
New modelling of submarine gravity flows: application to the Nice collapse in 1979

Alexandre Hugot^{a*}, Philippe Joseph^a, Bruno Savoye^b and Stéphane Zaleski^c

^aInstitut français du pétrole, division « Géologie–géochimie », 1–4, av. de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison cedex, France

^bInstitut français de recherche pour l'exploitation de la mer, laboratoire «Environnements sédimentaires », BP 70, 29280 Plouzané cedex, France

^cLaboratoire de modélisation en mécanique, université Pierre-et-Marie-Curie, tour 66, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

*: Corresponding author : alexandre.hugot@elfgrc.co.uk

Abstract: We propose to apply in this note a simple mathematical model for the sedimentation of gravity deposits in deep water. An inverse method has been developed in order to characterize the parameters associated with the submarine flow. This method also provides the initial conditions, which constitute a major uncertainty in geoscience modelling. Application of the inverse method to the 1979 Nice airport collapse (southern France), constrained by cable breaks and/or deposit thicknesses, leads, for example, to the estimation of the initial volume and/or the physical parameters of the flow (friction coefficient, modified turbulent Schmidt number, etc.). The application of the model to this real case shows that only the simultaneous inversion of dynamic (cable break times) and sedimentological (deposit) data allows a satisfactory reconstruction of the flow.

Keywords: gravity flow; turbidity current; flow object; inverse problem; 1979 Nice airport collapse; France

Version anglaise abrégée.

The flow object model. The submarine gravity flow is modelled as a deformable geometrical bidimensional object, *i.e.* a semi-ellipse with variable length and height [1, 2]. The dynamic behavior of the object is characterized by four parameters: the height h , the length l , the mean velocity U and the volume fraction of particles ϕ , whose temporal evolution is described by a differential system (1). The main physical features of the model include: 1. Gravity (1st term of equation (1a)) 2. Turbulence ((2nd term of equations (1a) & (1b)); 3. Spreading due to pressure forces ((1st term of equation (1b)); 4. Water incorporation at the suspension–ambient fluid interface (equation (1c)); 5. Particle settling and erosion (equation (1d)).

Equations (1a) and (1c) are modified versions of the ones considered by [3], equations (1a), (1c) and (1d) are modified versions of the ones considered by [4].

The originality of this model is to take into account all the forces that rules the flow and the coupling between depositional and erosional processes.

Data inversion consists of determining, with the help of the above model and of experimental [5, 6] or real data, the parameter vector which allows the best representation of these data. For this purpose we have used a modified version of the simulated annealing algorithm [2, 7].

The 1979 Nice collapse. The Nice collapse took place during a land-filling operation at the airport. Two sub-marine cables were broken (figure 1), their positions are reported in table 1. The study of the cores collected by IFREMER allowed the determination of deposit thicknesses [2]. The total volume of the flow is at least $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ [8, 9]. The sediment volume involved in the flow is estimated from [10, 11] and is reported in table 2.

Application. The main questions we addressed are: Are dynamical reconstructions sufficient to reproduce deposit thicknesses (and vice versa)? Are observed deposit thicknesses the result of the Nice event? We have tested different hypothesis by imposing different constraints to the modelling [5, 2]. We present here an example of total inversion which allows the simultaneous determination of the initial conditions and the flow parameters, by imposing constraints either on the dynamic, or on the deposit, or both at the same time.

Discussion. Inversions which are only constrained by dynamic or deposit data lead to unrealistic values for the non-inverted data (cf. figures 2 and 3).

Then, we discuss only the case of simultaneous inversion on dynamic and deposit data. The complete discussion of the three cases can be found in [2]. The physical parameters obtained are reported in table 3. The initial conditions are reported in table 4. The associated initial sediment volume is $2,9 \times 10^7 \text{ m}^3$. This value corresponds to the lower bound shown in the table 2.

Figure 2 represents front velocity reconstruction. The hypothesis of an instantaneous break of the first cable is favoured. The second cable might have been stretched before its break.

Figure 3 shows the deposit thickness. The erosion phase is well represented, even if it is not introduced in the inverse problem. These deposit thicknesses can be associated with the collapse. The sediment volume implied in the flow at the junction of Paillon canyon and Var canyon can be estimated to $2,9 \times 10^7 \text{ m}^3$, showing that approximately $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ of sediment has been eroded in the distributary channel.

The velocities are, on the first 30 kilometers, lower than those of the previous studies (figure 4). However the flow decelerates more slowly due to the sediment gain by erosion, a phenomenon which was not taken into account in some of the other approaches [12, 10]. Velocities are in good agreement with the predictions of [11] between the 30th and the 80th kilometers. They are greater than the ones predicted by [10] at cable breaks.

Nevertheless, these results should be treated with some caution, since this is only a bidimensional model. The flow is likely to be bidimensional only in the upper part of the travel path, where the flow is confined. Furthermore the physical parameter values are only mean values over the whole reconstruction (they are time independent). In reality, they are functions of slope, grain sizes, etc. Other uncertainties are due to the position of the cores, which have various location: main channel, central levee, distal valley.

Conclusion. In this note we have dealt with the problem of reconstructing data of a real case: the 1979 Nice collapse. It is a challenging problem, since most of the parameters are uncertain or unknown.

During this work, it appears that a good reconstruction is only achievable through the simultaneous input of dynamic data (*e.g.* cable break positions) and deposit (sediment thicknesses estimated from cores) [2]. A good reconstruction of the dynamic data does not guaranteed a good reconstruction of the sediment deposit thicknesses. Conversely, the respect of the deposit thicknesses does not imply the respect of the cable breaks.

The theoretical model has shown its hability to reproduce major catastrophic events which lead to significant deposit. Besides helping to interpret the deposit, by validating hypotheses concerning the origin of some sequences, it is possible to use this model as a predictive tool: it has been used to predict the depositional profile in a lateral channel [2]. Computational times being very small, this model will also open the way to series of event simulations.

Introduction Les écoulements gravitaires sous-marins sont des processus qui déplacent sous l'influence des forces gravitationnelles sur le fond de la mer, des sédiments d'une eau peu profonde à une eau plus profonde. C'est ici l'excès de charge dû aux sédiments en suspension qui, sous l'influence de la pesanteur, est le moteur de l'écoulement et déplace les masses d'eau dans lesquelles ces sédiments sont dispersés. L'eau est dans ce cas un partenaire passif dans le mélange. La plupart de ces écoulements présentent des analogies avec les processus de pente sur le continent, les avalanches de neige [13, 14] et les processus pyroclastiques des éruptions volcaniques explosives [15, 16].

On peut distinguer quatre grandes classes de modèle: 1. Les approches particulières: on considère un ensemble de particules de taille finie (idéalement des sphères rigides ou élastiques) et on simule directement la quantité de mouvement de chaque particule [17, 18, 19, 20]. 2. Les approches discrètes: On considère ici encore un ensemble de particules de taille finie et on tente de déduire les lois gouvernant le comportement mécanique de l'ensemble complet. On a alors recours à des fonctions statistiques telles que la fonction de probabilité de présence d'une particule ou d'un grain [21, 22]. Ces deux approches sont limitées par le nombre de particules qu'elles permettent de simuler. 3. Les approches mécaniques des milieux continus qui sont des approches macroscopiques (équations de Navier–Stokes [16, 14, 23, 24, 25, 26], d'ondes longues [27, 28, 29, 30, 31, 32, 33]). Dans ces approches la notion de particules ou de granules discrets n'est pas conservée et la simulation d'un événement est encore très longue. 3. Les approches empiriques ou phénoménologiques qui par analyse dimensionnelle permettent de combiner les paramètres physiques les plus importants. Ces approches sont fondées, non seulement sur la théorie, mais également sur l'expérience et ne donnent souvent qu'une faible description de l'écoulement [34, 35, 36, 37, 38, 39].

Le but de cette note est de montrer, en utilisant un modèle macroscopique simple mais complet, que des contraintes à la fois sur la dynamique et le dépôt sont nécessaires pour reproduire correctement l'écoulement. Le modèle décrit ci-après correspond à une nouvelle approche d'un point de vue conceptuel.

Le modèle objet écoulement. L'écoulement gravitaire sous-marin est traité comme un objet géométrique déformable bidimensionnel, à savoir une demi-ellipse de longueur et de hauteur va-

riables au cours du temps [1, 2]. Le comportement dynamique de l'écoulement est caractérisé par quatre paramètres, la hauteur h , la longueur l , la vitesse moyenne U et la fraction volumique des particules ϕ , dont l'évolution temporelle est régie par le système différentiel (1) :

$$\text{Mouvement de l'objet :} \quad (Uhl)' = g'\phi hl \sin \theta - C_0 l f_1(U^2, l^2, Ul) \quad (1a)$$

$$\text{Étalement de l'objet :} \quad (lhl)' = \frac{1}{2} g' \phi h^2 \cos \theta - C_0 l f_2(l^2, U^2, Ul) \quad (1b)$$

$$\text{Incorporation de fluide :} \quad (hl)' = \frac{C_1}{C_2 + \text{Ri}} l f(i, U) \quad (1c)$$

$$\text{Érosion \& Sédimentation :} \quad (\phi hl)' = (C_4 C_0 f(i, U) - C_3 V_s) \phi l \quad (1d)$$

où θ est la pente; C_i , des constantes; f_i , des lois de friction turbulente; V_s , la vitesse de sédimentation des particules; Ri , le nombre de Richardson modifié; g' , l'accélération de gravité réduite $(\Delta\rho)/\rho$.

Les principaux mécanismes physiques pris en compte par le modèle sont : 1. La gravité (1^{er} terme de l'équation (1a)); 2. La turbulence (2^{es} termes des équations (1a) & (1b)); 3. L'étalement dû aux forces de pression (1^{er} terme de l'équation (1b)); 4. L'incorporation de fluide le long de l'interface suspension–fluide ambiant (équation (1c)); 5. La sédimentation et l'érosion de particules (équation (1d)).

Les équations (1a) et (1c) sont des versions modifiées de celles considérées par [3], les équations (1a), (1c) et (1d) sont les versions modifiées de celles considérées par [4].

L'originalité de ce modèle réside dans la prise en compte de l'ensemble des forces affectant l'écoulement et du couplage avec les processus d'érosion et sédimentation (les modèles précédemment publiés s'intéressant essentiellement à la dynamique de l'écoulement).

L'inversion de données consiste à déterminer, à partir du modèle que nous avons développé (système (1)) et de données expérimentales [5, 6] ou réelles [2], le vecteur de paramètres qui permet de représenter au mieux ces données. Pour cela nous utilisons une version modifiée de l'algorithme du recuit simulé [7, 2].

L'effondrement de Nice, 1979. L'effondrement a eu lieu le 16 Octobre 1979 lors des travaux de remblais pour l'extension de l'aéroport de Nice. C'est le type même d'événement catastrophique. L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) a contribué à l'étude de cet événement en effectuant des campagnes océanographiques sur cette zone avec en particulier des carottages, des plongées et des études numériques [12, 10, 11]. L'abondance des données disponibles sur cet événement nous a conduit à le choisir pour mettre en œuvre notre nouveau modèle.

Le courant gravitaire a sectionné deux câbles de télécommunications lors de son passage dans la vallée inférieure (figure 1). Le premier câble a été sectionné 3 h 45 après le déclenchement, le second 8 heures après. Un autre câble situé le long du flanc Sud de la ride sédimentaire du Var n'a pas été sectionné, ce qui semble indiquer que l'écoulement n'a pas, ou très peu, débordé de sa vallée principale à cet endroit. Les positions des câbles peuvent être estimées d'après leur profondeur respective (tableau 1).

Les études réalisées par l'IFREMER ont permis de prélever un grand nombre de carottes et de déterminer les épaisseurs des dépôts engendrés par l'événement [2].

Tous ces éléments sont utilisés comme contrainte pour la modélisation inverse.

Le volume total impliqué dans l'effondrement semble être d'au moins $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ [8, 9]. Des estimations des valeurs du volume de sédiments dans l'effondrement peuvent être calculées d'après les observations de [10, 11]. Elles sont reportées dans le tableau 2.

Mise en œuvre. Les études précédentes se sont attachées à trouver des conditions initiales et des paramètres d'écoulement permettant de reconstruire de façon satisfaisante la dynamique

de l’effondrement et en particulier de respecter les temps de rupture des câbles. Les principales questions auxquelles nous avons tenté de répondre étaient : La reconstruction de la dynamique est-elle suffisante pour pouvoir reproduire de façon satisfaisante les épaisseurs sédimentées (et inversement)? Les temps de ruptures des câbles peuvent-ils être réellement pris comme points de contrainte pour la position de la tête? Les épaisseurs de sédiments observées dans les carottes sont-elles bien associées à l’effondrement de Nice?

Nous avons testé différentes hypothèses en imposant différentes contraintes aux modélisations de l’écoulement [2, 5]. Nous présentons ici une inversion totale qui permet à la fois une estimation des paramètres physiques du modèle et des conditions initiales de l’écoulement. En effet, bien qu’un très grand nombre d’observations ait été effectué, le choix de conditions initiales pour l’effondrement reste problématique car incertain.

L’inversion totale est ici réalisée en imposant de respecter soit les contraintes sur la dynamique, soit le dépôt, soit les deux. Les contraintes sur la vitesse sont imposées par les barres d’erreur dont la position est la suivante : 80–100 km pour le câble 1 et 106–120 km pour le câble 2. Les contraintes sur le dépôt sont constituées par cinq épaisseurs de sédiments relevées sur les carottes.

Discussion. Les inversions contraintes par les seules données dynamiques ou de dépôt conduisent à des valeurs très éloignées de la réalité pour les données non inversées (cf. figures 2 et 3).

Nous ne commentons donc ici que le cas de l’inversion simultanée sur des données de dynamique et de dépôt. La discussion complète des trois cas peut être trouvée dans [2].

Les paramètres physiques optimisés sont donnés dans le tableau 3. La valeur élevée du coefficient de friction C_0 peut s’expliquer par une rugosité importante associée au fond. Les valeurs des coefficients d’incorporation d’eau, C_1 et C_2 , sont élevées indiquant une forte incorporation d’eau. La faible valeur de la fraction volumique basale C_3 indique une répartition peu homogène de la fraction volumique dans l’écoulement. Les conditions initiales sont reportées dans le tableau 4. Le volume initial de sédiments associé est de $2,9 \times 10^7 \text{ m}^3$. Cette valeur correspond à la borne inférieure de la valeur du volume estimée dans le tableau 2.

La figure 2 représente la reconstruction de la position du front en fonction du temps. L’accord avec les données est satisfaisant. L’hypothèse d’une rupture instantanée est privilégiée pour le premier câble. Le second câble semble d’abord avoir été étiré avant de rompre.

La figure 3 représente la hauteur sédimentée. Le dernier point de dépôt est moins bien respecté. Ceci peut être expliqué par les positions très proches des autres points de contrainte qui ont, alors, un poids double. La phase d’érosion est correctement reproduite bien qu’elle ne soit cependant pas introduite dans le problème inverse. Les épaisseurs de sédiments observées peuvent donc bien apparemment être attribuées à l’effondrement. Le volume de sédiments impliqué dans l’écoulement à la confluence du canyon du Paillon et du canyon du Var est estimé¹ à $2,9 \times 10^7 \text{ m}^3$, indiquant qu’un volume de sédiments d’environ $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ ait été érodé dans le chenal distributaire.

Les vitesses sont, sur les premiers 30 kilomètres, beaucoup plus faibles que les estimations faites lors des précédentes études (figure 4). La décélération de l’écoulement est cependant moins rapide à cause, en partie, du gain de sédiments par érosion, phénomène qui n’était pas pris en compte dans certaines des approches précédentes [12, 10]. Les vitesses sont en accord avec les prédictions de [11] entre le 30^e et le 80^e kilomètres. Elles sont supérieures aux prédictions de [10] au niveau des points de rupture des câbles.

Ces résultats sont cependant à prendre en compte moyennant certaines précautions, puisqu’il ne s’agit que d’une modélisation bidimensionnelle qui n’est strictement valide que dans la partie haute du trajet où l’écoulement est chenalisé. De plus les valeurs des paramètres physiques ne sont que des valeurs moyennes sur toute la reconstruction (ils sont indépendants du temps). Ces derniers sont en réalité des variables de la pente, de la granulométrie, etc. Enfin, il existe des incertitudes

1. pour une largeur initiale de 2000 m et une fraction volumique initiale égale à 0.2 ($V_{\text{sédiment}} = V_0 L \phi$).

liées aux données de dépôt. Les carottes sont situées selon des positions assez diverses : fond de chenal, bordure latérale, levée centrale, vallée distale.

Conclusion. Dans cette note nous avons traité le problème de la reconstruction des données d'un cas réel à partir d'observations : l'effondrement de Nice en 1979. C'était un problème inverse délicat à résoudre dans la mesure où de nombreux paramètres (paramètres physiques et conditions initiales) sont inconnus, et où l'érosion et le dépôt des sédiments influencent fortement la dynamique du mouvement.

Il apparait que seule la donnée simultanée de contraintes sur la dynamique (p. ex. position des points de ruptures de câbles) et les dépôts (épaisseurs sédimentées estimées d'après les carottes) permet une bonne reconstruction [2]. Elle est indispensable à une bonne estimation des paramètres physiques et des conditions initiales. Une reconstruction satisfaisante de la dynamique (respect des temps de rupture) n'est pas suffisante pour reproduire de façon correcte les épaisseurs sédimentées (figure 3). Inversement, le respect des épaisseurs sédimentées n'implique pas non plus une reconstruction satisfaisante de la dynamique, et en particulier, ne permet pas de respecter les temps de passage sur les câbles, même si ceux-ci sont incertains (figure 2).

Ce modèle théorique a montré sa capacité à reproduire des événements catastrophiques importants menant à des dépôts significatifs. Outre l'aide à l'interprétation des dépôts par la validation d'hypothèses sur l'origine de certaines séquences, il est possible d'utiliser ce modèle comme outil prédictif : il a, par exemple, été utilisé pour prédire le profil de dépôt dans un chenal latéral [2]. Enfin, les temps calculs étant très faibles, ce modèle ouvre la voie pour les simulations de succession d'événements.

Références

- [1] A. Hugot, S. Zaleski, and P. Joseph. Dilute gravity flows: a phenomenological model in thin layer theory. *C. R. Acad. Sci. Paris, série 11b*, 327:457–462, 1999.
- [2] A. Hugot. *Modélisation des écoulements gravitaires catastrophiques par une approche objet dynamique : érosion—transport—dépôt*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, France, 2000. 410 p.
- [3] P. Beghin. *Etude des bouffées bidimensionnelles de densité en écoulement sur pente avec application aux avalanches de neige poudreuse*. PhD thesis, Université Scientifique et Médicale de Grenoble et Institut National Polytechnique de Grenoble, 1979. 120 p.
- [4] W. B. Dade, J. R. Lister, and H. E. Huppert. Fine-sediment deposition from gravity surges on uniform slopes. *J. Sed. Res.*, A64(3):423–432, 1994.
- [5] A. Hugot, S. Zaleski, and P. Joseph. Simulation of gravity flows using a dynamic object approach. In S. J. Lipard, A. Næss, and R. Sinding-Larsen, editors, *Proceedings of the 5th annual conference of the International Association for Mathematical Geology*, volume 2, pages 527–532, august 1999.
- [6] A. Hugot, S. Zaleski, and P. Joseph. Phenomenological modeling of catastrophic dilute gravity flows. *Oil & Gas Science and Technology - Revue de l'IFP*, 55(5):471–483, 2000.
- [7] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery. *Numerical Recipes in C, the Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2nd edn., <http://www.nr.com/>, 1992.
- [8] M. Genesseeux, A. Mauffret, and G. Pautot. Les glissements sous-marins de la pente continentale niçoise et la rupture de câbles en mer Ligure (Méditerranée Occidentale). *C. R. Acad. Sci. Paris, série d*, 290:959–962, 1980.
- [9] P. Habib. Aspects géotechniques de l'accident du nouveau port de Nice. *Revue Française de Géotechnique*, 65:3–15, 1994.
- [10] D. J. W. Piper and B. Savoye. Processes of late Quaternary turbidity current flow and deposition on the Var deep-sea fan, north-west Mediterranean Sea. *Sedimentology*, 40:557–582, 1993.
- [11] T. Mulder, B. Savoye, and J. P. M. Syvitski. Numerical modelling of a mid-sized gravity flow: the 1979 Nice turbidity current (dynamics, processes, sediment budget and seafloor impact). *Sedimentology*, 44(305-326), 1997.
- [12] T. Mulder. La vitesse du courant de turbidité de 1979 à Nice: apports de la modélisation. *C. R. Acad. Sci. Paris, série 11a*, 317:1449–1455, 1993.

- [13] F. Hermann, D. Issler, and S. Keller. Numerical simulations of powder-snow avalanches and laboratory experiments on turbidity currents. In *“Pierre Beghin” international workshop on rapid gravitational mass movements*. CEMAGREF, Grenoble, 1993.
- [14] M. Naaim. Modélisation numérique des avalanches aérosols. *La Houille Blanche*, 6(5):56–62, 1995.
- [15] R. P. Delinger. A model for generation of ash clouds by pyroclastic flows, with application to the 1980 eruptions at Mount St. Helens, Washington. *Jour. Geophys. Res. B.*, 92:10,284–10,298, 1987.
- [16] G. A. Valentine and K. H. Wohletz. Numerical models of Plinian eruption columns and pyroclastic flows. *Jour. Geophys. Res. B.*, 94:1867–1887, 1989.
- [17] N. L. Ackermann and H. Shen. Stresses in rapidly sheared fluid-solid mixture. *Jour. Eng. Mech. Div.*, ASCE, 108:95–123, 1982.
- [18] H. Shen and N. L. Ackermann. Constitutive relations for fluid-solid mixture. *Jour. Eng. Mech. Div.*, ASCE, 108:748–763, 1982.
- [19] X. M. Zheng and J. M. Hill. Molecular dynamics modeling of granular chute flow : density and velocity profiles. *Powder Technology*, 86:219–227, 1996.
- [20] S. Straub and G. Valentine. 3-d modelling of rapid granular flows and its application to high-concentration pyroclastic flows. In *Sediment transport and deposition by particulate gravity currents, programme and abstract volume*, page 51, <http://earth.leeds.ac.uk/turbconf>, September 1998. University of Leeds.
- [21] J. M. Herard and O. Simonin. Numerical modelling of turbulent two phase flows. Technical Report ART:T36E4T, Electricité de France, 1990.
- [22] O. Simonin. Modélisation numérique des écoulements turbulents diphasiques à inclusions dispersées. Ecole de Printemps de mécanique des fluides numériques, Aussois, 1991.
- [23] L. Zhiming. A three-dimensional computer simulation program for turbidity flows. Master’s thesis, Stanford Univ., 1995. 110 p.
- [24] M. Felix. Numerical model of turbidity current of non-cohesive material. In *Sediment transport and deposition by particulate gravity currents, programme and abstract volume*, page 25, <http://earth.leeds.ac.uk/turbconf>, September 1998. University of Leeds.
- [25] P. Heinrich, A. Mangeney, and G. Boudon. Modéliser un raz de marée créé par un volcan : L’éruption à Montserrat le 26 décembre 1997. *La Recherche*, 318:66–71, mars 1999.
- [26] R. Skogseth. Turbiditetsstraumar langs eit skrått plan. Universitetet i Bergen & Norsk Hydro. 101 p., mars 1999.
- [27] J. E. Plapp and J. P. Mitchell. A hydrodynamic theory of turbidity currents. *Jour. Geophys. Res. B.*, 65(3):983–992, 1960.
- [28] J. O. Hinze. On the hydrodynamics of turbidity currents. *Geologie en Mijnbouw*, 39:18–25, 1960.
- [29] H. M. Pantin. Interaction between velocity and effective density in turbidity flow: phase plan analysis, with criteria for auto suspension. *Mar. Geol.*, 31:59–99, 1979.
- [30] J. W. Rottman and J. E. Simpson. The initial development of gravity currents from fixed volume releases of heavy fluids. *Jour. Fluid Mech.*, 135:95–110, 1983.
- [31] R. T. Bonnetcaze, H. E. Huppert, and J. R. Lister. Particle-driven gravity currents. *Jour. Fluid Mech.*, 250:339–369, 1993.
- [32] R. S. J. Sparks, R. T. Bonnetcaze, H. E. Huppert, J. R. Lister, M. A. Hallworth, H. Mader, and J. Phillips. Sediment-laden gravity currents with reversing buoyancy. *Earth and Planetary Science Letters*, 114:243–257, 1993.
- [33] J. Zeng and D. R. Lowe. Numerical simulation of turbidity current flow and sedimentation: I. theory. *Sedimentology*, 44:67–84, 1997.
- [34] R. A. Daly. Origin of submarine canyons. *Am. Jour. Sci. Ser. 5*, 31:401–420, 1936.
- [35] P. H. Kuenen. Estimated size of the Grand Banks turbidity currents. *Am. Jour. Sci.*, 250:874–884, 1952.
- [36] G. V. Middleton. Small scales models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension. *Jour. Sediment. Petrol.*, 36:202–208, 1966.
- [37] P. D. Komar. Hydraulic jumps in turbidity currents. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 82:1477–1488, 1971.
- [38] S. Lüthi. Experiments on non channelized turbidity currents and their deposits. *Mar. Geol.*, 40:M59–M68, 1981.
- [39] R. A. Bagnold. The flow of cohesionless grains in fluids. *Phil. Trans. Royal Soc. London, Ser. A*, 249:235–297, 1956.

	Câble 1	Câble 2
heure de rupture	3h45	8h
profondeur (m)	2480–2545	≈2600
	position estimée (km)	
Mulder [12]	80	110
Piper et Savoye [10]	95	122,5
Mulder <i>et al.</i> [11]	100	120
Savoye [Com. pers., 1999]	90,65	114,04

TAB. 1 – *Estimation de la position des ruptures de câbles. / Cable break position estimation.*

Volume estimé de sédiments		
dans l'effondrement initial	à la confluence Paillon–Var	déposés
$8 \times 10^6 \text{ m}^3$ [8, 9]	$3\text{-}10 \times 10^7 \text{ m}^3$	$15 \times 10^8 \text{ m}^3$ [10, 11]

TAB. 2 – *Estimation des valeurs du volume de sédiments dans l'effondrement. / Estimation of sediment volume involved in the collapse.*

Méthode	coefficient de				
	friction	fraction volumique	incorporation d'eau		Schmidt turbulent
	C_0	C_3	C_1	C_2	C_4
	0.001–0.1	0.1–10	0.0001–1	0.0001–0.1	0.1–10
Dyn.	0.00392785	3.38918	0.0001057	0.0014115	1.01757
Dep.	0.0158818	0.200001	0.00516767	0.00801326	0.284233
Dyn.+Dep.	0.032841	0.203134	0.0129835	0.00111847	0.200005

TAB. 3 – *Inversion totale sur la dynamique et/ou le dépôt : paramètres physiques. Les bornes des valeurs admissibles sont indiquées à la quatrième ligne. / Total inversion constrained by dynamic and/or deposit data: physical parameters. The range of acceptable values are indicated on the fourth line.*

	volume/u. de larg.	hauteur	vit. moy.	vit. ét.
Unité	m^2	m	m/s	m/s
Méthode	V_0	h	U	U_t
Dyn.	620166	5.52794	0.400489	1.53555
Dep.	108100	5.0482	4.37153	3.18806
Dyn.+Dep.	71571.6	5.00026	3.51874	4.31302

TAB. 4 – *Inversion totale sur la dynamique et/ou le dépôt : conditions initiales. Total inversion constrained by dynamic and/or deposit data: initial conditions.*

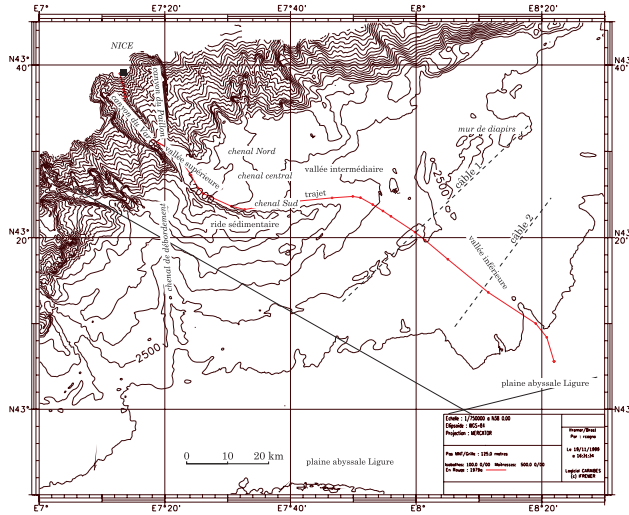


FIG. 1 – Contexte géographique, montrant la morphologie du cône sous-marin. Localisation des ruptures de câbles d'après [10]: en pointillés les câbles rompus, en traits pleins, les câbles non rompus. Le ■ indique la localisation de l'effondrement. La ligne rouge indique le trajet emprunté par l'effondrement. / Geographical context, showing the morphology of the deep-sea fan. Localisation of the cable break after [10]: dashed lines are broken cables, plain lines are intact cables. The ■ shows the localisation of the collapse. The red line shows the travel path of the flow.

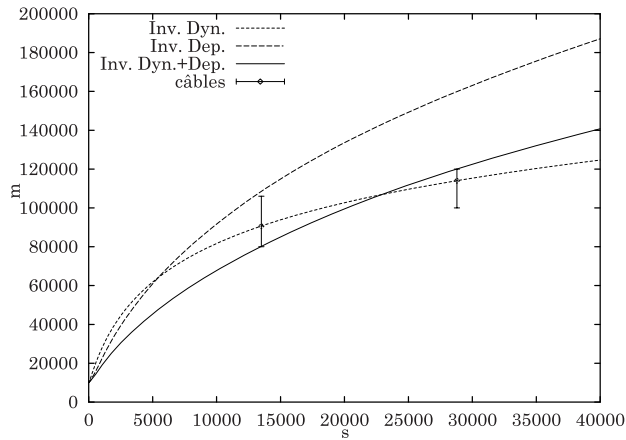


FIG. 2 – Inversion totale contrainte par la dynamique et/ou le dépôt: position du front en fonction du temps. / Total inversion constrained by dynamic and deposit data: front position function of time.

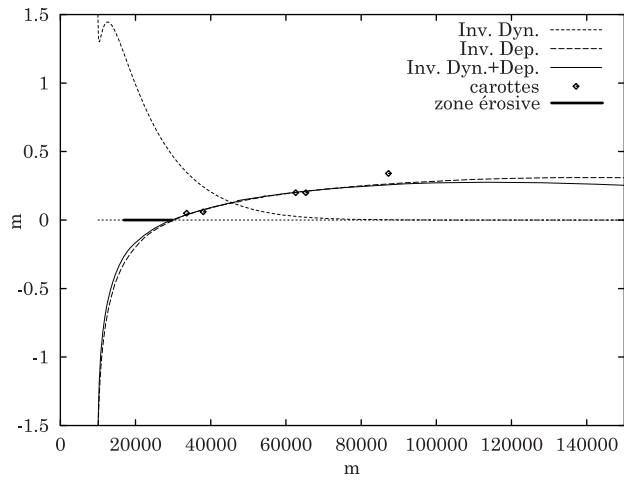


FIG. 3 – *Inversion totale contrainte par la dynamique et le dépôt : épaisseur déposée.* / *Total inversion constrained by dynamic and deposit data: deposit thickness.*

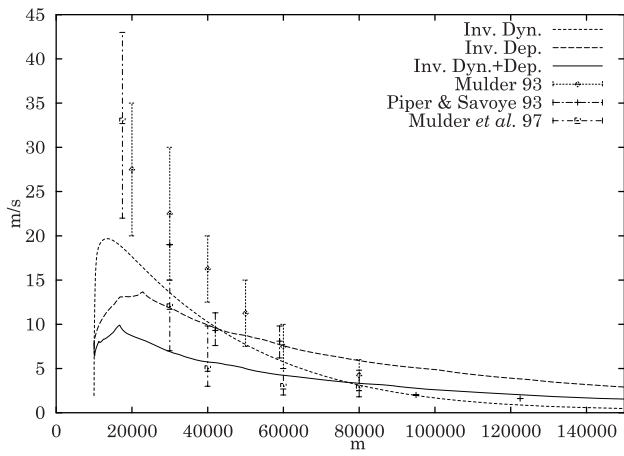


FIG. 4 – *Inversion totale contrainte par la dynamique et le dépôt : vitesse en fonction de la position.* / *Total inversion constrained by dynamic and deposit data: velocity function of position.*