

LA MER NOIRE : L'ÉVOLUTION D'UN LAC D'EAU DOUCE EN UNE MER D'EAU SALEE PROVOQUE LA FONTE D'HYDRATES DE GAZ.

Vincent Riboulot¹ (chercheur) et la classe de 1^{ère} générale spécialité SVT du lycée Groupe Scolaire Sévigné de Joséphine Sawadogo Villain² (*la liste des élèves est mentionnée en fin d'article*)

Article original/Original article: Riboulot, V., Ker, S., Sultan, N., Thomas, Y., Marsset, B., Scalabrin, C., Ruffine, L., Boulart, C., Ion, G.,. *Freshwater lake to salt-water sea causing widespread hydrate dissociation in the Black Sea*. 2018. Nature Communications 9, 117.

Institution : ¹IFREMER, REM-GM, BP70, 29280 Plouzané, France
²Lycée Groupe Scolaire Sévigné, 20 Rue de la Sous-Préfecture, 60200 Compiègne

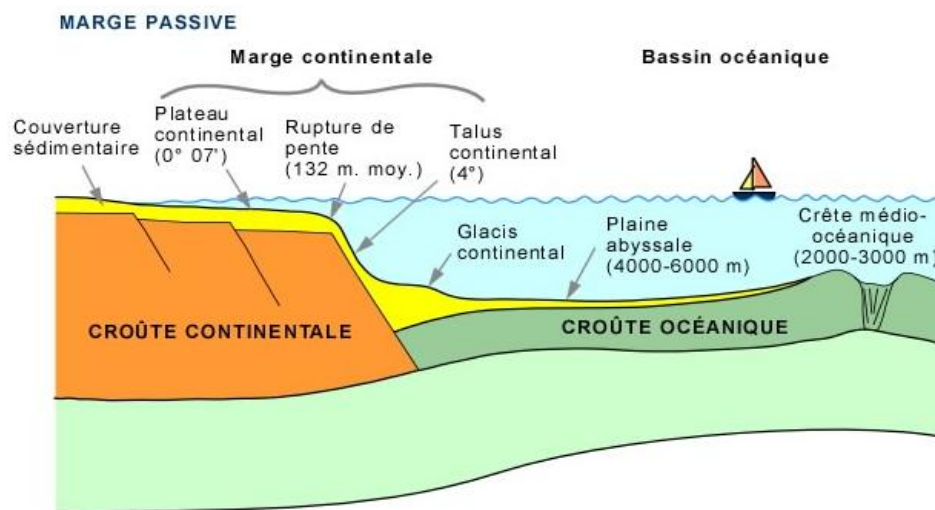


Figure 1 : Coupe schématique des fonds océaniques dans un contexte de marge passive (pas en subduction). Les marges continentales*, zones de transition entre la croûte continentale et la croûte océanique, sont composées d'un plateau continental, d'un talus continental ainsi que d'un glacis continental.
<http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/relief.oceans.html>

Résumé :

Le méthane est un gaz à effet de serre qui peut se trouver dans la nature sous forme de bulles ou dissoute dans l'eau ou l'air mais aussi sous la forme solide appelée hydrates de gaz*. Cette forme est peu connue, elle ressemble à de la glace et s'observe seulement dans les sols gelés, permafrost, et sur les fonds marins à grande profondeur d'eau (très forte pression) et faible température (mais supérieure à 0). Nous nous intéressons ici aux hydrates présents dans les sédiments marins le long des marges continentales (**Fig. 1**). Les hydrates de gaz sont composés de molécules d'eau et de gaz et sont généralement stables c-à-d qu'ils ne fondent pas sauf si les paramètres environnementaux évoluent de manière naturelle ou anthropique (liée à une activité humaine). Si le niveau marin baisse, ou que la salinité et la température augmentent, les hydrates

1

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.

peuvent fondre et relarguer de grandes quantités de bulles de gaz dans les couches sédimentaires. Les surpressions générées dans ces couches sédimentaires peuvent conduire à des glissements de terrain et/ou à la sortie de gaz sur les fonds marins. Ce gaz, majoritairement du méthane, puissant gaz à effet de serre, peut augmenter l'acidification des océans et le réchauffement climatique si celui-ci arrive jusqu'à l'atmosphère. Cette étude a montré, à travers l'exemple de la mer Noire (**Fig. 2**), qu'une fonte d'une partie des hydrates de gaz est en cours et pourrait se prolonger dans le futur en raison des récents changements de salinité de l'eau de mer. La diffusion* récente et future du sel au sein des sédiments déstabilise les hydrates de gaz en réduisant l'étendue et l'épaisseur de leur zone de stabilité thermodynamique* sur une région d'au moins 2800 kilomètres carrés. Nous soupçonnons que ce processus puisse se produire dans d'autres régions du monde comme par exemple la mer Caspienne et la mer de Marmara.

Mots clés : Méthane ; Fonte des hydrates de gaz ; Salinité de la mer ; Géologie ; Mer Noire

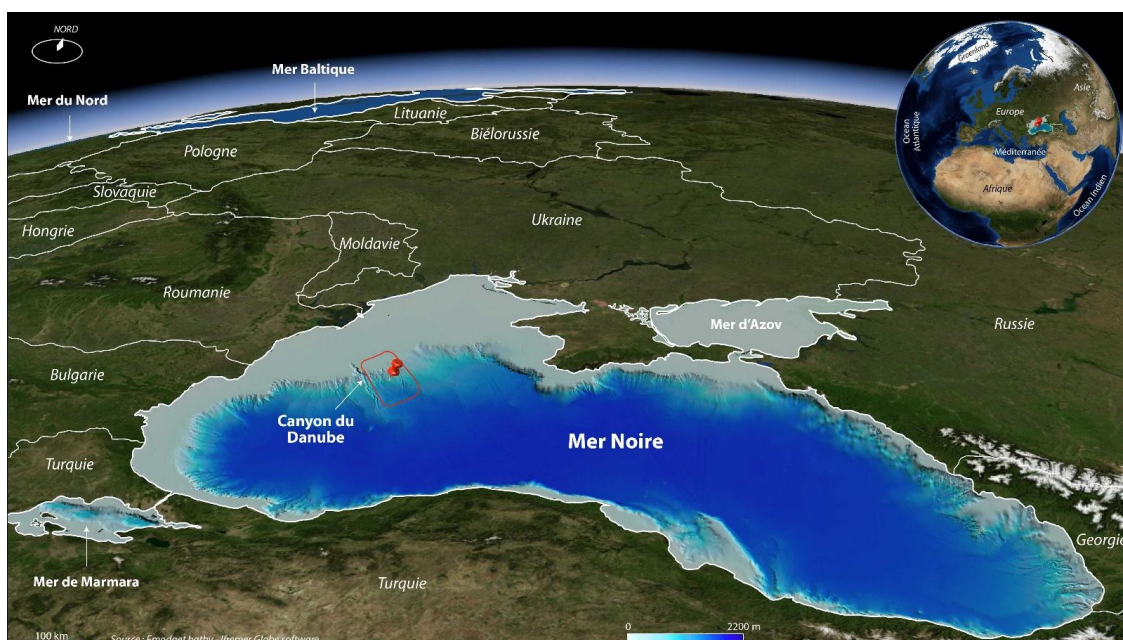


Figure 2 : Carte localisant la mer Noire et la zone d'étude (en rouge). La mer Noire est située à la limite sud entre l'Europe et l'Asie, et est bordée par, entre autres, la Russie, l'Ukraine et la Turquie. La zone d'étude est située au nord-est du Canyon du Danube au large de la Roumanie



1 Introduction

1.1 Définition

Les hydrates de gaz, également appelés clathrates de gaz, sont des composés solides formés par l'association de molécules de gaz et de molécules d'eau. Ils sont semblables à de la glace (**Fig. 3**). Ils sont présents dans le monde entier (**Fig. 4**), sur la terre dans les pergélisols* et dans des conditions de basse température et de haute pression dans le sous-sol des océans (les sédiments marins). La quantité de gaz libre piégé sous forme d'hydrates pourrait surpasser les réserves totales de gaz naturel. Le méthane est le principal hydrocarbure présent dans les hydrates de gaz dans les sédiments marins, avec des concentrations près de 100 fois supérieures à celles des autres hydrocarbures gazeux.

1.2 Risques liés à la présence des hydrates de gaz dans les sédiments marins

Les hydrates de gaz présents dans les sédiments sont sensibles aux changements environnementaux globaux. En effet, ils peuvent se former ou fondre en fonction des changements opérés. Une réduction de la pression en raison de la baisse du niveau de la mer, ou une augmentation de la température due au réchauffement des eaux de fond entraîneraient une réduction de la zone dans laquelle les hydrates de gaz sont stables et une fonte des hydrates présents dans cette zone. Cette fonte des hydrates est responsable du relargage massif de gaz dans les sédiments qui peut provoquer des surpressions dans les sédiments et la formation de zones de rupture propices au déclenchement de glissements sous-marins pouvant eux-mêmes provoquer des

tsunamis et le relargage de méthane dans les océans voire l'atmosphère (**Fig. 5**). De plus, étant donné que les hydrates de gaz sont présents dans les sédiments superficiels des marges continentales du monde entier, ces phénomènes naturels pourraient survenir partout dans le monde (**Fig. 4**). On suspecte également que **ces gaz à effet de serre** provenant des fonds marins contribuent à l'acidification des océans et aux changements climatiques lors d'épisodes de **relargage massif** de carbone associés à des perturbations climatiques rapides. Toutefois, il est probable que le rôle des hydrates de gaz dans le changement global soit surestimé. On ne sait pas encore quelle partie du méthane des hydrates pénètre dans l'atmosphère et quelle influence elle pourrait avoir sur le climat.

1.3 Comment repérer les hydrates de gaz dans les sédiments marins ?

Pour étudier le sous-sol marin, il est possible de réaliser des coupes du sous-sol, comme une échographie des fonds, en envoyant des ondes sismiques, par exemple des bulles d'air, émises depuis une source tractée par un bateau à la surface de l'océan vers les fonds (**voir 5.2**). L'image sismique acquise est une coupe du sous-sol marin et les différentes lignes observées correspondent à des réflecteurs sismiques qui marquent des limites entre des couches sédimentaires de nature ou de densité différentes. Grâce à ces données, la présence d'hydrates de gaz dans les sédiments marins peut être suspectée lorsque nous observons la présence d'un réflecteur sismique particulier qui recoupe les autres réflecteurs représentant l'empilement verticale des couches sédimentaires. Ce réflecteur imite la



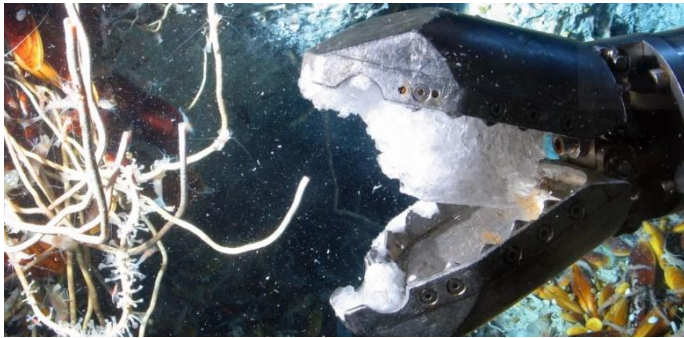


Figure 3 : Hydrate de gaz dans la pince du ROV Victor 6000*. Campagne WACS (<https://doi.org/10.17600/11030010>) - <https://www.ifremer.fr/fr/presse/hydrates-de-gaz-des-enjeux-brulants-pour-l-ocean>

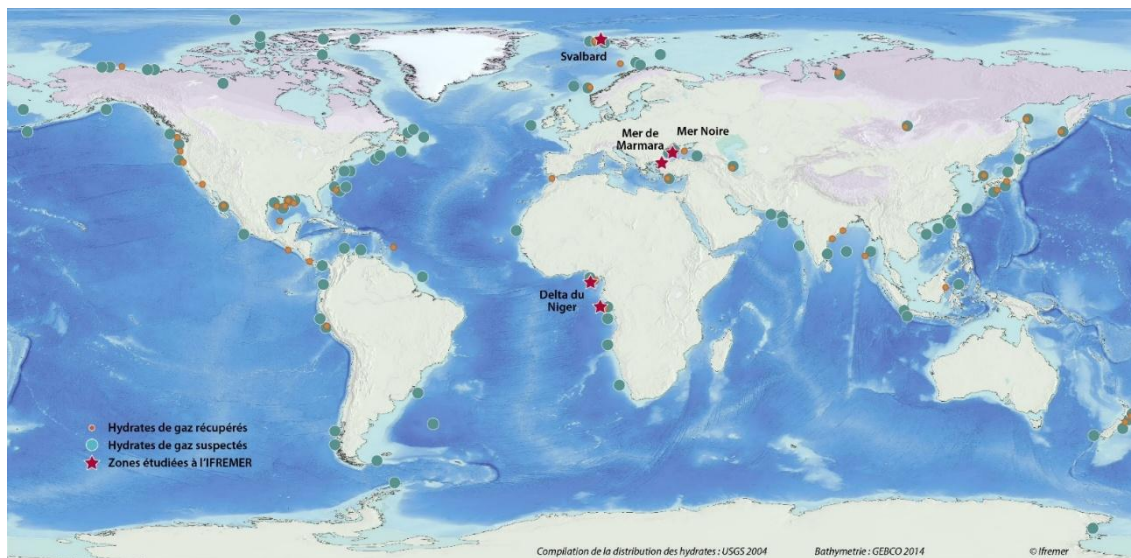


Figure 4 : Carte mondiale de la présence d'hydrates de gaz récupérés ou observés. Carte réalisée avec le logiciel ArcGis (Système d'information géographique). Les champs d'hydrates suspectés sont représentés par des ronds verts et les zones clairement identifiées par prélèvement sédimentaire sont représentées par des ronds rouges. Les zones étudiées par l'IFREMER sont représentées par une étoile rouge.

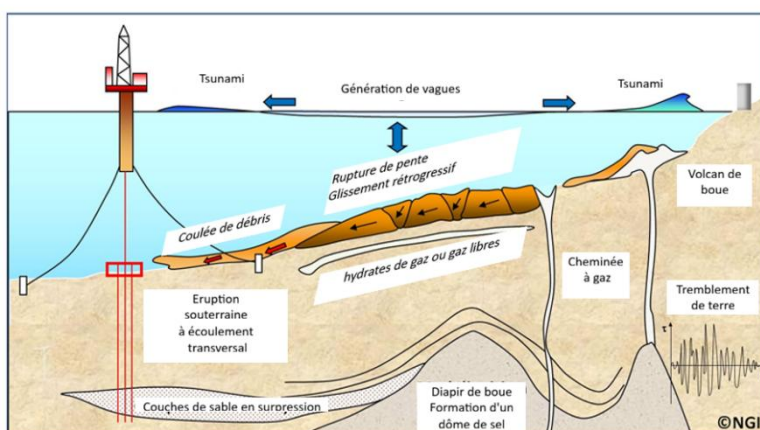


Figure 5 : Implication de la présence des hydrates de gaz sur les aléas géologiques. Les bulles de méthane produites dans les sédiments suite à une fonte d'hydrates de gaz peuvent créer des surpressions importantes à l'origine de glissements sous-marins pouvant donner naissance à des tsunamis. Les glissements peuvent entraîner la rupture de câbles sous-marins et endommager des infrastructures fonds de mer. Figure traduite de Camerlinghi et al., 2007.

morphologie du fond de la mer et est de plus forte amplitude (intensité plus forte). Il est connu sous le nom anglais « **Bottom Simulating Reflector (BSR)** ». Ce BSR (**Fig. 6**) établit la limite de la Zone de Stabilité des Hydrates de Gaz (ZSHG*), c'est-à-dire la limite entre les bulles de gaz (gaz libre) piégées sous les hydrates de gaz. La présence d'hydrates est suspectée par l'observation de réflexions sismiques affichant une polarité négative (signature inverse par rapport à celle du fond de la mer) et une impédance forte (le réflecteur est plus marqué, il ressort plus que les autres), dues à la présence du gaz libre sous les hydrates (**Fig. 6**). On observe souvent les BSR avec une morphologie discontinue, se superposant ainsi aux autres réflecteurs qui marquent la géométrie des couches sédimentaires. De plus, on peut localiser leur position en observant une série d'amplitudes différentes. La présence du BSR en mer Noire, au large de la Roumanie, est identifiée assez largement et laisse suspecter la présence des hydrates de gaz sur une vaste zone.

1.4 Origine du gaz piégé dans les hydrates de gaz et conditions de formation

Le gaz piégé dans les hydrates de gaz au large de la Roumanie est principalement du méthane d'origine microbienne (**voir 5.3**), il est généré par la dégradation de la matière organique dans les sédiments* par des communautés microbiennes à des profondeurs relativement faibles (**Fig. 7**). Ces hydrates de gaz sont composés à plus de 99% de méthane, un gaz à très fort pouvoir à effet de serre.

2 La mer Noire : Présentation de la zone d'étude et des particularités (variations de sa salinité au cours des temps géologiques)

À l'image de certains bassins dans le monde, tels que la mer de Marmara, la mer Noire a été isolée des océans mondiaux au cours de son histoire géologique et plus récemment durant la période du Quaternaire terminal* (**Fig. 8**). En effet, durant les périodes glaciaires, le niveau marin global chute d'en moyenne 120 m par rapport au niveau actuel, ce qui entraîne la déconnexion de la mer Noire de la mer de Marmara et de la mer Méditerranée car le détroit du Bosphore (passage maritime reliant la mer de Marmara à la mer Noire) n'est profond que de 35 m. Cette déconnexion prolongée a provoqué une modification radicale de la salinité de l'eau de la mer Noire. Avant la reconnexion de la mer Noire avec la mer Méditerranée lors du réchauffement du climat entraînant la remontée du niveau marin global, qui remonte à environ 9000 ans avant J-C (9 kyrs cal BP), la mer Noire était un lac d'eau douce, présentant une concentration en sel très faible, de l'ordre de 2 psu (unité anglaise : Practical Salinity Unit qui représente 1 g de sel par kg d'eau).

Lors de la reconnexion, via le détroit du Bosphore, il a été constaté des modifications hydrologiques radicales. La salinité de l'eau a connu une forte augmentation, passant de quelques psu à environ 22 psu, et s'est stabilisée depuis ces 2500 dernières années. Cette augmentation de la salinité de la mer Noire a transformé progressivement la salinité des eaux interstitielles présentes dans les sédiments du sous-sol marin. La modification de la salinité du sous-sol est très lente car ce processus se réalise par diffusion et, par

conséquence, il est toujours en cours de changement. Actuellement, la salinité dans les 2 premiers mètres sous le fond de la mer est de 22 psu et elle diminue progressivement pour atteindre les 2 psu à

25 m de profondeur dans les sédiments.

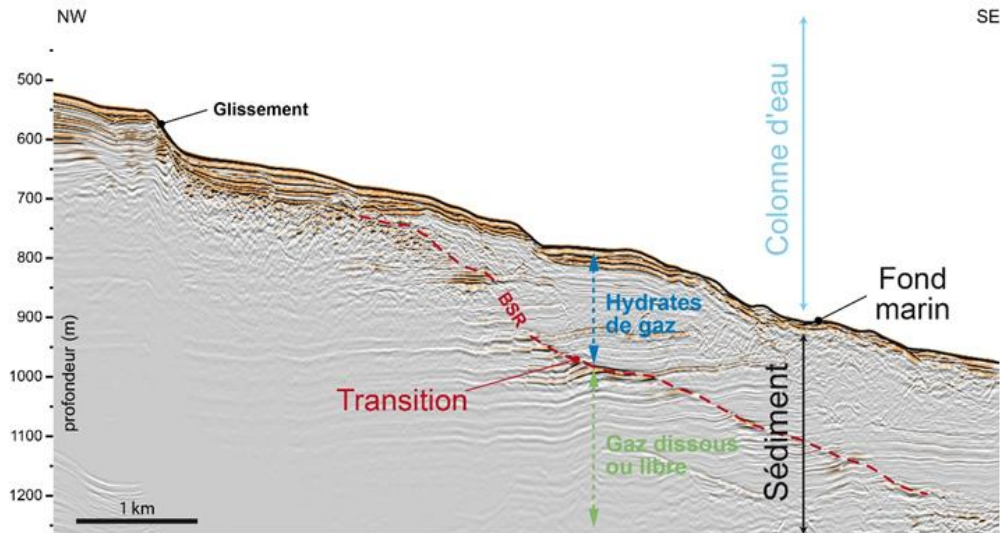


Figure 6 : Le BSR (Bottom Simulating Reflector) est un réflecteur sismique qui mime un peu le fond marin. Contrairement aux autres réflecteurs sismiques qui marquent la différence d'impédance (lié à la nature des sédiments) entre 2 couches sédimentaires, le BSR est un réflecteur qui marque la différence de l'état du gaz, donc lié à la profondeur et à la température. En-dessous le gaz est sous forme de bulles, au-dessus il est sous forme solide, Hydrates. Donc il recoupe les autres réflecteurs qui sont eux liés à la géométrie des couches sédimentaires

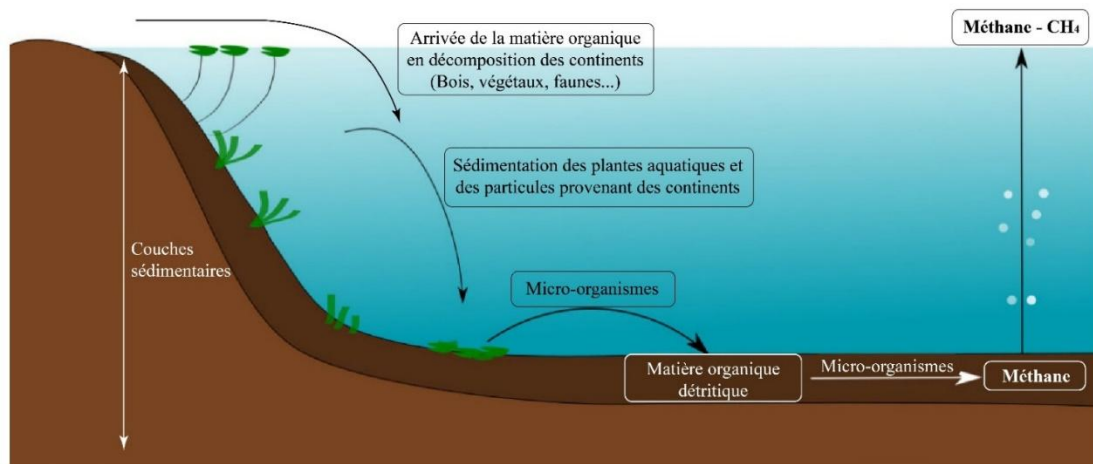


Figure 7 : Pourquoi du méthane se retrouve produit dans les sédiments marins ? La matière organique déposée dans les sédiments marins subit une série de transformations bio-géochimiques d'abord en présence puis en l'absence d'oxygène conduisant à la dernière transformation qui est appelée la méthanogenèse. Les différentes étapes de dégradation de la matière organique sont réalisées par des populations bactériennes différentes et conduisent à la formation du **méthane (CH₄)**.



Cette modification de la salinité entraîne une modification des conditions d'équilibre des hydrates de gaz. Une augmentation de la salinité peut faire fondre les hydrates de gaz qui sont à la limite de leurs conditions de stabilité car ce paramètre est un inhibiteur de la formation des hydrates. A conditions de pression et de température égales, la profondeur de la base de stabilité des hydrates dans les sédiments sera moins importante dans l'eau salée que dans l'eau douce.

3 Résultats de l'étude de la stabilité des hydrates en mer Noire

3.1 Présence d'hydrates de méthane sur la marge roumaine de la mer Noire

Pour prouver la présence de la zone de stabilité des hydrates de gaz dans le secteur roumain de la mer Noire, différentes techniques (certaines détaillées plus haut), ont été employées comme l'observation d'un BSR (observation géophysique et indirecte de la base de stabilité des hydrates), l'atténuation du signal sismique sous le BSR (accumulation de gaz sous forme de bulles sous la zone sans qu'il n'y ait d'indices géométriques d'accumulation de gaz à cet endroit) et l'analyse des vitesses à partir des profils sismiques acquis lors de l'expédition GHASS (augmentation des vitesses liée à la présence des hydrates et diminution en-dessous en raison de la présence de bulles de gaz) (**Fig. 9**). Des preuves irréfutables de la présence des hydrates, dans la zone où le BSR a été identifié, ont été fournies par des prélèvements *in situ*. Des hydrates de gaz ont été récupérés dans trois longues carottes Calypso échantillonnant les sédiments marins à 800 m de profondeur sous le niveau de la mer. Ces carottes ont été

prélevées dans les zones identifiées à partir des profils sismiques et qui montraient la présence de bulles de gaz dans la colonne d'eau*. Les hydrates ont été prélevés dans les 6 premiers mètres de sédiments sous le fond marin.

Le méthane prélevé sur la pente continentale de part et d'autre du canyon du Danube à l'origine de la formation des hydrates de gaz est d'origine biogénique* comme nous l'avons expliqué plus haut (**Fig. 7**). Ces hydrates de méthane font partie des hydrates de type SI (structure cubique).

3.2 Impact des modifications de salinité sur les hydrates de la mer Noire

Les mesures de salinité (**Fig. 10**) des eaux interstitielles (eaux contenues dans les sédiments) faites sur huit carottes sédimentaires prélevées durant la mission GHASS ont montré une diminution progressive de la salinité passant de 22 psu au niveau du fond marin à près de 2 psu vers 25 mètres sous le fond marin (**voir 5.4**). La salinité dans les sédiments n'est donc pas constante. Comme il y a 9000 ans elle était proche de 0, une diffusion lente du sel dans les sédiments est en cours depuis la reconnexion avec la mer de Marmara et donc avec la mer Méditerranée. Cette **diffusion du sel** à travers les sédiments, dans la zone où les hydrates sont stables peut changer de manière significative l'état physique (phase) des hydrates de gaz. La conséquence d'un tel processus de diffusion est une réduction future de la zone de stabilité des hydrates, entraînant la fonte des hydrates de gaz les plus proches de la limite de stabilité, à mesure que l'eau interstitielle s'enrichit en sel.



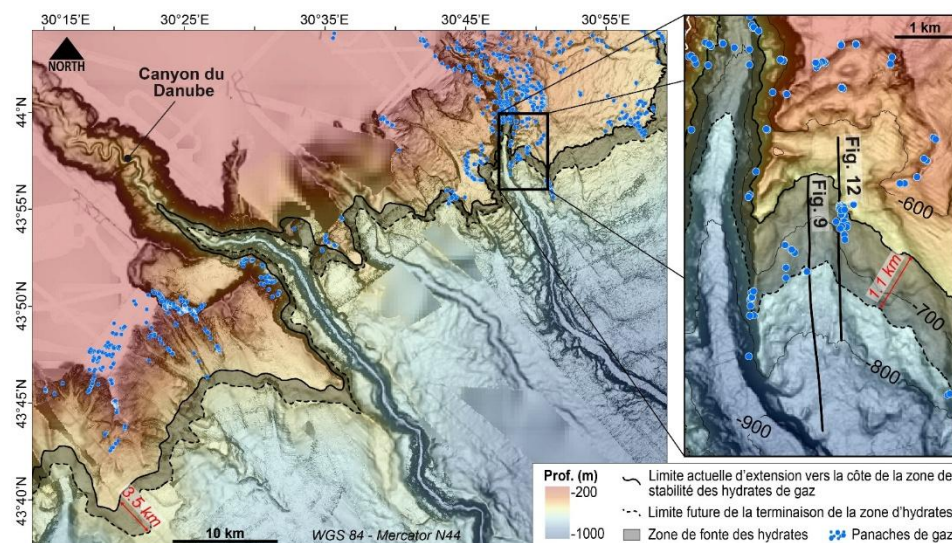


Figure 8 : Carte bathymétrique présentant la morphologie de la zone d'étude, les zones de sortie de gaz identifiées au fond de la mer et dans la colonne d'eau et la zone présumée de déstabilisation des hydrates de gaz dans le secteur roumain de la mer Noire. Les fonds marins montrent un plateau continental assez large puis une transition vers la pente continentale vers 200 m de profondeur d'eau. Cette marge est incisée principalement par le canyon du Danube et plusieurs escarpements sous-marins. La zone de déstabilisation des hydrates de gaz (Gas hydrate déstabilisation zone – GHDZ*), est située entre la ligne noire et celle en pointillée, a été déterminée par modélisation (voir ci-après). Cette zone se situe entre la limite de stabilité des hydrates actuelle et celle future (dans 5000 ans), correspondant respectivement aux contours bathymétriques de 660 et 720 mètres sous la surface de la mer. Les sorties de gaz sur les fonds marins (points bleus), distribués le long de structures géologiques telles les failles, les canyons et les zones de glissement, se trouvent à 96% en dehors de la zone de présence des hydrates de gaz et une petite partie à l'intérieur de la zone suspectée de déstabilisation des hydrates. Elles ont été observées grâce au sondeur multifaisceaux* RESON 7150 qui équipe le navire océanographique « le Pourquoi Pas ? » (Voir partie méthodologie). Les profils sismiques utilisés dans cette étude sont représentés par un trait noir.

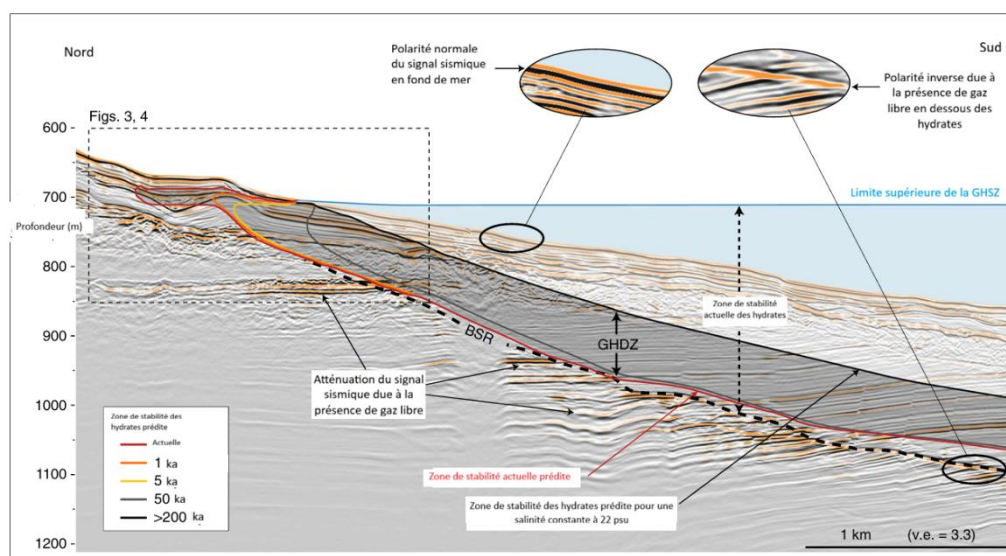


Figure 9 : Profil sismique montrant la coupe du sous-sol marin et la base de stabilité des hydrates actuelle (BSR et modélisation) et son évolution prédite dans le temps sous l'effet de la salinisation des sédiments. Le BSR se caractérise par un réflecteur de forte amplitude et de polarité négative (cercles noirs) qui se comporte de manière erratique en profondeur au-delà de 750 m sous la surface de la mer.



Grâce aux données géophysiques, sédimentologiques et géochimiques acquises lors de la campagne GHASS, une prédiction de l'évolution de la zone de stabilité des hydrates dans le temps et l'espace a été possible.

La base de la zone de stabilité des hydrates a été simulée avec le modèle bidimensionnel de stabilité des hydrates de gaz de Sultan *et al.* (2010). La simulation se base sur les données scientifiques mesurées sur zone et considère des hydrates contenant 99,6 % de CH₄, une température de l'eau de mer de fond de 8,9°C, un gradient géothermique de 24,5°C/km et un profil de salinité basé sur les mesures des carottes de GHASS complété en profondeur par les mesures faites sur des forages plus anciens.

Les résultats montrent que la simulation de la base de stabilité des hydrates est globalement cohérente avec la profondeur actuelle observée, celle du BSR (**Fig. 9**). Pour des profondeurs d'eau inférieures à 750 m, les prédictions du modèle concordent avec les observations faites sur les données sismiques. Au-delà, le BSR observé est plus profond que prévu, probablement en raison d'un rééquilibrage thermique. En effet, pendant la Dernière Période Glaciaire (environ 20000 ans – Last Glacial Maximum - LGM), la température du fond marin était plus basse (4°), qu'à présent (8.9°). La diffusion de la température est aussi un phénomène lent et nous pensons que par forte profondeur de sédiments, le processus n'est pas fini. Ce phénomène, souvent négligé, affecterait actuellement une partie de la mer Noire.

3.3 Évolution de la zone de stabilité des hydrates au fil du temps

Comme mentionné précédemment, la dynamique de la zone de stabilité des

hydrates de gaz en mer Noire dépend comme ailleurs de la température et de la pression mais aussi des variations de salinité matérialisées par la diffusion de sel dans les sédiments. Plus précisément, la dynamique des hydrates de gaz concerne l'ensemble des processus qui influencent leur comportement, en particulier la façon dont ils se forment, fondent (dissociation* ou déstabilisation) ou restent stables dans un environnement donné. Cela inclut plusieurs phénomènes physiques et chimiques. Les calculs numériques effectués montrent que les hydrates de gaz sont en cours de dissociation, avec des projections sur leur évolution future (**Fig. 11**). Les calculs ont été faits sur une période de 200000 ans en considérant comme étant constantes les conditions de température et de pression, et seule la diffusion de sel dans les sédiments a été prise en compte pour comprendre cet impact qui n'a encore jamais été décrit dans le milieu naturel (**voir 5.5**).

Le modèle indique que la zone de stabilité actuelle des hydrates de gaz la plus superficielle est à 15 mètres sous le fond marin et elle présente une **forme en langue** s'étendant entre 680 et 710 mètres sous le niveau de la mer. Ces hydrates de gaz devraient se décomposer au cours des 1000 prochaines années, formant une zone où les hydrates de gaz deviennent instables, appelée zone de déstabilisation des hydrates de gaz (GHDZ*) allant de 660 à 720 m de profondeur d'eau. La diffusion du sel à travers les sédiments contribuerait donc indirectement à la libération de méthane dans la colonne d'eau suite à la fonte des hydrates de gaz et pourrait expliquer les remontées de gaz actuellement observées entre 660 et 720 m de profondeur d'eau (**Fig. 12**).



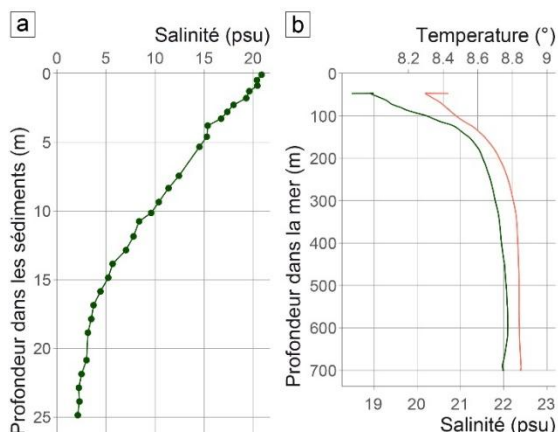


Figure 10 : (a) Profil de salinité dans la colonne sédimentaire mesuré sur la carotte CS16 de 25 m de longueur. (b) Profils de salinité et de température de la colonne d'eau (voir 6.4).

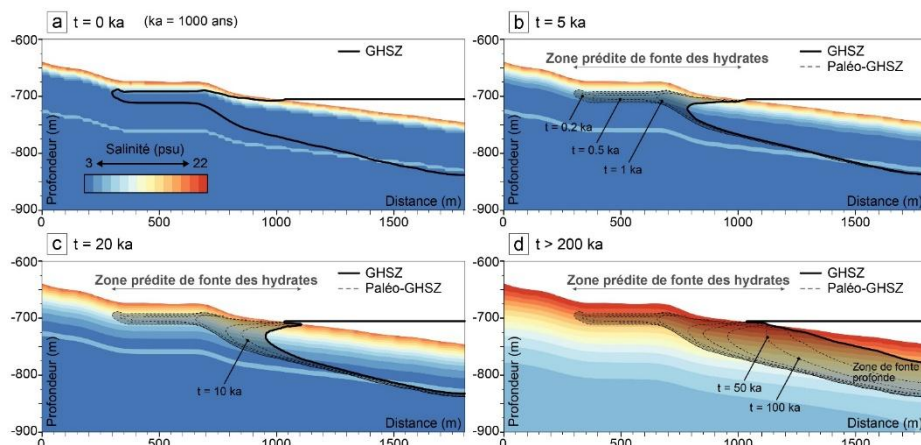


Figure 11 : Simulation de l'évolution de la zone de stabilité des hydrates au cours du temps. Quatre étapes de calcul sont représentées ici en suivant le modèle bidimensionnel développé par Sultan et al. (2010). a. $t = \text{actuel}$, b. $t = 5 \text{ ka}$, c. $t = 20 \text{ ka}$, et d. $t > 200 \text{ ka}$. Les accumulations d'hydrates dans la zone grisée, appelée « zone de déstabilisation des hydrates de gaz » (GHDZ), sont actuellement en cours de dissociation en raison de la diffusion du sel à travers les sédiments.

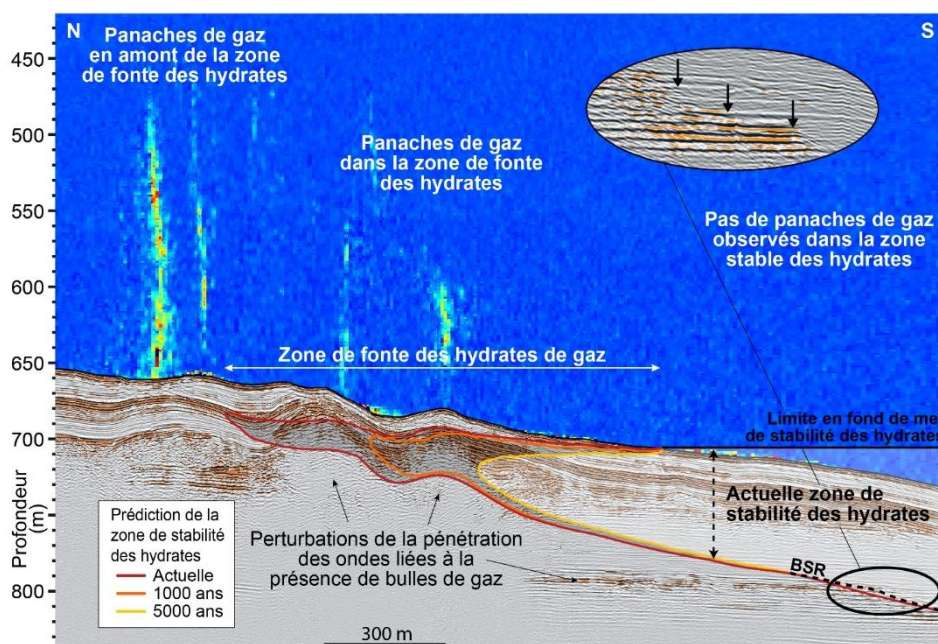


Figure 12 : Image montrant une coupe de la colonne d'eau (la mer Noire) et de la colonne sédimentaire sous le fond marin. L'image acoustique de la colonne d'eau a été réalisée grâce à une sondeur multifaisceaux et celle du sous-sol à un système de sismique réflexion remorqué près du fond de la mer appelé SYSIF (<https://archimer.ifremer.fr/doc/00160/27153/>). L'interprétation des données sismiques montre le gaz libre piégé sous le BSR. La zone suspectée de dissociation des hydrates de méthane pour les prochains 5000 ans a été ajoutée sur la coupe sismique et est représentée par les lignes rouge et jaune. La diffusion du sel, qui est un processus actif actuellement, pourrait donc être responsable de la fonte des hydrates dans cette zone



En effet, grâce aux acquisitions de données issues du sondeur multifaisceaux (**voir 5.1**), l'imagerie de la colonne d'eau a montré plusieurs anomalies acoustiques* qui possèdent toutes les caractéristiques pour être interprétées comme étant de grandes remontées de gaz. Une partie de ces sorties de gaz se trouve en dehors de la zone à hydrates et quelques échappements sont à l'aplomb de la zone à hydrates que nous supposons en cours de dissociation prouvant la présence de grandes quantités de méthane dans les sédiments (**Fig. 12**). Ces remontées de gaz peuvent s'élever jusqu'à 400 m au-dessus des fonds marins et se terminer à environ 50 mètres de la surface de la mer.

3.4 Impact de la déstabilisation des hydrates à l'échelle de la mer Noire

Les résultats obtenus sur la marge roumaine peuvent être extrapolés à une partie importante de la marge de la mer Noire (**Fig. 13**). C'est une approche qui révèle que la déstabilisation des hydrates de méthane affecterait les 1700 km de côtes de la mer Noire pendant des siècles, jusqu'à ce que la salinisation des sédiments soit achevée et stable. Il a été estimé qu'environ $4,2 \times 10^{10}$ à $\sim 2,1 \times 10^{11}$ m³ de méthane se déstabiliseront dans le futur sur une zone d'environ 2800 km² au large des marges de la mer Noire. Aussi, si la déstabilisation attendue des hydrates déclenche des glissements sous-marins au niveau de la pente continentale, la quantité de méthane libérée pourrait être multipliée par un ordre de grandeur bien supérieur. Si les glissements générés étaient de très grande envergure, ils pourraient être responsable de la formation de tsunamis.

4 Conclusion

Les **changements de la salinité** de la mer Noire, intervenus au cours des 9000 dernières années en raison de sa reconnexion avec la mer Méditerranée, sont susceptibles de faire fondre des **hydrates de méthane (forme solide du méthane composée de gaz libre et d'eau)** piégés dans les sédiments marins. **Ce processus, augmente le risque de glissements de terrain et de génération de tsunamis.**

L'évolution future de la zone de stabilité des hydrates constitue un processus en cours, susceptible d'avoir un impact significatif sur la configuration des marges et sur le **bilan de carbone des océans**. De plus, la présence dans la mer Noire de zones d'hydrates de méthane **potentiellement instables sous les 15 premiers mètres de sédiments** constitue une source importante de **risque** pour le développement des **infrastructures sous-marines** et donc pour les **activités économiques**. Il est peu probable que la marge de la mer Noire soit la seule zone connaissant une déstabilisation étendue des hydrates due à la variation de la salinité dans les sédiments. L'histoire géologique de certaines régions du monde suggère que des mécanismes similaires pourraient se produire par exemple dans la **mer Caspienne** et la **mer de Marmara**.

5 Matériels et Méthode

5.1 Bathymétrie* et données acoustiques de la colonne d'eau



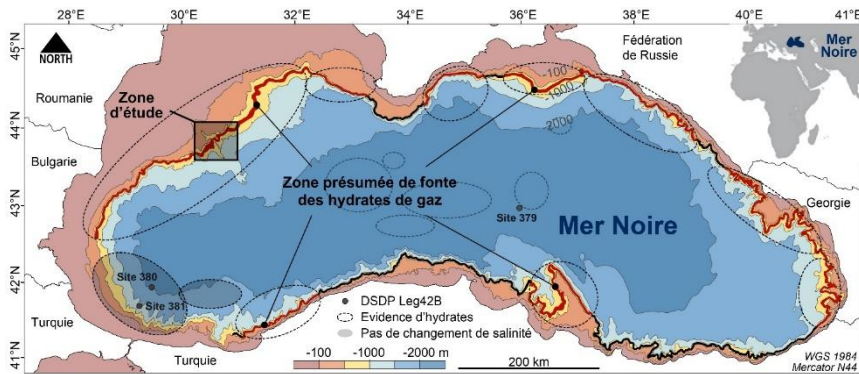


Figure 13 : Carte de la mer noire présentant sa profondeur d'eau et les zones qui seraient affectées en ce moment et dans le futur par la déstabilisation des hydrates de gaz. Ces zones couvriraient potentiellement 2800 kilomètres carrés de marge de la mer Noire. La zone présumée de déstabilisation des hydrates de gaz est colorée en 2 couleurs : en noir, il n'y aurait pas d'impact sur la mer Noire car aucune étude n'a encore montré la présence d'hydrates dans ces régions et la zone rouge désigne la zone où les hydrates de gaz ont été identifiés ou supposés et où ils devraient se décomposer en raison de la diffusion de la salinité à travers les sédiments. La zone rouge est située entre la terminaison actuelle et future (dans 5000 ans) de la zone de stabilité des hydrates qui correspondent respectivement aux contours bathymétriques de 660 et 720 mètres.

Figure 14 : Représentation schématisée d'une acquisition de données bathymétriques à partir d'un sondeur multifaisceaux monté sur un navire océanographique de la flotte océanographique française opérée par l'IFREMER (<https://www.geo-ocean.fr/Science-pour-tous/Nos-outils/Le-sondeurs/Le-sondeur-multifaisceau>).

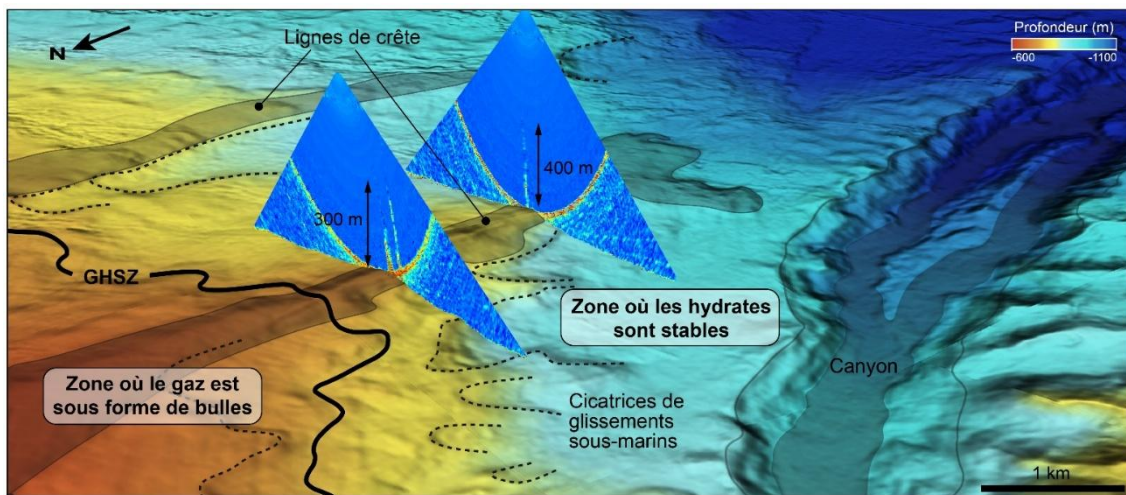
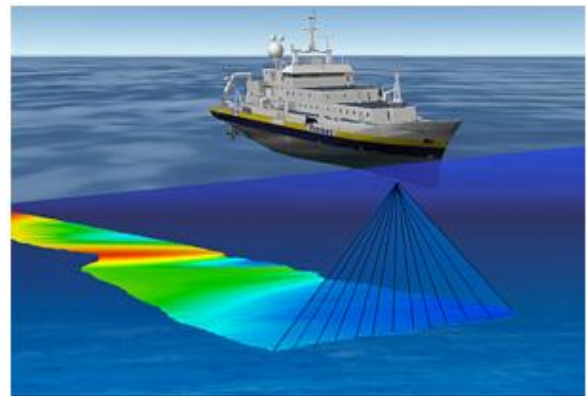


Figure 15 : Vue 3D des fond marins montrant la transition entre la zone à gaz libre et la zone où le gaz peut se trouver sous la forme solide d'hydrates de gaz. Deux images acoustiques de la mer, appelées aussi échogrammes polaires, ont été ajoutées sur cette figure (les triangles bleus). Au sommet des triangles se trouve le bateau qui envoie les ondes dans la colonne d'eau à partir d'un sondeur multifaisceaux (Riboulot et al., 2017). Nous observons des anomalies verticales sur ces images (traits verticaux rouges, jaunes et verts) qui sont interprétées comme étant la présence de panaches de bulles de gaz qui remontent des fonds marins.



En 2015, lors de l'expédition nommée GHASS, à bord du navire océanographique Pourquoi Pas ?*, un levé bathymétrique et acoustique de la colonne d'eau à partir d'un sondeur multifaisceaux (**Fig. 14**) a été effectué, sur le plateau continental externe et de la pente proche du canyon du Danube (**Fig. 08**), dans le but de détecter les déformations des fonds marins et la présence de gaz libérés dans la colonne d'eau (**Fig. 08, 12 & 15**) dans et hors de la zone à hydrates de gaz. Les données acoustiques ont été produites par les différents échosondeurs du navire (multifaisceaux Reson Seabat 7111 pour les eaux peu profondes de 5 à 500 mètres & Reson Seabat 7150 pour les eaux profondes de 200 à 2000 mètres). Les données ont été visualisées, 2D et 3D et traitées et en utilisant SonarScope (module de traitement et de visualisation des données acoustiques) ainsi que GLOBE (GLobal Oceanographic Bathymetry Explorer) (**Fig. 15**).

5.2 Données sismiques

Les données sismiques en 2D haute résolution (**Fig. 9**) ont été collectées en utilisant une source des ondes émises, un canon à l'air, et une flûte sismique de 96 récepteurs espacés de 6,25 m tractée derrière le bateau (**Fig. 16**). Le faible enfouissement de la source et des récepteurs a permis d'obtenir un signal avec une fréquence comprise entre 70 et 225 Hz. La résolution horizontale dépend de la qualité du traitement des données et des effets liés aux reliefs de part et d'autre du trajet de la ligne sismique acquise, appelé effet 3D. La profondeur d'investigation dans les sédiments varie de 400 à plus de 750 m sous le fond marin avec ce dispositif. Pour les zones où la profondeur d'eau dépasse 500 m, la pénétration des ondes dans le sous-sol est limitée par l'atténuation du signal

sismique et d'autant plus lorsqu'il y a la présence de bulles de gaz dans les sédiments peu profonds. La courte distance entre la source et les récepteurs est idéale pour étudier les sédiments jusqu'à environ 600 m sous la mer.

Lorsqu'une onde sismique se propage dans le sous-sol marin, elle se réfléchit sur les différentes interfaces entre les couches géologiques en raison des différences de densité des couches sédimentaires. On mesure le temps aller-retour de l'onde jusqu'à chaque interface : ce sont les temps de réflexion. Ces temps sont importants pour déterminer les profondeurs réelles des fonds marins et des couches sédimentaires. Des analyses de vitesses ont donc été réalisées tous les 150 m. Afin d'obtenir la vitesse d'intervalle de la propagation des ondes dans le sous-sol pour chaque couche sédimentaire (la vitesse varie beaucoup entre du sable et des argiles et elle est très ralentie lors de la présence de gaz et accélérée lorsque les ondes rencontrent des couches contenant des hydrates).

Bien que la limite de stabilité des hydrates, marquée par la présence du **BSR**, soit assez profonde, entre 900 et 1200 m, les résultats du calcul de vitesse sont cohérents. **Là où les sections montrent un BSR bien marqué, on observe toujours des changements de vitesse :**

- les sédiments au-dessus du BSR, qui ont une épaisseur de 100 à 200 m, montrent des **vitesse plus élevées** (1800 à 2000 m/s) par rapport aux sédiments en surface (environ 1600 m/s ou moins), ce qui pourrait être dû à la présence d'**hydrates de gaz**,
- les sédiments sous cette limite sont caractérisés par **une diminution de la vitesse**, à cause de la **présence de gaz libres** piégés sous la couche d'HG.



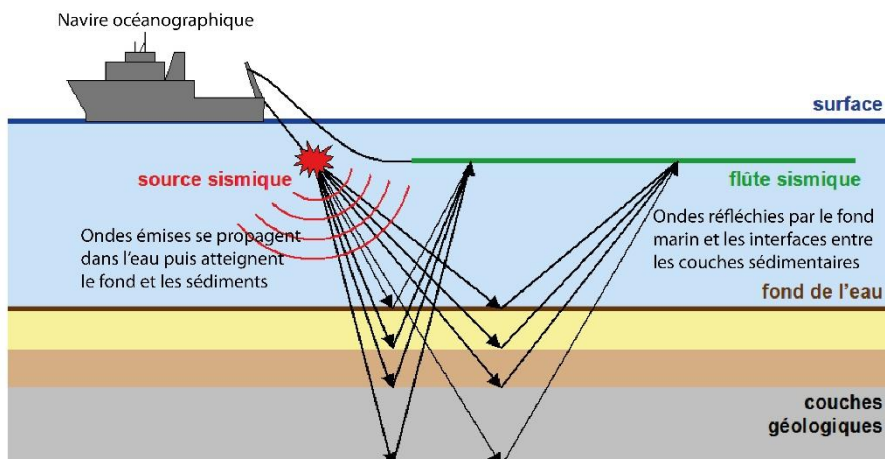


Figure 16 : Schéma illustrant le principe d'acquisition de la sismique réflexion 2D (modifié de <https://www.flotteoceanographique.fr/Nos-moyens/Navires-engins-et-equipements-mobiles/Equipements-mobiles/Equipements-sismiques>).

Figure 17 : Schéma illustrant le principe d'acquisition de la sismique réflexion 2D (modifié de <https://www.flotteoceanographique.fr/Nos-moyens/Navires-engins-et-equipements-mobiles/Equipements-mobiles/Equipements-sismiques>).

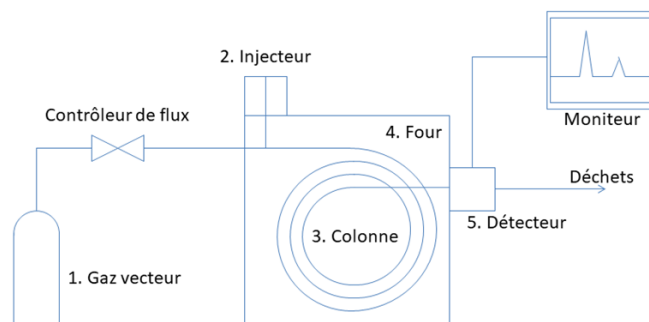


Figure 18 : Photo du côté du navire N/O Pourquoi Pas ? montrant la récupération d'une carotte sédimentaire de plusieurs mètres de longueur.

(www.flotteoceanographique.fr/var/storage/images/_aliases/opengraphimage/medias-ifremer/medias-flotte/equipements-mobiles/prelevementssedimentaires/calypso/le-carottier-calypso/1689229-1-fre-FR/Le-carottier-Calypso.JPG).

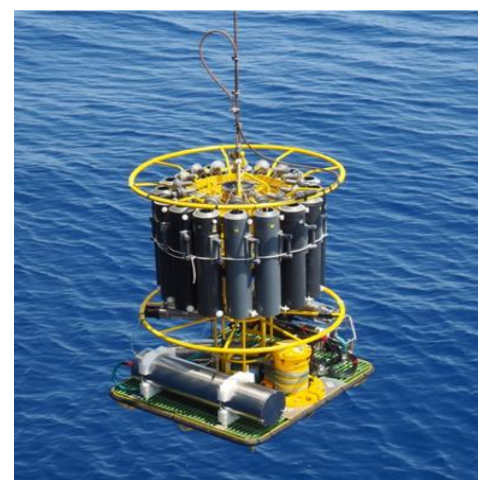
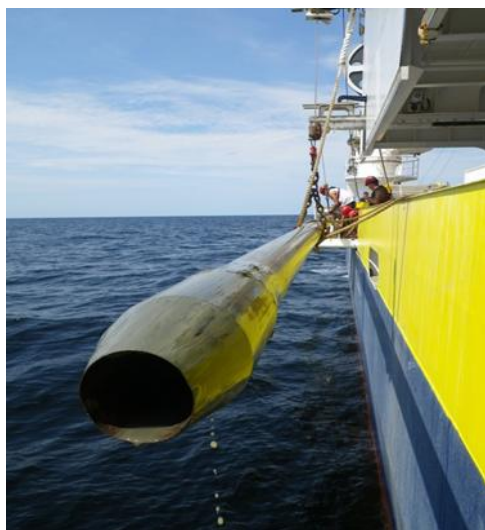


Figure 19 : L'échantillonneur de l'eau en eaux profondes, la CTD-rosette.

<https://www.geo-ocean.fr/Campagnes/Campagnes-oceanographiques/Les-blogs-de-nos-precedentes-campagnes/Partir-sur-la-mission-oceanographique-MAYOBS15/La-CTD-Rosette>.



5.3 Composition du gaz présent dans les hydrates de gaz

La nature du gaz a été déterminée grâce à une analyse des échantillons d'hydrates prélevés dans des carottes sédimentaires. Les hydrates prélevés ont subi une décomposition, ensuite par chromatographie en phase gazeuse, les gaz libérés sont analysés grâce à un chromatographe (Fig. 17). Le taux de méthane est supérieur à 99,6%-mol. La présence de cette quantité de méthane dans l'échantillon d'hydrates montre qu'il y a une source de gaz constituée principalement de méthane.

5.4 Mesures de salinité et de température

Dans le cadre de la mission GHASS, des capteurs de température ont été utilisés pour évaluer le gradient géothermique (c'est-à-dire la façon dont la température varie en profondeur sous le fond marin). Pour cela des sondes ont été installées autour du tube servant aux prélèvements des sédiments. Elles ont été placées à 7 cm du tube pour éviter toutes modifications des mesures en lien avec la conductivité thermique du tube de carottage. La température mesurée sur le site indique un gradient d'environ 24,5° C par kilomètre.

Des mesures de température ont également été réalisées dans la colonne d'eau à l'aide d'un capteur conçu pour résister à la pression sous-marine et capable de mesurer des températures variant de -1 à + de 31°C. La salinité a été mesurée par un capteur C SBE 4 (permet des mesures de conductivité) et les résultats sont exprimés en PSU (unité de salinité).

Un dispositif, appelé CTD-rosette (Fig.

19), a été utilisé pour identifier la composition de l'eau de mer. Il permet de collecter des échantillons d'eau à différentes profondeurs et de mesurer la température, la pression et la turbidité. Les données obtenues sont ensuite analysées par le logiciel Seasave.

5.5 Modèle numérique permettant de prédire la zone de stabilité des hydrates actuelle et son évolution dans le futur

L'hypothèse sur la dynamique des hydrates de gaz et l'évolution de la zone de stabilité des hydrates a été testée en fonction de la diffusion du sel à l'aide d'un modèle numérique bidimensionnel développé par Sultan *et al.* (2010). Ce modèle calcule la température et la pression d'équilibre des hydrates à chaque étape en utilisant l'égalité des potentiels chimiques, comme proposé par Van der Waals et Platteuw. Le gaz est transporté sous forme dissoute par diffusion, selon la loi de Fick. Le modèle prend en compte les effets de la chaleur latente qui ralentit la dissociation des hydrates (phénomène d'auto-préservation), ainsi que la diminution locale de la salinité lors de la dissociation, ce qui ralentit également ce processus. Toutefois, à l'échelle de temps des simulations (ka), les perturbations salines sont considérées comme mineures par rapport à la diffusion verticale du sel.

Les fluides et la diffusion des ions salins sont simulés à chaque étape de calcul par la méthode des différences finies sur 10 couches. Les résultats montrent que le dépôt d'hydrates est en cours de dissociation et permettent de projeter leur évolution future. Les conditions thermiques aux limites sont un flux thermique nul aux deux extrémités verticales, avec une température de fond





marin constante de 8,85 °C et un gradient géothermique de 24,5 °C/km. La salinité au fond marin est de 22 psu, avec un flux d'ions nul aux limites. La diffusion du chlorure est calculée avec un coefficient moyen de diffusion de 6×10^{-10} m²/s.

6 Lexique final

Acoustique : Etude de la propagation des ondes mécaniques dans tout fluide (solides, liquides et gaz)

Bathymétrie : Mesure des profondeurs et du relief des océans dans le but d'en faire sa topographie et d'identifier les morphologies associées aux processus sédimentaires et tectoniques.

Biogénique : Qui est produit par des organismes vivants.

Colonne d'eau : Espace aquatique entre la surface et le fond des océans.

Diffusion de sel : Phénomène où le sel contenu dans la mer ou les eaux interstitielles des sédiments se déplacent. Processus lent. Ce processus a un impact sur les hydrates de gaz car pour des conditions identiques, le sel est un inhibiteur de la formation des hydrates.

Diapirisme : Processus géologique expliquant l'élévation de roches moins denses et ductiles à travers des couches plus denses sous l'effet de la tectonique.

Dissociation des hydrates : La dissociation des hydrates est un processus endothermique dans lequel de la chaleur doit être fournie pour rompre les liaisons hydrogène entre les molécules d'eau et les forces d'interaction de van der Waals entre

la molécule invitée et la molécule d'eau du réseau d'hydrates. La fonte des hydrates diminue ainsi la température extérieure.

Echosondeur : Appareil utilisé principalement pour mesurer la profondeur de l'eau et détecter ce qui se trouve sous la surface des océans (comme le fond marin, les poissons, ou des objets immergés), en utilisant des ondes sonores. Cet outil est donc essentiel à la bathymétrie.

Echosondeur multifaisceaux Reson Seabat 7111 : Echosondeur se distinguant par une précision (pluri-centimétrique) et une fréquence plus importante que celle de l'échosondeur Reson Seabat 7150.

Echosondeur Reson Seabat 7150 : Echosondeur se distinguant par sa capacité à atteindre des profondeurs plus élevées que l'échosondeur multifaisceaux Reson Seabat 7111 (>500 m).

GHSZ : Zone de Stabilité des Hydrates de Gaz. Il s'agit d'une région où les conditions de température et de pression permettent aux hydrates (forme solide du gaz) d'être stables.

GHDZ : Zone de déstabilisation des hydrates de gaz. Elle représente la région où les hydrates commencent à se décomposer en raison de changements des conditions environnementales, ici la salinité.

Hydrates de gaz : Composés solides formés d'eau et de gaz, principalement du méthane, présents dans les sédiments marins ou dans les sols gelés.

Interstice : Entre deux couches (de terre pour ce cas-là).





Loi de DIX : appelé également loi des 10%, elle indique qu'environ 10 % de l'énergie d'un niveau trophique est disponible pour le niveau trophique supérieur.

Marge continentale : Zone sous-marine située entre le continent et le fond abyssal de l'océan. Elle marque la transition entre la croûte continentale et la croûte océanique.

Pergélisol : Sol gelé en permanence et absolument imperméable des régions arctiques.

Pince du ROV (Remotely Operated Vehicle) Victor 6000 : Véhicule sous-marin de l'IFREMER. Il est téléopéré et déployé à partir d'un bateau océanographique. Il est utilisé pour explorer les grands fonds et faire de l'échantillonnage.

N/O Pourquoi Pas ? : Navire Océanographique le *Pourquoi Pas ?*, bateau de la flotte océanographique française, opérée par Ifremer et armée par GÉNARVIR. Il a été utilisé pour acquérir toutes les données scientifiques utilisées dans cette étude durant la mission GHASS en 2015.

Sédimentologie : Étude de la sédimentation et des sédiments, liée à la nature, à la configuration, à la répartition et à l'extension des dépôts sédimentaires.

Sédiments : Dépôts qui proviennent de l'altération ou de la désagrégation des roches préexistantes.

Thermodynamique : La branche de la physique qui traite de la dépendance des propriétés physiques des corps à la température, des phénomènes où interviennent des échanges thermiques, et

des transformations de l'énergie entre différentes formes.

7 **Références**

Camerlenghi, A., Urgeles, R., Ercilla, G., & Brückmann, W. (2007). Scientific ocean drilling behind the assessment of geo-hazards from submarine slides. *Scientific Drilling*, 4, 45-47.





Ont participé au travail d'écriture de cet article, en collaboration avec Dr. Vincent Riboulot, chercheur en Géosciences marines à l'IFREMER, les élèves de la 1ère générale spécialité SVT du lycée Groupe Scolaire Sévigné (Compiègne, FR) encadrés par Madame la professeure de SVT Joséphine Villain Sawadogo : Almeida Gomes Diégo, Challouet Mathis, De Wulf Juliette, Dos Santos Léa, Gamez-Buggenhout Léa, Isambert Léona, Izanic Rozenn, Lachaal Rania, Téotonio Matheus.

Comment citer cet article : : Almeida Gomes Diégo, Challouet Mathis, De Wulf Juliette, Dos Santos Léa, Gamez-Buggenhout léa, Isambert Léona, Izanic Rozenn, Lachaal Rania, Téotonio Matheus, Villain Sawadogo Joséphine et Vincent Riboulot, (2026). L'évolution d'un lac d'eau douce en une mer d'eau salée provoque la fonte d'hydrates de gaz en mer Noire, Journal DECODER, 2026.

