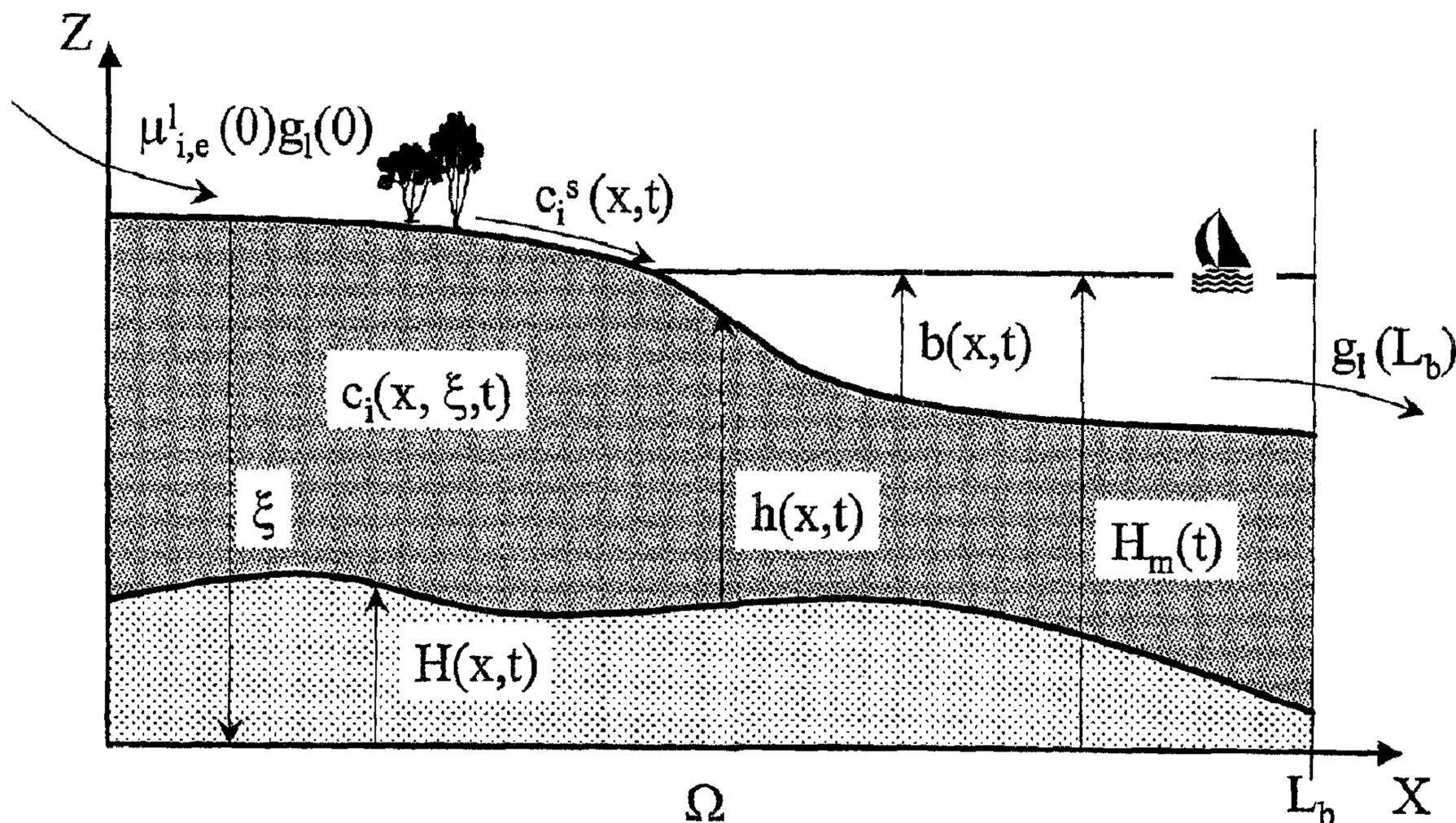




(22) Date de dépôt/Filing Date: 2004/09/20
 (41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 2005/03/24
 (45) Date de délivrance/Issue Date: 2012/11/20
 (30) Priorité/Priority: 2003/09/24 (FR03/11.194)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *G01V 1/28* (2006.01),
G01V 11/00 (2006.01)
 (72) Inventeurs/Inventors:
MASSON, ROLAND, FR;
CACAS, MARIE-CHRISTINE, FR;
DOBRANSZKY, GABRIELA, FR
 (73) Propriétaire/Owner:
IFP ENERGIES NOUVELLES, FR
 (74) Agent: ROBIC

(54) Titre : METHODE POUR SIMULER LE DEPOT D'UNE SEQUENCE SEDIMENTAIRE DANS UN BASSIN
 (54) Title: METHOD FOR STIMULATING THE DEPOSIT OF A SEDIMENTARY SEQUENCE IN A BASIN



(57) Abrégé/Abstract:

- La méthode concerne la formation par simulation d'une carte de référence de la distribution spatiale des apports sédimentaires selon leur composition, dans un bassin sédimentaire durant une séquence de dépôt sédimentaire (pendant un intervalle de temps géologique donné) et permet d'obtenir en outre la topographie de la surface terrestre du bassin au début et à la fin de cette période.
 - Comme données d'entrée, on dispose d'une carte de l'épaisseur de la couche sédimentaire étudiée, connue par interprétation des résultats d'une campagne sismique, de données concernant la localisation et la composition des apports sédimentaires aux

(57) **Abrégé(suite)/Abstract(continued):**

frontières du bassin sédimentaire étudié, obtenues par interprétation de campagnes sismiques, mesures et observations, et de paramètres physiques caractérisant le transport des sédiments (coefficients de diffusion dans le milieu marin et dans le domaine continental) pendant la période considérée. Cet ensemble de données est appliqué à un modèle numérique, de type diffusif stationnaire et l'on obtient en sortie une carte de la composition lithologique des sédiments déposés pendant la séquence étudiée, la topographie de la surface terrestre sur l'ensemble de bassin, au début et à la fin de la période de temps considérée.

- Applications à la localisation de gisements d'hydrocarbures, notamment.

PRECIS DE LA DIVULGATION:

- La méthode concerne la formation par simulation d'une carte de référence de la distribution spatiale des apports sédimentaires selon leur composition, dans un bassin sédimentaire durant une séquence de dépôt sédimentaire (pendant un intervalle de temps géologique donné) et permet d'obtenir en outre la topographie de la surface terrestre du bassin au début et à la fin de cette période.
- Comme données d'entrée, on dispose d'une carte de l'épaisseur de la couche sédimentaire étudiée, connue par interprétation des résultats d'une campagne sismique, de données concernant la localisation et la composition des apports sédimentaires aux frontières du bassin sédimentaire étudié, obtenues par interprétation de campagnes sismiques, mesures et observations, et de paramètres physiques caractérisant le transport des sédiments (coefficients de diffusion dans le milieu marin et dans le domaine continental) pendant la période considérée. Cet ensemble de données est appliqué à un modèle numérique, de type diffusif stationnaire et l'on obtient en sortie une carte de la composition lithologique des sédiments déposés pendant la séquence étudiée, la topographie de la surface terrestre sur l'ensemble de bassin, au début et à la fin de la période de temps considérée.
- Applications à la localisation de gisements d'hydrocarbures, notamment.

5 METHODE POUR SIMULER LE DEPOT D'UNE SEQUENCE SEDIMENTAIRE DANS UN BASSIN

La présente invention concerne une méthode pour établir une carte de la distribution spatiale de la composition lithologique des sédiments déposés pendant un intervalle de temps géologique donné, dans un bassin sédimentaire.

Etat de la technique

Les progrès récents en géologie, qui ont donné naissance au cours de ces vingt dernières années à la stratigraphie sismique, puis à la stratigraphie génétique, ont profondément modifié la compréhension de l'histoire du remplissage sédimentaire des bassins sédimentaires sur de grandes échelles de temps et d'espace en montrant l'influence primordiale de deux paramètres principaux: l'évolution temporelle de la topographie de la surface terrestre du bassin par rapport au niveau marin (cette topographie est nommée dans la suite "profil bathymétrique"; le profil bathymétrique prend la valeur nulle en tout point se situant au niveau de la mer, c'est-à-dire sur la ligne de côte) et les apports sédimentaires aux frontières du bassin.

De nombreux modèles et notamment des modèles numériques déterministes, ont été élaborés afin de pouvoir appréhender les implications géométriques et lithologiques de ces nouvelles approches.

Ces modèles numériques simulent le transport et la sédimentation (ou l'érosion) des sédiments dans le bassin en se basant sur une description plus ou moins complexe de la nature, à partir d'une estimation de l'eustatisme (variations de la surface des océans enregistrées simultanément sur l'ensemble de la surface terrestre), de la subsidence

(déplacement absolu du fond d'un bassin sédimentaire par rapport à un niveau repère fixe au cours du temps) et de l'apport sédimentaire aux frontières du bassin étudié.

Parmi ces modèles numériques, les modèles diffusifs ont prouvé leur efficacité par leur utilisation dans de nombreuses études réalisées notamment pour l'industrie pétrolière, dans le but de mieux (et plus facilement) cerner les zones susceptibles de receler des hydrocarbures. De tels modèles sont décrits dans le document ci-après :

- Rivenaes, J.C., 1988, Application of a dual-lithology, depth dependent diffusion equation in stratigraphic simulation. Basin Research, 4, 133-146.

et aussi dans les brevets suivants du demandeur : FR 2 744 224 (US 5 844 799) et FR 02/16.456 portant sur des méthodes de modélisation du remplissage de bassins sédimentaires.

Ces modèles numériques déterministes sont intégrés dans une procédure de calage de leurs paramètres d'entrée, dite "procédure d'inversion", représentée sur la figure 2. La procédure d'inversion vise à ajuster les paramètres du modèle, afin que les résultats fournis par ce dernier s'ajustent au mieux à la réalité observée. Parmi les paramètres à ajuster, on compte l'évolution temporelle de la subsidence et du niveau marin, c'est-à-dire de l'accommodation. Le critère d'ajustement du modèle obtenu repose entre autre sur la capacité du modèle à reproduire la géométrie, et notamment la carte des épaisseurs des unités sédimentaires déposées.

Cette procédure d'inversion, est la plupart du temps de type "essai-erreur" comme décrit par exemple dans le brevet FR 02/16.456 précité. Elle peut aussi être automatisée comme décrit par exemple dans le brevet FR 2.776.393 du demandeur portant sur une méthode de modélisation stratigraphique d'un réservoir ou bien encore par exemple dans la publication suivante :

- T.A.Cross and M.A.Lessenger, "Construction and application of a stratigraphic inverse model", in: Numerical experiments in stratigraphy; recent advances in stratigraphic and sedimentologic computer simulations, Special Publication - Society for Sedimentary Geology. 62; Pages 69-83. 1999.

Quelle que soit la méthode adoptée, la mise en œuvre de cette procédure d'inversion est généralement très lourde car elle fait appel à des utilisations répétées du modèle

déterministe. Mais si elle permet d'améliorer la concordance entre la réalité observée et la modèle obtenu, la procédure d'inversion n'assure pas d'obtenir un accord satisfaisant entre le résultat du modèle et la réalité observée.

Notamment, les cartes d'épaisseur des différentes séquences sédimentaires sont généralement bien contraintes en modélisation stratigraphique, quand elles proviennent de l'interprétation d'une campagne sismique. Or l'ajustement exact des cartes d'épaisseur des séquences de dépôt du modèle à celles qui sont données par l'interprétation de la sismique n'est absolument pas garanti par la procédure d'inversion. En pratique, l'ajustement exact n'est quasiment jamais atteint. Dans le cas de la méthode de type essai-erreur, le succès de la procédure dépend entièrement du savoir-faire et de l'intuition de l'utilisateur. Il en est de même si l'on utilise une procédure automatique : celle-ci peut ne jamais aboutir, si les données proposées initialement par l'utilisateur sont trop éloignées de la solution.

LA METHODE SELON L'INVENTION

La méthode proposée ici permet comme on le verra plus loin de façon plus détaillée, à partir de données d'entrée d'une carte de l'épaisseur de la couche sédimentaire étudiée, d'une distribution détaillée de l'apport sédimentaire dans le bassin, et de paramètres physiques caractérisant le transport des sédiments, de calculer un modèle du remplissage multi-lithologique d'une séquence sédimentaire d'un bassin. Elle est basée sur un processus diffusif stationnaire, qui permet d'obtenir un accord rigoureux entre la carte d'épaisseur d'une séquence sédimentaire du modèle et celle de la réalité observée, sans nécessiter de procédure d'inversion. Le processus diffusif utilisé ici est dit stationnaire en ce sens que la vitesse de sédimentation est supposée constante le long de toute verticale de la séquence étudiée.

Selon la méthode, la carte d'épaisseur de la séquence sédimentaire devient une donnée et non une sortie. La méthode fournit de façon directe les cartes de composition lithologique et de profils bathymétriques en début et en fin de séquence. L'ajustement entre la carte d'épaisseur mesurée et celle du modèle ne fait donc plus l'objet d'une inversion à l'issue incertaine: c'est un principe de base de la méthode. Le calage des épaisseurs de sédiments par résolution d'un problème inverse n'est plus nécessaire et la bathymétrie est une sortie du modèle et non plus une sortie résultant d'une inversion, comme auparavant.

En d'autres termes, la méthode selon l'invention permet de simuler la formation d'une carte de référence de la distribution spatiale des apports sédimentaires selon leur composition, dans un bassin sédimentaire durant une séquence de dépôt sédimentaire (i.e. durant un intervalle de temps géologique). A cet effet, on forme une carte initiale donnant l'épaisseur actuelle de la couche sédimentaire par interprétation des données de campagnes de prospection sismique et on détermine l'épaisseur des couches sédimentaires formées à tout instant durant la séquence par interpolation linéaire en temps entre les épaisseurs desdites couches au début et à la fin de la dite séquence. On réunit aussi, sur la base de mesures et d'interprétations, des données portant sur la localisation et la composition d'apports de sédiments aux limites du bassin sédimentaire étudié ainsi que sur la valeur de coefficients de diffusion caractérisant le transport des sédiments vers le bassin. On applique alors les données d'entrée à un modèle diffusif stationnaire avec résolution d'équations de transport diffusif à grande échelle de façon à déterminer la carte recherchée ainsi que la topographie de la surface terrestre sur l'ensemble de bassin, au début et à la fin de la séquence.

Suivant un mode de mise en œuvre convenant pour le cas où les apports de sédiments sont monolithologiques, on détermine par interpolation tous les profils bathymétriques intermédiaires entre le début et la fin de chaque séquence, chaque profil intermédiaire étant obtenu en sélectionnant la valeur d'un paramètre tel que la bathymétrie.

Suivant un autre mode de mise en œuvre convenant au cas où les apports de sédiments sont multilithologiques avec un rapport constant entre coefficients de diffusion en milieu marin et en milieu continental, on détermine par interpolation tous les profils bathymétriques intermédiaires entre le début et la fin de chaque séquence, chaque profil intermédiaire étant obtenu en sélectionnant la valeur d'un paramètre tel que la bathymétrie.

Suivant un autre mode de mise en œuvre convenant au cas plus général où les apports de sédiments sont multilithologiques sans la condition restrictive précédente, on forme par application du modèle, une famille de solutions dépendant du temps en fixant pour chacune d'elles la valeur d'un paramètre en un point du bassin, tel que la bathymétrie.

PRESENTATION SUCCINCTE DES FIGURES

Les caractéristiques et avantages de la méthode selon l'invention, apparaîtront plus clairement à la lecture de la description détaillée ci-après, en se référant aux dessins annexés où :

- 5 - la figure 1 montre le schéma général d'application de la méthode selon l'invention ;
- la figure 2 montre un schéma classique d'inversion du modèle diffusif classique non-stationnaire ;
- la figure 3 explicite les notations utilisées dans le chapitre "description détaillée";
- la figure 4 montre un exemple de section sismique du bassin sédimentaire d'Oman
10 illustrant l'exemple d'application ;
- la figure 5 montre le profil de dépôt sédimentaire de l'exemple d'application;
- les figures 6a et 6b montrent des exemples de profils bathymétriques admissibles pour différentes valeurs de coefficients de diffusion marins et continentaux K_m et K_c , pour l'exemple d'application; et
- 15 - les figures 6c et 6d montrent des exemples de profils bathymétriques admissibles et des courbes de concentration obtenues en appliquant la méthode dans le cas multi-lithologique au cas d'exemple.

DESCRIPTION DETAILLEE

- 20 La méthode permet, on va le voir, de calculer un modèle du remplissage multi-lithologique d'une séquence sédimentaire d'un bassin en désignant par ce terme la formation de sédiments dans le bassin associés à un intervalle de temps géologique pendant lequel les apports sédimentaires aux frontières du bassin ainsi que les vitesses de subsidence et de variations du niveau marin peuvent être considérées comme constantes.

25 Les données d'entrée du modèle

Comme données d'entrée pour le modèle, on dispose :

1. d'une carte de l'épaisseur de la couche sédimentaire étudiée, connue par interprétation des résultats d'une campagne sismique. Le cumul des valeurs de la carte permet de calculer le volume total de sédiment introduit dans le bassin pendant la séquence de dépôt. Il faut noter que cette carte d'épaisseur est généralement considérée comme la donnée la mieux contrainte en modélisation stratigraphique.

2. d'une distribution détaillée de l'apport sédimentaire dans le bassin, tant sur le plan de sa localisation dans l'espace que de sa composition lithologique. On décrit la proportion du volume global de sédiments apporté, en tout point de la frontière du bassin, par les fleuves ou les eaux de ruissellement. On peut également tenir compte de sédiments directement incorporés à l'intérieur du bassin comme c'est le cas pour la croissance de récifs carbonatés. Les apports sédimentaires sont aussi caractérisés par leur composition lithologique (proportions respectives de sable, d'argile et de carbonate par exemple) également variable dans l'espace. Par exemple, 25% des sédiments peuvent être introduits en une zone centrale du bassin avec une composition de 100% en carbonates, et 75% des sédiments restants introduits de manière uniforme à la frontière du bassin et composés de 50% de sable et de 50% d'argile). Ces données sont estimées par ailleurs par la synthèse des résultats de campagnes sismiques, de mesures géologiques effectuées sur les carottes et/ou les mesures diagraphiques en forage, et d'observations géologiques sur affleurement.

3. de paramètres physiques caractérisant le transport des sédiments (coefficients de diffusion dans le milieu marin et dans le domaine continental) pendant la période considérée. Plus précisément, il s'agit de deux coefficients de diffusion par lithologie: un coefficient de diffusion valable en milieu marin, un coefficient valable en milieu immergé (lacustre ou marin). Ces coefficients quantifient l'efficacité du transport des sédiments en milieux continental et marin à l'époque géologique considérée.

Application du modèle numérique

Cet ensemble de données est appliqué à un modèle numérique diffusif multi-lithologique détaillé plus loin, dit "modèle diffusif stationnaire". Ce modèle numérique repose principalement sur les hypothèses suivantes:

Application du modèle numérique

Cet ensemble de données est appliqué à un modèle numérique détaillé plus loin, dit "modèle diffusif stationnaire" adapté à la modélisation du transport des sédiments. Ce modèle numérique repose principalement sur les hypothèses suivantes:

- 5 1. La vitesse de sédimentation (positive dans le cas d'une sédimentation, négative dans le cas d'une érosion) est constante le long de chaque verticale de la séquence. Précisons que cette vitesse de sédimentation, constante dans le temps en toute verticale, varie en général latéralement.
2. Les coefficients de diffusion et les apports sédimentaires aux frontières du
10 bassin (flux aux bords) ou au sein du bassin (termes sources) sont constants en temps pendant la séquence considérée.
3. Cette dernière hypothèse n'est utile que dans le cas (2) ci-dessous. En cas d'érosion, on impose que la composition de la lithologie érodée soit constante le long de chaque verticale érodée. Dans le cas (2), ceci est vérifié par le modèle si l'hypothèse est
15 vraie pour la première séquence et si l'on ne peut éroder au cours d'une même séquence les sédiments sur plus d'une couche inférieure.

Les sorties du modèle numérique

En sortie, plusieurs cas sont à considérer selon que le modèle diffusif stationnaire est appliqué (1) dans un contexte monolithologique, (2) dans un contexte multilithologique
20 mais pour toutes les lithologies, le rapport entre les coefficients de diffusion en milieu marin et en milieu continental étant les mêmes, ou (3) dans le cas général multilithologique.

Les sorties du modèle dans ces trois cas sont détaillées dans la suite. Sous les hypothèses précédentes, dans le cas général multilithologique, le modèle est stationnaire au
25 sens où la solution en un temps donné dans la séquence considérée peut être calculée indépendamment des solutions aux temps précédents dans la séquence.

1) Les sorties du modèle diffusif stationnaire dans le cas monolithologique

Le modèle fournit une carte de référence de la distribution spatiale des apports sédimentaires selon leur composition $\Psi(x, y)$ où x et y désignent les coordonnées dans le

plan horizontal. Par opérations arithmétiques sur cette carte de référence, on obtient directement l'ensemble de tous les profils bathymétriques en tout temps du début à la fin de séquence, qui permettent au processus diffusif de satisfaire rigoureusement la carte d'épaisseur de la séquence étudiée. L'utilisateur peut alors sélectionner l'un de ces profils, en imposant une bathymétrie donnée, en un point donné du bassin. Par exemple, la donnée d'un point de la carte se trouvant sur la ligne côtière en début de séquence, et d'un autre point se trouvant sur la ligne côtière en fin de séquence permet de calculer un profil bathymétrique initial unique et un profil bathymétrique final unique satisfaisant rigoureusement les données d'entrée. De même, pour obtenir un profil bathymétrique unique en un temps donné quelconque de la séquence il faut par exemple imposer la bathymétrie en un point du bassin au temps considéré.

En outre, dans le cas monolithologique, la même carte de référence $\Psi(x, y)$ est valable pour tout jeu de coefficients de diffusion. On peut donc calculer les solutions pour d'autres jeux de coefficients de diffusion sans ré-appliquer le modèle numérique.

2) *Les sorties du modèle diffusif stationnaire, dans le cas multilithologique avec un rapport constant entre coefficients de diffusion en milieu marin et en milieu continental*

Comme dans le cas précédent, le modèle fournit une carte de référence $\Psi(x, y)$ où x et y désignent les coordonnées dans le plan horizontal. Par opérations arithmétiques sur cette carte de référence, on obtient directement une famille à un paramètre (dépendant du temps) de profils bathymétriques en tout temps du début à la fin de séquence, qui permettent au processus diffusif de satisfaire rigoureusement la carte d'épaisseur de la séquence étudiée. En outre, le modèle fournit une carte unique des compositions lithologiques dans la séquence. Cette composition lithologique est constante le long d'une verticale, mais variable latéralement suivant la carte fournie par le modèle. La sélection par l'utilisateur du profil bathymétrique en un temps donné de la séquence peut être faite comme précédemment suivant différents critères portant sur le profil bathymétrique comme par exemple la valeur de la bathymétrie en un point du bassin au temps considéré.

3) *Les sorties du modèle diffusif stationnaire dans le cas général multilithologique*

Le modèle fournit une famille à un paramètre (dépendant du temps) de profils bathymétriques et de compositions lithologiques qui satisfont la carte des épaisseurs de sédiments. Contrairement aux deux cas précédents, on ne peut pas parcourir un ensemble

de solutions à partir d'une carte de référence. Le modèle numérique doit être appliqué à chaque temps en fixant par exemple la valeur de la bathymétrie en un point quelconque du bassin au temps considéré, il fournit alors une solution unique. La solution complète sera construite par interpolation en temps à partir du calcul des solutions en début et en fin de séquence ainsi que si nécessaire en un petit nombre de temps intermédiaires.

Le modèle

Le transport des sédiments est modélisé par un modèle diffusif multi-lithologique tel que ceux décrits par Rivenaes, J.C., 1988, ou dans les brevets du demandeur tous cités plus haut. Sa formulation mathématique précise est présentée notamment dans la publication suivante :

- Eymard R. et al :Muti-lithogy Stratigraphic Model under Maximum Erosion Rate Constraint, accepted in Int. J. Numer. Meth. Eng., 2003.

Ce modèle calcule à chaque instant les épaisseurs de sédiments déposés ou érodés et la composition en lithologies des sédiments déposés connaissant les apports, l'accommodation et les coefficients de diffusion. Le calage des épaisseurs de sédiments ne peut être obtenu dans ce cas que par un processus d'inversion en inversant par exemple l'accommodation ou la bathymétrie.

L'idée à la base de la méthode consiste à interpoler linéairement en temps entre chaque séquence les épaisseurs de sédiments qui deviennent donc des données. On leur substitue ensuite comme nouvelle inconnue l'accommodation ou encore la bathymétrie. Le modèle est donc formulé en termes des nouvelles inconnues que sont la bathymétrie (ou profil de dépôt dans le repère lié à la mer) et la composition. Les solutions garantissent clairement par construction le respect des épaisseurs de sédiments de chaque séquence.

Le taux de sédimentation ou d'érosion étant désormais connu et constant en temps, le modèle, n'est plus un problème d'évolution. Le modèle diffusif peut donc être considéré comme stationnaire. En résumé, le calage des épaisseurs de sédiments par résolution d'un problème inverse n'est plus nécessaire et la bathymétrie est une sortie du modèle et non plus une sortie résultant d'une inversion, comme auparavant.

Notations

Ω : projection horizontale du bassin.

x : coordonnées d'un point dans Ω .

z : coordonnée verticale d'un point du bassin dans un repère fixe.

5 $z = H_m(t)$: niveau marin au temps t .

$z = H(x,t)$: position au temps t du socle = surface de référence soumise aux déplacements verticaux tectoniques.

$h(x,t)$: épaisseur au temps t des sédiments au dessus du socle.

$b(x,t) = H_m(t) - h(x,t) - H(x,t)$: bathymétrie au temps t .

10 ξ : coordonnées verticale d'un point du bassin dans le repère d'origine le sommet du bassin et pointant vers le bas ($\xi = z - H(x,t) - h(x,t)$).

L : nombre de lithologies composant les sédiments et indicées par $i = 1, \dots, L$.

$c_i(x, \xi, t)$: composition dans la lithologie i des sédiments au point (x, ξ) du bassin à l'instant t .

15 $c_i^s(x, t)$: composition des sédiments à l'instant t déposés en surface en cas de sédimentation ou passant en surface en cas d'érosion.

n_x : normale sortante à la frontière $\partial\Omega$ du bassin.

Données définies par l'utilisateur ou paramètres à caler :

20 I : indice des séquences temporelles entre les temps t_l et t_{l+1} pointées par l'utilisateur.

$e_l(x) = h(x, t_{l+1}) - h(x, t_l)$: épaisseur, donnée par l'utilisateur, des sédiments entre les temps t_l et t_{l+1} (positive en cas de sédimentation, négative en cas d'érosion).

On notera $v_l(x) = e_l(x) / (t_{l+1} - t_l)$ la vitesse moyenne de dépôt ou d'érosion entre les temps t_l et t_{l+1} .

25 $g_l(x)$: flux total de sédiments (entrant <0 ou sortant >0) défini sur la frontière $\partial\Omega$.

$S_l(x)$: terme source de production totale (>0) ou consommation totale (<0) de sédiments défini sur le domaine Ω .

$\partial\Omega'_e = \{x \in \partial\Omega, g_l(x) < 0\}$: frontière entrante de sédiments.

$\Omega'_p = \{x \in \Omega, S_l(x) > 0\}$: sous domaine de Ω de production de sédiments.

$\mu_{i,e}^l(x) \geq 0$ (avec $\sum_{i=1}^L \mu_{i,e}^l(x) = 1$) : fraction de flux entrant en lithologie i définie sur la portion de frontière $\partial\Omega'_e$.

5 $\mu_{i,p}^l(x) \geq 0$ (avec $\sum_{i=1}^L \mu_{i,p}^l(x) = 1$) : fraction de production en lithologie i définie sur le sous domaine Ω'_p .

On notera $S'_i(x,t)$ le terme source égal à $\mu_{i,p}^l(x) S_l(x)$ sur Ω'_p et à $c_i^s(x,t) S_l(x)$ sur Ω / Ω'_p .

Coefficients de diffusion de la lithologie i en milieux marin et continental : $k_{i,m}^l$,

10 $k_{i,c}^l$

On définit pour chaque lithologie i la fonction $\psi_i(b) = \begin{cases} -k_{i,m}^l b & \text{si } b > 0, \\ -k_{i,c}^l b & \text{si } b < 0. \end{cases}$

En cas d'érosion de la première couche (donc $v_0(x) < 0$) il faut spécifier la composition initiale à t_0 des sédiments érodés dans la colonne x notée $c_i^0(x)$ et supposée indépendante de ξ .

15 Enfin l'utilisateur doit spécifier à titre d'exemple une valeur de la bathymétrie en un point quelconque $x_0(t)$ et pour tout temps t que l'on notera $b_0^l(t) = b(x_0(t), t)$.

Modèle : il est obtenu en supposant la vitesse de dépôt ou d'érosion des sédiments indépendante du temps au cours de la séquence considérée:

$$\partial_t h(x,t) = v_l(x) \text{ pour } t < t < t_{l+1}.$$

20 Le modèle détermine alors pour tout temps de la séquence la bathymétrie $b(x,t)$ la composition de surface $c_i^s(x,t)$ et la composition du bassin $c_i(x,\xi,t)$ solution du système

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div}(-c_i^s(x,t)\nabla\psi_i(b(x,t))) = -v_i(x)c_i(x,0,t) + S_i^l(x,t) \quad \text{sur} \quad \Omega \times (t_i, t_{i+1}), \\ \sum_{i=1}^L c_i^s(x,t) = 1 \quad \text{sur} \quad \Omega \times (t_i, t_{i+1}), \\ \sum_{i=1}^L -c_i^s(x,t)\nabla\psi_i(b(x,t)).n_x = g_i(x) \quad \text{sur} \quad \partial\Omega \times (t_i, t_{i+1}), \\ -c_i^s(x,t)\nabla\psi_i(b(x,t)).n_x = \mu_{i,e}^l(x)g_i(x) \quad \text{sur} \quad \partial\Omega_e^l \times (t_i, t_{i+1}), \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial_t c_i(x, \xi, t) + v_i(x)\partial_\xi c_i(x, \xi, t) = 0 \quad \text{sur} \quad \Omega \times (0, +\infty) \times (t_i, t_{i+1}), \\ c_i(x, 0, t) = c_i^s(x, t) \quad \text{si} \quad v_i(x) > 0, \\ c_i(x, \xi, 0) = c_i^0(x), \end{array} \right.$$

$$5 \quad b(x_0(t), t) = b_0^l(t).$$

Condition de compatibilité des données : une condition nécessaire sur les données pour que le système admette une solution est la condition de compatibilité suivante

$$\int_{\Omega} v_i(x) dx = \int_{\Omega} S_i(x) dx - \int_{\partial\Omega} g_i(x) d\sigma$$

10 qui traduit que le volume algébrique de sédiments de la séquence est égal à l'intégrale du flux total sur le bord du bassin plus l'intégrale des termes de production ou de consommation dans le bassin. Elle est supposée vérifiée dans la suite de l'exposé.

Cas monolithologique L=1

Dans ce cas le système se réduit à

$$\left\{ \begin{array}{l} -\Delta\psi(b(x,t)) = -v_i(x) + S_i(x) \quad \text{sur} \quad \Omega, \\ -\nabla\psi(b(x,t)).n_x = g_i(x) \quad \text{sur} \quad \partial\Omega, \\ b(x_0(t), t) = b_0^l(t). \end{array} \right.$$

15 Il s'agit donc d'un problème stationnaire pour chaque temps $t \in (t_i, t_{i+1})$ dans la séquence. La fonction $\psi(b(x,t))$ solution est unique lorsque la condition de compatibilité des données est vérifiée. Elle est clairement de la forme

$$\psi(b(x,t)) = \psi_i(x) + f(t)$$

où la fonction $f(t)$ est déterminée de façon unique par la condition $b(x_0(t), t) = b_0^l(t)$. On peut donc déterminer la bathymétrie $b(x, t)$ en tout temps de la séquence en déterminant la fonction $\psi_i(x)$ en un seul calcul stationnaire en résolvant le système précédent en l'inconnue ψ .

5 Cas multilithologique $L > 1$ avec un quotient $\frac{k_{i,m}^l}{k_{i,c}^l} = r$ indépendant de la lithologie i

Soit la fonction $\psi(b) = \begin{cases} -rb & \text{si } b > 0, \\ -b & \text{si } b < 0 \end{cases}$ telle que $\psi_i(b) = k_{i,c}^l \psi(b)$. On remarque

donc que le problème se reformule à nouveau dans ce cas en l'inconnue ψ .

Sous l'hypothèse 3 définie plus haut (pas d'érosion de plus d'une couche inférieure au cours de la séquence considérée), on montre que la solution $\psi(b)$ est de la forme

10
$$\psi(b(x, t)) = \psi_i(x) + f(t)$$

où la fonction $f(t)$ est déterminée de façon unique par la condition $b(x_0(t), t) = b_0^l(t)$.

De plus la composition de surface $c_i^s(x, t)$ ne dépend que de x et est indépendante de $b_0^l(t)$. On notera

$$c_i^s(x, t) = c_i^l(x).$$

15 Il en résulte que la composition $c_i(x, \xi, t)$ des sédiments déposés (donc si $v_i(x) > 0$) ne varie pas verticalement et est égale à $c_i^l(x)$.

A nouveau dans ce cas, la solution s'obtient en tout temps de la séquence en un seul calcul stationnaire des fonctions $\psi_i(x)$ et $c_i^l(x)$, $i = 1, \dots, L$ en résolvant le système dans les inconnues ψ et c_i^s , $i = 1, \dots, L$.

20 Cas général multilithologique

Il existe une solution unique à chaque temps du système mais cette fois la solution sur toute la durée de la séquence ne peut être obtenue que par une discrétisation et une

interpolation en temps en calculant la solution au temps initial t_i , au temps final t_{i+1} et en un petit nombre de temps intermédiaires dans la séquence.

Notons toutefois que la bathymétrie au temps final de la séquence $b(x, t_{i+1})$ s'obtient en un seul calcul stationnaire au temps t_{i+1} qui peut être effectué
5 indépendamment des autres calculs. Seul le calcul de la composition finale $c_i(x, \xi, t_{i+1})$ dans la colonne nécessite cette discrétisation en temps.

Schéma numérique

Le schéma en espace est celui décrit par exemple dans la référence Eymard et al déjà citée. Il est similaire à celui introduit dans le papier de Rivanaes déjà cité également.

10 Le schéma en temps dans le cas général multilithologique est une simple interpolation linéaire des solutions obtenues aux temps initial, final et intermédiaires.

Exemple d'application

L'exemple suivant s'applique à un bassin sédimentaire d'Oman. On supposera ici que le milieu est cylindrique, c'est à dire qu'il est inchangé dans la direction
15 perpendiculaire aux figures présentées. C'est donc un cas que l'on traite ici en 2D, cas simplifié par rapport au cas général 3D auquel s'applique la méthode. Les données utilisées proviennent d'une ligne sismique représentée sur la figure 4. Il s'agit d'une coupe verticale du bassin. Sur cette figure est indiquée la séquence à laquelle la méthode s'applique: elle est délimitée par ses limites supérieures et inférieures (dites "toit" et "base",
20 respectivement).

La distribution spatiale des épaisseurs de la séquence est présentée sur la figure 5. La méthode décrite ci-dessus a été appliquée dans le cas monolithologique, pour différents choix des coefficients de diffusion en milieu marin et milieu continental. La figure 6A présente des exemples de profils topographiques obtenus par la méthode, ainsi que les
25 paramètres auxquels ils correspondent. Rappelons que ces profils sont obtenus de manière directe, et permettent tous d'obtenir exactement, par diffusion, la répartition des épaisseurs observée sur la ligne sismique de la figure 5, moyennant le choix de paramètres indiqué.

Dans la figure 6B, nous avons représenté un ensemble de profils topographiques obtenus pour le même choix des coefficients de diffusion, mais en faisant varier la

bathymétrie de référence. Ainsi, ces profils topographiques indiquent un chemin possible de l'évolution de la bathymétrie au cours du dépôt de la séquence étudiée.

Nous avons également appliqué la méthode décrite dans un cas multi-lithologique, à deux lithologies. Nous avons considéré des compositions entrantes de 50% pour chaque lithologie et un rapport entre le coefficient de diffusion marin et continental de 10^{-2} pour chaque lithologie. La figure 6C représente des profils bathymétriques obtenus pour ces paramètres, en faisant varier le rapport entre les coefficients de diffusion marins des deux lithologies. Dans la figure 6D, nous avons représenté trois profils de concentration de la lithologie 1, également obtenus en faisant varier le rapport entre les coefficients de diffusion marins des deux lithologies.

Les réalisations de l'invention au sujet desquelles un droit exclusif de propriété ou de privilège est revendiqué, sont définis comme il suit :

- 1) Méthode pour former par simulation une carte de référence de la distribution spatiale des apports sédimentaires selon leur composition, dans un bassin sédimentaire
5 durant une séquence de dépôt sédimentaire, dans laquelle :
- on forme une carte initiale donnant l'épaisseur actuelle de la couche sédimentaire par interprétation des données de campagnes de prospection sismique et on détermine l'épaisseur des couches sédimentaires formées à tout instant durant la séquence par interpolation linéaire en temps entre les épaisseurs desdites couches au début et à la fin
10 de la séquence ;
 - on réunit, sur la base de mesures et d'interprétations, des données portant sur la localisation et la composition d'apports de sédiments aux limites du bassin sédimentaire étudié ainsi que sur la valeur de coefficients de diffusion caractérisant le transport des sédiments vers le bassin ; et
 - 15 - on applique les données à un modèle diffusif stationnaire avec résolution d'équations de transport diffusif à grande échelle de façon à déterminer la dite carte ainsi que la topographie de la surface terrestre sur l'ensemble de bassin, au début et à la fin de la séquence.
- 2) Méthode selon la revendication 1, dans laquelle, quand les apports de sédiments
20 sont monolithologiques, on détermine par interpolation tous les profils bathymétriques intermédiaires entre le début et la fin de chaque séquence, chaque profil intermédiaire étant obtenu en sélectionnant la valeur d'un paramètre tel que la bathymétrie.
- 3) Méthode selon la revendication 1, dans laquelle, quand les apports de sédiments sont multilithologiques avec un rapport constant entre coefficients de diffusion en milieu
25 marin et en milieu continental, on détermine par interpolation tous les profils bathymétriques intermédiaires entre le début et la fin de chaque séquence, chaque profil intermédiaire étant obtenu en sélectionnant la valeur d'un paramètre tel que la bathymétrie.
- 4) Méthode selon la revendication 1, dans laquelle, quand les apports de sédiments sont multilithologiques, on forme par application du modèle, une famille de solutions

dépendant du temps en fixant pour chacune d'elles la valeur d'un paramètre en un point du bassin, tel que la bathymétrie.

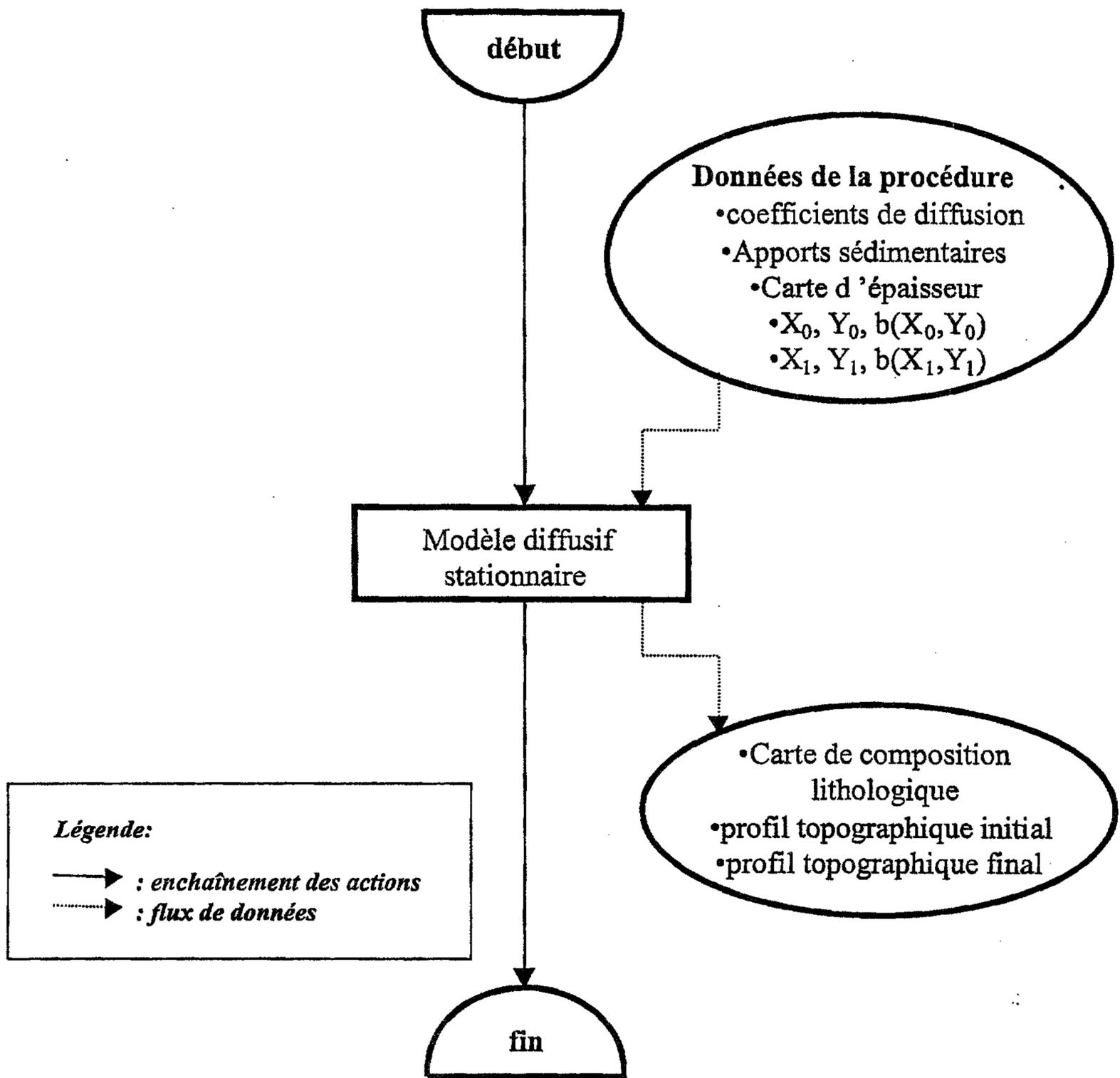


FIG.2

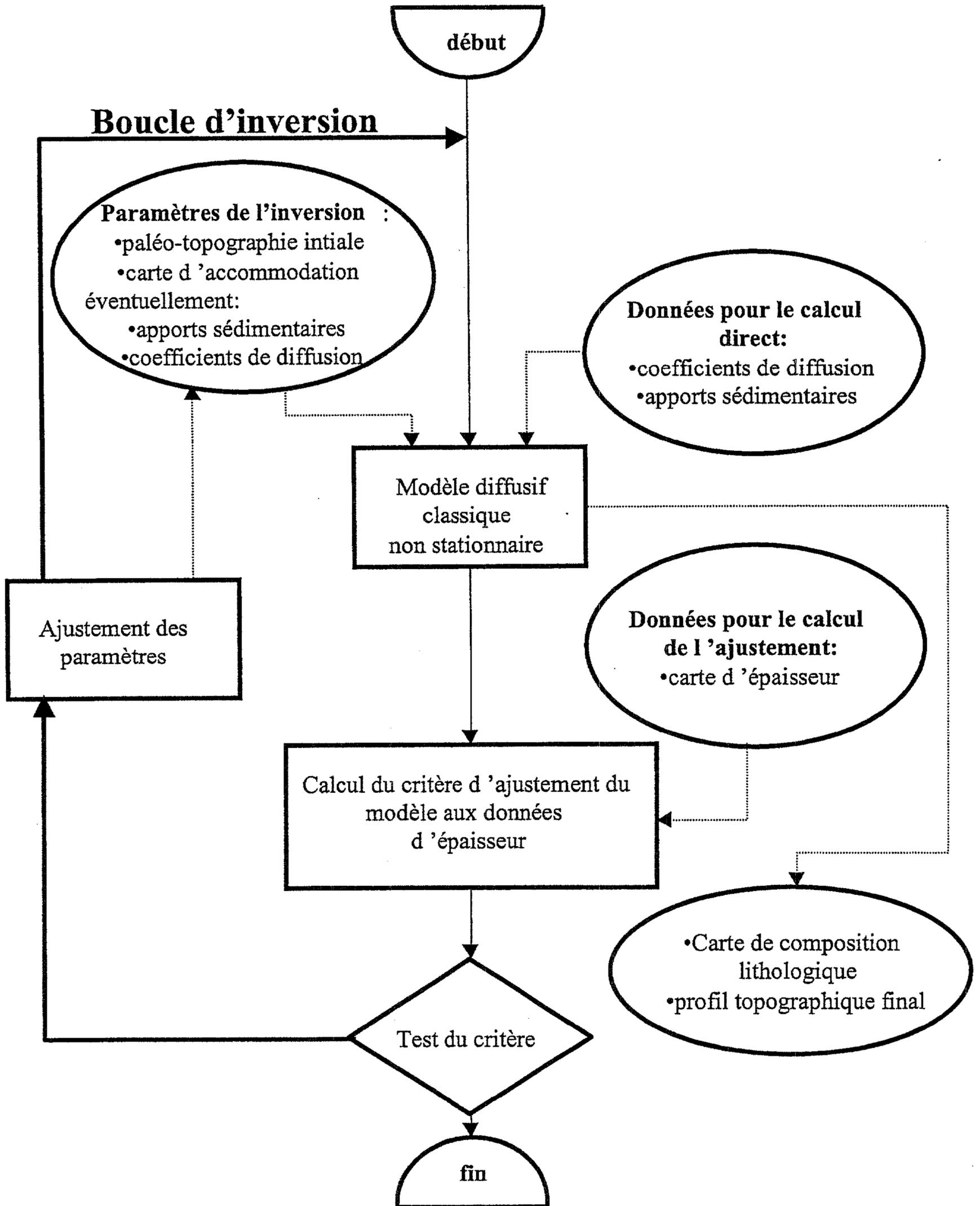


FIG.3

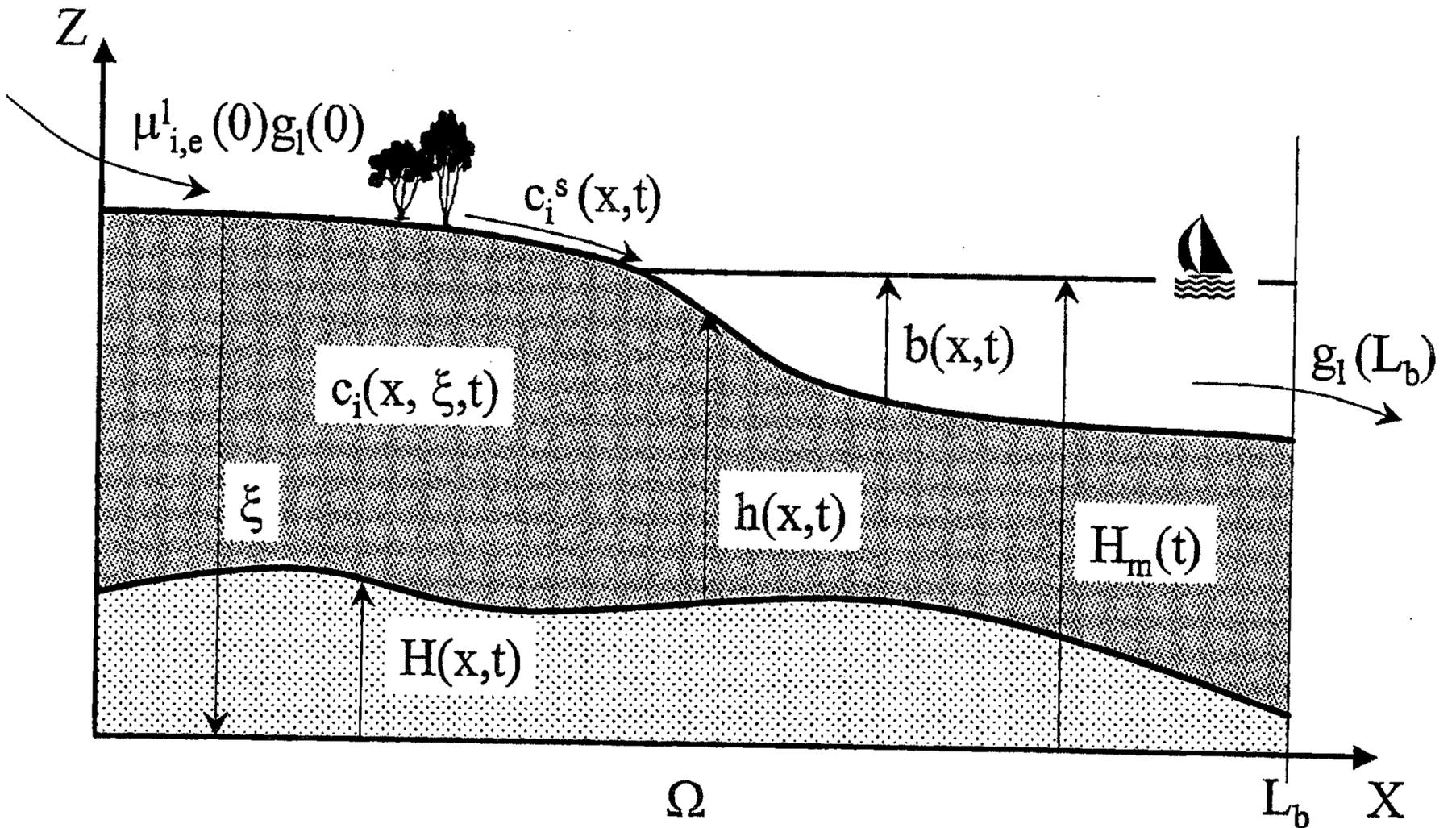


FIG.4

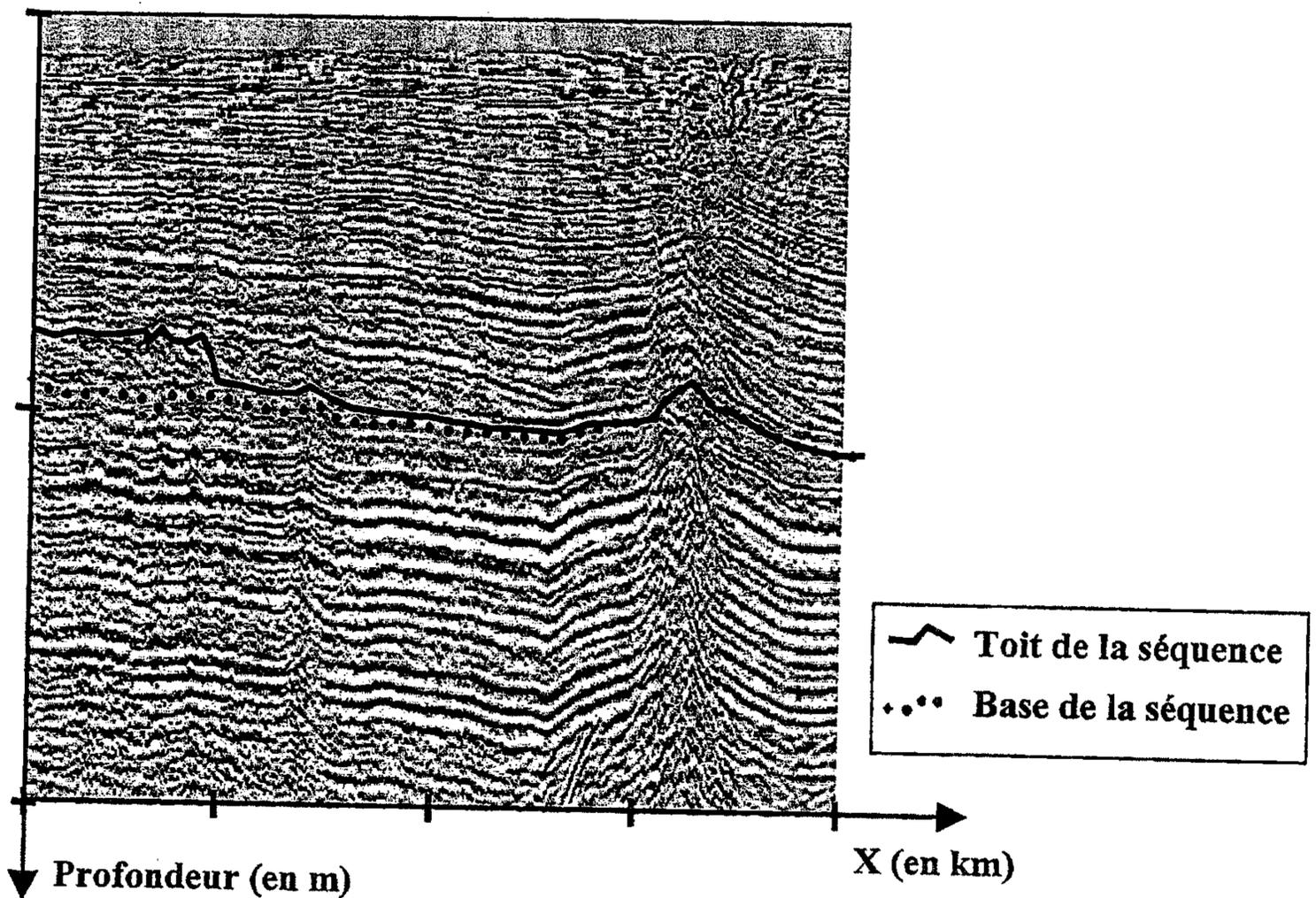


FIG.5

Epaisseur de la séquence étudiée

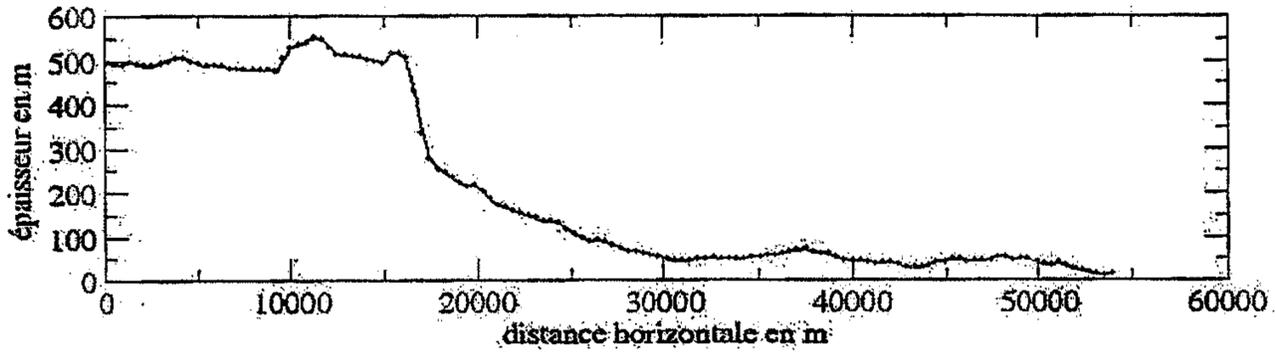


FIG.6A

exemples de profils bathymétriques admissibles

Différentes valeurs de K_m et K_c ; bathy=0 en $X=14500m$

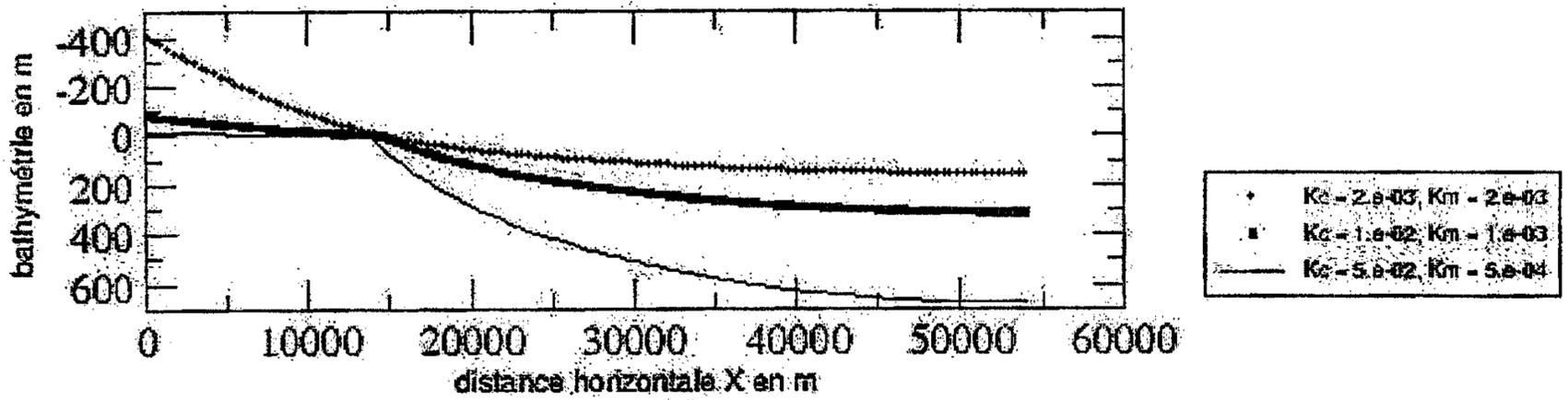


FIG.6B

exemples de profils bathymétriques admissibles

pour $K_c=5e-02$, $K_m=5.e-04$, bathy variable, imposée à $X=14500m$

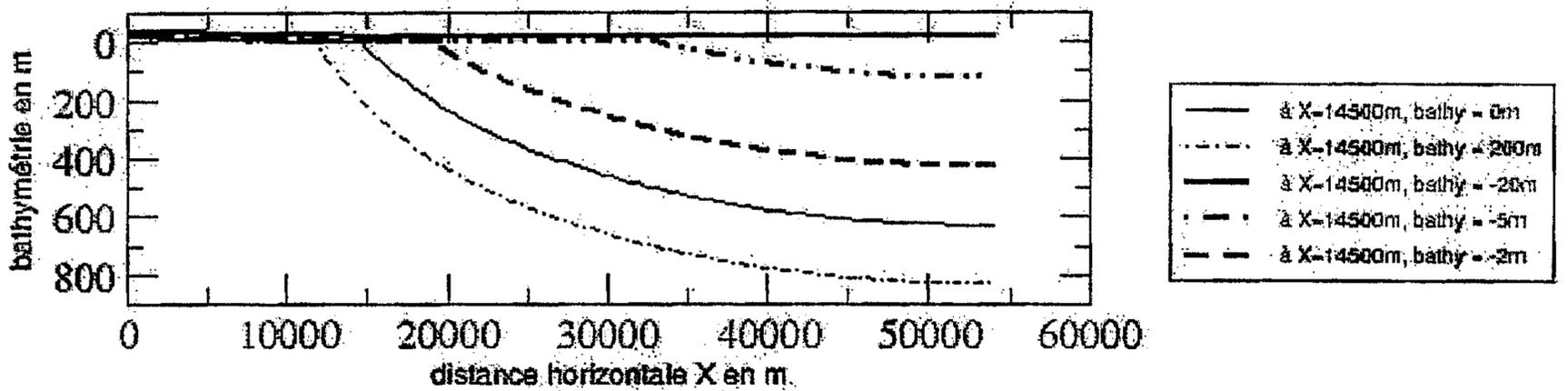


FIG.6C

exemples de profils bathymétriques admissibles

cas à 2 lithologies, bathy=0 en X=14500m, Km/Kc=0.01

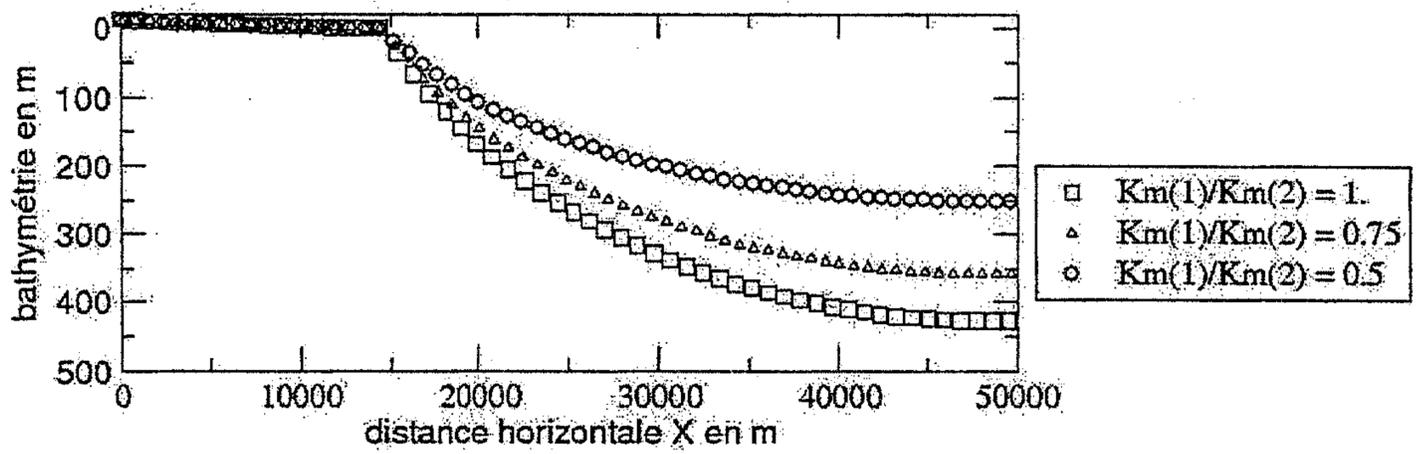


FIG.6D

profils de concentration

cas à 2 lithologies, différents rapports Km(1)/Km(2)

