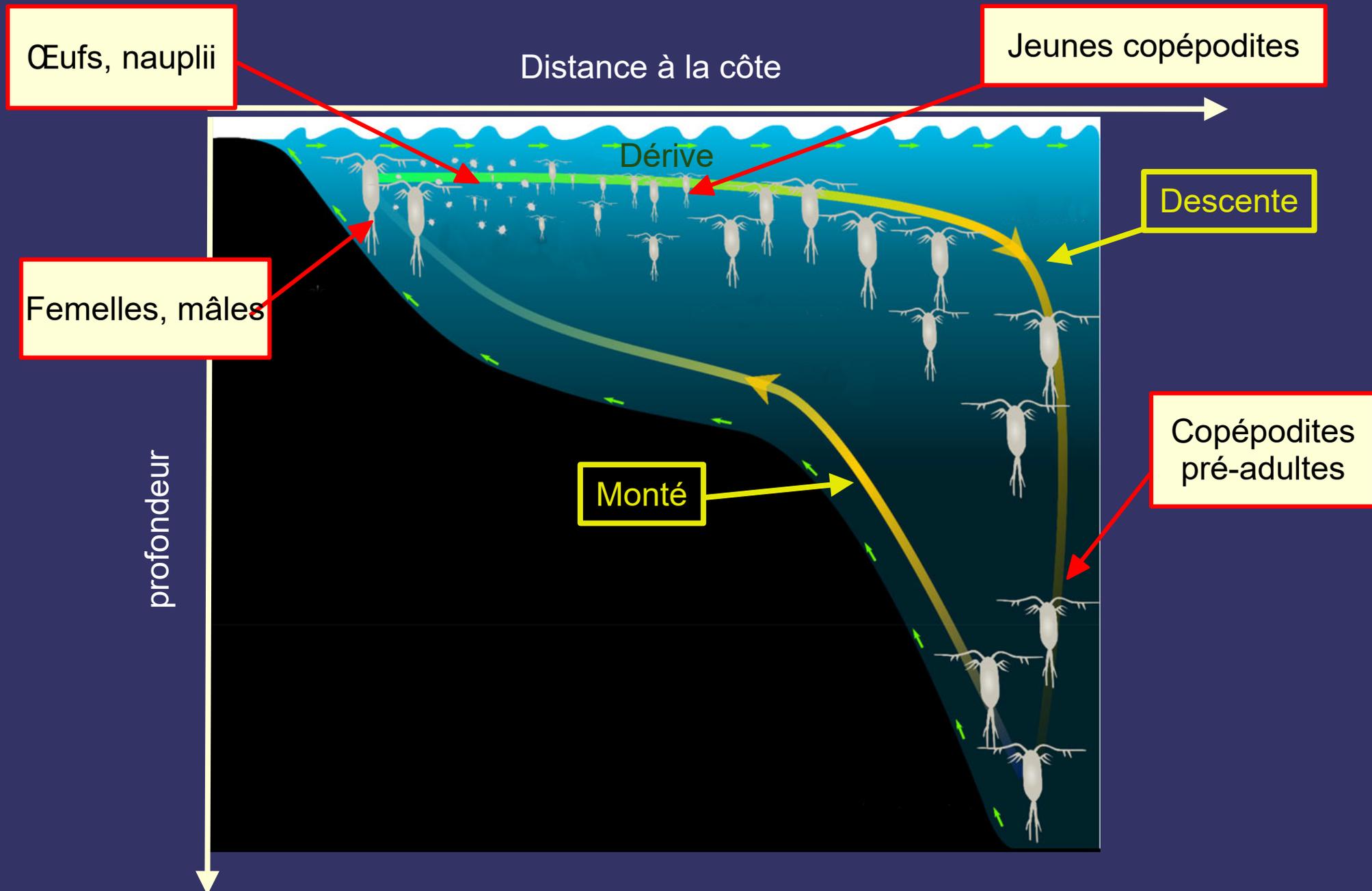


Migrations verticales ontogéniques

« Krill » austral : *Euphausia superba*

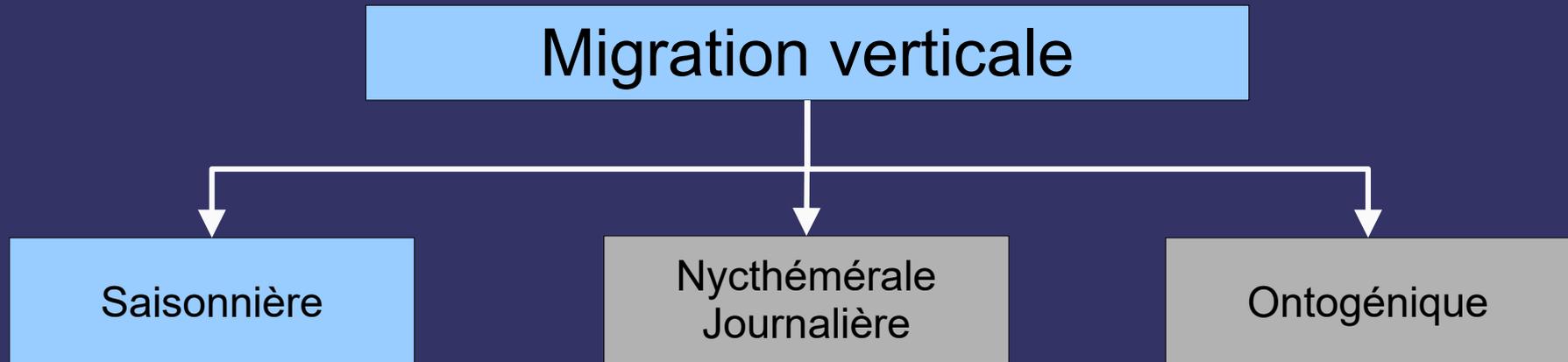


Migrations verticales ontogéniques

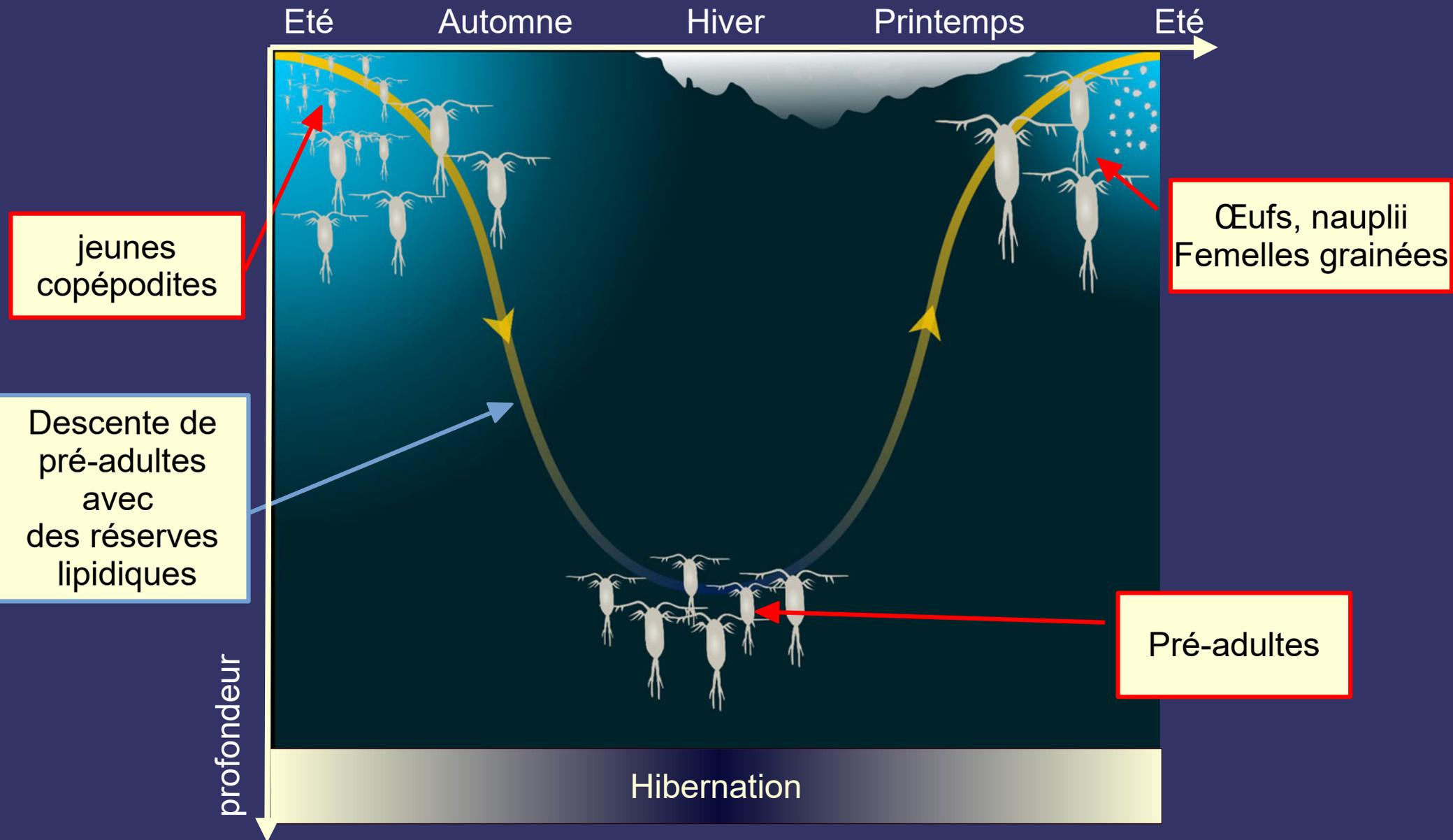


Calanus marshallae copépoide calanoïde dans une région d'upwelling côtier, Peterson (1998).

Plusieurs types de migration verticale



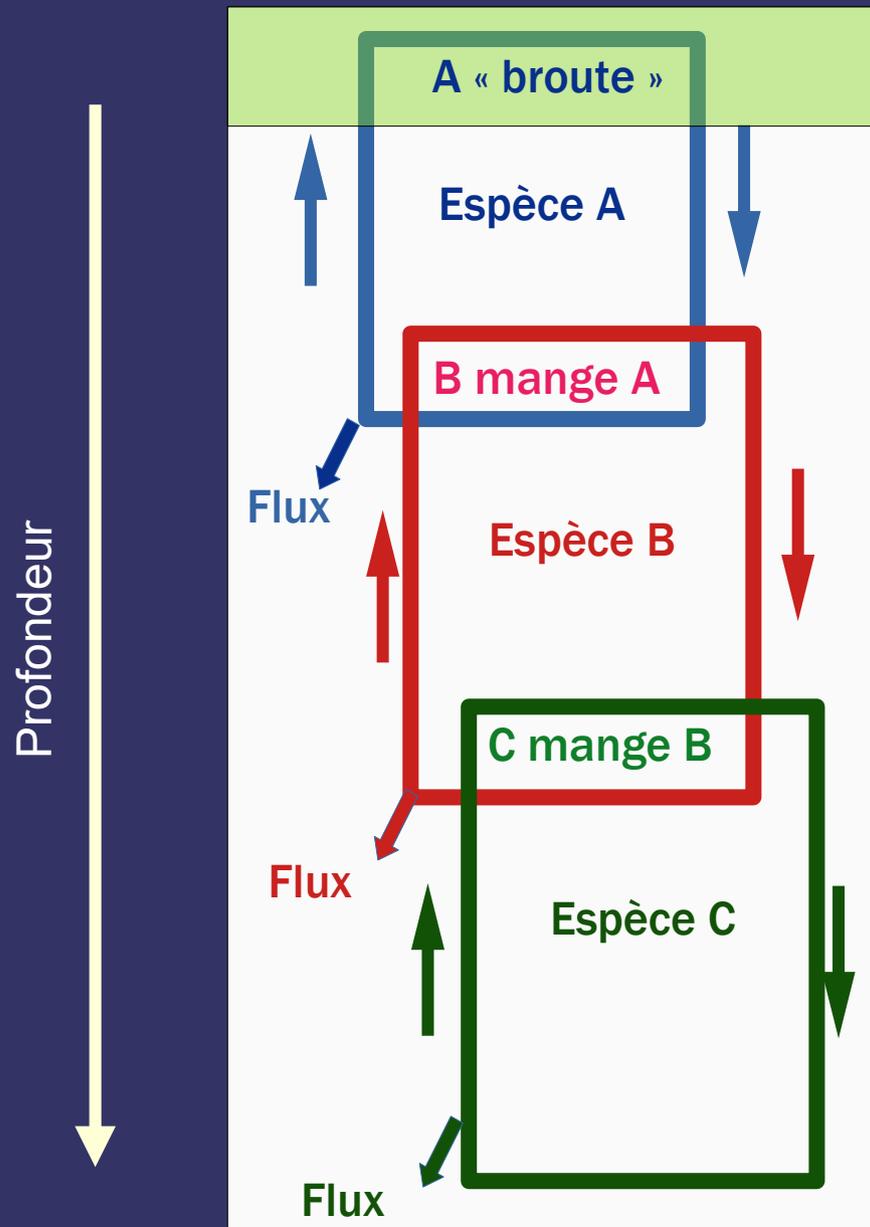
Migrations verticales saisonnières du zooplancton



En conclusion

Rôle des migrations verticales dans les flux de matière dans l'océan

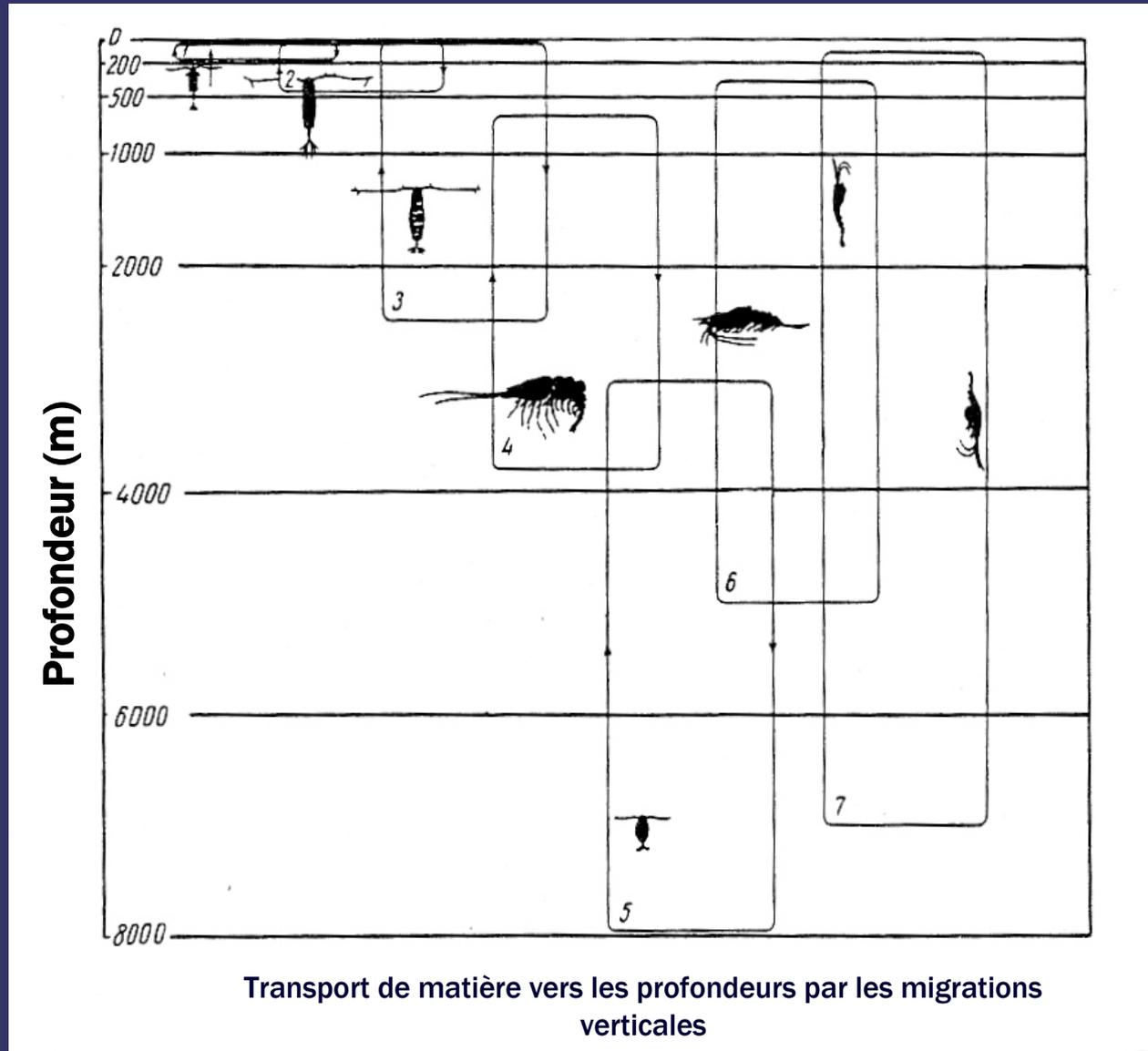
Rôle des migrations verticales dans les flux de matière dans l'océan



L'interconnexion de maillons trophiques migrant verticalement induit des transferts verticaux de matière dans l'océan.

Flux = Flux liés à écophysiologie (Fèces respiration- excrétion)

Rôle des migrations verticales dans les flux de matière dans l'océan



L'écophysiologie des espèces migrantes, respiration- excrétion-fèces- mortalité , représenterait de 1/6 à 1/3 du flux passif de carbone particulaire dans l'océan.

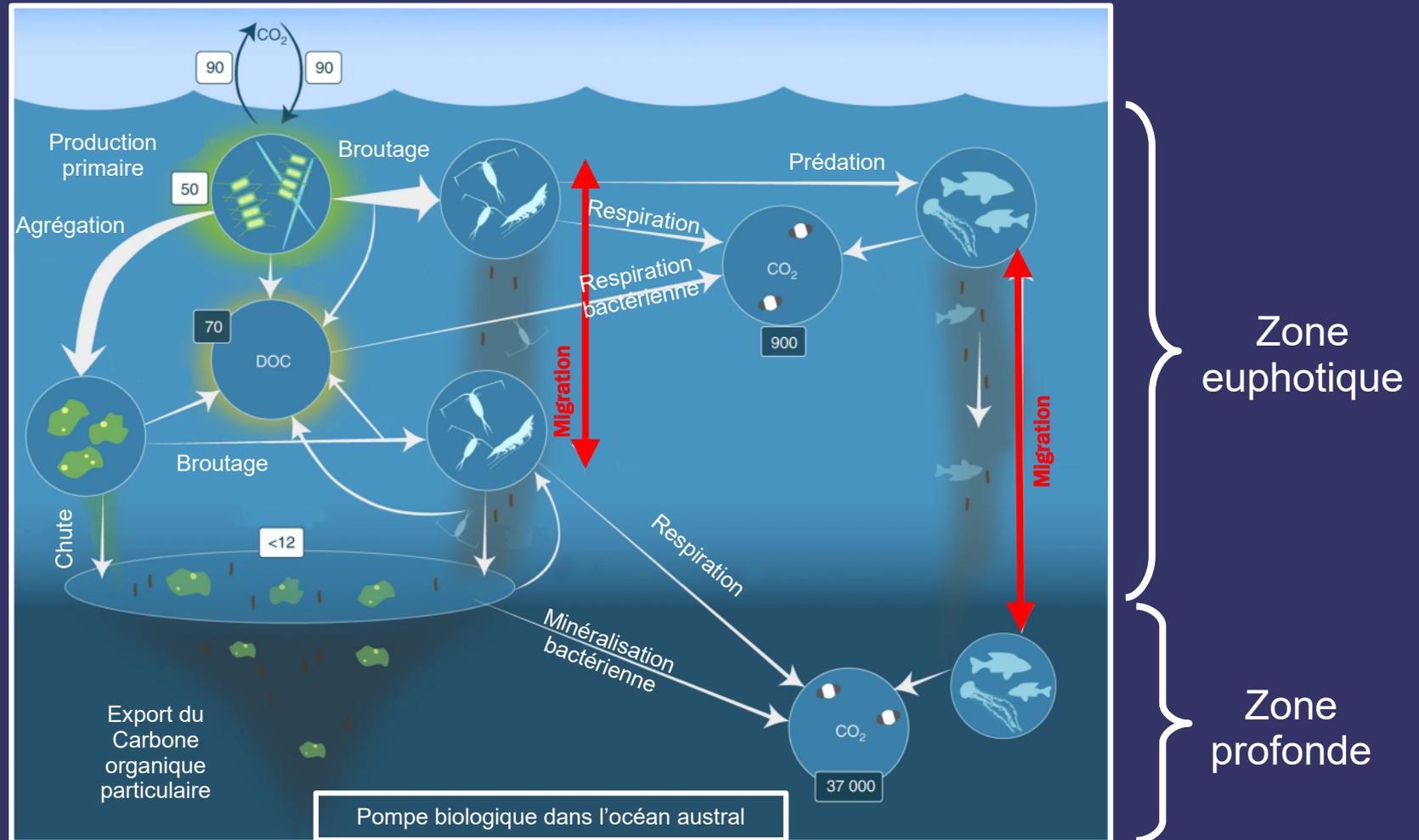
Rôle des migrations verticales dans les flux de matière dans l'océan

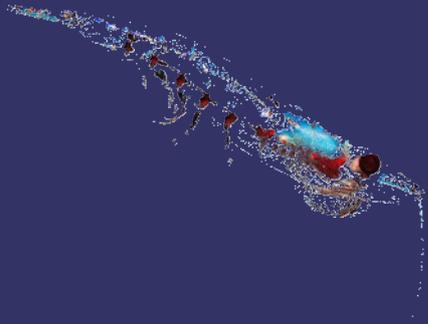
L'écophysiologie des espèces migrantes, respiration- excrétion-fèces- mortalité, de 1/6 à 1/3 du flux de carbone particulaire dans l'océan.

Flux en Gt de C par an

Masse en Gt de C

DOC : Carbone organique dissous





Merci de votre attention