

TURU, V. (1998). "Interprétation génétique de l'unité déformée de la coupe stratigraphique de Sornàs. Un *drumlin* dans les vallées du *Valira del Nord*, Principauté d'Andorre, (Pyrénées Orientales)", résumé du Vème Congrès National de Géomorphologie ayant eu lieu à Grenade du 15 au 18 septembre 1998; publié dans *Investigaciones recientes de la Geomorfología española* (A. GÓMEZ ORTIZ et F. SALVADOR FRANCH, éditeurs), Barcelone, 445-454 ; <http://www.igeotest.ad/articulos/vsart.asp?ID=39>

## INTERPETATION GENETIQUE DE L'UNITE DEFORMEE DE LA COUPE STRATIGRAPHIQUE DE SORNAS ; UN *DRUMLIN* DANS LES VALLEES DU VALIRA DU NORD, PRINCIPAUTE D'ANDORRE, PYRENEES ORIENTALES.

V, Turu Michels

Institut d'Estudis Andorrans, *Gran Via de les Corts Catalanes 585, 08007 Barcelone*

*Traduction de Romain Roger Roch GIL, Ingénieur géologue de l'école nationale supérieure de géologie (Nancy)*

**Résumé :** Une analyse des relations entre la sédimentation et la déformation des matériaux de l'unité 1 de Turu (1992) a été réalisée pour ce travail. A partir de ces relations et la position de cette formation par rapport à l'axe principal de la vallée du *Valira du Nord*, on a abouti à la conclusion que nous sommes en présence d'un *drumlin* formé vers la fin du dernier cycle glaciaire.

**Mots clés:** Sous-glaciaire, sédimentation, déformation, drumlin, dernière glaciation, Andorre

**Abstract:** We study the relationship between deformation and sedimentation of the unity one from Turu (1992) and we have concluded that this unity is an ancient drumlin, partially eroded, from the final part of the last glacial cycle in the Pyrenees.

**Key words:** Subglacial, sedimentation, deformation, drumlin, last glacial cycle, Andorra.

### 1 Introduction au modelé glaciaire des Pyrénées andorranes

La dernière glaciation pléistocène dans les Pyrénées présente un maximum glaciaire antérieur à 35 ka BP (Bordonau, 1992), qui correspond à la période pendant laquelle le glacier andorran atteignait son extension maximale, avec une moraine frontale située à 950 mètres d'altitude (Llobet, 1947). D'autres auteurs ont mis en évidence des affleurements glaciogéniques à des altitudes inférieures (Llopis, 1965; Prat, 1980 et Turu, 1994). Le glacier d'Andorre était le produit de la confluence de plusieurs vallées glaciaires, principalement des vallées de la *Valira d'Orient*, la vallée de la *Valira del Nord* et la vallée du *Madriu* (figure 1). La présente étude considère plusieurs affleurements situés entre 1290 mètres et 1310 mètres d'altitude dans la vallée de la *Valira del Nord*, et plus précisément dans la vallée d'Ordino, près du village de Sornàs. Antérieurement à cette étude, les travaux de Prat(1980), Vilaplana (1985), Turu et Bordonau (1997) citent différents affleurements glaciogéniques présents dans les différentes vallées de la *Valira del Nord*. Parallèlement à ces travaux, ceux de Turu (1992) et Turu et al. (1995) étudient en détail la séquence stratigraphique de Sornàs, et postérieurement, Turu et Bordonau (1997) ont apporté de nouvelles preuves sédimentaires que l'on va étayer dans cet article.

## 2 Théories en vigueur se référant à la déformation des drumlins

Un drumlin est une structure de forme ovale et allongée vu en plan, d'échelle décamétrique à hectométrique, qui se forme en position sous-glaciaire et orientée selon la direction d'écoulement d'un glacier. Au niveau d'un drumlin, on peut rencontrer des structures sédimentaires synchrones à la déformation qui traduisent un courant tractif sous le glacier. Un drumlin se différencie d'une moraine d'avancée glaciaire par la disposition du corps sédimentaire et l'orientation des structures de déformation par rapport à la direction d'écoulement du glacier (Piotrowski et Vahldiek, 1990). Plusieurs auteurs ont étudié l'origine de la génération des drumlins dans des glaciers non confinés (Hart, 1995) et dans des glaciers confinés (Van der Meer et Van Tatenhove, 1992). Pour Hart il existe deux grandes théories qui expliquent la génération d'un drumlin:

Théorie déformative: Elle suppose que les drumlins se sont formés sur un niveau déformé en position sous-glaciaire, où se retrouvent piégés des niveaux compétents qui agissent comme des noyaux, et les matériaux incompétents fluent autour des noyaux en formant une carapace (surface érosive). Cette surface autour du noyau est une surface érosive, tandis que le drumlin est une forme érodée. D'après Boulton (1987), ces drumlins se forment dans des zones d'extension longitudinales.

Théorie fluviale : Selon elle, un drumlin résulte du processus de dépôt fluvio-glaciaire dans des cavités érodées par des grands systèmes sous-glaciaires (drumlins constitués de sable ou de graviers). Ce processus peut-être généré par une pression interstitielle importante.

Recherches récentes : Actuellement, on pense que lorsque le glacier se déplace au-dessus d'un niveau potentiellement déformable, il existe un accouplement de la couche déformable avec le glacier, qui aboutit à l'augmentation de la vitesse d'écoulement de cette couche (Hart et Boulton, 1991). Pour Hart(1994), le style de déformation glaciaire dépend du gradient d'écoulement du glacier, occasionnant une déformation qui excave les matériaux recouverts par le glacier, ou une déformation constructive, si la vitesse augmente ou diminue, respectivement.

Les conclusions auxquelles Van der Meer et Van Tatenhove (1992) sont arrivés pour les différents drumlins sont globalement les suivantes:

- a) Les différents exemples présents dans les Alpes montrent que ces formes sont rares dans le contexte alpin et qu'elles présentent des structures peu développées, si bien qu'il est difficile de les reconnaître
- b) Ces structures peuvent aussi bien être générées par de petits glaciers holocènes, comme par des glaciers plus étendus de la fin de la dernière glaciation.

Les drumlins étudiés dans les Alpes se forment à partir d'une action directe du glacier et on écarte l'hypothèse de la génération de drumlins par l'action des eaux de fusion.

### 3 Description de la section stratigraphique de Sornàs

L'affleurement que l'on décrit ci-dessous est le résultat de l'étude de trois sections qui correspondent à trois phases d'excavation d'une parcelle de terrain annexe à la CG n°3 (Route Nationale 3) entre les villages d'Ordino et de Sornàs.

Le premier affleurement a été creusé en été 1990 et s'étendait sur 50 mètres de large, avec une hauteur maximale de 4 mètres. Au nord, ces sédiments-là étaient en contact avec des calcschistes du Dévonien, qui présentent des surfaces polies et striées. Cet affleurement a été décrit par Turu (1992), et sept unités sédimentaires ont été alors distinguées.

Postérieurement, lors du printemps 1991, deux affleurements supplémentaires ont pu être étudiés grâce à une nouvelle excavation. Le premier est subparallèle au précédent et le second sub-perpendiculaire. A partir de ces nouvelles données, Turu et al. (1995) regroupe deux des six unités sédimentaires décrites dans Turu (1992). On distingue ainsi cinq unités de dépôts. Parmi ces cinq unités, on étudie dans cet article la première et la seconde. Ainsi donc, on a au final, 4 unités de dépôts (figures 2 et 3). L'unité 2 de la figure correspond à un niveau de graviers imbriqués qui correspondent à un ancien lit de la rivière *Valira del Nord* et qui érode partiellement les unités sous-jacentes. L'unité 3 présente différents niveaux silteux avec des fragments de charbon (datés entre  $8589\pm 90$  BP et  $8160\pm 60$ BP) qui correspondent à des épisodes d'inondation de la rivière *Valira del Nord*. L'unité 4 correspond à des sédiments de lithologie locale correspondant à des colluvions provenant du versant proche.

Dans un contexte général de glaciologie des vallées de la *Valira del Nord*, Turu et Bordonau (1997, affleurement VII-1.1) décrivent une section perpendiculaire aux sections décrites précédemment dans cet article (figure 4). On a pu y distinguer les mêmes unités de dépôt. Ici, l'unité 2 se subdivise en deux : unités 2a et 2b. La sous-unité 2a est composée d'éléments de granulométrie grossière, sans structure sédimentaire. On associe la mise en place de cette sous-unité à des courants de gravité, tandis que la sous-unité 2b, constituée de graviers imbriqués a été déposée par un courant tractif, relatif au *Valira del Nord*.

Durant l'été 1996, une nouvelle excavation est réalisée dans une parcelle située à 20 mètres au sud des affleurements antérieurs. Dans ce nouvel affleurement on distingue les unités 1, 3 et 4. L'unité 1 présente un pendage vers l'ouest.

A partir des différents affleurements étudiés, on a abouti à la reconstruction de l'unité déformée (unité 1) qui présente généralement une longueur supérieure à 100 mètres dans la direction parallèle à la vallée glaciaire et une largeur de 20 mètres (minimum) dans la direction perpendiculaire. La puissance maximale de la structure n'a pas été déterminée.

La stratigraphie de l'unité 1 a été décrite en grande partie par Turu (1992), cependant, les nouveaux affleurements ont permis de compléter les différents niveaux existant. Globalement, l'unité 1 repose sur le substratum de calcschistes du Dévonien, présentant un poli et des stries glaciaires. A la base, 1,5 mètres de graviers semblant présenter des structures tractivées reposent sur le socle. A leur sommet, et en contact érosif, on trouve un niveau compact de blocs et de graviers présentant des morphologies glaciaires dans une matrice silto-sableuse, qui ne présente pas de structures sédimentaires internes, interprété comme un till. Au-dessus de ce dernier niveau, on retrouve les niveaux décrits par Turu (1992). Au-dessus des niveaux décrits par Turu (1992), on trouve un niveau de graviers sans structure interne, avec une puissance d'un mètre. Au-dessus, un mètre de sables laminés, légèrement basculés correspondent à l'unité 2 de Turu(1992) et au toit de l'unité 1. La série sédimentaire s'achève par un till sous-glaciaire qui recouvre de façon externe l'unité 1, étant donné qu'il existe des endroits où l'unité fluviatile n'a pas érodé l'unité sous-jacente.

#### **4 Relation entre la sédimentation et la déformation de l'unité 1**

Les couches de l'unité 1 sont inclinées, avec une surface de contact ondulée, présentant des petits plis avec une longueur d'onde inférieure au mètre, et une amplitude faible. Ces couches ont subi des contraintes de confinement élevées, étant donné les nombreux blocs fracturés observés dans le matériel des niveaux à faible proportion de matrice. On a également pu observer que certains contacts entre les couches étaient tangentiels, ce qui signifie que le système présente un enregistrement sédimentaire synchrone à la déformation des niveaux inférieurs.

On estime la déformation longitudinale afin de pouvoir la comparer avec les déformations longitudinales d'autres localités. La déformation longitudinale est calculée d'après l'équation suivante :

$$e = \frac{\text{longueur déformée} + \text{longueur initiale}}{\text{longueur initiale}} \times 100$$

Etant donné l'impossibilité de réaliser une coupe géologique équilibrée, on a procédé à la mesure du raccourcissement directement au niveau des contacts entre les formations sédimentaires, étant donné que, en général, les structures de déformation à grande échelle sont reflétées par les structures de déformation à petite échelle.

Sur la figure 2, on présente une description synthétique de la série sédimentaire. A la base, le raccourcissement longitudinal est de 41% au contact entre le premier till et les graviers inférieurs. Pour la première moitié de la deuxième série de tills sous-glaciaires, le raccourcissement longitudinal est de 36%. La base du till sous-glaciaire intermédiaire présente un raccourcissement de 14%, tandis que la surface de contact entre les deux tills présente un raccourcissement de 11,5%, comme le niveau de graviers situé juste au-dessus. Le niveau de graviers suivant présente un raccourcissement de 10,4%. Finalement, les sables laminés sont caractérisés par un raccourcissement de 3,8% (unité 2 de Turu, 1992). Ils forment une discordance angulaire avec les autres couches et fossilisent le relief des niveaux les plus déformés.

A partir de cette évolution du raccourcissement longitudinal, on met en évidence 3 phases importantes. D'après Hart(1994), la première phase serait caractérisée par un raccourcissement de 4,6%, généré par l'accouplement de la base du glacier avec des sédiments déformables et une vitesse d'écoulement de la glace compatible avec la déformation constructive; La deuxième phase, avec un raccourcissement de 21,9% correspondrait à un changement de la vitesse d'écoulement, correspondant à une déformation qui érode les matériaux déposés. La dernière phase, serait à nouveau une phase constructive et présenterait un raccourcissement synsédimentaire de 14%.

A l'échelle décimétrique, la structure se présente comme une série de plis coniques antiformes et synformes avec des flancs ouverts vers le centre de la vallée et qui se ferment au niveau du versant proche. Au niveau de la partie la plus interne de la structure, celle qui a subi un raccourcissement plus important et qui se trouve en bas de la pile sédimentaire, les plis sont parallèles à la surface polie de l'auge glaciaire. Conformément à cela, à la base de la pile sédimentaire, les axes des plis semblent avoir une disposition en éventail avec une tendance à être parallèles avec l'axe de la vallée.

## **5. Discussion et conclusions**

L'unité 1 présente une évolution décroissante de sa déformation de la base au toit de la série sédimentaire. De plus, les discordances angulaires au niveau des couches et un indice d'une déformation synsédimentaire. D'autre part, l'existence d'un till sous-glaciaire partiellement érodé par l'unité 3, en contact avec plusieurs niveaux de l'unité 1 suggère que cette unité était recouverte par le till sous-glaciaire, si bien qu'elle se situait en position sous-glaciaire.

D'après la disposition structurale à l'échelle décimétrique, avec les axes des plis qui présentent une disposition en éventail avec une tendance à être parallèles avec l'axe principal de la vallée, on peut dire que c'est l'écoulement de glace qui est responsable du caractère conique des plis. La présence exclusive de structures de déformations ductiles permet d'affirmer que la déformation des sédiments s'est produite dans un contexte présentant une pression de confinement élevée. D'autre part, la sédimentation fluvio-glaciaire des différents niveaux de l'unité 1 implique un courant tractif. En combinant ces deux informations, on en déduit que les sédiments et les cavités sous-glaciaires étaient saturés et que la pression interstitielle devait être élevée.

La situation de l'unité 1, sous du lit rocheux a été propice au dépôt de cette unité dans une position abritée du courant (*lee side*), comme le "Dépôt de Sant Mamés" décrit par Vilaplana(1983) et plus tard par Bordonau (1992) dans le complexe proglaciaire de Vilaller. Dans le cas de Sornàs, le substratum rocheux devait modifier la vitesse d'écoulement de la glace et générer une déformation constructive, comme le suggère Hart (1994). Lorsque la déformation creusait les sédiments sous-jacents, l'érosion ne devait être que partielle, et accompagnée d'une déformation importante et du dépôt d'un till sous-glaciaire sur l'unité.

A partir de ces informations, une séquence théorique de déformation synsédimentaire de l'unité 1 sans échelle a été élaborée (figure 5). En partant d'un lit rocheux incliné et un remplissage sédimentaire existant, on génère une ondulation des couches sédimentaires par accouplement avec base du glacier, jusqu'à l'endroit où le substratum rocheux se trouve trop profond (figure 5a). La déformation synsédimentaire des couches génère des irrégularités topographiques sous le glacier (figure 5b et 5c), de telle façon que l'on a une création d'espace. Dans cet espace les matériaux détritiques de fusion sous-glaciaire se sont déposés (déformation constructive). Par moments, la base du glacier entre en contact avec les sédiments fluvio-glaciaires, et les érode partiellement, en déformant de façon intense l'unité 1 (figures 5d et e), et dépose des niveaux de tills sous glaciaires (déformation creusant les sédiments sous-jacents). Le gradient d'écoulement de la glace a dû générer à nouveau une déformation constructive de telle façon que les matériaux fluvioglaciaires (figure 5f) se déposent. Au fur et à mesure que la vitesse d'écoulement glaciaire diminue, la déformation est moins importante, et la sédimentation régularise le relief engendré par la déformation des couches (figure 5g).

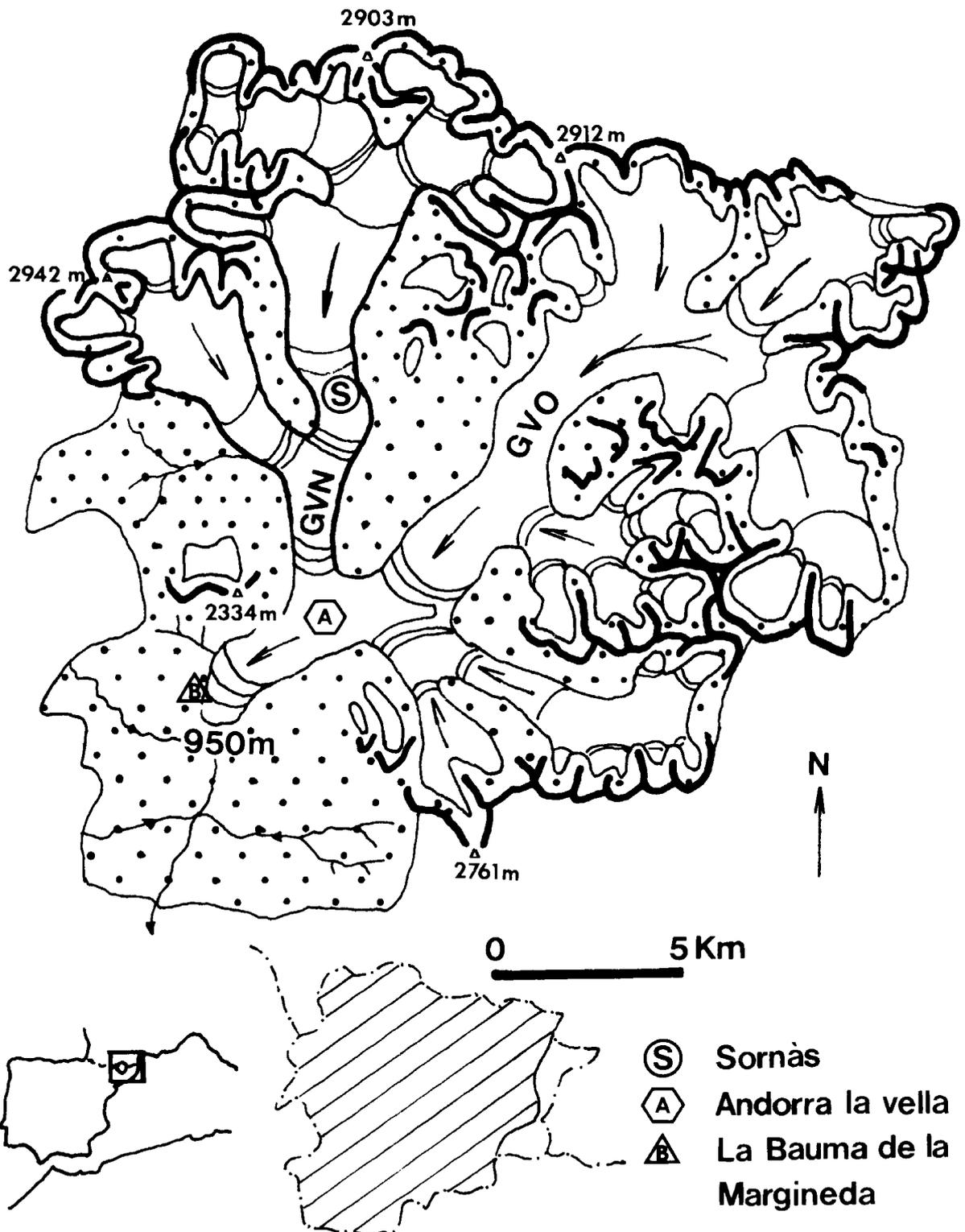
On a distingué en tout trois phases de déformation, où la plus importante est la seconde (22% de raccourcissement linéaire) et est caractérisée par une érosion partielle et le dépôt d'un till sous-glaciaire (figure 5d et 5e)

Comme cela a été décrit dans les Alpes (Van der Meer et Van Tatenhove, 1992), le drumlin de Sornàs a été formé par l'action déformative du glacier, mais avec une pression interstitielle importante. Les différentes phases de déformations présentes, sont associées au gradient d'écoulement de la glace et au caractère de la déformation creusant ou déposant des sédiments, comme le suggère Hart (1994).

Lors de la formation du drumlin de Sornàs, le front glaciaire devait se situer à quelques kilomètres au Sud d'Ordino, puisque les déformations sous-glaciaires se produisent près du front glaciaire. Cela est dû à l'accumulation des contraintes tangentielles générées par la différence d'épaisseur de glace au niveau du front glaciaire, comme le suggère Croot et Fenton (1989), si bien que l'on peut attribuer un âge antérieur au dernier maximum glaciaire du dernier cycle glaciaire dans les Pyrénées. Ils appartiennent probablement à l'épisode de glaciers de vallées ou glaciers en altitude de Bordonau (1992).

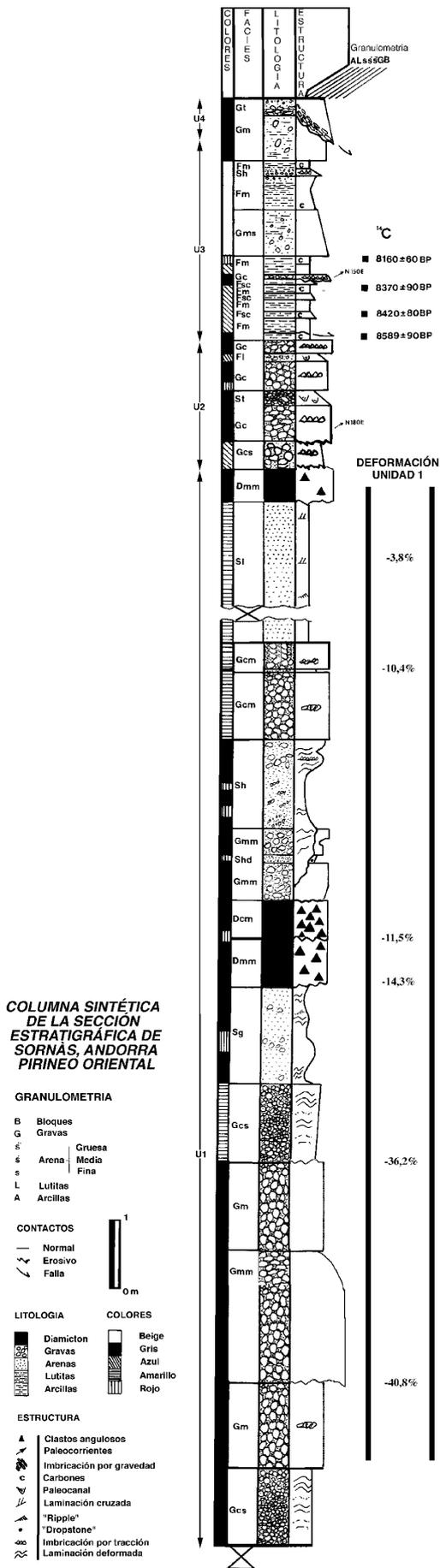
## **Références bibliographiques**

- Bordonau, J. (1992): El complex proglacial de barratge morrènic del Seminari de Vilaller. En: Geoforma (Ed.), *Els complexos glacio-lacustres relacionats amb el darrer cicle glacial als Pirineus*, Logroño, 94-99 pp
- Boulton, G. S. (1987): A theory of drumlin formation by subglacial deformation. En: Menzies, J. y Rose, J. (Eds.), *Drumlin Symposium, Rotterdam*, 25-80 pp
- Croot, D.G. y Fenton, M. M. (1989): Dynamism of glaciotectionic deformations. En: Kluwer Academic Co.(Ed.), *Glaciotectionic landforms and structures*; Dordrecht, 155-168 pp
- Hart, J. K. (1994): Till fabric associated with deformable beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 15-32
- Hart, J. K. (1995): Drumlin formation in southern Anglesey and Arvon, Northwest Wales. *Journal of Quaternary Science*, 10, 3-14
- Hart, J. K. y Boulton, G. S. (1991): The interrelationship between glaciotectionic deformation and glaciodeposition within the glacial environment. *Quaternary Science Reviews*, 10, 335-350
- Llobet, S. (1947): *El medio y la vida en Andorra, estudio geográfico*. CSIC, Barcelona, 347 pág.
- Llopis, N. (1967): *Mapa geológico de Andorra*. CSIC, IV, 1:25.000, Madrid.
- Piotrowski, J.A. y Vahldiek, J. (1990): Elongated hills near Schonhorst, Schlewig-Holstein: drumlins or terminal push-morraines?. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 38, 231-242.
- Prat, M.C. (1980): *Montagnes et vallées d'Andorre, étude géomorphologique*. Tesis de tercer ciclo, Inst. de Geogr. de la Univ. de Bordeaux III, Inédita, 267 pág.
- Turu, V. (1992): La secció estratigràfica de Sornàs. *Annals 1991 de l'Institut d'Estudis Andorrans*, Barcelona, 47-76
- Turu, V. (1994): Datos para la determinación de la máxima extensión glaciaria en los valles de Andorra (Pirineo Central). En: J. Arnáez-Vadillo, J.M. García-Ruiz y A. Gómez Villar (Eds.), *Actas de la III Reunión Nacional de Geomorfología*, Logroño, 265-276 pp.
- Turu, V.; Bordonau, J. y Vilaplana, J.M. (1995): La secció de Sornàs (Andorra, Pirineo Central). En: GTPEQ-AEQUA (Ed.), *Actas de la III Reunión del Cuaternario Ibérico*, Universidade de Coimbra, Coimbra 1993, 209-214 pp
- Turu, V. y Bordonau, J. (1997): El glacialisme de les valls de la Valira del Nord (Principat d'Andorra), síntesi d'afloraments. *Annals 1995 de l'Institut d'Estudis Andorrans*, Barcelona, 41-104
- Van der Meer, J. J. M. y Van Tatenhove, F. G. H (1992): Drumlin in a full alpine setting: some examples from Switzerland. *Geomorphology*, 6, 59-67
- Vilaplana, J. M. (1983): Quaternary Glacial Geology of Alta Ribagorça Basin (Central Southern Pyrenees). *Acta Geológica Hispánica*, 18, 3/4, 217-233
- Vilaplana, J. M. (1985): Les fases glacials del Quaternari superior en el sector nord-oest del Pirineu Andorrà. *Revista de Investigaciones Geológicas*, 41, 67-82.



**Figure 1 :** Localisation de la zone d'étude. Sur cette figure on peut observer la confluence des appareils glaciaires à Andorre la Vieille. On observe également la position du front glaciaire à une côte de 960 mètres, à proximité de la *Bauma de la Margineda*.

**Figure 2 :** Colonne stratigraphique de la section de Sornàs, avec la division des différentes unités de dépôt. On a également représenté sous forme de colonne le raccourcissement linéaire des différents niveaux de l'unité de dépôt 1.



## Sección estratigráfica de Sornàs, Andorra, Pirineo Oriental

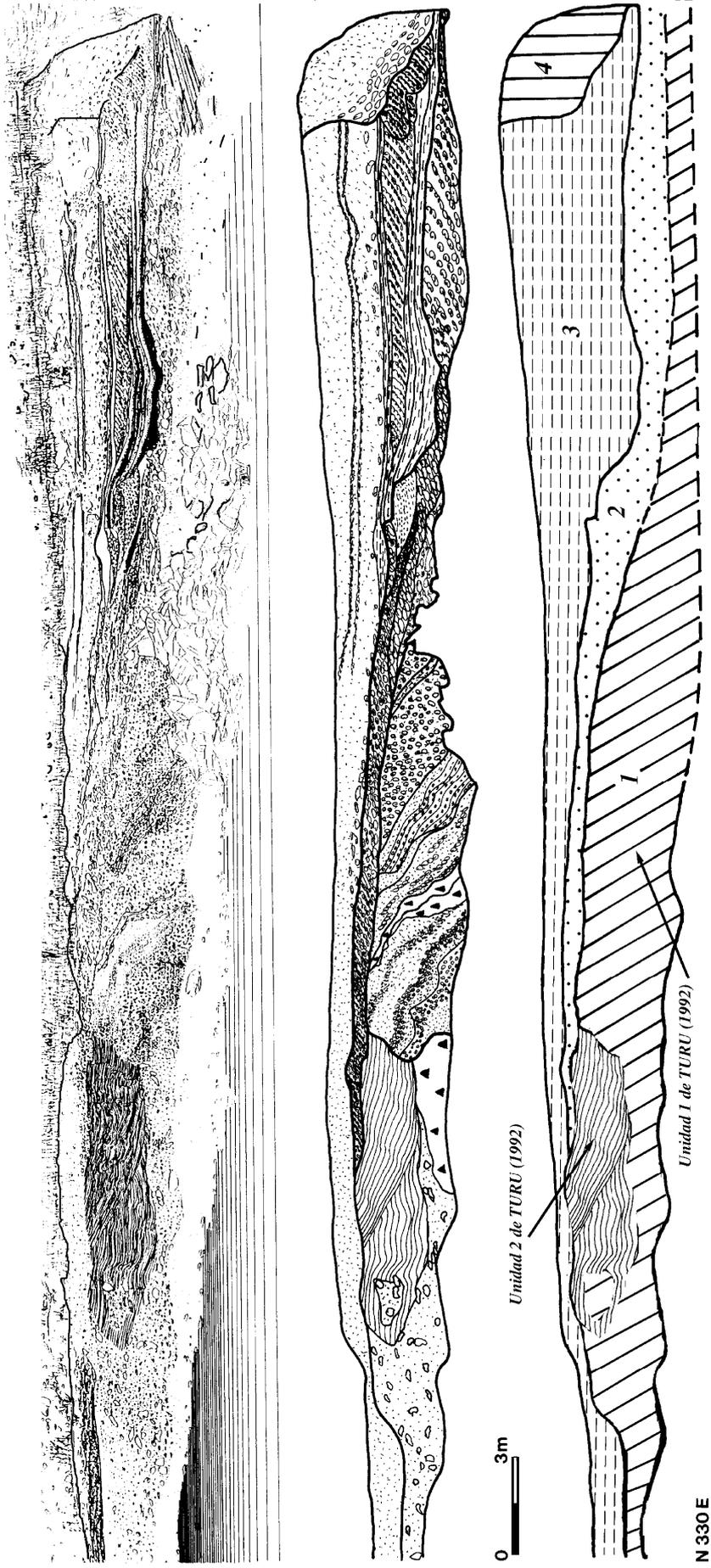
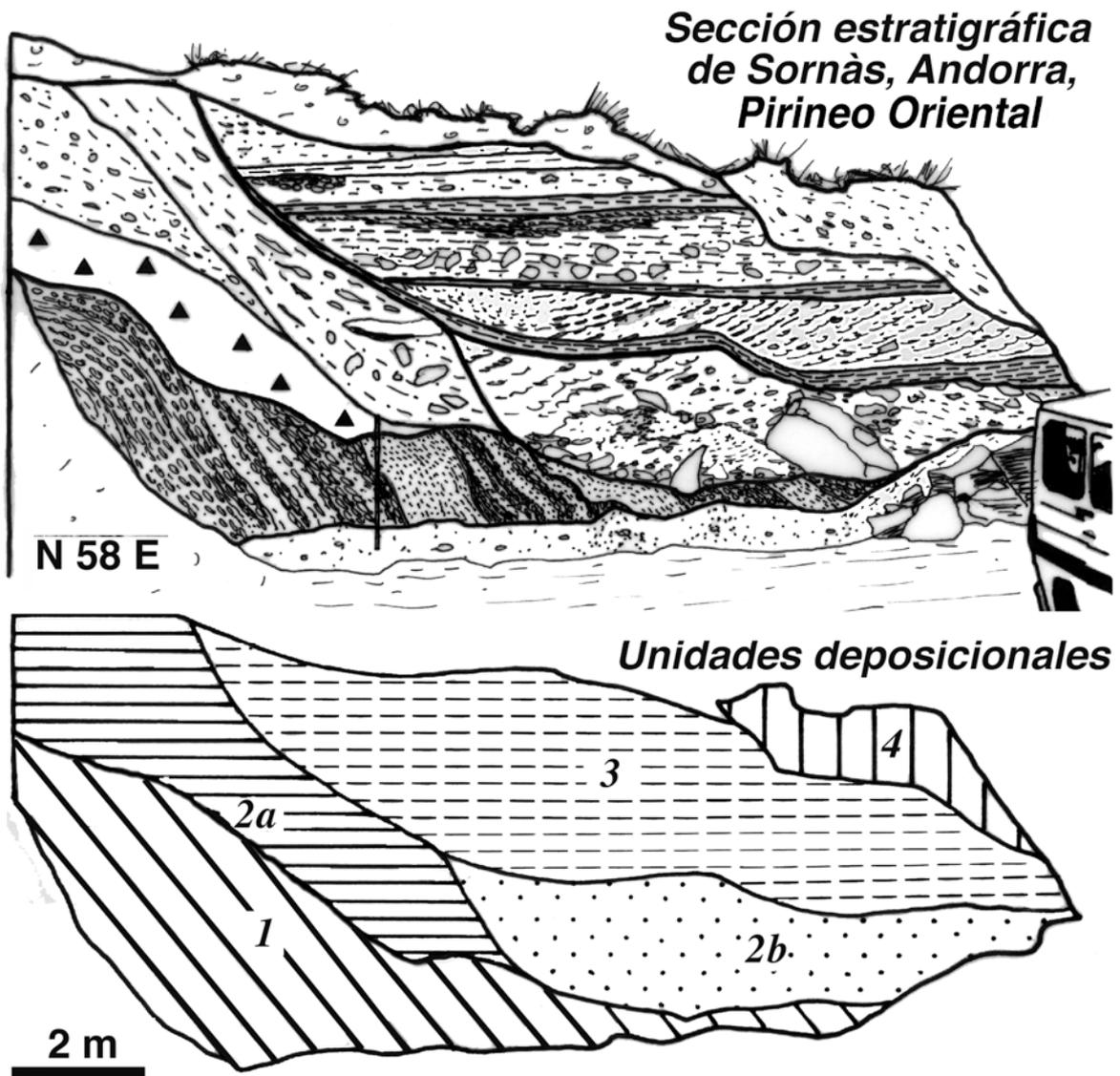
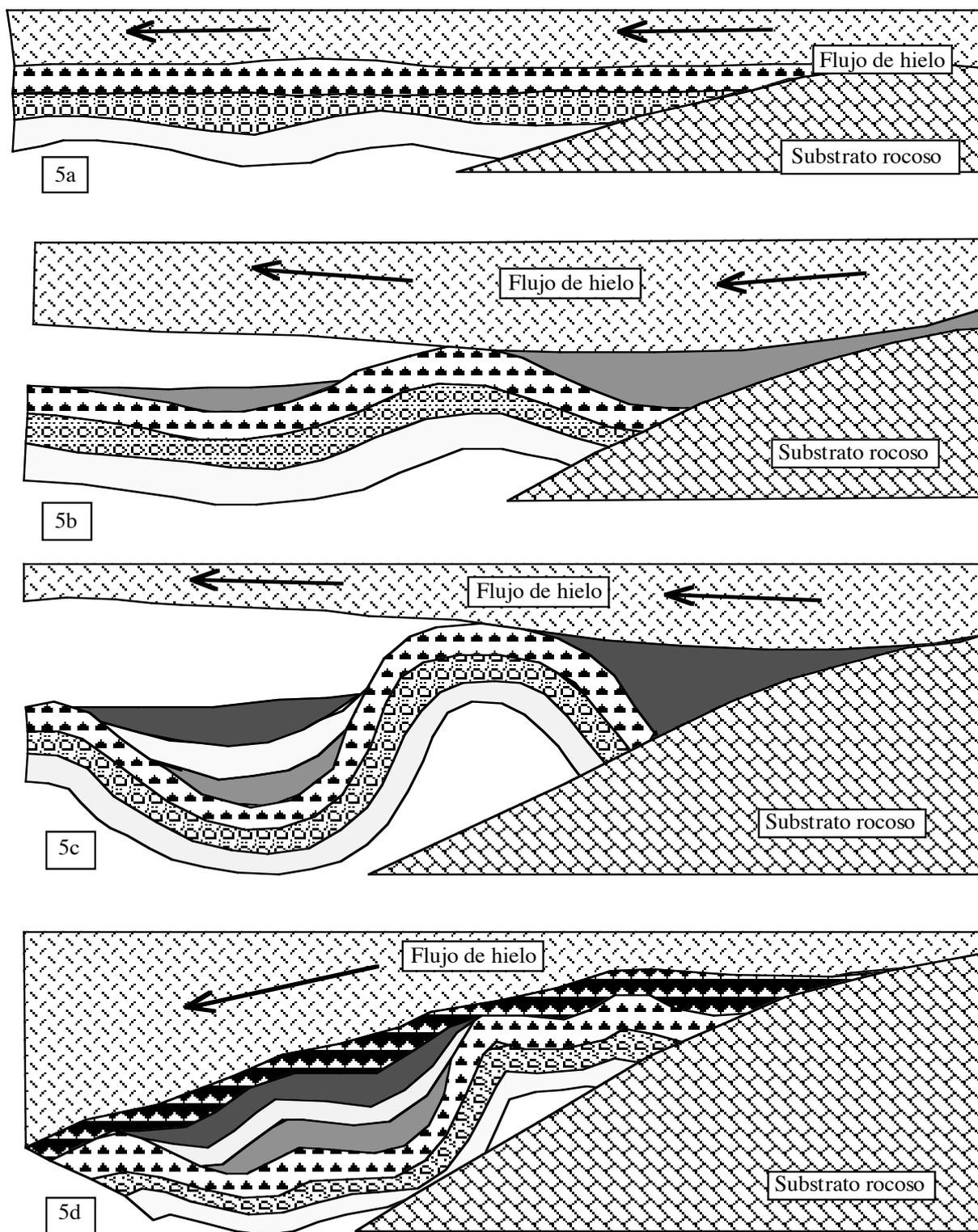


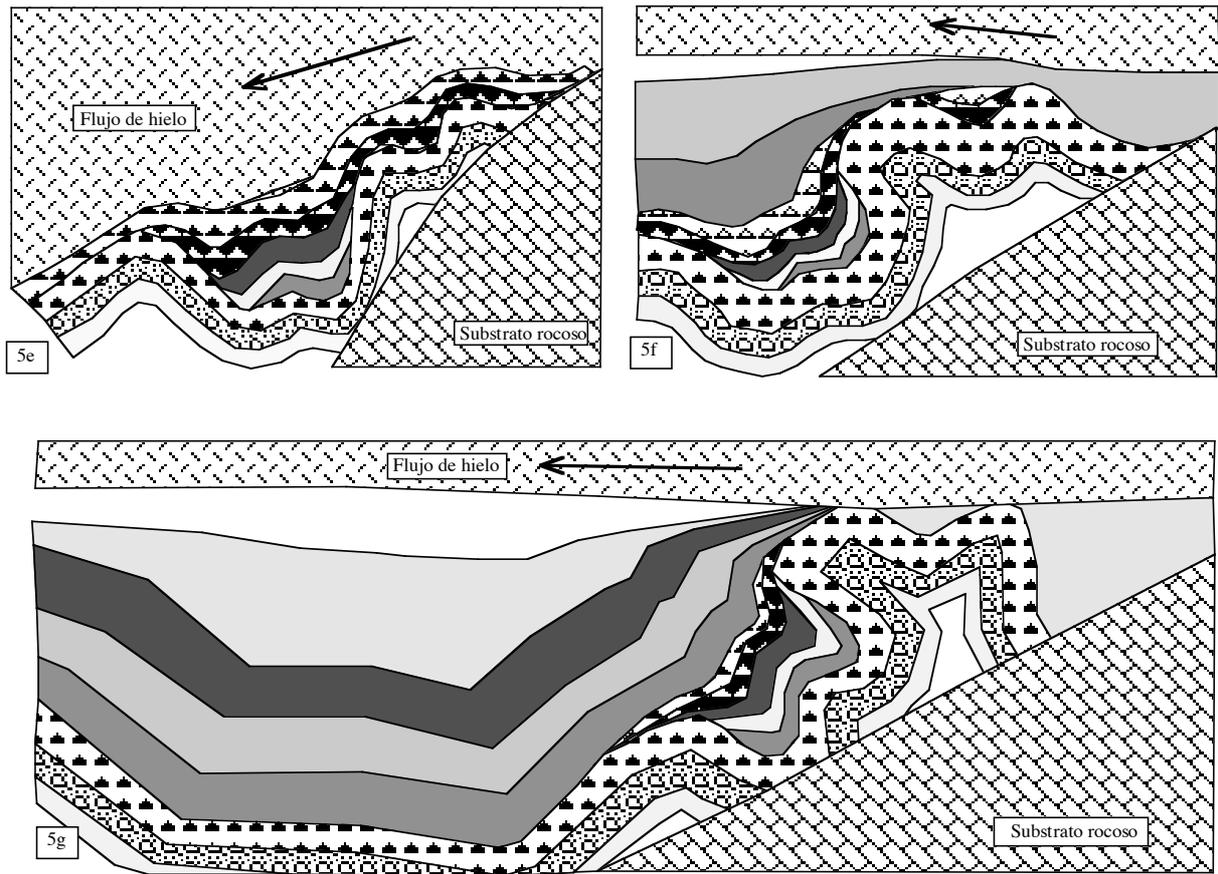
Figura 3: Esquema de la sección estratigráfica de Sornàs estudiada por Turu (1992) y Turu et al. (1995). En el presente esquema se puede observar como la unidad 2 de Turu (1992) se sitúa de forma discordante por encima de los materiales de la unidad 1 de Turu (1992); el contacto es discordante pero estos materiales pertenecen a la misma unidad.



**Figure 4 :** Schéma de la section stratigraphique de Sornàs étudiée par Turu et Bordonau (1997). Cette section est perpendiculaire à celle présentée sur la figure 3, si bien qu'on a pu étudier la géométrie des différentes unités. On observe également que les unités de dépôt postérieures sont discordantes et en contact érosif avec l'unité 1.



**Figure 5** : Evolution des relations entre déformation et sédimentation dans l'unité stratigraphique 1 de Sornàs, voir l'explication dans le texte.



**Figure 5 (cont.) :** Evolution des relations entre déformation et sédimentation dans l'unité stratigraphique 1 de Sornàs, voir l'explication dans le texte.

**Drumlin de Sornàs, papyrofléxie.** En vert la roche, en bleu les niveaux de till sous-glaciaire, en jaune les sables qui se sont déposés en dernier. En blanc et hachuré, la terrasse fluviale du *Valira del Nord* qui érode le Drumlin.

