

**Diapo 1 :**

Notre projet porte sur l'étude de la propagation des ondes acoustiques dans le milieu océanique. Les résultats que nous mettrons en évidence auront pour but d'illustrer quelques enjeux de la lutte anti-sous-marine, notamment ceux liés à la dissimulation des sous-marins dans l'océan.

**Diapo 2 :**

C'est pourquoi notre étude s'appuiera sur la problématique suivante :

Comment la connaissance des paramètres environnementaux assure-t-elle aux sous-marins une discrétion optimale ?

Dans un premier temps j'évoquerai certaines caractéristiques ou propriétés du milieu océanique utiles à la compréhension de notre TIPE puis je parlerai des lois de l'optique géométrique qui permettront de prévoir la propagation d'un rayon acoustique. Ensuite je vous présenterai le programme que nous avons écrit et qui illustre les propriétés vues dans les parties précédentes puis je finirai en reliant notre projet au domaine de la détection sous-marine.

**Diapo 3 :**

A l'échelle du globe terrestre, les océans présentent de nombreuses inhomogénéités dans leurs caractéristiques physiques que ce soit au niveau de la surface ou bien au niveau de la profondeur. Ces inhomogénéités sont principalement dues à la température et à la salinité et elles entraînent donc l'existence de masses d'eau dans l'océan ainsi qu'une évolution des couches de surface en température et en salinité au cours d'une année.

Ces deux planisphères représentant la température de l'eau à 3m de profondeur au mois de janvier 2008 puis juillet 2008 mettent en évidence l'évolution des couches de surface au cours d'une année. En effet bien que la différence ne soit pas flagrante, on peut voir au niveau de l'équateur que la température a augmenté de quelques degrés tandis que l'eau s'est rafraîchie au niveau du pôle sud.

Ces variations qui ne semblent pas très importantes vont toutefois avoir un impact considérable sur la propagation des rayons acoustiques.

**Diapo 4 :**

Au début des années 1900 Lichte montre expérimentalement que la vitesse du son dans l'eau dépend de la salinité, la température et la pression. Cette dépendance sera plus tard établie mathématiquement par la formule  $c^2 = \dots$  dans laquelle  $\beta$  représente le coefficient de compressibilité de l'eau (abaque) et  $\rho$  la masse volumique donnée par l'équation d'état de l'eau de mer.

### Diapo 5 :

Afin de mettre en évidence l'impact de l'environnement sur le trajet des rayons acoustiques, nous sommes parties des lois de l'optique géométrique énoncées par Descartes : pour un rayon incident parvenant au contact d'un dioptré et formant un angle  $i_1$  avec la normale, la direction du rayon réfracté est reliée à l'angle d'incidence et l'indices des deux milieux par la relation  $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$ . L'angle que forme le rayon réfléchi avec la normale vérifie quant à lui  $r = i_1$ .

Or d'après la relation  $n = c_i/c$  (**ATTENTION :  $c$  = valeur de référence et pas célérité dans le vide**) et d'après ce qui a été dit dans la partie précédente à savoir que les propriétés du milieu marin varient continuellement, on a  $c_i$  qui varie pour chaque point de l'espace donc  $n_i$  varie continuellement. De ce fait le rayon subit des réfractions successives car c'est comme si on avait une infinité de dioptrés, ce qui courbe le trajet du rayon et donne à celui-ci l'apparence que vous voyez sur le schéma.

### Diapo 6 :

Afin de mieux comprendre ce phénomène nous avons décidé de le modéliser informatiquement en python. Nous avons donc créé un programme qui retrace le trajet d'un rayon acoustique dans un milieu océanique donné. Je vais m'appuyer sur le schéma suivant afin de vous en expliquer le fonctionnement : supposons que l'on ait discrétisé l'espace dans lequel se propage le rayon en rectangles de longueurs  $\Delta z$  et de largeur  $\Delta x$ . Nous faisons de plus l'approximation que les propriétés physiques de l'eau de mer sont fixées au sein d'une case discrétisée ce qui entraîne, d'après la loi de Snell-Descartes que les rayons se propagent en ligne droite dans une case.

Le principe du programme repose alors sur la détermination de la provenance du rayon (où rentre-t-il dans la case), la détermination de l'équation de la droite selon laquelle se propage le rayon dans la case et les coordonnées en lesquelles celui-ci quitte la case. Ce processus est alors répété de case en case jusqu'à ce que le rayon atteigne les limites de l'espace que nous avons défini.

(Parler réflexion surface)

### Diapo 7 :

Je vais maintenant me pencher plus en détail sur notre programme Python.

Afin de faciliter le problème, nous avons créé de nombreuses fonctions annexes et je vais vous présenter les plus importantes. La première étape consiste à calculer la célérité de l'onde en une case discrétisée ce qui nous donnera accès à l'indice du milieu. Pour cela nous avons repris une équation simplifiée de l'équation d'état de l'eau de mer présentée précédemment qui prend en entrée une abscisse et une ordonnée et qui fait appel à des fonctions température, salinité et pression. La seconde fonction consiste à appliquer les formules de Snell-Descartes pour la réfraction et la réflexion et elle se sert donc de la fonction précédente. Il faut ensuite déterminer l'équation de la droite selon laquelle se propage le rayon à partir de l'angle réfracté et d'un point par lequel passe ce rayon, ici les coordonnées où le rayon rentre dans la case.

A partir de ces trois fonctions principales nous pouvons créer le programme final suivant le modèle que je vous ai présenté dans la diapo précédente, c'est-à-dire que l'on détermine la propagation du rayon de case en case et au final nous obtenons une courbe qui est en fait une succession de segments.

## Diapo 8 :

(Faire des tests avec une célérité uniforme pour voir si les résultats sont cohérents)

Afin de tester le fonctionnement de notre programme ainsi que de donner une première illustration des phénomènes que nous étudions, nous avons créé nous même un environnement océanique schématique. Les courbes représentant la célérité en fonction de la profondeur à droite et à gauche représentent des situations proches de la réalité. Sur la première partie de l'espace, la célérité correspond au profil un tandis que sur la seconde partie de l'espace après la rupture la célérité correspond à ce second profil. Nous mettons ainsi en évidence l'impact de l'environnement sur la propagation du rayon puisque quand la thermocline disparaît (montrer la thermocline sur le profil = sorte de palier où la célérité diminue fortement), les rayons coincés en surface plongent soudainement.

(Comparer le résultat avec des sources fiables)

Notre problématique portant sur l'exploitation du milieu marin afin de dissimuler les sous-marins, nous mettons ici en évidence l'existence de zones dans lesquelles les rayons ne se propagent pas : ces zones sont appelées zones d'ombre (les montrer sur le schéma). En se plaçant à ces endroits stratégiques les sous-marins ne pourront pas être détectés par les sonars.

Cependant les résultats que vous voyez là, ont été créés pour reproduire des situations quasi-réelles mais sont tout de même caricaturaux. Nous avons donc décidé d'implémenter des données réelles dans le programme afin de les comparer à ces résultats.

## Diapo 9 :

Je vais donc vous présenter le programme ARGO. C'est un programme international qui fonctionne grâce à des flotteurs lâchés dans tous les océans. Pour indication il y a en ce moment environ 3000 flotteurs actifs dans le monde. Sur l'image, les points bleus représentent les flotteurs implémentés par les organismes européens et il y en a donc tout autant dans les océans pacifiques et indiens. Les flotteurs récoltent des données de température, de salinité et de pression jusqu'à 2000m de profondeur que nous pouvons ensuite récupérer sous forme de fichier Excel.

## Diapo 10 :

Avant de passer à la suite je vous montre à quoi ressemble les données auxquelles nous pouvons accéder avec ce programme :

A gauche vous pouvez voir l'évolution de la température en un point du globe au cours d'une année.

A droite le graphique représente la température en fonction de la profondeur et chaque couleur représente une date de l'année. Nous voyons alors qu'au cours de l'année la thermocline disparaît puis se reconstitue l'année suivante.

## Diapo 11 :

L'objectif pour nous a été de récupérer ces données en Python pour pouvoir ensuite les exploiter. Nous avons décidé de travailler avec des listes. Nous associons à une liste de pression la liste des températures correspondantes. Le problème qui s'est alors posé est que dans la version précédente du programme, la température était donnée par une fonction continue alors que nous utilisons désormais des valeurs discrètes.

Pour y remédier nous avons codé une fonction de recherche dichotomique qui nous renvoie une valeur de température approchée à la profondeur souhaitée. La suite du programme reste inchangée par rapport à la version précédente.

Comme pour la version précédente du programme nous avons tracé la propagation de plusieurs rayons dans un milieu donné avec un changement de profil de célérité au milieu. Cette fois nous ne remarquons plus un changement important dans la direction de propagation, que nous associons au fait que les profils ne varient plus aussi brusquement, mais également aux approximations faites dues à la discontinuité de nos valeurs de température.

#### **Diapo 12 :**

Toute l'étude que nous venons de réaliser est effectuée en temps réel par des appareils militaires tel que les gliders. Ces données sont directement transmises aux bâtiments militaires qui se déplacent alors pour rester invisible des appareils de détection ennemis. Bien que nous n'ayons pas réussi à mettre en évidence l'existence des zones d'ombre à partir de données réelles, celles-ci existent bien et représentent un atout majeur.

D'autres applications peuvent découler de nos observations tel que l'utilisation de zones d'iso célérité dans lesquelles la célérité est minimale ce qui permet de propager les rayons sur des distances très importantes en minimisant l'atténuation subit par les rayons.