

Textes réglementaires régissant l'exploitation du gaz méthane du lac Kivu

Proposition scientifique et technique

Michel Halbwachs le 23 avril 2011

(Modification apportée sur l'exploitation de la PRZ en novembre 2011)

Avertissement

Ce texte est certainement à l'état d'ébauche et comporte sans doute encore quelques lacunes et imperfections. Nous l'avons rédigé en urgence dans un délai limité à trois semaines alors que le texte « Management Prescriptions for the Development of Lake Kivu Gas Resources » (MPs) a été élaboré par un comité d'experts composé de 6 membres et que sa mise au point a nécessité un délai de plus 2 ans.

Nous nous excusons donc des éventuelles imperfections et omissions, voire des erreurs possibles de ce document.

Ce texte doit être perçu comme une critique constructive des MPs. Nous avons été vigilants sur ce point : chacune de nos mises en cause des prescriptions des MPs est accompagnée d'une proposition de solution alternative. Nous avons ensuite proposé le processus technique d'exploitation (extraction et rejet des eaux) qui nous est apparu comme le mieux adapté à la sécurité, à la protection environnementale et à l'efficacité de l'extraction du méthane.

Concernant les MPs, les deux principales critiques que nous avons retenues sont :

- Une remise en cause du bien fondé de la méthode de réinjection des eaux après dégazage proposée dans les MPs et la proposition d'une autre technique totalement différente (rapport YLec GMW292, Septembre 2009),
- La constatation d'une omission dans le texte des MPs concernant l'absence d'un critère d'optimisation de l'efficacité de l'exploitation du gaz contenu dans le gisement. Nous avons tenu à remédier à cette lacune en détaillant nos arguments conduisant à la définition d'un rendement énergétique minimal d'une station d'extraction qu'il faudra obligatoirement atteindre ou dépasser.

Remarque : les MPs portent une attention particulière à la sélection et la géométrie des emplacements des concessions. Nous pensons que cette sélection ne relève pas des textes régissant l'exploitation du gaz du Kivu et, partant, n'entre pas dans les attributions de ce comité. Nous pensons que le choix des concessions relève des prérogatives et de la responsabilité de chacun des états concernés.

Nous avons donc rédigé par ailleurs un document distinct qui expose nos idées concernant les critères de sélection des emplacements favorables à l'implantation des stations d'extraction.

Critique de la méthode de réinjection des eaux après dégazage proposée dans les MPs

La quasi-totalité des discussions qui ont été menées dans le comité d'experts pour aboutir aux MPs a porté sur le procédé de rejet dans les eaux profondes du lac des eaux dégazées issues du dispositif de séparation gaz-liquide (séparateur).

Nous ne sommes pas d'accord avec la solution adoptée par le comité d'experts. Elle nous semble à la fois inappropriée en de terme de préservation de la ressource et techniquement irréalisable. Cette solution n'a d'ailleurs, semble-t-il pas été consensuelle. Elle est le résultat d'une confrontation entre deux points de vue et a été adoptée uniquement car elle était supportée par la majorité des membres du comité d'experts (cf. page 36 des MPs).

Une analyse détaillée des MPs a été faite par le bureau d'étude YLec Consultants :
Exploitation of Lake Kivu Gas Resource, Consequence of the re-injection of degassed water into the Resource Zone, Rapport GMW292, Septembre 2009
Les conclusions de cette analyse argumentée, notamment sur la base de considérations hydrodynamiques sont formelles:

1) Il est totalement impossible de rejeter les eaux dégazées de telle manière qu'elles constituent une couche individuelle insérée dans les eaux des couches de la ressource. Les eaux rejetées vont immédiatement se mélanger par diffusion dans les eaux riches en gaz dissous et conduire à un phénomène irrémédiable de dilution de la ressource (baisse de la teneur en méthane dissous).

2) La dilution d'une couche de la ressource conduit à une diminution rapide de l'efficacité du dispositif d'extraction (du débit de méthane extrait) : la couche concernée devient rapidement une couche définitivement inexploitable, dans un premier temps économiquement, puis à terme techniquement.

3) La base de la proposition de rejet des eaux dégazées repose sur l'idée d'ajuster la densité des eaux rejetées en limitant la concentration en CO₂ dissous à des teneurs de 40 % à 50 %.

Dans la méthode que nous utilisons, la concentration de CO₂ dissous est fixée par la profondeur du séparateur (par exemple, à 25 m, la concentration de CO₂ dans les eaux de rejet est de 70%). Peut-être existe-t-il une technique sophistiquée pour régler ce taux de CO₂ à des valeurs inférieures à 70%. Dans ce cas, nous pensons que cette technique devrait être exposée dans les MPs. On ne peut pas imposer aux concepteurs de rejeter de l'eau contenant 40 % ou 50% de CO₂ sans leur indiquer la méthode proposée, afin notamment que sa viabilité puisse être analysée. Il est en effet possible que cette technique soit complexe, d'un coût prohibitif et d'une précision en pratique insuffisante.

En conclusion, à notre avis, la technique de rejet des eaux proposée dans les MPs est irréaliste à mettre en œuvre, impossible à contrôler et aboutira à un gaspillage considérable de la quantité de méthane présente dans le gisement. Dans une hypothèse optimiste, 30 % à 50% du méthane contenu dans la ressource pourra être extrait et ce en utilisant des techniques compliquées à gérer (débit décroissant dans le temps) et probablement onéreuses.

Absence d'un critère caractérisant l'efficacité de l'exploitation du gaz du gisement

L'omission d'un tel critère est étonnante dans un texte appelé à définir une technique saine, optimale et durable de l'extraction du méthane du Kivu.

Un exploitant qui utilise une technologie gaspillant 80 % du méthane dans les eaux de rejet n'est pas pénalisé par rapport à un autre qui ne renvoie que 20 % de méthane.

Par ailleurs, un exploitant qui utilise pour le fonctionnement de ses installations 25 % de l'énergie électrique produite à partir de l'extraction de méthane de sa station n'est pas pénalisé par rapport à un exploitant qui consomme 1 % de cette énergie.

Nous proposons dans notre texte de définir un paramètre de « rendement énergétique » minimal à respecter par tout exploitant.

Résumé et principales conclusions

Une description simplifiée de la structure physico-chimique du lac Kivu fait apparaître cinq couches distinctes :

- Biozone (BZ),
- Zone intermédiaire, (Intermediate Resource Zone : IRZ),
- Ressource potentielle, (Potential Resource Zone : PRZ),
- Gisement supérieur (Upper Resource Zone : URZ),
- Gisement inférieur (Lower Resource Zone : LRZ)

L'extraction du méthane se fait par prélèvement d'eau provenant de la zone de gisement (URZ, LRZ), séparation du gaz et du liquide (dans le dispositif appelé séparateur) et rejet des eaux dégazées.

Problématique du mode de rejet des eaux dégazées

Les MPs imposent de manière arbitraire de rejeter les eaux dégazées dans la couche où l'eau riche en gaz dissous a été prélevée.

Le rapport réalisé par YLec Consultants conclut formellement en écartant cette solution. Ce rapport démontre qu'une telle méthode aboutirait inévitablement à la dilution de la couche concernée, à une chute de l'efficacité du processus d'extraction et à la transformation d'une couche exploitable en une couche contenant encore la majeure partie du méthane dissous mais qui n'est plus exploitable en pratique, donc à un gaspillage inacceptable et irrémédiable de la richesse de la ressource.

Nous apportons dans ce texte des arguments supplémentaires qui indiquent que la méthode préconisée dans les MPs est inapplicable.

En page 26, nous rappelons qu'il existe des oscillations verticales des eaux dans les profondeurs du lac (phénomène appelé seiches) qui peuvent avoir des amplitudes de l'ordre de 2 m à 4 m et qui, quelle que soit la géométrie, même très sophistiquée, du dispositif de rejet, rendent impossible la formation d'une couche individuelle dégazée d'épaisseur inférieure à 4 m.

Selon notre expérience dans le domaine du développement de sondes de concentration, l'ajustement de la densité des eaux de rejet proposé dans les MPs (par réglage de la concentration de CO₂ dissous) n'est à ce jour pas réaliste en terme instrumental : il faudrait obtenir une précision dans le réglage des densités largement supérieure à 10⁻⁴. Les techniques d'évaluation de densité, calculée à partir des divers paramètres de l'eau

du lac et de diverses constantes peu sûres restent en pratiques incertaines : de ce fait aucune vérification ne sera possible prouvant la formation d'une couche individualisée des eaux dégazées.

Enfin, on montre page 26 que certains paramètres, notamment la température, varient de manière considérable à l'échelle de quelques années, par exemple au niveau de la couche URZ située entre le gradient principal et le gradient secondaire, ce qui peut considérablement compliquer un réglage précis des densités.

Indépendamment des conclusions détaillées dans le Rapport YLec, les considérations ajoutées ci-dessus suffiraient à elles seules à écarter la solution de rejet des eaux proposée dans les MPs.

Exposé de la méthode de rejet des eaux dégazées que nous proposons

Pour les besoins de clarté de notre explication, nous simplifions le schéma de structure du lac en passant de cinq à trois régions :

- Biozone et zone intermédiaire,
- Ressource potentielle,
- Gisement

Un point important de notre méthode repose sur des simulations portant sur la possibilité d'exploitation de la zone de ressource potentielle PRZ. Ces simulations sont étayées par des retours d'expériences sur site. Actuellement, l'exploitation de cette zone de ressource est pratiquement impossible (techniquement et économiquement). Nous avons montré en page 12 que, dans l'hypothèse d'un taux d'enrichissement en méthane réaliste, l'exploitation de cette zone restait impossible dans un délai inférieur à plusieurs siècles.

Nous en tirons la conclusion qu'il ne faut pas espérer tirer partie du méthane contenu dans cette couche PRZ et qu'elle est et restera totalement inexploitable.

Une considération supplémentaire porte sur les conséquences que pourraient avoir un rejet des eaux dégazées dans la région biozone et zone intermédiaire.

Nous ne sommes pas compétents dans ce domaine qui relève de l'écologie lacustre mais la majorité des scientifiques qui se sont penchés sur ce problème déconseillent fortement une telle option.

Le rejet direct des sels contenus dans les eaux profondes du lac et très riches en substances nutritives (phosphates, nitrates) dans la biozone (oxygénée) pourrait provoquer une augmentation de la production de matières organiques avec des conséquences écologiques graves pour l'environnement lacustre (bloom algae eutrophisation des eaux).

Par ailleurs, les études menées par l'EAWAG, ont montré qu'un flux vertical important de nutriments est transporté continuellement vers la biozone par un mouvement ascendant des eaux du lac. Cette montée des eaux est expliquée par des apports d'eau provenant de sources advectives dans les profondeurs du lac, notamment au niveau du gradient principal et surtout du gradient situé à 190 m (au dessus de la ressource potentielle).

Les scientifiques de l'EAWAG insistent sur le risque environnemental en relation avec une augmentation du débit ascendant des eaux du lac qui impliquerait un accroissement de la masse de nutriments pénétrant chaque année dans la biozone. En conséquence, le rejet des eaux dégazées, riches en matières nutritives, dans la zone intermédiaire est jugé dangereux pour l'environnement du lac.

En résumé, pour trouver une solution à la problématique du rejet des eaux dégazées, on se trouve confronté avec la situation suivante :

Point 1 – D'après ce qui est rappelé en tête de chapitre, il est exclu (pour des raisons de faisabilité et des raisons économiques) de rejeter les eaux dégazées à l'intérieur du gisement (URZ et LRZ)

Point 2 – Il est imprudent, pour des raisons environnementales, d'effectuer le rejet des eaux dégazées dans la biozone et même dans la zone intermédiaire.

Point 3 – La zone de ressource potentielle PRZ ne sera jamais exploitable.

A partir de ces constatations, il n'existe qu'une seule solution, qui de plus paraît évidente : le rejet des eaux dégazées provenant du gisement doit se faire dans la zone de ressource potentielle.

Le gisement s'épuise au cours de l'exploitation en conservant ses caractéristiques ; la zone supérieure du lac formée par la biozone et la couche intermédiaire ne sont pas modifiées.

Principe général du procédé d'extraction

Selon le procédé énoncé ci-dessus, les eaux de rejet, chargées en sels et donc de forte densité, sont rejetées dans la partie haute de la zone de ressource potentielle PRZ et mélangée intimement avec celle-ci. Il en résulte d'une part une subsidence des eaux situées au dessus du point de prélèvement. D'autre part, la couche constituée par le mélange de la zone de ressource potentielle et des eaux de rejet va en s'épaississant, sa densité, tout en restant sensiblement homogène, va augmenter.

Nous verrons à la page 16 qu'il est possible de commencer l'exploitation par la ressource supérieure (solution A) ou par la ressource inférieure (solution B).

Le choix de l'une ou l'autre de ces solutions dépend de plusieurs critères, certains en faveur de la solution A, d'autres en faveur de la solution B. Il est donc difficile de se prononcer de manière formelle sur la meilleure solution à adopter.

Critère 1 – Resistance des gradients au cours de l'exploitation

Ce point est traité en détail pages 20 et 21. La solution A, débutant par l'exploitation de la ressource supérieure est privilégiée, principalement pour conserver des zones de gradients suffisamment robustes pour isoler la zone de gisement de la zone résultant du mélange de la PRZ et des eaux de rejets.

En effet, en utilisant la solution A, ce gradient présente une amplitude minimale de $0,9 \text{ kg/m}^3$ lors de l'étape finale de l'exploitation du méthane. En choisissant la solution B, ce gradient ne présente plus qu'une amplitude minimale de $0,4 \text{ kg/m}^3$ lors de l'étape finale de l'exploitation du méthane.

Néanmoins, le processus de subsidence des couches, sans modification de l'allure des gradients de densité, a été validé concrètement lors du dégazage du lac Monoun (cf. page 24). Dans cet exemple le rejet au dessus d'un gradient des eaux prélevées en dessous de ce gradient n'a provoqué aucun phénomène de dé-stratification.

Critère 2 – Evolution du risque d'explosion gazeuse

Ce point a été traité pages 23. La solution B débutant par l'extraction de la ressource inférieure est dans ce cas nettement plus sécurisante.

Critère 3 – Aspects économiques

La solution B est globalement plus intéressante. L'exploitation de la LRZ est en effet beaucoup plus efficace que celle de l'URZ en raison de sa richesse en méthane (pour une géométrie donnée de station, le débit d'extraction est environ 1,5 fois plus important dans la solution B par rapport à la solution A). Par ailleurs, la LRZ renferme deux fois plus de méthane que l'URZ.

A noter cependant que la solution A qui s'effectue à des profondeurs moins importantes comparativement à la solution B est facilitée par la proximité du rivage et donc par une longueur du gazoduc moins importante.

L'exploitation de la ressource s'étalant sur plusieurs décennies, l'examen de l'impact des différents critères évoqués ci-dessus, devrait permettre de corriger les plans initiaux prévus et de moduler éventuellement le mode d'extraction entre solution A et solution B en exploitant à la fois l'URZ et la LRZ selon des proportions visant à la fois à conserver de forts gradients et à réduire les risques d'explosion.

Rendement énergétique du gisement

L'exploitation rationnelle de l'énergie latente contenue dans le gisement implique de réduire au maximum toute perte d'énergie, c'est-à-dire d'optimiser le rendement énergétique du processus d'extraction.

Il faut bien entendu en particulier minimiser la puissance électrique nécessaire pour faire fonctionner la station d'extraction.

Il faut aussi développer une méthode d'exploitation qui limite les pertes de méthane dans les eaux de rejet. Nous insistons particulièrement sur ce point précis qui constitue la véritable clé de l'efficacité d'un procédé d'extraction.

Les pertes de méthane au cours du lavage (étape d'enrichissement en méthane par dissolution préférentielle du CO₂ contenu dans le mélange gazeux initialement produit) peuvent être directement calculées (avec une marge d'incertitude) en fonction de la concentration en méthane recherchée.

En revanche les pertes de méthane au cours de la séparation liquide – gaz ne peuvent pas être calculées aussi simplement : elles dépendent du procédé d'extraction utilisé. Nous insistons donc sur le fait qu'il faudra mettre au point des techniques de mesure du méthane dissous pour évaluer la teneur en méthane des eaux rejetées. Nous jugeons vital, pour garantir une exploitation durable de la ressource, qu'une concentration maximale admissible de la concentration en méthane dans les eaux de rejet soit définie. Cette concentration limite pourra être fonction de la zone exploitée, qui sera plus ou moins riche en méthane selon que l'eau est prélevée dans l'URZ ou la LRZ. L'utilisation de toute installation dont la teneur en méthane des eaux de rejet excède cette valeur limite devrait en toute logique être prohibée ou a minima être soumise à des pénalités.

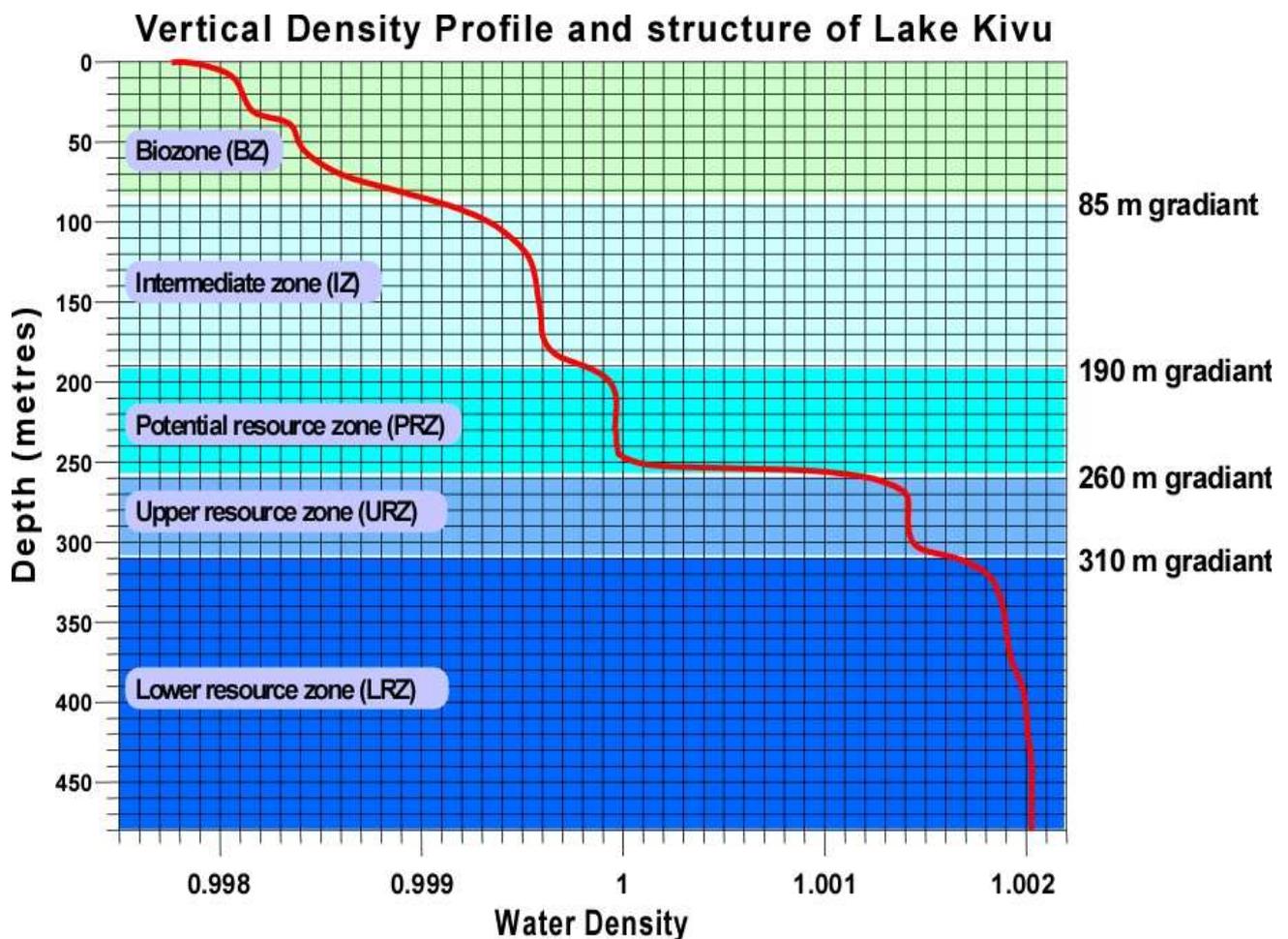
1 – Structure du lac Kivu

Densité des eaux

Le profil de densité des eaux joue un rôle essentiel dans la stabilité du lac, dans le choix d'un processus optimal de rejet des eaux chargées en gaz et dans l'estimation du risque d'explosion gazeuse.

Les eaux du lac Kivu présentent une structure stratifiée particulièrement évidente au vu des variations de ses paramètres physico-chimiques avec la profondeur.

L'explication précise de ce phénomène de stratification est complexe. Les différentes couches du lac vont se séparer en couches homogènes – où le mixage par convection se fait facilement – séparées par des couches à haut gradient de densité qui jouent le rôle de barrière au processus de mélange. La structure physico-chimique du lac présente une allure « en escalier » comme on le voit sur la figure ci-dessous pour le paramètre densité. On peut facilement repérer les zones de fort gradient qui séparent les couches homogènes. On notera particulièrement l'importance du fort gradient de densité situé vers 260 m de profondeur, qui joue le rôle de piège pour le gaz dissout dans les couches profondes.



La structure du lac se décompose schématiquement en 5 zones plus ou moins homogènes, séparées par des gradients de densité plus ou moins marqués.

La biozone (BZ) constitue la couche superficielle vivante du lac. Sa partie oxygénée varie suivant les saisons entre 30 m et 60 m de profondeur.

La zone intermédiaire (IZ), entre 90 et 190 m, renferme une très faible teneur en gaz, insuffisante pour espérer une exploitation du méthane dans l'avenir.

La couche de ressource potentielle (PRZ), entre 190 m et 260 m, contient une quantité totale non négligeable de méthane mais on verra par la suite que sa concentration ne permet pas son exploitation, même dans un avenir lointain.

Un gradient de densité très marqué situé à 258 m, appelé gradient principal, sépare le lac entre la partie inexploitable et le gisement exploitable en méthane.

Dans le gisement, on distingue la couche du gisement supérieur (URZ), entre 260 m et 310 m et la couche du gisement inférieur (LRZ), entre 310 m et le fond du lac situé à 485 m maximum. Ces deux couches du gisement sont séparées par un gradient que l'on appelle gradient secondaire.

La densité de l'eau est fonction de différents paramètres physico-chimiques :

- elle décroît lorsque la température augmente,
- elle croît avec la salinité (teneur en ions caractérisé par le paramètre de conductivité électrique),
- elle croît avec la teneur en CO₂ dissout,
- elle décroît avec la teneur en méthane dissout.

La dépendance de l'eau pure avec la température (dans la gamme de température 23° C à 26 °C) est donnée par l'expression

$$D(T) = 1.00332 - 2.56 \times 10^{-4} T$$

L'expression de la densité en fonction des paramètres ci-dessus est la suivante :

$$D(T, C, CO_2, CH_4) = D(T) \times (1 + \beta C + \beta_{CO_2} CO_2 - \beta_{CH_4} CH_4)$$

T est la température en degrés Celsius,

C est la conductivité en mS/cm ; $\beta = 8.826 \times 10^{-4}$

CO₂ est la concentration en CO₂ dissout en L_{gaz}/L_{eau} ; $\beta_{CO_2} = 5.576 \times 10^{-4}$

CH₄ est la concentration en méthane dissout en L_{gaz}/L_{eau} ; $\beta_{CH_4} = 8.945 \times 10^{-4}$

Nous avons reporté sur la figure ci-dessous la dépendance de la densité en fonction de la profondeur du lac en séparant les effets des différents paramètres.

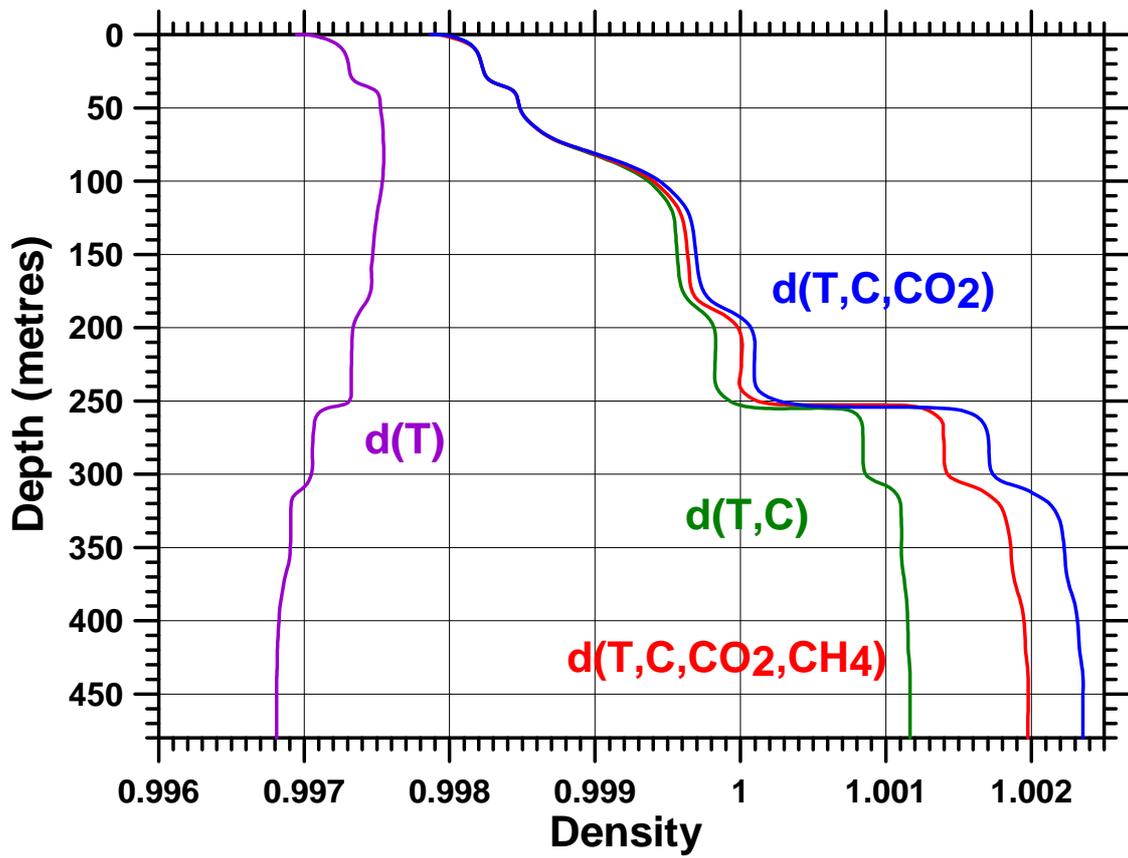
D(T) est la densité de l'eau pure supposée portée à la température de l'eau du lac,

D(T,C) est la densité de l'eau à la température et à la conductivité de l'eau du lac,

D(T,C,CO₂) est la densité de l'eau à la température, à la conductivité et à la concentration en CO₂ de l'eau du lac,

D(T,C,CO₂,CH₄) est la densité de l'eau à la température, à la conductivité, à la concentration en CO₂ et à la concentration en CH₄ de l'eau du lac,

On constate sur cette figure le rôle prépondérant sur la densité du paramètre salinité (mesuré à partir de la conductivité électrique).



Profils de densité calculés à partir des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux du lac

2 – Problématique de l'extraction du méthane

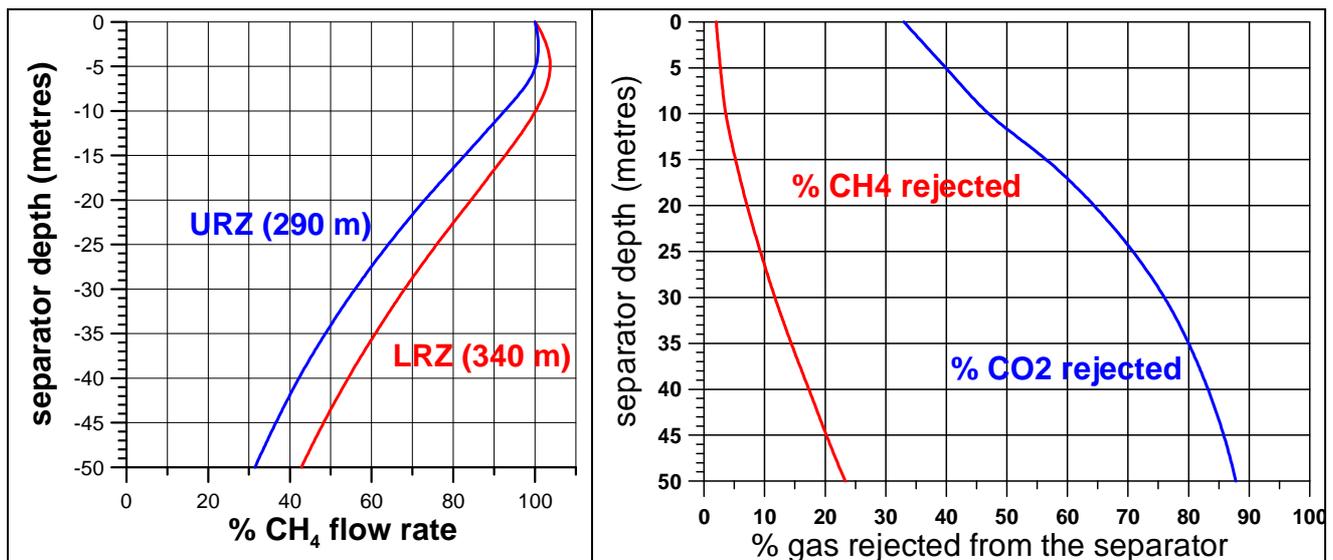
Effet de la profondeur du séparateur

Nous avons porté ci-dessous la courbe (normalisée) de débit du méthane en fonction de la profondeur du séparateur. Ce débit augmente lorsque la profondeur du séparateur diminue.

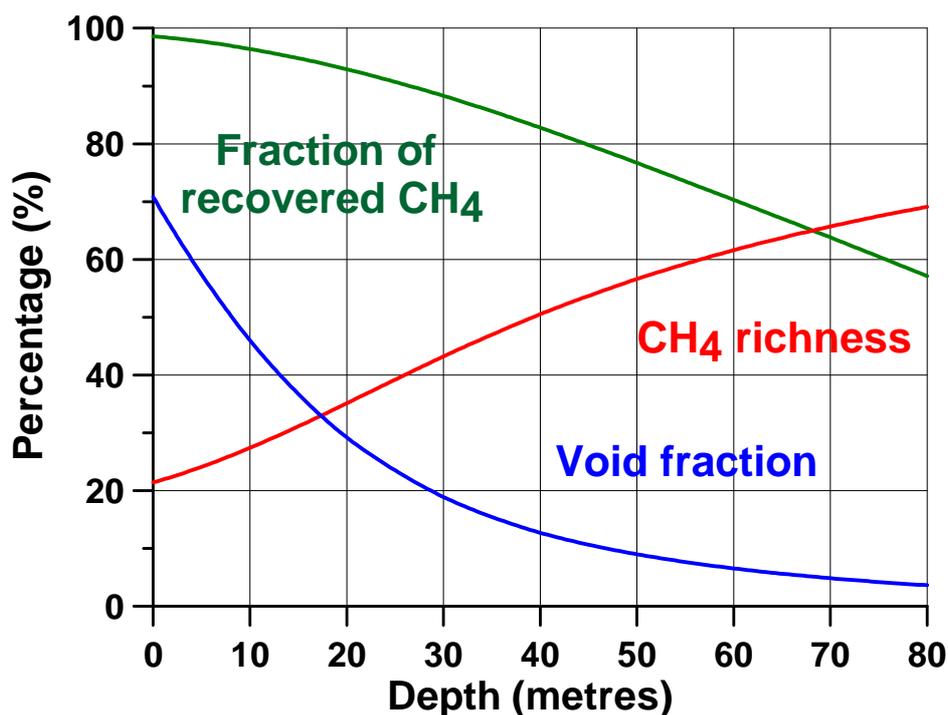
De même, nous avons porté le pourcentage de méthane et de CO₂ contenu dans les eaux de rejet en supposant que l'eau et le gaz sont à l'équilibre dans le séparateur.

On constate que la perte en méthane augmente avec la profondeur du séparateur.

Ces deux remarques sont donc en faveur d'une position du séparateur à faible profondeur.

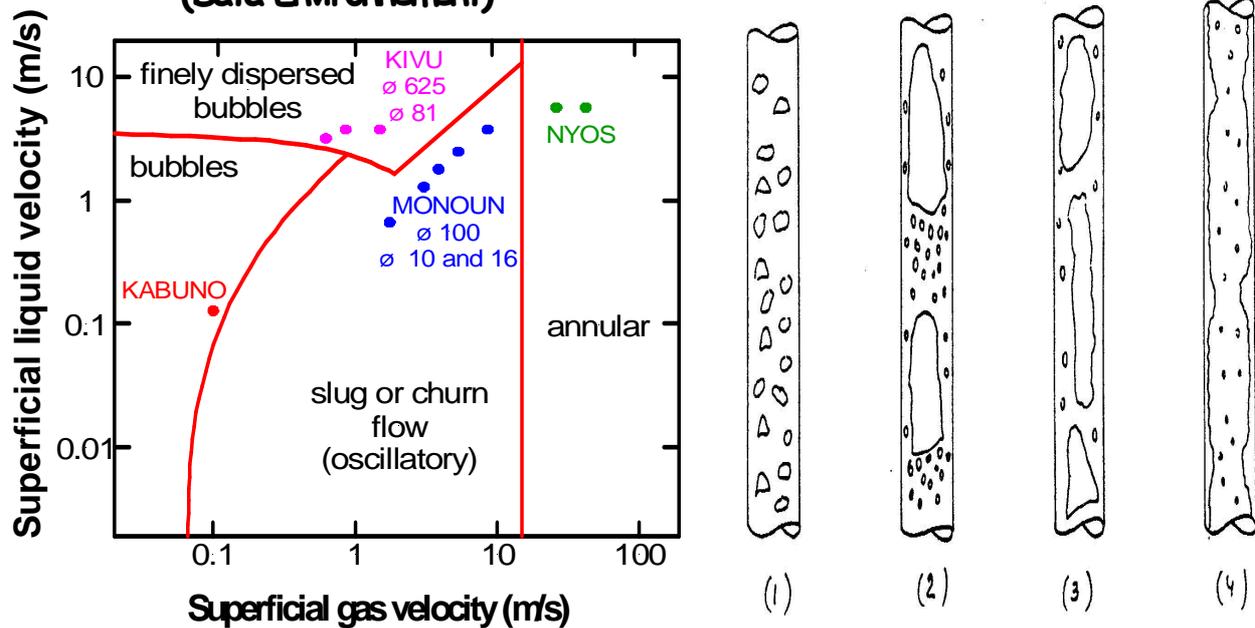


Notons cependant sur la figure suivante que, lorsque la profondeur diminue, la richesse du gaz en méthane diminue et que le taux de vide (void fraction) ou teneur volumique en gaz de l'écoulement (rapport du débit de gaz divisé par le débit total : eau plus gaz) augmente fortement.



Éléments sur la typologie des écoulements diphasiques

Flow patterns and map: ex-solution experiments (Data Environment)



Nous avons reportés sur la courbe ci-dessus les résultats expérimentaux obtenus durant de nombreuses campagnes expérimentales sur les lacs Nyos, Monoun, Kivu et golfe de Kabuno.

Suivant notamment la valeur du taux de vide dans un écoulement diphasique liquide - gaz, différents types de régimes peuvent apparaître :

- (1) écoulement à bulles : les bulles sont dispersées au sein du liquide (on distingue les bulles finement dispersées des simples régimes à bulles)
- (2) et (3) écoulements intermittents : on distingue des régimes à poches (ou à bouchons) des régimes bouillonnant. Il y a alors coalescence de la phase gazeuse (poches) séparés par la phase liquide (bouchons).
- (4) écoulement annulaire. La phase liquide est alors préférentiellement rejetée sur les parois, le cœur gazeux de l'écoulement véhicule des gouttelettes de liquide dispersées.

On peut généralement considérer que les écoulements intermittents apparaissent lorsque le taux de vide est supérieur à 25 % (valeur empirique et approximative). Ils apparaissent brutalement et sont dangereux du fait des vibrations, voire des chocs, induits dans la structure. Par ailleurs, ils limitent très fortement les échanges des composants (CO_2 et CH_4) entre phase liquide et phase gazeuse et donc la possibilité d'approcher de l'état d'équilibre. Enfin, ils pénalisent fortement l'efficacité d'entraînement du liquide par les bulles de gaz.

En conclusion, la profondeur d'immersion du séparateur doit être suffisante pour éviter des régimes d'écoulements instables. D'après cette constatation et le contenu du paragraphe présenté à la page précédente, le séparateur doit être positionné autour de 25 m (entre 20 m et 30 m de profondeur).

Cette valeur du taux de vide, de l'ordre de 25%, délimitant l'apparition de régimes d'écoulements intermittents, est en accord avec les constatations obtenues lors de campagnes d'essais réalisées sur des colonnes de dimension semi-industrielle.

Notion de qualité d'une couche en fonction de sa teneur en méthane

Chaque couche composant la ressource (potential, upper, lower layer ressource) est caractérisée par deux paramètres, l'un quantitatif, l'autre qualitatif.

- le paramètre quantitatif est bien entendu représenté par la quantité totale de méthane contenue dans la couche considérée,
- le paramètre qualitatif représente la capacité de la couche considérée pour activer le processus d'autosiphon.

L'utilisation d'un code de calcul sur les écoulements diphasiques a montré que c'est essentiellement la concentration en méthane qui conditionne l'efficacité de l'autosiphon, et par voie de conséquence, le débit de gaz extrait. En fait, c'est le méthane, qui va provoquer l'exsolution dans la colonne de liquide à cause de sa faible solubilité dans l'eau. Le rôle du CO₂ dans ce mécanisme est relativement secondaire.

Le tableau ci-dessous rappelle les capacités et teneurs en méthane des différentes couches.

Couche	Eau (km³)	Densité moyenne	CH₄ (km³)	Concentration CH₄ (L_{meth}/L_{liq})	
0 m - 60 m	133	998,352	0	0	biozone
60 m - 190 m	219	999,435	10,5	0,045	zone intermédiaire
190 m – 260 m	84	1000,175	9,5	0,10	potential ressource
260 m – 310 m	49	1001,447	16	0,34	ressource : upper layer
310 m – 480 m	74	1001,882	30	0,414	ressource : lower layer
Total	559		66		

Cette remarque est évidente dans le cas de la zone de ressource potentielle (PRZ).

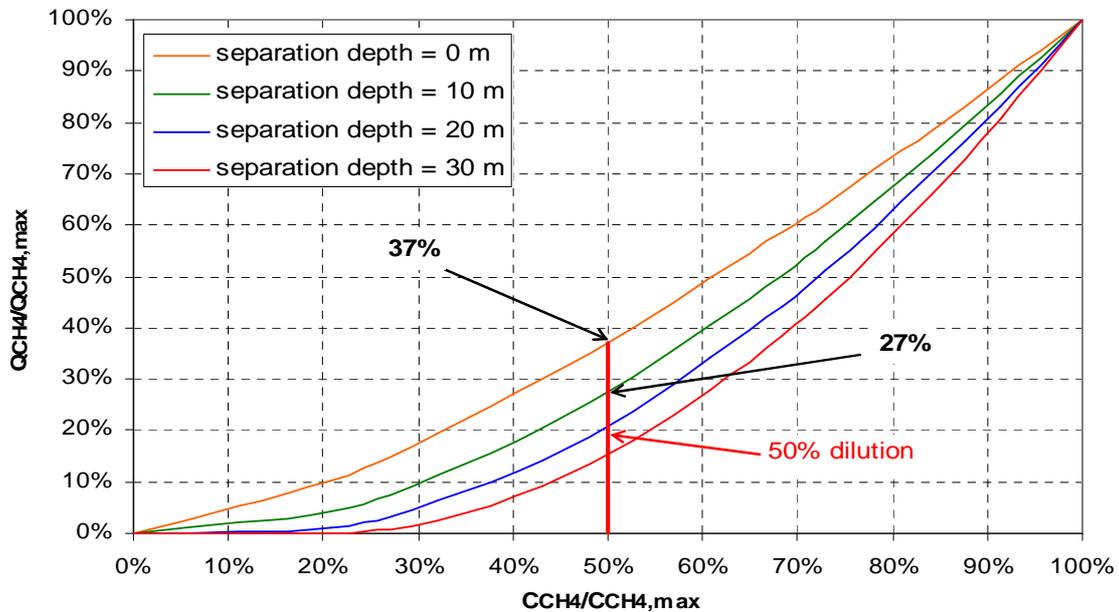
La quantité de méthane qu'elle renferme n'est pas négligeable (15 % de la ressource totale) ; par contre la concentration en méthane (0,1 L_{methane}/L_{eau}) rend son exploitation impossible. Cette partie très importante concernant la capacité d'extraction d'une couche en fonction de sa richesse en méthane est en relation avec les conséquences de la dilution d'une couche. Elle a été développée dans le Rapport YLec et est détaillée p. 12.

Exploitation possible de la couche de ressource potentielle (PRZ) ?

Sur la figure ci-dessous, on a porté en abscisse la concentration de méthane rapportée à la concentration de méthane dissous à 350 m et en ordonnée le débit (normalisé) de méthane extrait dans le séparateur suivant différentes profondeurs de celui-ci.

Prenons un exemple de l'effet de la concentration en méthane sur le débit disponible, celui de l'URZ qui a une concentration en méthane d'environ 83 % de celle de la LRZ (0,34 L_{methane}/L_{eau}). Si on veut utiliser un séparateur situé à 20 m de profondeur, on constate que le débit de méthane extrait sera de 68 % comparativement à celui extrait dans la LRZ.

Prenons maintenant le cas de l'extraction du gaz provenant de la couche de ressource potentielle. La concentration en méthane de PRZ est de l'ordre de 0,1 L_{methane}/L_{eau}, soit environ de 25 % de celle de la LRZ (0,414 L_{methane}/L_{eau}). Avec des concentrations aussi faibles en méthane, il est possible d'utiliser un séparateur en surface sans dépasser la règle empirique d'un taux de vide inférieur à 25 %.



D'après la courbe ci-dessus et en utilisant un séparateur à la surface du lac, l'extraction du méthane de la PRZ ne délivrera qu'environ 12 % du débit d'un dispositif d'extraction de même géométrie travaillant dans la LRZ (séparateur à 20 m). Même en supposant que cette concentration en méthane soit multipliée par 1,5 au cours du prochain centenaire (ce qui est très peu probable, les estimations portant actuellement sur un facteur multiplicatif de 1,3 sur 100 ans), cette fraction du débit délivré passera de 12 % à 18 %.

Nous pensons donc, qu'il faut abandonner définitivement l'idée d'exploiter la PRZ, sauf en utilisant un procédé original proposé au paragraphe 6.

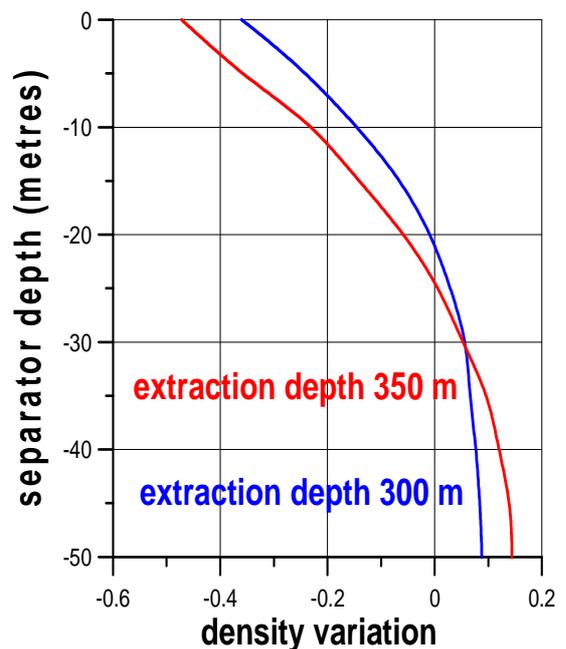
Densité des eaux issues du séparateur

On rappelle l'expression de la densité de l'eau en fonction des divers paramètres physico-chimiques :

$$D(T, C, CO_2, CH_4) = D(T) \times (1 + \beta_C C + \beta_{CO_2} CO_2 - \beta_{CH_4} CH_4)$$

Lors de l'étape de séparation de l'eau et du gaz, la température et la salinité restent constantes (on négligera l'effet du refroidissement de l'eau lors de la détente - pratiquement isotherme - du gaz dans la colonne d'extraction).

Si l'on prend seulement en compte l'influence des termes $\beta_{CO_2} CO_2$ et $\beta_{CH_4} CH_4$, on s'aperçoit que, suivant la profondeur du séparateur, le terme positif $\beta_{CO_2} CO_2$ l'emporte sur le terme négatif $\beta_{CH_4} CH_4$ à partir d'une profondeur située entre 20 et 25 m. En effet, dans ce cas, l'eau rejetée par le séparateur a conservé la majeure partie de son CO_2 alors qu'elle a perdu presque la totalité du méthane. Cette remarque est importante parce que cela signifie que l'eau sortant du séparateur présente alors une densité légèrement plus importante que l'eau entrant dans la colonne d'extraction. Rappelons que le séparateur est situé entre 20 et 25 m. A l'examen de la figure ci-dessous, on pourra donc considérer que l'eau de sortie du séparateur présentera une densité pratiquement égale à celle de l'eau prélevée dans la ressource.



3 - Stratégie de rejet des eaux dégazées

Le rejet des eaux dans le lac après dégazage pose un certain nombre de problèmes délicats concernant :

- le respect de l'environnement lacustre (notamment de la couche oxygénée ou biozone),
- la protection de la ressource (conservation de son intégrité, notamment de sa composition en gaz dissous),
- la réduction des risques d'explosion gazeuse,
- l'efficacité de la technologie pour parvenir à extraire un volume de méthane maximum par rapport à la capacité totale du gisement,
- la stabilité de la stratification du lac,
- l'efficacité du procédé d'extraction en termes de coût des installations, notamment en ce qui concerne leur consommation énergétique.

Impératifs auxquels doit répondre la technique d'extraction

Nous suggérons de classer ces impératifs selon l'ordre d'importance suivant :

- 1) *Préserver l'intégrité de la couche vivante (biozone) comprise entre 0 et 60 m,*
- 2) *limiter au maximum la vitesse de montée des eaux chargées en sels (nutriments) et qui, à terme, vont pénétrer dans le biotope,*
- 3) *Minimiser les pertes de méthane rejetées par le séparateur et le laveur de manière à assurer à l'exploitation un rendement d'exploitation optimal du gisement,*
- 4) *Préserver le rôle de barrière au mélange et de « piège à méthane » constitué par les zones à fort gradient de densité de manière à profiter pleinement du taux d'enrichissement en méthane. (taux qui est à ce jour largement incertain),*
- 5) *Éviter totalement tout rejet de gaz dans l'atmosphère en période normale d'extraction,*
- 6) *Contrôler que le procédé proposé tend à accroître la sécurité du lac en termes de risques d'explosion gazeuse. A cette fin, favoriser la subsidence des eaux du lac en dessous du gradient principal, et notamment aux niveaux 270 m et 320 m, niveaux qui présentent actuellement les taux de saturation en gaz les plus élevés,*
- 7) *Renvoyer le maximum de CO₂ dans l'eau de rejet du séparateur pour éviter son relâchement dans l'atmosphère (gaz à effet de serre)*.*
- 8) *Choisir un procédé d'extraction conciliable avec les impératifs économiques et financiers du processus d'extraction (en clair, optimiser le coût des dispositifs d'exploitation),*
- 9) *Maintenir au mieux la stabilité du lac, c'est-à-dire (en simplifiant) éviter, autant que possible, d'affaiblir les différences de densité entre l'eau au fond du lac et à la surface.*

** A noter que les 300 km³ de CO₂ représentent, en terme de crédit carbone (actuellement autour de 13 Euros la tonne) une valeur de l'ordre de 2 milliards d'euros : passer de 40 % (méthode des MPs) à 70 % (notre méthode) la concentration de CO₂ renvoyée dans le lac représente donc une économie potentielle de 600 millions d'Euros.*

Méthode de rejet des eaux dégazées

Elle est issue de considérations évidentes déduites des impératifs que nous avons énumérés ci-dessus.

- Nous avons exposé dans le rapport produit par le bureau d'études YLec Consultants quelles seraient les conséquences d'un rejet des eaux dégazées dans les couches URZ et LRZ, donc dans le gisement. Le mélange de ces eaux conduirait inévitablement à une dilution en méthane de ces couches et à un gaspillage considérable et irrémédiable de la ressource (incompatible avec les impératifs 3 et 8). Il est donc inconcevable d'effectuer le rejet dans les couches constituant le gisement.

- Nous pensons qu'il est important de conserver intact le couvercle d'eau de faible densité constitué par la biozone (BZ) et la zone intermédiaire (IZ), ceci aussi bien en terme de réduction des risques d'explosion que pour limiter le flux ascensionnel des nutriments. On remarquera que le gradient de densité constitué par ces deux couches sur une épaisseur de 190 m représente $2,1 \text{ kg/m}^3$, soit sensiblement la moitié du gradient de densité total du lac entre la surface et le fond. Nous répondons ainsi aux impératifs 1 et 2, et partiellement à l'impératif 4.

Pour des raisons économiques, le rejet des eaux dégazées ne peut se faire dans le gisement.

Pour des raisons environnementales, il semble prudent que ce rejet ne se fasse pas dans la biozone, ni même dans la couche intermédiaire.

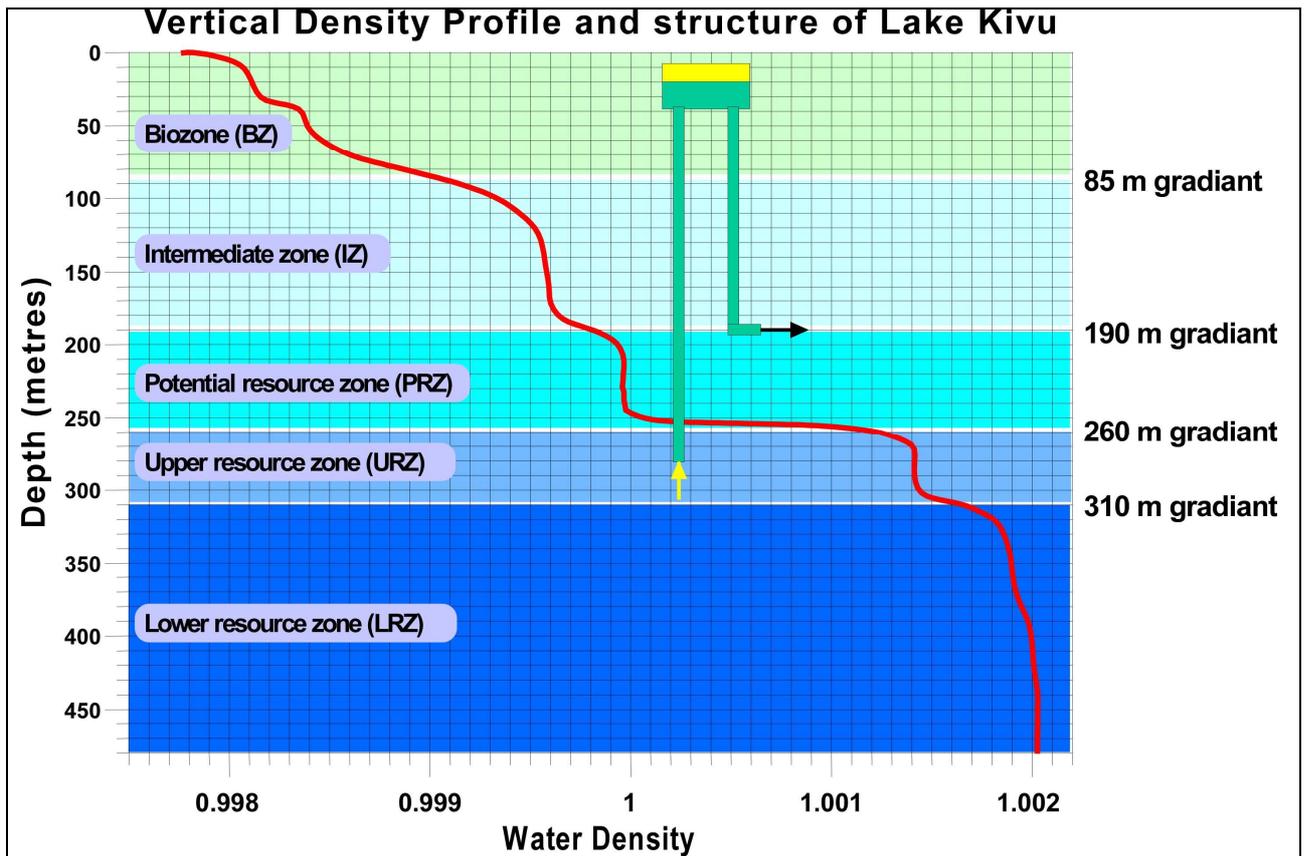
Par ailleurs, nous avons souligné plus haut le fait que l'exploitation de la PRZ n'était pas économiquement viable, même à long terme.

A partir des trois précédentes remarques, le procédé de rejet découle tout naturellement. Les eaux dégazées ne peuvent être rejetées que la zone de ressource potentielle (PRZ) :

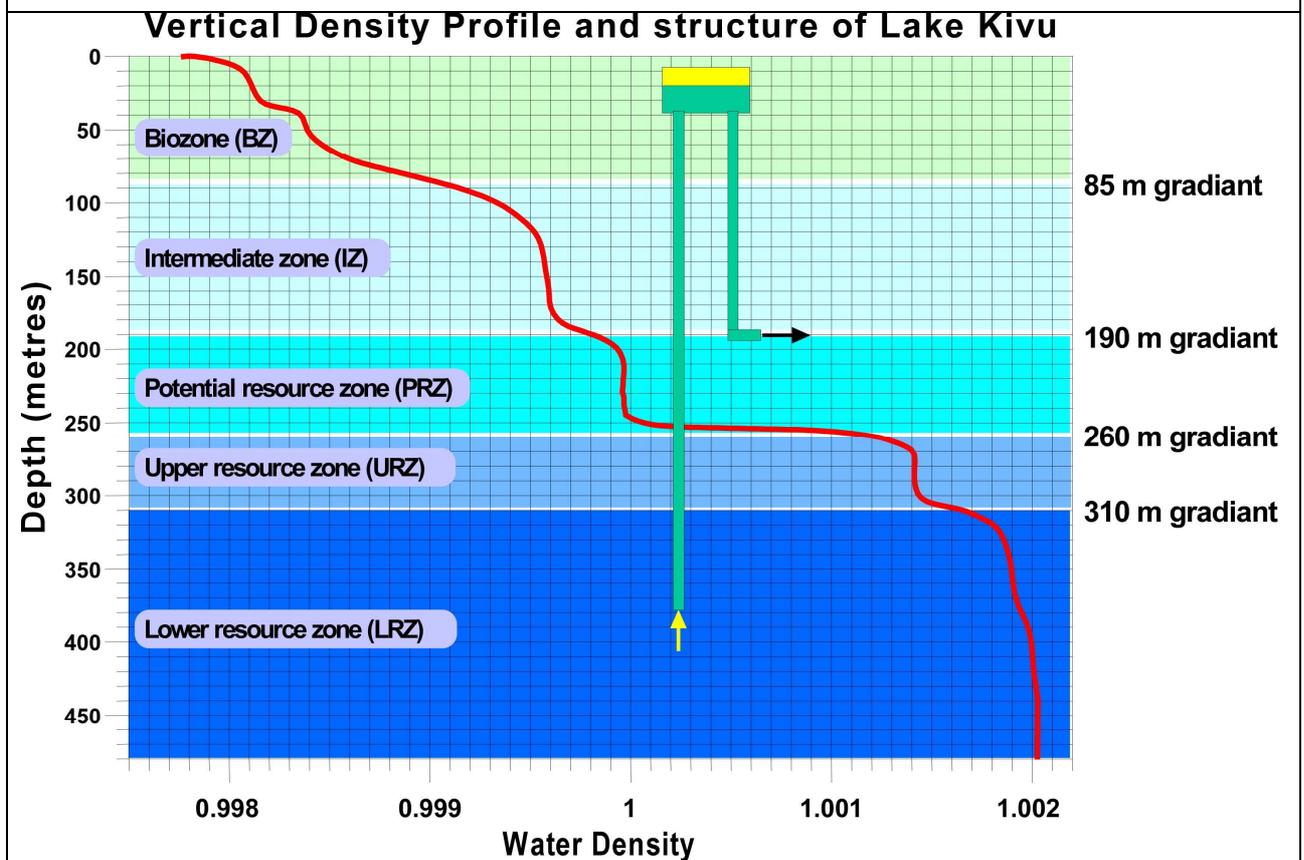
- **soit on prélève de l'eau de la LRZ et on la rejette (avec mélange) dans la PRZ,**
- **soit on prélève de l'eau de l'URZ et on la rejette (avec mélange) dans la PRZ,**

Les figures suivantes montrent que durant l'application de ce procédé les zones de forts gradients sont conservées (impératifs 4 et 9). La subsidence des couches riches en gaz permet notamment de s'écarter des conditions dangereuses en termes d'explosion gazeuse (impératif 6).

En conclusion, la procédure de rejet proposée satisfait quasiment la totalité des impératifs évoqués, aussi bien en termes de respect de l'environnement lacustre, de sécurisation du lac et d'optimisation du rendement économique et du coût de l'extraction.



Solution A : exploitation de l'URZ, rejet et mélange dans la PRZ



Solution B : exploitation de la LRZ, rejet et mélange dans la PRZ

Principe général du procédé d'extraction

Le scénario d'extraction que nous proposons a le mérite de la simplicité.

Etape 1 - On exploite la couche URZ (ou LRZ) en rejetant les eaux dégazées dans la PRZ (par un dispositif simple favorisant le mélange des eaux).

A la fin de cette étape, le nouveau volume de la PRZ (ou zone de mélange) est donc égal à la somme de son ancien volume augmenté du volume de l'URZ (ou LRZ).

La densité de la zone de mélange est calculée par une péréquation à partir de son ancienne densité et de la densité de la couche URZ (ou LRZ) rajoutée.

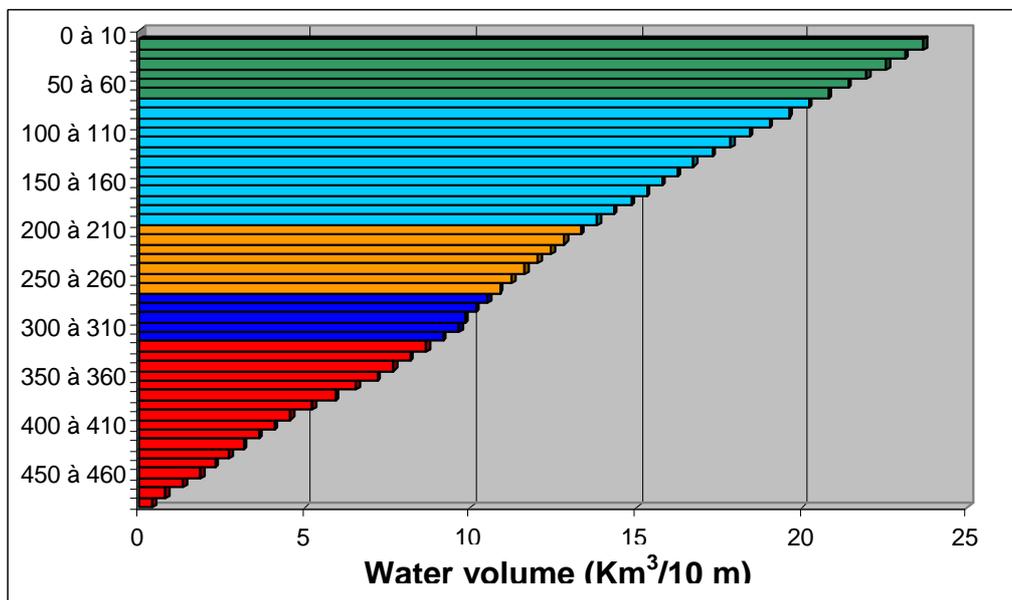
Remarque : on a déjà constaté que la densité de l'eau rejetée par le séparateur est pratiquement identique à celle de l'eau prélevée dans la ressource.

Etape 2 – On exploite la couche restante de la ressource - soit LRZ si l'URZ a été préalablement exploitée ; soit URZ si la LRZ a disparue – et on renvoie les eaux dégazées dans la zone de mélange obtenue en fin d'étape 1 (toujours en procédant par mélange).

Le volume de cette zone de mélange continue à augmenter ainsi que sa densité.

Le volume final de la zone de mélange à la fin de l'exploitation est donc égal à la somme des volumes des couches PRZ, URZ et LRZ en début d'exploitation.

La densité de la zone de mélange en fin d'exploitation est calculée à partir des volumes et des densités des trois couches PRZ, URZ et LRZ en début d'exploitation.



Représentation de l'histogramme de répartition actuelle des couches d'eau dans le lac (par tranche de 10 m d'épaisseur).

Couleur verte : biozone, (biozone : BZ)
Bleu clair : couche intermédiaire (intermediate zone : IZ)
Orange : gisement potentiel (potential resource zone : PRZ)
Bleu foncé : gisement supérieur (upper resource zone : URZ)
Rouge : gisement inférieur (lower resource zone : LRZ)

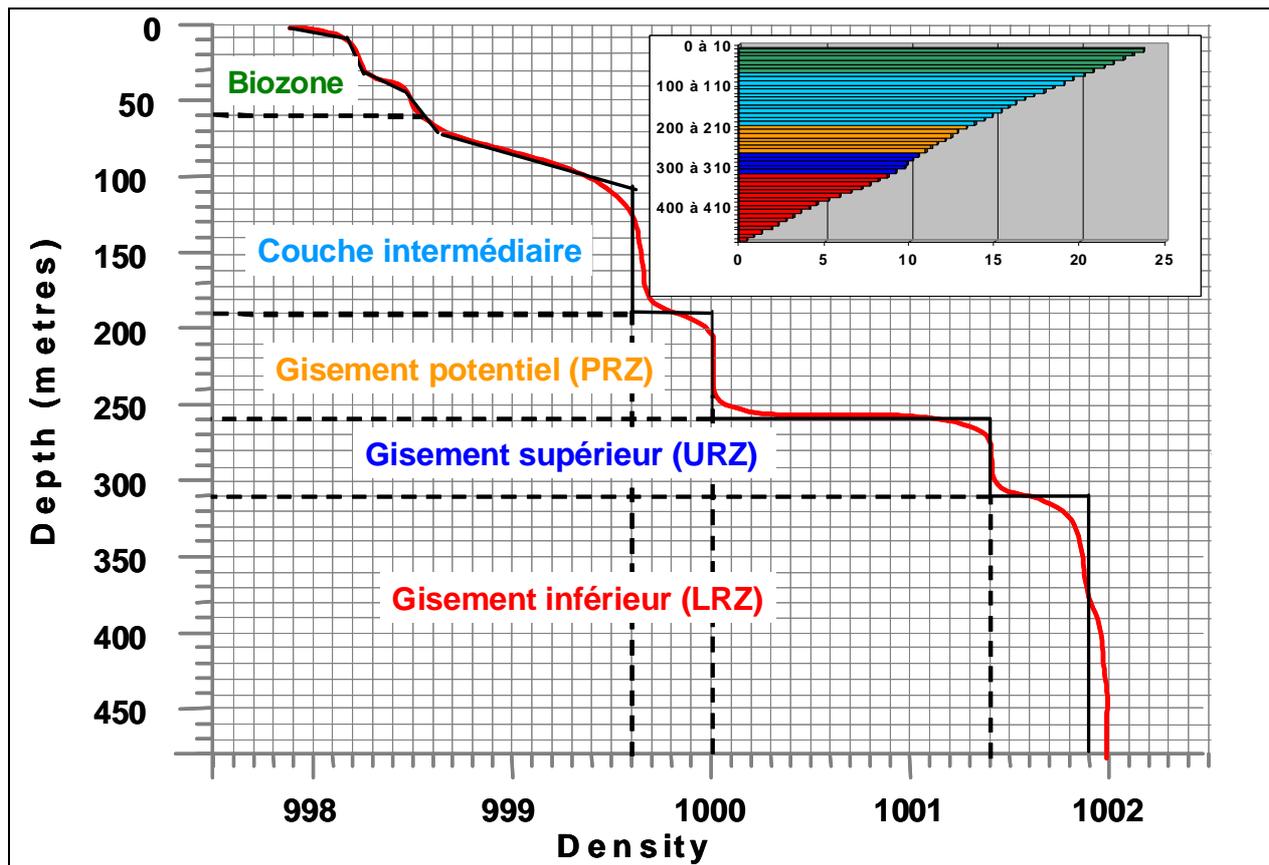


Figure a : distribution actuelle des couches de diverses densités

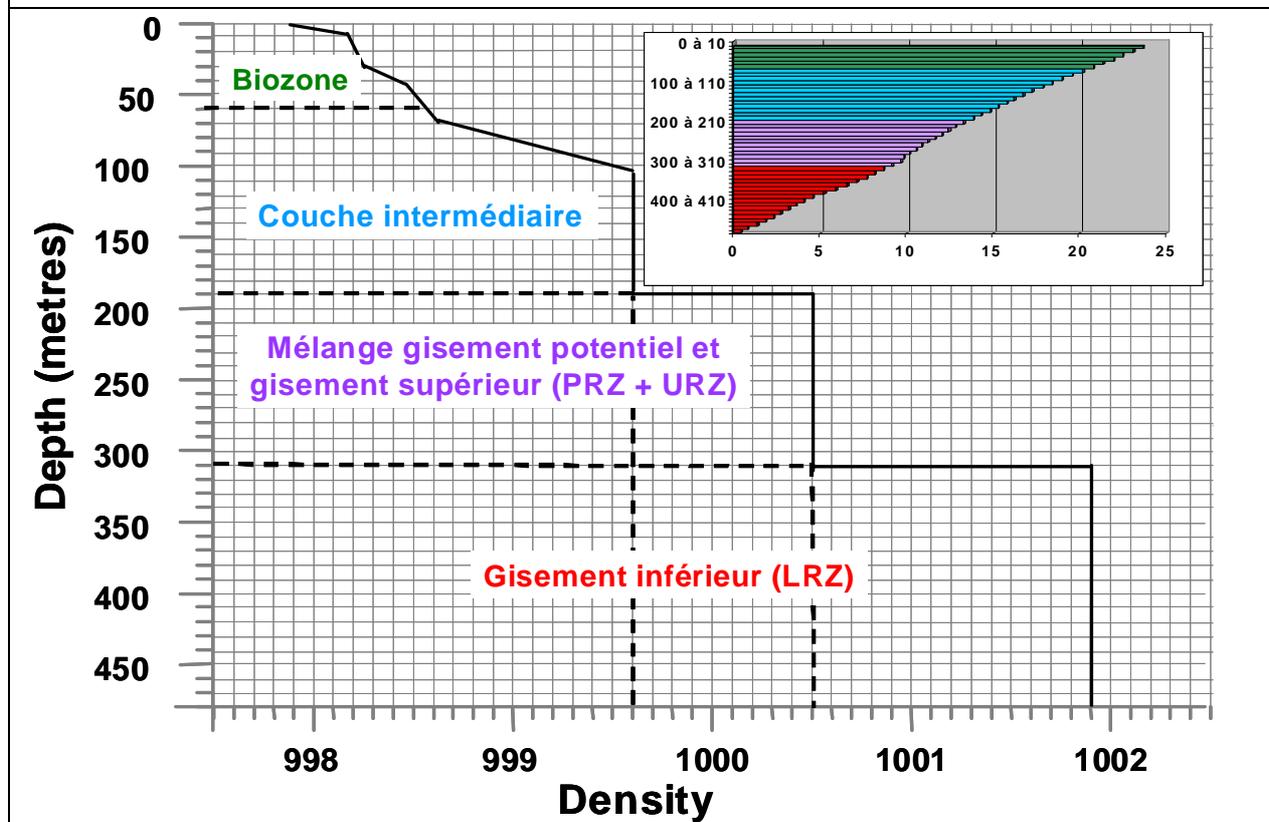


Figure b : Fin d'exploitation du gisement supérieur, rejet dans la PRZ

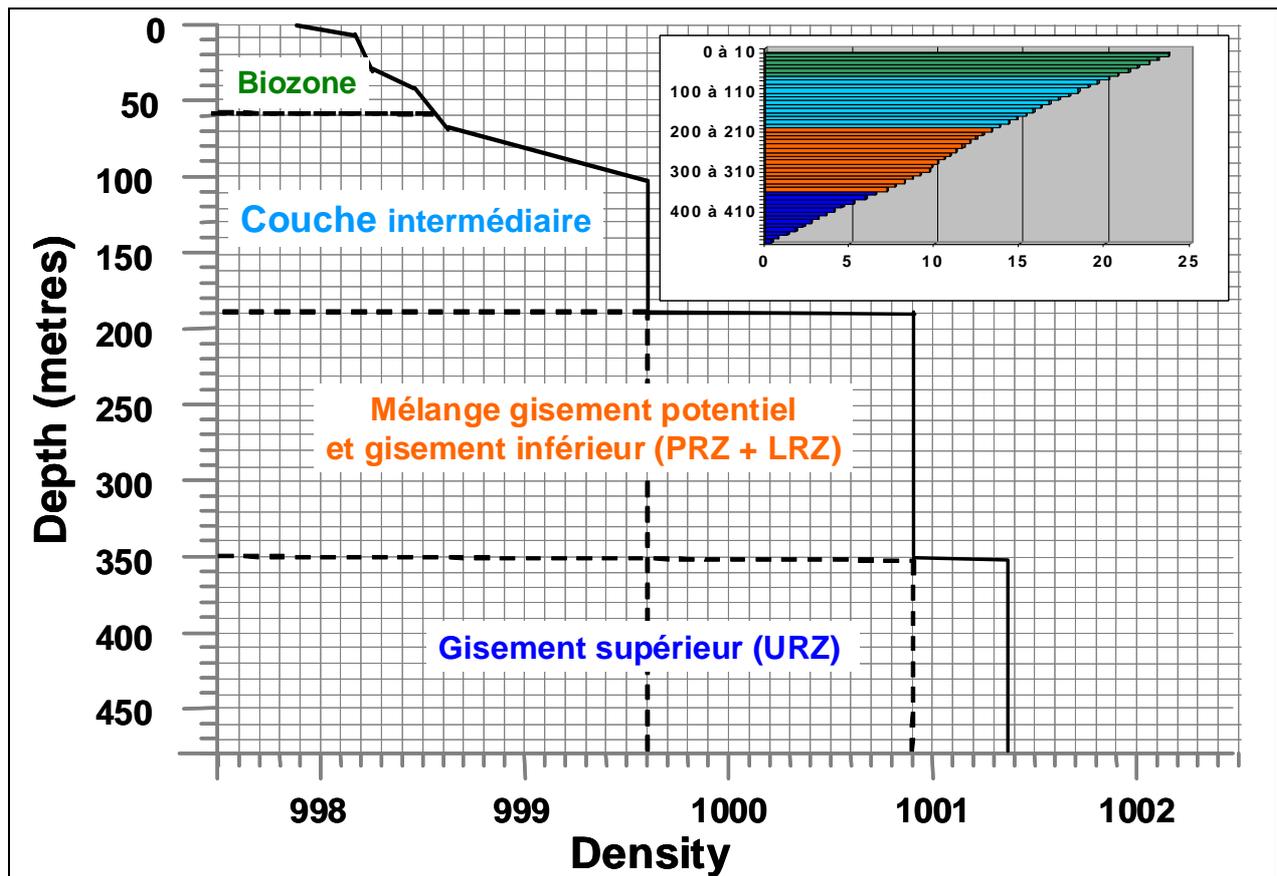


Figure c : Fin d'exploitation du gisement inférieur, rejet dans la PRZ

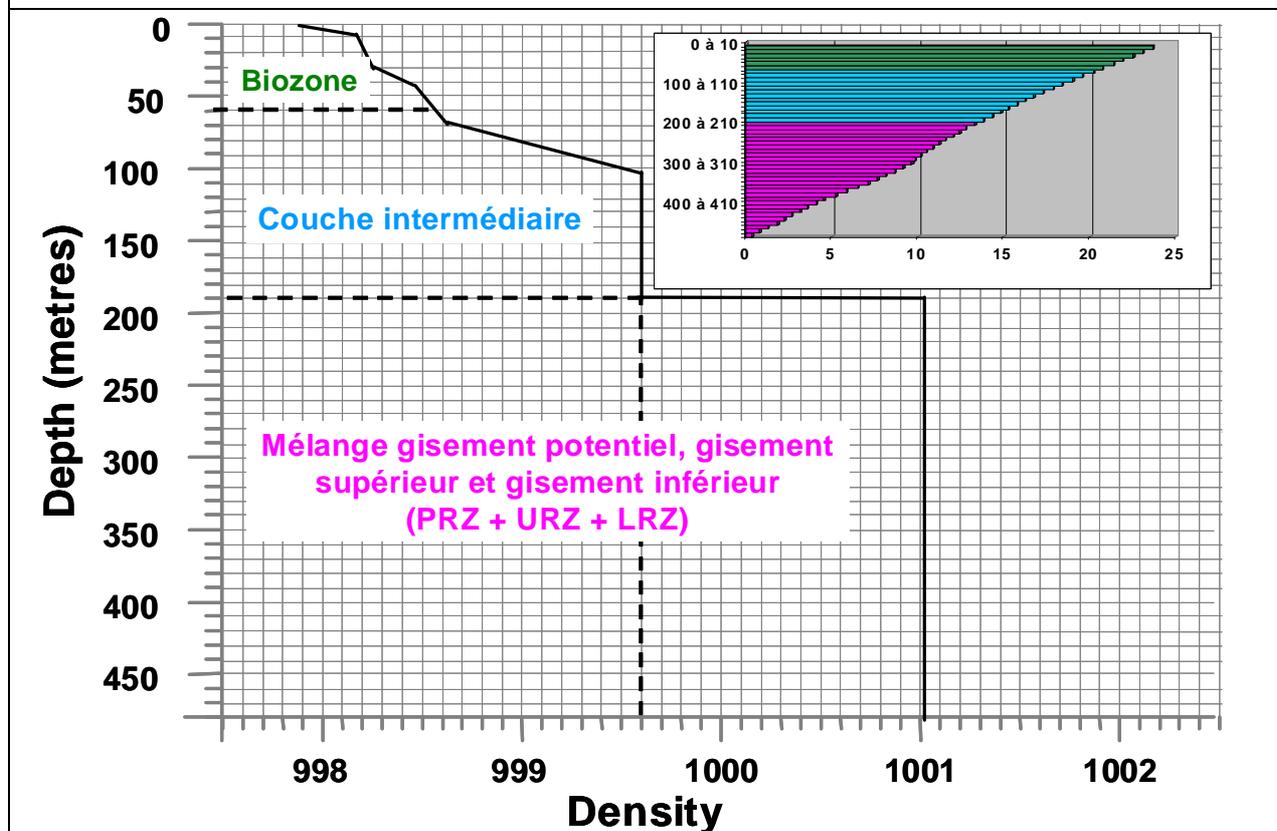


Figure d : Fin d'exploitation de toute la ressource, rejet dans la PRZ

Evolution des zones de gradients (cf. figures pages précédentes)

Le mécanisme général de l'évolution entre la figure a (situation actuelle) et la figure d (situation en fin d'exploitation) est simple.

Si on exploite d'abord l'URZ, le niveau du gradient principal baisse.

Si on exploite d'abord la LRZ, le niveau des deux gradients, principal et secondaire, baisse.

Dans les deux cas, l'amplitude du gradient à 190 m augmente, la densité et l'épaisseur de la zone de mélange augmente.

➤ **Hypothèse A : le prélèvement a lieu en premier lieu dans l'URZ**

Figure b

Durant l'exploitation de l'URZ, on assiste :

- à la baisse de niveau du gradient principal (qui passe de 260 m à 310 m avant de disparaître lorsque la couche URZ est épuisée) ;

L'ensemble gradient principal et gradient secondaire qui s'étendait entre 1000,0 kg/m³ et 1001,9 kg/m³ se ramène à un seul gradient qui s'étend entre 1000,6 kg/m³ et 1001,9 kg/m³

- à un renforcement du gradient situé à 190 m (qui s'étendait entre 999,6 kg/m³ et 1000,0 kg/m³ et s'étend maintenant entre 999,6 kg/m³ et 1000,6 kg/m³) cependant que la couche constituée du mélange PRZ + URZ s'épaissit de 70 m à 120 m et que sa densité augmente (de 1000,0 kg/m³ à 1000,6 kg/m³)

Figure d

L'exploitation de la LRZ s'accompagne :

- de la baisse du niveau du nouveau gradient (résultat de la disparition de la couche URZ) qui passe de 310 m à 485 m (fond du lac) lorsque la LRZ est épuisée.

- de la poursuite du renforcement du gradient situé à 190 m (qui s'étendait entre 999,6 kg/m³ et 1000,6 kg/m³ et s'étend maintenant entre 999,6 kg/m³ et 1001,0 kg/m³).

La couche constituée du mélange PRZ + URZ + LRZ s'épaissit entre 190 m de profondeur et le fond du lac cependant que sa densité augmente de 1000,6 kg/m³ à 1001,0 kg/m³

➤ **Hypothèse B : le prélèvement a lieu en premier lieu dans la LRZ**

Figure c

Durant l'exploitation de la LRZ, on assiste :

- à la baisse de niveau du gradient secondaire (qui passe de 310 m à 350 m),

- à la disparition du gradient principal,

- à un renforcement du gradient situé à 190 m (qui s'étendait entre 999,6 kg/m³ et 1000,0 kg/m³ et s'étend maintenant entre 999,6 kg/m³ et 1000,9 kg/m³),

La couche constituée du mélange PRZ + LRZ s'épaissit de 70 m à 160 m cependant que sa densité augmente (de 1000,0 kg/m³ à 1000,9 kg/m³),

On notera la faiblesse du gradient qui joue le rôle de piège et qui s'étend maintenant entre 1000,9 kg/m³ et 1001,4 kg/m³. De ce point de vue ce second scénario nous paraît moins approprié que le précédent.

Figure d

L'exploitation de l'URZ s'accompagne :

- de la baisse du niveau du nouveau gradient (résultat de la disparition de la couche LRZ) qui passe de 350 m à 485 m (fond du lac) lorsque l'URZ est épuisée.

- d'un très faible renforcement du gradient situé à 190 m (qui s'étendait entre 999,6 kg/m³ et 1000,9 kg/m³ et s'étend maintenant entre 999,6 kg/m³ et 1001,0 kg/m³)

La couche constituée du mélange PRZ + URZ + LRZ s'épaissit entre 190 m de profondeur et le fond du lac cependant que sa densité augmente de $1000,9 \text{ kg/m}^3$ à $1001,0 \text{ kg/m}^3$

Dans les deux procédés présentés ci-dessus, la stabilité globale du lac en fin d'exploitation aura un peu diminué, la densité au fond du lac ayant baissé de $1001,9$ à 1001 kg/m^3 .

Discussion des deux solutions proposées :

Dans cette discussion, nous examinerons en priorité les caractéristiques des gradients de densité séparant la zone de ressource de la zone PRZ (ou résultant des mélanges PRZ et eaux de rejets dégazées). Ces gradients joueront bien entendu toujours le rôle de piège à méthane, mais ce seront aussi eux qui devraient empêcher un mélange possible des deux zones adjacentes par diffusion.

La comparaison entre les solutions A et B se fera donc surtout sur le critère de la présence constante de gradients d'amplitudes suffisantes pour jouer un rôle de barrière au mélange des zones riches en méthane avec les zones pauvres en méthane.

Evidemment ce concept « d'amplitude suffisante » reste bien subjectif et n'est pas quantifiable mais nous chercherons à privilégier les solutions qui favorisent la robustesse apparente de ces gradients-barrières aux mélanges.

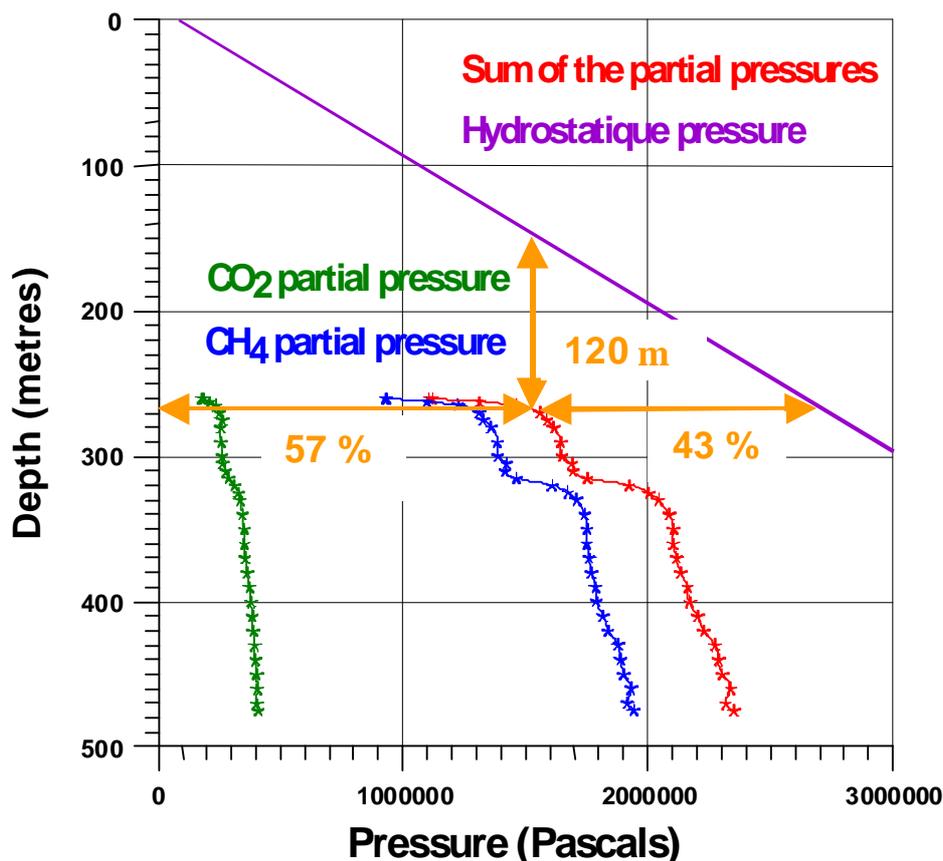
La solution A est la plus sécurisante par le fait qu'il reste toujours un gradient d'amplitude suffisante pour jouer ce rôle de barrière au mélange : de la situation figure b à celle figure d, l'amplitude du gradient barrière décroît de $1,4 \text{ kg/m}^3$ à $0,9 \text{ kg/m}^3$ dans la toute dernière phase de l'exploitation (rappelons que le gradient principal actuel a une amplitude de $1,4 \text{ kg/m}^3$).

Dans le cas de la solution B, on constate déjà sur la figure c, que le gradient barrière n'est que de $0,5 \text{ kg/m}^3$, et diminue légèrement à $0,4 \text{ kg/m}^3$ durant le passage de la figure c à la figure d.

4 – Divers acquis techniques et fondamentaux

Evolution du risque d'explosion gazeuse durant l'exploitation

L'apparition d'une phase gazeuse pouvant entraîner une explosion (éruption limnique) intervient lorsque la somme des pressions partielles des différents gaz dissous atteint la pression hydrostatique. On voit sur la figure ci-dessous que deux zones de profondeurs sont actuellement les plus concernées, à 270 m et à 330 m, avec des pressions gazeuses totales de l'ordre de 55 à 60 % de la pression hydrostatiques.



Résultats des calculs obtenus à partir de nos mesures des teneurs en CO₂ et CH₄, campagne de novembre 2003

La méthode de rejet des eaux dégazées que nous proposons doit tenir compte d'une évolution temporelle qui aille dans le sens d'une diminution de la situation du risque à toutes les profondeurs du lac.

Nous ne reviendrons pas ici dans le détail de l'optimisation du processus de prélèvement / rejet des eaux qui est exposé aux pages 18 et 19 de ce document.

Notons une différence importante suivant que l'on commence l'extraction par la couche du gisement inférieur (figure b, page 18) ou supérieur (figure c, page 19).

On imagine facilement le cas où l'extraction du gisement supérieur se fait en premier lieu. On élimine la couche entre 260 m et 310 m, sans modifier le gisement inférieur.

Sur le plan de l'évolution de la situation du risque, on élimine tout risque entre 260 et 310 m, et donc la zone proche de 270 m est sécurisée. Par contre au niveau de la profondeur 310 le niveau de risque reste inchangé.

Dans le cas par contre où l'on commence par l'extraction du gisement inférieur, c'est toute la couche entre 260 m et le point de prélèvement (le fond du lac par exemple) qui disparaît progressivement. Dans ce cas de figure, toutes les couches au dessus du point de prélèvement subissent une subsidence au cours de l'exploitation. En particulier les zones autour de 270 m et de 310 m descendent conjointement et évoluent vers une situation plus sécurisée.

Il est clair que, sur le plan de l'évolution vers une situation plus sûre du lac, la méthode de prélèvement du gisement inférieur en premier lieu présente un avantage indiscutable.

Structure du lac après dégazage total (dans un lointain futur)

Si on se reporte à la figure d, page 19, la structure finale du lac se décompose en trois parties : jusqu'à la profondeur de 190 m, la biozone et la couche intermédiaire qui sont restées inchangées et le reste du lac, entre 190 m et le fond, qui est constitué par un mélange des eaux de rejet dégazées avec le volume d'eau constituant initialement la PRZ. Dans l'état actuel du lac (figure a, page 18) le gradient principal situé à 260 m de profondeur et d'une amplitude de $1,4 \text{ kg/m}^3$ constitue le « piège » à méthane.

Dans l'état final (figure d, page 19), on a un nouveau gradient, sensiblement de même amplitude ($1,4 \text{ kg/m}^3$) mais situé à 190 m, soit 70 m plus haut que dans l'état actuel. On peut tout à fait prévoir que ce nouveau gradient constituera encore un piège à méthane. Dans les siècles (millénaires ?) à venir, il est possible que la concentration de méthane à 190 m atteigne des niveaux tels qu'une nouvelle exploitation soit envisageable, dont la capacité d'extraction équilibrerait le taux de recharge du lac en gaz. A 190 m de profondeur, la concentration de saturation du méthane est de $0,57 \text{ L}_{\text{méthane}}/\text{L}_{\text{eau}}$: avec une telle teneur en gaz, l'extraction du méthane serait donc particulièrement facile.

Sensibilité de la résistance des gradients à l'extraction du gaz

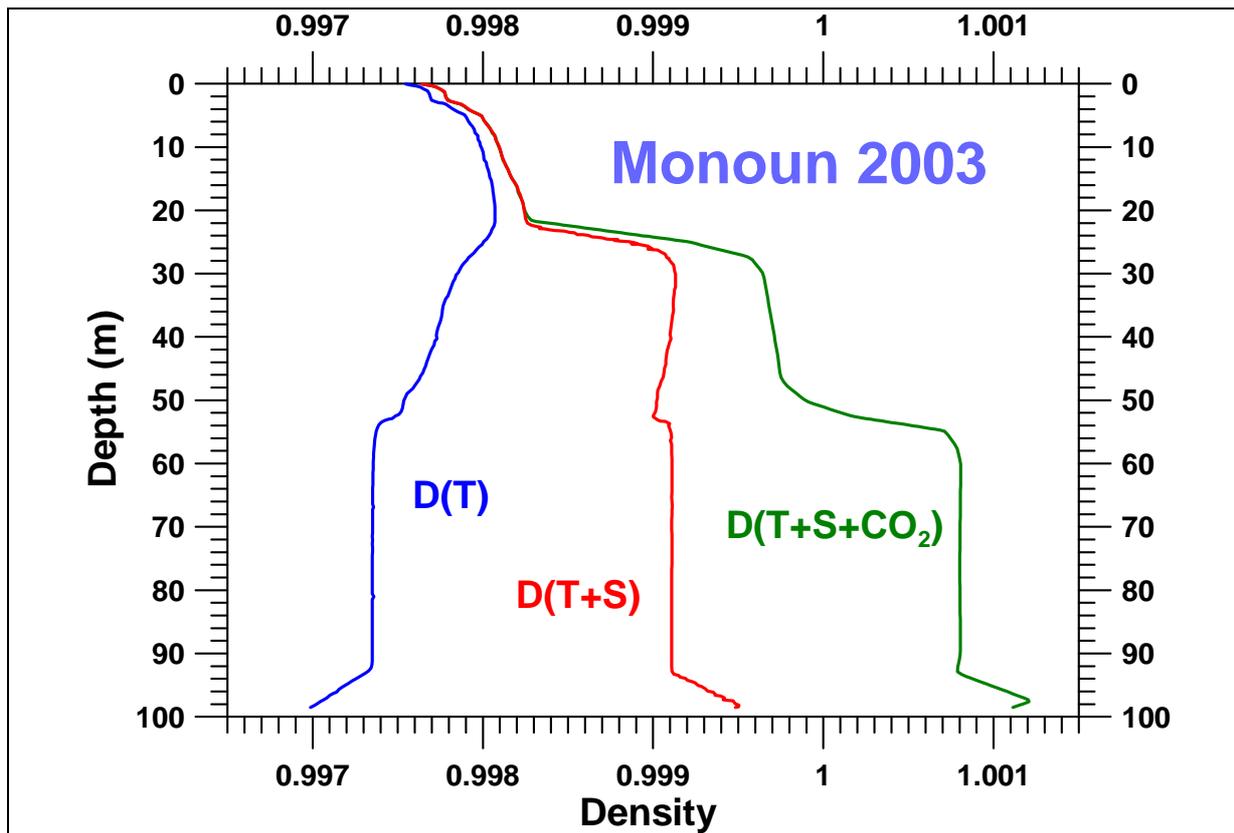
Une discussion importante et dont l'issue n'était pas évidente concerne la possibilité de dé-stratification d'un gradient lorsque l'on prélève de l'eau en dessous du gradient et qu'on la rejette au dessus. C'est une question qui s'était posée lors du dégazage du lac Monoun dont la structure est assez semblable à celle du lac Kivu.

Avant le dégazage de Monoun, en 2003, on constatait clairement la présence d'un gradient de densité à 25 m de profondeur causé par la présence d'une forte teneur en sel, suivi d'un second gradient à 55 m de profondeur causé par l'apparition du dioxyde de carbone dissous. Durant les opérations de dégazage (2003 – 2008), l'eau était prélevée au fond du lac et rejetée en surface. La subsidence des couches du lac a été suivie au moyen du paramètre conductivité.

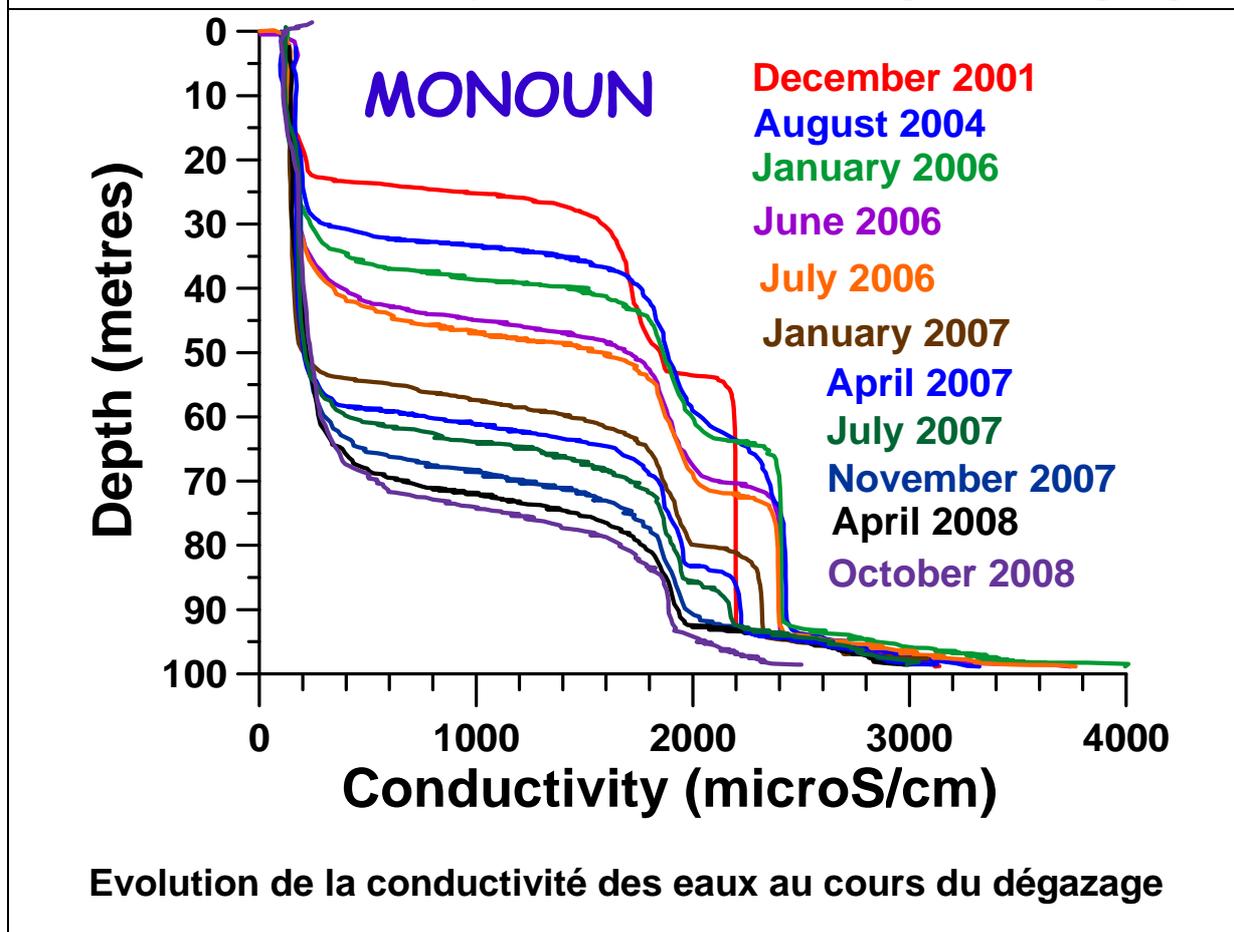
On constate sur les courbes présentées page suivante que ces courbes de conductivité ont subi une subsidence générale, sans se déformer, et sans qu'apparaisse le moindre phénomène de dé-stratification. Les deux gradients ont subi une descente en profondeur, tout en restant parfaitement individualisés, jusqu'au moment où le gradient causé par la présence de gaz dissout a disparu en fin de dégazage (entre juillet et novembre 2007).

Le dégazage du lac Nyos a débuté avec la mise en place d'une colonne en 2001. En Mars 2011, nous avons rajouté deux colonnes supplémentaires d'un diamètre supérieur, multipliant par un facteur 8 l'efficacité du dégazage par rapport à la colonne de 2001. Nous avons fait sensiblement les mêmes observations qu'au lac Monoun concernant la subsidence du gradient de densité qui existait à 185 m de profondeur et qui s'est simplement déplacé (avec néanmoins une légère dé-stratification) vers le bas (avant sa disparition en 2007).

Nous sommes donc rassurés par ces résultats de terrain quant à la robustesse de la tenue des gradients de densité et à leur pérennité durant l'extraction.



Densité en fonction de la température, salinité, teneur en gaz avant dégazage



Evolution de la conductivité des eaux au cours du dégazage

Les études menées par l'EAWAG ont montré que les gradients de densité correspondaient à l'existence de sources qui alimentent le lac (apports advectifs provenant de la côte nord du lac constituées par le barrage volcanique des Virunga).

Sans entrer dans les détails, l'apport total de ces sources a été estimé (Wuëst, 2011) à 1,3 km³/an (la rivière Ruzizi seul émissaire du lac présente un débit de l'ordre de 3,2 km³/an). D'après un modèle réalisé par l'EAWAG, le flux d'eau provenant des sources situées à 260 m de profondeur s'élève à 0,47 km³/an alors que les sources situées à 190 m de profondeur alimentent le lac par un débit de 0,69 km³/an.

Suivant le procédé d'exploitation que nous proposons, le gradient principal devrait subir une subsidence dont la vitesse sera fonction du débit d'eau prélevé dans la ressource. Il est difficile de prévoir quel sera l'influence des apports d'eaux advectifs sur la subsidence du gradient principal. Sur une surface de 1000 km², la couche d'eau produite chaque année par les sources advectives atteint une épaisseur non négligeable de l'ordre de 50 cm. La profondeur et l'allure générale du gradient principal devra être suivi expérimentalement.

Nous pensons néanmoins, sans certitude absolue, que les eaux de source devraient couler le long de la côte et s'étaler sur le gradient principal en se diluant. Nous ne pensons pas que la stratification du gradient principal devrait être modifiée notablement par cet apport d'eau.

Obstacles à l'application du rejet des eaux préconisée dans les MPs

Le principe du rejet des eaux dégazées recommandé dans les MPs repose sur l'hypothèse qu'il est possible - en choisissant une zone de gradient de densité et en utilisant un dispositif d'éjection sophistiqué (ce qui n'est par ailleurs que très sommairement évoqué dans les MPs) - de constituer une couche dégazée, distincte des eaux environnantes chargées en méthane dissous, et qui s'étalerait sur toute la superficie du lac à la profondeur du rejet. Cette hypothèse nous semble irréaliste. La superficie du lac, aux profondeurs évoquées dans les MPs, est de l'ordre de 1000 km². Cela signifie qu'une couche d'eau individualisée pourrait s'étendre sur des distances atteignant 18 km sans qu'un processus de diffusion n'agisse pour mélanger cette couche avec l'eau environnante. Et quand bien même cette couche serait considérée comme déjà formée, il est bien évident que le processus de diffusion dans le temps la ferait se mélanger à terme avec son entourage et perdre son individualité.

On parle dans les MPs d'un éjecteur permettant d'obtenir un régime d'écoulement laminaire des eaux rejetées. Tout écoulement, au départ laminaire, finit par devenir turbulent. De plus, il faut tenir compte des oscillations mécaniques qui se produisent dans les profondeurs des lacs après les coups de vents. Ce phénomène appelé seiches (ou internal waves) peut avoir des amplitudes considérables. Dans le cas du lac Kivu, la figure suivante donne une représentation schématique du mécanisme de seiches et des mesures expérimentales ont révélé des oscillations verticales d'amplitude de 2 à 3 m à une profondeur de 320 m. Ce phénomène, à lui tout seul suffirait à effectuer un mélange des eaux rejetées, quel que soit le type d'éjecteur utilisé.

Un problème supplémentaire peut provenir de l'existence de ces seiches. Les MPs supposent que la densité de l'eau dégazée rejetée soit égale à la densité des eaux du point de rejet. Pour que cette eau rejetée ait une chance de former une couche individualisée, il est essentiel que le point de rejet soit situé dans une zone de gradient de densité le plus prononcé possible. Il y a contradiction entre la nécessité de rejeter l'eau de rejet dans une zone de fort gradient et la nécessité de préserver l'intégrité de ce gradient. En effet, le phénomène de seiches ayant une amplitude de l'ordre de 4 m, le point de rejet de l'eau

dégazée se déplacera verticalement de cette hauteur, et ce, dans une zone de gradient de densité aussi important que possible, donc située déjà soit dans le gradient principal (plan A1 et plan B des MPs), soit dans le gradient secondaire (plan A2). Les eaux de rejet étant distribuées sur une hauteur de 4 m dans les zones de gradient vont certainement provoquer la dé-stratification de ce gradient (ou tout au moins endommager son intégrité).

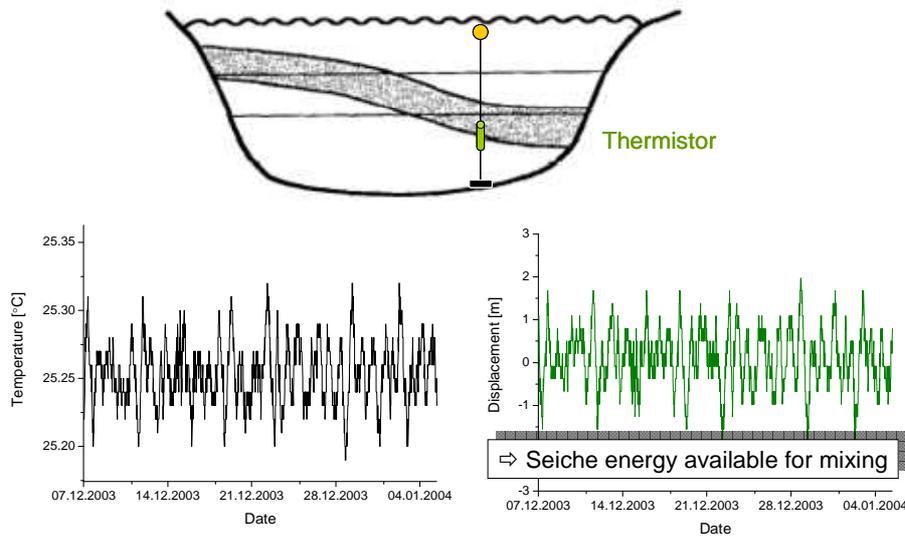
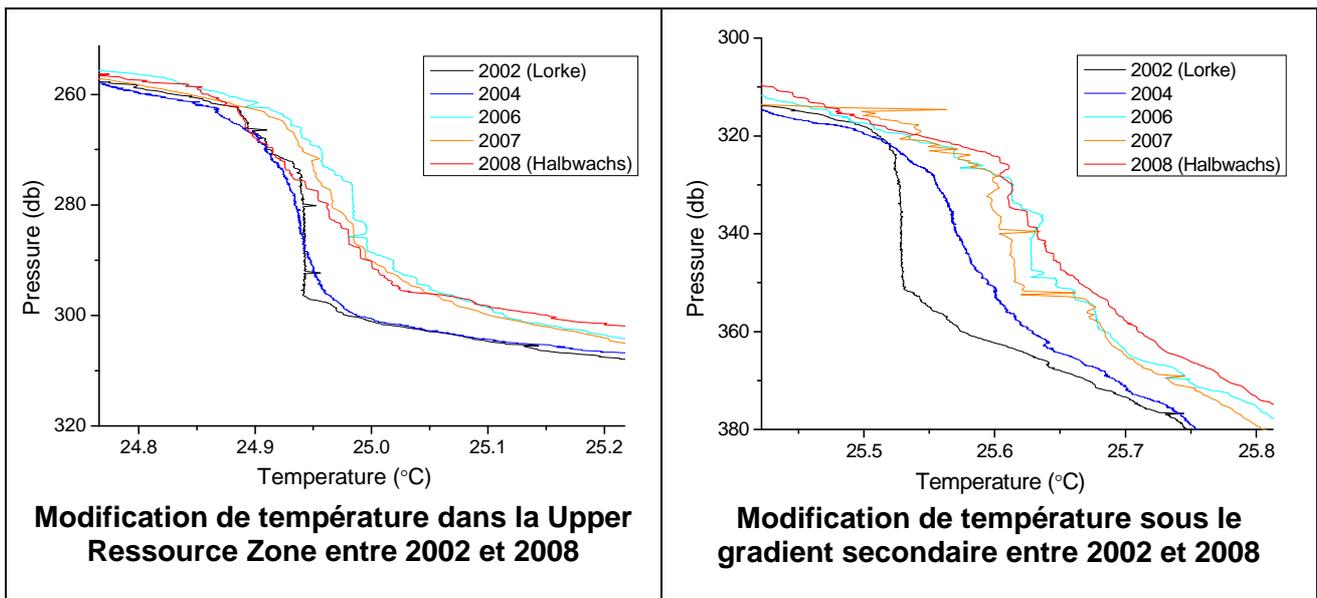


Schéma du mécanisme de seiches dans le lac Kivu fourni par l'EAWAG

Enfin, on notera que des variations se produisent dans les paramètres physiques des couches concernées par les rejets proposées par les MPs. Ces variations interviennent à des échelles de temps qui sont réduites (quelques années) et on imagine difficilement comment un ajustement des densités des eaux rejetées qui nécessite une précision de l'ordre de 10^{-4} dans les mesures va être capable de suivre de telles variations dans le temps. On peut même imaginer, au vu de l'évolution temporelle rapide qui intervient dans les couches de part et d'autre du gradient secondaire, que ce gradient soit un jour amené à disparaître naturellement.



Variation de la stratification dans le temps (Martin Schmid, EAWAG, communication personnelle) : les couches mixtes de Lorke (2002) ont disparu, les températures ont augmenté de manière significative entre 2002 et 2006 à des profondeurs de 270 à 300 m et 320 à 370 m.

5 – Notion de rendement énergétique du gisement

L'objectif de l'extraction du gaz méthane du lac Kivu consiste à exploiter le maximum de l'énergie latente qui est contenue dans la ressource. Il est donc bien évident que le procédé d'extraction doit être optimisé suivant des critères de rendement économique pour l'exploitation.

On ne parlera pas ici du rendement correspondant à la transformation de l'énergie thermique fournie par la combustion du mélange gazeux dans les moteurs des groupes électrogènes pour délivrer de l'énergie électrique disponible sur le réseau.

Pour donner une explication simple du bilan énergétique d'une station d'extraction de méthane de la ressource on distinguera les éléments suivants :

- la puissance électrique produite par la station ; appelons α cette puissance,
- la puissance électrique consommée par la station (notamment pour assurer le fonctionnement de pompes ou de compresseurs) ; soit β cette puissance.

La puissance électrique délivrée sur le réseau sera $\alpha - \beta$

On peut déjà estimer un terme de rendement électrique en divisant la puissance délivrée sur le réseau par la puissance produite par la station.

Le terme de rendement électrique s'écrit : $\eta_{\text{électrique}} = (\alpha - \beta) / \alpha$

Concernant les termes d'énergie transportée par le méthane, on choisira par commodité une unité commune qui sera le flux volumique de méthane pur (à 0°C et sous une atmosphère si le méthane est sous forme gazeuse).

- l'énergie reçue par la station provient du méthane dissout dans l'eau de la ressource. Le débit de méthane prélevé par la station est égal au produit du débit liquide circulant dans la colonne d'extraction multiplié par la concentration en méthane de l'eau prélevée. Appelons ε le débit de méthane dans la colonne.
- l'énergie perdue par la station se décompose en deux parties :
 - débit de méthane renvoyé dans les eaux de rejet du séparateur ; appelons γ ce débit,
 - débit de méthane renvoyé dans les eaux de lavage lors de l'enrichissement du gaz ; appelons δ ce débit.

Le débit total de méthane perdu est donc égal à $(\gamma + \delta)$.

Bien entendu, le débit de méthane gazeux disponible à la sortie de la station est égal au débit de méthane reçu moins le débit de méthane perdu (lors de la séparation et du lavage), soit λ ce débit : $\lambda = \varepsilon - (\gamma + \delta)$

Le rendement de la station en termes de récupération de méthane peut s'exprimer simplement en divisant le débit de méthane disponible en sortie par le débit de méthane reçu par la station.

Soit $\eta_{\text{méthane}} = \lambda / \varepsilon$

La même expression faisant intervenir les pertes γ et δ :

$$\eta_{\text{méthane}} = 1 - (\gamma + \delta) / \epsilon$$

L'expression du rendement total de la station (faisant intervenir le rendement électrique, hors rendement des groupes de production d'électricité) devient :

$$\eta_{\text{total}} = [(\alpha - \beta) / \alpha] \times [1 - (\gamma + \delta) / \epsilon]$$

Exemple de divers rendements énergétiques en fonction de la technologie utilisée

Nous présentons ci-dessous les rendements énergétiques de quatre stations imaginaires (mais plausibles).

On supposera le prélèvement exécuté dans la LRZ et la séparation faite à 20 m de profondeur. On supposera que l'on souhaite produire du gaz à 65 % de richesse en méthane

i) Station idéale

Elle ne consomme pas d'électricité : $\beta = 0$; rendement électrique = 1

Elle rejette 7 % du débit ϵ de méthane au niveau du séparateur (équilibre gaz-liquide à 20 m) : $\gamma = 0.07 \epsilon$;

Elle produit un mélange gazeux de richesse 65% en méthane ; dans ces conditions, les codes de calculs prévoient une perte au lavage de 6 % du débit de méthane prélevé : $\delta = 0.06 \epsilon$;

L'application de la formule encadré ci-dessus conduit à : $\eta_{\text{total}} = 0.87$

Rendement énergétique : 87 %

ii) Station réaliste de bonne conception

Elle consomme 1 % d'électricité : $\beta = 0,01 \alpha$; rendement électrique = 0.99

Elle rejette 13 % du débit ϵ de méthane au niveau du séparateur : $\gamma = 0.13 \epsilon$;

La perte au lavage est toujours de 6 % du débit de méthane prélevé : $\delta = 0.06 \epsilon$;

L'application de la formule encadré ci-dessus conduit à : $\eta_{\text{total}} = 0.80$

Rendement énergétique : 80 %

iii) Station réaliste de moyenne conception

Elle consomme 15 % d'électricité : $\beta = 0,15 \alpha$; rendement électrique = 0.85

Elle rejette 35 % du débit ϵ de méthane au niveau du séparateur : $\gamma = 0.35 \epsilon$;

La perte au lavage est toujours de 6 % du débit de méthane prélevé : $\delta = 0.06 \epsilon$;

L'application de la formule encadré ci-dessus conduit à : $\eta_{\text{total}} = 0.50$

Rendement énergétique de 50 %

iv) Station réaliste de mauvaise conception

Elle consomme 25 % d'électricité : $\beta = 0,25 \alpha$; rendement électrique = 0.75

Elle rejette 60 % du débit ϵ de méthane au niveau du séparateur : $\gamma = 0.6 \epsilon$;

La perte au lavage est toujours de 6 % du débit de méthane prélevé : $\delta = 0.06 \epsilon$;

L'application de la formule encadré ci-dessus conduit à : $\eta_{\text{total}} = 0.255$

Rendement énergétique : 25.5 %

RECAPITULATIF	η idéal	Bon η	Moyen η	Mauvais η
% perte électrique = β / α	0 %	1 %	15 %	25 %
$\eta_{\text{électricité}} = (\alpha - \beta) / \alpha$	100 %	99 %	85 %	75 %
% perte méthane séparateur = γ / ε	7 %	13 %	35 %	60 %
% perte méthane laveur = δ / ε	6 %	6 %	6 %	6 %
% perte méthane = $\gamma / \varepsilon + \delta / \varepsilon$	13 %	19 %	41 %	66 %
$\eta_{\text{méthane}} = 1 - (\gamma + \delta) / \varepsilon$	87 %	81 %	59 %	34 %
$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{élec}} \times \eta_{\text{méthane}}$	87 %	80 %	50 %	25.5 %

Ces considérations générales résumées dans ce tableau peuvent conduire à une conclusion (à laquelle on pouvait logiquement s'attendre) : une station utilisant un procédé facile à mettre au point conduira probablement à un rendement faible ; une station aboutissant à un rendement élevé sera difficile à concevoir.

6 – Proposition d'exploitation de la PRZ (voire de l'IRZ)

Dans ce paragraphe, on va encore simplifier la structure du lac Kivu. Concernant l'extraction du méthane, les eaux du lac peuvent être schématiquement séparées en deux parties :

- une partie appelée ressource, située entre 260 m et le fond du lac, qui contient une forte concentration en gaz dissous,
- une partie appelée ressource potentielle, située entre 60 m et 260 m, qui contient une faible concentration en gaz dissous.

Chaque couche est caractérisée par deux paramètres, l'un quantitatif, l'autre qualitatif.

- le paramètre quantitatif est bien entendu représenté par la quantité totale de méthane contenue dans la couche considérée,
- le paramètre qualitatif représente la capacité de la couche considérée pour activer le processus d'auto-siphon.

On montre que c'est essentiellement la concentration en méthane qui conditionne l'efficacité de l'auto-siphon, et par voie de conséquence, le débit de gaz extrait. En fait, c'est le méthane, qui va provoquer l'ex-solution dans la colonne de liquide à cause de sa faible solubilité dans l'eau. Le rôle du CO₂ dans ce mécanisme est relativement secondaire.

Le dispositif d'extraction du méthane que nous proposons utilise le procédé d'exsolution naturelle appelé auto siphon décrit plus haut qui, une fois le processus amorcé, ne nécessite aucune énergie extérieure.

L'énergie utilisée provient de la formation d'une phase gazeuse au-dessus de la profondeur de saturation du liquide. Le mélange diphasique liquide-gaz, du fait de sa densité plus faible que le liquide, développe dès lors une énergie archimédienne qui entraîne naturellement l'ensemble de la colonne liquide vers le haut.

Ce procédé d'auto siphon est directement applicable dans la zone de la ressource, l'exsolution permettant de développer une énergie supérieure à celle nécessaire pour amorcer le mécanisme d'auto-siphon,

Le procédé d'auto siphon n'est pas applicable dans la zone de la ressource potentielle, l'énergie développée étant insuffisante pour activer le processus d'auto siphon.

Notre proposition consiste à utiliser l'énergie excédentaire d'un dispositif d'extraction situé dans la zone de la ressource pour suppléer au manque d'énergie nécessaire pour activer le processus d'auto siphon dans la zone de ressource potentielle.

Il est donc proposé d'effectuer un mélange des eaux riches en gaz dissous provenant de la ressource avec des eaux pauvres en gaz dissous provenant de la ressource potentielle. Le mélange de ces deux types d'eau devra être ajusté dans des proportions telles qu'il puisse activer le processus d'auto siphon de manière économiquement rentable.

Un tel mélange est possible à effectuer, toujours sans utilisation d'énergie externe, en jouant simplement sur l'ouverture d'une (ou plusieurs) vanne latérale disposée sur la colonne d'extraction.

Supposons une colonne amorcée de telle façon que son embouchure soit située dans la zone ressource. Du fait de la perte de charge créée par les forces de frottement, le liquide qui circule dans la colonne est en dépression par rapport au liquide extérieure qui est à la pression hydrostatique. Supposons que l'on place une vanne latérale à ouverture réglable, sur la colonne, à une profondeur située dans la zone de ressource potentielle. L'ouverture de cette vanne latérale va entraîner, du fait de la dépression existant dans la colonne, une

aspiration d'eau latérale provenant de la zone de la ressource potentielle. L'ajustement du coefficient de perte de charge de la vanne latérale par ouverture variable va permettre de régler le rapport du flux latéral au flux principal de liquide, rapport que l'on appellera dilution. Il reste à choisir le rapport de dilution de telle manière que le liquide résultant du mélange des eaux principales (provenant de la ressource) et latérales (provenant de la ressource potentielle) soit optimal par rapport au débit de gaz en sortie de colonne souhaité.

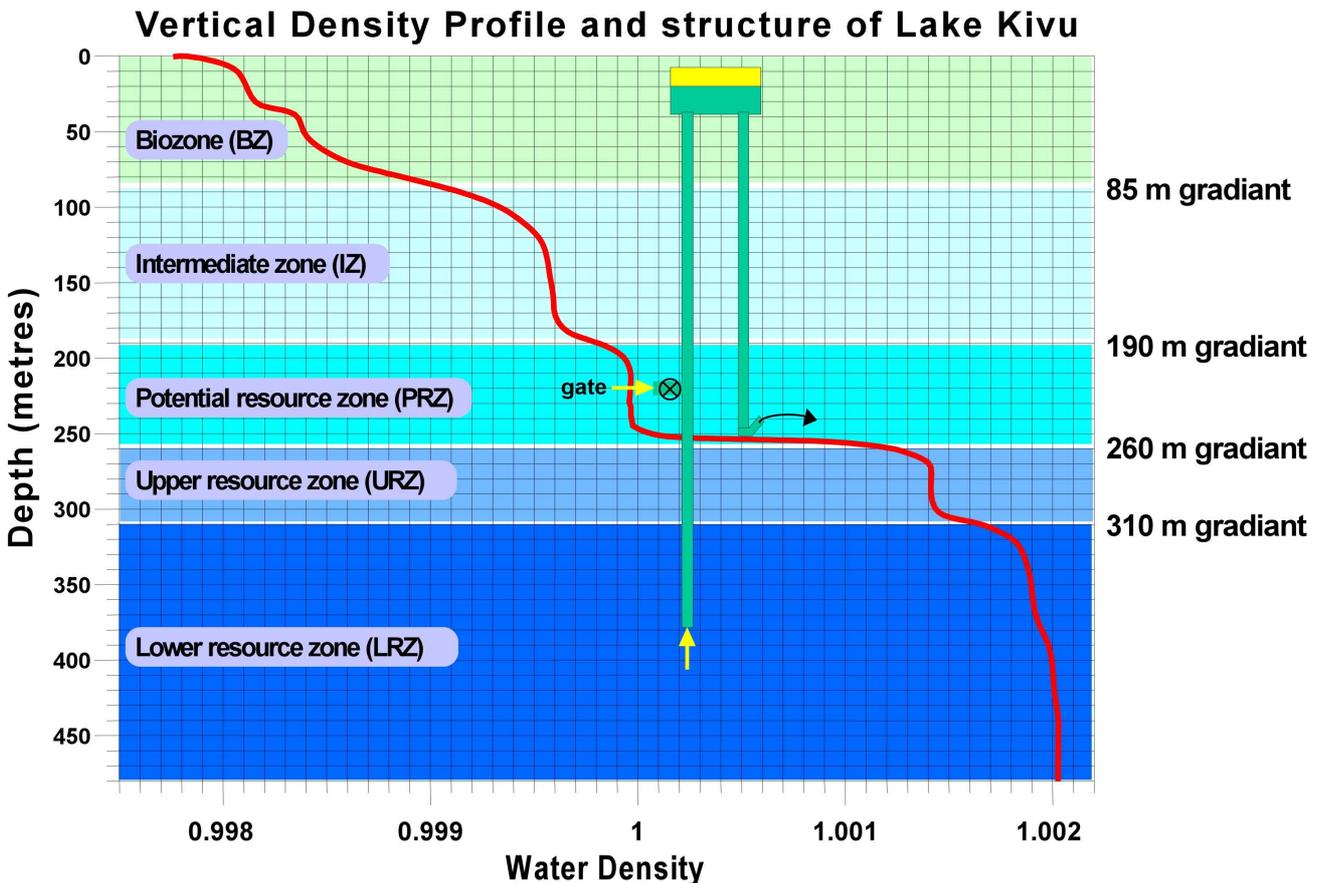


Schéma du procédé d'extraction permettant de valoriser la ressource potentielle

En résumé, si on considère une colonne fonctionnant normalement dans la zone ressource :

- i) On profite de la dépression existant dans la colonne d'extraction pour faire entrer un flux d'eau latérale provenant de la zone de ressource potentielle, le débit de ce flux étant réglé au moyen d'une vanne à perte de charge ajustable ;
- ii) on ajuste le rapport de dilution de manière à obtenir un mélange dont la richesse en gaz dissous permettra un fonctionnement optimal du dispositif d'auto siphon.

Suivant une autre formulation basée sur des considérations énergétiques, on prélève, sur un dispositif d'extraction fonctionnant dans la ressource, une partie excédentaire de l'énergie pour provoquer un débit réglable d'eau aspirée dans la ressource potentielle de telle manière que le mélange ainsi réalisé puisse activer l'auto siphon dans des conditions optimales.

Une simulation montre qu'un tel procédé permet d'extraire et de valoriser – en théorie - la totalité du gaz dissous dans la ressource potentielle, gaz qui était jusqu'à présent considéré comme perdu.

Inconvénients : la dilution de l'eau provenant de la ressource par l'eau provenant de la ressource potentielle résulte en une eau de mélange qui sera moins efficace pour l'activation du processus d'auto siphon. Il faudra donc prévoir, dans le cas de l'application de ce dispositif permettant d'extraire la ressource potentielle, d'augmenter les dimensions de la colonne, du séparateur et du conduit de rejet des eaux dégazées pour obtenir un débit identique de méthane. Ces modifications ont un coût qu'il faudra prendre en compte dans le bilan économique du projet.

Notons que la zone de la ressource contient 46 km³ tpn (à 0°C et sous une atmosphère) de méthane et que la ressource potentielle en contient 20 km³. Le procédé proposé permet donc théoriquement de multiplier par un facteur proche de 1,4 la capacité d'exploitation des potentialités énergétiques renfermées dans les eaux du lac Kivu. En pratique, nous espérons qu'il sera possible de multiplier par 1,28 la capacité contenue dans la ressource *stricto sensu*.

Sur un plan quantitatif, comme on le verra dans l'annexe 2, notons que la zone de la ressource contient 70 % du gaz dissout dans le lac. Le procédé proposé permet d'exploiter 89 % des potentialités énergétiques renfermées dans les eaux du lac Kivu

Dans la stratégie de dégazage du lac Kivu, il est important de garder à l'esprit le fait que chaque couche individuelle homogène appartenant à la ressource possède deux caractéristiques quant à sa valeur énergétique :

- i) **sa capacité en méthane dissout,**
- ii) **sa capacité d'entraîner - par le processus d'autosiphon - de l'eau provenant des zones de la ressource potentielle et permettant ainsi de valoriser le méthane contenu dans ces zones.**

En résumé, jusqu'à présent, il était admis que près d'un tiers de la capacité totale de méthane contenu dans le lac Kivu était considéré comme impossible à extraire (zone de la ressource potentielle). Notre proposition montre que, moyennant l'application d'un procédé financièrement plus coûteux, l'extraction du 89 % du méthane contenu dans la totalité du lac ne présente aucune difficulté technique.

7 - Textes réglementaires

Règles fondamentales

RF1 – Le rejet dans la Biozone (BZ) des eaux dégazées issues du séparateur est interdit.

RF2 – Le rejet dans la Zone Intermédiaire (ZI) des eaux dégazées issues du séparateur est interdit.

RF3 – Le rejet dans la ressource (URZ et LRZ) des eaux dégazées issues du séparateur est interdit.

RF4 – **Le rendement énergétique total de la station tel qu'il est décrit au paragraphe 5 de ce document doit dépasser 80 %.**

Le rendement énergétique total η_{total} est défini comme le produit du rendement électrique $\eta_{\text{électrique}}$ par le rendement en méthane $\eta_{\text{méthane}}$:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{électrique}} \times \eta_{\text{méthane}}$$

On rappelle que le rendement électrique est défini par la relation :

$$\eta_{\text{électrique}} = (\alpha - \beta) / \alpha$$

α étant la puissance électrique produite par la station

β étant la puissance électrique consommée par la station

Le rendement de la station en termes de récupération de méthane peut s'exprimer en divisant le débit de méthane disponible en sortie λ (fournie à la centrale électrique) par le débit de méthane reçu par la station ε .

$$\eta_{\text{méthane}} = \lambda / \varepsilon$$

Concernant les termes d'énergie transportée par le méthane ε et λ , on choisira par commodité une unité commune qui sera le flux volumique de méthane pur (à 0°C et sous une atmosphère si le méthane est sous forme gazeuse).

La définition détaillée des expressions ci-dessus peut être obtenue au paragraphe 5.

Annexe 1 – Rendement énergétique (cf. paragraphe 5)

Estimation pratique du rendement énergétique

Rendement électrique : les puissances électriques délivrées et consommées α et β sont fournies par le gestionnaire de la centrale électrique.

Le rendement en méthane peut être obtenu expérimentalement par deux approches différentes.

Le débit de méthane ϵ circulant dans la colonne peut être calculé à partir du débit liquide dans la colonne et de la concentration en méthane dissous (qui est précisément connue en fonction de la profondeur de prélèvement de l'eau).

La mesure du débit de méthane en sortie de la station λ sera bien entendu prévue dans l'instrumentation de la station (avec correction de l'effet de la température et de la pression).

On pourra ainsi obtenir le rendement en méthane de manière globale en divisant le débit de sortie par le débit d'entrée ($\eta_{\text{méthane}} = \lambda / \epsilon$)

Nous pensons qu'il est important d'obtenir également ce rendement en mesurant séparément les pertes de méthane au niveau du séparateur et du laveur. D'une part, l'évaluation des pertes permettra de confirmer (de manière redondante) et de préciser le rendement en méthane obtenu par la méthode globale. D'autre part, la mesure des coefficients γ et δ fournira des informations importantes sur le fonctionnement de la station et permettra éventuellement de détecter certaines anomalies et d'y remédier.

Perte dans la colonne de lavage (terme δ)

Le cas du laveur est un peu particulier dans le sens où la perte de méthane sera fonction de la richesse en méthane du gaz que l'on souhaite obtenir en sortie de la station.

D'une manière générale, le fait de chercher à augmenter la richesse en méthane de sortie du gaz se traduira par une augmentation de la perte en méthane dans les eaux de lavage. Le fait de faire le choix de délivrer un mélange gazeux à 65 % ou à 80 % de richesse en méthane fera varier nettement la perte en méthane à ce niveau (cette perte sera probablement doublée dans le cas où l'on cherche une richesse du mélange gazeux à 80 ou 85 % par rapport au cas où on se satisfait d'une richesse de 65 % en méthane).

Pour estimer la perte dans le laveur, il faudra connaître le débit d'eau de lavage et la concentration en méthane dissous dans l'eau de rejet. La colonne de lavage devra donc être équipée de capteurs de débit liquide et de concentration en méthane dissous.

On pourra néanmoins noter qu'il est possible d'obtenir une bonne estimation de cette perte de méthane en utilisant des codes de calculs existant pour les colonnes de lavage moyennant certaines hypothèses sur les écarts à l'équilibre liquide - gaz.

Perte dans la colonne de séparateur (terme γ)

Le cas de l'estimation de la perte de méthane au niveau du séparateur constitue le point fondamental et le plus délicat à réaliser. Bien entendu on connaît le flux liquide qui est le même que celui de la colonne, mais on est dans une incertitude absolue concernant la teneur en méthane dans les eaux de rejet.

Il est en effet pratiquement impossible d'estimer par les moyens de calculs quelle sera la proportion de méthane qui sera libérée à l'état gazeux et celle qui restera dissoute dans les eaux de rejet. Il faudrait pour cela faire appel à des codes d'écoulements diphasiques

qui feraient intervenir la typologie de l'écoulement, la taille des bulles, les cinétiques de mise à l'équilibre des phases liquides et gazeuses, etc...

Dans ce cas précis, la détermination expérimentale de la concentration en méthane dissous dans les eaux de rejet devient donc un impératif absolu.

A notre avis, c'est ce paramètre de perte de méthane dans le séparateur qui constitue le facteur le plus difficile à quantifier dans l'estimation du rendement énergétique global d'une station d'extraction.

C'est aussi ce paramètre qui est susceptible de pénaliser de la manière la plus lourde le rendement énergétique de la station.

Selon notre expérience sur des colonnes de dimension semi industrielle, ce terme peut en effet varier dans des proportions considérables en fonction de la technologie d'extraction utilisée, passant par exemple d'un facteur γ de 0,1 ϵ à 0,6 ϵ (10% de méthane à 60% de méthane dans les eaux de rejet), et ce pour une même profondeur de prélèvement et une même profondeur du séparateur. On mesure ainsi le gaspillage possible du méthane à ce stade.

Exemple d'une station d'extraction de méthane simplifiée à l'extrême (à très faible rendement)

Le procédé d'extraction de méthane le plus simple à mettre en œuvre peut être décrit ci-dessous.

On provoque dans la colonne d'extraction une puissante énergie motrice par la méthode de gas-lift (en injectant soit de l'air, soit du gaz prélevé dans le séparateur ou après lavage). Le débit d'eau entraîné augmente avec le débit du gas-lift. On peut ainsi recueillir un important débit de méthane gazeux libéré dans le séparateur.

Ce procédé n'est pas interdit par les MPs. En fait il n'est pas mentionné et n'a semble-t-il pas été prévu par le comité d'expert.

Il en résulte bien évidemment deux types de conséquences graves.

Premier constat évident : il est nécessaire de consommer de la puissance électrique au niveau du compresseur qui activera le gas-lift.

Second constat qui est plus pernicieux parce que invisible : l'eau de rejet du séparateur contiendra une importante concentration de méthane resté en solution ; plus le débit de gas-lift est important, plus la vitesse de l'eau augmente et plus on s'écarte des conditions d'équilibre dans l'écoulement diphasique, donc plus les eaux de rejet contiendront de méthane resté hors équilibre. Nous avons pu mettre en évidence cette tendance lors d'essais sur site.

Un exemple réaliste simplifié

1/3 de la puissance électrique produite par la station est consommée par l'activation du gaz lift,

2/3 du méthane circulant dans la colonne reste en solution dans les eaux de rejet (on néglige les pertes au lavage).

Le rendement global d'un tel dispositif sera égal à $(2/3) \times (1/3) = 2/9$ soit un rendement de 22 %. C'est sensiblement l'exemple d'une station de mauvais rendement présenté dans le tableau présenté page 29 dans le paragraphe 5. Ce type de fonctionnement paraît de toute évidence inacceptable en ce qu'il conduit à un gaspillage considérable de la ressource.

Annexe 2 – Solution proposée d’extraction de la PRZ : essai de chiffrage du gain énergétique

Dans ce paragraphe, nous ne prétendons pas donner une estimation exacte des capacités énergétiques potentielles des couches constituant la structure du lac. Pour cela, il serait nécessaire d’avoir une connaissance expérimentale précise du profil vertical de concentration en méthane dans le lac. Nous ne prenons pas non plus en compte le taux annuel de recharge. Il s’agit surtout d’évaluer un ordre de grandeur des capacités utilisables de méthane :

- dans le cas où la technique d’extraction est limitée à la zone de ressource
- dans le cas où on choisi la technique évoquée au paragraphe 6 d’extraction simultanée de la zone de ressource et de la zone de ressource potentielle PRZ.

Le tableau ci-dessous présente une estimation de la capacité de méthane renfermée dans chaque couche.

	Profondeur (m)	Volume d’eau* (km ³)	Volume de méthane (km ³)
IRZ**	60 – 160 m	176	7
PRZ**	160 – 260 m	138	13
URZ	260 – 310 m	49	16
LRZ	310 – 485 m	74	30
Total		426	66

* les volumes d’eau ont été obtenus à partir d’une courbe hypsométrique précise du lac (surface en fonction de la profondeur). Cette courbe a été extraite à partir d’un fichier numérique 3D (Lahmeyer et Osae) 3D de maillage x,y,z : 5 m x 5 m x 5 m.

** L’IRZ est limitée à 60 – 160 m ; la PRZ a été étendue de 190 – 260 m à 160 – 260 m.

On notera que, dans notre estimation, on extrait 13 km³ sur les 20 km³ de méthane contenus entre 60 et 260 m : les 7 km³ restant, soit 10 % de la totalité du méthane du lac, n’étant pas exploités.

Les autres hypothèses choisies pour notre évaluation sont détaillées ci-dessous. :

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du méthane est pris égal à 36 MJ/m³,

Le rendement de l’extraction tel que défini au paragraphe 5 est supposé égal à 85 % (on fera aussi une estimation avec un rendement de 75 %).

On table sur une durée d’exploitation totale du gaz étalée sur 50 ans.

Enfin, on suppose que le rendement de la centrale électrique (rapport de la puissance électrique fournie à la puissance thermique reçue, cf. paragraphe 5) est égal à 38%.

On va estimer ci-dessous pour différents cas de figure la puissance électrique disponible.

Cas limite idéal : exploitation de la totalité du méthane contenu dans le lac

Volume de méthane disponible : 66 km³

Energie thermique correspondante : $66 \cdot 10^9 \times 36 = 2,38 \cdot 10^{12}$ MJ

Energie disponible par an : $2,38 \cdot 10^{12}$ MJ / 50 ans = $47,5 \cdot 10^9$ MJ/an

Energie disponible à la sortie de la centrale d’extraction : $47,5 \cdot 10^9 \times 0,85 = 40 \cdot 10^9$ MJ/an

Puissance thermique délivrée aux groupes électrogènes : $40 \cdot 10^9 / 365 / 24 / 3600 = 1281$ MW_{th}

Puissance délivrée sur le réseau par la centrale électrique : $1281 \times 0,38 = 487$ MW_{el}

Notre technologie : exploitation de la ressource (URZ + LRZ)

Volume de méthane disponible : 46 km^3

Energie thermique correspondante : $46 \cdot 10^9 \times 36 = 1,656 \cdot 10^{12} \text{ MJ}$

Energie disponible par an : $1,656 \cdot 10^{12} \text{ MJ} / 50 \text{ ans} = 33 \cdot 10^9 \text{ MJ/an}$

Energie disponible à la sortie de la centrale d'extraction : $33 \cdot 10^9 \times 0,85 = 28 \cdot 10^9 \text{ MJ/an}$

Puissance thermique délivrée aux groupes électrogènes : $28 \cdot 10^9 / 365 / 24 / 3600 = 892 \text{ MW}_{\text{th}}$

Puissance délivrée sur le réseau par la centrale électrique : $892 \times 0,38 = 339 \text{ MW}_{\text{el}}$

On exploite donc $339/487 = 69,6 \%$ de la puissance limite idéale.

Notre technologie : exploitation de la ressource et de la ressource potentielle

Volume de méthane disponible : 59 km^3

Energie thermique correspondante : $59 \cdot 10^9 \times 36 = 2,1 \cdot 10^{12} \text{ MJ}$

Energie disponible par an : $2,1 \cdot 10^{12} \text{ MJ} / 50 \text{ ans} = 42 \cdot 10^9 \text{ MJ/an}$

Energie disponible à la sortie de la centrale d'extraction : $42 \cdot 10^9 \times 0,85 = 36 \cdot 10^9 \text{ MJ/an}$

Puissance thermique délivrée aux groupes électrogènes : $36 \cdot 10^9 / 365 / 24 / 3600 = 1145 \text{ MW}_{\text{th}}$

Puissance délivrée sur le réseau par la centrale électrique : $1131 \times 0,38 = 435 \text{ MW}_{\text{el}}$

On exploite donc $430/487 = 89,3 \%$ de la puissance limite idéale.

La méthode d'exploitation de la ressource potentielle permet donc de produire durant 50 ans une puissance de $435 \text{ MW}_{\text{el}}$ au lieu de $339 \text{ MW}_{\text{el}}$, soit un gain de $96 \text{ MW}_{\text{el}}$.

La technique d'exploitation de la ressource potentielle permet de gagner 28 % de la capacité énergétique durant l'exploitation totale du méthane du lac Kivu et d'atteindre 89,4 % de la puissance limite idéale.

Considérations techniques et économiques

L'exploitation de la PRZ utilisant la dépression dans la colonne créée par la perte de charge due à la circulation de l'eau prélevée dans la ressource ne pose pas spécialement de problème technique. Les volumes d'eau dans la PRZ et dans la ressource étant proches (138 km^3 et 123 km^3), on peut effectuer une simulation supposant que le débit latéral d'eau prélevé dans la PRZ est proche du débit principal provenant de la ressource.

Bien évidemment, un tel dispositif devra être de dimension plus importante pour un débit de méthane donné.

Concernant le rejet des eaux dégazées, il faudra adopter une méthode différente de celle proposée au paragraphe 3. Au lieu de mélanger les eaux de rejet avec les eaux de la PRZ, on propose de renvoyer ces eaux, juste au dessus du gradient principal (par exemple vers 245 m, cf. figure page 31). Des calculs préliminaires ont montré que la densité des eaux de rejet se situait vers $1000,7 \text{ kg/m}^3$, proche de la moyenne entre celle de la PRZ et celle de l'URZ. On estime que, moyennant quelques précautions techniques, les eaux de rejet devraient se mélanger avec les eaux de la partie basses de la PRZ et aboutir, après un intervalle de temps important, à la formation d'une couche distincte, sans se mélanger, ni avec les eaux de la PRZ, ni avec celles de l'URZ. Concernant cette partie, il convient de se montrer prudent, de faire appel à des codes sophistiqués de mélanges liquides et en accompagnant l'exploitation d'une surveillance expérimentale rigoureuse dans la zone de rejet.

On notera enfin que le procédé proposé n'a pas d'influence sur le flux de nutriments dans la biozone. En effet, l'eau prélevée dans la ressource potentielle est rejetée dans la ressource potentielle. L'eau prélevée dans la ressource, en dessous du gradient principal, est rejetée juste en dessus du gradient principal. D'après les estimations de l'EAWAG, cette eau chargée en nutriments devrait mettre environ 350 ans pour parvenir dans la biozone.

Résumé

Cette technique d'exploitation de la PRZ doit être considérée comme une proposition d'amélioration de la méthode exposée au paragraphe 3. Elle est opérationnelle et a été validée lors de nos expériences de dégazage des lacs camerounais. Elle nécessite par contre des études complémentaires concernant la validité de la méthode de rejet.

En conclusion, il est possible d'utiliser un procédé permettant d'exploiter, sans apport d'énergie extérieure, la totalité du gaz contenu dans la ressource potentielle.

Cette méthode permettrait un gain d'énergie de 28% lors de l'exploitation totale du lac.

Cette proposition présente aussi des inconvénients en termes de coût et d'incertitude quant à l'efficacité de la méthode de rejet.