



Mémoire de Master 2  
Parcours: Lithosphère, Bassin et Pétrole  
Spécialité : Bassin

# **Modélisation génétique et statistique de réservoirs fluviaux méandriformes**

Jean-Philippe JENNY

**Responsables:** Isabelle COJAN, Helene BEUCHER,  
Jacques RIVOIRARD.

Année universitaire 2008-2009

## Remerciements

Je tiens à remercier mes responsables de mémoire de l'école des Mines sans lesquels je n'aurais pas pu réaliser cette recherche.

Je tiens à remercier les conseils d'Isabelle Cojan, son expérience apportée à mes recherches et pour son exigence très stimulante. Je remercie Helene Becher pour ses nombreuses explications en statistiques et au sujet de l'utilisation de la méthode Isatis. Je lui suis également très reconnaissant pour le temps précieux qu'elle m'a consacré, souvent lorsqu'elle en disposait le moins. Je remercie Jacques Rivoirard pour ses encouragements et pour les moments à table le midi qui ont permis d'éclaircir certaines questions de statistique.

Je voudrais aussi remercier l'ensemble des équipes de géostatistiques et de géosciences de l'école des Mines qui m'ont accueilli chaleureusement à fontainebleau.

Je remercie plus particulièrement Philippe Le Caer et Fabien Ors pour leurs régulières explications-interventions sur l'utilisation des logiciels et sur le fonctionnement du système informatique en général ; Monique Berger pour l'assemblage des panoramas ; Didier Renard, pour les conseils et le prêt de document en statistiques ; Sylvie Boj pour son travail d'organisation du camp terrain et des modalités administratives ; Anne-Edwige Held, Claire Fauchoux, Caroline Mehl, Pierre Yves Descote, pour leur soutien réconfortant et pour leurs nombreux conseils.

## Résumé

L'objectif de cette étude est de proposer une utilisation conjointe de deux méthodes de modélisation pour obtenir la représentation d'un réservoir fluviatile méandriforme.

La première méthode de modélisation est génétique, basée sur les processus de dépôts, l'autre est statistique, basée sur les géométries. L'Ecole des Mines a développé deux logiciels, Flumy et Isatis, pour optimiser l'utilisation de ces principes de modélisation.

Des données ont été collectées sur un analogue terrain de réservoir fluviatile dans le but de calibrer les simulations. L'analyse de terrain dans le bassin de Loranca en Espagne a ainsi permis de déterminer quatre intervalles stratigraphiques, de lever des coupes pour connaître les proportions de sable par intervalle et d'étudier les dimensions des corps sableux de la portion distale du système fluviatile de la région de Huete.

Dans le cas de la méthode génétique, les simulations préliminaires, non conditionnelles, ont permis de retrouver les proportions de sable en paramétrant les fréquences-intensités de crue, le gradient de pente et le coefficient d'érodabilité. L'observation terrain d'une composante du système fluviatile, les Mud plugs, a également permis de définir les ceintures latérales du chenal, de proposer un axe d'écoulement du chenal et de définir les limites latérales du domaine d'étude. Cette composante a été simulée dans Flumy en introduisant une barrière d'érodabilité.

Dans le cas de la méthode statistique, les simulations ont permis de reconstituer à l'aide d'un modèle Pluri-Gaussien les configurations spatiales des corps sableux en respectant les différents taux d'amalgamation observés selon les intervalles stratigraphiques.

## Abstract

Two modeling Methods were developed at l'Ecole des Mines de Paris and has been used at once to define a meandering fluviatil system reservoir.

The first Genetic Modeling Method is performed through Flumy software using deposit processes, whereas Statistic Modeling Method is run by Isatis software and is focused in this case on bodies' geometry.

A data set has been collected over the Loranca Basin, Spain, in order to calibrate simulations. Then we defined four stratigraphic' intervals, wells for sand proportion estimation and sand body extensions of the distal part of the Tortola fluviatil system.

Non conditional simulations were fitted from Overbank frequency-intensity, Slope and erodibility rate. These simulations were carried out to obtain the same sand proportion than estimated from field. In a second time Channel Belt inventory on the field favored the area bound positioning on the geographic map and the channel axis recognition. An erodibility map hence has been introduced to constrain lateral flow migration.

Statistic Method permitted to define a multi-Gaussien Model that is useful in statistic to configure spatial geometries of sand bodies respecting amalgamation rate for different startigraphic levels.

## Liste des figures et tableaux

- Figure 1 : Représentation schématique des différentes composantes d'un fleuve méandriforme et des dépôts associés. P6
- Figure 2 : A) Représentation schématique des différents types de dépôts d'un cours d'eau à méandres Point bar (Cojan et Renard, 1997.) P8
- Figure 3. Courbe verticale des proportions des lithotypes obtenue à partir des données de puits du bassin de Loranca
- Tableau 1. Les faciès de classe granulométrique similaire sont regroupés en un même lithotype pour la simulation, avec un code de couleur associé. P11
- Figure 4. La nature hétérogène du domaine combiné au caractère ponctuel et faible de l'échantillonnage peut être à l'origine de mauvaises estimations des pourcentages de sable par niveau. P11
- Figure 5. Représentation générale d'un variogramme. P12
- Figure 6. Différents modèles de variogramme et représentation graphique du phénomène de dispersion associé. P13
- Figure 7. Représentation du modèle statistique et de ses composantes : les proportions et le variogramme. P14
- Figure 8. Règle d'assemblage des lithotypes (Schéma de seuillage) P14
- Figure.9. Situation géographique et configuration générale du bassin de Loranca P16
- Figure 10. A) Schéma lithostratigraphique général du remplissage du bassin de Loranca P18
- Figure 11. Les Ceintures de méandre dans la plaine d'inondation. P19
- Figure 12. Dépôts associés à une ceinture latérale de chenal. P20
- Figure 13. Délimitation du domaine de simulation pour les modèles Isatis et Flumy. Disposition des corps sableux, et représentation synthétique de leurs extensions. P21
- Tableau.2. Les intervalles sont obtenus à partir de cinq coupes terrain. P22
- Figure 14. Représentation schématique des cinq puits du bassin de Loranca P22
- Figure 15. Représentation des extensions sableuses et des intervalles vides (gap) pour les intervalles II et IV. P24
- Figure 16. Synthèse des données des intervalles I à IV de la série Oligo-Miocène de Huete (2009) P25
- Figure 17. Synthèse des données des intervalles I à IV de la série Oligo-Miocène de Huete (2009) P25
- Tableau 3. Simulations pour déterminer les pourcentages de sable en respectant les relations de proportionnalité entre l'intensité et la fréquence des crues définies par Bridge (2003). P26
- Figure 18. Evolution conjointe des valeurs d'intensité et de fréquence observées dans les systèmes naturels (Bridge, 2003). P27
- Tableau.4. Influence de la pente, du coefficient d'érodabilité et de la période de crue sur les proportions de sable. P27
- Figure.19. Valeurs de migration pour différentes vitesses de perturbation. P28
- Tableau.5. Les proportions de sable par intervalle ont été reproduites par la simulation en utilisant le coefficient d'érosion et de la pente en respectant les facteurs de proportionnalité de Bridge (2003). P28
- Figure 20. Intervalle II qui respecte les rapports de proportionnalité entre les intensités et les fréquences de débordement décrits par Bridge (2003). P28
- Figure 21. Simulation non conditionnelle d'un petit intervalle. P29

Tableau.5. Résultats de la simulation non conditionnelle pour un fleuve contraint et pour un fleuve non contraint par une ceinture de méandre. P30

Figure 22. Vues aériennes et coupes transversales d'une simulation contrainte par des ceintures latérales (A) et non contraintes (B). P31

Figure 23. Courbes verticales de proportions couvrant l'ensemble du domaine. Les pourcentages sont exagérément élevés entre les channel belts. P31

Figure 24. Illustration de la morphologie d'un fleuve contraint par un « channel belt ». P32

Tableau.7. Résultats des résultats sur les proportions de sable de la simulation conditionnelle de l'intervalle II et IV. P33

Figure 25. Résumé des paramètres de simulation Flumy des intervalles II et IV du bassin de Loranca. P33

Tableau.6. Légère diminution des proportions de sable dans le cas d'une simulation avec transformation des faciès « Point bars » de petite épaisseur en faciès « Crevass Splay ». P34

Figure.26. La géométrie en parabole du chenal de la modélisation sous-représente les faibles épaisseurs par rapport à un système naturel. P34

Figure 27. Evolution d'un chenal et de ses dépôts conditionnés par un puits. P35

Figure 28. Sections transversales de deux simulations avec les faciès PB de petite épaisseur (<1,4m) dans les puits remplacés par le faciès Crevass Splay. P36

Figure 29. En simulations conditionnelle deux puits trop proches l'un de l'autre peuvent affecter anormalement la morphologie du chenal P37

Figure 30. A) Proportion des lithotypes de l'intervalle II pour l'ensemble des puits P38

Figure 31. « Petites Extensions » des corps mesurés sur le terrain et sur l'interface graphique de Flumy. P39

Figure 32. Profile longitudinal de San Juan à Pernalon, repris de Daams (1996). Ce profile met en évidence les « petites extensions » et leur agencement. P40

Figure 33. Une simulation conditionnelle d'Isatis honore dans tous les cas parfaitement les puits. P40

Figure 35. Coupes transversales illustrant différents types de modèle statistiques. P42

Figure 34. Coupes transversales illustrant différentes l'utilisation de différents schémas de seuillages. P41

Figure 36. Schéma de seuillage retenu pour la simulation conditionnelle. a.Sables ; b.Argilo-sableux ; c.Argiles. P43

Figure 37. Différentes portées appliquées aux transitions des corps sableux avec les argiles. P43

Tab.7. Résumé de deux sets de paramètres sélectionnés d'après les simulations non conditionnelles. P44

Tableau.8. Tableau synthétique de la connectivité d'une simulation de l'intervalle II par la méthode Isatis et Flumy. P44

Figure 38. Interface graphique d'Isatis affichant les simulations conjointes de Flumy et Isatis. P45

Figure 39. Grille du domaine de Huete utilisée pour les deux simulations Flumy et Isatis calibrés à partir des ceintures de méandre qui indiquent sur l'axe de circulation du chenal. P45

Figure 40. Représentations de section longitudinale de l'intervalle II d'une simulation Flumy. P46

Figure 41. Comparaison des simulations Flumy et Isatis pour profiles, l'un contenant des puits, l'autre n'en contenant pas. P46

Figure 42. Les deux grilles de Flumy et d'Isatis présentant la répartition des faciès. P47

# Sommaire

<b>I.</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>II.</b>	<b>Caractéristiques des Modèles</b>	<b>6</b>
<b>II.I</b>	<b>Le modèle génétique</b>	<b>6</b>
II.I.1.	Le domaine	7
II.I.2.	Le chenal	7
II.I.3.	Les dépôts	8
II.I.4.	Les processus	8
II.I.5.	Le conditionnement	9
<b>II. II</b>	<b>Le modèle statistique</b>	<b>10</b>
II.II.1.	Le domaine	10
II.II.2.	Les lithotypes	10
II.II.3.	Le modèle Pluri-Gaussien	11
II.II.4.	Le conditionnement	15
<b>III.</b>	<b>Cas d'étude : le bassin de Loranca</b>	<b>16</b>
III. I	Cadre d'étude	16
III. II	Méthode et matériel	18
III. III	Résultats	21
	les pourcentages	24
	les extensions	25
	les intervalles	27
<b>IV.</b>	<b>Les simulations</b>	<b>28</b>
IV. I	Simulations (Flumy)	28
IV.I.1.	Simulations non-conditionnelles	28
IV.I.2.	Simulations conditionnelles	35
IV. II	Simulations (Isatis)	40
IV.II.1.	Paramétrage des extensions	40
IV.II.2.	Simulations conditionnelles	46
IV.II.3.	Connectivité	47
<b>V.</b>	<b>Discussion</b>	<b>47</b>
<b>VI.</b>	<b>Résumé des résultats</b>	<b>49</b>
<b>VII.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>50</b>
<b>VIII.</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>51</b>
<b>IX.</b>	<b>Annexes</b>	<b>52</b>

## I. Introduction

Les dépôts des systèmes fluviaux méandriques constituent des réservoirs hétérogènes dont les processus de mise en place ont déjà fait l'objet de nombreuses études (Alvarez Sierra, 1987 ; Bridge, 2003 ; Daams et al., 1994 ; Gomez et al., 1996 ; Martinius, 2000).

Ces connaissances ont permis de créer des représentations modélisées des systèmes fluviaux basées sur les processus (Flumy) avec comme objectif de quantifier des proportions de sable dans le système à des fins pétrolières.

Une autre approche consiste à modifier les corps sableux à l'aide du logiciel Isatis afin de qualifier l'hétérogénéité du réservoir. La modélisation des corps permet d'étudier leur connectivité qui conditionne les écoulements dans le réservoir.

L'objectif de cette étude est de réaliser la simulation d'un réservoir selon ces deux approches, tout en respectant des valeurs communes de proportions de sable.

Les proportions de sable sont extraites de huit puits issus d'un analogue terrain dans le bassin de Loranca, Espagne, correspondant aux missions 2008 et 2009. Les résultats des simulations seront comparés tant dans les morphologies que dans les connectivités des corps sableux.

Des simulations non conditionnelles, non contraintes par les puits, seront réalisées dans un premier temps pour paramétrer la modélisation. Les résultats seront ensuite utilisés pour reproduire les observations d'un cas d'étude, en incluant les données de puits (simulation conditionnelles).

## II. Caractéristiques des Méthodes

Les deux méthodes, génétique et statistique, sont utilisées pour la représentation des dépôts des systèmes fluviaux méandriformes à l'échelle du réservoir. Elles ont pour objectif de reproduire les proportions de sable et le degré de connectivité dans le réservoir.

### II.I. Modèle Génétique - approche selon les processus

#### Définition

Le modèle Flumy est basé sur les processus, c'est-à-dire qu'il utilise les règles de dépôts des sédiments associées à la migration, aux débordements et aux avulsions du chenal. Il est capable de reproduire ces processus pour l'essentiel des systèmes continentaux existant, car il respecte les règles observées dans les systèmes naturels.

Le modèle est également stochastique, c'est-à-dire basé sur l'étude des phénomènes aléatoires dépendant du temps. Ainsi, chaque simulation sera générée en fonction de la valeur d'un nombre entier, le « germe », et chaque simulation pourra être reproduite à l'identique si ce germe n'est pas changé.

Il permet d'étudier la répartition et la proportion des faciès déposés par un fleuve en domaine continental dans un intervalle de temps donné. En termes de réservoir le modèle permet de retrouver les proportions des roches perméables (le sable) d'un intervalle tout en respectant les principales conditions d'évolution du chenal et les conditions de dépôt correspondant au système d'étude.

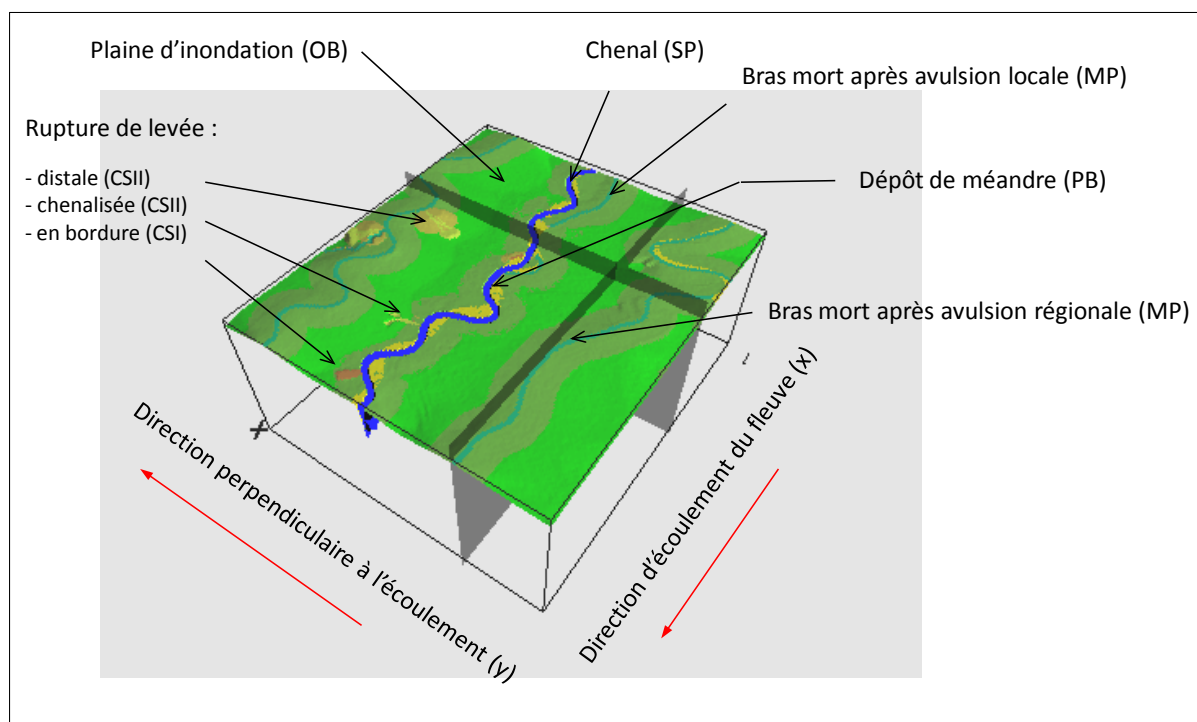


Figure 1 : Représentation schématique sur l'interface graphique du logiciel Flumy des différentes composantes d'un fleuve méandriforme et des dépôts associés. Le nom et la signification des dépôts sont précisés p7.c.



## Les paramètres de modélisation

### II.1.1. Le domaine

**Les dimensions** : le domaine doit contenir toute la plaine d'inondation. Ces dimensions doivent correspondre à la surface maximale recouverte par les crues de débordement pour que les boucles de méandre puissent se développer correctement. Les dimensions doivent donc être égales en largeur comme en longueur à 40 fois la largeur du chenal, au minimum. Pour un chenal de 75m de large il faut prévoir au minimum 3km.

**La pente** : les valeurs observées de la pente observées des systèmes naturels vont de 0,001 au minimum, à 0,016 au maximum.

**La direction d'écoulement** : elle est orientée conventionnellement vers la droite, le long de l'axe OX. Il n'y a pas d'angle particulier donné à l'écoulement du chenal, mais ce sont les puits, dans le cas du conditionnement, qui sont positionnés cartographiquement de manière à respecter la direction d'écoulement qui elle ne change pas.

**Maille de la grille** : La largeur du chenal doit également être égale ou supérieure à deux fois la maille de la grille.

### II.1.2. Le chenal

**La morphologie** : Elle dépend de trois principaux paramètres qui influent sur la sinuosité et la longueur d'onde.

- la profondeur du chenal. En effet, dans le modèle, la longueur d'onde du chenal ( $\lambda$ ) est proportionnelle à la profondeur (H) du chenal, avec  $\lambda = 800H$ . (Bridge, 2003)
- La sinuosité. Elle est proportionnelle à la largeur du chenal. De cette manière le modèle peut s'appliquer à des fleuves de toutes dimensions tout en respectant les règles naturelles d'évolution du chenal.  $U = \sqrt{\frac{g H I}{C_f}}$  ( $g = 0.81$ , H = profondeur du chenal, I = pente,  $C_f = 0.0036$ )
- Le coefficient d'érodabilité. Il intervient sur la migration du chenal et le développement plus ou moins important des boucles de méandre, et il est inversement proportionnel à la fréquence des avulsions. La valeur conventionnelle est approximativement de  $2.e-8$ , déterminée par Sun (1996) pour obtenir des valeurs réalistes d'évolution du chenal. Cette valeur représente environ 0.3m de sédiments érodés par année pour une migration.

#### Les dimensions :

a. La profondeur maximum du chenal correspond à 1,5 fois la profondeur moyenne sur une section parabolique de chenal. Cette profondeur est déterminée à partir des mesures de terrain effectuées sur les barres de méandre et les Mud plug.

b. La largeur du chenal équivaut à  $21.3 d_m^{1.45}$ , avec  $d_m$  la profondeur moyenne du chenal. Cette équation a été déterminée à partir d'une compilation d'observation (Bridge, 2003).

### II.1.3. Les dépôts

Le modèle reconnaît sept faciès principaux que l'on peut regrouper selon leur potentiel de roche réservoir.

- a. Les dépôts sableux de chenaux. Ils regroupent les barres de méandres (Point Bar : PB), les bouchons sableux (Sand Plugs : SP) et les premiers dépôts de rupture de levées (Crevasses Splay : CSI). Selon l'hydrodynamisme ces sédiments peuvent être des graviers (fond de chenal), des sables grossiers à grandes rides entrecroisées, des sables moyens à stratification plus petite et entrecroisée et des sables fins à laminations parallèles. Ces sédiments ont une bonne perméabilité et sont de bonnes roches réservoirs.
- b. Les dépôts fins et argileux. Ce sont les dépôts laminaires de débordement (Overbank flood : OB), les remplissages argileux (Mud plug : MP) et les Crevasses Splay II (CSII). Ces roches sont imperméables et forment des barrières de perméabilité dans les réservoirs.
- c. Les dépôts intermédiaires argilo-sableux. Ils correspondent aux dépôts de levées (LV). On trouve ces faciès toujours en contact, latéralement, avec les faciès sableux.

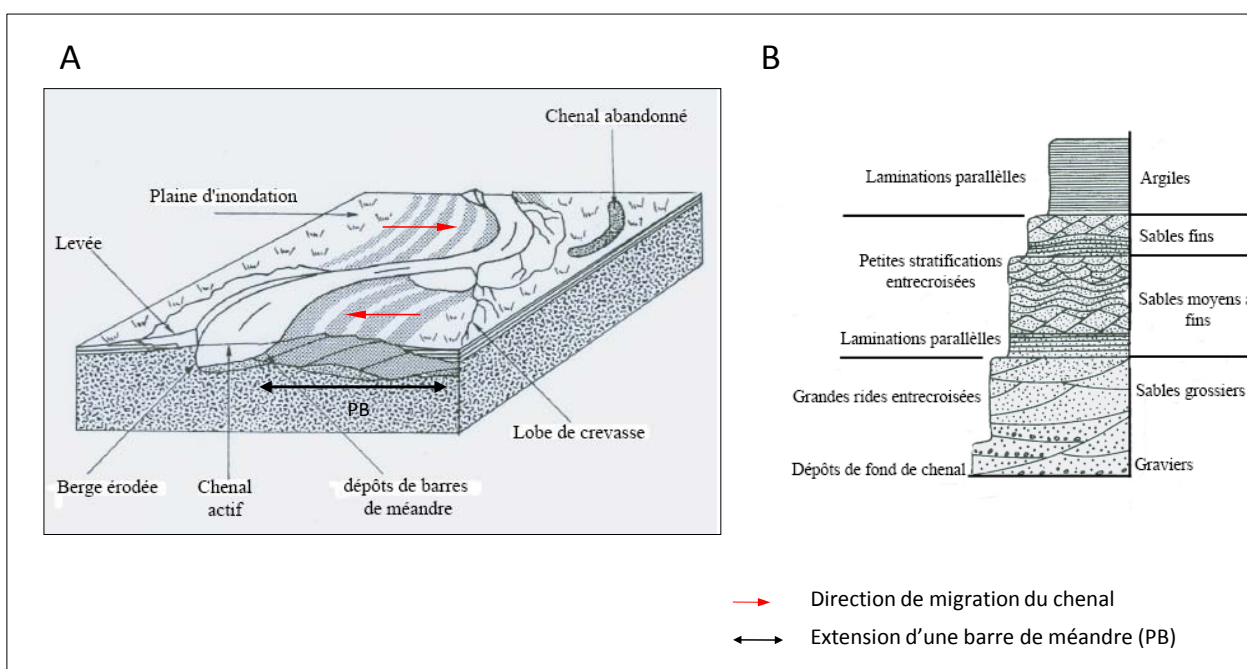


Figure 2 : A) Représentation schématique des différents types de dépôts d'un cours d'eau à méandres avec indication du sens de migration du chenal et la largeur d'un Point bar (PB). B) Séquence de dépôt d'un chenal. (Cojan et Renard, 1997.)

### II.1.4. Les processus

L'érodabilité : Le coefficient d'érodabilité renseigne sur le degré de résistance d'une roche à l'érosion. Il est possible d'introduire une carte d'érodabilité pour contraindre l'étendue de la migration du chenal sur la plaine d'inondation. Cet outil permet d'éviter aux boucles de méandres de se développer plus qu'il n'est possible dans la réalité.

Les avulsions : La période des avulsions régionales dans cette étude est estimée à 2000 itérations (une itération est le temps qu'il faut au chenal pour effectuer une migration, un an en moyenne). Elle a été calculée en faisant le rapport de l'épaisseur totale d'un PB (extension latérale) sur l'épaisseur d'une stratification

Les crues de débordement : Un ordre de grandeur,  $I \approx 20 t^{0.67}$ . L'intensité des crues de débordement ( $t$  = intervalle de temps entre deux crues de débordement). Pour une fréquence de débordement de 100 itérations, l'intensité des crues sera de 0,43m.

#### **II.1.5. Le conditionnement**

Les données de puits sont utilisées dans le cadre des simulations conditionnelles. Les puits contraignent la simulation du dépôt à respecter le plus strictement possible la nature et la position des faciès recensés sur le terrain.

Les données de puits correspondent dans cette étude à des levés de coupe. Les données doivent respecter un format particulier. Ils doivent faire figurer les coordonnées X et Y des puits sur le domaine, la profondeur et la nature des faciès le long du puits.

Le logiciel n'est pas contraint par des puits dans le cadre d'une simulation non conditionnelle. Il reproduit l'agencement des dépôts uniquement à partir des paramètres liés aux conditions de dépôts. Pour ce type de simulation on n'importera pas de puits, contrairement aux simulations conditionnelles.

Le conditionnement fournit des repères spatiaux à la simulation. Il modifie également le trajet du cours d'eau de manière à ce que les dépôts respectent les données de puits. La morphologie du cours d'eau en sera affectée, et parfois le conditionnement entrainera le cours d'eau en dehors ou à la limite des schémas naturels réalistes.

## II.II. Modèle Pluri-Gaussien - approche stochastique

### Définition

La méthode géostatistique permet d'obtenir une représentation des dépôts sédimentaires en tenant compte des statistiques spatiales des faciès. Cette méthode utilise une fonction mathématique qui calcule la dispersion des faciès dans les trois dimensions de l'espace pour ensuite reproduire le milieu en respectant ces dimensions et les données disponibles.

Nous utiliserons dans cette étude la méthode Pluri-Gaussienne car elle est adaptée à la simulation des milieux sédimentaires et est couramment utilisée pour l'étude de réservoirs pétroliers.

La simulation Pluri-Gaussienne permet d'intégrer les observations et connaissances géologiques au travers d'agencement des lithotypes (transition des faciès), de courbes de proportions (tendances géologiques des faciès), de fonctions Gaussiennes (dimensions moyenne des corps géologiques).

### Les paramètres de modélisation

#### II.II.1. Le domaine

Le domaine de simulation est déterminé en fonction de la largeur de la plaine d'inondation. Contrairement à la méthode Flumy il n'est pas nécessaire d'inclure une largeur supplémentaire pour le développement des méandres.

#### II.II.2. Les lithotypes

La première étape pour réaliser les simulations est de définir les lithotypes. Un lithotype est une réunion de plusieurs faciès qui partagent certaines mêmes propriétés. On regroupe dans cette étude les faciès sableux des chenaux et des crevasses splay1 dans un premier lithotype, puis les faciès argileux des Overbanks dans un second, et enfin un lithotype intermédiaire argilo-sableux correspondant aux levées.




Lithotype	Faciès	légende
Sableux	Sand plug; Channel lag; Point bar; Crevasse splay I	
Argilo-sableux	Crevasse splay II ; Levées	
Argileux	Mud plug; Overbank floods; Wet land;	

Tableau 1. Les faciès de classe granulométrique similaire sont regroupés en un même lithotype pour la simulation, avec un code de couleur associé.

Les lithotypes sont des variables qualitatives qu'il faut transformer en variables quantitatives par l'intermédiaire d'indicatrices. Ainsi, sur la grille de simulation, l'indicatrice du grès prend la valeur 1 lorsqu'au point observé il y a du grès, et la valeur 0 lorsque le grès en est absent.

### II.II.3. Le modèle plurigaussien

Il est généralement admis que les corps sédimentaires des systèmes fluviaux sont disposés spatialement de manière hétérogène et anisotrope. Pour simuler les corps et pour intégrer les anisotropies de morphologie selon les axes il nous faut définir un modèle statistique. Le modèle est la combinaison du variogramme (gaussien) et des proportions.

Modèle =  $f(\text{variogramme}_{\text{gauss}}, \text{proportions})$

#### - Les Courbe des Proportions (VPC)

La courbe verticale des proportions (VPC) montre la répartition verticale des proportions des différents lithotypes. L'objectif de cette étape est de faire correspondre les proportions modélisées avec celles de la réalité géologique. Pour cela les proportions sont calculées dans un premier temps à partir des données de puits, correspondant dans le cas de cette étude aux levées de coupes. Les proportions sont calculées à partir de la somme des données de puits, niveau par niveau, pour chaque lithotype.

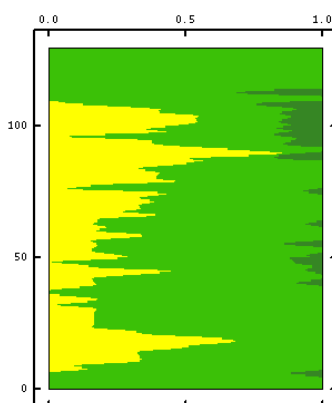


Fig.3. Courbe verticale des proportions des lithotypes obtenue à partir des données de puits du bassin de Loranca

Nous verrons que dans ce cas d'étude les proportions varient d'un puits à l'autre. La cause de cette variation peut être expliquée par une faible quantité d'information. Les proportions donnent une indication sur la répartition verticale qu'il est intéressant de compléter par les observations (Fig.4).

C'est pour cette raison qu'une information qualitative de terrain a été abordée. (cf.simulation)

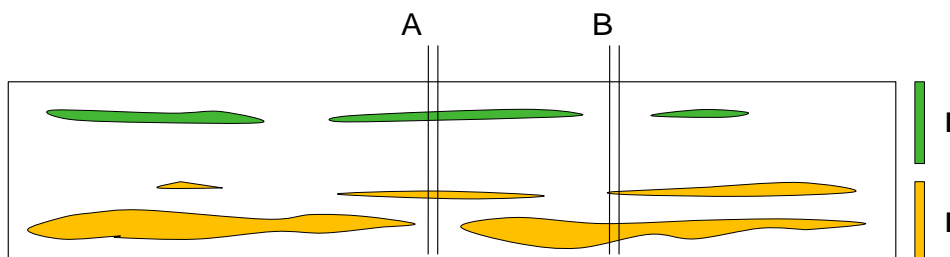


Fig.4. La nature hétérogène du domaine combiné au caractère ponctuel et faible de l'échantillonnage peut être à l'origine de mauvaises estimations des pourcentages de sable par niveau.

Les VPC issues des données de puits sont ensuite lissées (moyennes glissantes sur plusieurs niveaux) de façon à atténuer l'effet de discrétisation.

#### - Le variogramme

C'est est un outil de base en géostatistique qui permet de quantifier les corrélations spatiales entre les observations. Il quantifie la manière dont varie la valeur d'un point lorsqu'on s'en éloigne (Fig.5). Il existe pour chaque caractéristique spatiale de variable un type de variogramme qui lui est propre (Fig.6).

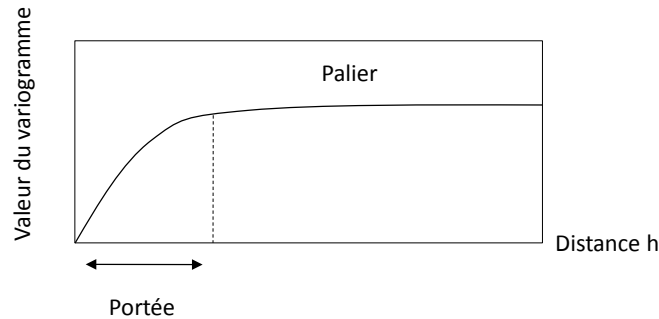


Fig.5. Représentation générale d'un variogramme. La portée représente la distance sur laquelle une valeur porte une influence. Lorsque le palier est atteint la valeur n'exerce plus d'influence.

La portée (Fig.5) est indirectement liée à la taille des corps. Elle permet de faire varier les extensions des corps indépendamment dans les trois dimensions de l'espace. Dans le cas où cette valeur ne peut être ajustée sur les données (notre cas) il est possible de modifier cette valeur en fonction d'observations qualitatives supplémentaires.

Le calcul des variogrammes est réalisé à partir des données de position et de nature des faciès contenues par les puits pour trois directions de l'espace, deux horizontales pour repérer les anisotropies, et une verticale, perpendiculairement à la stratification. Cette étape cruciale requière le plus grand nombre de puits, de façon à avoir des statistiques fiables.

Pour la simulation deux variogrammes nécessitent d'être calculés. L'un est un variogramme *expérimental* qui est calculé à partir des données de puits. L'autre est un variogramme *modèle* (équation.1) à partir duquel il est possible d'effectuer la simulation. Il s'agit donc de sélectionner les variogrammes modèles qui correspondent le plus avec les variogrammes expérimentaux.

Equation 1 : Le variogramme théorique

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E[(Z(x) - Z(x+h))^2]$$

où  $x$  est le vecteur de coordonnées (1, 2 ou 3 coordonnées selon le cas)  
 $h$  est le vecteur distance.

Dans cette étude nous avons collecté des données qualitatives pour apporter une information supplémentaire, indispensable ici dû au nombre peu élevé de puits couvrant le domaine. Ces données correspondent à des mesures de position sur le terrain, de part et d'autre de corps gréseux, permettant d'intégrer des valeurs relatives aux dimensions des corps.

Enfin, il est important de se rappeler que pour utiliser un variogramme choisi et adapté à un milieu il faut que ce milieu contienne une certaine régularité de forme. Si on peut reconnaître des zones très différentes géologiquement, a on l'habituellement intérêt à traiter les faciès séparément.

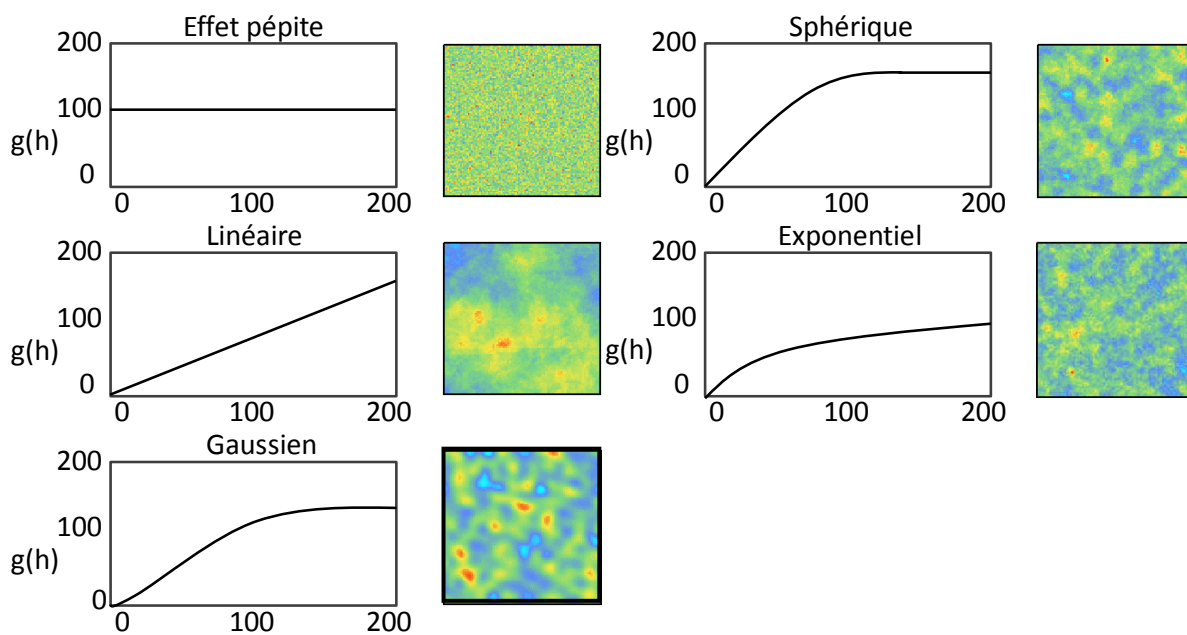


Fig.6. Différents modèles de variogramme et représentation graphique du phénomène de dispersion associé. Chaque phénomène géologique possède un variogramme qui lui est propre.

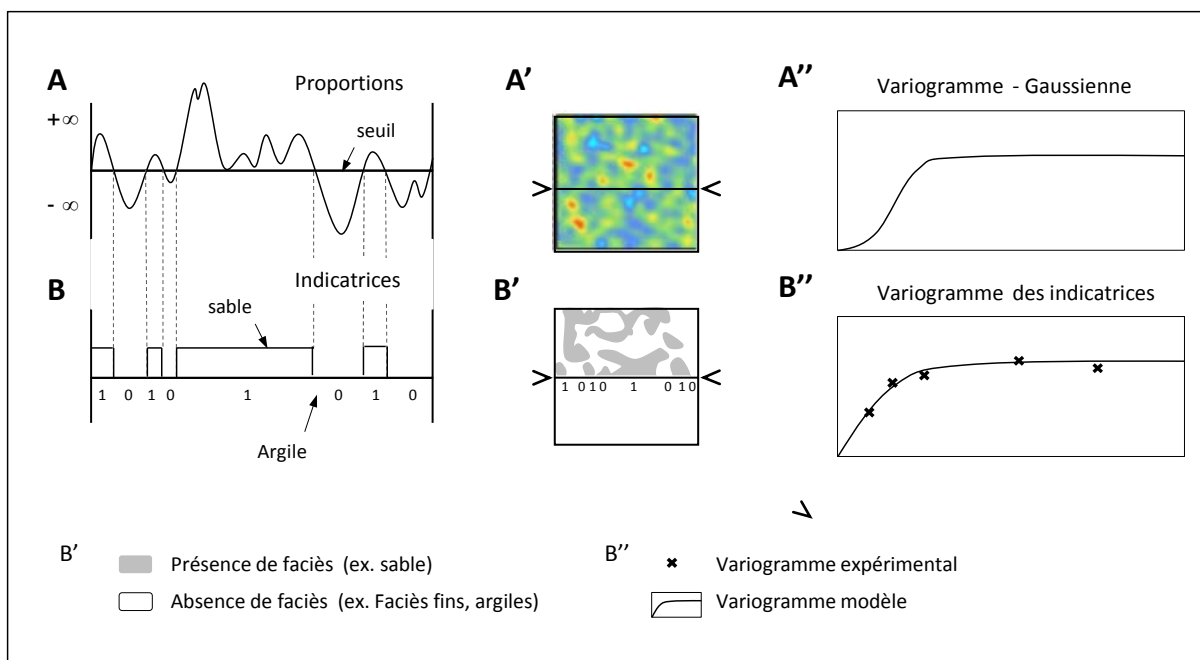


Fig.7. Les composantes du modèle statistique (B'') : les proportions (A) et le variogramme (A''). Le variogramme (Gaussienne) (A'') crée la tendance de dispersion des valeurs (A'). Selon le seuil de proportion fixé une valeur égale à 0 ou 1 est attribuée au faciès (B). Chaque point du domaine a une valeur attirée et permet la représentation des morphologies (B'). Le modèle ci-dessus est déterminé pour une section médiane au travers d'un domaine carré.

#### - Schémas de seuillage

Il faut également choisir une règle d'assemblage des lithotypes à l'aide d'un « schéma de seuillage » qui doit permettre de traduire les transitions entre les lithotypes.

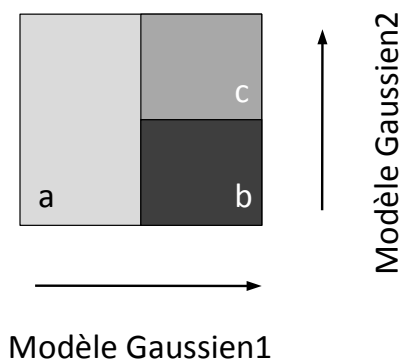


Fig.8. Règle d'assemblage des lithotypes (Schéma de seuillage)

Les dépôts sableux sont les plus grossiers et se déposent dans les lits creusés par les fleuves. Visuellement ils recoupent donc les autres faciès. C'est pour cette raison que le lithotype sableux est choisi ici comme le premier faciès dont la transition avec les autres faciès est assurée par la première gaussienne (modèle1) (Fig.7). Les dépôts associés sont relativement peu étendus lors de leur mise en place. Ils correspondent à la largeur du chenal, puis à l'étendue de sa migration avant avulsion.



Les deux autres lithotypes sont comparés deux à deux sans prendre en compte les sables. Cette transition est assurée par la deuxième gaussienne (modèle2) (Fig.7). Les formes doivent être plus étendues puisqu'elles recouvrent, pour les argiles, la plaine d'inondation.

#### **II.II.4. Le conditionnement**

Dans le cas du conditionnement les puits donnent des valeurs de faciès que l'on veut retrouver dans la simulation. Le conditionnement ne doit pas impliquer de distorsions ou d'autres artefacts sur le reste du domaine.

### III. Cas d'étude : le bassin de Loranca

#### III. I. Cadre d'étude

Le bassin de Loranca représente un domaine d'étude idéal dans le cas des séries sédimentaires continentales à caractère fluvial car il possède une série de chenaux d'âge Oligo-Miocène bien préservée.

Le bassin de Loranca se situe à l'Est de Madrid. Ce bassin a déjà fait l'objet d'études (Martinius, 2000 ; Daams, 1996) notamment concernant le système fluvial de Tortola et de son implication sur les dépôts dans le bassin. Ces études ont permis la cartographie du paleosystème fluvial. Nous savons que le système s'étendait sur une vaste zone avec un écoulement d'axe Nord Ouest et ramifié vers Nord, dont l'un des bras s'étend au bord de l'actuelle ville de Huete, et qui fera l'objet de cette étude.

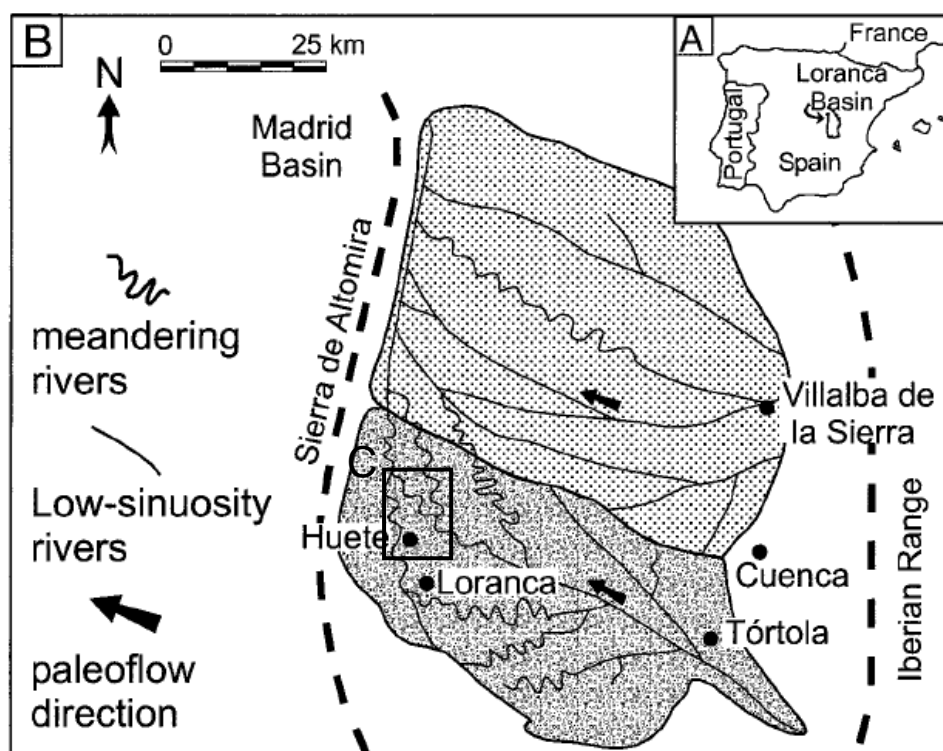


Figure.9. A) Situation géographique de Loranca. B) Configuration générale du bassin de Loranca et représentation du système fluvial Oligocène supérieur de Tortola. Martinus, 2000.

#### III.I.1. Environnement de dépôt

La ville de Huete se situe dans la partie distale du système fluvial de la région de Huete (Martinius, 2000), à la charnière d'un anticlinal de pente douce de  $10^\circ$  orientée vers le NE (Fig.9-B).

Les zones de charnière d'un anticlinal sont généralement les plus étirées et favorisent l'apparition de zones de faiblesses, de fractures, plus facilement soumises aux agents d'érosion, favorisant le découverture des sédiments plus anciens. C'est ainsi qu'on observe

une zone exposée, majoritairement d'axe Nord-Sud, d'environ 800m de large. L'intervalle stratigraphique d'étude est de 120m de hauteur au maximum. Il est délimité à sa base et à son sommet par deux niveaux repères continus. Le premier niveau repère est un calcaire lacustre qui figure à la base de chacune des coupes du terrain. Le second repère se situe à son sommet un banc de gypse massif. Les conditions climatiques déduites de l'analyse de paléosols correspondent à un climat semi-aride.

### **III. 1.2. Age et stratigraphie**

Quatre unités stratigraphiques majeures, composées de dépôts alluviaux, lacustres et sableux-fluviatiles ont été identifiées dans le bassin de Loranca (Diaz-Molina et al. 1989 ; Fig.10-A). Le système fluviatile de la région de Huete forme une partie de l'unité supérieure (Upper Unit), une unité tectono-sédimentaire qui recouvre un plus ancien bassin sédimentaire, limité par deux inconformités à son toit et à sa base (Diaz-Molina et al. 1989 ; Gomez et al. 1996). Une analyse des fossiles de mammifères (des dents de rongeurs) a montrée que l'unité supérieure commence au niveau de référence des mammifères MP25 (équivalent à la zone T de la subdivision stratigraphique locale) et termine à la fin au niveau repère MN2 (équivalent à la bas de la zone Y2 de la subdivision locale). La succession ainsi étudiée correspond à un intervalle de 1,6 Ma et comprend les biozones MP29 à MN2. Cet intervalle de temps s'étend de la fin de l'Oligocène jusqu'au Miocène inférieur (Chattien), Alvarez Sierra 1987 ; Daams et al. 1996b).

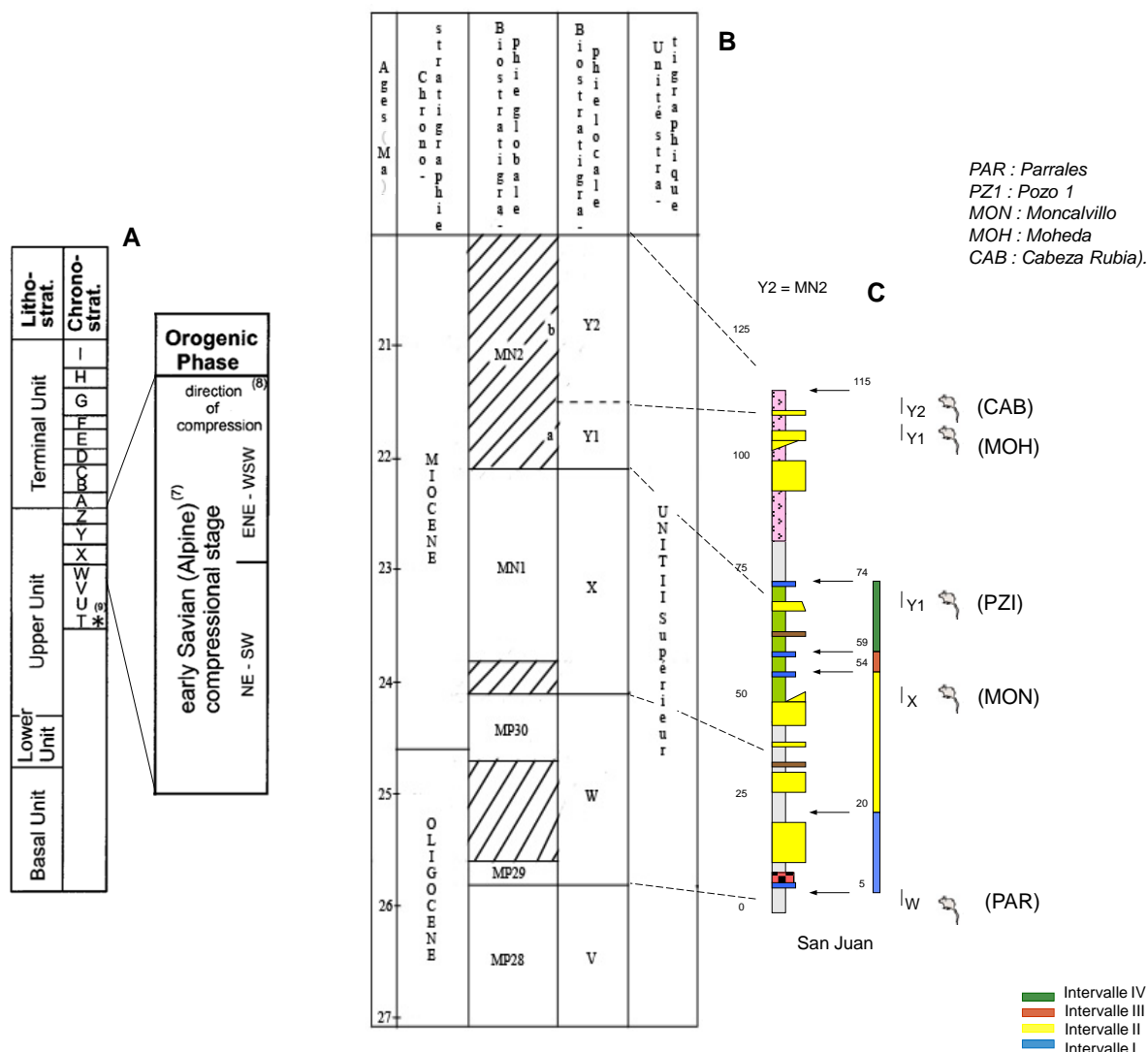


Fig. 10. A) Schéma lithostratigraphique général du remplissage du bassin de Loranca, mis en relation avec les phases orogéniques (Martinius, 2000). B) Assemblages chronostratigraphie et lithostratigraphie et biostratigraphie de l'unité supérieure. C) Coupe verticale du terrain (San Juan) représentative des intervalles d'étude. Les âges repères sont indiqués par les espèces de rongeurs.

### III. II. Méthode et matériel

La mission terrain (2009) a permis de collecter des coupes verticales pour obtenir des pourcentages de sable, des mesures d'extensions des corps gréseux, et d'autres mesures de position qui seront utilisées pour reproduire le système fluviatile de Huete en simulation.

#### Coupes verticales

Deux nouvelles coupes verticales ont été dressées afin d'obtenir des intervalles repères et des pourcentages de sable pour les simulations avec Flumy et Isatis. Ce qui porte le nombre total de puits couvrant le domaine d'étude à cinq.

#### Extensions

En tout, quatre-vingt-neuf mesures de positions ont été relevées aux extrémités des corps sableux. Le set de données relatif à ces extensions a été collecté afin de fournir une

information qualitative pour la simulation Isatis. Les corps sableux ont été mesurés dans leurs longueurs et leurs largeurs par des mesures GPS, Garmin eTrex HCX, et traitées à l'aide du logiciel mapSource. Les mesures sont données avec une précision de 1-3m en terrain découvert.

### Marqueurs stratigraphiques

Des marqueurs stratigraphiques ont été repérés, pour la plupart lors des précédentes missions (2008). Ils correspondent à des marqueurs continus, tels les calcaires lacustres ou les bancs de gypses massifs, qui se retrouvent sur l'ensemble du domaine d'étude (Fig.14). Ils permettent la corrélations entre les intervalles.

### Channel Belt

La présence de chenaux abandonnés « Mud Plug » (Fig.12-A1) à l'extrémité d'une boucle de méandre permet de repérer ponctuellement la périphérie du système fluvial dans son axe transversal (Fig.11-B). La mesure de position de plusieurs Mud Plug des mêmes intervalles a permis de retrouver les ceintures latérales des chenaux qui indiquent les limites de domaine.

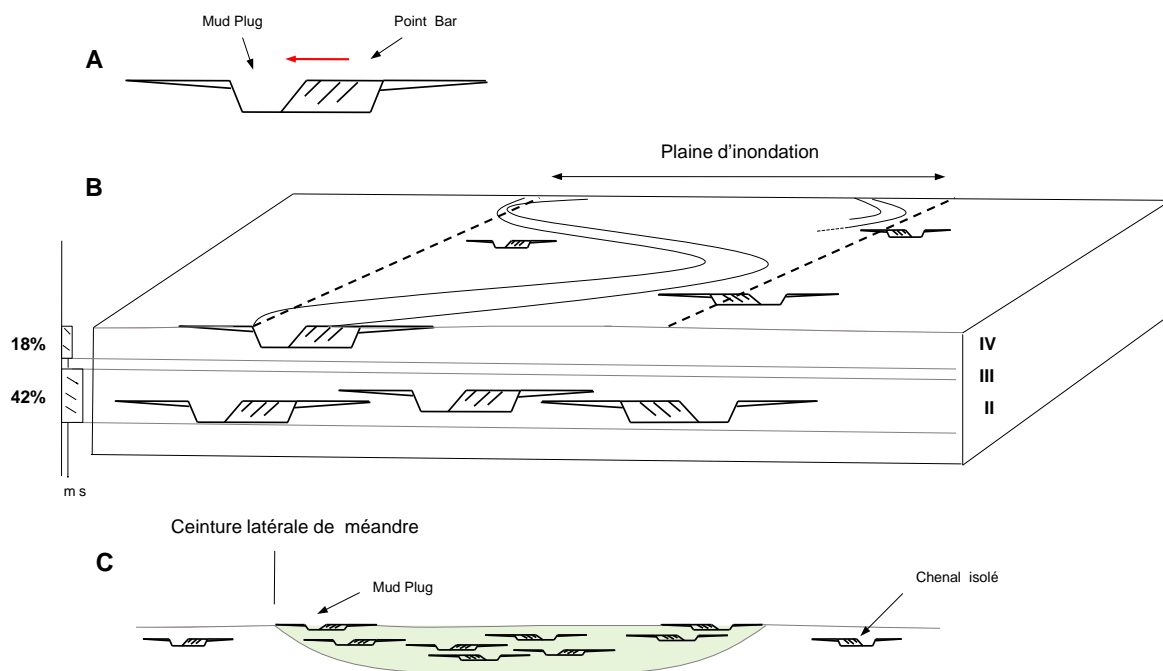
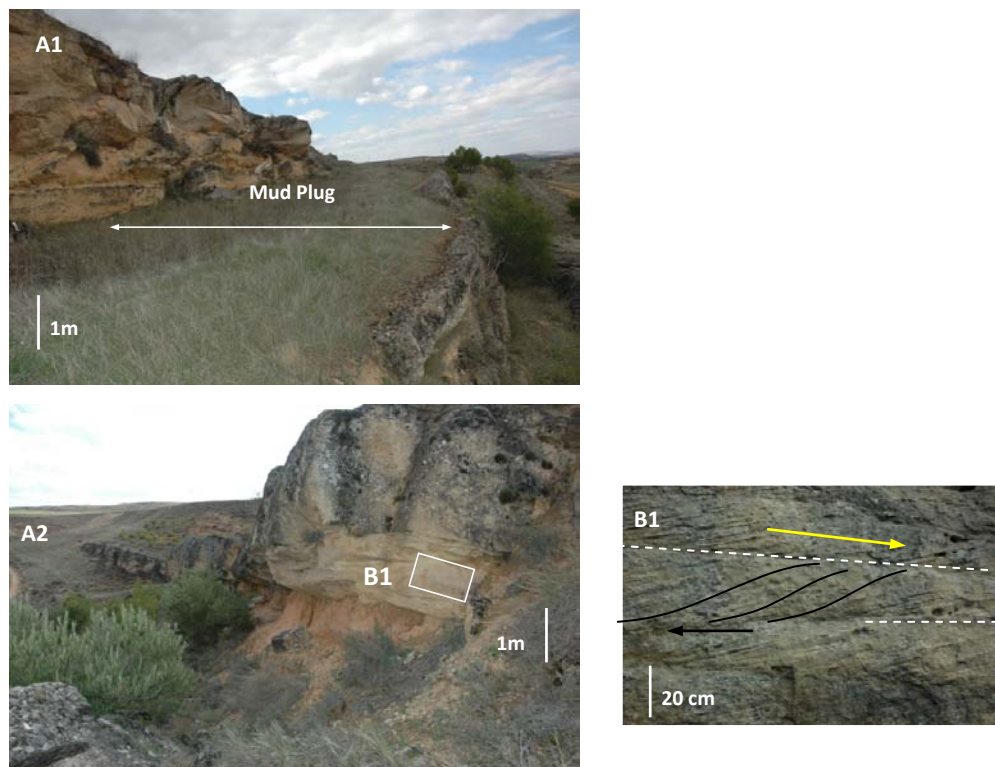


Fig. 11. Les Ceintures de méandre dans la plaine d'inondation. A) Coupe transversale des dépôts du chenal. L'association d'un Point bar et de son Mud plug détermine l'extrémité d'une boucle de méandre. Cette extrémité constitue un point repère de la ceinture de méandre. B) Plusieurs points repères permettent de reconstituer les ceintures latérales de méandre C) En dehors de la zone des ceintures les chenaux sont peu abondant, voir inexistant.

L'orientation des Mud Plug est déterminée par les sets striés à l'intérieur des barres de méandre qui indiquent la direction de migration des chenaux (Fig.11-A). Les mesures de position et d'orientation d'une quinzaine de Mud Plug ont ainsi permis de différencier deux ceintures latérales de méandre d'axes parallèles et d'orientations opposées. Ces deux axes délimitent le couloir principal de circulation qui a été formé par le chenal à l'Oligo-Miocène.



*Fig. 12. Dépôts associés à une ceinture latérale de chenal. A1) Dépôt de chenal abandonné « Mud plug », compris entre deux barres de méandre. A2) Barre de méandre avec base érosive. B1) Les strates (en noir) indiquent la direction du courant. Les sets stratigraphiques (en blanc) indiquent la migration du chenal.*

La position des mud Plug mesurée sur le terrain a été reportée sur la carte du domaine (Fig.13-A) et ont permis d'estimer le tracé des Ceinture latérales.

### III.III. Résultats

Les positions des « Mud Plug » sont essentielles à la reconstitution des ceintures latérales de méandres. Grâce à cette reconstitution il est désormais possible de contraindre le domaine d'étude avec une précision de l'ordre de la centaine de mètre. Les bordures du domaine ont été ajustées aux deux modèles Flumy et Isatis (Fig.13-A). Celles de Flumy sont repoussées sur l'extérieur d'un kilomètre pour prendre en compte les dépôts des crues de débordement.

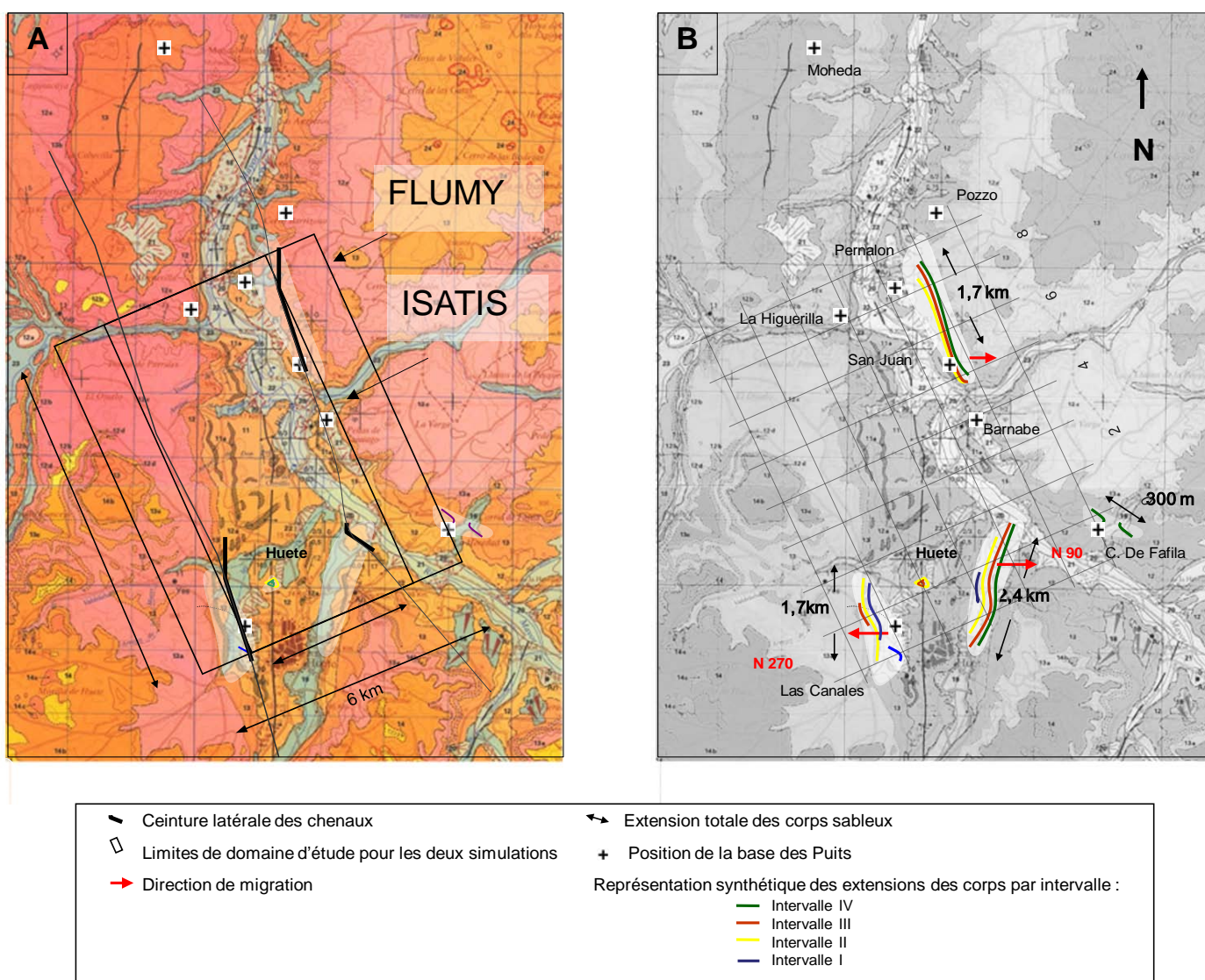


Fig. 13. A) Limitation du domaine de simulation pour les modèles Isatis et Flumy déterminées à partir des positions et directions des « mud Plugs ». B) Disposition des corps sableux, et représentation synthétique de leurs extensions (il s'agit ici des « grandes extensions » décrites chapitre III.III.2, p24).

Les directions de migration confirmées par les positions successives des mud Plug (Fig.13) permettent de confirmer l'orientation SE du paléochenal (en moyenne perpendiculaire aux directions de migration, et de même axe que les ceintures latérales).

### III.III.1. Les pourcentages

	Canales	La Higuerrilla	San Juan	San Bernabe	Pernalon		Net to Gross moyen
Intervalle IV							
total sable	3,20	1,50	2,50	2,50	3,00	IV	<b>0,18</b>
épaisseur	13,00	15,00	15,00	15,00	15,00		
Net to Gross	0,25	0,10	0,17	0,17	0,20		
Intervalle III							
total sable	0,00	2,10	0,00	0,00	0,00	III	<b>0,08</b>
épaisseur	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00		
Net to Gross	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00		
Intervalle II							
total sable	22,30	12,40	13,50	15,00	8,00	II	<b>0,42</b>
épaisseur	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00		
Net to Gross	0,66	0,36	0,40	0,44	0,24		
Intervalle I							
total sable	3,70	2,30	8,80	6,00	8,00	I	<b>0,38</b>
épaisseur	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00		
Net to Gross	0,25	0,15	0,59	0,40	0,53		

Tableau.2. Les intervalles sont obtenus à partir des cinq coupes terrain, des repères stratigraphiques et des proportions de sable. Les proportions de sable sont indiquées par le « Net to Gross ».

Cinq coupes sur un total de huit ont été sélectionnées sur un domaine d'étude de 8000m sur 6000m. Les coupes de Pozzo, Moheda et Corralde de Fafila se trouvent en dehors de la ceinture latérale de chenaux repérée figure. Ils ne seront pas utilisés pour cette étude.

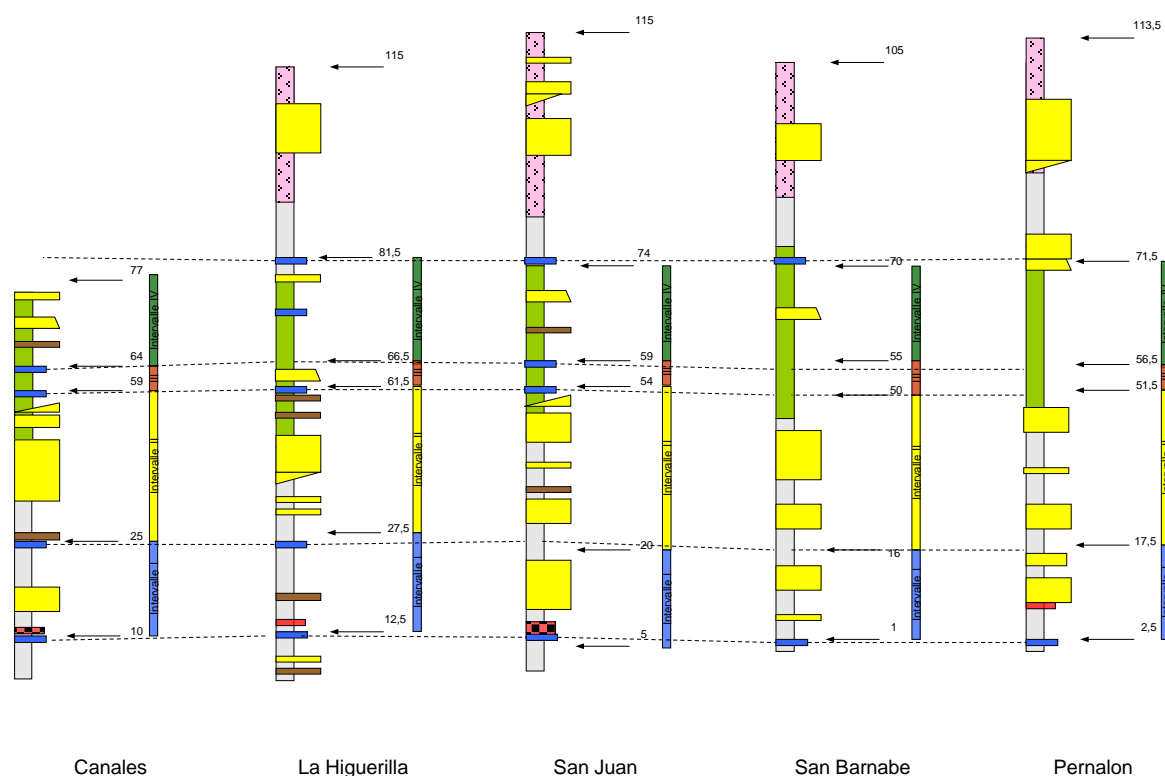


Fig.14. Représentation schématique des cinq puits du bassin de Loranca utilisés pour la simulation. Quatre intervalles sont délimités verticalement grâce à des calcaires lacustres qui servent de repères stratigraphiques. On remarque que ces intervalles sont isopaques malgré qu'ils ne soient pas à la même altitude.



### III.III.2. Les extensions

A l'intérieur d'un intervalle, les corps sableux ne sont pas systématiquement continus mais présentent plus généralement des interruptions. Ils dessinent ainsi une succession de corps sableux intermédiaires (Fig.15-16-17) qui constituent des corps plus étendus lorsqu'on les regroupe : **grandes extensions** (Fig.13-B). Les corps intermédiaires, **petites extensions**, ont été mesurés individuellement sur le terrain, puis repositionnés et corrélés entre eux à l'aide de marqueurs stratigraphiques afin d'attribuer à chaque niveau le long des puits des tendances moyennes d'extension.

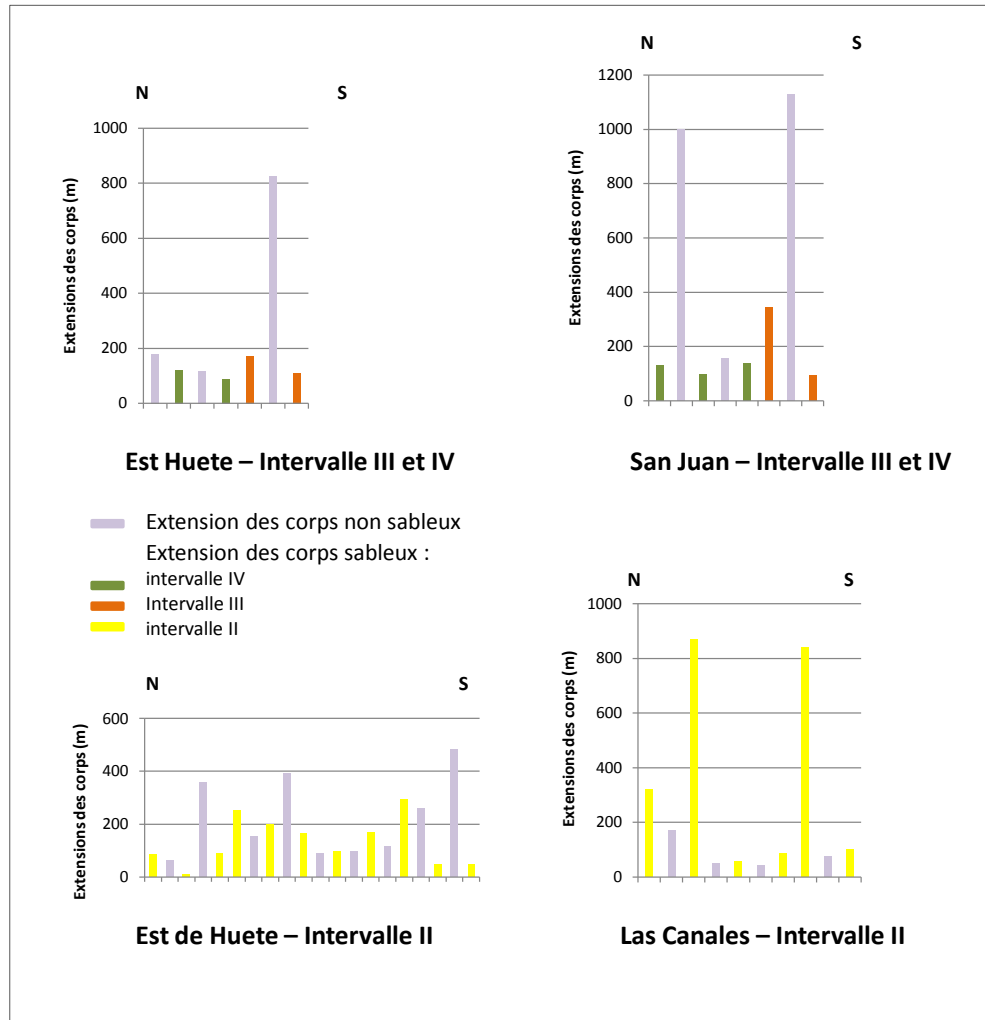


Fig.15. Représentation des extensions sableuses et des intervalles vides (gap) pour les intervalles II et IV. L'extension des corps sableux correspond sensiblement à celle des gaps. Les dimensions des corps sableux d'un même intervalle ne sont pas identiques d'une ceinture de méandre à l'autre.

- L'intervalle II a des extensions pour la plupart inférieures ou égales à 200m. Deux mesures sont plus élevées mais restent infra-kilométriques. Les intervalles vides (Gaps) sont relativement de même dimension que les extensions des corps gréseux.
- L'intervalle IV est décrit par un nombre moins important de données. Par conséquent II est difficile d'en donner une tendance représentative. Pourtant, si on associe les données obtenues pour l'intervalle III, alors on peut constater que les gaps sont presque toujours de plus grande dimension que les corps gréseux.

Int	E	Net to Gross	Age	Epaisseur des corps sableux (m)			Epaisseur des Gaps (m)			Extensions longitudinales des corps sableux (m)			Extensions longitudinales des Gaps (m)			Extensions latérales des corps sableux (m)
				moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy
IV	15	0,18	0,87	1,6	0,5	3,0	5,2	2,1	12	115,2	88	137	364	119	1000*	120*
III	5	0,08	0,26	2,1			5,0			181,2	96	345	977,5	825	1130	
II	34	0,42	1,60	4,5	0,4	18,0	4,7	0,2	15	219	47	867	170	65*	482	
I	15	0,38	0,87	4,1	1,0	8,8	4,5	0,2	11,1	224	65	539	163	90	283	90

Fig.16. Synthèse des données des intervalles I à IV de la série Oligo-Miocène de Huete (2009)

(mise en page : paysage)

Fig.17.

(mise en page : paysage)

### III.III.3. Les intervalles

Ils résultent de l'analyse des extensions sableuses sur les affleurements et des pourcentages de sables dans les puits.

Nous avons défini quatre intervalles sur la base des caractéristiques des unités sableuses, de leur distribution spatiales ainsi qu'à l'aide de cinq repères stratigraphiques. Pour étudier les extensions (Fig.15) nous avons relevés les dimensions de 36 corps sableux suivant le sens de l'écoulement du fleuve ; 7 corps pour l'intervalle I ; 20 corps pour l'intervalle II ; 4 corps pour l'intervalle III et 5 corps pour l'intervalle IV. Les dimensions des corps selon la verticale sont données par les mesures de puits. Le net to Gross indique le rapport entre la quantité de sable sur la quantité totale.

- L'intervalle I (15m ; 0,87 Ma) est constitué de chenaux peu amalgamés, de barres sableuses, de méandres abandonnés, de bancs silteux, de crevasses splay distal. On repère au pied de la marmorisation dans les paléosols. Le net to gross est de 0,38. Les extensions des formes sableuses vont de 65m à 539m, en moyennes elles sont de 224m.
- L'intervalle II (34m ; 1,6 Ma) est constitué de chenaux amalgamés, d'un ensemble de barres de méandre, de plusieurs mud plug repérés à Canales, au Nord Est de Huete et à San Juan. L'intervalle est riche en sable (Net to Gross : 0,42). L'extension minimum des corps sableux est de 47m, l'extension maximum est de 867m et la moyenne des corps sableux représente 219m ; celle des gaps est de 977,5m. L'épaisseur moyenne mesurée sur 16 corps sableux est 4,45m (min, 0,4m ; max, 18m). L'épaisseur moyen des gaps est 29,55m (min, 0,2 ; max, 15m).
- L'intervalle III (5m ; 0,26 Ma) n'a pas de réelle particularité et ne se différencie pas dans sa configuration de l'intervalle IV. Pourtant on notera tout de même qu'il présente un pourcentage très faible de sable (net to Gross : 0,08). Les occasionnelles extensions des corps sont relativement importantes (min : 96m ; max : 345m ; moy : 181,25).
- L'intervalle IV (15m ; 0,87 Ma) est formé de chenaux isolés, de sols marmorisés, de calcaires lacustres, et de végétation qui remplace des bancs fins lessivés. Net to gross : 0,18. La dimension des 5 corps mesurés à Canales et à San Juan sont relativement équivalentes (min, 88m ; max, 137m) avec une moyenne de 115,2m. Les gaps sont de même dimension que les corps sableux (moy, 364 ; ou 152, en ne comptant pas une valeur aberrante). L'épaisseur moyenne mesurés sur 8 corps (en comptant les CSI) est 1,58m (min, 0,5m ; max, 3m). L'épaisseur des gaps (moy, 13,42 ; min, 2,1 ; max, 12m).

## IV. Les simulations

Les simulations non conditionnelles ont permis de déterminer les paramètres qui influent sur les proportions de sable par intervalle et de tester l'influence d'un « channel belt » sur la simulation. Elles ont permis d'étudier les extensions des corps dans les directions d'écoulement du fleuve et perpendiculairement à l'écoulement. Enfin elles ont permis de comparer ces extensions à celles produites par un autre modèle et à celles d'un affleurement.

Les simulations conditionnelles ont permis de vérifier que les faciès de barre de méandre (PB) de petite épaisseur (<1,4m) doivent être remplacés par des faciès de rupture de levée (CS) pour respecter la hauteur des dépôts et les pourcentages de sable. Les simulations conditionnelles ont également permis d'étudier la connectivité des corps perméables dans le réservoir.

### IV. I. Flumy

#### IV.I.1. Simulations non conditionnelles

##### IV.I.1.1. Les pourcentages de sable

Les pourcentages de sable sont obtenus en simulation en faisant varier la fréquence et l'intensité des crues (mémoire Mbang Bilombo , 2008), dont les variations jouent sur la quantité relative des dépôts argileux et permettent de modifier le rapport Sable sur argile (Net to Grauss). Nous reprendrons ces paramètres pour retrouver les pourcentages des intervalles de Huete (Tab.2.p22).

##### Deux nouveaux paramètres de calibration

Pour obtenir une valeur de proportion de sable les variations des valeurs de fréquences et d'intensités des crues sont habituellement effectuées de manière indépendante l'une de l'autre à chaque simulation. Cette évolution des valeurs n'est pas réaliste car il existe un coefficient de proportionnalité entre ces deux paramètres (Bridge, 2003) (Fig.18).

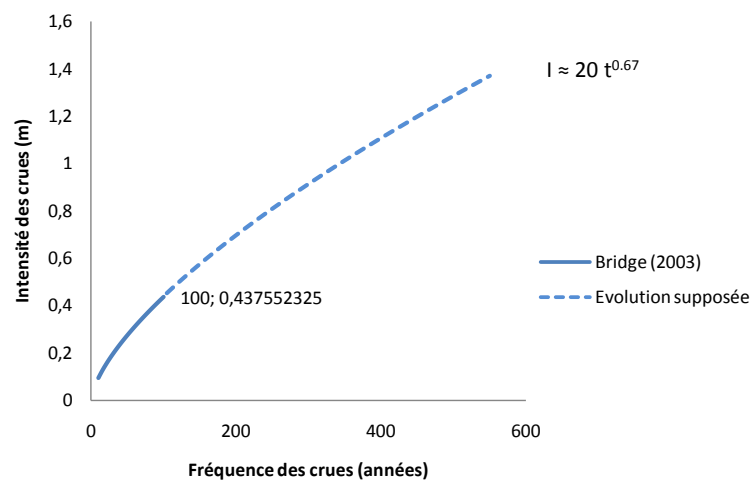


Fig. 18. Evolution conjointe des valeurs d'intensité et de fréquence observées dans les systèmes naturels (Bridge, 2003). Les valeurs d'intensité dépendent de la fréquence suivant l'équation  $I (\text{intensité}) = 20 t^{0.67}$ .

De plus, le respect du coefficient de proportionnalité défini par Bridge rend imperceptibles les variations de pourcentage de sable d'une simulation à l'autre (Tab.3). Cette constatation rend par conséquent très difficile l'utilisation de ces deux paramètres pour la calibration des proportions de sable.

	1	2	3	4	5	6
Intensité des crues (m)	0,1	0,2	0,28	0,36	0,43	1,37
Fréquence des crues (its/crue)	10	30	50	75	100	550
Pourcentage de sable (%)	35,3	<b>12,6</b>	<b>11,7</b>	<b>11,2</b>	<b>12,3</b>	<b>11,8</b>
Pourcentage de sable prévisionnelle	15	11	10	10	10	13
Hauteur des dépôts (m)	39	46	50	42	44	38
Nombre d'itérations	50000	50000	50000	50000	50000	50000

*Tableau 3 . Simulations pour déterminer les pourcentages de sable en respectant les relations de proportionnalité entre l'intensité et la fréquence des crues définies par Bridge (2003). La fréquence des crues correspond à un intervalle de temps (nombre d'itérations) entre deux crues (its/crues). L'intensité des crues correspond à la hauteur des sédiments déposés sur la plaine d'inondation lors de chaque crue (m). (cf. processus p8.)*

Pour remédier au problème de l'utilisation des fréquence-intensités des crues nous allons proposer à titre expérimental à deux autres paramètres pour faire varier les proportions de sable : le gradient de pente et le coefficient d'érodabilité (Tab.4).

Simulation		1	2	3	4	5
Paramètres	Pente	0.001	<b>0.002</b>	0.001	0.001	0.001
	Coef. Erodabilité	2 <sup>e</sup> -0.8	2 <sup>e</sup> -0.8	<b>3<sup>e</sup>-0.8</b>	2 <sup>e</sup> -0.8	2 <sup>e</sup> -0.8
	Période d'OB	150	150	150	<b>250</b>	<b>600</b>
Résultats	Epaisseur des dépôts (depuis 0)	31	33	32	23	12
	Epaisseur des dépôts (sensu stricto)	26	28	27	18	7
	% de sables (PB)	13	17	20.5	15.6	48.5
	% de sables (Total)	15.8	19.2	23.5	18.5	52.5

*Tableau.4. Influence de la pente, du coefficient d'érodabilité et de la période de crue (sans modifier l'intensité) sur les proportions de sable.*

- Une pente très faible (variation de 0,001 à 0,002) augmente facilement les proportions de sable de plusieurs pourcent (Tab. 4).
- Une augmentation du coefficient d'érodabilité entraîne également une augmentation du pourcentage de sable (Tab. 4). Pourtant cette valeur simulée semble un peu élevée vis-à-vis du coefficient de référence déterminé par Sun (1996), pour respecter selon lui l'évolution réaliste d'un chenal.

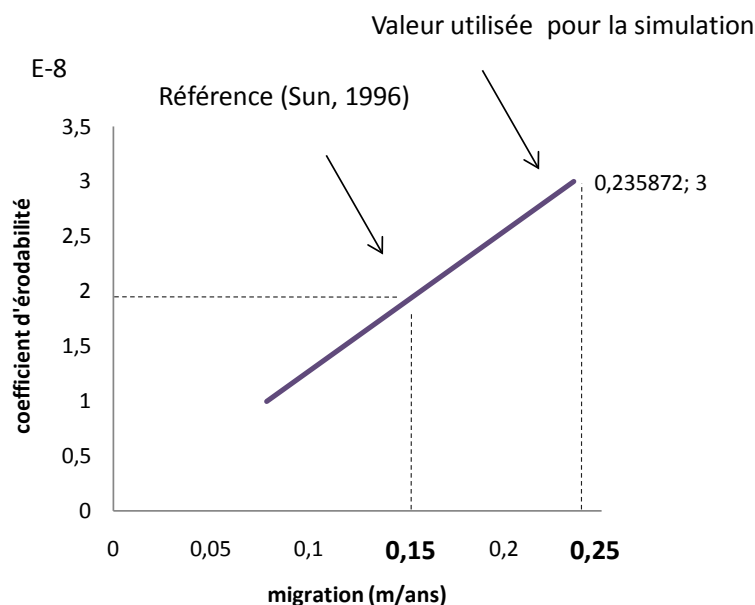


Figure. 19. Valeurs de migration pour différentes vitesses de perturbation. La valeur de migration de référence est  $2.E-8$  qui correspond à  $0,1356$  m par année (Sun, 1996). Pour une valeur de migration de  $3.E-8$  nous obtenons  $0,2358$  m par année, qui semble réalisable mais un peu élevée pour une évolution réaliste de chenal d'après Sun.

Intervalle	Pente	Coefficient Erodabilité	Freq OB	Intensité	% sable	Itérations
<b>IV</b>	0.0017	$3e-8$	125	0.50	<b>18</b>	9 000
<b>II</b>	0.003	$3e-8$	550	1.37	<b>40</b>	50 000

Tableau.5. Les proportions de sable par intervalle ont été reproduites par la simulation en utilisant le coefficient d'érosion et de la pente en respectant les facteurs de proportionnalité de Bridge (2003).

Le choix de ces nouveaux paramètres nous a permis de simuler avec succès les valeurs de proportion de sable correspondantes à celles de Huete (Tab.5). Quant à l'utilisation d'un coefficient d'érodabilité on constatera tout de même avec satisfaction sur l'interface graphique que les morphologies ainsi que l'évolution du chenal semblent parfaitement cohérentes (Fig.20).

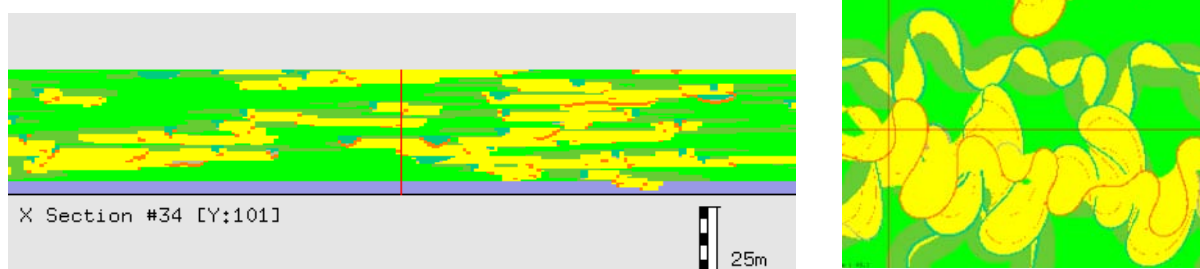


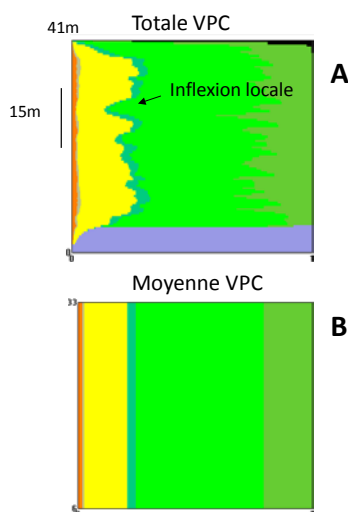
Fig.20. Intervalle II qui respecte les rapports de proportionnalité entre les intensités et les fréquences de débordement décrits par Bridge (2003). Les boucles de méandre sont bien développées. Les proportions de sable sont respectées.

#### IV.1.1.2. Recommandation pour la simulation des intervalles de petite épaisseur

Deux intervalles sédimentaires (intervalle II et IV) du domaine de Huete ont été sélectionnés pour les simulations car ils présentent des pourcentages de sable et des taux d'amalgamation différents. Pourtant l'un des deux intervalles est plus petit de moitié que le premier, représentant 15m de sa base à son sommet, et doit faire l'objet de certaines précautions quant au calibrage des simulations.

Lorsqu'on simule plusieurs fois un petit intervalle avec le même jeu de paramètres il est souvent difficile d'obtenir des résultats identiques sur les proportions de sable.

Cette difficulté est causée par le peu de temps qu'on accorde en simulation au développement du chenal pour qu'il soit représentatif du paramétrage. Ainsi, pour un petit intervalle, si un chenal commence par se développer sur la périphérie du domaine, alors des sables seront déposés majoritairement en dehors du domaine tandis que les argiles seront comptabilisées dans le domaine. Pour un petit intervalle, ce phénomène aura donc beaucoup de répercussions sur les pourcentages de sable. Il est donc important de rester vigilant et critique sur les résultats des petits intervalles, qui peuvent ne pas toujours traduire une tendance générale (Fig.21).



*Fig.21. Pour simuler un intervalle de petite épaisseur (ici 15m) on choisit dans un premier temps de déterminer les paramètres liés aux proportions de sable sur un grand intervalle (41m) pour que les variations locales (ici, une inflexion) ne risquent pas de masquer une tendance générale.*

Pour contrer cette difficulté une méthode simple peut être utilisée pour calibrer plus facilement les petits intervalles.

Il s'agit de traiter ces conditions de dépôts dans un premier temps à l'aide d'un grand intervalle. Une fois les paramètres globaux (représentatifs) acquis, on peut lancer une seconde simulation pour respecter les hauteurs d'intervalle.

#### IV.1.1.3. Les channel belts

Nous chercherons à présent à connaître l'impact d'une ceinture de méandre sur les proportions de sable. Pour cela nous avons introduit une carte d'érodabilité (Fig.24.) en respectant les positions des ceintures de méandre repérées sur le terrain.

La carte d'érodabilité permet de contraindre la migration latérale du fleuve. Par conséquent les sables du chenal seront concentrés sur une surface plus étroite du domaine ce qui aura pour conséquence de modifier localement les courbes verticales de proportion (VPC).

Nous avons réalisé deux simulations dont l'une est contrainte par une ceinture de méandre et dont l'autre ne l'est pas (Tab.5).

Caractéristique de migration du fleuve	Intervalles	% Sable			Nombre d'itérations	
		Pronostique	VPC PB	VPC Total	entre 2 OB	Total
Pas de ceinture latérale (1)	Intervalle IV	<b>12</b>	<b>13,8</b>	<b>17</b>	<b>125</b>	<b>14 000</b>
	Intervalle II	<b>37</b>	<b>41,1</b>	<b>42,8</b>	<b>675</b>	<b>245 000</b>
Avec ceinture latérale (2)	Intervalle IV	<b>17</b>	<b>28</b>	<b>30,8</b>	<b>125</b>	<b>14 000</b>
	Intervalle II	<b>56</b>	<b>49,5</b>	<b>52,3</b>	<b>675</b>	<b>68 000</b>

*Tableau.5. Résultats de la simulation non conditionnelle pour un fleuve contraint et pour un fleuve non contraint par une ceinture de méandre. Le pourcentage de sable « PB » est donné par le seul faciès « Point Bar » (PB). Le pourcentage de sable « total » est donné par les faciès Point Bar, Channel lag et sand plug. Le « pronostique » est calculé par anticipation par la machine à titre indicatif.*

- La Simulation sans ceinture de méandres (1) a son fleuve autorisé à migrer sur tout le domaine d'étude, soit 8000m sur 6000m. Le calibrage des paramètres de simulation permettent de retrouver très sensiblement les proportions de sable déduites du terrain (Tab. 5 et Tab.2 p22).
- Avec la Simulation non contrainte par une ceinture(2) on ne cherche pas à reproduire un pourcentage de sable issu du terrain mais à comparer les pourcentages de la simulation contrainte(1) et non contrainte(2) en conservant les mêmes paramètres de simulation (« paramètres d'entrée »).

On remarque que les pourcentages globaux sont plus élevés dans le cas de la simulation avec ceinture (Tab.5).



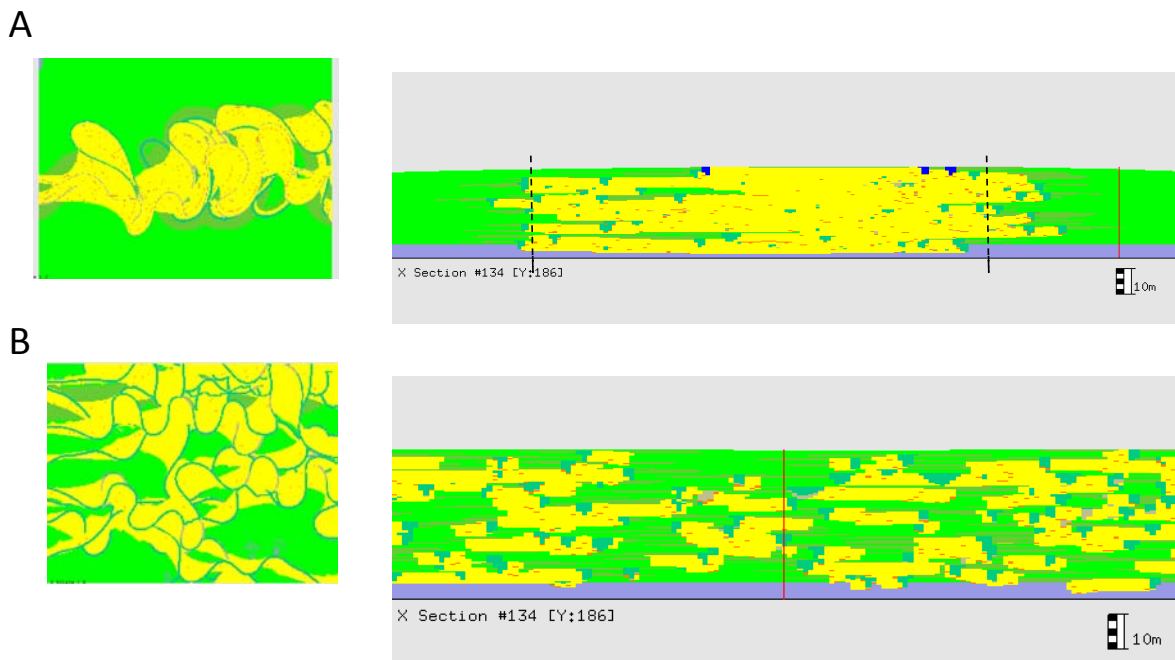


Fig.22. Vues aériennes et coupes transversales d'une simulation contrainte par des ceintures latérales (A) et non contraintes (B).

Grâce à l'interface graphique il est possible d'observer au travers des courbes verticales de proportion (VPC) la répartition du sable sur le domaine. On constate que les pourcentages de sable sont anormalement élevés entre les ceintures de méandre (Fig.22-23).

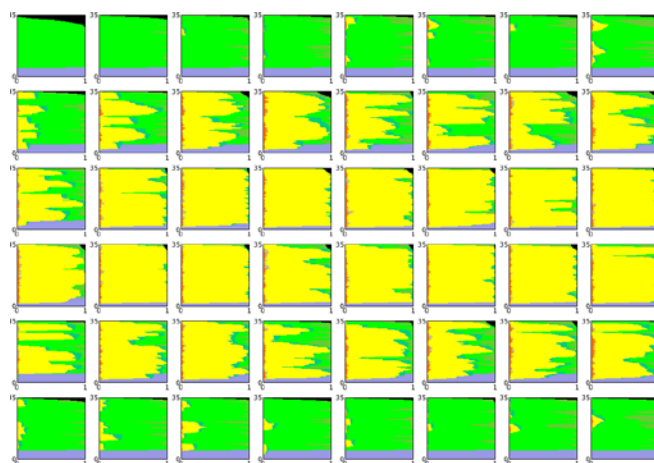
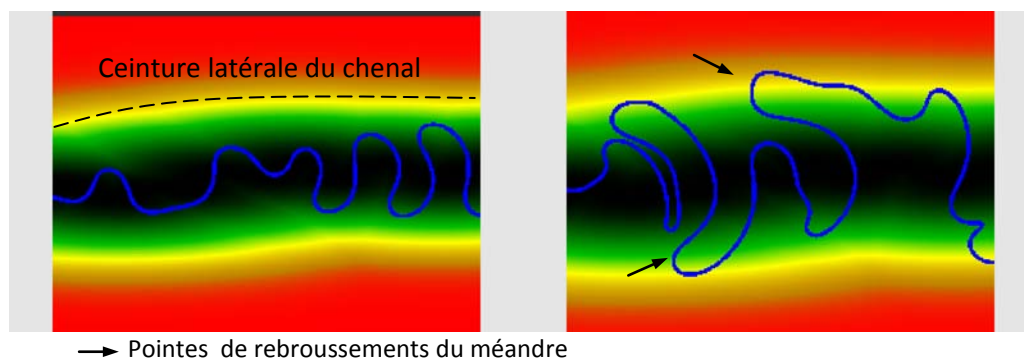


Fig.23. Courbes verticales de proportions couvrant l'ensemble du domaine. Les pourcentages sont exagérément élevés entre les channel belts.

Pour pallier le problème de la surélévation des proportions de sable entre les ceintures les paramètres de simulations peuvent être modifiés pour retrouver des proportions de sable souhaitées. Pourtant cette méthode a révélé un problème déjà évoqué (Tab.5), car il surestime les proportions également lorsqu'on en fait une moyenne sur l'ensemble du domaine. Mais il y a un autre inconvénient pour l'instant à l'utilisation de carte des ceintures simulées dans Flumy par les cartes d'érodabilité. Il s'agit de la perturbation de la morphologie des chenaux (Fig.24).



*Fig.24. Illustration de la morphologie d'un fleuve contraint par un « channel belt ». Canal nouvellement apparu sur la plaine d'inondation (gauche) ; le même canal après quelques centaines d'itérations (droite). Les ceintures latérales (en jaune) limitent l'extension des boucles de méandre.*

Les anomalies remarquées lors des simulations sont pointées sur l'interface graphique de Flumy (Fig.24). Elles correspondent à des « rebroussements » du chenal, dus aux parois (les ceintures) qui accrochent les méandres. Ces anomalies sont également soupçonnées d'être à l'origine de la surestimation de sable moyen sur le domaine (Tab.5)

## IV.1.2. Simulations conditionnelles

Les simulations conditionnelles (contrainte par des puits) ont été effectuées en utilisant les informations collectées pendant la mission terrain à Huete pour deux intervalles stratigraphiques (Tab.7) et en utilisant les paramètres de calibration obtenus grâce aux simulations non conditionnelles.

Elles ont permis de tester une nouvelle stratégie de conditionnement, en remplaçant les faciès Point bar de petite taille par des Crevass Splay, et ont permis d'étudier l'impact des puits sur les Morphologies.

### IV.1.2.1. Résumé des résultats obtenus pour deux intervalles

Grâce à l'acquisition de données de terrain de Huete nous avons pu sélectionner deux intervalles différents dans leurs pourcentages de sable et leurs épaisseurs.

Avec les simulations non conditionnelles nous avons pu sélectionner les paramètres adaptés qui ont amené à ces proportions, et qui seront repris pour les simulations conditionnelles.

Les simulations conditionnelles, résumées ci-dessous (Tab.7-8), respectent les proportions de sables, considèrent les PB<1,4m comme des CS, et n'intègrent pas de barrières d'érodabilité.

Simulation	Epaisseur (m)	% Sable				
		Pronostic	VPC PB	VPC Total	Its entre OB	Nb Itérations
Intervalle IV	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>125</b>	<b>45 000</b>
Intervalle II	<b>34</b>	<b>32</b>	<b>40</b>	<b>41,8</b>	<b>550</b>	<b>265 000</b>

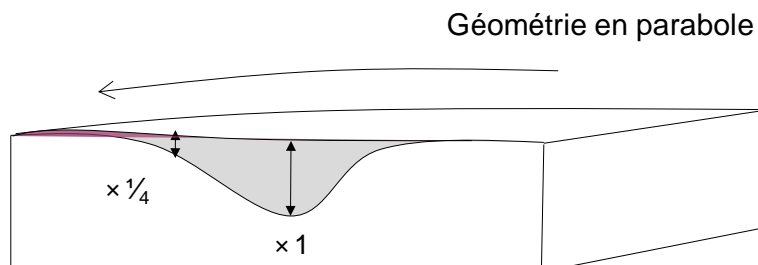
Tableau.7. Résultats des résultats sur les proportions de sable de la simulation conditionnelle de l'intervalle II et IV.

Domaine	8000 × 6000m	
Chenal :		
- Profondeur	2,3m	
- Largeur	75m	
Pente	0,001	
Maille de la grille	30m × 30m	
Coefficient d'érodabilité	2 <sup>E</sup> -8	
Fréquence des avulsions régionales	2000 itérations	
Avulsions locales	Autorisées	
Facteur exponentiel de décroissance des dépôt en s'éloignant du fleuve	3000m	
Les crues de débordement (OB)	Intervalle II	Intervalle IV
- Fréquence	550its	125 its
- Intensité	0,43m	0,43m

Fig.25. Résumé des paramètres de simulation Flumy des intervalles II et IV du bassin de Loranca.

#### IV.II.2.2. Remplacement des petites épaisseurs de Point Bar (PB)

Le remplacement des petites épaisseurs de barre de méandre, ou Point Bar (PB), a une origine liée à la géométrie en parabole du chenal de la modélisation (Fig.26) qui sous-représente les faibles épaisseurs par rapport à un système naturel. Le choix est alors de remplacer les épaisseurs inférieures de  $\frac{1}{4}$  la profondeur du chenal par un autre faciès, les Crevass Splay I (CSI) (dépôts de rupture de levée).



Bordure convexe du chenal :

- Système Naturel: dépôts de sables
- Simulation: ne prévoir pas le dépôt de sable

Figure.26. La géométrie en parabole du chenal de la modélisation sous-représente les faibles épaisseurs par rapport à un système naturel.

Les faciès « point bar » (PB) dont l'épaisseur au puits est inférieure à  $\frac{1}{4}$  la profondeur du chenal (ici nous prendrons 1,4m) obligeront le logiciel à faire migrer le chenal de telle manière à ce qu'il dépose du sable pour honorer le puits. L'inconvénient d'un passage du chenal à ce niveau du puits est que les dépôts vont être plus épais que 1,4m. Il en résulte une surestimation locale des proportions de sable (Fig.27-A).

Conversion de faciès	Epaisseur (m)	% Sable				
<b>PB&lt;1,4m = PB</b>	Hauteur	Pronostic	VPC		Fréquence OB (its)	Itérations
			<b>PB</b>	<b>total</b>		
	37	36	46.5	53.5	650	285 000
<b>PB&lt;1,4m = CS</b>	Hauteur	Pronostic	VPC		Fréquence OB (its)	Itérations
	37	36	44.9	52.2	650	300 000

Tableau.6. Légère diminution des proportions de sable dans le cas d'une simulation avec transformation des faciès « Point bars » de petite épaisseur en faciès « Crevass Splay ».

Pour apporter une correction à la modélisation il a été choisi de remplacer les Faciès PB dont l'épaisseur est inférieure à l'épaisseur du chenal par le faciès CS. Le logiciel interprète le CS comme un dépôt de bordure de chenal. De cette manière le chenal se rapproche du puits pour déposer le CS mais ne le recoupe pas (Fig.75-B). Dans cette configuration le logiciel contraint le puits à repousser le chenal. Cette alternative implique d'apporter avant la simulation une correction aux données de puits. Cette correction permet d'honorer correctement les puits et d'éviter les surestimations des proportions de sable.

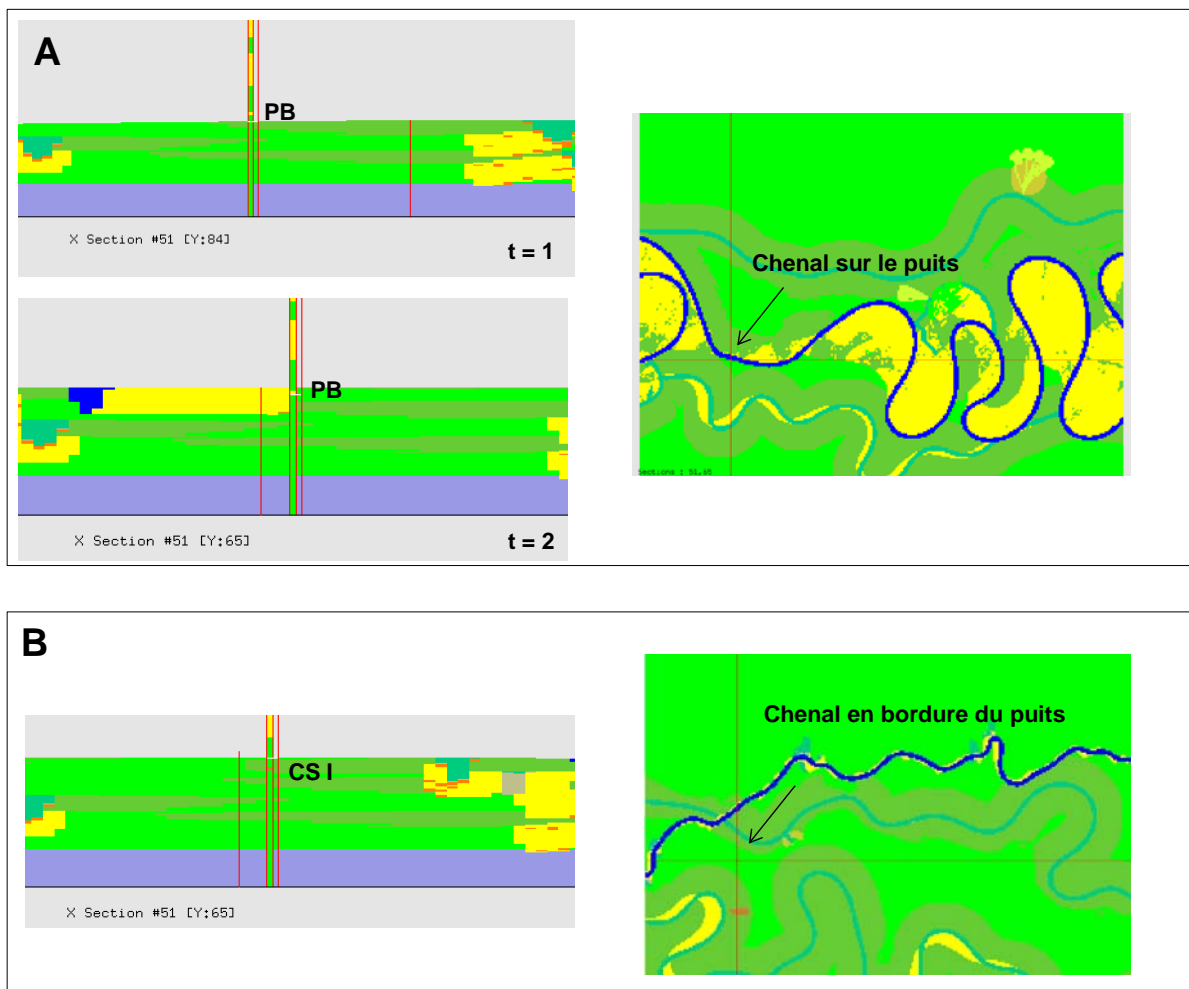


Fig.27. Evolution d'un chenal et de ses dépôts conditionnés par un puits. A) Le puits contient un faciès PB de petite épaisseur ( $E < \frac{1}{4}$  profondeur du chenal), ce qui a pour conséquence d'attirer le chenal et d'augmenter les dépôts de sable. B) Le faciès PB a été remplacé par un faciès CS de même épaisseur, ce qui a pour conséquence de tenir le chenal à une distance minimum et de diminuer les proportions de sable.

Pour illustrer le caractère répétitif de ce phénomène deux simulations sont réalisées avec des puits contenant 3 Point Bar de petite taille (Fig.28). La première simulation (A, B, C) utilise des données de puits pour lesquelles les faciès initiaux (issus du terrain) ne sont pas modifiés. La seconde simulation utilise des données modifiées, de manière à remplacer les faciès Point bars (PB) de petite épaisseur ( $< 1,4\text{m}$ ) par des faciès Crevass Splay (CS).

- Les corps sableux des simulations avec uniquement des PB ne sont pas repoussés et honorent incorrectement les puits en y déposant plus de sable que prévu.
- Les corps des simulations avec  $\text{PB}_{\text{min}} = \text{CS}$  rejoignent le puits dans leur extrémité et ne provoquent pas un sur-dépôt de sable.

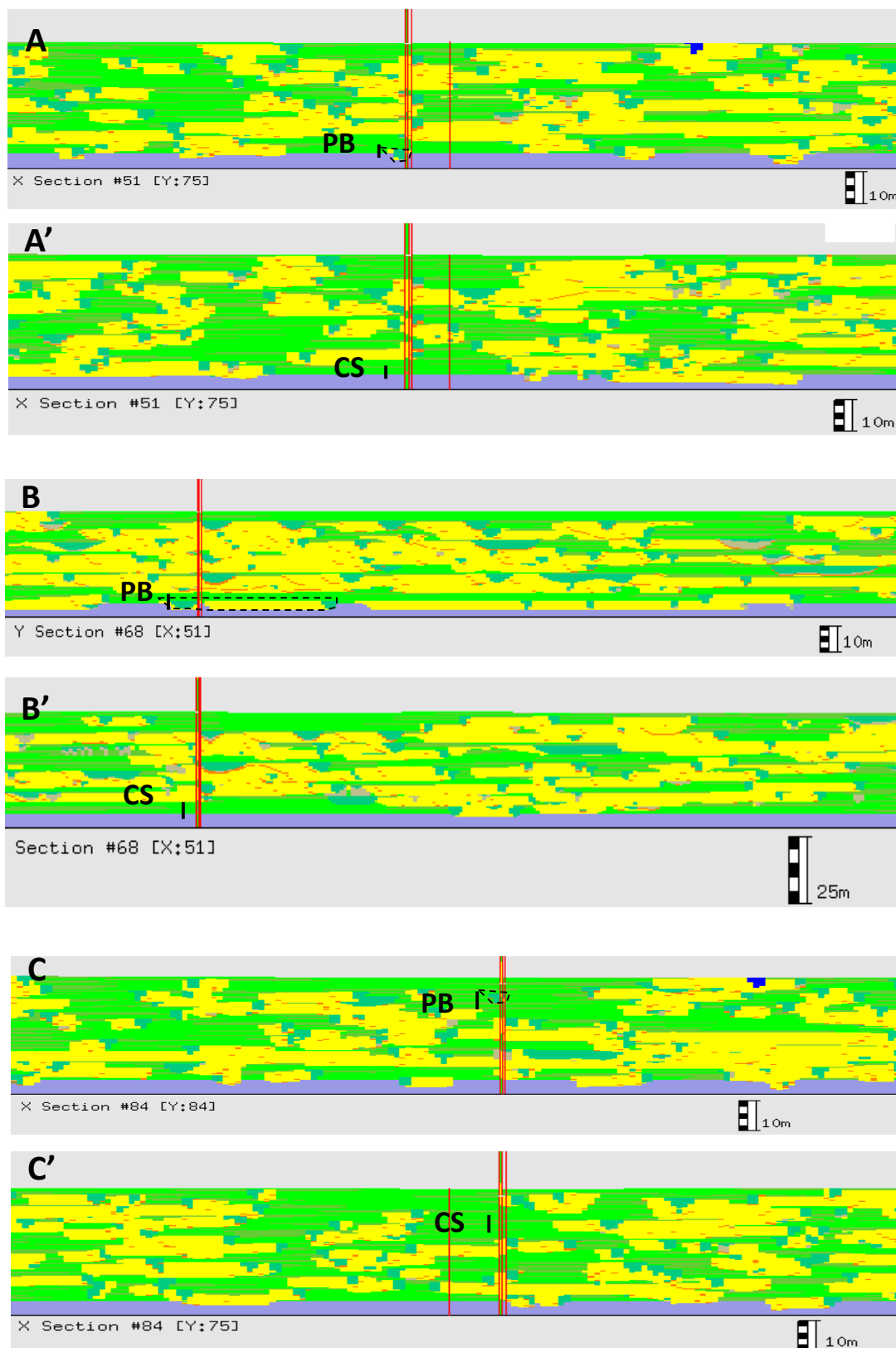
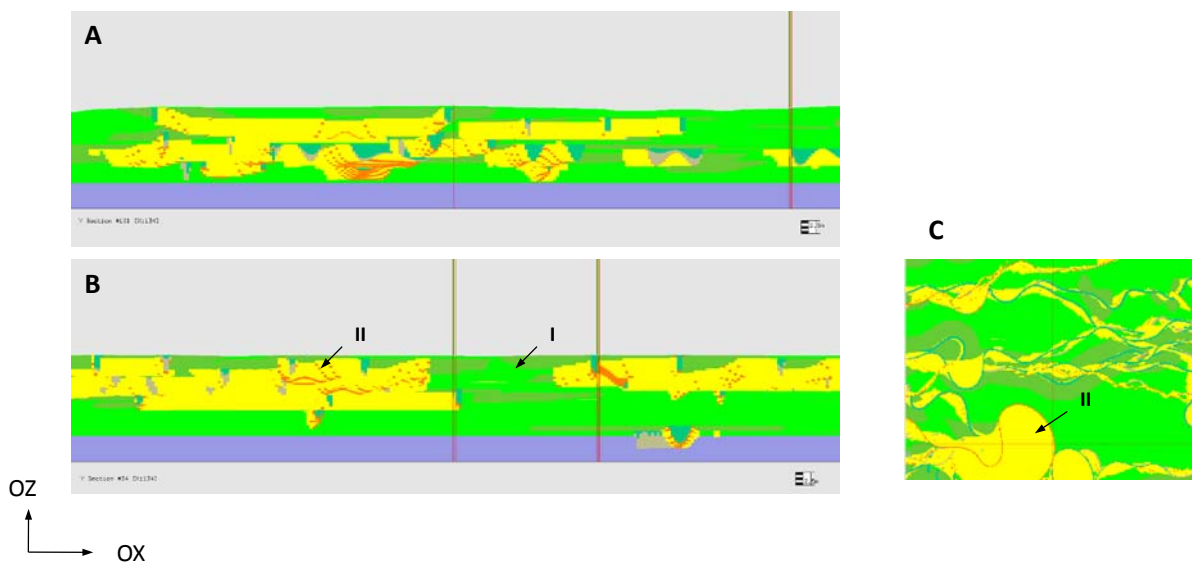


Fig.28. Sections transversales de deux simulations : la première (A', B', C') avec les faciès PB de petite épaisseur (<1,4m) dans les puits remplacés par le faciès Crevass Splay. La seconde (A', B', C') conserve ses faciès d'origine. Les simulations avec Crevass Splay déposent moins de sable localement que les simulations qui conservent les petits PB.

#### IV.II.2.3. Un Impact du conditionnement sur la morphologie et le dépôt

L'utilisation des puits permet à la simulation de respecter certaines données spatiales fixes et réelles. C'est donc un atout majeur pour la représentation d'un réservoir. Pourtant il faut noter que certaines manoeuvres peuvent provoquer des effets non souhaités. C'est le cas pour cette simulation dont le positionnement rapproché de deux puits empêche la circulation du chenal entre leurs positions (I, Fig.24).



*Fig.29. En simulations conditionnelle deux puits trop proches l'un de l'autre peuvent affecter anormalement la morphologie du chenal avec le développement surdimensionné des boucles de méandre (C) et modifier la répartition naturelle des dépôts de sable (B). Les résultats ont été comparés avec une simulation non conditionnelle (A).*

- Des accumulations de sable s'organisent à la périphérie des puits, dûs probablement au développement anormal de boucles de méandres (II, Fig.29)

Il faudrait effectuer plus de simulations pour comprendre davantage ce problème.

On peut malgré tout proposer une solution dans l'immédiat qui concerne le rapprochement des puits. Il faut en effet veiller à respecter des espacements assez larges entre les puits. L'équivalent de la largeur d'une boucle de méandre, soit 2-3km dans notre cas, devrait être suffisant pour le développement régulier du chenal.

## IV.II. Isatis

### IV.II.1. Choix des paramètres en fonction du terrain

La préparation d'une simulation Isatis est relativement longue et minutieuse. En contre-partie elle permet de simuler et de calculer divers paramètres d'un réservoir. Elle permet dans notre cas d'étude d'estimer la connectivité, d'intégrer des simulations provenant d'un autre logiciel et de produire une simulation à partir des extensions des corps sédimentaires.

#### IV.II.1.1. Les proportions

Les proportions utilisées aussi bien pour les simulations conditionnelles que non conditionnelles sont les mêmes que celles choisies pour la simulation de Flumy, soit en moyenne 20% et 40%. Elles ont été calculées à partir des données des coupes de terrain (Tab.2 p22) et représentées par les courbes verticales de proportions (VPC) (Fig.30-B).

Pourtant, comme nous venons de le remarquer, le travail de paramétrage est long pour obtenir la simulation d'un intervalle. Nous voulons simuler plusieurs intervalles dont les proportions sont différentes afin d'en étudier la connectivité. Pour cela il a été choisi ici de conserver le même paramétrage pour tous les intervalles mais en y modifiant simplement les courbes de proportions.

Cette manipulation semble possible car la VPC est le seul paramètre d'entrée qui est propre à un intervalle dans Isatis. Quant aux autres paramètres ils restent les mêmes pour tous les intervalles ; excepté l'épaisseur qui de toute manière n'aura pas d'incidence sur la connectivité.

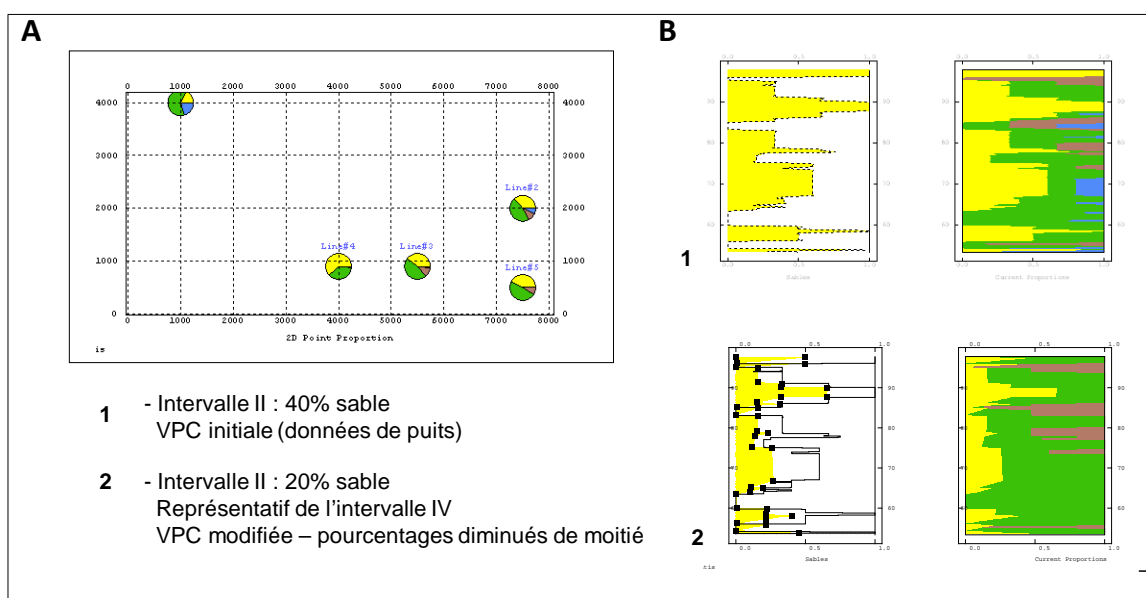


Fig.30. A) Proportion des lithotypes de l'intervalle II pour l'ensemble des puits. Les proportions varient d'une localité à l'autre mais la courbe verticale de proportion résultante est la même sur l'ensemble du domaine. B)-1. Courbe verticale de proportion de l'intervalle II (VPC). -2. Proposition d'une VPC pour l'intervalle IV à partir des paramètres de la simulation II, afin de déterminer rapidement les connectivités sans recommencer un long paramétrage.

Il est à noter que les courbes de proportions (VPC) sont des paramètres d'entrée avec la méthode Isatis. Les VPC sont constantes sur l'ensemble des positions géographiques du domaine bien que les proportions des puits varient d'un puits à l'autre (Fig.30-A).



#### IV.II.1.3. Les dimensions

Pour réaliser une simulation conditionnelle de l'intervalle II en respectant les dimensions naturelles des corps d'un système fluvatile nous avons procédé à deux étapes préliminaires.

La première étape fut d'observer les dimensions des corps réels sur le terrain de Huete. Cette observation doit permettre de déterminer des extensions sableuses de référence qui pourront être utilisées pour déterminer les portées des variogrammes (Fig. 35-37). La seconde étape a été de tester en simulation non conditionnelle différents modèles statistiques en modifiant les portées horizontales-verticales des variogrammes puis le schéma de seuillage (Fig.34).

Il sera enfin possible de comparer les extensions du terrain avec celles de Flumy et d'Isatis pour vérifier que le modèle statistique choisi dans cette partie est correct.

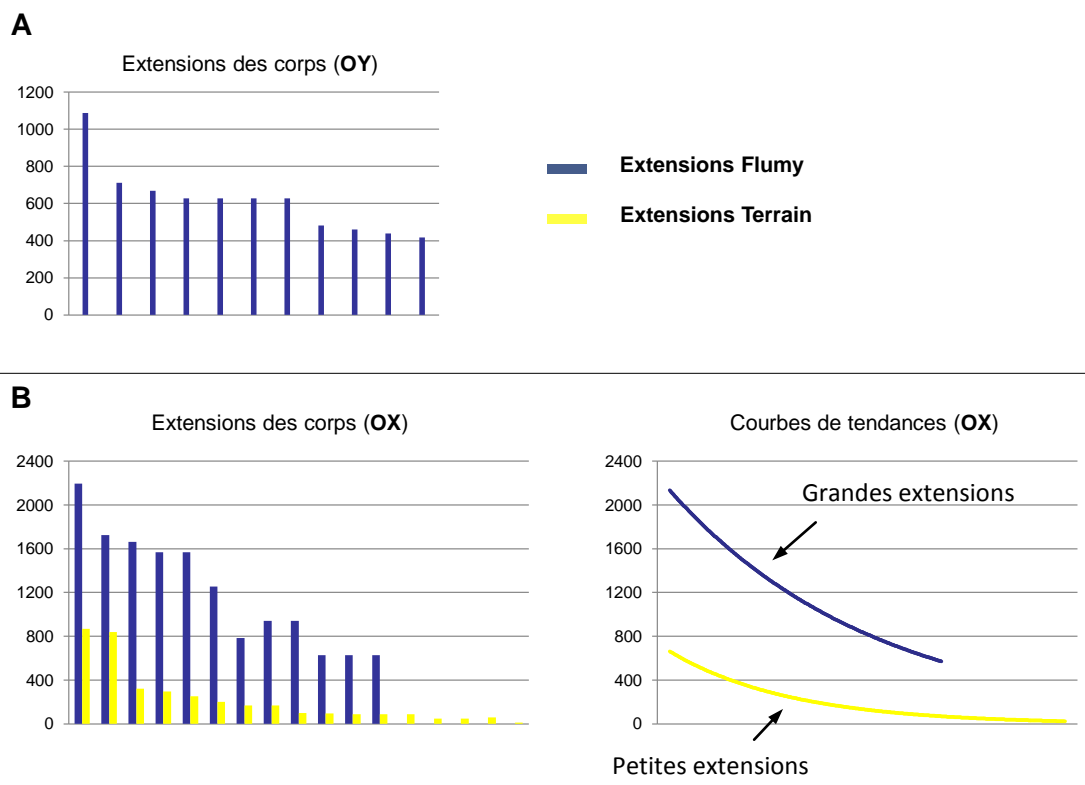


Fig.31. « Petites Extensions » des corps mesurés sur le terrain et sur l'interface graphique de Flumy. Les extensions ont été relevées parallèlement (B) et perpendiculairement (A) à l'axe d'écoulement du chenal pour estimer les anisotropies.

L'observation des dimensions des corps réels nous a tout d'abord permis de différencier deux classes d'extensions.

- **Les petites extensions** (Fig.31- 32) correspondent à des extensions sans interruption des corps sableux, observées sur le terrain. Leurs extensions sont variables (25 – 800m), avec une majorité de corps inférieurs à 400m.
- **Les grandes extensions** (Carte p21 – Fig.17.p25) correspondent aux extensions cohérentes (même époque de dépôt) d'un même intervalle mis bout à bout en incluant les intervalles vides (Gap). Elles correspondent à des extensions de 1,7-2,4km.

Les extensions mesurées sur Flumy sont de grande dimension et semblent donc appartenir davantage au type des « grande extensions » plutôt qu'à celles des « petits corps ».

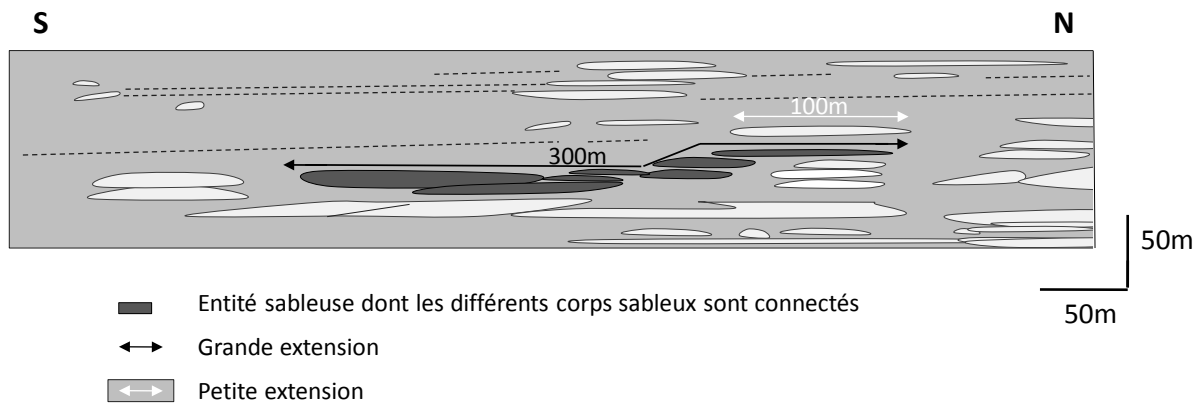


Fig.32. Profil longitudinal de San Juan à Pernalon, repris de Daams (1996). Ce profil met en évidence les « petites extensions » et leur agencement.

La majorité des observations et de calibrations s'appuient sur l'observation des extensions longitudinales (parallèles à l'écoulement du chenal) pour lesquelles nous avons récolté le plus de données sur le terrain.

Il est néanmoins possible pour calibrer la simulation Isatis de s'appuyer sur les observations des corps simulés par Flumy, sachant désormais qu'elles peuvent correspondre aux « grandes extensions », et qu'il faut par conséquent les simuler en tant que telles.

En effet, nous avons remarqué que la méthode Isatis semble avoir ce grand avantage de pouvoir matérialiser les corps des deux types d'extensions (grandes et petites) (Fig. 33), ce qui est moins visible sur Flumy. Cette capacité à simuler les petites extensions provient du choix du type de modèle statistique. Il a été déterminé pour cet effet à partir des simulations non conditionnelles, parce qu'il affecte les corps d'un effet de « crépitement », morcelant ainsi les grandes extensions (Fig.35).

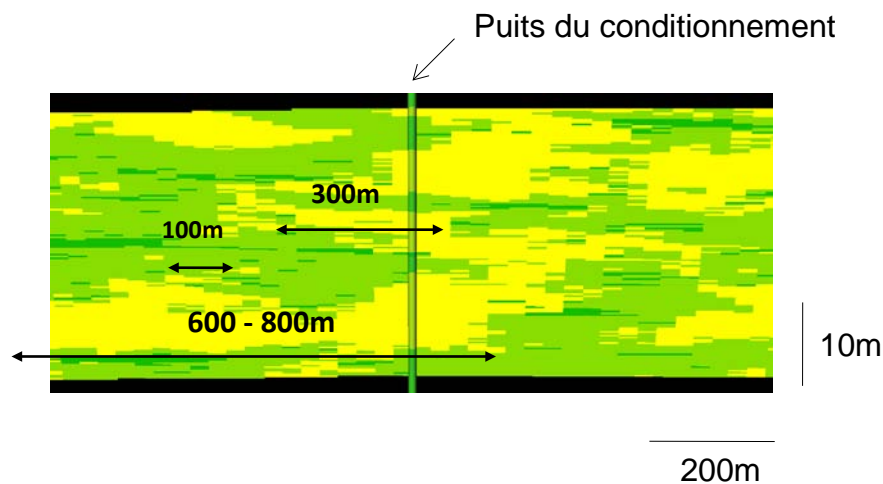
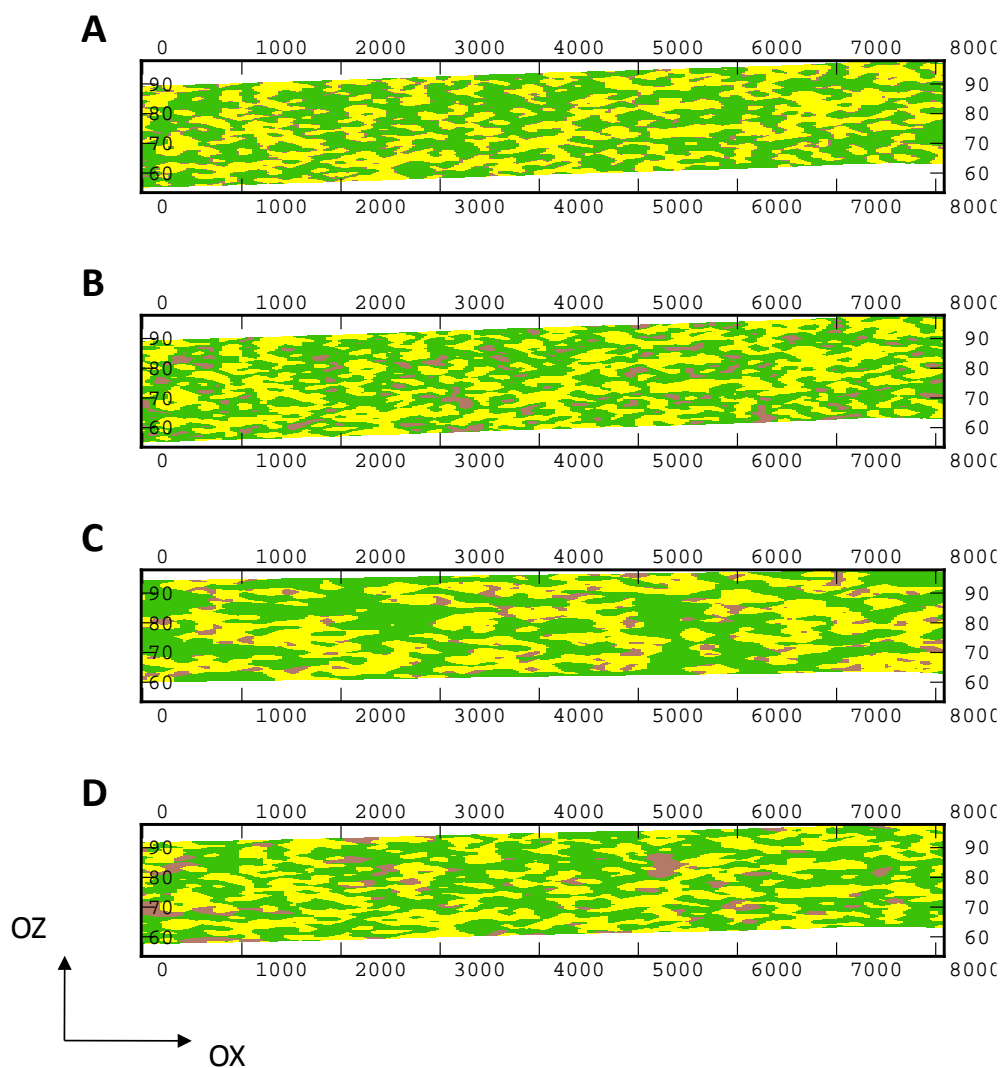


Fig. 33. Une simulation conditionnelle d'Isatis honore dans tous les cas parfaitement les puits. Cette illustration met en évidence des extensions des différentes dimensions. Les corps de petites extensions semblent provenir du morcellement des corps de plus grandes extensions.

#### IV.II.1.4. Les anisotropies

On choisit de tester différents schémas de seuillage de manière à reproduire un assemblage qui corresponde à la réalité du terrain.

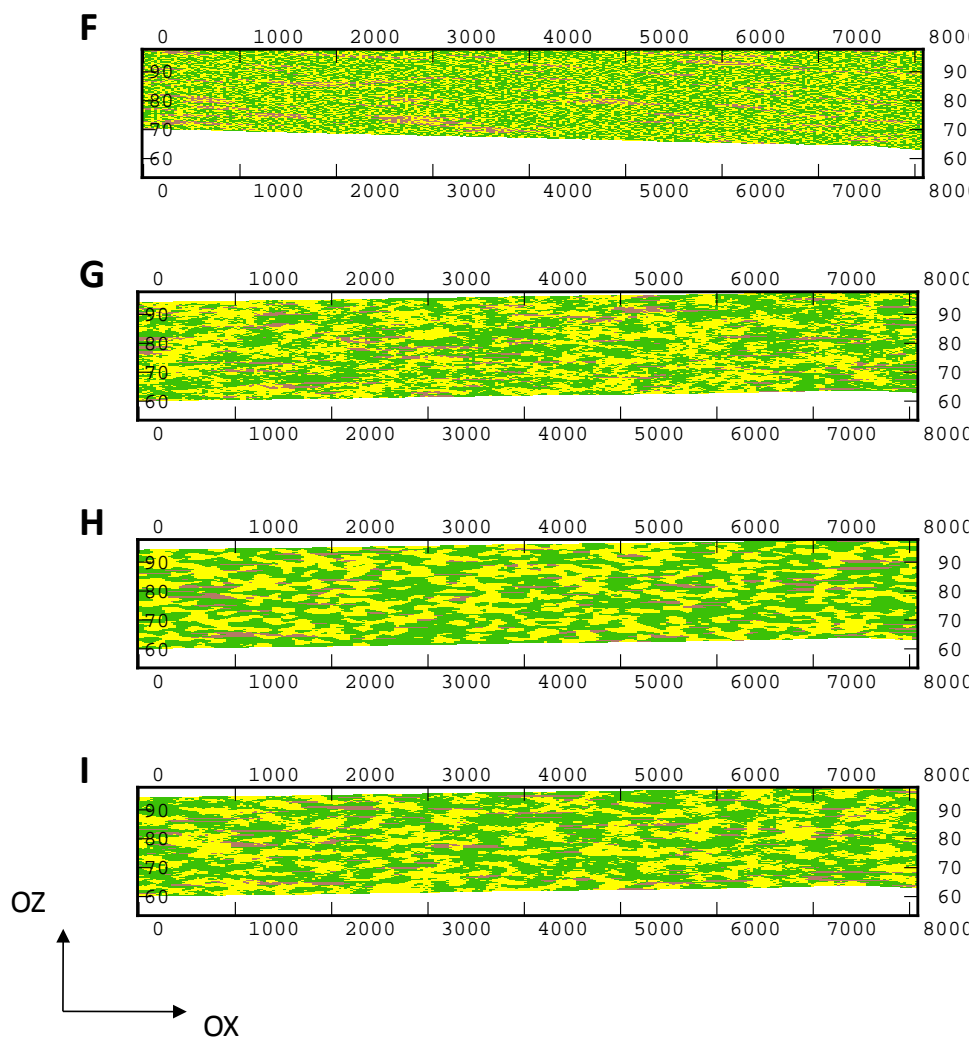


Simulation	Schémas de seuillage	
	Monogaussien	
A		Le faciès des levées entoure complètement les sables
B		Le levées sont dans les argiles, isolées des sables
	Plurigaussien	
C		Les levées sont dans les sables, isolées des argiles
D		Les levées sont à la frontière entre argiles et sables

Fig.34. Coupes transversales illustrant différentes l'utilisations de différents schémas de seuillages.

Le schéma de seuillage qui se rapproche le plus de notre cas d'étude est un modèle pluri-Gaussien qui permet aux levées d'être en contact avec les sables tout en baignant dans une

matrice argileuse. Le schéma qui s'en rapproche le plus dans les simulations non conditionnelles (Fig.34) se situe entre le schéma C et D.




Simulation		Portée horizontale (OX)	Portée horizontale (OY)	Portée verticale (OZ)
	Plurigaussien			
	Modèle 1	250	200	2
	Modèle 2	800	300	0.9
F	Effet Nuggets	Effet de crépitement. Les corps ne sont pas discernables		
G	Exponentiel	Les corps se dessinent – les corps restent brouillés		
H	Cubique	Relativement semblable au Gaussien. La morphologie des corps est lissée		
I	Sphérique	Les corps sont bien discernables et pas trop lises		

Fig.35. Coupes transversales illustrant différents types de modèle statistiques.

Un modèle qui permet de faire apparaître un peu de crépitement tout en conservant des corps bien dessinés permet de représenter les petites et les grandes extensions observées sur le terrain. C'est une caractéristique du modèle sphérique, voir exponentiel.

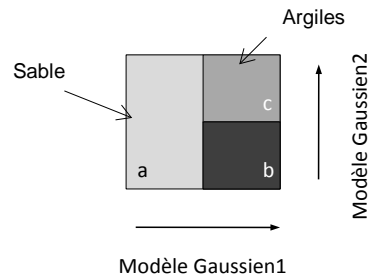
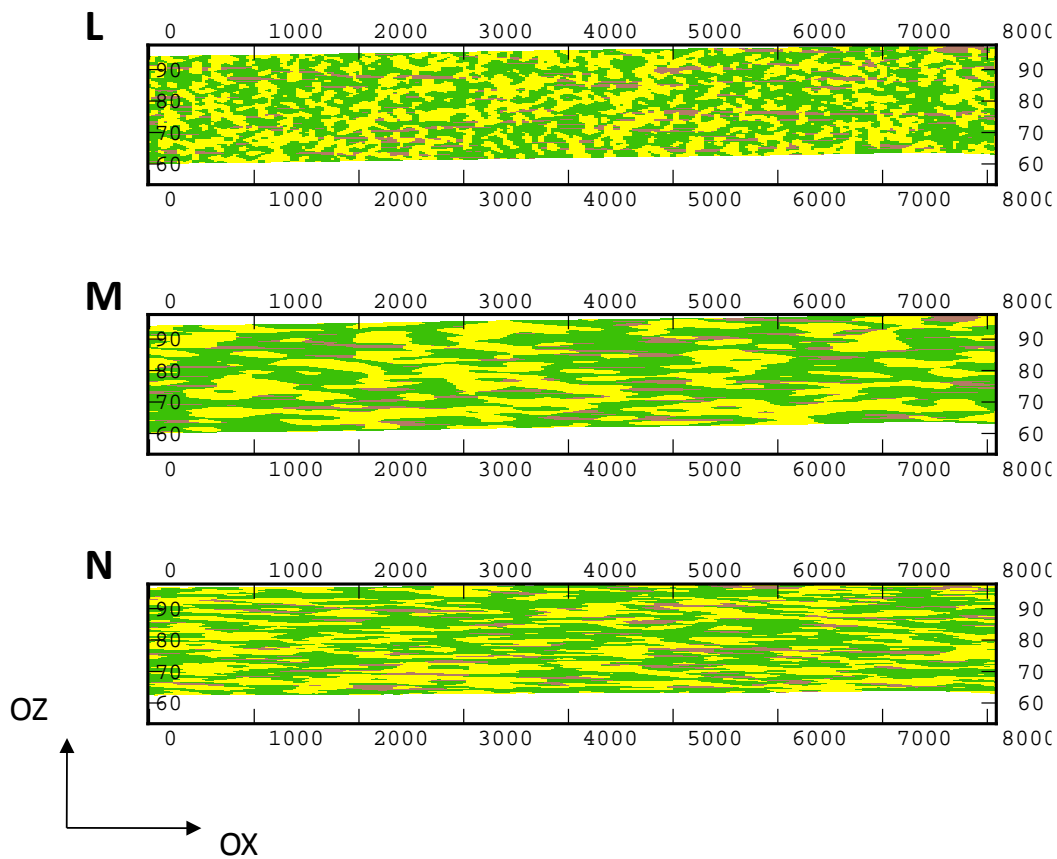


Fig.36. Schéma de seuillage retenu pour la simulation conditionnelle. a.Sables ; b.Argilo-sableux ; c.Argiles.




Simulation		Portée horizontale (OX)	Portée horizontale (OY)	Portée verticale (OZ)
	Plurigaussien			
J	Modèle 1	100	200	2
K	Modèle 1	500	200	2
L	Modèle 1	400	200	1
	Modèle 2	800	300	0.9
		Le modèle M semble le plus adapté aux réservoirs fluviatiles car il dessine correctement les formes observées sur le terrain		

Fig.37. Différentes portées appliquées aux transitions des corps sableux avec les argiles. Le modèle M présente à la fois des extensions de l'ordre kilométrique et de l'ordre de la centaine de mètre. Il correspond aux observations de terrain concernant les extensions mesurées, et semble par conséquent adapté à notre cas d'étude.

### IV.II.3. Simulations conditionnelles

La simulation conditionnelle a été calibrée à partir des résultats obtenus en simulation non conditionnelle. Elle a été simulée sur une grille correspondante aux dimensions du domaine de Huete, contenant cinq puits, et dont l'orientation dépend de l'axe d'écoulement du chenal (Fig.38-38).

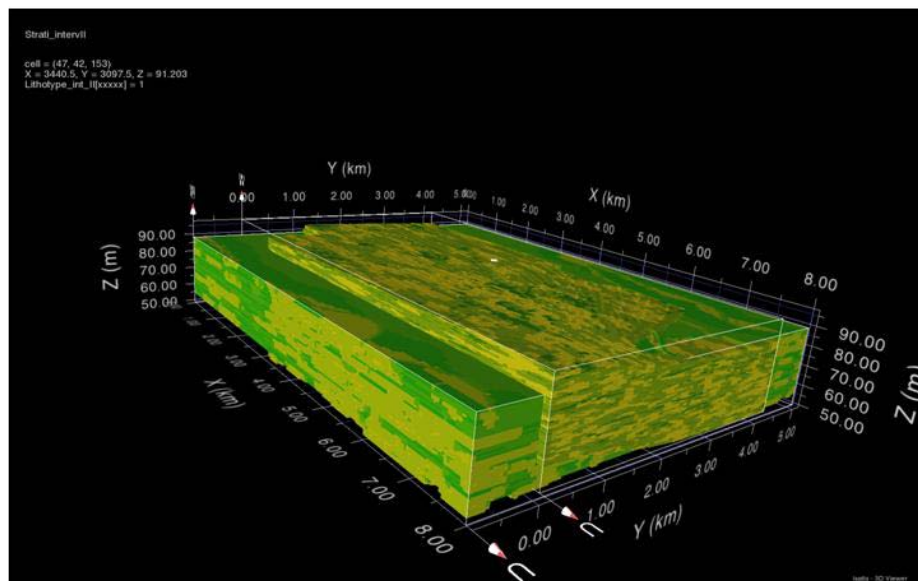


Fig.38. Interface graphique d'Isatis affichant les simulations conjointes de Flumy (grande grille) et Isatis (petite grille). La direction d'écoulement est orientée suivant l'axe X.

	Simulation 2
<b>Modèle 1</b>	Sphérique
Portée Horizontale 1	600
Portée Horizontale 2	250
Portée Verticale	4
<b>Modèle 2</b>	Exponentiel
Portée Horizontale 1	800
Portée Horizontale 2	800
Portée Verticale	0,9

Tab.7. Résumé de deux sets de paramètres sélectionnés d'après les simulations non conditionnelles. Les simulations conditionnelles Isatis respectent les pourcentages : sable, 41,81%, Argiles, 51,14% ; Argilo-sableux, 7,05%.

Les paramètres de simulation (Tab.7) ont été sélectionnés de manière à :

- Autoriser le contact des levées avec le sable, mais en les faisant baigner principalement dans la matrice argileuse. Cette opération a été permise grâce à la sélection d'un schéma de seuillage de type pluri-Gaussien.
- Permettre un effet léger de crépitement qui permet le morcellement partiel des corps sableux de grande dimension et permet d'obtenir des extensions de plus petite taille. Cet effet a été produit par un modèle de type Exponentiel et Sphérique.
- Favoriser les dimensions des corps correspondant au terrain, de taille kilométrique et de l'ordre de la centaine de mètre.

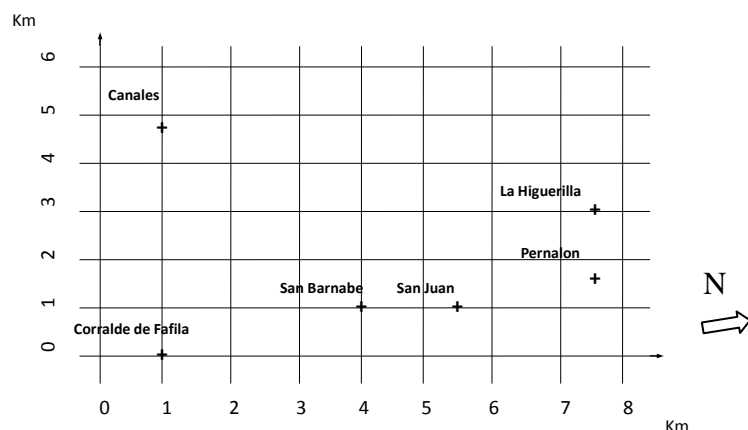


Fig.39. Grille du domaine de Huete utilisée pour les deux simulations Flumy et Isatis calibrés à partir des ceintures de méandre qui indiquent sur l'axe de circulation du chenal.

#### IV.II.2. Connectivité

La connectivité peut être horizontale ou verticale. Le paramètre principal qui contrôle le type de connectivité est l'aggradation. Une forte aggradation favorise une connectivité verticale car les chenaux n'ont pas le temps de déposer du sable sur l'ensemble du domaine à un même niveau. D'autre part une faible aggradation favorise une connectivité horizontale car elle empêche les superpositions rapides de sable et force le chenal à déposer le sable latéralement.

La connectivité s'évalue en comptant dans une grille de simulation (ici Isatis) le nombre de mailles d'un même faciès qui sont en contact. Plus le nombre de mailles est important plus le volume de roche en contact est élevé. Prévoir le volume de roche poreuse connecté permet d'estimer les quantités d'huile qu'il est possible d'extraire avec le minimum de puits de forage. C'est donc un enjeu crucial pour le budget d'une entreprise.

Trois approches peuvent être utilisées pour estimer la connectivité.

- Les entités sableuses. Le logiciel peut calculer le nombre de corps entièrement connectés qui forment des entités sableuses distinctes. Le nombre d'entités renseigne sur la connectivité globale du réservoir. C'est l'approche utilisée dans cette étude.
- Les extensions maximales des corps connectés.
- Les volumes maximum connectés.

	Simulation Isatis		Simulation Flumy	
Total mailles	16783200		4255572	
Somme	99%		98%	
Nb de composantes	× 2		× 2	
Composantes connexes	N°1	N°2	N°1	N°2
Nb mailles	5330454	6671953	2831689	1418395
Proportion	41,35%	51,76%	66,54	33,33%

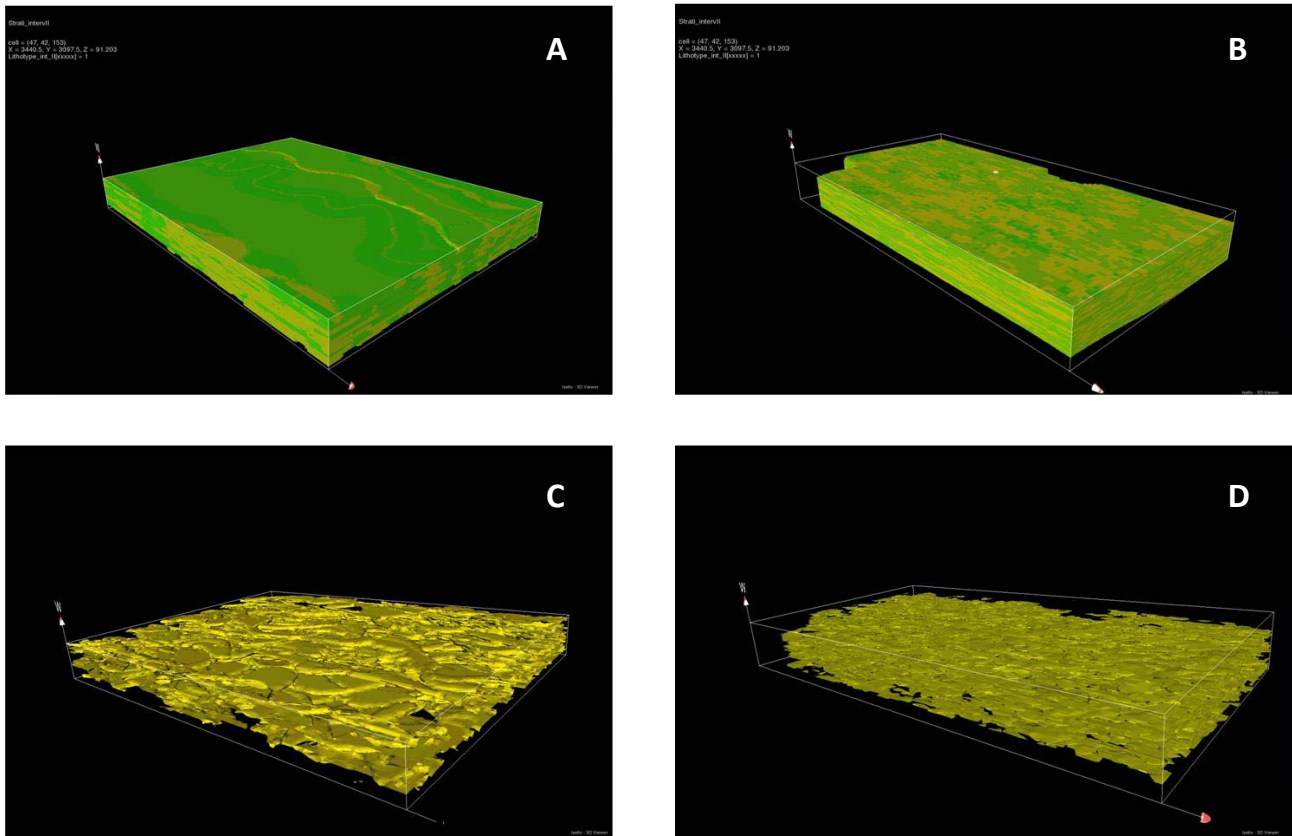
Tableau.8. Tableau synthétique de la connectivité d'une simulation de l'intervalle II par la méthode Isatis et Flumy, reprenant les paramètres du tableau. L'étude numérique de la connectivité a été réalisée sur le même logiciel, Isatis.

Les grands corps connectés dans les deux simulations sont peu nombreux mais ils regroupent la quasi-totalité du sable de l'intervalle (99% et 98%), ce qui indique une

connectivité presque totale. Il est également très intéressant de remarquer qu'on obtient des résultats semblables pour les deux méthodes, en ce qui concerne la connectivité.

## V. Discussion

Les résultats et les interprétations des simulations ont déjà été traités pour chacune des méthodes, individuellement, dans la partie « simulation ». La courte discussion proposée ici concerne les relations entre les résultats des simulations lorsqu'elles sont regroupées sur le même logiciel.



*Fig.42. Les deux grilles de Flumy (A, C) et d'Isatis (B, D), présentant, en haut, la répartition des faciès sableux (jaune) et des faciès fins (vert), et en bas le volume occupé par les corps sableux et sa connectivité. Le sable est représenté d'une seule couleur, ce qui indique que la quasi-totalité des corps sont connectés.*

- Les corps simulés avec la méthode Isatis sont de plus petites dimensions. Cette méthode permettrait ainsi de simuler les « petites extensions ». Comme il a été observé sur le terrain, les corps de petite extension, lorsqu'ils sont mis bout à bout, dessinent des plus grandes extensions. Cette caractéristique est également observée sur la simulation Isatis. Isatis semblerait donc un outil efficace pour représenter deux « classes » d'extensions proposées à partir des observations du terrain.
- Les corps simulés par Flumy sont essentiellement de grande dimension dans l'axe longitudinale. Cette méthode semble représenter ce qui a été défini comme les « grandes extensions ».



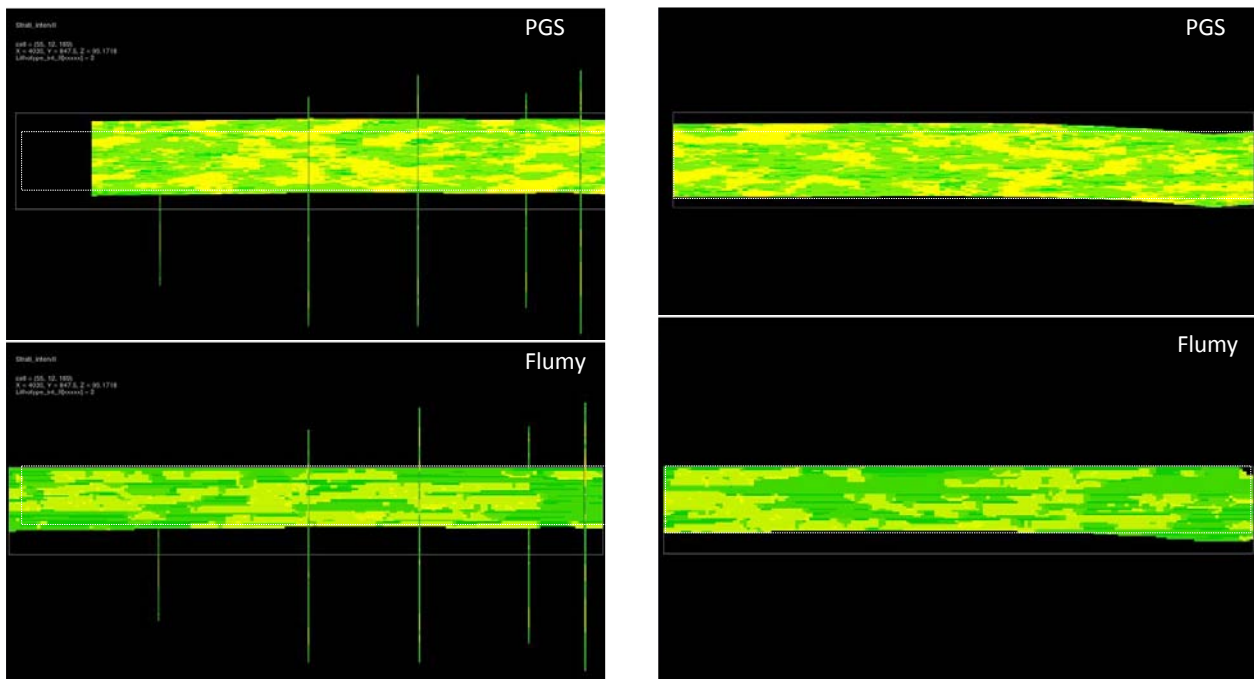


Fig. 41. Comparaison des simulations Flumy et Isatis pour profils, l'un contenant des puits, l'autre n'en contenant pas.

- Les dimensions des corps gréseux semblent se ressembler pour les deux méthodes malgré qu'Isatis génère également des corps de plus petite extension. Nous n'avons pas cherché ici à reproduire avec Isatis une copie des résultats obtenus dans Flumy. La ressemblance entre les résultats est donc rassurante car elle indique que les deux méthodes fournissent des résultats concordant.
- On remarque tout de même que les sables dans Flumy semblent plus étirés et moins épais que dans Isatis. Cet étirement qui permet d'obtenir des grandes extensions doit être lié à la longueur d'onde des boucles de méandres générés par Flumy. En modifiant les paramètres des processus liés à la sinuosité (Pente, érodabilité, dimensions du chenal, fréquence des avulsions ; Annexe 4) il serait probablement possible de générer des petites extensions. On s'attendrait alors à ce qu'elles forment également des grandes extensions par amalgamation. Ainsi Flumy permettrait également de générer les deux classe d'extensions.

## Résumé des résultats obtenus

### Flumy

- Le remplacement de Point Bar de petite taille dans les puits semble corriger à la baisse les pourcentages de sables surestimés lorsqu'on les conserve.
- Deux paramètres, l'érodabilité et le gradient de pente, permettent de calibrer aisément les proportions de sable en respectant les règles définies par Bridge pour les systèmes naturels.
- L'utilisation d'une carte d'érodabilité permet de simuler les ceintures latérales des chenaux et de restreindre la migration latérale des chenaux. Cette méthode nécessite pourtant encore quelques améliorations, de manière à éviter les surrévaluations des proportions de sable apparemment liées aux rebroussement du méandre le long des ceintures.
- Le paramétrage des petits intervalles peut être facilité grâce au paramétrage dans un premier temps d'une simulation non-conditionnelle d'un intervalle de plus grande taille.

Les simulations Flumy peuvent être importées dans Isatis pour être comparées aux simulations analogues d'Isatis (Fig-40-41-42).

### Isatis

- Un modèle statistique a été déterminé pour simuler un réservoir dont on connaît les extensions des corps grâce aux données collectées sur le terrain.
- Nous avons ainsi déterminé les portées des variogrammes, qui permettent d'obtenir les extensions longitudinales et perpendiculaires à l'écoulement du chenal.
- Nous avons utilisé un schéma de seuillage qui permet aux levées d'être positionnées au contact des sables tout en restant « noyées » dans une matrice argileuse.
- De calculer les connectivités et les ressemblances entre la simulation Flumy et Isatis d'un intervalle de Huete.

## VI. Conclusion

En se basant sur les paramètres étudiés dans cette étude il ressort que les méthodes Flumy et Isatis ont reproduit avec succès les proportions de sables (Flumy) d'un intervalle étudié dans la région de Huete, de reproduire les morphologies des grandes extensions sableuses (Flumy et Isatis) et de petite dimension (Isatis) et d'obtenir des résultats concordant de connectivité. Ces résultats confortent aujourd'hui l'idée que les deux méthodes sont efficaces et qu'elles peuvent être utilisées en parallèle pour offrir deux approches différentes du même corps géologique.

De plus cette étude a permis de mettre en évidence les points forts de chacune des méthodes.

En ce qui concerne Isatis, malgré sa gourmandise pour les données de puits, elle a la capacité de simuler des entités non reproductibles pour le moment avec Flumy (les petits corps), de simuler la répartition du sable de manière homogène sur l'ensemble du domaine en utilisant une VPC globale définie à partir des données de puits.

En ce qui concerne Flumy, du fait que cette méthode utilise les processus, elle est plus proche des règles naturelles et permet de travailler avec plus de paramètres issus de l'observation. Elle permet de remédier au caractère plus « aveugle » de la méthode Isatis en qui tout repose sur le modèle statistique choisi (auquel on est obligé de croire), en tout cas dans notre étude.

En conclusion les deux méthodes, génétique et statistique, semblent, au travers de ces premiers tests, pouvoir être utilisées en complémentarité, chacune d'elles apportant ses points forts à l'autre méthode.

### Perspectives :

Il serait intéressant d'utiliser dans Isatis les courbes verticales de proportion issues des simulations de Flumy, pour apporter à la méthode Isatis des résultats issus d'une méthode génétique.

La méthode Isatis est gourmande de données pour être plus efficace. Il serait alors utile de tester une simulation du même analogue en utilisant de nouveaux types de données, plus abondantes, et parfois moins chers à obtenir qu'un puits de forage, les profils sismiques.

Avec du courage, il faudrait relever une grande quantité de puits pour exploiter tout le potentiel d'Isatis.

Il faudrait d'avantage d'observation de terrain des extensions dans un plan perpendiculaire à l'écoulement du fleuve pour vérifier les anisotropies visibles sur Flumy.

## Bibliographie

ALVAREZ SIERRA, M.A., 1987, Estudio sistemático y bioestratigráfico de los Eomyidae (Rodentia) del Oligoceno superior y Mioceno inferior español: *Scripta Geologica*, v. 86, 207p.

BRIDGE, 2003: *Rivers and Floodplains*, Blackwell Publishing, 491p.

COJAN, I. et RENARD, M., 1997. *Sédimentologie. Enseignement des Sciences de la Terre*, Editions Masson, 417p.

DAAMS, R., ALVAREZ SIERRA, M.A., VAN DER MEULEN, A.J., AND PELAEZ-CAMPOMANES, P., 1996b, Paleoeology and paleoclimatology of micromammal faunas from upper Oligocene–lower Miocene sediments in the Loranca Basin, province of Cuenca, Spain, *in* Friend, P.F., and Dabrio, C., eds., *Tertiary Basins of Spain*: Cambridge, U.K., Cambridge University Press, p. 295–299.

DAAMS, R., DIAZ-MOLINA M., MASB, R., 1994. Uncertainties in the stratigraphic analysis of fluvial deposits from the Loranca Basin, central Spain. *Sedimentary Geology* 102 (1996) 187-209.

DIAZ-MOLINA, M., ARRIBAS-MOCOROA, J., AND BUSTILLO-REVUELTA, A., 1989, The Tortola and Villalba de la Sierra fluvial fans : Late Oligocene–early Miocene, Loranca Basin, central Spain : *International Conference on Fluvial Sedimentology*, Barcelona, Spain, *Excursion Guidebook* 7, 74 p.

GOMEZ, J.J., DIAZ-MOLINA, M., AND LENDINEZ, A., 1996, Tectono-sedimentary analysis of the Loranca Basin (Upper Oligocene–Miocene, central Spain): a “non-sequenced” foreland basin, *in* Friend, P.F., and Dabrio, C.J., eds., *Tertiary Basins of Spain* : Cambridge, U.K., Cambridge University Press, p. 285–294.

MARTINIUS, A.W., 2000. Labyrinthine facies architecture of the Tortola fluvial system and controls on deposition (Late Oligocene-Early Miocene, Loranca Basin, Spain). *Journal of Sedimentary Research*, Vol 70, No. 4, July, 2000, p. 850-867.

SUN, 1996: A simulation model for meandering rivers. *Water Resources Research* 32(9).

## Annexe 1

Unité	Est de Huete				San Juan				Las Canales			
	Nom	Longitude	Latitude	extensions corps totale	Nom	Longitude	Latitude	extensions corps totale	Nom	Longitude	Latitude	Extensions (m) corps totale
4	F 7	527443	4443500		PP 1	526064	4449803					
	F 6	527285	4443416	180	PP 3	526183	4449489	131				
	F 5	527232	4443305	123	PP 4	526125	4449372	1000				
	F 4	527207	4443186	88	SJUAN E	526653	4448457	97				365
	F 3	527121	4443202	119	SJUAN D	526607	4448371	157				
3	F 21	527497	4444226	172	SJUAN 1C	526677	4448231	137				
	F 22	527534	4444057	825	SJUAN 1B	526761	4448125	441				
	F 2	527123	4443345	112	PP1-	526235	4449387	345				
	F 1	527065	4443248	112	PP2-	525920	4449522	1130				
	F 19	527417	4444200	89	SJ 1A	525343	4448300	96				
2 - 3	F 30	527355	4444647	86	SJ 1B	525343	4448271					
	F 29	527307	4444575	65	SJ 1D	525343	4448211					
	F 28	527273	4444522	11	BAR 3NW	526408	4448206	339				
	F27	527266	4444511	357	BAR 3SE	526620	4447942					
	F 20	527494	4444244	89								
2 - 2					U2-2	526247	4448371	176	BAR B D	525063	4445027	322
					U2-1	526340	4448221	33	BAR B B	525130	4444787	
					BAR 2NW	526363	4448197	139	BAR B A	525144	4444613	170
					BAR 2SE	526446	4448087		BAR 3N	525172	4444447	867
									BAR 3B	525364	4443604	48
									BAR 3A	525388	4443562	58
									BAR 3S	525378	4443504	42,6
									1BAR 3N	525409	4443475	86
									1BAR 3S	525481	4443426	
									BAR 3N	525172	4444447	839
2 - 1	F 24	527264	4444676		BAR 2B	525371	4443634	75	BAR 2A	525432	4443590	100
	F 25	527291	4444647	251	BAR 2S	525432	4443591					
	F 26	527237	4444430	153								
	F 18C	527242	4444274	200								
	F 18B	527212	4444078	393								
	F 17	526927	4443807	166								
	F 18	527075	4443731	88								
	F 12	527054	4443634	95								
	F 11	527024	4443557	98								
	F 13	526984	4443648	168								
	F 14	526993	4443480	117								
	FER 10	526880	4443454	295								
	FER 9	526828	4443165	261								
	FER 5	526921	4442970	47								
	FER 4	526896	4442932	482								
FER 2	526773	4442467	47									
FER 1	526756	4442422										
1 - 1	F 16	526949	4443803	328	U1-1	526212	4448332	95	BAR C N	525223	4444846	
	F 15	526993	4443480	328	U1-2	526258	4448247	90	BAR C A	525194	4444556	539
					BAR 1 NE	526309	4448174	245	BAR C B	525250	4444295	
					BAR 1B SE	526423	4448076	150				283
									BAR 1E	525327	4444023	80
									BAR 1C	525347	4443945	
									BAR 1S	525378	4443789	
									BAR 1A	525396	4443728	65
												161
									BAR 0N	525539	4443662	312
								BAR BS	525740	4443424		

Positions GPS relevées aux extrémités des corps sableux. Le système spatial de référence utilisé est UTM. Les corps sableux sont représentés en couleur et classés par intervalle de I à VI. Les intervalles vides entre deux corps (Gaps) sont indiqués en rouge.

## Annexe 2

## Interface Flumy

File Settings Compute About

Domain Imported Wells/ Erodibility Avulsions Aggradation Seed Summary

Aggradation

Equilibrium Profile

Elevation (m)

Changes  Edit... Variation (m)  Edit...

Draping

Thickness (m):  Facies:

Overbank Flood

Occurrence  Edit... Thickness (m)  Edit...

Wetland Proportion (%)

Exp. Decrease: Thickness (m)  Grainsize (m)

Levee width (multiple of channel width):

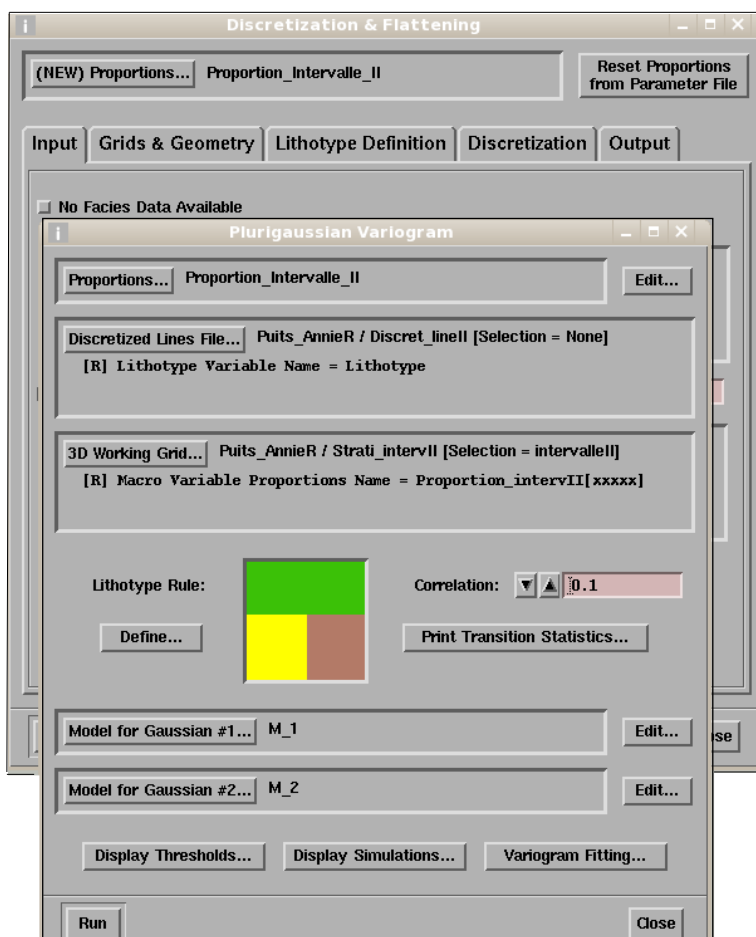
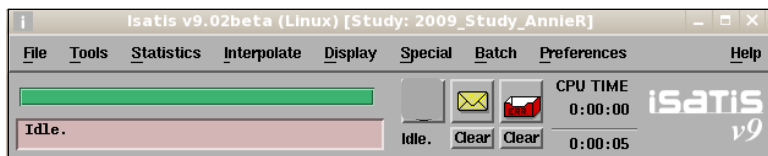
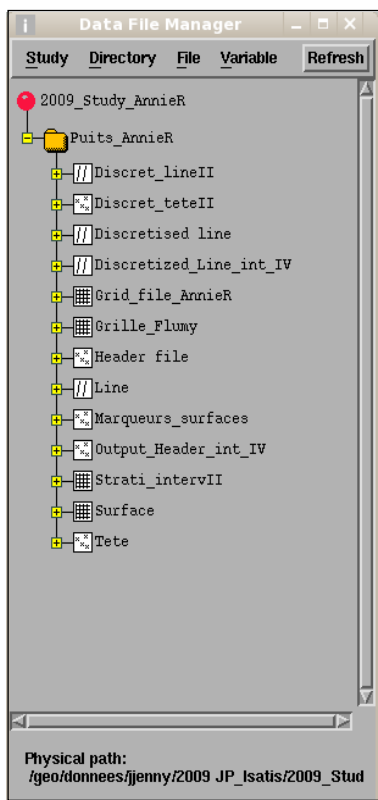
Launch Launch Until... Refresh. Loop Pause Reset

Batch Iter. Sequence Skip Sequence Jnl Exit Exit

Ready. Iteration: 0 Eq. Profile: 1000 m Sinuosity: NA

# Annexe 3

## Interface Isatis



## Annexe 4

	<b>Processus affectés</b>	<b>Conséquence</b>
<b>Pente de la plaine d'inondation</b>	Migration du chenal, Longueur des boucles de méandre	Une pente plus abrupte augmente sensiblement la vitesse de migration et la longueur des boucles de méandre.
<b>Erodabilité</b>	Migration du chenal	La migration est plus rapide avec une érodabilité plus grande, favorisant les dépôts de sable et sa connectivité horizontale, sa sinuosité et les mudplug.
<b>Largeur du chenal</b>	Migration du chenal	La migration est plus rapide pour une largeur plus importante, favorisant les dépôts de sable et sa connectivité horizontale, sa sinuosité et les mudplug.
<b>Profondeur du chenal</b>	Migration du chenal	La profondeur du chenal favorise les dépôts de sable et la connectivité verticale, la longueur d'onde et les mudplug.
<b>Profil d'équilibre</b>	Aggradation	Lorsqu'il est juste au-dessus de la plaine d'inondation, l'aggradation diminue, favorisant les dépôts de sable et la connectivité horizontale. Lorsqu'il est très au-dessus de la plaine d'inondation, il favorise l'aggradation, les argiles et une connectivité verticale de sable.
	Incision	Lorsqu'il est en dessous de la plaine d'inondation
<b>Fréquence de débordement</b>	Aggradation	Elle favorise l'aggradation, les argiles et la connectivité verticale de sable.
	Incision	Elle favorise l'incision, car les dépôts sont moins compacts.
<b>Intensité des débordements</b>	Aggradation	Une intensité élevée favorise l'aggradation, les argiles et une connectivité verticale des sables.
<b>Avulsion</b>	Aggradation	Une fréquence élevée des avulsions diminue le taux d'aggradation de la plaine d'inondation.
	Disposition des méandres Fréquence des mudplug	Une fréquence élevée limite le temps de développement des boucles de méandre, une diminution de la sinuosité et des mudplug.
	Proportion des barres de méandre	Les avulsions favorisent la sédimentation sur la totalité de la plaine d'inondation et augmentent la proportion des barres de méandre du fait que plusieurs chenaux déposeront du sable sur un même niveau.

*Annexe.4. Compilation de données bibliographiques (cf. Bibliographie) et des observations sur le logiciel Flumy (réalisé à l'École des Mines).*