



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master
Master de Sciences et Technologies

Mention : **Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie**

Spécialité: **Géosciences et Géomatériaux**

Parcours: Lithosphère, Bassins, Pétrole

Année 2007/2008

Intitulé:

**MODELISATION DE SYSTEMES TURBIDITIQUES
CHENALISES ET MEANDRIFORMES;
EXEMPLE DES DEPÔTS PLIOCENE-
PLEISTOCENES DU CANYON MAJEUR DU BENIN
(GOLFE DE GUINEE)**

Présenté par : Ali HACHOUR

Responsables:

Isabelle COJAN

et

Jacques RIVOIRARD

SOMMAIRE

2. Description d'un système sous marin, «éventail sous-marin»	3
2.1. Introduction	3
2.1.1. Le Canyon	3
2.1.2. Le système chenaux-levées	4
2.1.3. Les lobes	4
2.2. Caractérisation de l'éventail moyen	5
2.3. Architecture et processus associés:	5
2.3.1. <i>PROCESSUS</i>	5
2.3.2. <i>Les faciès</i>	8
2.3.3. <i>Architecture et faciès</i>	8
3. Description de TURMY	10
3.1. Domaine	10
3.2. Wells/Sediment Load	10
3.3. Erodibility channel	11
3.4. Avulsion	12
3.5. Aggradation	12
3.6. Visualisation des résultats	12
4. Cas d'étude.....	14
4.1. Localisation de la zone étudiée	14
4.2. Description du complexe Chenaux-levées majeur du Bénin	15
4.3. Mesures de la vallée et des chenaux	16
4.4. Evolution du systèmes chenaux levée aggradant	17
4.4.1. <i>La période d'incision</i> :	17
4.4.2. <i>Phases de remplissage</i>	18
4.4.3. <i>Les levées externes</i>	19
5. Modélisation.....	21
5.1. Channel centerline	21
5.2. Carte d'érodabilité (Emap).....	24
5.2.1. <i>a- Définition de la carte d'érodabilité</i>	24
5.2.2. <i>b- Construction de la carte d'érodabilité</i>	24
6. Test et simulations	25
6.1. Test de la longueur d'onde	25
6.1.1. <i>Analyse des longueurs d'ondes données par le logiciel</i>	25
6.2. Cas d'études	27
6.2.1. <i>Estimation des longueurs d'ondes du cas étudié</i>	27
6.2.2. <i>Largeurs</i>	27
6.2.3. <i>Reproduction des tracés des chenaux</i>	28
6.3. Reproduction du bloc	31
6.3.1. <i>Analyse de la morphologie de la vallée</i> :	31
6.3.2. <i>Les simulations des morphologies de la vallée</i>	32
6.3.3. <i>Analyse du remplissage de la vallée</i>	33
6.3.4. <i>Simulations du remplissage</i>	34
7. Conclusions et perspectives	37
Liste des figures et tableaux	39
Bibliographie.....	41

1. Introduction

Les courants de turbidité constituent un mécanisme important de transfert des sédiments littoraux vers les eaux profondes. Le transfert se fait le long de corridors appelés chenaux ou canyons sous-marins. Les dépôts qu'ils engendrent connus sous le nom de turbidites, se révèlent de constituer d'excellents réservoirs pétroliers. Ils ont un intérêt économique important ont suscité la curiosité des compagnies pétrolières, lors de cette dernière décennie. L'architecture de ce complexe sédimentaire est encore sujette à beaucoup de discussions du fait de la grande variabilité qu'elle peut présenter.

Dans cette optique, le logiciel de TURMY, développé récemment à l'Ecole des Mines de Paris, a été conçu pour reconstituer la partie chenalisée de ces systèmes complexes.

Dans cette étude, j'ai travaillé sur l'utilisation de ce logiciel de modélisation à l'échelle réservoir des systèmes turbiditiques chenalisés. L'objectif de ce travail est de tester le logiciel TURMY en évaluant la variabilité des architectures qui peuvent être représentées par le logiciel, dans le cas des dépôts associés aux systèmes chenaux-levées turbiditiques méandriques. Cette étude s'appuie sur un cas bien étudié par Mark Deptuck (2003, 2007), qui est en l'occurrence le canyon du Bénin majeur, situé dans le delta du Niger. Cette caractérisation s'appuie sur les paramètres génétiques des chenaux (la migration, la taille, la fréquence, taux d'aggradation,....etc.), combiné à une approche stochastique, TURMY permet de modéliser la géométrie des corps sédimentaires et de reproduire leur architecture répondant aux variations de leurs paramètres génétiques. Leur organisation est méconnue et la sismique 3D reste le seul moyen d'observation de cette architecture complexe.

2. Description d'un système sous marin, «éventail sous-marin»

2.1. Introduction

Le transfert des sédiments depuis le plateau continental vers les plaines abyssales est assuré par les courants de turbidité. Ceux-ci se définissent comme un écoulement en masse d'une eau dense et chargée de sédiment. C'est un écoulement gravitaire dans lequel le sédiment est maintenu en suspension par la turbulence du courant.

Il en résulte un système de dépôt complexe appelé éventail sous-marin qui se développe à l'aval d'une source d'apport continental, avec ou sans connexion avec l'embouchure d'un système fluviodeltaïque (figure 1). L'évolution d'un système turbiditique est contrôlée par des facteurs externes, essentiellement les variations du niveau marin et la tectonique (Weaver et al. 2000).

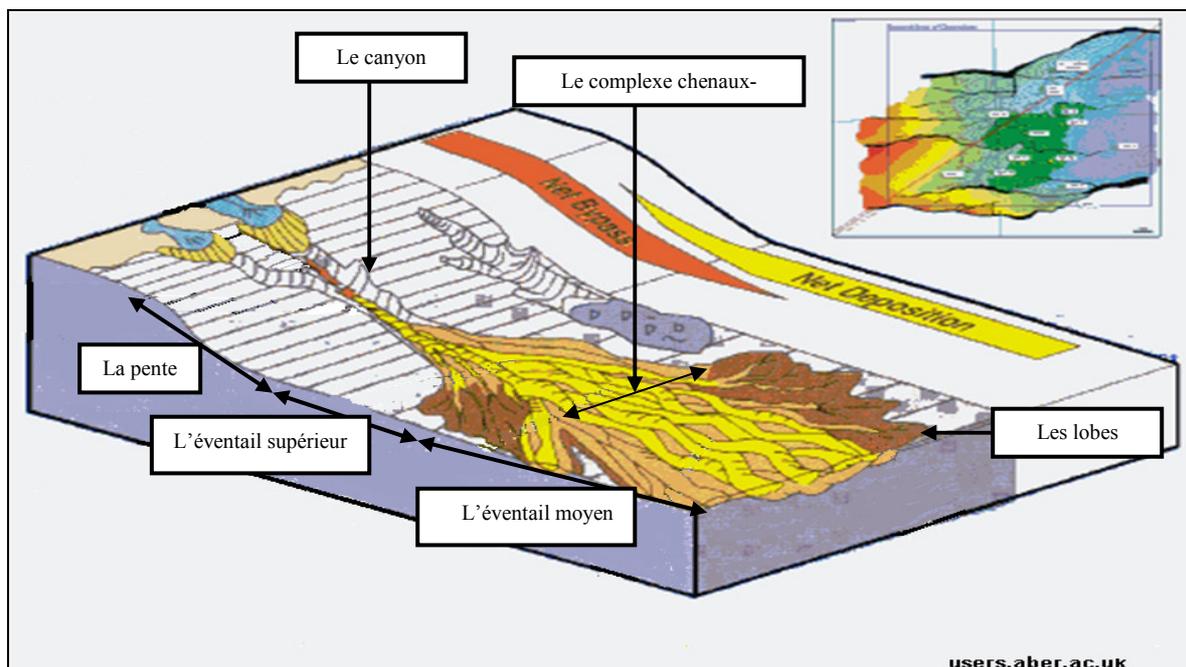


Figure 1 : Bloc 3D illustrant la morphologie d'un système turbiditique actuel.

Il existe plusieurs modèles d'éventails selon leur morphologie. Le cas le plus courant est constitué par un système turbiditique chenalisé se terminant par des lobes comme représenté sur la figure 1. De l'amont à l'aval, ce système comprend :

- Une zone de transit et d'érosion correspondant au **canyon**.
- Une zone de transit / dépôt : c'est le complexe **chenaux-levées**.
- Et une zone dominée par les dépôts où se mettent en place **les lobes distaux**.

2.1.1. Le Canyon

C'est une incision en forme de « V » ou « U », qui se développe depuis le plateau continental, s'étend le long de la pente jusqu'au glacis continental (figure 1). Il sert de corridor dans lequel les sédiments transitent vers la plaine abyssale. C'est une zone d'érosion et de non dépôt. L'érosion est très importante pendant les phases de baisse du niveau marin.

2.1.2. Le système chenaux-levées

A la sortie du canyon, le système évolue en chenal au tracé sinueux et constitue ce qu'on appelle l'éventail supérieur. Les chenaux sont plutôt érosifs en amont et passent progressivement à une morphologie de type dépôt en aval (Mansor, 2004). L'éventail supérieur peut s'étaler sur plusieurs dizaines de kilomètres voire centaines de km. Sa morphologie s'exprime par un profil transversal en U qui peut être bordée, de part et d'autre, par des levées. Dans la partie amont les levées n'existent pas ou sont très peu développées, contrairement à la partie aval où elles ont très développées.

Les levées sont construites par le débordement de la fraction fine. Leur hauteur varie de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, leur largeur atteint les 50 km (Mansor, 2004). Leur relief diminue en s'éloignant de l'axe du chenal. Les sédiments sableux forment des levées basses et étroites et les sédiments argileux et silteux forment des levées bien développées (Migeon, 2000).

2.1.3. Les lobes

Au débouché des chenaux, il se met en place ce qu'on appelle les lobes distaux qui migrent selon la disponibilité de l'espace d'accommodation.

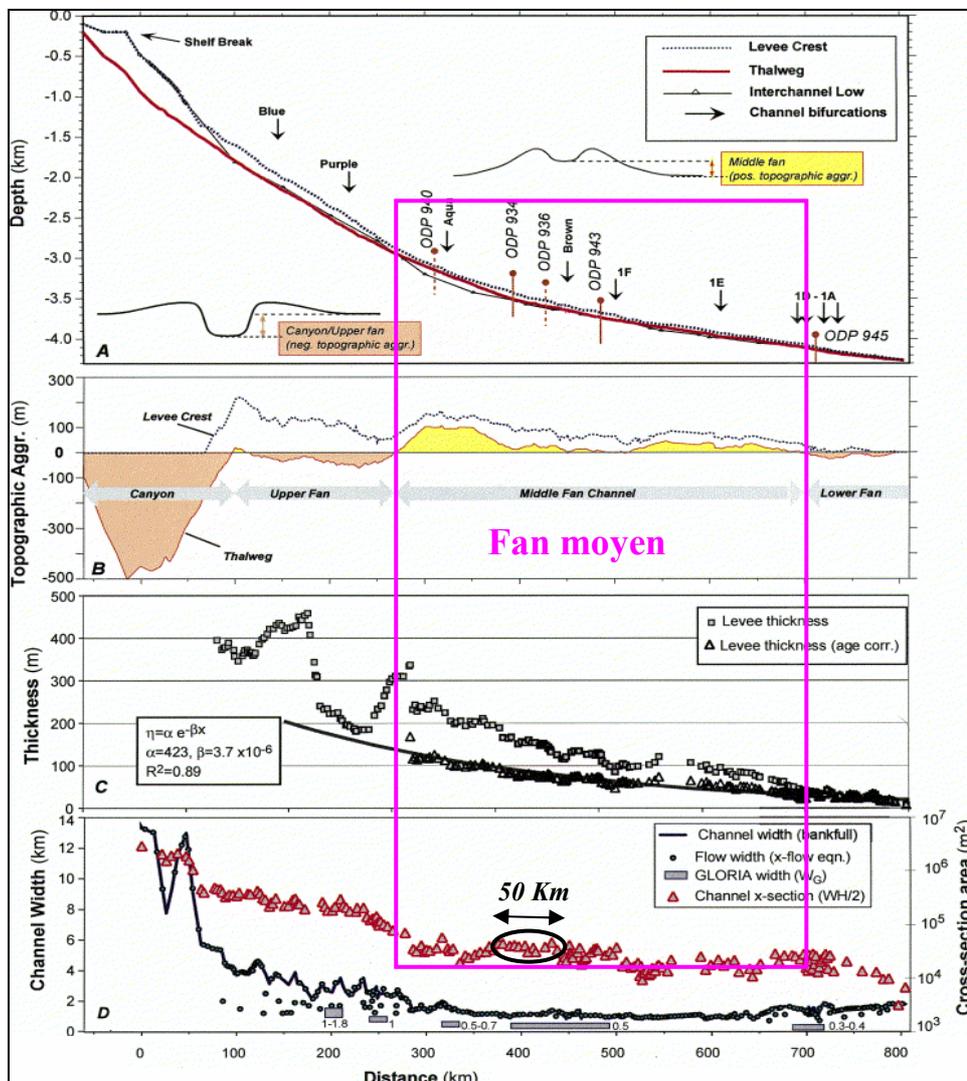


Figure 2 : Mesures des paramètres géométriques dans le système chenaux-levées de l'Amazonie (Pirmez et Irman 2003).

2.2. Caractérisation de l'éventail moyen

Le logiciel de modélisation TURMY s'intéresse aux dépôts chenalisés donc à la zone de l'éventail moyen. Celui-ci se construit par la migration des chenaux tortueux bordés par des levées (figure 3), résultant du débordement des particules fines des turbidites. Les chenaux s'étalent sur plusieurs dizaines de kilomètres. Leurs tracés méandriformes ont la même allure que les chenaux dans les systèmes fluviaux méandriformes.

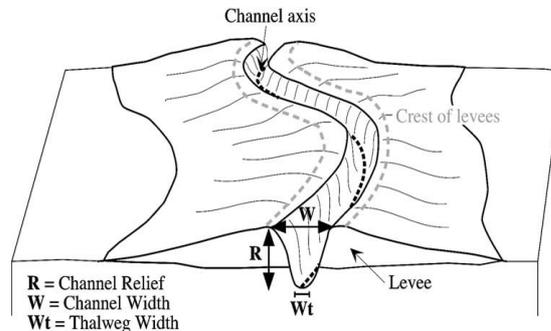


Figure 3 : Illustration de la géométrie d'un chenal (Mabonneau et al, 2002).

Les caractéristiques principales de l'éventail moyen sont les suivantes :

- Chenaux de taille relativement régulière (figure 2).

Dans le fan moyen la géométrie des chenaux paraît régulière, comme on peut le voir sur la figure 2(D) notamment sur une fenêtre de 50 km, notre fenêtre d'observation.

- Présence de levées : les levées sont relativement bien développées dans cette partie du fan. Elles diminuent d'épaisseur en aval, figure 2 (B).
- Possibilité d'avulsion : les avulsions sont très fréquentes et s'observent facilement grâce aux anciens tracés.

2.3. Architecture et processus associés

2.3.1. PROCESSUS

Plusieurs processus influencent l'évolution d'un chenal. Les principaux sont les suivants :

La migration latérale : Lorsque le chenal est en équilibre, il migre latéralement. Il érode la rive externe du méandre et dépose du sable dans l'autre, des LAP's (Lateral Accretion Package) (figures 4 et 5), (Abreu, 2003).

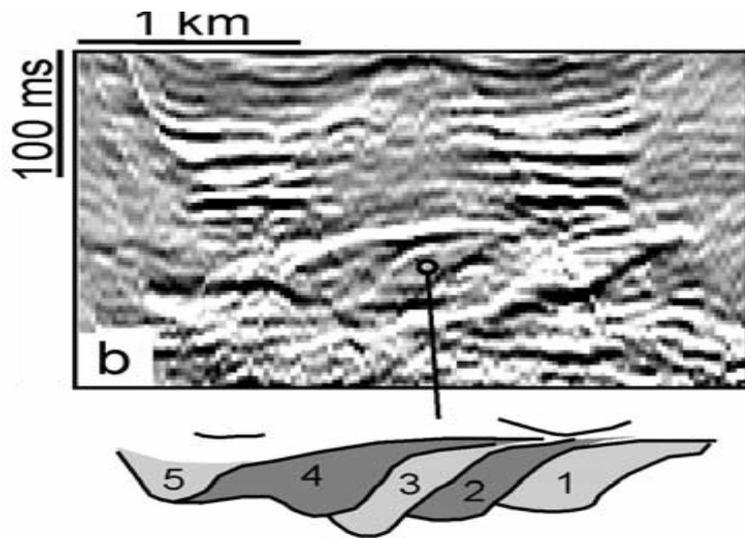


Figure 4 : Profil sismique montrant le processus de la migration et dépôt de « LAP's » (Deptuck, 2003).

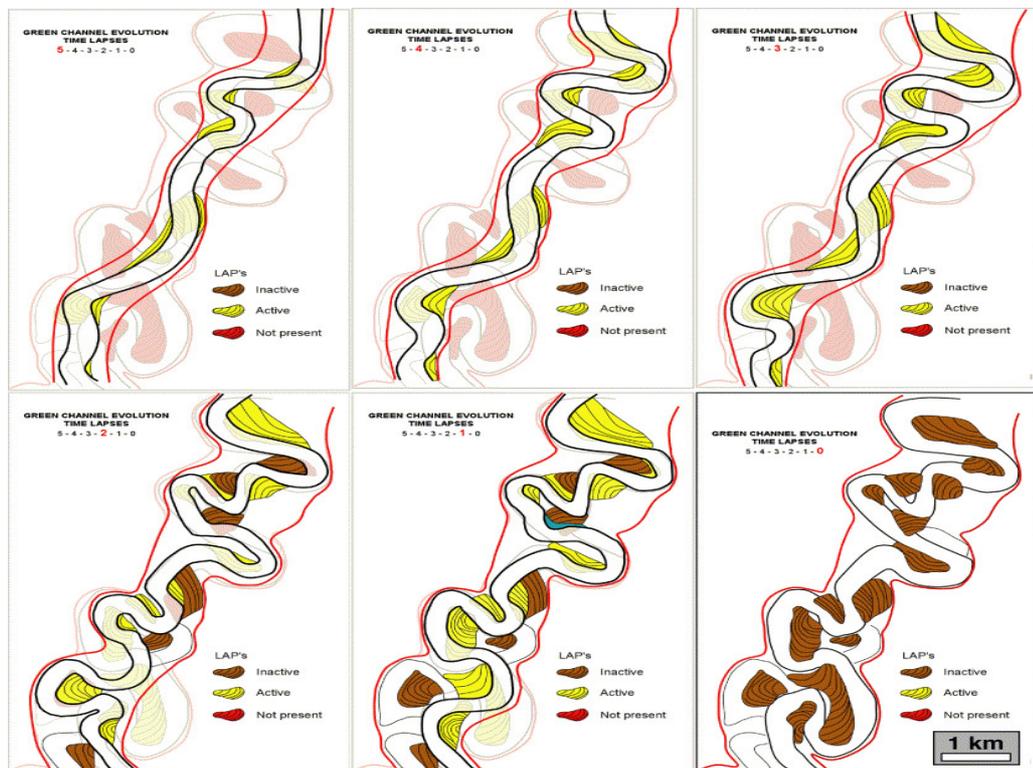


Figure 5 : Illustration de la migration latérale d'un chenal, côte ouest Afrique (Abreu, 2003).

L'aggradation : Lorsque le taux de sédimentation est important le chenal aggrade. Il en résulte une superposition de plusieurs chenaux comme illustré dans la figure 6.

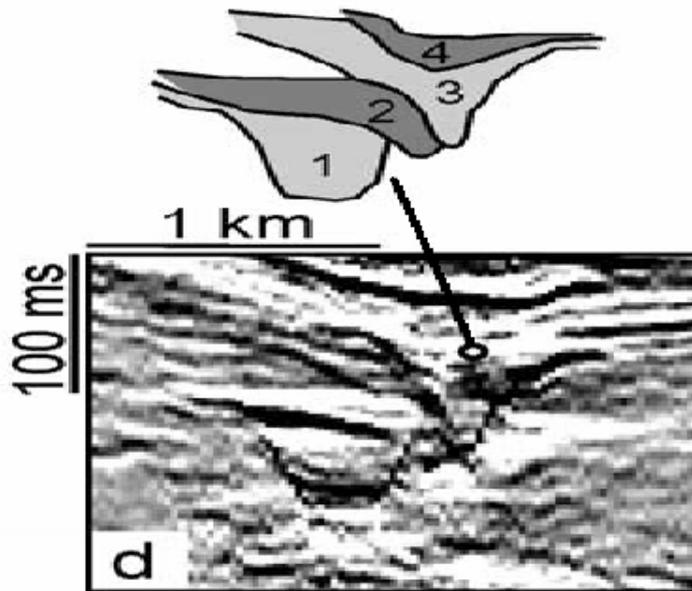


Figure 6 : Profil sismique montrant l'aggradation d'un chenal (Deptuck, 2003).

La rupture de méandre

Se produit lors d'un recouplement des boucles de méandres lorsque celles-ci sont très développées. Il en résulte un chenal plus lisse comme illustré dans la figure 7.

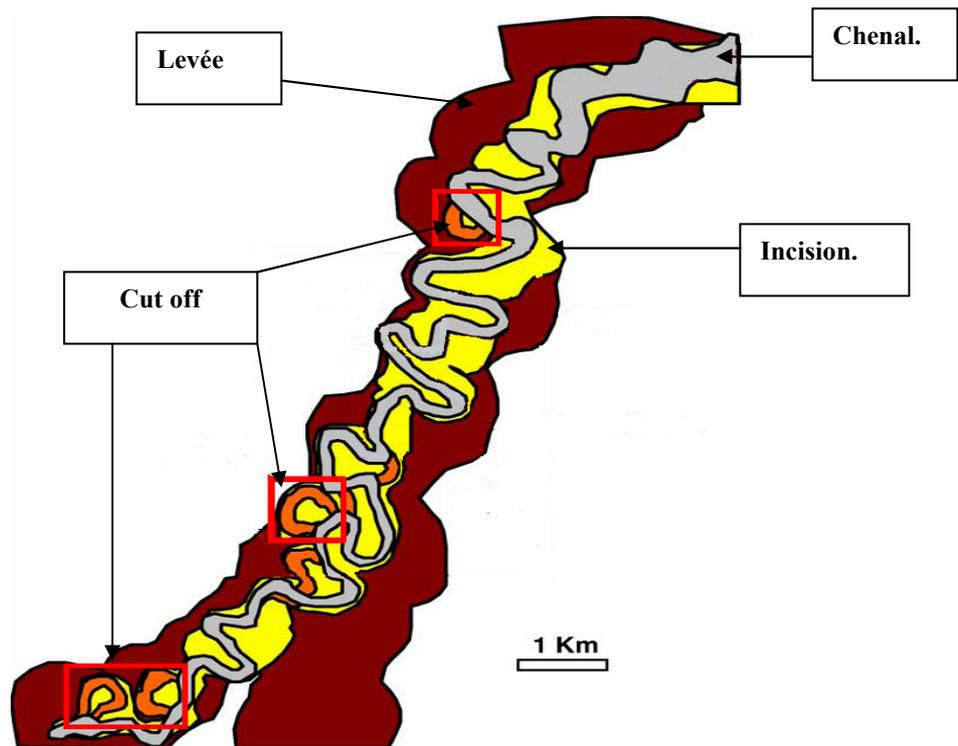


Figure 7 : Illustration de la rupture de méandre « Cut-off » (Abreu et al, 2003)

L'avulsion

Lorsque un chenal abandonne brutalement son cours et change de direction on parle

d'avulsion. Elle apparaît lorsque la pression exercée par la colonne turbiditique excède la limite de stabilité des levées du chenal (Lopez, 2001). Il se crée alors une rupture de la levée, les écoulements débordent et le chenal bondonne son ancien lit (Figure 8).

Elle peut être régionale ou locale et on peut contrôler sa fréquence.

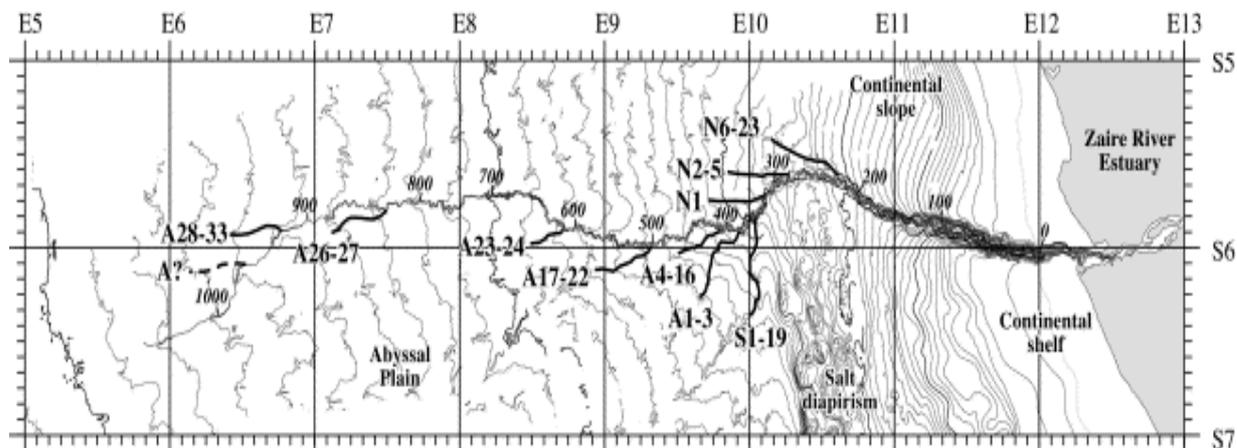


Figure 8 : Carte illustrant le processus de l'avulsion dans le canyon du Zaire (Mabonneau, 2002).

2.3.2. Les faciès

Les faciès associés au turbidite sont variables. On les regroupe en 4 principaux faciès sismique, (Mayall, Jones et Casey, 2006), (figure 9).

- 1-Basal lag : (dépôts de fond de chenal).
- 2-Slump and debris flows.
- 3-High N/G stacked channels : dépôts chenalisés engendrés par la migration et/ou l'aggradation des chenaux.
- 4-Low N/G channel-levees: correspondent au dépôt des levées.

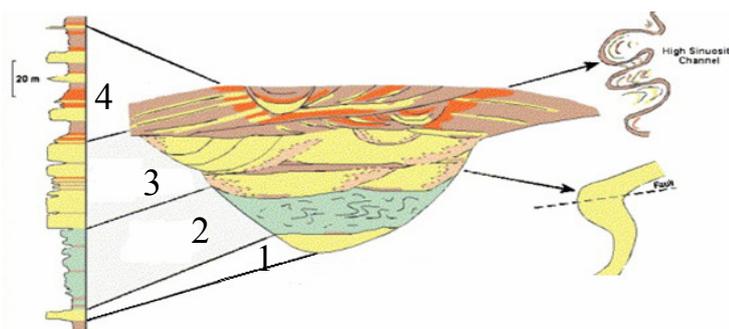


Figure 9 : Architecture et faciès associés aux turbidites (Mayall, Jones et Casey, 2006).

2.3.3. Architecture et faciès

Très souvent l'architecture se résume en chenaux de différentes tailles, emboîtés dans une large vallée d'incision. Ces chenaux dits confinés migrent latéralement ou aggradent pour donner des systèmes complexes comme on le voit sur la figure 10.

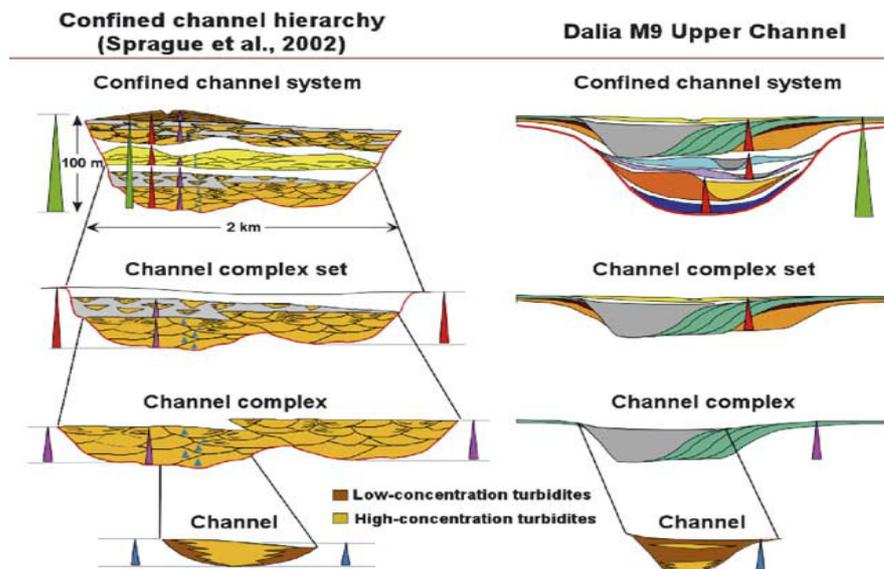


Figure 10 : Architecture des chenaux confinés dans une vallée d'incision (Abreu et al, 2003).

3. Description de TURMY

Le modèle de TURMY est basé sur l'analogie avec le système fluvial à méandre. Il s'appuie sur une modification de la migration du chenal utilisée pour le fluvial. Cette modification permet de restituer le tracé plus tortueux des chenaux sous-marins.

Le logiciel fonctionne sous LINUX comme sous WINDOWS. Il est doté d'une interface assez simple (figure 11) qui permet de prédéfinir les paramètres génétiques d'un système chenaux-levées et de visualiser son évolution. Ces paramètres sont nécessaires pour entreprendre une simulation. Ils sont présentés dans le logiciel par grands domaines (classés par onglet), qui sont les suivants :

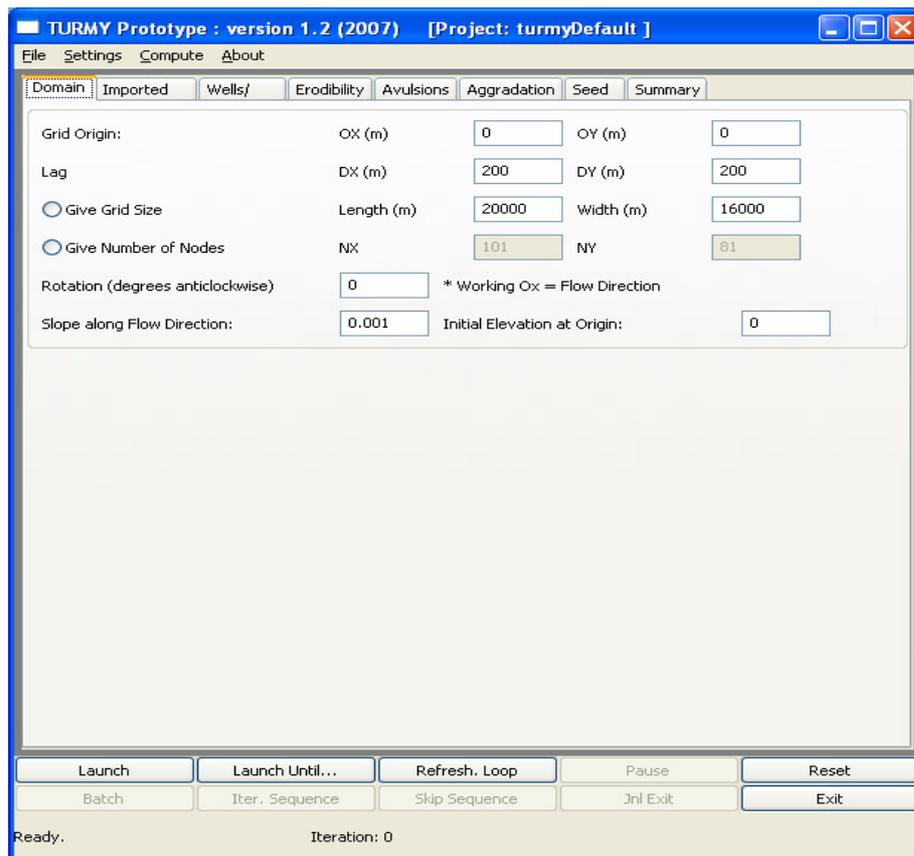


Figure 11 : Illustration de l'interface de TURMY.

3.1. Domaine

L'onglet **Domain** permet de définir le domaine que l'on veut modéliser. L'utilisateur doit définir les dimensions de la grille (ou domaine), la taille de la grille, sa maille ainsi que la pente.

3.2. Wells/Sediment Load

Cette fonction n'est opérationnelle. Les dépôts sont décrits par une couleur correspondant au faciès déposé par un processus. Avec la fonction **Sediment Load**, on pourra faire varier la composition de la turbidite. La fonction **Well** permettra d'introduire des données de puits.

3.3. Erodibility channel

Sur cet onglet on définit la géométrie du chenal : hauteur, profondeur moyenne et son tracé initial si on le souhaite (figure 12, b), sinon il est tiré au sort (figure 12, a). On peut également modifier la valeur de l'érodabilité, qui correspond à une valeur moyenne de migration en introduisant une carte d'érodabilité pour contrôler la migration du chenal.

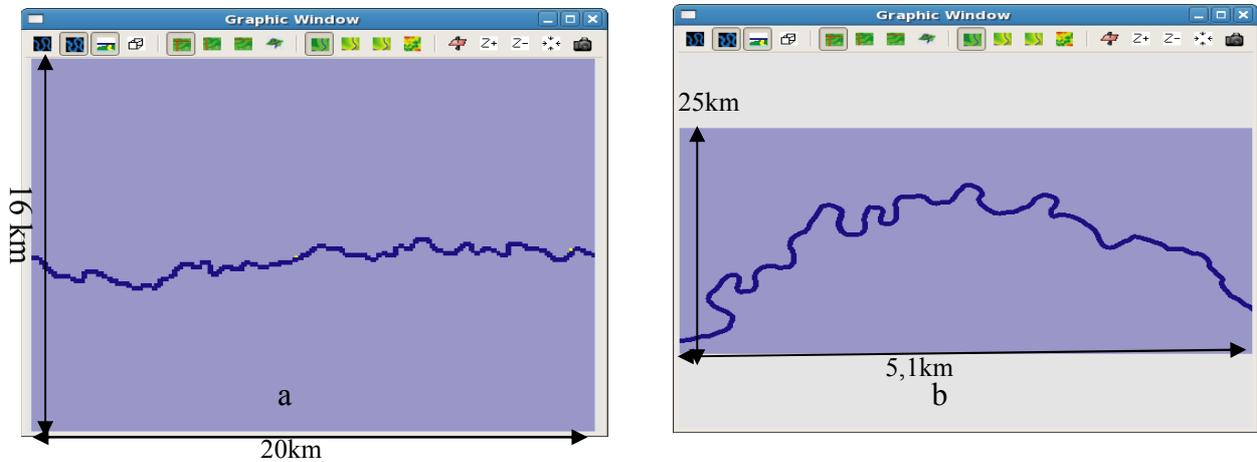


Figure 12 : Canal tirés au sort (a) et canal importé (b).

Par défaut l'érodabilité est constante sur tout le domaine et vaut par défaut 2×10^{-8} (Sun, 1996). Le chenal peut alors balayer celui-ci.

On utilise une carte d'érodabilité pour contrôler la migration du chenal qui reste alors confiné dans la zone à forte érodabilité (figure 12, c).

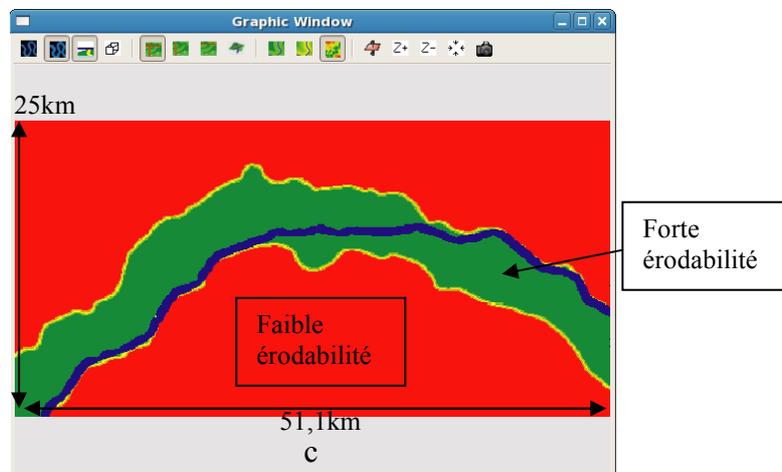


Figure 12 c: Canal tiré au sort avec érodabilité prédéfini.

Sur la carte d'érodabilité, le chenal est tracé dans la zone de forte érodabilité (zone verte sur la figure 12c), et évite la zone de faible érodabilité (jaune et rouge).

L'érodabilité favorise la migration du chenal. On l'utilise pour localiser des zones à sable. Le tracé des chenaux tiré au sort tient alors compte de la carte d'érodabilité (figure 12, c).

3.4. Avulsion

Il est possible de réaliser des avulsions à partir de rupture de levée, à l'intérieur du domaine (local) ou en amont (régionale) afin de garder la variabilité naturelle d'un système.

3.5. Aggradation

Le menu 'Aggradation' propose les différentes actions qui reflètent les processus de dépôt ou incision verticaux, associés au passage d'un courant turbiditique dans le chenal sous-marin :

- ✓ **Drapping** : c'est le cas où le chenal est « inactif ». Il se dépose alors une épaisseur constante dans tout le bassin (comparable à un dépôt pélagique).
- ✓ **Channel fill** : Le chenal est rempli par des dépôts de *channel fill* (dépôts très fin « mud »).
- ✓ **Steady** : La turbidite est en équilibre, son passage conduit à une migration latérale, lente et progressive, et dépose du sable de type 'LAP's (Lateral Accretion Package).
- ✓ **Channel lag** : Lorsque l'énergie de la turbidite s'atténue l'écoulement abandonne les éléments lourds dans le fond du chenal et peut déborder des levées. On observe une aggradation.
- ✓ **Erosive** : c'est une incision simple et verticale.

3.6. Visualisation des résultats

Dans TURMY chaque « itération » correspond à un événement. Ce logiciel offre la possibilité de visualiser et de contrôler les simulations en temps réel sur une fenêtre graphique (figure 13) qui offre plusieurs angles de vision, une vue aérienne (figure a), en section selon l'écoulement ou transversale (figure b) et en 3D (figure c).

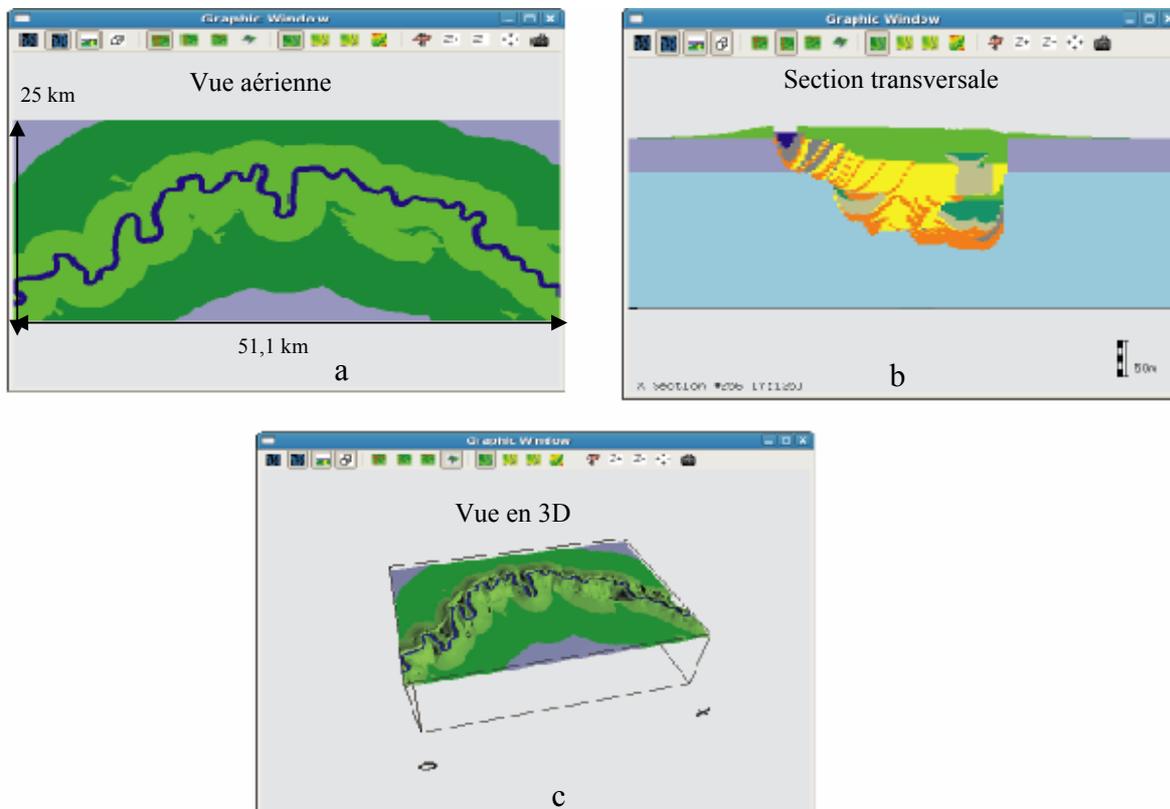


Figure 13 : Fenêtres graphiques des différents angles de vision de TURMY

A l'aide de son menu aisément utilisable il permet également :

- De sauvegarder la simulation par étape et d'y revenir en arrière si on le souhaite.
- D'exporter des données de type puits, surface topographique et tracé du chenal.
- De visualiser les proportions de faciès en matrice (courbe verticale de proportion).

4. Cas d'étude

4.1. Localisation de la zone étudiée

Les chenaux sous-marins bordés par des levées sont des environnements communs des milieux mixtes situés à l'aval des systèmes deltaïques. Nous nous intéressons dans notre étude au canyon majeur du Bénin, situé sur la côte ouest du delta du Niger (figure 14). Le delta se développe sur la marge ouest de l'Afrique et débouche sur le golfe de Guinée. On s'intéresse plus précisément à la partie du système situé entre les isobathes 800 et 1900m.

Son nom de Bénin majeur, le différencie du canyon mineur (qui est plus petit et situé plus au nord), et le rattache à la rivière du Bénin (Be, figure 14). L'âge d'incision est incertain. Par ailleurs des marqueurs corrélés grâce aux puits industriels, indiquent que ce système serait actif au cours du Pliocène-Pléistocène (Deptuck et al 2003, 2007).

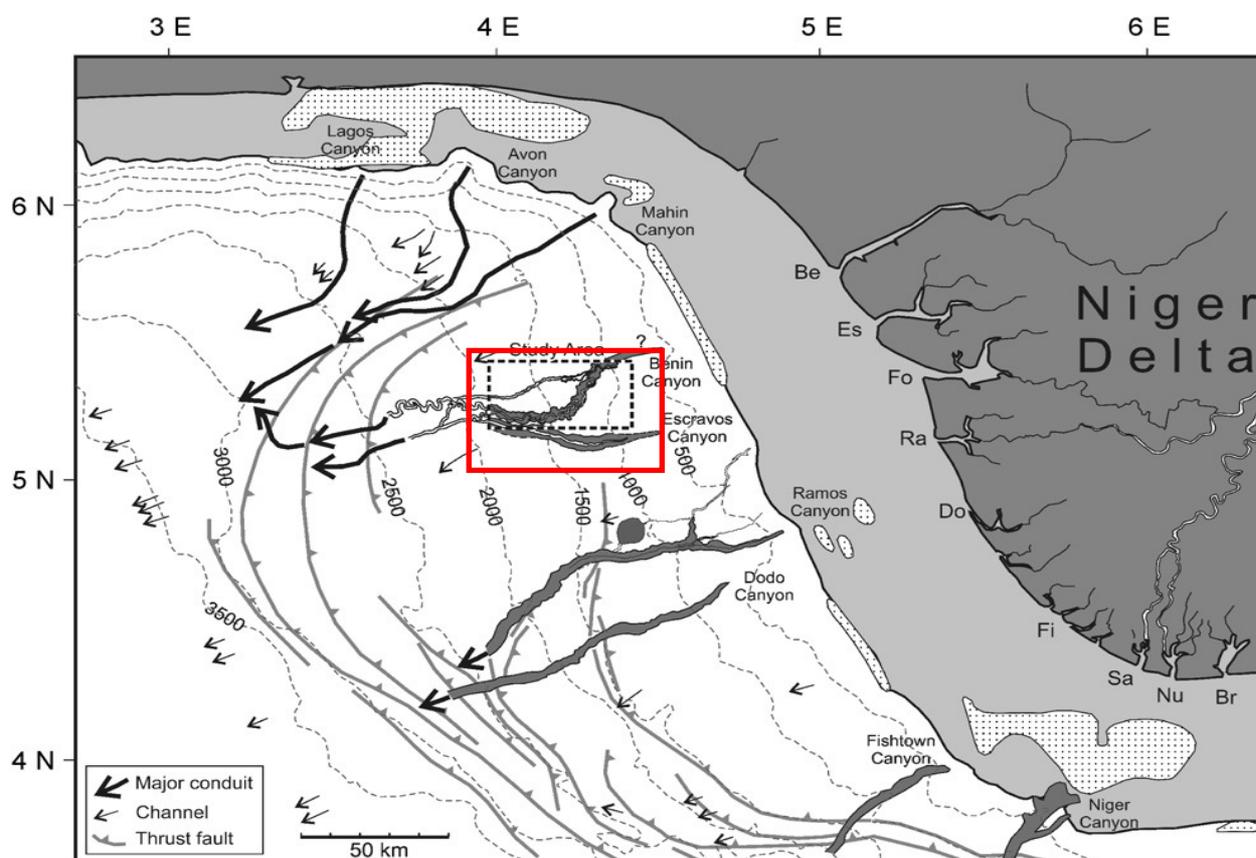


Figure 14 : Carte de localisation de la zone étudiée (Deptuck 2007).

Notre choix s'est porté sur ce cas d'étude car on dispose d'excellentes données sur :

- Les tracés des chenaux.
- Leur géométrie.
- L'évolution du remplissage.

4.2. Description du complexe Chenaux-levées majeur du Bénin

Le développement de l'outil sismique, notamment la sismique, 3D a permis de bien comprendre la géométrie globale des systèmes chenaux-levées. Un segment de 54 km de long et large de 25 km a été bien cartographié (figure 16) (Deptuck, 2003, 2007), grâce à une étude sismique détaillée. Les profils ont été disposés perpendiculairement à l'axe de la vallée d'incision, tous les 2km le long du canyon.

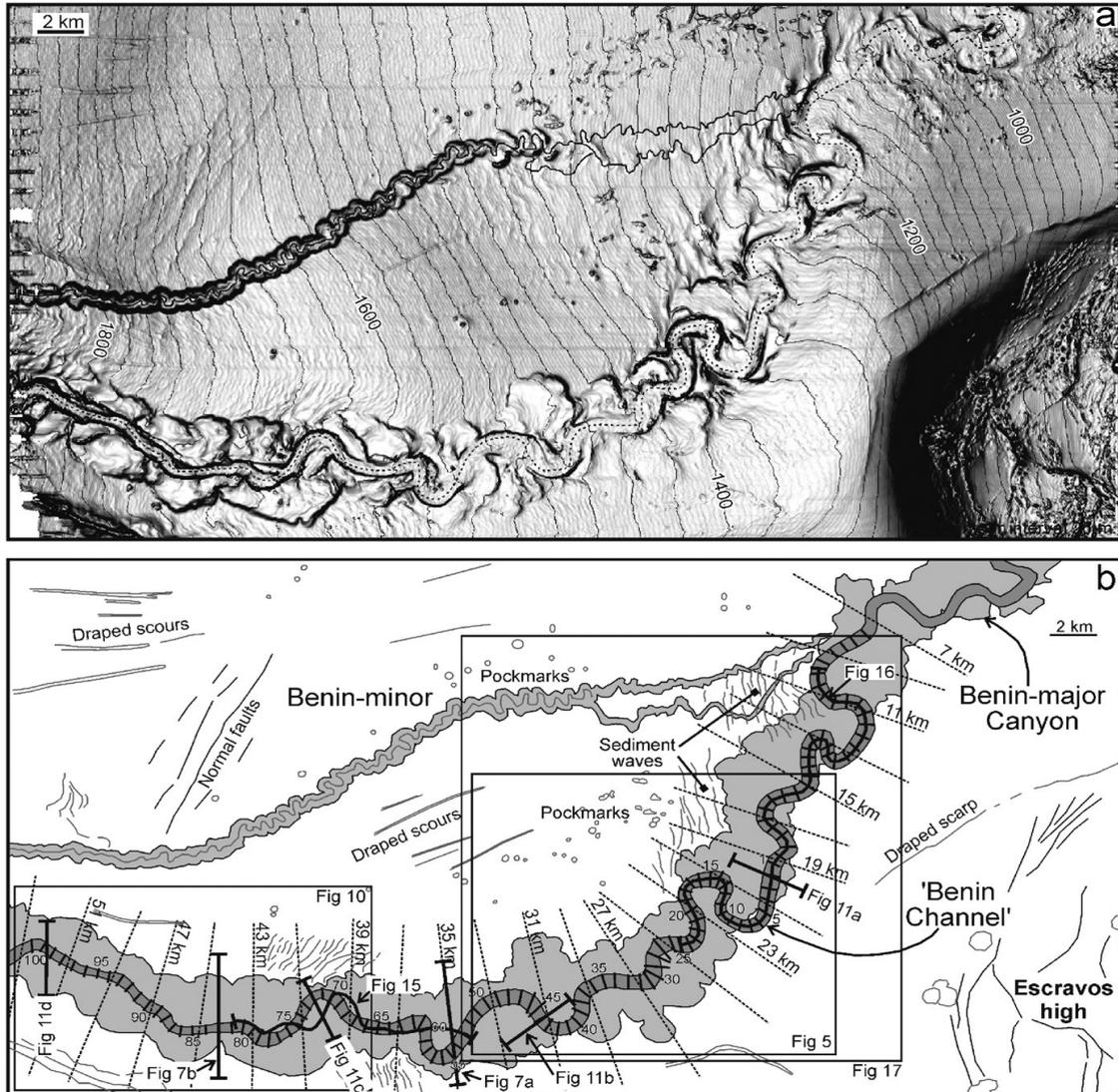


Figure 15 : Carte en isobathe au niveau du canyon majeur du Bénin (Deptuck, 2007).

Le remplissage du canyon majeur du Bénin montre une épaisseur maximale de 350 m au niveau de l'axe du chenal. Sa largeur, distance entre les levées externes, varie par endroit entre 2,7 et 5,1km (figure 16), (Deptuck, 2007). Il correspond à une vallée d'incision, bordée par deux levées externes. Sa base, érosive est large de 350m en moyenne. Elle atteint parfois les 700m. La profondeur moyenne de l'incision est de 170 m. Elle atteint les 330m dans la partie ouest la zone étudiée.

A l'intérieur de cette vallée se confie un système de chenaux-levées aggradant. Il correspond au remplissage de la vallée

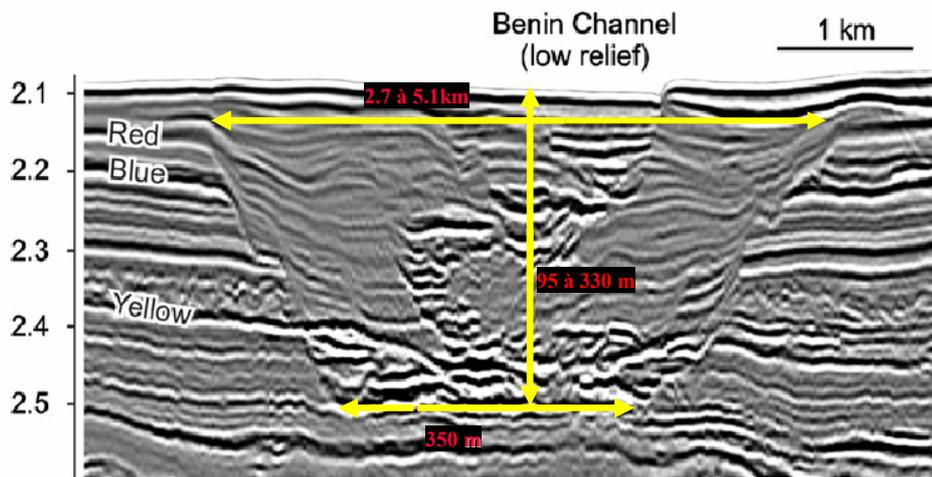


Figure 16 : Profil sismique et Coupe transversale dans la vallée d'incision (Deptuck, 2007).

4.3. Mesures de la vallée et des chenaux

Les observations et la mesure des paramètres du canyon majeur du Bénin sont basées sur la stratigraphie sismique. Pour ce faire des profils sismiques ont été dressés perpendiculairement à l'allongement de la vallée, tout les 2 km (figure 17). Ce qui a permis de mesurer la largeur, la profondeur, la sinuosité et le gradient de la pente des différents chenaux. Par ailleurs, plusieurs chenaux ont pu être cartographiés.

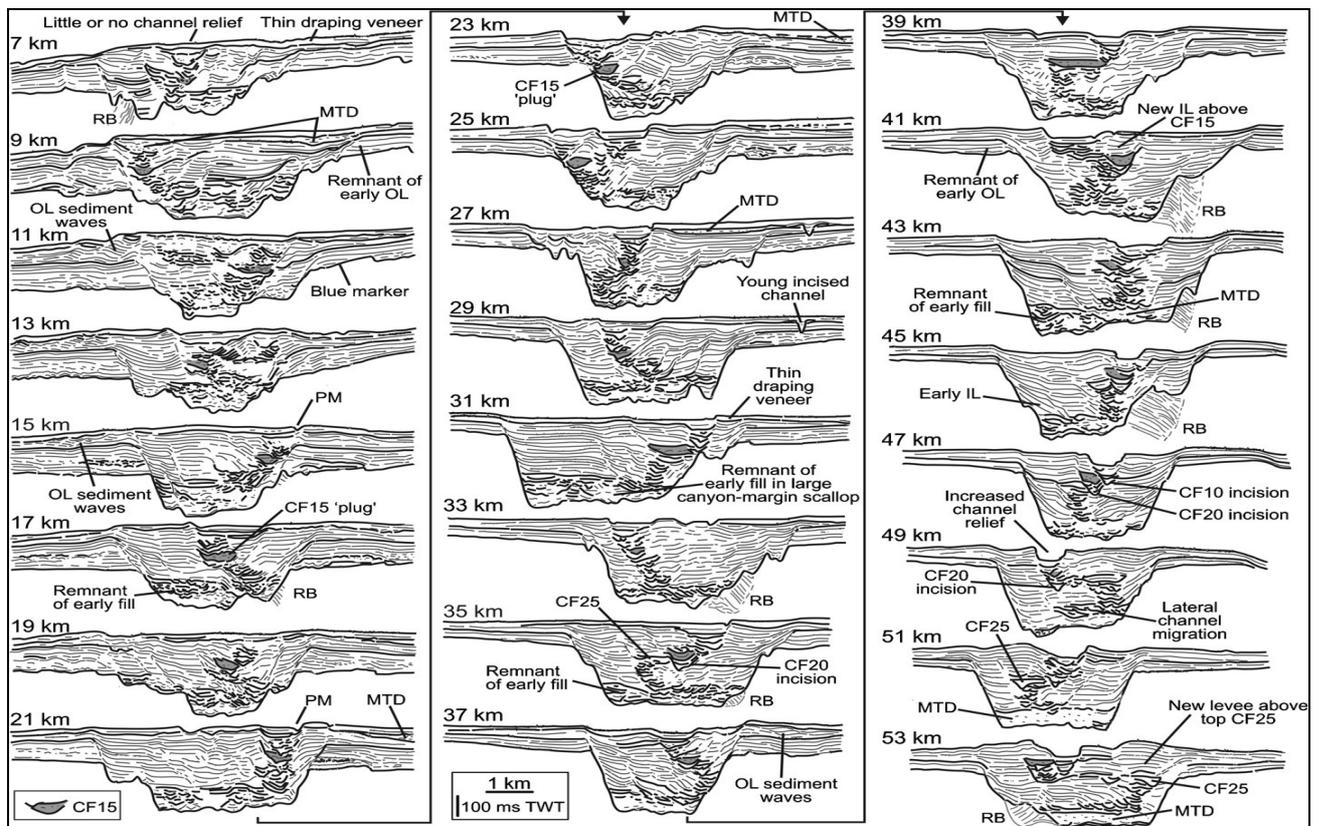


Figure 17 : Profils et mesures sismiques le long de la vallée d'incision (Deptuck, 2007).

Chenaux CF	Long (KM)	Largeur base (m)	Largeur sommet (m)	sinuosité	Epaisseur remplissage (m)	Morphologie
1	67	300-700	1300	2,5 - 1,07		U /
2	67	250-650	1200	2,5 - 1,07	22 ~ 40	U /
3	64	200-500	1000	2,5 - 1,07	<20(E) ~ 30(w)	U
5	62	150-300	400-600	2,5 - 1,06	<20(E) ~ 50(w)	U - V
7	24	100-200	-	2,5/	10 ~ 27	V
10	68	100-200	250	2,9 - 1,06	<15 ~ 25	V
15	66	150-300	500	2,75 -1,2	32 ~ 48	U - V
17	61	150-250	-	2,7 -1,2	10 ~ 18	U - V
20	48	100-200	-	2,7 -1,2	-	V
25	17	150-250	1100	/1,15	25 ~ 35	U - V
27	17	100-200	-	2,3 - 1,22	<15	U
28	30	100-200	-	2,0/	<15	U
33	36	120-220	-	2,3 - 1,2	16 ~ 30	U

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des paramètres géométriques des différents chenaux définies par Deptuck (U et V désignent la morphologie des chenaux) (Deptuck 2007).

4.4. Evolution du systèmes chenaux levée aggradant

L'évolution du canyon majeur du Bénin peut être subdivisée en une forte période d'incision suivie par trois phases de remplissage. Chaque phase est définie par la géométrie des chenaux et leur évolution dans l'espace.

4.4.1. La période d'incision

L'incision et la mise en place du système chenaux-levées majeur du Bénin sont associées à l'instabilité de la pente du plateau continental. L'incision commence par un escarpement qui correspondrait à un corridor à travers lequel les sédiments glissent vers la plaine abyssale. Se développant le long des failles de la pente continentale, un escarpement haut de 20 m est visible sur la figure 18. Il s'étend parallèlement au canyon majeur.

Nissen, Haskel et Coteril (1999) décrivent ces corridors comme des voies (stries) de glissement. Posamentier, Meizarwin, Wisman et Plawman (2000) les interprètent comme des cannelures (grooves) se développant sous la base d'un transport en masse de sédiment (In Deptuck, 2007).

La largeur de la vallée d'incision varie entre 2,7 à 5,11 Km. Ses marges présentent une pente raide de 13 à 26°. La base de l'incision est érosive et irrégulière, souvent concave en forme de U symétrique ou dissymétrique. Elle est plus profonde en aval où la pente plus accentuée, favorise l'érosion. Le gradient de la pente varie entre 5 et 40m/km.

Cette incision engendre un arrachement de blocs, des effondrements et des slumps qui constitueraient les premiers dépôts (Deptuck, 2003).

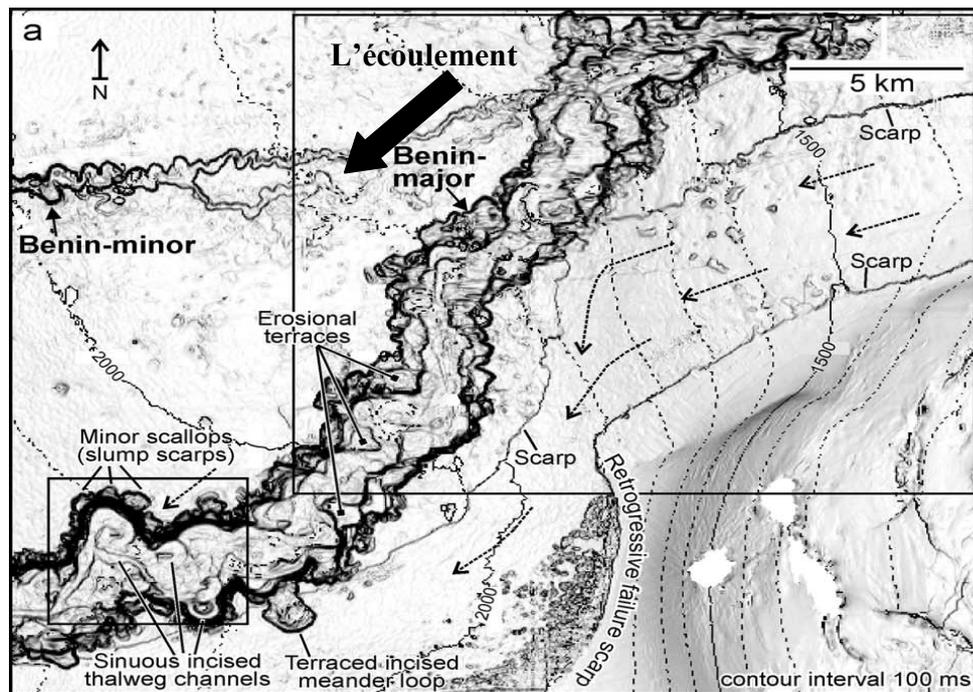


Figure 18 : Morphologie du canyon majeur et l'escarpement (Deptuck, 2007).

4.4.2. Phases de remplissage

Le remplissage correspond à l'aggradation d'un système chenaux - levées confiné. L'axe des chenaux étroits est représenté sur l'imagerie sismique par des réflecteurs mal organisés et de haute amplitude. Ils sont bordés par des réflecteurs parallèles et de basse amplitude ; ce sont les levées qui nappent « onlap » les marges de la vallée d'incision.

On distingue plusieurs phases de remplissage ;

a) Phase de remplissage 1

Sur l'imagerie sismique, les dépôts situés directement sur la base érosive sont représentés par des réflecteurs discontinus, chaotiques et de haute résolution. Ils correspondraient à un dépôt de fond du chenal. C'est un matériel grossier abandonné par le chenal et souvent mal classé. Dans la partie ouest de la zone étudiée, les dépôts sont plus au moins organisés. Ils sont représentés par une migration latérale puis verticale des chenaux avec mise en place de fines levées.

b) Phase de remplissage 2

Se caractérise par une aggradation du système «chenaux-levées» confiné. Durant cette phase, les chenaux sont étroits et présentent une forte sinuosité. Les cycles de méandre sont immatures et montrent des rayons de courbure et une longueur d'onde réduits. Les levées les plus prononcées se développent durant cette période, et montrent une épaisseur considérable. Elle drapent les reliefs et stabilisent les escarpements des marges de la vallée d'incision.

La transition vers la phase de remplissage 3 est brutale. Elle se marque par une diminution du nombre de chenaux (18 pour la phase 2 et 11 pour la phase 3). De plus ils deviennent moins sinueux et les rayons de courbure s'élargissent.

c) Phase de remplissage 3

Elle se caractérise par une migration latérale des chenaux ce qui accroît la sinuosité et la largeur des chenaux vers le sommet. Durant cette phase, le taux d'aggradation des dépôts de chenal est supérieur à l'aggradation des levées. De ce fait les reliefs s'aplanissent progressivement ce qui favorise l'avulsion régionale et l'abandon du système.

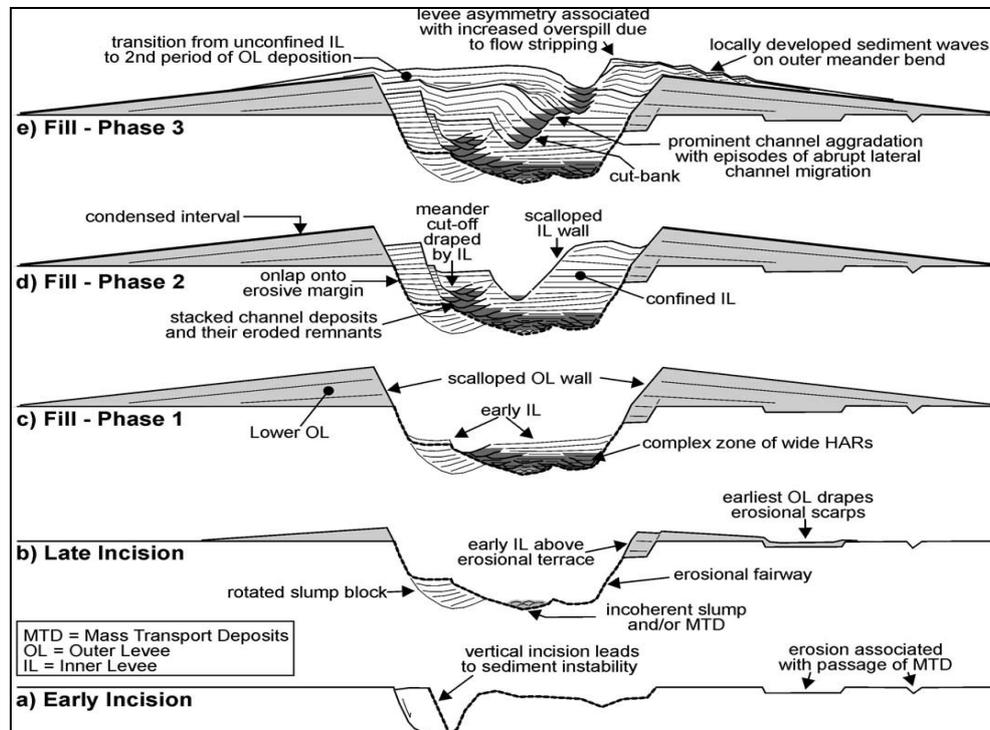


Figure 19 : Les différentes phases d'évolution du canyon du Bénin majeur (Deptuck, 2003).

4.4.3. Les levées externes

L'incision commence au niveau du marqueur bleu (Figure 16) au dessus duquel subsiste la levée externe. Cette dernière a cessé de se déposer lorsque l'incision est assez profonde pour contenir l'écoulement turbiditique et ne permet nul débordement.

Les levées externes présentent une épaisseur maximale de 200m et drapent la structure du complexe chenaux-levées du Bénin majeur. Elles sont représentées sur l'imagerie sismique par des réflecteurs parallèles, continus et de basse amplitude, qui se biseautent en s'éloignant de la vallée. La partie sommitale, (levée externe supérieure), se distingue par des réflecteurs plus au moins discontinus et de forte amplitude. Cette levée externe supérieure développe localement des rides (Deptuck, 2003), qui drapent la levée externe inférieure. Elle commence à se mettre en place au fur et à mesure que la vallée se comble (figure 20).

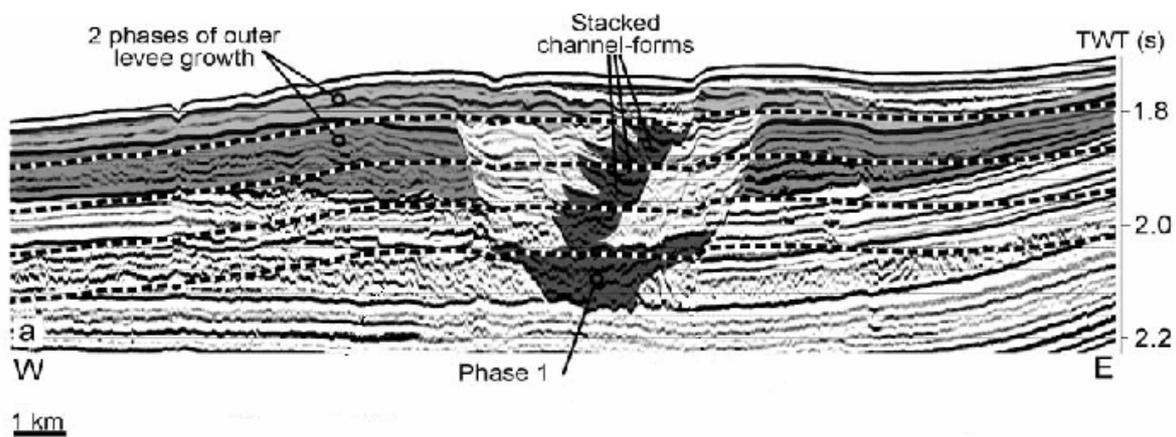


Figure 20 : Profile sismique montrant les phases de dépôt des levées externes (Deptuck, 2003).

5. Modélisation

Après avoir présenté le logiciel TURMY, les systèmes turbiditiques actuels ainsi que le cas d'étude, qui offre l'opportunité d'exploiter des données réelles bien synthétisées par Deptuck (2003, 2007), j'ai digitalisé et construit les paramètres géométriques à introduire dans la logiciel. En suite, j'ai essayé de reproduire les différents tracés des chenaux et le bloc en s'appuyant sur les caractéristiques décrites précédemment, enfin je discuterai les résultats.

5.1. Channel centerline

a- Définition du Channel centerline

La ligne centrale correspond au tracé initial que doit suivre un chenal lors d'une simulation sur TURMY. Ce tracé peut être en 2D ou en 3D. Son origine doit se situer au début du domaine défini, sur l'axe des 'x'.

b- Construction des lignes centrales

Les tracés des chenaux, tirés de données Deptuck (2007) (figure 21), sont digitalisés sur une table de digitalisation simple, appelé DIGNIV qui fonctionne sous DOS. A la sortie on récupère un fichier EXCEL avec les coordonnées du tracé par rapport à une origine (X, Y). L'axe 'X' doit être dirigé dans le sens de l'écoulement du chenal. Pour pouvoir être chargé sur le logiciel, Les fichiers EXCEL sont sauvegardés en en format TXT, auxquels en ajoute une entête spécifique au logiciel TURMY. Au total 5 centerlines ont été construit, correspondant à 5 chenaux bien cartographiés à l'aide des outils de sismique réflexion (Deptuck, 2003 et 2007) (figure 16 et 17).

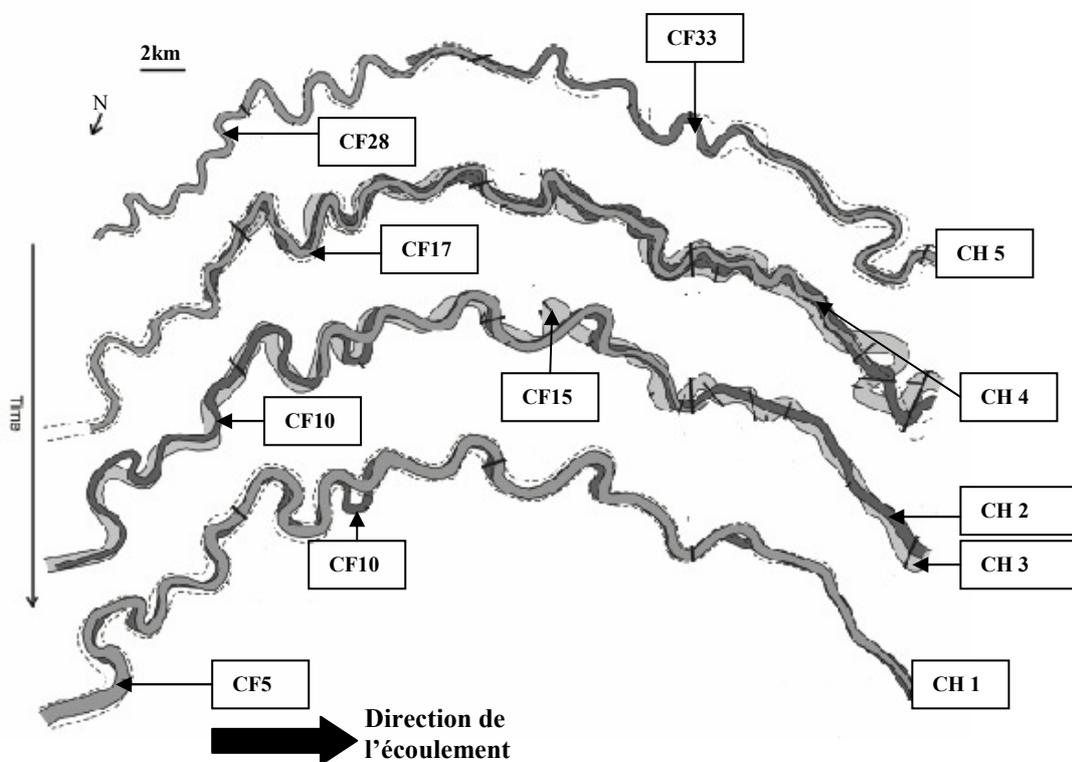


Figure 21 : Les chenaux qui seront digitalisés (Deptuck, 2007).

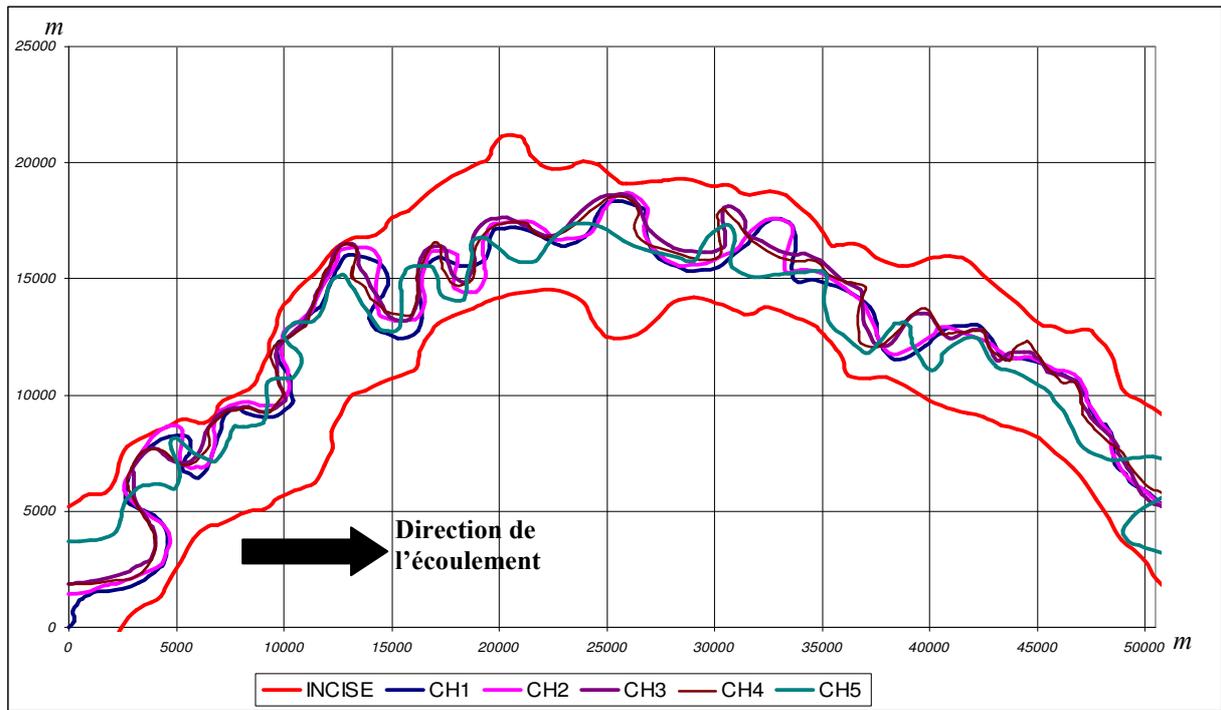
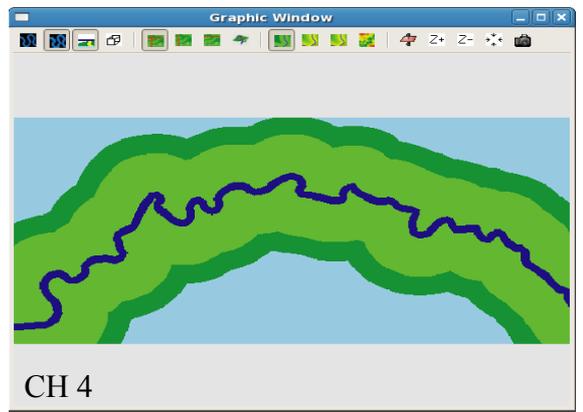
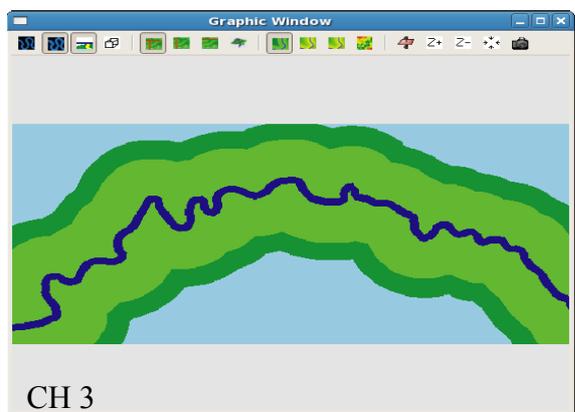
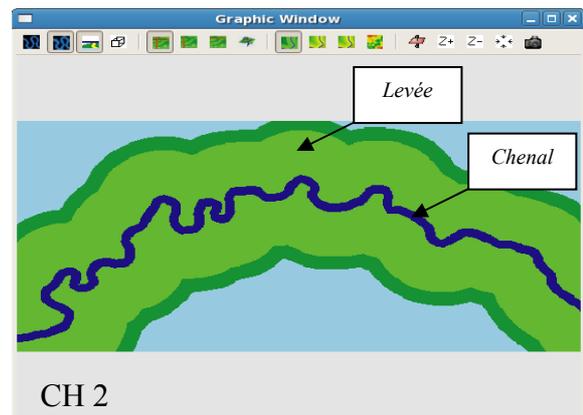
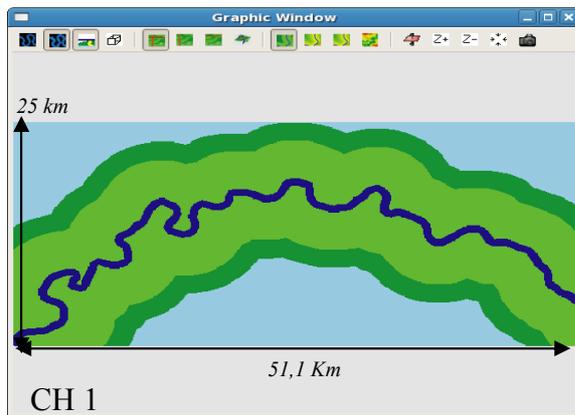


Figure 22 : La vallée incisée et superposition des lignes centrales construits.



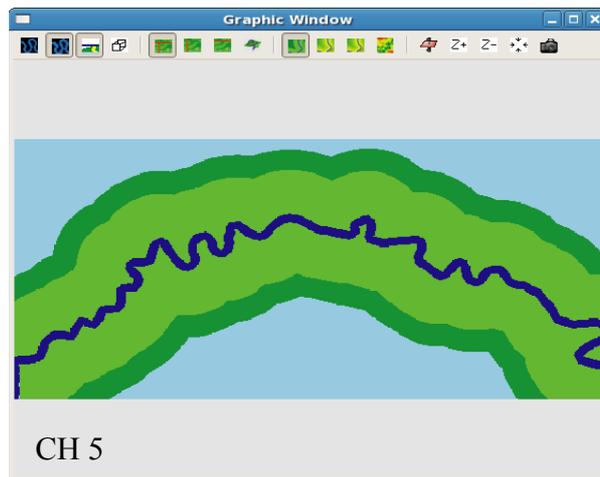


Figure 23 : Simulation des 5 lignes centrales construites avec dépôt de levées (en vert foncé et claire).

c- Stratigraphie des chenaux digitalisés

Les chenaux digitalisés CH 1, CH2, CH3, CH4 et CH5 sont les chenaux les plus continus qui ont pu être cartographié à l'aide de la sismique (Deptuck, 2007). Ils correspondent respectivement aux chenaux CF 5, CF 10, CF 15, CF 17, CF 28, et CF33 (Deptuck, 2007), ces derniers sont associé a un seule chenal (figure 21 et 24).

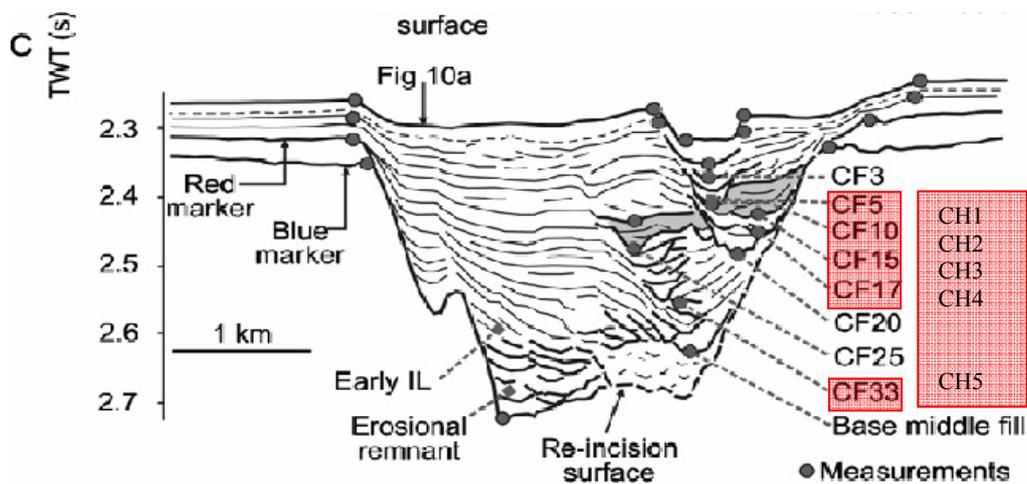


Figure 24 : Place des chenaux digitalisés dans le système (Deptuck, 2007).

La partie proximale du chenal CH5 correspond au chenal CF28 de Deptuck et sa partie distale au CF 33. C'est le chenal le plus ancien qui appartient à la partie inférieure de la phase de remplissage 2, décrite antérieurement. Cette phase se caractérise par une aggradation de chenaux étroits et sinueux.

Les chenaux CH4 et CH3 (CF 17, CF 15) appartiennent à la partie supérieure de la phase de remplissage 2. Elle caractérise par des chenaux aggradant puis migrant latéralement et devenant de plus en plus larges et de moins en moins sinueux.

Les chenaux CH 2 et CH1 correspondent respectivement aux chenaux CF10 et CF5. Ils font partie de la phase de remplissage 3 qui est dominée par une migration latérale de chenaux larges et sinueux.

5.2. Carte d'érodabilité (Emap)

5.2.1. a- Définition de la carte d'érodabilité

La carte d'érodabilité est la représentation graphique, en 2D, de la vallée d'incision. On affecte des valeurs réelles entre -2 et +2 à la carte, positives dans la zone érodée, négatives en dehors de celle-ci et puis 0 le long de son mur ou marge. En fin ces valeurs sont transformées en d'érodabilité d'érodabilité (E -8).

5.2.2. b- Construction de la carte d'érodabilité

Comme les chenaux, la vallée d'incision est digitalisée à l'aide de la table DIGNIV. Les données récupérées sont représentées en carte 2D sur un graphique Excel, sur lequel on superpose une grille préalablement construite. Et puis on affecte les valeurs d'érosion comme décrit ci-dessus. La maille de la grille est choisie selon l'objectif. Dans notre cas elle est de 100m. Elle est large de 25km et longue de 51km, ce qui nous fait une grille de 512X251 noeuds.

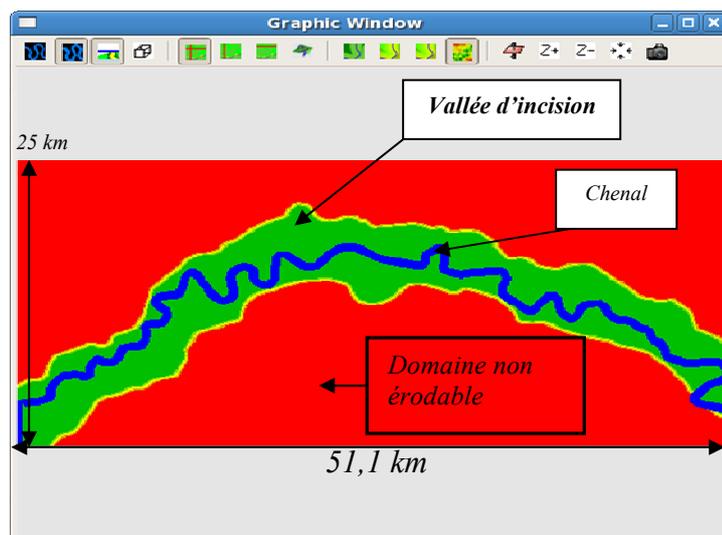


Figure 25 : Chargement de la carte d'érodabilité et chenal importé.

6. Test et simulations

6.1. Test de la longueur d'onde

6.1.1. Analyse des longueurs d'ondes données par le logiciel

Dans le modèle de TURMY, la longueur d'onde « λ » des boucles de méandre est, par construction, fonction de la largeur des chenaux, donc n'est pas influencée par la profondeur.

Dans un domaine donné, pour un même tracé de chenal et avec des paramètres identiques, on fait migrer le chenal pour différentes largeurs. Le résultat étant indépendant de la profondeur, on fixe celle ci arbitrairement à 10 m.

Ainsi on obtient les résultats résumés dans le tableau ci-dessous :

Largeur (m)	Nbre. itérations	Nbre de boucles	taille de la plaine (Km)	$\lambda/2$ calculé
200	2000	52	20	0,66
200	3000	50	20	0,59
200	4000	50	20	0,59
200	5000	52	20	0,6

Tableau 2 : Calcul de la demi-longueur d'onde pour un chenal à 200m de largeur.

Pour un nombre d'itération croissant on constate que la valeur de la longueur d'onde est stable à partir de 3000 itérations.

Pour deux longueurs données le rapport des longueurs d'onde s'exprime comme suit :

$$\lambda_1 / \lambda_2 = (W_1 / W_2)^{1/1,45}$$

Cette formule est déduite des relations utilisées

$$\lambda \approx H_{\text{flow}}, H_{\text{flow}} \approx (W/21,3)^{1/1,45}$$

(D'après Bridge, 2003 in, « FLUMY users guide, June, 2007 »).

[W=largeur du chenal, H=profondeur équivalente pour FLUMY]

Le modèle de TURMY étant basé sur l'analogie du celui de FLUMY, cette dernière formule nous servira pour le calcul des longueurs d'ondes prévues des chenaux de largeurs variées.

On considère que le système est stable à 3000 Itérations (longueur d'onde relativement stable) et on calcule les prévisions des longueurs d'ondes pour différente largeur. Les résultats sont résumés dans le tableau 3.

W (M)	200	300	500	600	700	800	900	1000	1100
$\lambda/2$ (Km)	0,59	0,78	1,1	1,25	1,39	1,53	1,66	1,79	1,91

Tableau3 : Calcul des demi-longueurs d'ondes prévues pour différentes largeur de chenal

En suite pour différente largeur on fait migrer un tracé (tiré au sort) pendant 3000 itérations (figure 26) et on mesure les longueurs d'ondes pour différentes largeurs. La mesure

est effectuée en mesurant la distance moyenne entre deux points d'inflexion. Il faut définir une taille de la plaine telle qu'elle donne suffisamment de boucles pour que l'estimation soit représentative. Les résultats sont dressés dans le tableau 4.

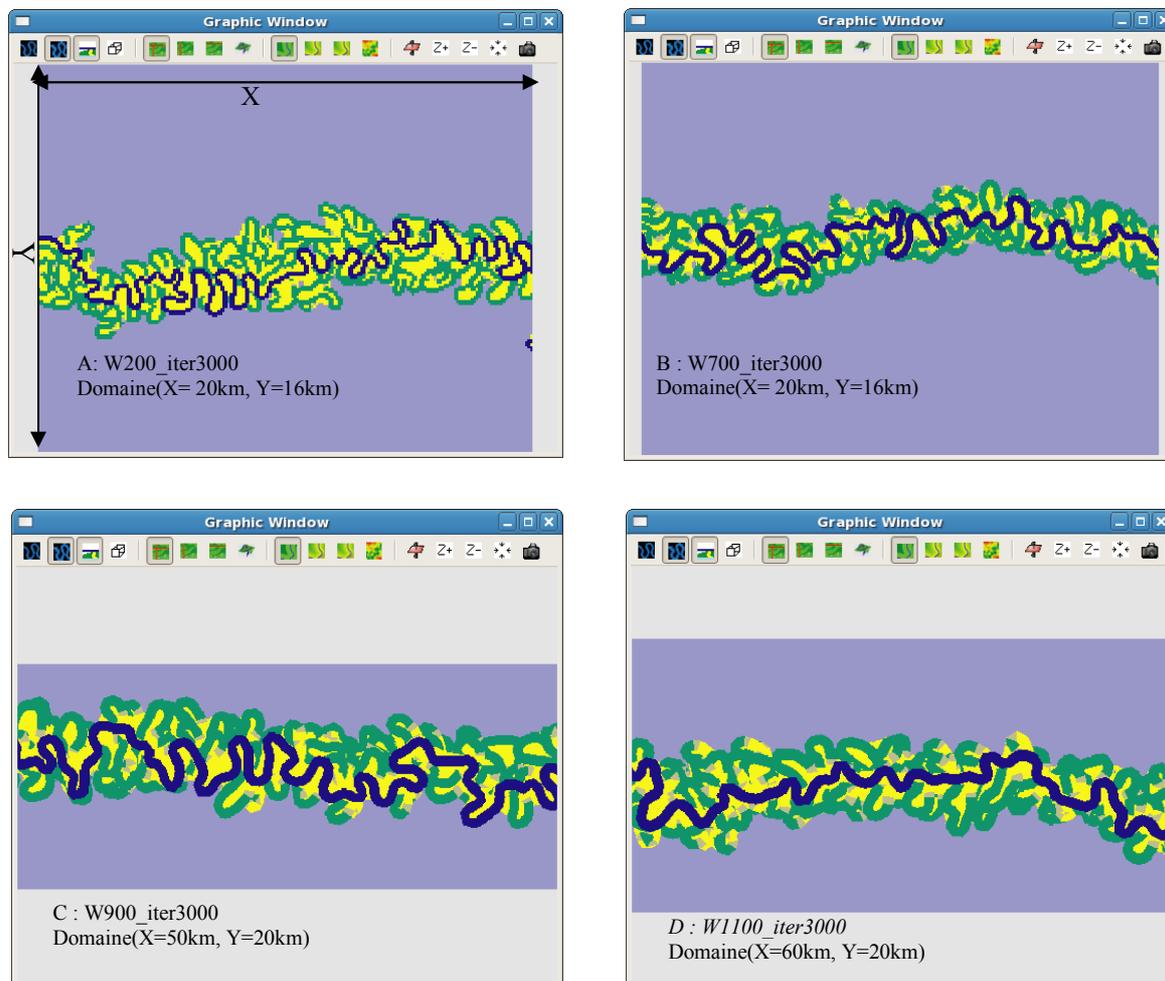


Figure26 : Variation des longueurs d'onde en fonction de la largeur des chenaux.

W (m)	L. Plaine (Km)	IT	Nb de boucles	$\lambda/2$ Min (Km)	$\lambda/2$ Max (Km)	$\lambda/2$ moyenne (Km)
200	20	2000	52	0,24	1,31	0,66
200	20	3000	50	0,37	1,11	0,59
500	20	3000	24	0,68	1,95	1,07
700	50	3000	45	0,92	2,75	1,54
1000	60	3000	39	1,47	2,74	1,91
1100	60	3000	38	1,04	3,13	1,98

Tableau 4 : Calcule des demi-longueurs moyennes pour différentes largeurs de chenal.

6.2. Cas d'études

6.2.1. Estimation des longueurs d'ondes du cas étudié

Comme dans le cas précédent, on mesure de la même façon la longueur d'onde réelle des 5 chenaux digitalisés (figure 21). Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

	Nb de boucles	$\lambda/2$ MIN (km)	$\lambda/2$ MAX(km)	$\lambda/2$ Moyenne (km)
chenal1	27	1	2,6	1,81
chenal2	27	1	2,8	1,85
chenal3	27	1	2,6	1,62
chenal4	32	0,8	2,6	1,47
chenal5	31	0,8	2,4	1,44

Tableau 5 : Estimations des demi-longueurs d'onde réelles des différents chenaux

6.2.2. Largeurs

Les données de largeurs calculées sur la sismique ont été représentées dans le tableau 1. On dispose de largeurs du fond des chenaux qui oscillent entre 150 et 700m, (250m en moyenne pour la totalité des chenaux) et des largeurs du sommet des chenaux qui varient entre 250 et 1300 (850 en moyenne pour la totalité des chenaux). La longueur d'onde réelle estimée pour ces chenaux varie entre 1,44 et 1,85km (Tableau 5).

	Bénin			TURMY Largeur prévue pour $\lambda/2$ observé (m)
	W base CH (m)	W sommet CH (m)	$\lambda/2$ (km) observé	
CH1	150-300	400- 600	1,81	1020
CH2	100-200	>250	1,85	1050
CH3	150-300	>500	1,62	870
CH4	150-250		1,47	760
CH5	100-220		1,44	730

Tableau 6 : Longueurs d'onde observées (Bénin) et largeur de chenal correspondant dans TURMY.

A partir des demis longueurs d'onde estimées pour des largeurs de chenaux données dans TURMY (tableau 3 et 4), nous proposons pour chacun des chenaux du Bénin, auquel est associé une longueur d'onde, la largeur correspondant dans TURMY (Tableau 6).

Conclusion

La comparaison avec les largeurs de fond de chenal et de sommet de chenal, montre que les largeurs de sommet de chenal semblent plus adaptés pour faire les simulations que celles de base de chenal. Toutefois l'incertitude sur les largeurs réelles et le peu de mesures nécessiterait de comparer avec d'autres systèmes.

Il semblerait que TURMY sur estime les largeurs. Si ce résultat se confirme sur d'autres études, une modification des paramètres de migration devrait être envisagée.

Après avoir choisi les bons paramètres géométriques et longueurs d'ondes, on passe aux simulations et à la reproduction de l'architecture du système.

6.2.3. Reproduction des tracés des chenaux

On fixant les meilleurs paramètres géométriques du chenal, à savoir : la largeur (entre 700 et 1000m) et la profondeur (30m c'est l'épaisseur moyenne des chenaux) ; on fait des simulations pour reproduire les chenaux récents par migration simple des chenaux anciens.

Ce test consiste à faire des simulations en migration simple- non conditionnelle dans un premier temps puis conditionnelle, i.e. : avec contrainte d'érodabilité, sur un tracé de chenal ancien (CH5) pour voir si l'on peut reproduire les tracés des chenaux plus récents (CH4).

Comparaison des tracés initiaux des chenaux

Au regard des tracés initiaux des chenaux CH5 et CH4 (figure 27), on constate que ces tracés sont parallèles, presque superposables et présentent pratiquement les mêmes boucles de méandre, excepté dans la parti aval où le chenal récent (CH4), en bleu sur la figure 28, devient rectiligne.

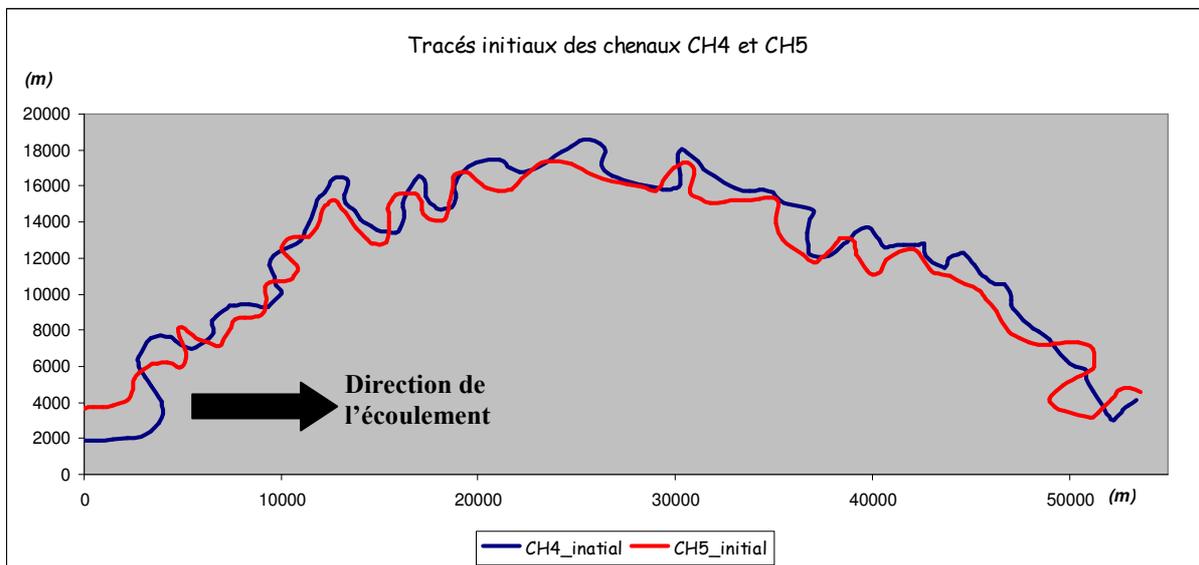


Figure 27 : Comparaison des tracés initiaux des chenaux Ch5 et CH4

Voyons à présent ce que donnent les simulations faites sur TURMY :

Simulations non conditionnelles

Dans les simulations non conditionnelles (figure 28), le tracé migre librement. Les boucles de méandres se développent et donnent des longueurs d'ondes assez régulières.

A moins de 100 itérations, le chenal ne migre pas assez et reste presque collé au tracé initial. Entre 100 et 200 itérations (figure 28), on se rapproche de certaines boucles de méandre que l'en peut presque reconstituer (cercles blancs sur la figure 28). Mais le tracé CH4 (tracé bleu marine) en entier est loin d'être reproduit, notamment à son extrémité aval où il est étiré et devient rectiligne.

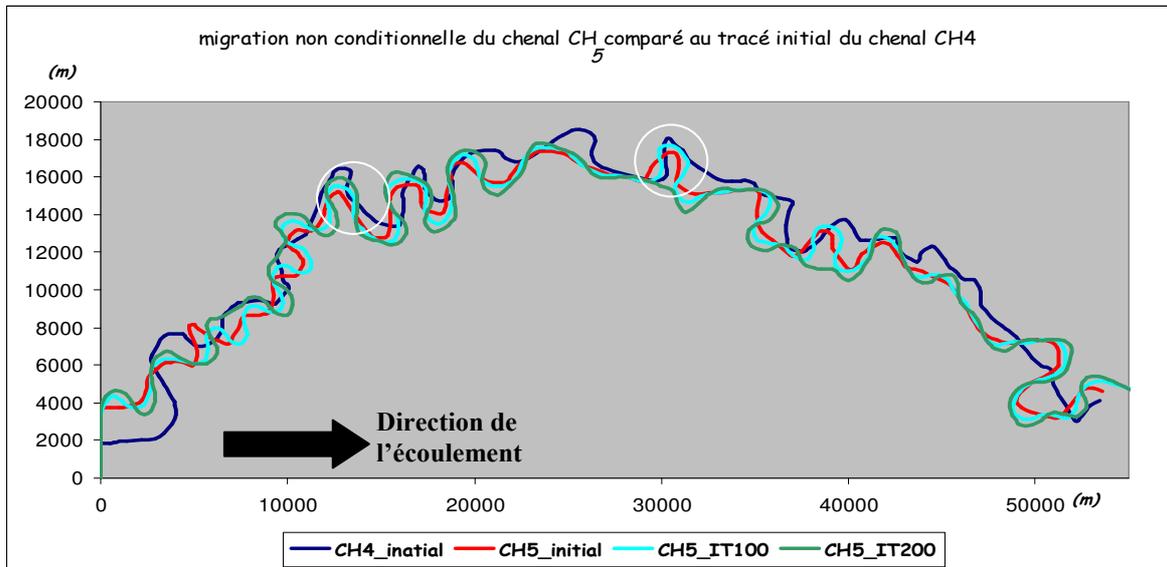


Figure 28 : Essai de reproduction des tracés récents (CH 4) avec un chenal ancien CH5 sans contrainte d'érodabilité (CH=chenal, $W=900$ m. et IT.= nombre d'itération).

A plus de 500 itérations les boucles se développent largement et les ruptures de méandre (Cut off) apparaissent (figure 29). Par conséquent, ceci nous éloigne du tracé CH4 que l'on veut reproduire.

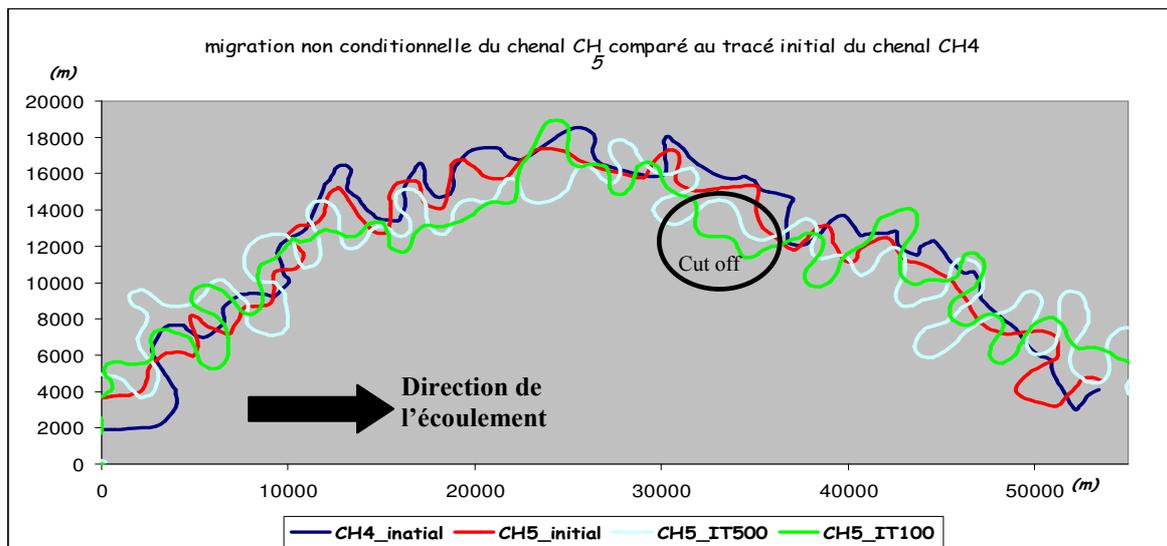


Figure 29 : Essai de reproduction d'un tracé récent CH 4 avec un chenal ancien CH5 sans contrainte d'érodabilité.

Par contre lorsque l'on effectue les mêmes tests, avec une migration conditionnée par une contrainte d'érodabilité, les chenaux migrent rapidement et les ruptures de méandres apparaissent plutôt que dans les simulations non conditionnelles (Figure 30).

Simulations conditionnelles

Maintenant on fait contraindre la migration avec une carte d'érodabilité. La migration semble plus rapide et les ruptures de méandre sont plus fréquentes.

A moins de 50 itérations le chenal migre peu et ne s'écarte pas du tracé initial. Entre 50 et 100 itérations on voit certaines boucles se rapprocher du tracé CH4 que l'en veut reconstituer (figure 30). Mais comme dans le cas précédent on n'est pas proche de la reproduction entière du tracé. A 100 itérations, en reproduit plus au moins bien deux boucles de méandres entourées en blanc sur la figure 30.

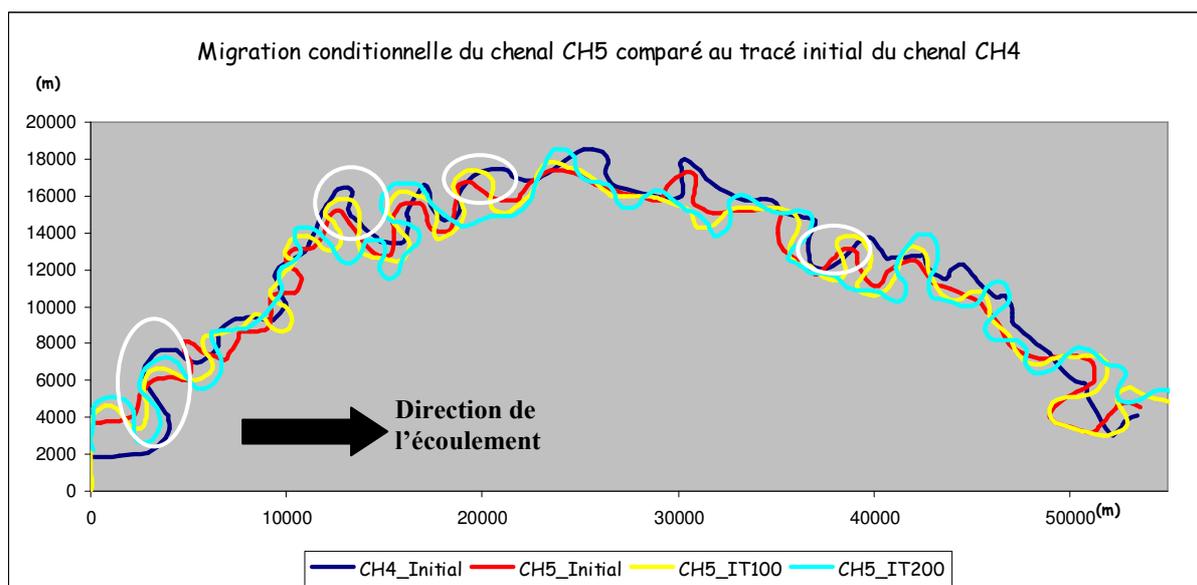


Figure 30 : Essai de reproduction d'un tracé récent (CH 4) avec un chenal ancien CH5 avec contrainte d'érodabilité.

Le tracé à 200 itérations (figure 30), reproduit presque parfaitement la première boucle du tracé initial. Comme pour les cas précités le tracé entier n'est pas reproduit. Au delà de 500 itérations on commence à avoir les ruptures de méandres ce qui nous éloigne de plus en plus du tracé à reproduire (figure 31).

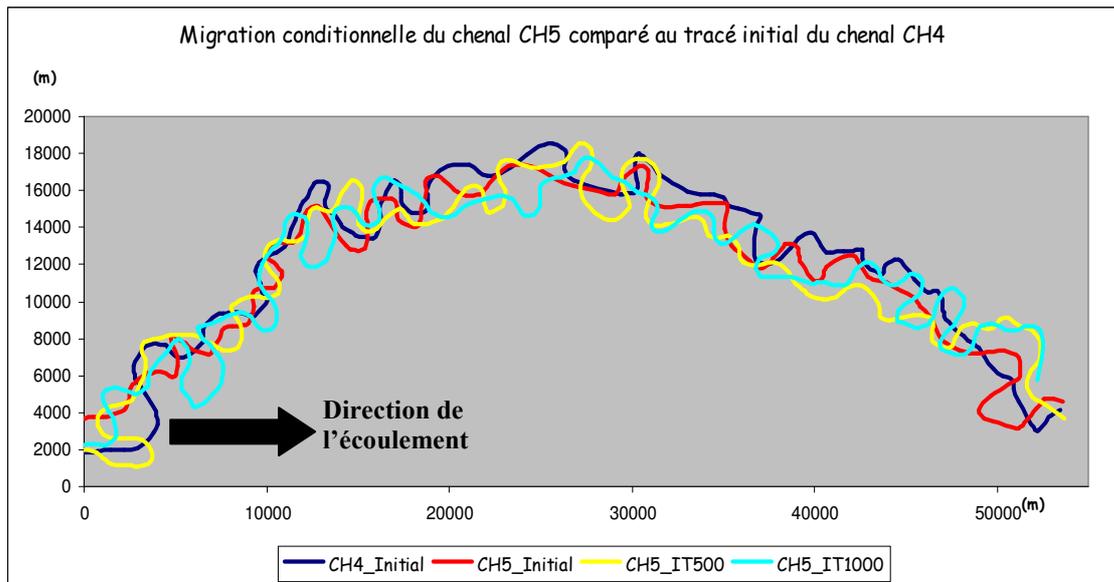


Figure 31 : Essai de reproduction d'un tracé récent (CH 4) avec un chenal ancien CH5 avec contrainte d'érodabilité.

Discussion

En dépit des rares boucles de méandres reproduites, le modèle de migration du logiciel ne permet la reproduction de la totalité des tracés récents. Ce modèle de ne s'adapte pas parfaitement à la migration des chenaux dans notre cas d'étude. Cela serait dû probablement :

- ✓ Au fait que les chenaux soient très proches dans leur géométrie, chenaux aux tracés presque superposables comme l'en a pu le voir antérieurement. Ceci indique probablement une migration restreinte, avec une composante avale plus forte que dans TURMY.
- ✓ Le gradient de la pente dans le modèle de TURMY est uniforme, alors que dans notre cas d'étude, celle-ci varie de 5‰ à 4%. En effet, la variabilité de la pente est très fréquente dans cette partie de bassin. Cette dernière semble jouer un rôle majeur dans l'évolution et la migration des chenaux turbiditiques.

6.3. Reproduction du bloc

6.3.1. Analyse de la morphologie de la vallée

La vallée d'incision présente une base érosive concave. Sa morphologie est irrégulière, souvent en « U » symétrique bien visible sur la figure 17, profil 35, 37, 47 et 51 km (figure 32 a) parfois dissymétrique (figures 17 et 32 b)

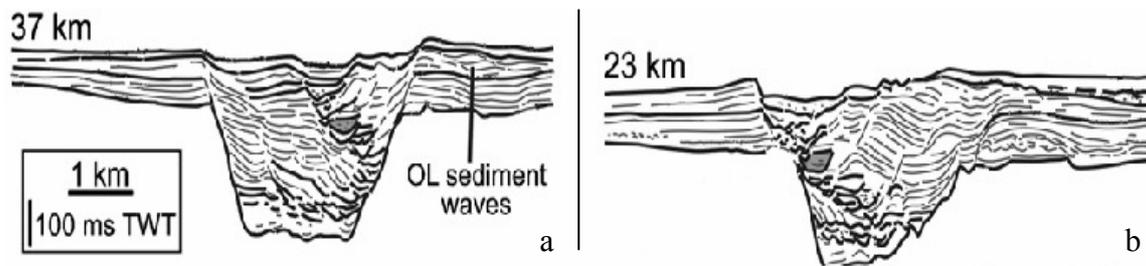


Figure 32 : Exemples de profil montrant la morphologie de la vallée d'incision (Deptuck, 2007)

La largeur de la vallée varie entre 2,7 et 5,11km et sa profondeur entre 95 et 33m. Sa profondeur moyenne est de l'ordre de 400ms (soit 0,4s) en temps double (TWT) (figure 32) et pour des vitesses équivalentes de ce type de dépôt allant de 900 à 1700m/s ceci nous ramène à des profondeurs qui varient en 180 et 340m. Ce qui correspond aux des profondeurs annoncées par Deptuck.

Cette incision présente parfois des épaulements sur les côtés (figure 33), souvent a demi-profondeur (100 à150m), témoignant d'au moins deux phases majeures d'incision.

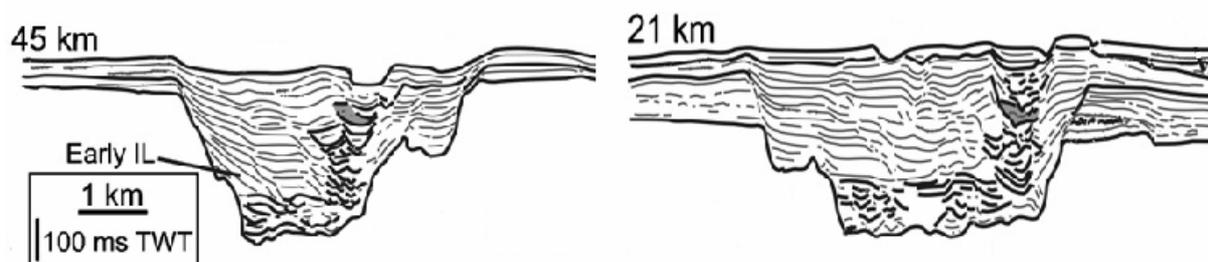


Figure 33 : Profils sismiques montrant les épaulements de la vallée incisée (Deptuck, 2007)

6.3.2. Les simulations des morphologies de la vallée

A l'aide de TURMY on peut a priori reproduire exactement les paramètres géométriques décrits ci-dessus, 1,75 à 200 m de profondeur en moyenne et 5 km en largeur (figure 34).

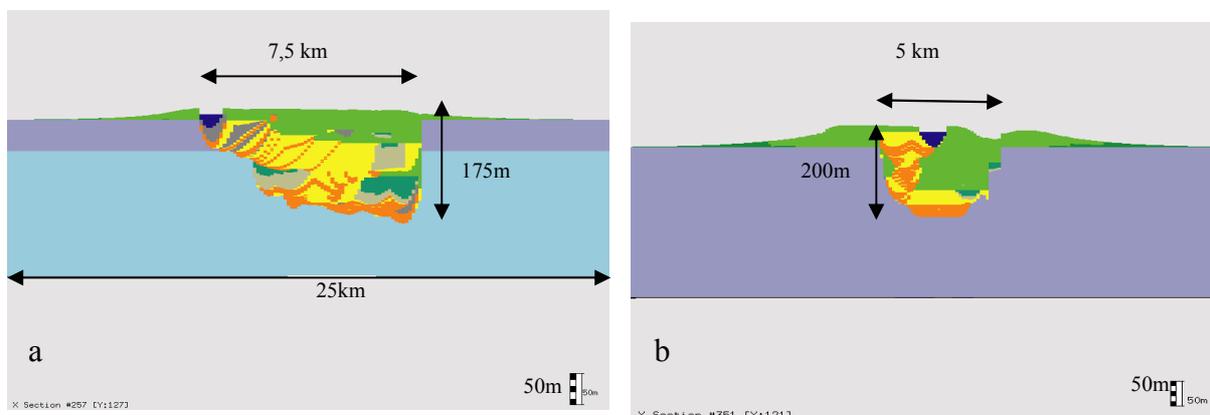


Figure 34 : Mesures des paramètres géométriques des vallées obtenues par simulations.

Quant à la morphologie, on peut aisément reproduire les trois cas de figure précités, à savoir la forme en « U » symétrique (figure 34 b) et dissymétrique (figure 34 a) et les épaulements à mi-profondeur sur les deux côtés (figures 35 a et b).

La morphologie en « U » symétrique s'obtient en faisant une incision rapide avec un chenal assez large (1000m). En effet le chenal érode en profondeur et édifie des marges droites. Les formes en « U » dissymétrique sont réalisées avec une alternance régulière des simulations en migration latérale seule et en incision profonde.

Les épaulements sont réalisables grâce à de longues périodes de migration latérale interrompues par des phases d'incision rapide.

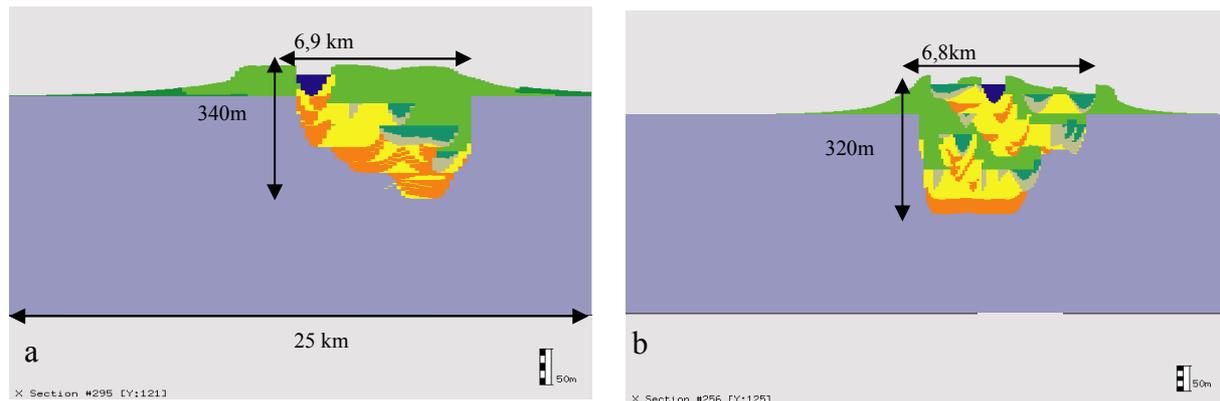


Figure 35 : Morphologie des vallées obtenues par simulation (a : Epaulement à gauche et b : Epaulement à droite).

La simulation de l'incision oscille entre 1200 à 1500 itérations. Ce qui témoigne de l'importance de la durée d'incision.

De cette simulation on en déduit que la migration et l'érosion respectent bien les limites imposées par la contrainte d'érodabilité. Les mesures des largeurs dépassent légèrement les mesures de Deptuck car section la transversale n'est pas perpendiculaire par rapport à l'axe de la vallée.

Concernant la morphologie de la vallée, le seul point négatif est que TURMY ne peut pas faire des marges régulières raides, à moyen ou fort gradient de pente. Le logiciel les fait parfaitement verticales, chose qui est plutôt rare dans la réalité.

On ne peut pas également simuler les effondrements et les slumps. C'est probablement ces derniers qui sont à l'origine de ce type de marge.

6.3.3. Analyse du remplissage de la vallée

Comme nous l'avons présenté, le remplissage du canyon majeur du Bénin est subdivisé en trois phases d'après les travaux de Deptuck.

- **Phase de remplissage 1** : Cette phase s'associe aux « HAR » (High amplitude reflectors) recouvrant directement la surface d'érosion. Ils correspondraient aux dépôts de fond de chenal, matériel mal classé et grossier abandonné au fond du chenal « Basal Lag » auquel on associe les slumps et les débris flows (figure 9). Ce dépôt se caractérise par sa largeur : il s'étale souvent sur la totalité de la largeur du fond de la vallée incisée.

- **Phase de remplissage 2** : La deuxième phase d'érosion est épaisse. C'est la phase la plus importante dans l'histoire du remplissage de ce canyon. Deptuck la subdivise en deux intervalles. L'intervalle inférieur, commence par une brève période de migration latérale surmontée par une aggradation rapide de chenaux étroits et tortueux engendrant d'épaisses levées, les plus importantes du point de vue épaisseur, dans l'histoire d'évolution du remplissage. Le passage à l'intervalle supérieur est brutal. Il se marque souvent par une migration latérale bien exprimée. Puis les chenaux aggradent graduellement. ils sont légèrement plus larges et leur sinuosité décroît vers le sommet.
- **Phase de remplissage 3** : Au fur et à mesure que la vallée se comble, les reliefs s'aplanissent, par conséquent les chenaux deviennent plus larges et très sinueux. Ils peuvent être aggradants ou migrer latéralement. Cette phase se caractérise principalement par une vitesse d'aggradation des chenaux supérieure à celle des levées. Ce qui conduit à une avulsion régionale et à l'abandon du système.

6.3.4. Simulations du remplissage

La procédure utilisée pour reproduire chacune des trois phases de remplissage est détaillée ci-dessous.

La première phase de remplissage décrite par Deptuck est relativement difficile à reproduire par le logiciel qui ne simule pas les slumps et les effondrements. Ces dépôts sont représentés par défaut par du « Channel Lag » (le faciès orange sur les figures). En effet, il correspond à un dépôt grossier abandonné dans le fond du chenal lorsque le courant s'atténue et le taux de sédimentation est important. Afin de permettre une couverture maximale du fond de la vallée, nous avons choisi un chenal assez étalé. L'épaisseur totale est par contre obtenue par plusieurs itérations à l'aide d'un channel lag de 10m d'épaisseur (figure 36). La simulation de la première phase se fait en 5 à 10 itérations.

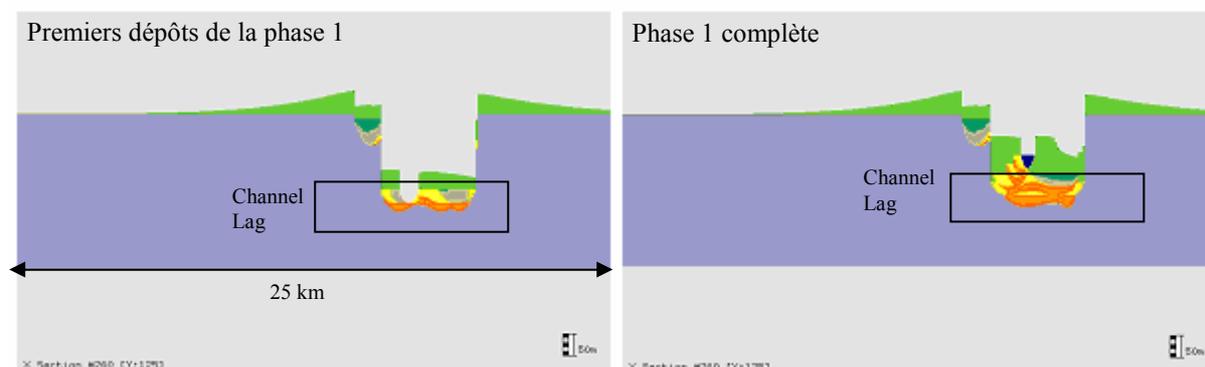


Figure 36 : Simulation de la première phase de dépôt (Channel lag) (Coupe transverse).

La deuxième phase de remplissage est assez simple à reproduire. Nous utilisons la largeur minimale du chenal, définie d'après les données de Deptuck (600 m). Les levées sont très épaisses (30 à 40 m) et possèdent une longue portée, ce qui permet de reproduire la présence de dépôts de levées conséquents dans le remplissage de la vallée au cours de cette phase.

L'intervalle inférieur de la phase 2 est obtenu en appliquant une succession rythmique

des fonctions « Steady » (100 itérations) suivie de « Channel lag » (3 itérations pour un Channel lag épais de 5m). L'intervalle supérieur ressemble au précédent. Il se distingue par une migration latérale plus importante, sans changement significatif de la taille des chenaux ou des dépôts de levées. Nous gardons les mêmes paramètres mais avec une période de migration latérale plus longue en mode « Steady » (200 itérations) (figures 38a à c).

Il faut au total 700 à 1000 itérations pour reproduire cette phase.

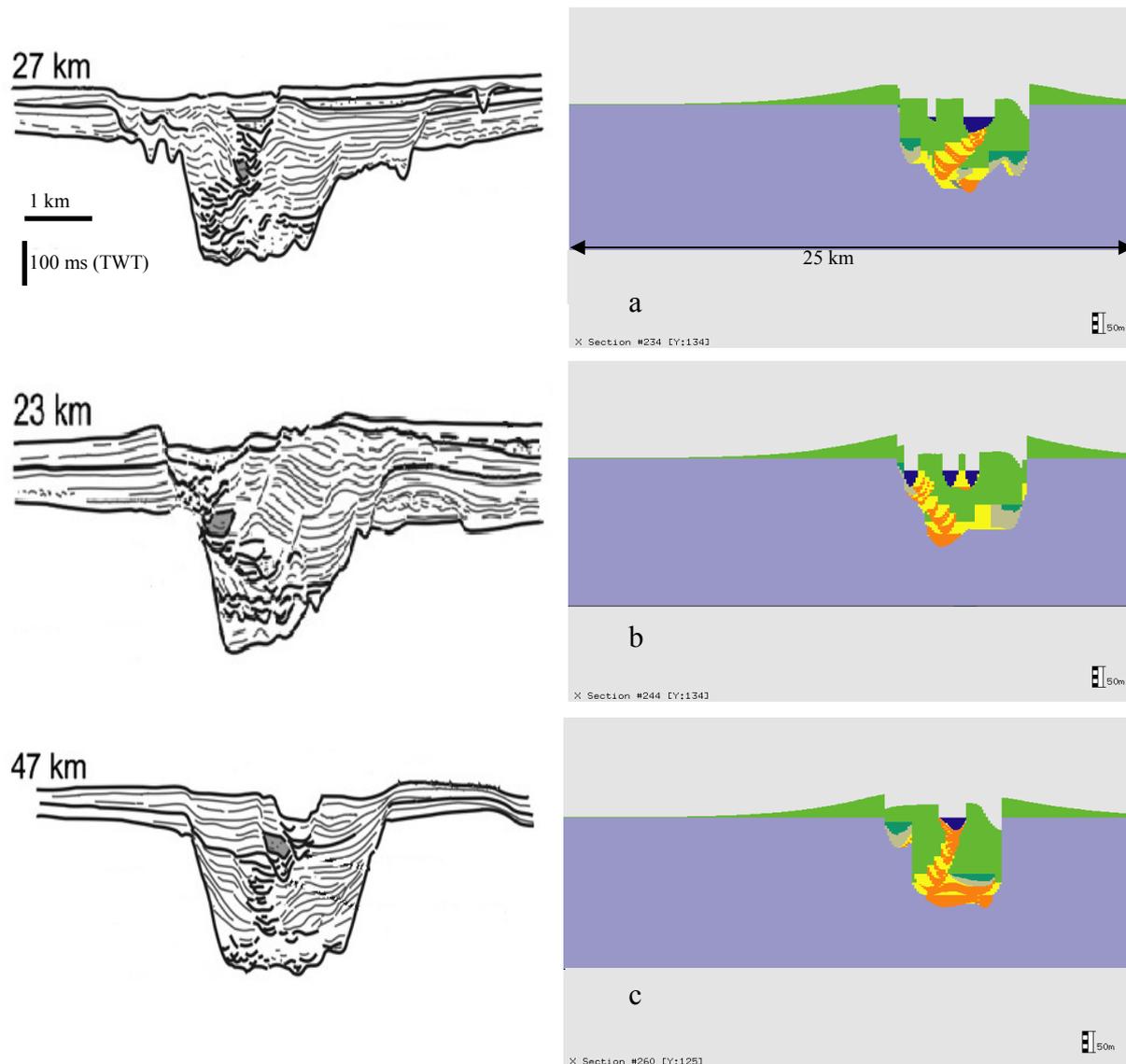


Figure 38: Sections de la vallée sous-marine. Simulations de la deuxième phase de dépôt, à gauche les données de Deptuck (2007), à droite les simulations.

Pour la **troisième et dernière phase** de remplissage, le chenal est plus large (900m). Le traitement des levées est fait en deux temps. Au départ, les paramètres de la simulation précédente sont conservés jusqu'à ce que les levées internes recouvrent les levées externes [« Steady » (100 itérations) suivie de « Channel lag » (3 itérations pour un Channel lag épais

de 5m)]. Ensuite, l'épaisseur des levées est mise égale à la hauteur d'aggradation du chenal, les autres paramètres étant conservés (figure 39).

La troisième phase est reproduite après 700 itérations au maximum.

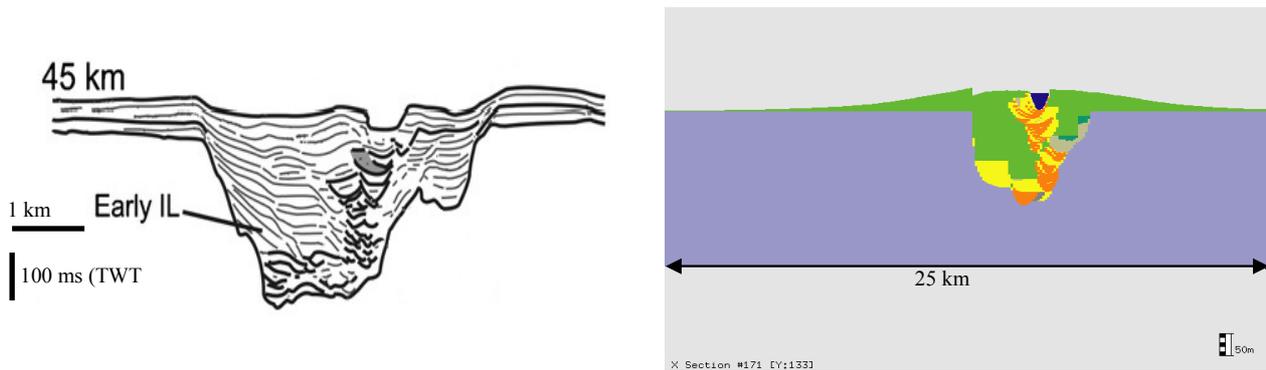


Figure 39 : Simulation de la troisième phase de dépôt. (A gauche les données de Deptuck (2007), à droite les simulations.)

Les différentes images montrent que les simulations reproduisent bien l'agencement des différents faciès ainsi que l'architecture complexe du remplissage de la vallée sous-marine ainsi que sa morphologie.

7. Conclusions et perspectives

Les complexes chenaux-levées sous-marins restent mal connus, en raison des variabilités qu'ils peuvent présenter et de la difficulté à observer les processus. Les dépôts qui sont associés se révèlent être d'excellents réservoirs pétroliers. La reconstitution de leurs architectures dans le détail n'est pas une tâche facile. Du fait de l'intérêt économique en jeu, la complexité de ce système constitue un domaine de recherche pour mieux comprendre la variabilité des réservoirs associés.

Au cours de ce projet, j'ai testé un logiciel en cours de développement à l'Ecole de Mines de Paris (TURMY), qui a pour objectif de reproduire l'architecture des systèmes turbiditiques méandriques associés à la zone moyenne d'un système sous-marin. L'architecture est reproduite en s'appuyant sur la variabilité des paramètres associés au chenal dans lequel l'écoulement turbiditique est canalisé : géométrie du chenal, sa migration, dépôt de levées, auxquels sont associées l'incision et l'aggradation dont les amplitudes donneront des architectures variées.

J'ai exploité les données du canyon majeur du Bénin, en m'appuyant sur les publications très riches et bien détaillées de Deptuck (2003 et 2007).

Mes résultats montrent que :

- les différents faciès, levées et chenaux sont représentés avec des dimensions en accord avec les données de Deptuck.
- L'incision a été reproduite à l'aide de chenaux de même taille que ceux utilisés pour le remplissage. La géométrie de la vallée incisée ainsi obtenue montre des flancs complexes, avec des sections en U ou montrant des épaulements.
- Le remplissage montre une variabilité tout à fait comparable à celle observée sur les images sismiques.

Ce cas d'étude m'a permis de conduire un test de validation du logiciel TURMY en cours de développement. Les résultats obtenus sont très satisfaisants sur la reproduction non conditionnelle des dépôts.

Pour les perspectives et dans le but d'améliorer les résultats, il faudrait conduire d'autres tests sur des systèmes turbiditiques équivalents situés dans le même secteur (Zaïre) ou sur d'autres marges (Amazone, Bengale) pour :

- évaluer plus précisément les relations entre la longueur d'onde et la largeur des chenaux. Les résultats sur le Bénin semblent montrer que TURMY surévalue les largeurs pour une longueur d'onde donnée ;
- vérifier si la migration aval est un phénomène général, ce qui permettrait d'améliorer si besoin l'algorithme actuel de la migration ;
- introduire dans le logiciel les effondrements et slumps pour reproduire des géométries de flancs de vallée et de dépôts encore plus réalistes.

Résumé

Les systèmes chenaux-levées engendrent des dépôts turbiditiques, qui constituent d'excellents réservoirs. Leur organisation et leur architecture sont complexes et mal connues. La reconstitution de cette architecture constitue un challenge pour les industriels pétroliers. Le logiciel TURMY, en cours de développement à l'ENSMP, a pour objectif la reconstruction des architectures des systèmes turbiditiques méandriformes associés à l'éventail moyen, en s'appuyant sur des paramètres associés au chenal : géométrie, migration, aggradation, incision et dépôt.

J'ai testé ce logiciel sur le remplissage du canyon majeur du Bénin, qui offre l'opportunité d'exploiter de riches données bibliographiques collectées par Deptuck (2003 et 2007). Les simulations reproduisent bien l'agencement des différents faciès, ainsi que la morphologie et l'architecture complexe du remplissage de la vallée sous-marine.

Ce cas d'étude m'a permis de faire un test de validation du logiciel. Si les résultats sont globalement satisfaisants, il est nécessaire de conduire d'autres tests sur des exemples situés soit sur la même marge, soit sur d'autres marges, afin d'affiner la compréhension des mécanismes et leur simulation (rapport entre longueur d'ondes et largeur des chenaux, mode de migration, slumps).

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Bloc 3D illustrant la morphologie d'un système turbiditique actuel.....	3
Figure 2 : Mesures des paramètres géométriques dans le système chenaux-levées de l'Amazonie (Pirmez et Irman 2003).....	4
Figure 3 : Illustration de la géométrie d'un chenal (Mabonneau et al, 2002).....	5
Figure 4 : Profil sismique montrant le processus de la migration et dépôt de « LAP's » (Deptuck, 2003).....	6
Figure 5 : Illustration de la migration latérale d'un chenal, côte ouest Afrique (Abreu, 2003)..	6
Figure 6 : Profil sismique montrant l'aggradation d'un chenal (Deptuck, 2003).	7
Figure 7 : Illustration de la rupture de méandre « Cut-off » (Abreu et al, 2003).....	7
Figure 8 : Carte illustrant le processus de l'avulsion dans le canyon du Zaïre (Mabonneau, 2002).....	8
Figure 9 : Architecture et faciès associés aux turbidites (Mayall, Jones et Casey, 2006).....	8
Figure 10 : Architecture des chenaux confinés dans une vallée d'incision (Abreu et al, 2003).	9
Figure 11 : Illustration de l'interface de TURMY.	10
Figure 12 : Chenal tirés au sort (a) et chenal importé (b).	11
Figure 12 c: Chenal tiré au sort avec érodabilité prédéfini.	11
Figure 13 : Fenêtres graphiques des différents angles de vision de TURMY.....	12
Figure 14 : Carte de localisation de la zone étudiée (Deptuck 2007).	14
Figure 15 : Carte en isobathe au niveau du canyon majeur du Bénin (Deptuck 2007).....	15
Figure 16 : Profil sismique et Coupe transversale dans la vallée d'incision (Deptuck, 2007). 16	16
Figure 17 : Profils et mesures sismiques le long de la vallée d'incision (Deptuck, 2007).	16
Tableau 1 : Tableau récapitulatif des paramètres géométriques des différents chenaux définies par Deptuck (U et V désignent la morphologie des chenaux)(Deptuck 2007).	17
Figure 18 : Morphologie du canyon majeur et l'escarpement (Deptuck 2007).	18
Figure 19 : Les différentes phases d'évolution du canyon du Bénin majeur (Deptuck 2003)..	19
Figure 20 : Profile sismique montrant les phases de dépôt des levées externes (Deptuck, 2003).....	20
Figure 21 : Les chenaux qui seront digitalisés (Deptuck, 2007).....	21
Figure 22 : La vallée incisée et superposition des lignes centrales construits.	22
Figure 23 : Simulation des 5 lignes centrales construites avec dépôt de levées (en vert foncé et claire).....	23
Figure 24 : Place des chenaux digitalisés dans le système (Deptuck, 2007).	23
Figure 25 : Chargement de la carte d'érodabilité et chenal importé.	24
Tableau 2 : Calcul de la demi-longueur d'onde pour un chenal à 200m de largeur.....	25
Tableau 3 : Calcul des demi-longueurs d'ondes prévues pour différentes largeurs de chenal ...	25
Figure 26 : Variation des longueurs d'onde en fonction de la largeur des chenaux.	26
Tableau 4 : Calcul des demi-longueurs moyennes pour différentes largeurs de chenal.	26
Tableau 5 : Estimations des demi-longueurs d'onde réelles des différents chenaux.....	27
Tableau 6 : Longueurs d'onde observées (Bénin) et largeur de chenal correspondant dans TURMY.	27
Figure 27 : Comparaison des tracés initiaux des chenaux Ch5 et CH4 28	28
Figure 28 : Essai de reproduction des tracés récents (CH 4) avec un chenal ancien CH5 sans contrainte d'érodabilité (CH=chenal, W =900 m. et IT.= nombre d'itération).....	29
Figure 29 : Essai de reproduction d'un tracé récent CH 4 avec un chenal ancien CH5 sans contrainte d'érodabilité.	29
Figure 30 : Essai de reproduction d'un tracé récent (CH 4) avec un chenal ancien CH5 avec contrainte d'érodabilité.	30

Figure 31 : Essai de reproduction d'un tracé récent (CH 4) avec un chenal ancien CH5 avec contrainte d'érodabilité.	31
Figure 32 : Exemples de profil montrant la morphologie de la vallée d'incision (Deptuck, 2007).....	32
Figure 33 : Profils sismiques montrant les épaulements de la vallée incisée (Deptuck, 2007)	32
Figure 34 : Mesures des paramètres géométriques des vallées obtenues par simulations.	32
Figure 35 : Morphologie des vallées obtenues par simulation (a : Epaulement à gauche et b : Epaulement à droite).	33
Figure 36 : Simulation de la première phase de dépôt (Channel lag) (Coupe transverse).	34
Figure 38: Sections de la vallée sous-marine. Simulations de la deuxième phase de dépôt, à gauche les données de Deptuck (2007), à droite les simulations.	35
Figure 39 : Simulation de la troisième phase de dépôt. (A gauche les données de Deptuck (2007), à droite les simulations.).....	36

Bibliographie

- Abreu, V., Sullivan, M., Pirmez, C., Mohrig, D., 2003. Lateral accretion packages (LAPs): an important reservoir element in deep water sinuous channels. *Marine and Petroleum Geology* 20, 631–648.
- Babonneau, N., Savoye, B., Cremer, M., Klein, B., 2002. Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan. *Marine and Petroleum Geology* 19, 445–467.
- Cojan, I., et Renard, M., 1997. *Sédimentologie*. Masson, Paris, 1997.
- Deptuck, M.E., 2003. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 20, 649–676.
- Deptuck, M.E., 2007. Migration–aggradation history and 3-D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Benin-major Canyon, western Niger Delta slope. *Marine and Petroleum Geology*, 24, 406–433.
- Mayall, M. et al, 2006. Turbidite channel reservoirs—Key elements in facies prediction and effective development. *Marine and Petroleum Geology*, 23, 821–841.
- Mansor, S., 2004. Faciès sismiques et architecture du système turbiditique armoricain. DEA, université de Bretagne occidentale (Brest, 2004), 1-21.
- Migeon, S et al, 2001. Processus récents impliqués dans la formation des levées sédimentaires de l'éventail turbiditique profond du Zaïre. C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes, Earth and Planetary Sciences 332, 371–378.
- Migeon, S et al, 2000. Structure et évolution récente de l'éventail turbiditique du Zaïre : premiers résultats scientifiques des missions d'exploration Zaïango1 & 2 (marge Congo–Angola) C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes / Earth and Planetary Sciences 331, 211–220.
- Pirmez, C et Imran, J., 2003. Reconstruction of turbidity currents in Amazon Channel. *Marine and Petroleum Geology* 20, 823–849.
- Weaver, P.P.E., Wynn, R.B., Kenyon, N.H. and Evans, J., 2000. Continental margin sedimentation, with special reference to the north-east Atlantic margin. *Sedimentology*, 47, 239–256

« Si ton labeur est dur et tes résultats sont minces, rappelle toi qu'un jour le grand chaîne a été un gland comme toi » Lao Tseu

Dédicaces

« Je dédie ce modeste travail à ma famille proche ; à mes très chers parents, mes frères et sœurs, à ma grand-mère et mes petites belles cousines. Vous me manquez énormément »

Remerciements

Ma profonde gratitude et reconnaissance à mes responsables de stage « ISABELLE et Jacques » pour leur ; confiance qu'ils me témoignent, et leurs conseils, aides et leurs présences. Vos conseils lumineux ont éclairé ma vue même au delà du domaine qui nous a réuni.

Je remercie mes amis de l'ENSMP (fontainebleau): Pierre-yves, Cédric, Salim, Mondher, Caroline, en particulier Sylvie et Catherine Philippe pour leurs sympathies et aides précieuses.

Merci à Sophie, Yannick, Céline et Emric pour votre soutien et de me recevoir comme un des vôtres. Vous êtes ma deuxième famille.