

# Évolution géomorphologique ancienne pour une vallée du versant méridional des Pyrénées Orientales. Âge et rythmes de construction de la vallée de la Valira du Nord (Principauté d'Andorre) à partir de données d'isotopes cosmogéniques ( $^{21}\text{Ne}$ et $^{10}\text{Be}$ )

V. Turu (1) et J.R. Vidal-Romaní (2)

(1) Fundació Marcel Chevalier, Av. Príncep Benlloch 66-72, Andorra la Vella AD 500, Principat d'Andorra.

[igeofundacio@andorra.ad](mailto:igeofundacio@andorra.ad)

(2) Instituto Universitario de Xeoloxía. Universidade da Coruña. 15072. A Coruña. Spain

## INTRODUCTION

L'échantillonnage de veines à quartz de différentes surfaces d'érosion ont été faites en 2002 (Fig. 1) pour obtenir du néon et béryllium cosmogénique ( $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ). Le but était de dater les phases du dernier cycle glaciaire qui, du même que pour le reste des vallées des Pyrénées méridionales (Bordonau, 1992), est censé avoir formé la vallée andorrane. Les résultats obtenus en 2004, spécialement des isotopes de  $^{21}\text{Ne}$ , diffèrent considérablement de ce qui était attendu. La prudence convenait alors de garder ces données jusqu'à que la bibliographie soit plus riche en cas similaires. Un premier exposé des résultats a été fait en 2009 dans l'excursion annuelle de l'AFEQ (Delmas & Turu, 2009). Finalement la publication des résultats a été faite par Turu et al. (2011a et b), avec une réflexion des possibles implications géomorphologiques (Turu, 2011) pour trois échantillons en concret (AND 1, AND 3 et AND 13, Fig. 1).

de présenter des cristaux de quartz. La méthodologie et matériaux pour les datations en  $^{21}\text{Ne}$  qui a été suivie est la même que celle appliquée en Galice par Fernández-Mosquera (2002). Les datations en  $^{10}\text{Be}$  ont été faites dans le laboratoire PRIME (Université Prude, Indiana, États-Unis) en 2004.

## DONNÉES DE LABORATOIRE

En aucun des échantillons de lithologie granitique a été possible obtenir du gaz pour les datation en  $^{21}\text{Ne}$  (9, 10, 11, 12, 17), bien que le quartz utilisé a été purifié à la mesure du possible. Ici on invoque des questions de migration du gaz par des flux d'eau en milieux cristallins fissurés comme est le cas exposé en Scandinavie (Neretnieks, 2013).

Par ailleurs les échantillons 16, 14 et 15 situées dans des schistes n'ont pas donné toute le  $^{21}\text{Ne}$  nécessaire. L'échantillon 2 a été prise à l'intérieur du Port Tunnel Rat d'observer l'atténuation des muons. Dans le Tableau 1 sont indiquées les concentrations totales obtenues à partir de différents paliers de température (Dunai, 2010). La composition isotopique du néon à différentes températures dans le diagramme ternaire de Niedermann (2002) informe sur l'histoire de la croûte terrestre ou de la composition du manteau (Dunai, 2010), mais c'est la ligne de spallation (néon cosmogénique) qui intéresse. Si l'évolution des compositions isotopiques a différents paliers de température ne suive pas cette ligne certaines corrections peuvent être faites (Fernández-Mosquera, 2003).

Sur un total de 17 échantillons 6 ont été sélectionnés pour dater avec  $^{10}\text{Be}$ . Contrairement aux échantillons  $^{21}\text{Ne}$  des résultats dans des échantillons de lithologie granitique ont pu être obtenues (Tableau 2).

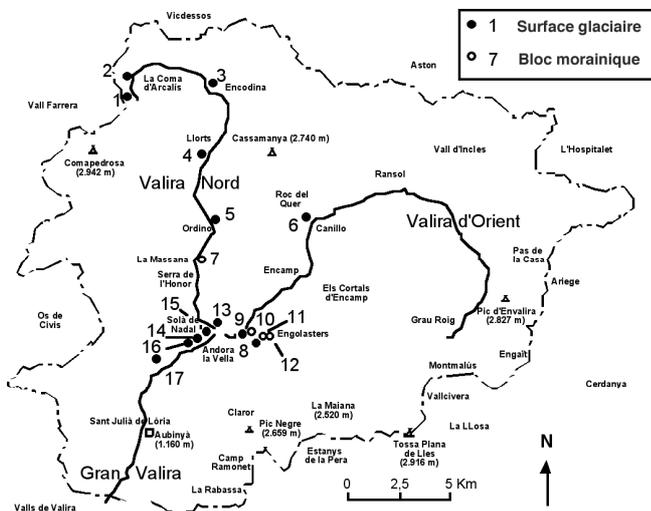


Fig. 1: Localisation de l'échantillonnage effectué. Discussion des résultats des échantillons 1, 3, 5 et 13 sont présents dans la communication.

Surface	$^{20}\text{Ne}$	Excès $^{21}\text{Ne}$	$^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$	Cosmo. $^{21}\text{Ne}$
AND 1 (a)	6,16	4,26	2,25	$2,902 \pm 0,0287$
AND 3 (b)	9,86	3,25	3,16	$2,68 \pm 0,0865$
AND 5 (b)	9,93	13,5	3,28	$6,13 \pm 0,0978$
AND 6 (ab)	1640	0,952	2,05	$0,521 \pm 0,0456$
AND 7 (b)	6,63	3,48	2,12	$2,16 \pm 0,0480$
AND 13(c)	18,3	2,97	2,06	$2,97 \pm 0,0633$
Atm./g	$\times 10^9$	$\times 10^7$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^7$

## STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

L'hypothèse de travail était supposer que une vallée glaciaire présente des traits les plus jeunes aux cirques, tandis que les zones les plus anciennes de la même sont la ou l'empreinte glaciaire est la plus faible. Dans ce sens nous avons choisi en 2002 faire un transect nord-sud préférentiel le long de la vallée du Valira Nord (Fig. 1). L'échantillonnage a toujours été choisir des veines de silicates sensibles

Tableau 1: Résultats obtenus dans le laboratoire en 2004 suivant la méthodologie de Fernández-Mosquera (2002). Les concentrations des différents échantillons ont été obtenus à partir de différentes étapes de température comprise entre  $400^\circ\text{C}$  et  $600^\circ\text{C}$ . (a) correction Fernández-Mosquera et al. (2003) en présence de la composition de la croûte. (b) correction de Fernández-Mosquera et al. (2000, 2003) en ajoutant nucléogéniques  $^{21}\text{Ne}$ . (c) correction Fernández-Mosquera et al. (2000, 2003) pris par d'autres composants de la composition de l'atmosphère Ne.

Référence.	<sup>10</sup> Be	Quartz	Secteur
AND 1	3,19789	42,63	Arcalis
AND 13	1,30881	17,65	Engordany
AND 15	1,62089	10,86	Solà Nadal
AND 3	2,34363	39,00	Encodina
AND 4	1,95781	20,79	Llorts
AND 9	3,35293	33,29	Engolasters
atomes/g	x10 <sup>5</sup>	g	

Tableau 2: Résultats obtenus dans le laboratoire PRIME (Université Prude, Indiana, États-Unis) en 2004 (NIST 4325 standard, voir <http://www.physics.purdue.edu/primelab/>).

### ÂGES APPARENTS

Contrairement au <sup>21</sup>Ne le <sup>10</sup>Be est un isotope instable et il se décompose radioactivement au cours du temps, c'est à dire qu'il ne s'accumule pas indéfiniment tandis que le <sup>21</sup>Ne oui.

L'atténuation de la production d'un quelconque isotope cosmogénique pour pénétrer la roche varie de façon exponentielle (Dunai, 2010) selon:

$$P = P_0 [EXP (M/\Lambda)]$$

Où P est la production à une profondeur donnée et P<sub>0</sub> sur la surface,  $\Lambda$  et M correspondent au coefficient d'atténuation massique (170 g/cm<sup>2</sup>), et le matériau traversé C (g/cm<sup>3</sup>). On parle alors de profondeur d'atténuation caractéristique (z\*), ou son inverse (coefficient d'absorption,  $\mu$ ), et qui varie en fonction du type de roche selon:

$$Z^* = \Lambda / \rho$$

Étant  $\rho$  la densité de la roche (g/cm<sup>3</sup>) et  $\Lambda$  de coefficient d'atténuation ( $\Lambda = 170$  g/cm<sup>2</sup>) ou de la longueur d'atténuation qui est le produit de la densité par la distance. Pour l'eau ( $\rho = 1,0$  g/cm<sup>3</sup>), le granit ( $\rho = 2,7$  g/cm<sup>3</sup>) et de basalte ( $\rho = 3,2$  g/cm<sup>3</sup>) la profondeur d'atténuation caractéristique est respectivement 170, 63 et 56 cm.

Ce fait rend le sommet de la surface un sujet intéressant à dater car va présenter la maximale accumulation de l'isotope, dans une condition de non érosion. Au contraire si il existe une érosion constante dans le temps l'accumulation du isotope va arriver avant à une situation d'équilibre stationnaire, Les âges seront apparents si il n'ya pas une remotion de la profondeur caractéristique d'atténuation par le processus d'érosion, ou bien la surface a subi un enterrement postérieur à l'exposition des rayons cosmogéniques.

Ainsi, dans le cas du <sup>21</sup>Ne peut être vu plus facilement un possible l'héritage de l'exposition, alors que pour les isotopes radioactifs (<sup>10</sup>Be) cet effet peut passer inaperçu car une partie de celui-ci se décompose au fil du temps.

En principe, il est possible de déterminer à la fois l'âge et le taux d'érosion d'une surface par l'analyse de deux (ou plusieurs) nucléides différents (Lal, 1991). Les résultats de cette approche sont généralement illustrés dans des diagrammes à deux nucléides de Lal (1991), dans lesquels différents domaines ayant des implications géomorphologiques peuvent être identifiés. Dans notre cas tous les échantillons analysés sont sur le champ des surfaces avec une histoire d'exposition complexe qui doit inclure les périodes d'inhumation au cours de lesquelles la production de nucléides ralentit ou arrête.

C'est important souligner que l'histoire d'exposition la plus courte est la d'une exposition de la surface continue sans érosion, suivie d'enfouissement à une profondeur suffisante pour la protéger complètement de la surface des rayons cosmiques (Bierman et al. 1999).

Pour des nucléides stables la concentration est fonction du taux d'irradiation (P) pour un certain temps d'exposition (t<sub>e</sub>):

$$C = P \cdot t_e (1)$$

Pour les nucléides radioactifs l'équation est un peu plus compliqué et à la forme:

$$C = [1 - EXP(-\lambda t_e)] \cdot [EXP(-\lambda t_b)] \cdot P / \lambda (2)$$

$$\lambda = LN(2) / T_{1/2}$$

Où le temps de demi vie du isotope radioactif est T<sub>1/2</sub> et t<sub>b</sub> le temps d'enfouissement produit par n'importe quel phénomène géomorphologique.

### Âge apparent des surfaces avec le <sup>10</sup>Be

Les échantillons sont tous des surfaces d'érosion glaciaires situées à des hauteurs différentes dans le fond de la Valira Nord, à l'exception de AND 9, qui correspond à une surface glaciaire associée à une moraine latérale. Les échantillons AND 15 et 13 se trouvent à la confluence avec la rivière principale. AND 3 et 4 dans la vallée moyenne et supérieure de Valira Nord. Enfin AND 1 a été pris dans un cirque glaciaire. Les âges des échantillons de <sup>10</sup>Be peuvent être vues dans le tableau 3. Il est à noter que tous les échantillons du fond de la vallée, quelle que soit leur position relative, ont pratiquement le même âge (11.151 ± 1.047 ans).

Ref.	Géomorphologie	Hauteur	Années	±2σ
AND 1	Cirque glaciaire	2.460	9.831	643
AND 3	Roche moutonnée	1.730	11.921	943
AND 4	Vallée glaciaire	1.530	11.489	999
AND 9	Surface de poliment	1.648	18.077	1.309
AND13	Roche moutonnée	1.108	10.562	1.155
AND15	Roche moutonnée	1.226	11.950	1.495
Moyenne (Σi/n)			11.151	1.047

Tableau 3: datations absolues minimales obtenues. Le taux de production a été obtenu en utilisant "CRONUS-Earth online calculator": (<http://hess.ess.washington.edu/math/>) v.2.2.1(Balco et al. 2008) sans corrections. Nous avons calculé la valeur moyenne des échantillons situés au fond de la vallée (sauf AND 9)

### Âge apparent des surfaces avec le <sup>21</sup>Ne

En général âges apparents <sup>21</sup>Ne sont pratiquement obtenus avec un à deux ordres de grandeur de de <sup>10</sup>Be. Les échantillons AND 1 et AND 3 et AND 5 ont presque une corrélation directe à la hauteur altimétrique (Tableau 4), indiquant les surfaces d'exposition réduits échantillon vers la vallée supérieure. Cette tendance est tronquée dans l'AND 13, qui montre là une zone de confluence de la vallée du Valira Nord avec Valira d'Orient en Andorre. L'échantillon AND 6 correspond à une surface glacier au bord de l'action de la glace sur le côté de la vallée. L'échantillon AND 7 a été prise dans un bloc morainique 7 et son âge est bien plus ancien que le dépôt ou il repose. Pour Turu et al. (2011a) le dépôt aurait un âge de 19 Ka Cal BP; le bloc aurait été donc recyclé, fait que pour Putkonen et Swanson (2003) n'a rien à d'étrange car ces auteurs ont

observé que seulement le 20% des blocs ont un âge synchrone par rapport à leur dépôt morainique.

Ref.	Geomorphologie	Hauteur	Âge	±2σ
AND 1	Cirque glaciaire	2.460 m	225 Ka	2,22 Ka
AND 3	Roche moutonnée	1.730 m	362 Ka	11,7 Ka
AND 5	Vallée glaciaire	1.300 m	1.180 Ka	18,8 Ka
AND 6	Surface de poliment	1.930 m	59,1 Ka	5,17 Ka
AND 7	Bolc morainique	1.298 m	411 Ka	9,14 Ka
AND13	Roche moutonnée	1.108 m	660 Ka	14,1 Ka

Tableau 4: datations obtenues suivant la méthodologie de Fernández-Mosquera (2002). Le taux de la  $^{21}\text{Ne}$  (Dunai, 2010) la production est fonction de la hauteur le long  $^{21}\text{Ne}/^{10}\text{Be} = \text{rapport } 4.3$  (Kober et al., 2010).

## RESULTATS

Le fait que les données disponibles sont dans le champ d'exposition complexe (Lal, 1991) indiquent qu'ils ont été partiellement ou complètement blindé après l'exposition initiale, leurs valeurs des âges  $^{10}\text{Be}$  sont apparents.

Le modèle de l'érosion non stationnaire a également été mis en évidence dans les Pyrénées Orientales par Delmas (2009) et Delmas et al. (2009). Ces auteurs notent importants héritages sur le côté sud (60% des surfaces en date du Carlit), contrairement au versant nord (15% en Ariège). Un fait curieux est présent dans la vallée de la Noguera Ribagorzana où également un 60% des échantillons datés par  $^{10}\text{Be}$  montrent des âges semblables à la moyenne des âges d'Andorre, ce qui est un indice d'héritage qui n'a pas été discuté par Pallàs et al (2006).

La protection ou l'enfouissement des surfaces d'érosion permetent aux radionucléides, comme  $^{10}\text{Be}$ , de se désintègrent en fonction de leurs  $T_{1/2}$  de 1,387 Ma (Chmeleff, 2010). C'est ce processus qui provoque également un minimum d'âge d'exposition calculées pour les différents radionucléides différent les uns des autres. En utilisant les équations (1) et (2) ci-dessus, les durées minimales depuis la première exposition ont été quantifiés pour le paire  $^{21}\text{Ne}$ - $^{10}\text{Be}$  avec la production actuelle (Tableau 5).

AND	$\times 10^6$ at/g		Interprétation "A" $^{21}\text{Ne}$ - $^{10}\text{Be}$ (années)		
	$^{21}\text{Ne}$	$^{10}\text{Be}$	Exposit.	Enfouisse.	Total
1	29	0,320	225.000	6.156.024	6.381.024
3	26,8	0,234	361.325	6.657.095	7.018.420
5*	61,3	0,137	1.161.507	8.743.878	9.905.385
13	29,7	1,21	660.000	7.956.232	8.616.232

Tableau 5: Pour la surface AND5 uniquement a été obtenue le  $^{21}\text{Ne}$ , ont appliqué ici le valor moyen des âges  $^{10}\text{Be}$  traduites en concentrations à partir de la production actuelle du cosmogénique dans ce lieu.

### Une vallée créée dans le Miocène

La récente connaissance morphotectonique et paléoenvironnementales des Pyrénées-Orientales et du Centrales (Fitzgerald et al. 1999, Agustí et al 2006, Calvet et Gunnell, 2008; Suc et al, 2012; Ortuño et al 2013), ont permis de connaître les valeurs du soulèvement tectonique qui varie entre 0,14 et 0,18 mm/an, données essentielles pour calculer les taux de production des isotopes cosmogéniques au moment de l'exposition. La valeur de 0,18 mm/an a été pris comme référence ici car c'est un valeur commun en Cerdagne et Prüedo (Ortuño et al. 2013), spécialement pour le calcul des productions des surfaces les plus élevées (AND 1 et AND 3). Pour la production du  $^{10}\text{Be}$  ont a utilisé la relation exposé dans Dunai (2010):

$[^{10}\text{Be}] = 3,6284 \text{ EXP}(0,9245 \text{ H})$ , ou H c'est l'hauteur en Km. Pour le  $^{21}\text{Ne}$  une relation de 4,3 fois celui du  $^{10}\text{Be}$  (Kober et al., 2010) a été pris en compte.

Pour le calcul de la production dans les surfaces d'érosion inférieures de la vallée on peut tenir compte de la paléogéographie du moment (Pérez-Vidal et al. 2001, Agustí et al., 2006; Suc et al., 2012). Ces auteurs estiment que, dans le Miocène la Cerdagne était près du niveau de la mer (fig. 8 Suc et al., 2012, option A). Ont à garde pourtant les différences de cote altitudinel entre AND 13 et AND 5 avec Can Vilella ( $\approx 1.165 - 1.175$  m). Neomains un minimum de 18,4 at/g/an pour la production du  $^{21}\text{Ne}$  (Dunai, 2010) a été tenu en compte. Avec ces critères on obtient les résultats du Tableau 6 - Fig. 2.

AND	Hauteur(Km)		Interprétation "B" $^{21}\text{Ne}$ - $^{10}\text{Be}$ (années)		
	1	2	Exposit.	Enfouisse.	Total
1	2,46	1,252	584.316	5.815.659	6.399.975
3	1,73	0,376	1.614.130	7.091.549	7.183.873
5	1,30	0,137	2.917.374	5.095.131	8.012.506
13	1,11	0,121	1.614.130	7.091.549	8.705.679

Tableau 6: La production d'isotopes cosmogéniques corrigée en fonction de l'hauteur au moment de l'exposition permet de calculer plus précisément le temps d'enfouissement (burial time, tb).

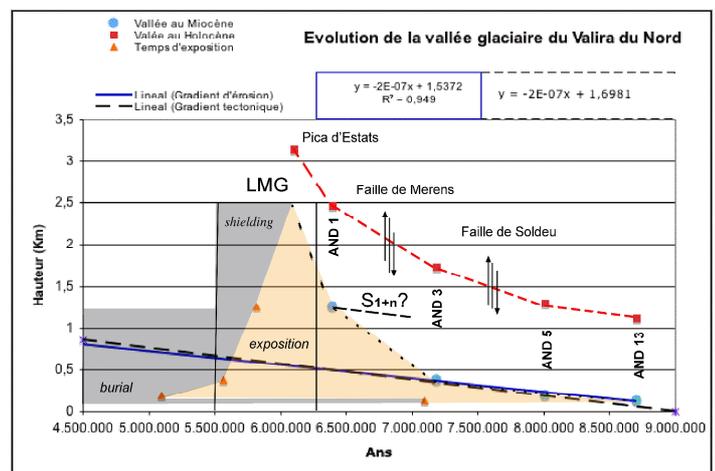


Fig. 2: Préprésentation des résultats en fonction de l'âge et hauteur de la surface d'érosion. Présent aussi l'actuel position altitudinale des surfaces. La représentation de la Pica d'Estats dans le profil est indicatrice du relief le plus haut près du échantillon AND 1. Vers 6,1 Ma le massif du Carlit se trouvait a 2.500 m d'altitude (Suc et al., 2012). LMG Last Miocene Glaciation. Shielding correspond au blindage d'exposition fait par les glaces dans le période LMG. Burial correspond au période d'enfouissement postérieur. Droite de régression de la surrection tectonique et droite de régression du taux d'érosion remontant à la vallée. Sn+1 surface d'érosion sous S1 (voir texte).

## DISCUSSION

Les résultats obtenues montrent bien que la vallée du Valira du Nord a été formé postérieurement à 10 Ma, au même moment que la surrection des surfaces d'aplanissement sommitales ait lieu (Calvet & Gunnell, 2008).

### Un profil d'équilibre liée à la tectonique

Le profil de la vallée formé (Fig. 2) dans ce moment a des notables différences par rapport au profil actuel, grand part par le jeu relatif entre les blocs séparés par les failles de Mérens et de Soldeu. (Zwart, 1979), par ailleurs toujours actives (Turu & Planas, 2005).

La formation des surfaces d'érosion dans la partie inférieure de la vallée montre être en relation avec le taux de soulèvement tectonique.

### Âge de la formation des grands cirques glaciaires

C'est indicatif que le enfouissement de la surface AND 13 (*burial*) s'initie avec le changement du taux d'érosion entre AND 3 et AND 1 (Fig. 2). On ignore pourquoi le taux d'érosion augmente, peut être par un augment du taux de surrection après 7 Ma?, associé ici a la faille de Mérens?, c'est par l'érosion remontant qui dissectione les surfaces d'aplanissement tout en cherchant le profil d'équilibre?, est ce que les cirques glaciaires sont associées à la formation de nouvelles surfaces d'érosion mineurs (Fig. 2;  $S_{1+n}$ ), comme a été soutenue par Prat (1980)?, si c'est le cas ont à là l'âge de la formation des planchers (6,4 + 0,18 / - 0,17 Ma) ou les grands cirques glaciaires de Delmas (2009) vont être inscrits; just à l'aube d'un refroidissement du climat dans la région Méditerranéenne vers les 6,26 Ma (Hodell et al. 2001).

### Un premier remplissage de la vallée d'Andorre

Néanmoins la combinaison de plus d'un des facteurs peut être aussi invoqués, mais dans tous les cas on obtient un premier remplissage de la vallée d'Andorre, qui est d'ailleurs méconnue (Turu 1999, Turu & Planas, 2005; Turu & Peña-Monné 2006ab; Turu et al. 2007), enfouissent la surface AND 13 par des sédiments d'âge Miocène.

### Une glaciation Miocène dans les Pyrénées

En dehors de l'échantillon AND 13 le reste de surfaces ont un temps d'exposition invers a leur altitude. Le blindage aux cosmogéniques des surfaces d'en haut vers le bas est celui qu'il faut espérer dans le cas de l'existence d'appareils glaciaires dans la vallée. A ce sujet il faut remarquer l'association de faune froide au Messinien observé dans les sédiments cerdans de Can Vilella (Agustí et al. 2006), mais aussi dans la faune bentonique de la Méditerranée (Hodell et al., 2001). Ces derniers auteurs signalent un refroidissement entre 6,26 Ma et 5,5 Ma, avec plusieurs oscillations climatiques (18) modulés par le cycle orbital de 41 Ka. En regardant le registre du  $^{14}\text{O}$  bentonique de la Méditerranée (Kroon et al., 1998) on remarque ici que les vestiges glaciaires les plus vastes et anciens (> 0,7 Ma; Turu & Peña, 2006b) présents a la termination de la vallée du Valira (Calvinyà), sont aussi associé a la cyclicité orbitale de 41 Ka et non a la cyclicité de 100 Ka.

### CONCLUSIONS

La principale conclusion est que au Pliocène la formation des vallées andorranes était déjà acquis. Dans la ligne de Delmas (2009) on peut dire que l'action érosive des glaciaires au Quaternaire n'est pas significative, et pour cette vallée nonplus.

**Remerciements:** Ce travail a été soutenu par des projets de recherche CGL2004-06516/BTE et BTE-CGL-2006-08996 du Ministère de l'Education et Science d'Espagne. Le travail de terrain a été financé par la société andorrane Igeotest SL1, tandis que le travail d'interprétation et la diffusion par la Fundación andorrane Marcel Chevalier.

### Références bibliographiques

Agustí, J., Oms, O., Furió, M. Pérez-Vila M<sup>a</sup>-Jesús; Roca, E. (2006) The Messinian terrestrial record in the Pyrenees: The case of Can Vilella (Cerdagne Basin).

- Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoclimatology, 238, 176-189
- Bordonau J., (1992) *Els complexos glacio-lacustres relacionats amb el darrer cicle glacial als Pirineus*. Geofoma (Ed.), Logroño (Espagne) 251 pp
- Bierman, P.R., Marsella, K.A., Patterson, C., Thompson-Davis, P. & Caffee, M. (1999) Mid-Pleistocene cosmogenic minimum-age limits for pre-Wisconsinian glacial surfaces in southwestern Minnesota and southern Baffin Island: a multiple nuclide approach, *Geomorphology* 27, 25-30
- Chmeleff, J., von Blanckenburg, F., Kossert, K. & Jakob, D. (2010) *Determination of the  $^{10}\text{Be}$  half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting*. En: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 268, 192-199
- Calvet, M. & Gunnell, Y. (2008). Planar landforms as markers of denudation chronology: an inversion of East Pyrenean tectonics based on landscape and sedimentary basin analysis. *Geological Society, London, Special Publication*, v. 296, 147-166.
- Delmas, M. (2009). *Chronologie et impact géomorphologique des glaciations quaternaires dans l'est des Pyrénées*. Thèse Laboratoire de géographie physique de la Université de Paris I, (France), 530 pp
- Delmas, M.; Calvet, M. & Gunnell, Y. (2009) Variability of Quaternary glacial erosion rates: A global perspective with special reference to the Eastern Pyrenees; *Quaternary Science Reviews*, 28, 484-498
- Delmas, M. & Turu, V. (2009) *Le glacier des Pyrénées orientales : Ariège et Andorre*. En. Livret guide de l'excursion annuelle de l'AFEQ, du 5 au 7 de Juin 2009, France-Andorre; [http://www.afeq.cnrs-belleuve.fr/excursions\\_precedentes.html](http://www.afeq.cnrs-belleuve.fr/excursions_precedentes.html)
- Dunai, T.J. (2010) *Cosmogenic Nuclides: Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences*; Cambridge University Press, (Gran Bretaña), 187 pp
- Fernández-Mosquera, D. (2002). *Geocronología de superficies graníticas mediante  $^{21}\text{Ne}$  cosmogénico en cuarzo*; Tesis Doctoral, Universidad de A Coruña (España), 261 pp.
- Fernández-Mosquera, D., Marti, K. y Vidal-Romani, J.R. (2003). Cosmogenic Ne in terrestrial quartz: How to correct the trapped component. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67/18S.
- Fitzgerald, P.G., Muñoz, J.A., Coney, P.J. & Baldwin, S.L. (1999). Asymmetric exhumation across the Pyrenean orogen: implications for the tectonic evolution of a collisional belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 173, 157-170.
- Hodell, D.A. & Curtis J.H. (2001) Correlation of late Miocene to early Pliocene sequences between the Mediterranean and North Atlantic. *Paleoceanography*, 16, 2, 164-178
- Kober, F.; Alfimov, V.; Ivy-Ochs, S.; Kubik, P.W. & Weiler, R. (2010) The cosmogenic  $^{21}\text{Ne}$  production rate in quartz evaluated on a large set of existing  $^{21}\text{Ne}$ - $^{10}\text{Be}$  data. *Earth and Planetary Science Letters*, 302, 163-171
- Kroon, D.; Alexander, I.; Little, M.; Iburens, I.J.; Matthewson, A.; Robertson, A.H.F & Sakamoto, T. (1998)  *$^{14}\text{O}$  isotope and sapropel stratigraphy in the Eastern Mediterranean during the last 3.2 million years*. En: Proceedings of the ocean drilling program, scientific results (Robertson, A.H.F; Emeis, K-C; Richter, C. y Camerlenghi, A. Eds.), vol 160, 181-189
- Lal, D. (1991). Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 104, 424-439.
- Niedermann, S. (2002). Cosmic-ray-produced noble gases in terrestrial rocks: dating tools for surface processes, *Rev. Mineral. Geochem.* 47, 731-784.
- Neretnieks, I. (2013) Some aspects of release and transport of gases in deep granitic rocks: possible implications for nuclear waste repositories. *Hydrogeology Journal*, 1701-1717
- Ortuño, M.; Martí, A.; Martin-Closas, C.; Jiménez-Moreno, G.; Martinetto, E. & Santanach, P. (2013) Palaeoenvironments of the Late Miocene Prüedo Basin:

- implications for the uplift of the Central Pyrenees. *Journal of the Geological Society*, 170, 79-92
- Pallàs, R., Rodés, A., Braucher, R., Carcaillet, J., Ortuño, M., Bordonau, J., Bourlès, D., Vilaplana, J. M., Masana, E., Santanach, P., (2006) The late Pleistocene and Holocene glaciation in the Pyrenees: a critical review and new evidence from  $^{10}\text{Be}$  exposure ages, south-central Pyrenees. *Quaternary Science Reviews* 25, 21-22, 2937-2963
- Pérez-Vila, M.J., Fauquette, S., Suc, J.P. & Bessedik, M. (2001) *Palynological contribution to estimation of Mio-Pliocene altitude of eastern Pyrenees*. In: Agustí, J. & Oms, O. (eds) Late Miocene to Early Pliocene Environments and Ecosystems. Abstracts of the 2nd European Science Foundation-EEDEN Plenary Workshop, Sabadell (Espagne) 15–17 Novembre 2001. European Science Foundation, Strasbourg, 52–54.
- Prat, M.C. (1980). *Montagnes et vallées d'Andorre, étude géomorphologique*. Thèse de III cycle, Institut de géographie de la Université de Bordeaux III, Bordeaux (France), 267 pp
- Putkonen, J. & Swanson, T. (2003). Accuracy of cosmogenic ages for moraines; *Quaternary Research*, 59, 255-261
- Suc, J-P. & Fauquette, S. (2012) The use of pollen floras as a tool to estimate palaeoaltitudes of mountains: The eastern Pyrenees in the Late Neogene, a case study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology*, 321-322, 41-54
- Turu, V. (1999) *Aplicación de diferentes técnicas geofísicas y geomecánicas para el diseño de una prospección hidrogeológica de la cubeta de Andorra, (Pirineo Oriental): Implicaciones paleohidrogeológicas en el contexto glacial andorrano*. En: Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología, (M. Olmo Alarcón & J.A. López Geta, Eds.), IGME, 203-210 ([http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2\\_TH/actu\\_tec\\_geofi/pdf/14a\\_comunicacion.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/actu_tec_geofi/pdf/14a_comunicacion.pdf))
- Turu, V. & Planas, X. (2005) *Inestabilidad de vertientes en los valles del Valira. Datos y dataciones para el establecimiento de una cronología, posibles causas*. *Andorra y Alt Urgell (Pirineos Orientales)*; IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas inestables, Valencia 21-24 de Junio. <http://www.igeotest.ad/articulos/docs/TuruiPlanas.pdf>
- Turu, V. & Peña-Monné, J.L. (2006a) *Las terrazas fluviales del sistema Segre-Valira (Andorra-La Seu d'Urgell-Organyà, Pirineos Orientales): relación con el glaciario y la tectónica activa*. En: Geomorfología y Territorio: IX Reunión Nacional de Geomorfología (A. Pérez-Alberti i López-Bedoya, J. eds.) USC, Santiago de Compostela (España), 101-112. (<http://www.igeotest.ad/articulos/docs/Turu%20Pena%20Segre-Valira%201.pdf>)
- Turu, V. & Peña-Monné, J.L. (2006b) *Ensayo de reconstrucción cuaternaria de los valles del Segre y Valira (Andorra - La Seu d'Urgell - Organyà, Pirineos Orientales): morrenas y terrazas fluviales*. En: Geomorfología y Territorio: IX Reunión Nacional de Geomorfología (A. Pérez-Alberti i López-Bedoya, J. eds.) USC, Santiago de Compostela (España), 113-129. (<http://www.igeotest.ad/articulos/docs/Turu%20Pena%20Segre-Valira%202.pdf>)
- Turu, V.; Boulton, G.S.; Ros, X.; Peña-Monné, X.; Martí-Bono, C.; Bordonau, J.; Serrano-Cañadas, E.; Sancho-Marcén, C.; Constante-Orríos, A.; Pous, J.; Gonzalez-Trueba, J.J.; Palomar, J.; Herrero, R. & Garcia-Ruiz, J.M<sup>a</sup>. (2007) Structure des grands bassins glaciaires dans le nord de la péninsule ibérique: comparaison entre les vallées d'Andorre (Pyrénées Orientales), du Gállego (Pyrénées Centrales) et du Trueba (Chaîne Cantabrique). En: *Quaternaire*, 18, (4), 309-325 (<http://quaternaire.revues.org/index1167.html>)
- Turu, V.; Vidal-Romá, J.R. & Fernández-Mosquera, D. (2011a) *Dataciones con isótopos cosmogénicos: Parte I ( $^{10}\text{Be}$ ): El "LGM" (Last Glacial Maximum) y "the Last termination" en los valles del Valira del Nord (Principado de Andorra, Pirineos Orientales)*. En: El Cuaternario en España y áreas afines, avances en 2011 (Valentí Turu & Ana Constante, Eds.), Andorra la Vella, Andorra, 19-24 ([http://www.igeotest.es/Articulos/docs/Dataciones\\_isotopos\\_cosmogonicos.pdf](http://www.igeotest.es/Articulos/docs/Dataciones_isotopos_cosmogonicos.pdf))
- Turu, V.; Vidal-Romá, J.R. & Fernández-Mosquera, D. (2011b) *Dataciones con isótopos cosmogénicos: Parte II ( $^{21}\text{Ne}$ ): Evolución del relieve andorrano en el Cuaternario y tasas de erosión (Principado de Andorra, Pirineos Orientales)*. En: El Cuaternario en España y áreas afines, avances en 2011 (Valentí Turu & Ana Constante, Eds.), Andorra la Vella, Andorra, 127-132 ([http://www.igeotest.es/Articulos/docs/Dataciones\\_isotopos\\_21Ne.pdf](http://www.igeotest.es/Articulos/docs/Dataciones_isotopos_21Ne.pdf))
- Turu, V. (2011) *El Glacialisme de les valls de la Valira del Nord: Evidències d'un enllaçament continuat fins a l'Holocè*. En: El Cuaternario en España y áreas afines, avances en 2011 (Valentí Turu & Ana Constante, Eds.), Andorra la Vella, Andorra, XXV-XXX. (<http://www.igeotest.ad/igeofundacio/Activitats/Docs/PDF/Glacialisme%20de%20les%20valls%20de%20la%20Valira%20del%20Nord.pdf>)
- Zwart, H.J. (1979) The geology of the central Pyrenees. En: *Leidse Geologische Mededelingen*, 50, 1-74