

Projet ANR-08-RISK-03-01

Prédétermination des valeurs extrêmes de pluies et de crues » (EXTRAFLO)

Programme RISKNAT 2008

Tâche IV : Approches naturalistes pour l'estimation des crues extrêmes

Rapport IV.3 « *Paléo-hydrologie dans les gorges du Gardon* »

Date : Décembre 2012

Rapport réalisé par :

⁽¹⁾ GéoSciences Montpellier

Avec la participation de :

⁽²⁾ Irstea, Centre de Lyon HHLY

Auteurs :

L. Dezileau¹, A. Latapie², B. Terrier², A. Paquier², B. Renard², M. Lang²



SOMMAIRE

1. Objectif de l'étude paléo-hydrologique	4
2. Reconstitution des crues du Gardon sur le dernier siècle : approches sédimentologiques, géochronologiques et modélisation hydraulique	5
2.1. Introduction	5
2.2. Site d'étude et hydrologie	5
2.3. Méthodes	6
2.3.1 Mise en évidence des dépôts de crue du passé	6
2.3.2 Géochronologie, géochimie et granulométrie	7
2.3.3 Modèle hydraulique (1D) et hydro-sédimentaire (2D)	9
2.4. Résultats	12
2.4.1 Débits de submersion des sites paléo	12
2.4.2 Datation des dépôts de la terrasse GE	14
2.4.3 Datation des dépôts de la cavité GG	15
2.5. Discussions	16
2.5.1 Reconstitution des évènements de crue au niveau de la terrasse GE et la cavité GG.....	16
2.5.2 Le problème des datations au ¹⁴ C	20
2.5.3 Corrélation avec les autres enregistrements paléohydrologiques de la région	21
3. Reconstitution des crues extrêmes du Gardon au cours du dernier millénaire	22
3.1 Sites d'étude	22
3.2. Résultats et discussions	24
3.2.1 La cavité GG	24
3.2.2 Les baumes 1 et 3	27
3.3.3 Lien entre l'épaisseur, la granularité des dépôts et l'intensité des crues	30
4. Synthèse	31
5. Références	33

1. Objectif de l'étude paléo-hydrologique

Cette action porte sur l'identification et l'estimation de la récurrence des crues extrêmes qui ont affecté le Gard au cours des derniers milliers d'années à partir de l'étude d'archives sédimentaires prélevées le long du lit majeur du Gardon.

En matière d'inondation, la conséquence des crues extrêmes peut être redoutable. La submersion ou la rupture d'ouvrages tels que des digues ou des barrages induit des phénomènes destructeurs dans des secteurs que l'on supposait protégés et qui peuvent être fortement urbanisés. Une étude ancienne menée aux Etats-Unis (Sheaffer et al., 1976) montrait que dans le coût moyen annuel des dégâts d'inondation du pays, les deux-tiers de la facture étaient imputables aux crues "au moins centennales". L'augmentation importante de la vulnérabilité aux inondations dans les grandes agglomérations n'a pas contribué à améliorer ce constat. Les événements extrêmes, par nature, sont rares. L'hydrologue a peu de chance de disposer localement d'une grande collection d'observations, alors que le principe de "l'analyse probabiliste des valeurs extrêmes" suppose d'étudier une (longue) série d'événements. On en déduit un "comportement probabiliste" que l'on extrapole ensuite à l'ensemble de la population des crues ou des pluies fortes. On se trouve dans la pratique confronté à deux difficultés :

- **Comment extrapoler des séries trop courtes, ne disposant le plus souvent d'informations que sur des événements plus ou moins courants (absence d'événement "extrême") ?**

- **Comment mettre à jour notre connaissance des événements extrêmes en intégrant les évolutions éventuelles liées au changement du climat ?**

C'est dans ce cadre que la partie paléo-hydrologie intervient, pour cela, nous nous intéressons aux dépôts laissés par les crues, soit directement dans le champ d'inondation, soit dans des grottes qui surplombent le lit mineur. Ces observations devraient permettre de reconstituer le niveau atteint par les plus fortes crues depuis plusieurs millénaires. Nous utiliserons des techniques d'analyse stratigraphique et de datation des dépôts (^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{14}C , géochimie des polluants, archéologie) pour évaluer l'altitude atteinte par les eaux lors des plus forts événements, et proposer une chronologie des crues. Des modélisations hydrauliques et sédimentaires sont également utilisées pour calculer la valeur de débit minimale permettant d'atteindre les coupes étudiées et pour essayer de relier l'épaisseur, la granularité et l'intensité des crues anciennes.

Sur le bassin de l'Ardèche, Sheffer et al., (2003a) ont montré que la crue de 1890, la plus forte connue sur une période historique de quatre siècles, était également la crue la plus importante enregistrée depuis plusieurs milliers d'années. Ces approches permettent d'élargir de façon considérable l'échelle chronologique d'investigation et donnent des éléments objectifs sur les crues majeures survenues sur le bassin versant. Notre travail va se concentrer principalement sur le Gardon, zone d'étude pour laquelle il existe une quantité importante de données historiques, particulièrement sur les pluies et débits des 100 dernières années.

2. Reconstitution des crues du Gardon sur le dernier siècle : approches sédimentologiques, géochronologiques et modélisation hydraulique

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, notre objectif consiste à identifier et reconstituer les crues du Gardon sur le dernier siècle à partir de l'étude d'archives sédimentaires. Pour cela, nous avons travaillé sur deux objets géomorphologiques différents: une terrasse (GE) située à 10 m de hauteur au dessus du Gardon et une cavité (GG) située à 15 m de hauteur. Le césium-137, le plomb-210 et le carbone-14 ont été utilisés pour dater les dépôts laissés par les crues. Ces sites d'étude sont en amont de la ville de Remoulins où un enregistrement annuel des hauteurs de crue existe depuis 1890. Cet enregistrement historique permet de réaliser des corrélations entre les données instrumentales et les archives sédimentaires.

2.2. Site d'étude et hydrologie

Le bassin versant des Gardons (1858 km² à Remoulins) est situé au sud est du Massif Central. Le Gardon fait 135 km de long depuis sa source au Mont Lozère (1699 m d'altitude) jusqu'à sa confluence avec le Rhône à 6 m d'altitude (Figure 1a). Au niveau géologique, les Cévennes sont caractérisées par des formations géologiques de l'ère primaire et sont principalement composées de granite, de schiste, de gneiss et de grès (Bonnifait et al., 2009). En aval, le Gardon traverse la plaine du Gard qui est caractérisée par des roches carbonatées du secondaire (Figure 1b). Dans cette zone, les formations massives du Crétacé ont forcé la rivière à créer de profonds canyons (les Gorges du Gardon). Ces formations calcaires présentent un haut degré de karstification. Plus en aval encore, les formations secondaires sont recouvertes par les sédiments fluviaux Quaternaire du Rhône.

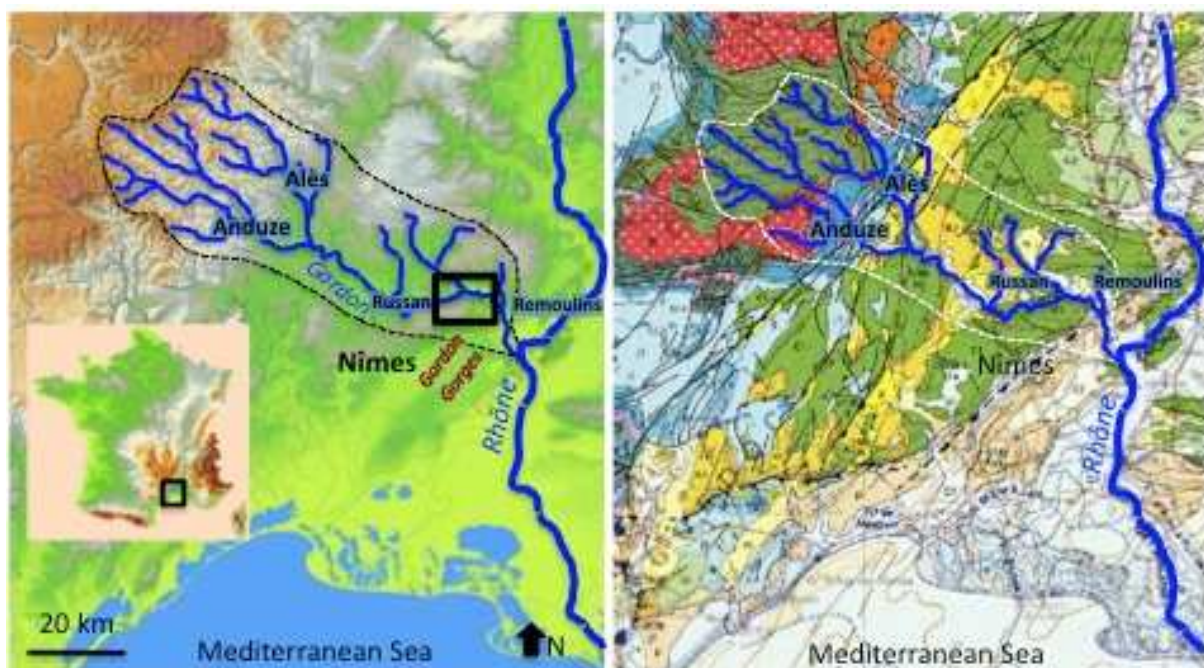


Figure 1 : (a) Topographie- hydrographie ; (b) carte géologique du Gardon

Le Gardon a un régime typiquement méditerranéen, avec un faible débit annuel moyen (33 m³/s, SAGE des Gardons, 2000), d'importantes variations saisonnières et des pointes de crue de plus de 100 fois son débit moyen. Les précipitations annuelles moyennes sont de 900 à 1100 mm sur la partie supérieure du bassin et de 500 à 700 mm sur la partie inférieure. Nuissier et al., (2008) fournissent une analyse détaillée des caractéristiques de crues éclair dans cette région. Des précipitations importantes peuvent s'accumuler sur le bassin du Gardon pendant plusieurs jours, en particulier à la fin de l'été et au début de l'automne. Ces perturbations d'origines frontales sont bloquées et renforcées par la présence des hauts reliefs du Massif Central. Lorsqu'un système méso-échelle convectif reste stationnaire pendant plusieurs heures, de fortes pluies de plus de 200 mm peuvent être enregistrées en moins d'une journée et donc conduire à des inondations dévastatrices dans cette région. De nombreuses données hydrologiques sont disponibles auprès du service de prévision des crues (SPC30) et l'autorité locale ("Smage des Gardons"). La station de mesure située à Remoulins (environ 15 km en aval des sites d'étude) fournit des mesures de hauteur depuis 1890 (Figure 2). Depuis le début des mesures, trois grandes inondations ont été enregistrées avec des hauteurs d'eau supérieures à 7 m et des débits estimés à plus de 5000 m³/s : le 16 et 17 Octobre 1907 (5300 m³/s), le 4 Octobre 1958 (6400 m³/s) et les 8 et 9 Septembre 2002 (7000 m³/s). Cette dernière crue extrême a provoqué la mort de 23 personnes et causé 1,2 milliards d'euros de dommages aux villes et villages le long du fleuve. Sept mille maisons ont été endommagées dont 100 complètement détruites, 1500 ont été submergées sous 2 m d'eau (Huet et al., 2003).

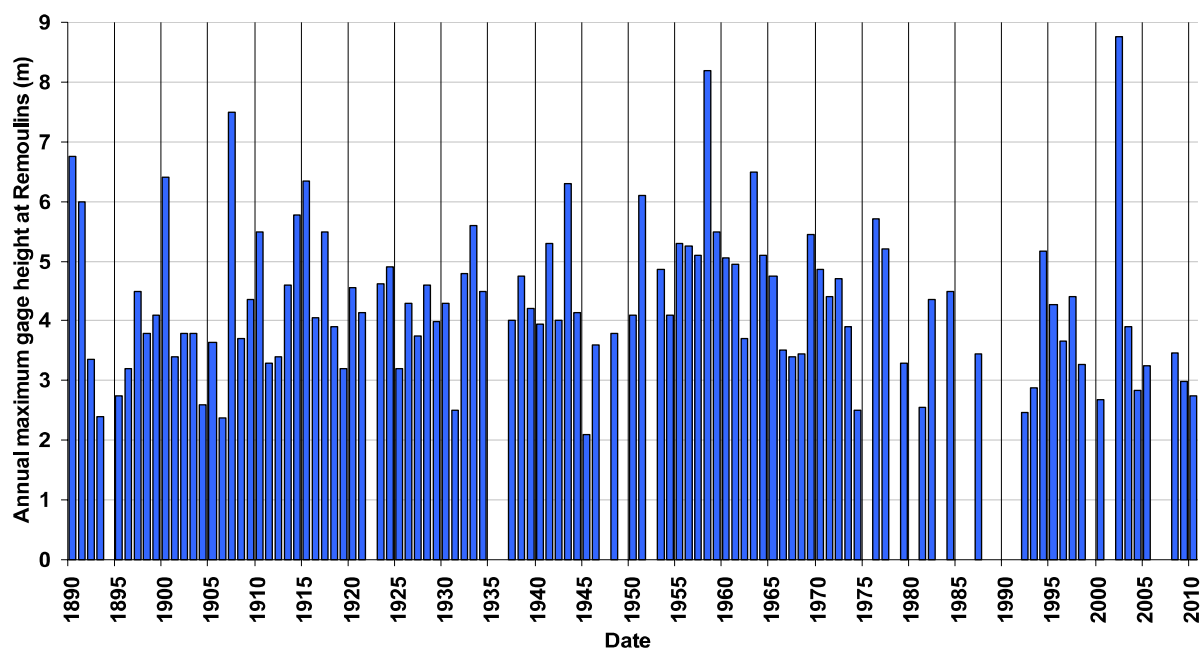


Figure 2 : Hauteurs maximales annuelles disponibles à Remoulins entre 1890 et 2010

2.3. Méthodes

2.3.1 Mise en évidence des dépôts de crue du passé

Deux coupes ont été étudiées le long du Gardon (Figure 3), elles se localisent dans la partie centrale des Gorges entre Collias et le Pont Saint Nicolas. Ces coupes proviennent d'une terrasse (GE située à 10 m de hauteur au dessus de la rivière) et d'une cavité (GG à 15 m au-dessus de la rivière). L'identification et la mise en évidence des différents paléo-événements de crue a été établie grâce à

l'inspection minutieuse de chaque dépôt sédimentaire (variabilité granulométrique, présence de paléols, détection de surfaces d'érosion, indication de bioturbation, présence de niveaux de cailloutis dans la cavité ou couches d'occupation anthropique entre différents événements d'inondation).



(a)



(b)

Figure 3: (a) Carte des sites d'étude ; (b) Terrasse GE et Cavité GG avec les coupes des archives sédimentaires correspondantes

2.3.2 Géochronologie, géochimie et granulométrie

La mise en place d'un cadre chronologique est capitale pour mettre en évidence une quelconque évolution des crues passées dans le temps. Dans le cadre de ce chapitre, le dernier siècle nous intéresse, nous utiliserons le ^{137}Cs , le ^{210}Pb et le ^{14}C . Le ^{137}Cs et le ^{210}Pb sont mesurés par spectrométrie nucléaire (spectrométrie gamma)   Géosciences Montpellier. Le ^{14}C a été mesuré au laboratoire de Mesure ^{14}C   Gif sur Yvette dans le cadre des appels d'offre ARTEMIS.

Datation par le ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,17$ ans)

Le Césium 137 est un isotope radioactif artificiel produit principalement par les essais nucléaires atmosphériques. La présence de Césium 137 dans les dépôts sédimentaires indiquera qu'ils ont été déposés récemment (maximum 50 ans). La mesure du ^{137}Cs sur le détecteur gamma CAMBERRA se fait en intégrant le pic à 661 keV. L'erreur n'excède pas 6 %.

Datation par le ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ ans)

Le Plomb 210 est un isotope radioactif naturel issu de la chaîne de désintégration de l'uranium 238. L' U^{238} , contenu naturellement dans la croûte terrestre, subit la série de désintégration suivante :

Uranium 238 → Uranium 234 → Thorium 230 → Radium 226 → Radon 222

Le ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,8$ jours) ainsi produit, se trouve sous une forme gazeuse. Lorsqu'il est produit à proximité de la surface, le gaz s'échappe dans l'atmosphère où il se transforme rapidement en Polonium 218 qui se désintègre en quelques minutes en ^{210}Pb . Ce ^{210}Pb , dit atmosphérique (ou ex excès) retombe sous forme de particules humides ou sèches et s'accumule dans les sédiments. Son activité au sein de la colonne sédimentaire diminue avec le temps selon une loi de décroissance radioactive. Le principe de la datation au ^{210}Pb s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle le flux atmosphérique en ^{210}Pb est constant, ce qui implique que l'activité de l'isotope radioactif à la surface des sédiments reste toujours identique. Cette hypothèse permet en mesurant l'activité du ^{210}Pb et en appliquant la loi de décroissance radioactive de déterminer l'âge de nos sédiments. Toutefois, dans le cadre de dépôts discontinus dans le temps comme c'est le cas pour des dépôts de crue, la détermination de l'âge n'est pas possible, la seule information que l'on peut déduire de la présence de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ est que l'âge des dépôts est inférieur à 80 ans compte tenu de sa période. La mesure du ^{210}Pb sur le détecteur gamma CAMBERRA se fait en intégrant le pic à 46,5 keV. Le $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ est estimé en soustrayant le pic du ^{210}Pb au pic du ^{226}Ra à 186,2 keV. L'erreur n'excède pas 6 %.

Datation par le ^{14}C ($T_{1/2} = 5730$ ans)

Le carbone 14 (radiocarbone) est un isotope radioactif du carbone. La datation par carbone 14 se fonde sur la présence, dans tout organisme vivant, de radiocarbone en infime proportion (de l'ordre de 10^{-12} pour le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}$ total). À partir de l'instant où un organisme meurt, les échanges avec l'extérieur cessent et la quantité de radiocarbone qu'il contient décroît au cours du temps selon la loi de désintégration des atomes de carbone 14. Un échantillon de matière organique (charbon de bois ou graine dans notre étude) peut donc être daté en mesurant le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}$ total. Les mesures de ^{14}C ont été converties en âges calendaires (Tableau 1) en utilisant le programme CALIB 6.1.0 (Stuiver and Reimer 1993).

Géochimie du Plomb et de l'Aluminium

Les concentrations en Al et en Pb ont été déterminées après digestion totale des sédiments à l'aide d'un ICP-MS, XSeries II (Thermo Fisher Scientific), équipé d'une CCT (Cell Technology Collision) au Laboratoire HydroSciences Montpellier. Des standards de sédiments marins et continentaux ont été utilisés pour vérifier l'exactitude et la précision des mesures analytiques. Les concentrations mesurées sont en accord avec les valeurs recommandées de 5% pour l'Al et de 2% pour le Pb. Pour savoir s'il y a eu un enrichissement du Pb, un facteur d'enrichissement (FE) a été calculé. Le niveau de

base du plomb correspond à la concentration du Pb dans les niveaux de crue les plus anciens. Le calcul du FE de plomb inclus sa normalisation par rapport à l'aluminium suivant l'équation: $FE_{Pb} = (Pb/Al)_{\text{échantillon}} / (Pb/Al)_{\text{base naturelle}}$.

Granulométrie

La granulométrie des dépôts de crue a été réalisée sur des échantillons tous les cm à l'aide d'un granulomètre laser Beckman-Coulter LS13320 au Laboratoire Géosciences Montpellier. Les mesures de granulométrie ont été faites sur la fraction inférieure à 1 mm.

Tableau 1 : Résultats des datations ^{14}C sur charbons et graines.

Sample	Type	Age	Calibrated Age (agreement %)	Age Model
GE113-116	charcoal	3735±35	2210-2031 BC (94%)	2210-2031 BC
GE 132-135	charcoal	1185±30	771-899 AD (92%)	771-899 AD
GE 148-152	charcoal	520±30	1324 1345 AD (10%) 1393-1443 AD (89%)	1324-1443 AD
GE 192-195	charcoal	835±30	1157-1265 AD (100%)	1157-1265 AD
GE 208-214	charcoal	900±30	1040-1110 AD (44%) 1115-1211 AD (55%)	1040-1211 AD
GE 238-243	charcoal	6540±40	5566-5466 BC (92%)	5566-5466 BC
GE 257-262	charcoal	355±35	1454-1529 AD (47%) 1540-1634 AD (53%)	1454-1634 AD
GE 267-270	charcoal	4445±35	3332-3213 BC (38%) 3132-3009 BC (51%)	3332-3009 BC
GE 275-280	charcoal	285±35	1511-1601 AD (61%) 1616-1664 AD (37%)	1511-1664 AD
GE 283-289	charcoal	220±30	1642-1683 AD (39%) 1735-1805 AD (48%)	1642-1805 AD
GE 103-107	seed	175±30	1657-1696 AD (19%) 1725-1814 AD (55%) 1917-1952* AD (20%)	1657-1952* AD
GE 122-127	seed	170±30	1660-1698 AD (18%) 1722-1817 AD (54%) 1916-1953* AD (20%)	1660-1953* AD
GE 138-142	seed	150±30	1667-1708 AD (17%) 1718-1783 AD (33%) 1796-1827 AD (12%) 1831-1889 AD (19%) 1910-1953* AD (19%)	1667-1953* AD
GE 157-161	seed	205±30	1646-1685 AD (29%) 1732-1808 AD (55%) 1928-1952* AD (16%)	1646-1952* AD
GE 188-193	seed	95±30	1683-1735 AD (28%) 1805-1930 AD (71%)	1683-1930 AD
GE 207-212	seed	125±30	1677-1766 AD (35%) 1800-1895 AD (47%) 1903-1940 AD (16%)	1677-1940 AD
GE 233-238	seed	195±30	1648-1691 AD (25%) 1729-1811 AD (57%) 1922-1952* AD (20%)	1648-1952* AD

2.3.3 Modèle hydraulique (1D) et hydro-sédimentaire (2D)

Deux modèles ont été réalisés sur le secteur des Gorges afin d'associer un débit aux cotes des dépôts identifiés par l'approche paléo-hydrologique et fournir des estimations reliant l'intensité des crues aux dépôts identifiés (épaisseur et granularité). Le modèle hydraulique unidimensionnel (Rubar3, Paquier 2012) et le modèle bidimensionnel avec transport solide (Rubar20TS) sont utilisés. Les modèles s'étendent de Russan (entrée des Gorges) à la station hydrométrique de Remoulins, soit un linéaire de 31,5 km. La géométrie des modèles est basée sur les données topographiques disponibles après 1999, fournies par le SPC30 et le Smage des Gardons ainsi que des levés spécifiques réalisés dans le cadre du projet Extraflo.

Pour la partie hydraulique, les modèles résolvent les équations de Barré de Saint-Venant. Le calage des coefficients de rugosité des modèles 1D a été réalisé sur différents événements dont le détail est

disponible dans le rapport Extraflo IV.2 sur la comparaison des résultats de l'approche hydro-géomorphologique avec la modélisation hydraulique sur le Gardon.

Pour le modèle bidimensionnel, les coefficients nécessitent d'être validés ; en effet, dans un modèle bidimensionnel, la topographie est mieux représentée, en particulier les petites variations géométriques qui sont prises en compte dans le coefficient de rugosité en 1D. De plus, le choix d'un coefficient de rugosité adéquat dans les Gorges est délicat en raison du peu de données de laisses de crues sur ce secteur. Dans un premier temps, l'influence du coefficient de rugosité sur les temps de propagation des crues a été testée. Afin de calibrer au mieux le modèle, les crues de 2002 et 2008 ont été modélisées afin de vérifier le temps de transit pour une crue extrême (crue de 2002, $Q_p = 7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ à Russan) et une crue de moindre amplitude (crue de 2008, $Q_p = 1\,400\text{ m}^3/\text{s}$ à Russan) et de vérifier la validité d'un coefficient de rugosité identique pour des débits plus ou moins forts.

Les crues de septembre 2002 et novembre 2008 sont modélisées en adoptant, dans un premier temps, un coefficient de rugosité unique égal à $30\text{ m}^{1/3}/\text{s}$ sur l'ensemble du linéaire. Les coefficients du modèle 1D sont ensuite repris. Les résultats obtenus sur la crue 2008 montrent que les variations du coefficient de rugosité ont un impact faible sur le temps de propagation d'une « petite » crue. Le décalage temporel moyen est ainsi égal à 300 s (soit 5 min). L'effet des variations du coefficient sur les hauteurs d'eau est très faible en moyenne (-1 cm) mais ces variations atteignent plusieurs mètres localement. Pour une crue de plus forte intensité (crue de 2002), l'influence des coefficients est plus marquée; ainsi les variations sur les hauteurs d'eau atteignent 90 cm et le décalage temporel moyen du pic de crue atteint 30 minutes.

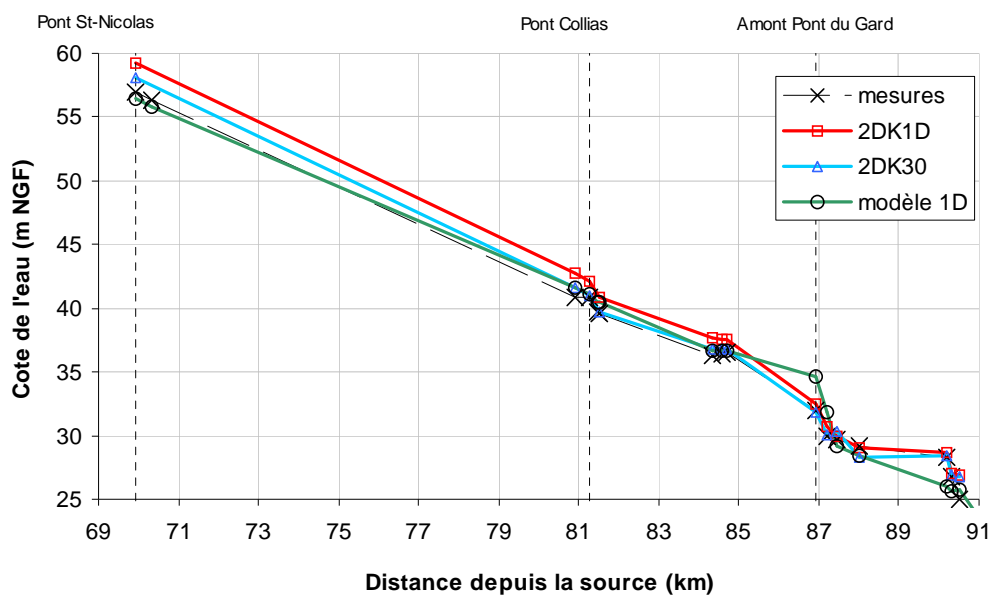


Figure 4 : Crue 2002 dans les Gorges : comparaison des modèles 1D, 2D et des laisses de crue.

Afin de sélectionner les coefficients de rugosité les plus pertinents pour les simulations suivantes, les résultats obtenus sur la crue de 2002 sont comparés aux laisses de crue et aux résultats calculés avec le modèle 1D (Figure 4). Quel que soit le coefficient de rugosité adopté, le modèle bidimensionnel surestime les niveaux d'eau au niveau du Pont-St-Nicolas (+ 1 m avec le coefficient de rugosité unique égal à 30). Sur le reste du linéaire, le modèle bidimensionnel donne des résultats plus proches des données de laisses de crue. Le modèle 2D avec les coefficients de rugosité unique semble pertinent jusqu'au Pont du Gard, plus à l'aval les résultats du modèle 2D avec les coefficients

de rugosité du modèle 1D sont plus probants. Ces valeurs de coefficients sont donc adoptées pour les autres simulations. Une fois le modèle calibré, des calculs avec transport de sédiments ont été réalisés afin de tester l'influence des paramètres sédimentaires sur les résultats. En effet, le modèle 2D permet de modéliser le transport de substances dissoutes ou de sédiments. Une équation de convection-diffusion d'une concentration est ajoutée aux équations sur l'eau. Les calculs réalisés dans le cadre de cette étude ne prennent en compte qu'une catégorie de sédiments, définie par défaut par son diamètre médian et éventuellement par son étendue granulométrique. Différentes options de calculs sont utilisables pour le calcul des termes de dépôt et d'érosion. Les tests réalisés en simulant l'hydrogramme de la crue de 2002 visent ainsi à sélectionner la formule la plus pertinente. Le modèle 2D avec transport sédimentaire nécessite la définition de conditions initiales en concentration. La formule d'Engelund (1967) est utilisée en prenant les données issues du modèle 1D pour déterminer la largeur et la vitesse moyenne.

$$C = 0.05 \rho_s \frac{LU^2}{Q} \frac{(JR)^{3/2}}{\sqrt{g(\rho_s/\rho - 1)^2 d}}$$

ρ_s : la masse volumique du sédiment (kg/m³)

ρ : la masse volumique de l'eau (kg/m³)

L : la largeur du cours d'eau (m)

U : la vitesse moyenne (m/s)

Q : le débit (m³/s)

J : la pente (m/m)

R : le rayon hydraulique (m)

g : l'accélération de la gravité (m/s²)

d : le diamètre du sédiment (m)

Le Tableau 2 détaille les paramètres de calcul adoptés dans les différents tests et fournit les dépôts calculés sur les mailles proches de la cavité. On observe ainsi que les dépôts sont quasiment nuls avec l'option c, très faibles avec l'option e et de plus en plus conséquents avec respectivement les options a, d et b. En d'autres termes, le coefficient de dépôt α a une forte influence; l'épaisseur du dépôt est ainsi multipliée par 7 lorsque le coefficient est multiplié par 10. Une augmentation de la taille des sédiments de 2,5 entraîne une augmentation de l'épaisseur du dépôt équivalente. Les tests c et e montrent qu'en doublant la concentration en entrée, on double également les dépôts mais les épaisseurs obtenues restent très inférieures aux résultats obtenus avec le test a qui est pourtant très similaire (la différence entre les deux options de calcul étant la détermination de la concentration à l'équilibre).

Tableau 2 : Détails des simulations réalisées avec le modèle hydrosédimentaire 2D

Tests	Valeurs	Épaisseur moyenne (cm)
Test a	$d_{50} = 80 \mu\text{m}$ $\alpha = 0,01$ $\tau_{cr} \rightarrow \text{Shields}$	4,24
Test b	$d_{50} = 80 \mu\text{m}$ $\alpha = 0,1$ $\tau_{cr} \rightarrow \text{Shields}$	29,04
Test c	$d_{50} = 80 \mu\text{m}$ $\alpha = 0,01$ $\tau_{cr} = 0,05$	0,064
Test d	$d_{50} = 200 \mu\text{m}$ $\alpha = 0,01$ $\tau_{cr} \rightarrow \text{Shields}$	9,81
Test e	<i>Similaire au test c et</i> $C_i \times 2$	0,13
Test f	<i>Similaire au test a et</i> $C_i \times 2$	12,4

2.4. Résultats

2.4.1 Débits de submersion des sites paléo

L'objectif de cette comparaison est d'associer un débit aux cotes des dépôts identifiés par l'approche paléo-hydrologique. Dans un premier temps une succession de régime permanent est injectée en entrée du modèle unidimensionnel afin d'extraire des simulations les relations hauteurs-débits au droit des sites. Des tests de sensibilité avec des variations de débits et des variations du coefficient de rugosité de $\pm 10\%$ sont effectués afin de fournir une enveloppe et donc une gamme de débits associée à chaque dépôt.

Les hydrogrammes de la crue de septembre 2002 fournis par le SAC 30 à Russan et à Remoulins révèlent que le pic de crue est approximativement le même en ces deux points. Ainsi, pour cet événement, le pic de l'Alzon et celui de Gardon ne coïncidaient pas. Des tests de sensibilité (avec et sans apport de l'affluent) ont permis de vérifier que l'injection du pic de crue observé à Remoulins au niveau de Russan ne détériorait pas les résultats.

La relation hauteur-débit calculée avec le modèle unidimensionnel pour la cavité GG est présentée sur la Figure 5. Les variations de débit de $\pm 10\%$ influent peu sur les résultats de hauteurs d'eau, en revanche les variations du coefficient de rugosité permettent d'obtenir une enveloppe de la courbe de tarage au droit du site. L'eau affleure le seuil du site pour un débit compris entre $4\,050 \text{ m}^3/\text{s}$ et $4\,825 \text{ m}^3/\text{s}$.

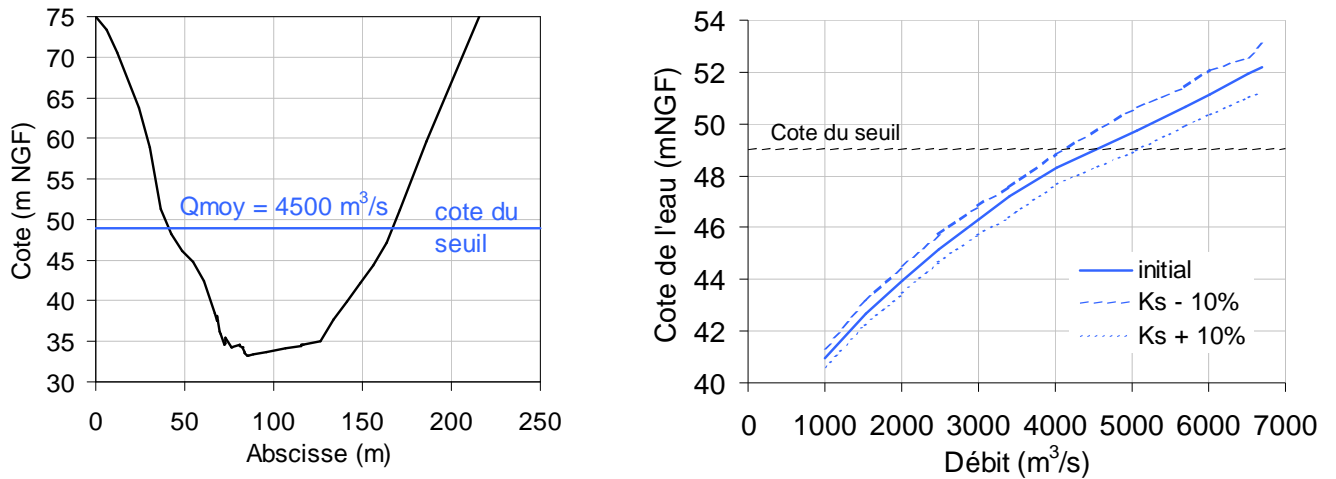


Figure 5 : Cavité GG : (a) profil en travers au droit de la cavité et (b) relation hauteur-débit calculée au droit du site

La relation hauteur-débit calculée avec le modèle unidimensionnel pour la coupe GE est présentée sur la Figure 6. Le trait en pointillé permet d'illustrer le haut du dépôt résultant de la crue de 2002, ainsi que la succession de strates identifiée par l'approche paléo-hydrologique (5 strates identifiées). Le haut de la coupe est submergé pour un intervalle de débit compris entre 1 700 m³/s et 2 100 m³/s.

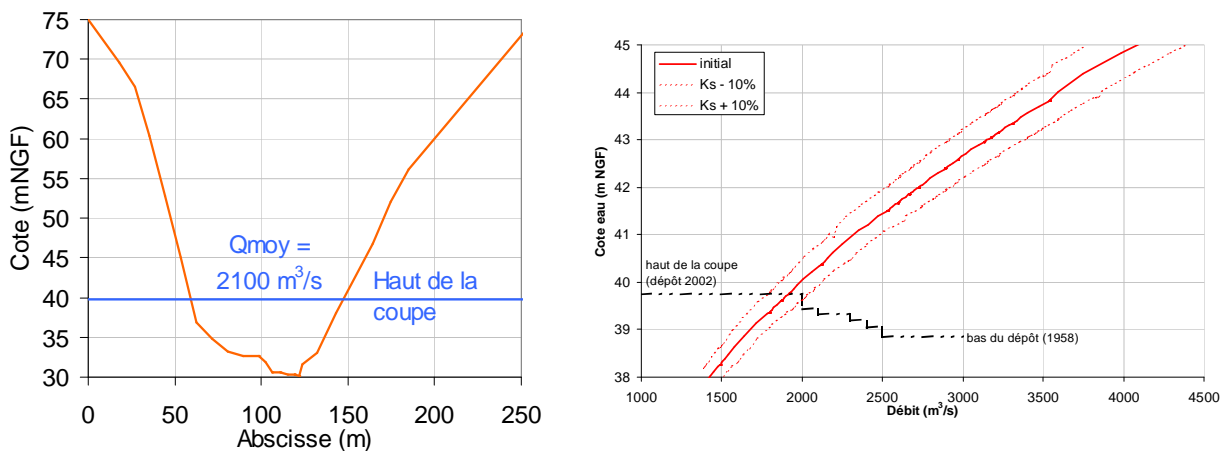


Figure 6 : Coupe GE : (a) profil en travers au droit de la cavité et (b) relation hauteur-débit au droit du site

Les gammes de débits de submersion calculées pour la cavité GG et la terrasse GE sont reportées sur la chronique de débits reconstituée à la station hydrométrique de Remoulins. L'historique des hauteurs d'eau en crue disponibles a été converti en débit avec la courbe de tarage fournie par le SAC 30 (courbe no. V1-11). Il faut souligner que cette courbe de tarage correspond aux estimations hautes de la crue de 2002 où le pic de crue est généralement estimé entre 6500 m³/s et 7200 m³/s (Sogreah, 2003). En se basant sur cette reconstitution de la chronique de débit, le nombre d'événements ayant atteint les sites depuis 1890 peut-être déterminé (Figure 7). Trois événements

semblent ainsi avoir distinctement submergés la cavité GG (1907, 1958 et 2002), et deux événements de crue semblent affleurer la cavité (1890 et 1963). Pour la terrasse GE, 21 événements sont identifiés comme ayant submergé la terrasse; de nombreux événements d'intensité plus faible (comme la crue de 1972 avec un débit d'environ 2100 m³/s à Remoulins) ont également atteint le site. Ces résultats nécessitent d'être mis en parallèle avec les datations des dépôts.

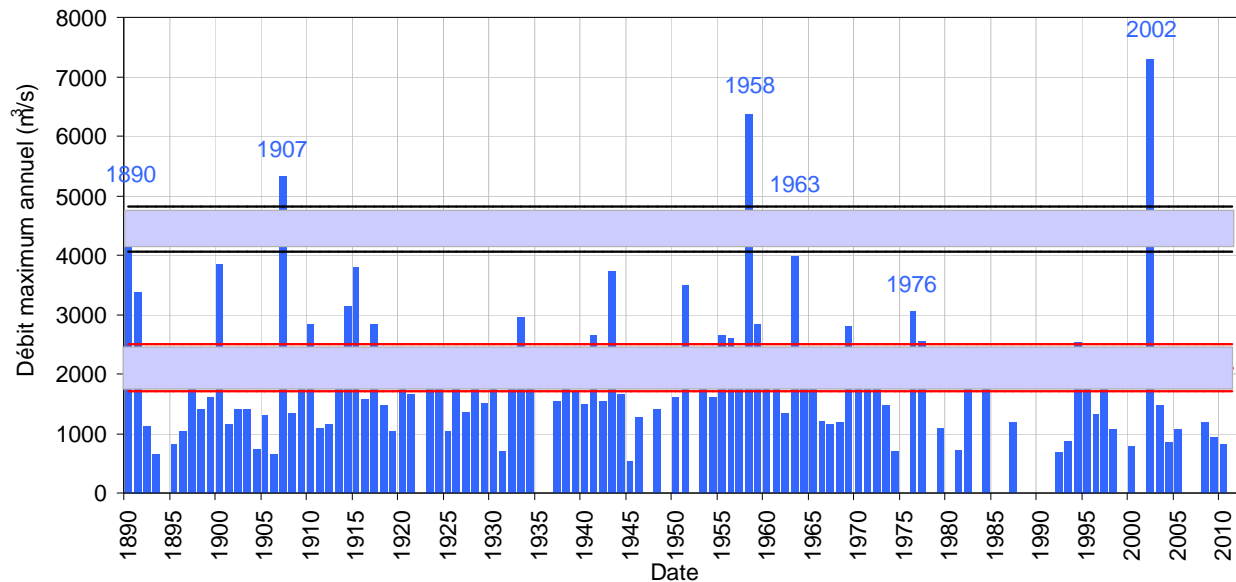


Figure 7 : Historique des débits de crue reconstitués à Remoulins et enveloppe des débits de submersion de la cavité GG (en noir) et de la terrasse GE (en rouge).

2.4.2 Datation des dépôts de la terrasse GE

Sur la terrasse GE, la stratigraphie se compose de 20 unités individuelles de dépôts de crue. La Figure 8 présente les unités de dépôts de crue identifiées, la granularité, les activités de ²¹⁰Pb_{ex}, de ¹³⁷Cs et le facteur d'enrichissement en Pb. Le césium-137 est présent dans les unités GE17, GE18, GE19 et GE20, avec des valeurs maximales de 38 et 45 mBq/g dans les unités GE17 et GE18, respectivement. L'activité en césium-137 est plus importante dans la partie supérieure des unités, caractérisée par une granulométrie plus fine. Ceci est illustré sur la Figure 8 et peut s'expliquer par une variation granulométrique dans les dépôts. Le matériel à la base des dépôts étant souvent plus grossier (sable) que la partie supérieure (silto-argileux). Cette relation entre l'activité en ¹³⁷Cs et la teneur en argile a également été observée par Ely et al. (1992) dans les dépôts de crue de la rivière Arizona aux Etats-Unis et dans la rivière Llobregat en Espagne (Thorndycraft et al., 2005). Le césium-137 se fixe principalement sur les particules fines. Le césium-137 n'est pas présent dans les dépôts plus anciens que l'unité GE17.

La première unité contenant du ²¹⁰Pb_{ex} est l'unité GE15 située à 90 cm de profondeur dans le profil stratigraphique, avec une valeur de 5 mBq/g. Le ²¹⁰Pb_{ex} est présent dans les unités GE15, GE17, GE18, GE19 et GE20, avec une valeur maximale de 58 MBq/g dans l'unité GE19. Les pics d'activité du ²¹⁰Pb_{ex}

sont également associés aux parties supérieures des unités, caractérisées par une granulométrie plus fine.

Le facteur d'enrichissement (FE) du Pb présente une variation très forte entre la base et le sommet de la terrasse, avec des valeurs comprises entre 2,5 et 50 (Figure 8). Les valeurs les plus basses (autour de 2,5) caractérisent les unités de GE1 à GE9. Le FE est plus élevé dans les unités supérieures de la terrasse avec des valeurs de 5 entre GE10 et GE17, de 9 dans l'unité GE18 et de 50 dans l'unité GE19. Le FE diminue dans la dernière unité GE20 (8).

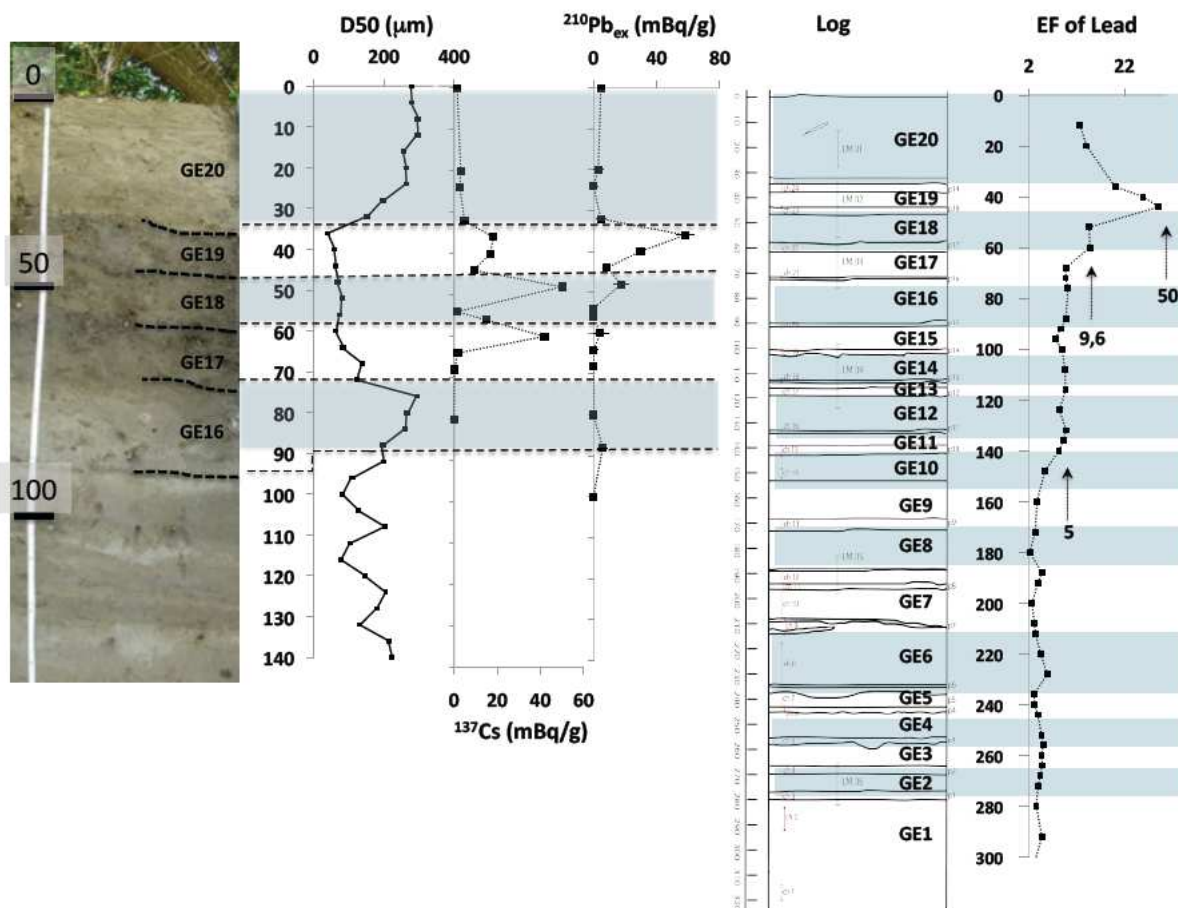


Figure 8 : Photo, stratigraphie, taille de grain (D50), césium-137, plomb-210 et facteur d'enrichissement en plomb de la terrasse GE

2.4.3 Datation des dépôts de la cavité GG

La cavité GG contient plus de 1,5 m de sédiments de dépôt de crue. Dans ce paragraphe, seuls les 35 premiers cm seront discutés, la partie inférieure sera discutée dans la partie 3. Six unités sédimentaires sont détectées sur les 35 premiers cm, dont quatre correspondant à des dépôts de crue (Figure 9). Ces dépôts se composent de sables fins et de limons, présentant des laminations diffuses, ainsi que de nombreux charbons de bois et des niveaux de cendre. La granulométrie moyenne (D50) est nettement influencée par la présence des charbons et des niveaux de cendre. Le ¹³⁷Cs est présent dans seulement deux échantillons analysés, correspondant à l'unité GG4 localisé

dans la partie supérieure de la coupe (valeur de 7 mBq/g). Le même résultat est observé pour le $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Le Plomb-210 est présent dans l'unité GG4 (environ 20 mBq/g), aucune activité n'a été mesurée dans les dépôts plus anciens.

La géochimie du profil indique que le facteur d'enrichissement (FE) du Pb varie dans une plage de 3 à 12. Les valeurs les plus basses (autour de 2,5) ont été mesurées à la base du profil au niveau de GG2. Le FE du Pb est plus élevé dans les unités supérieures avec des valeurs de 6 dans GG3 et de 12 dans GG4.

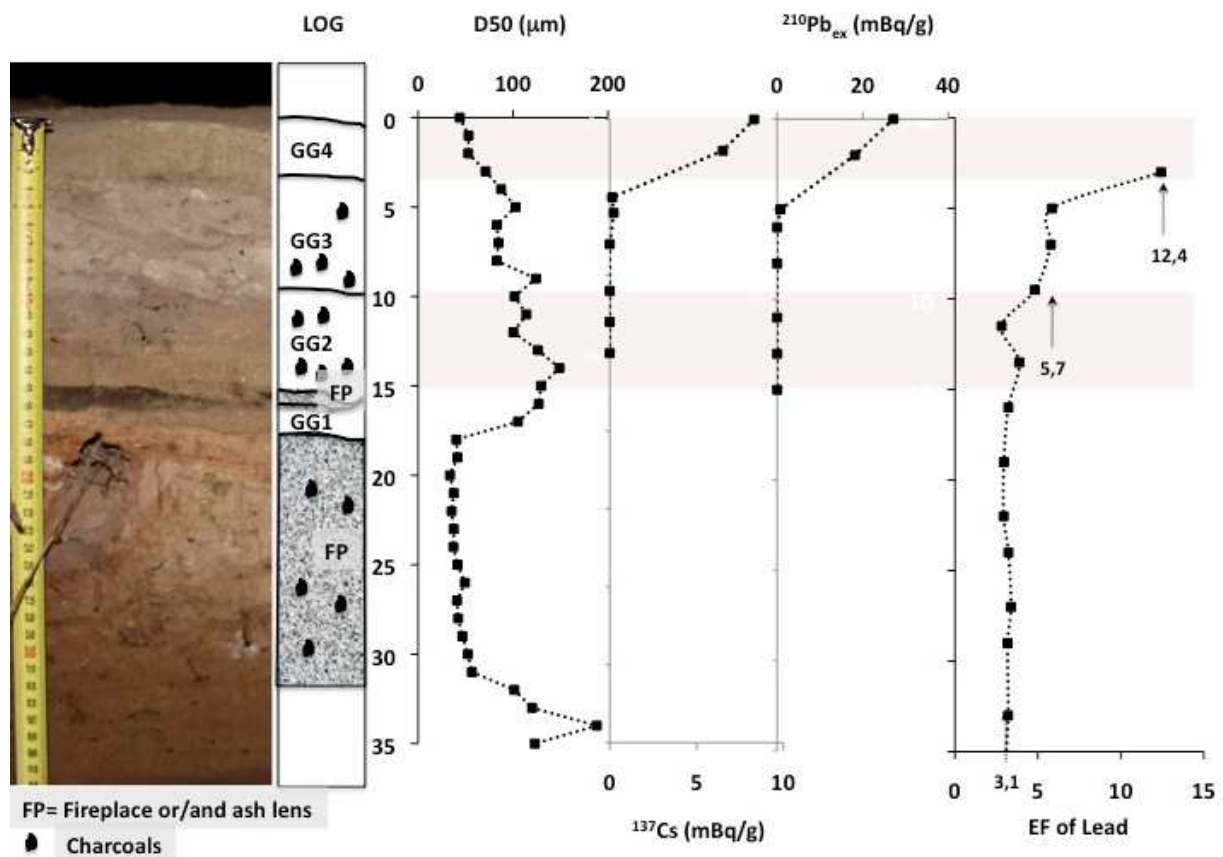


Figure 9 : Photo, stratigraphie, taille de grain (D50), césium-137, plomb-210 et facteur d'enrichissement en plomb de la coupe GG

2.5. Discussions

2.5.1 Reconstitution des évènements de crue au niveau de la terrasse GE et la cavité GG

La terrasse GE

Le ^{137}Cs est un radionucléide artificiel avec une demi-vie d'environ 30,2 années. La majeure partie de ce radioélément a été produit à la suite des essais nucléaires atmosphériques dans le milieu des années 1950-1960. L'apport en césium-137 atmosphérique est caractérisé par un premier pic en 1959 et un second pic en 1962-1964, son activité diminue très largement après. Certaines zones peuvent connaître un apport supplémentaire de césium-137 atmosphérique en 1986 après l'accident de Tchernobyl. Dans la séquence des dépôts de crue de la terrasse GE, les sédiments déposés après 1955 peuvent être identifiés grâce au ^{137}Cs (Figure 8). Le premier événement postérieur à 1955, identifié par les premières traces de ^{137}Cs , est représenté par l'unité GE17, indiquant que les 4 autres

dépôts de crue GE17-GE20 sont tous postérieurs à cette date. D'autre part, les fortes activités en césium-137 mesurées dans les unités GE17 et GE18, (38 et 45 mBq/g) peuvent être associées à la production maximale de césium-137 atmosphérique au milieu des années 1960 (autour de 1963, Figure 10).

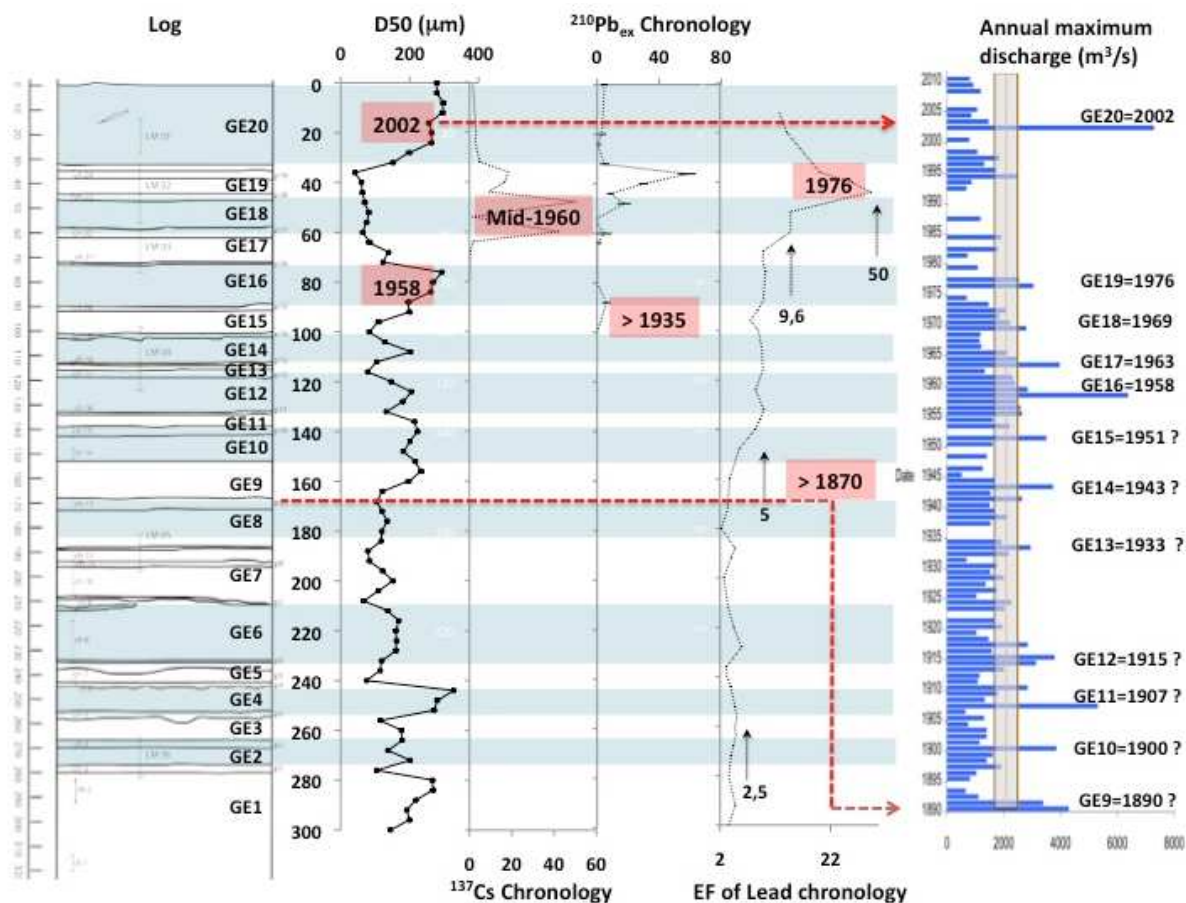


Figure 10 : Modèle d'âge pour les dépôts de crue de la terrasse GE, granulométrie (D50), activité du ^{137}Cs , activité du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, facteur d'enrichissement du plomb, historique des débits mesurés à Remoulins. L'enveloppe du débit minimum pouvant submerger le site est présentée en grisée. Chaque dépôt de crue est annoté par deux lettres (GE) et un chiffre qui suit l'ordre stratigraphique.

La demi-vie du plomb-210 est de 22,26 ans et pourrait théoriquement permettre de dater des dépôts sédimentaires sur les 110 dernières années. Cependant, dans ce type d'environnement, la méthode de datation au plomb-210 ne peut être utilisée à son optimum. En supposant que le dépôt de crue GE18 date du milieu des années 1960 et que l'on suppose un flux constant de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ sur le bassin versant, l'utilisation d'une loi de décroissance exponentielle entre GE18 (1,05 dpm/g) et GE15 (0,36 dpm/g) conduit à associer temporellement GE15 aux années 1930 (Figure 8). Cette approche très simpliste ne prend pas compte différents paramètres pouvant affecter le profil de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (tels que la variabilité granulométrique, des changements d'apport de plomb-210 du bassin versant, etc.). Toutefois, cette approche simpliste nous permet de montrer que la méthode du plomb-210 ne peut pas être utilisée pour dater des dépôts de crue supérieurs à 80 ans dans le meilleur des cas. Malgré cela, la méthode du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ peut nous permettre de confirmer un certain nombre de résultats obtenus à l'aide du ^{137}Cs . L'activité la plus élevée de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ enregistrée dans l'unité GE19 et la décroissance exponentielle de ce radioélément dans les autres dépôts de crue sous-jacents (GE18 à G15)

confirment que la stratigraphie n'est pas perturbée. De plus, la première trace de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ dans le profil est mesurée dans l'unité GE15, ce qui indique que les 6 dépôts de crue GE15-GE20 sont récents et probablement tous postérieurs aux années 1930 (Figure 10).

L'analyse géochimique de sédiments contaminés par l'exploitation minière, dans des plaines d'inondation, a été largement utilisée pour dater des dépôts de crue lorsque l'historique de l'activité minière est connue (Knox et Daniels, 2002; Thorndycraft et al, 2004). L'extraction du plomb et du zinc sur le haut bassin versant du Gardon a commencé en 1730 (Elbaz-Poulichet et al., 2006). Le nombre de concessions minières a considérablement augmenté entre 1860 et 1930. Pendant cette période, l'activité minière a généré 400 000 tonnes de déchets. Entre 1951 et 1963, les sociétés minières Pennaroya puis Metaleurop ont largement exploité le minerai produisant entre 2 300 000 et 5 000 000 de tonnes de déchets (30 000 tonnes de plomb et 3 500 tonnes de Zinc). Cette activité minière s'est arrêtée en 1993. Une des mines les plus importantes de la région est la mine de Carnoules qui a généré au total plus de 1 500 000 tonnes de déchets. La mine a officiellement fermée le 24 Octobre 1963. En Septembre 1976, le barrage d'un terril s'est brusquement ouvert suite à un épisode cévenol et 100 000 m³ d'eau contenant des résidus se sont déversés dans la rivière causant une pollution majeure du Gardon (DREAL, 2008).

À 155 cm de profondeur, on peut observer une augmentation du facteur d'enrichissement du plomb (de 2,5 à 5, Figure 8). L'augmentation de la production minière de plomb entre 1870 et 1905 pourrait expliquer cette augmentation de métaux lourds entre les unités GE9 et GE11 (Figure 8). Par conséquent, en terme de chronologie relative, l'analyse géochimique indique que les unités GE1 à GE9, sont postérieures à 1870. Le FE du plomb est plus élevé dans les unités supérieures de la terrasse, autour de 9 dans GE18 et de 50 dans GE19. L'unité présentant un FE de 9 peut être liée à la forte augmentation de la production de plomb dans le milieu des années 1960 (GE18) et l'unité présentant un très grand FE (50) peut être associé à l'évènement de pollution majeur du bassin en 1976 (GE19, Figure 10).

En plus des métaux traces, du ^{137}Cs et du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ comme traceurs chronologiques, les crues extrêmes sont également très bien visibles sur les log litho-stratigraphiques. Ces traceurs chronologiques ont été comparés aux historiques des crues disponibles depuis 1890 à la station de jaugeage de Remoulins (données du SPC30). La comparaison de ces enregistrements permet d'attribuer de manière plus fine des âges aux dépôts de crues de la séquence GE (Figure 10). L'évènement de 1958, le deuxième évènement le plus puissant enregistré par les archives instrumentales (6400 m³/s), a déposé une unité de 25 cm d'épaisseur de sables moyens (GE16: 270 μm). Les trois unités sous-jacentes, GE17, GE18 et GE19 sont bien marquées par la pollution en plomb et par le ^{137}Cs et ont été affectées à trois évènements de plus faibles ampleurs (4000, 2900 et 3000 m³/s) qui ont eu lieu en 1963, 1969 et 1976 respectivement (Figure 10). Les couches sédimentaires associées à ces crues sont caractérisées par des sables plus fins. L'évènement de 2002, le plus puissant jamais enregistré, a déposé une unité de 30 cm d'épaisseur de sables moyens (GE20). Une corrélation semble exister entre l'intensité d'un évènement et la taille granulométrique qui caractérise son dépôt. L'enregistrement sédimentaire des crues avant 1958 semble incomplet, en effet on observe moins d'unités de dépôt de crue (7 unités depuis 1890) que d'évènement ayant une ampleur suffisante pour couvrir la terrasse (Figure 10). Sur la base des résultats du modèle hydraulique, environ 14 évènements de crue auraient submergé la terrasse GE entre 1870 et 1958 (Figure 7 et Figure 10). En supposant qu'il soit nécessaire d'avoir une colonne d'eau suffisamment importante au dessus de la

terrasse pour pouvoir générer un dépôt de crue, il est possible que les événements de plus faibles amplitudes ne soient pas enregistrés dans les archives sédimentaires. Dans ce cas, en nous basant sur une relation possible entre la granulométrie des sédiments et l'ampleur d'un événement, GE15 pourrait être associé à 1951, GE14 à 1943, GE13 à 1933, GE12 à 1915, GE11 à 1907, GE10 à 1900 et GE9 à 1890 (Figure 10). Les processus d'érosion, des erreurs possibles dans les sources documentaires hydrologiques et les approximations dans le modèle pourraient également être à l'origine de cette plus faible corrélation entre enregistrement sédimentaire et enregistrement instrumental entre 1890 et 1958.

La cavité GG

Le ^{137}Cs est présent dans la partie supérieure de la coupe, il a été mesuré uniquement dans un seul échantillon correspondant à l'unité GG4 (valeur de 2 mBq/g). Le même résultat est constaté pour le $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (Figure 9). Le Plomb-210 est présent dans l'unité (valeur de 14mBq/g), aucune activité n'est mesurée dans les dépôts plus anciens. La présence de ^{137}Cs et de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ dans cette unité signifie qu'elle a un âge postérieur à 1955 (Figure 11).

À 15 cm de profondeur, on observe une augmentation du FE du plomb (le FE passe de 3 à 4). L'augmentation de la production minière de plomb entre 1870 et 1905 pourrait expliquer cette augmentation de FE entre l'unité GG1 et GG2 (Figure 11). Le FE du plomb est plus élevé dans les unités supérieures, autour de 6 dans l'unité GG3 et de 10 dans l'unité GG4. Ces FE plus élevés signifient que les unités GG3 et GG4 datent du XX^{ème} siècle (cf. l'historique de la pollution minière sur le bassin versant du Gardon dans le paragraphe précédent). Ces traceurs chronologiques ont été comparés à la chronique historique des crues disponibles depuis 1890 à la station de jaugeage de Remoulins. La comparaison de ces enregistrements permet d'attribuer de manière plus fine des âges aux dépôts de crues de la séquence GG (Figure 11). La crue de 1907, la troisième plus grande crue du relevé instrumental (estimé à 5200 m³/s), a déposé 5 cm de sable fin (GG2). L'unité suivante (GG3) est associée à la crue de 1958 (6300 m³/s) et a déposé 5 cm de sable fin. L'événement de 2002, qui est le plus important dans les relevés instrumentaux, a déposé une unité de 4 cm de sable fin (GG4). Les événements de 1961 et de 1976 n'atteignent pas la cavité GG, ce qui explique pourquoi le FE du plomb ne dépasse pas la valeur 10. Cependant, il est intéressant de noter que les valeurs de FE du plomb dans l'unité GG3 (1958) et GG4 (2002) sont les mêmes que dans les dépôts de crue de la terrasse GE16 (1958) et GE20 (2002). Cela pourrait signifier que chaque crue est caractérisée par un FE. Si cela est confirmé dans d'autres études, le FE du plomb pourrait être utilisé comme un traceur chronologique entre différentes séquences.

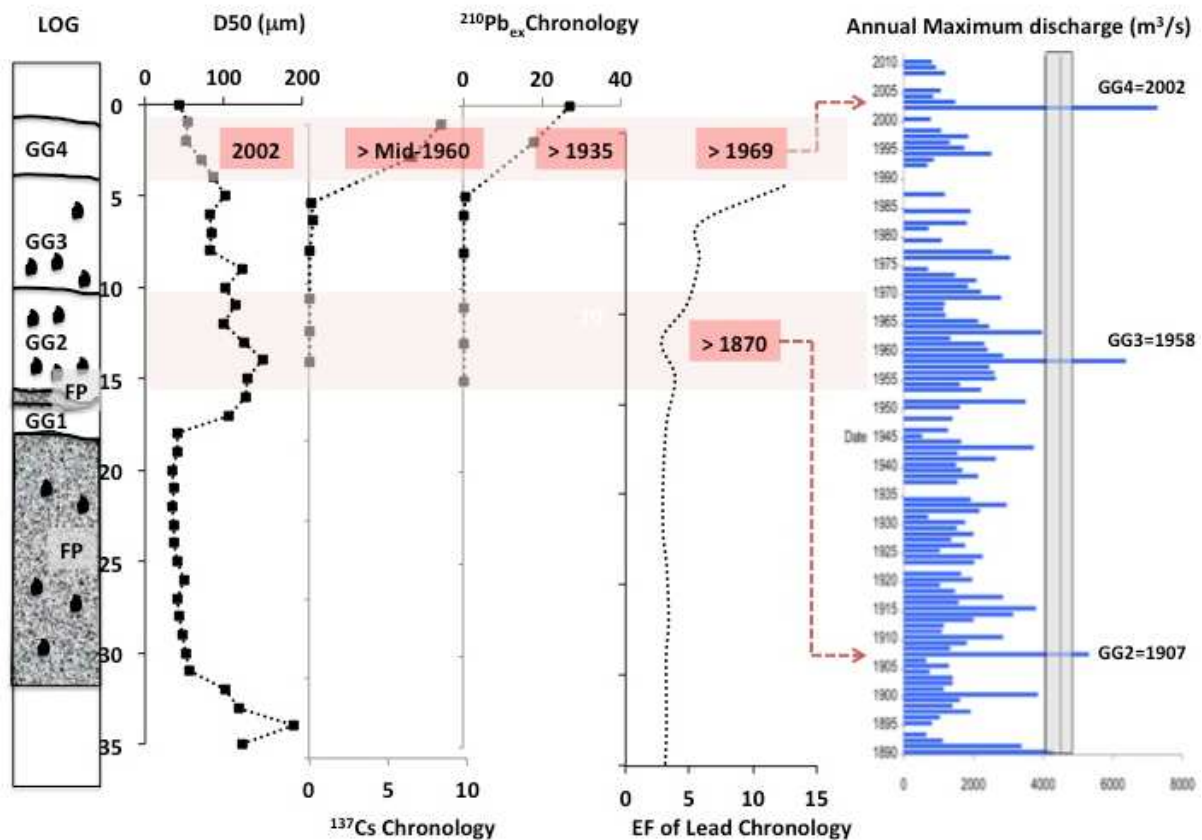


Figure 11 : Modèle d'âge pour les dépôts de crue de la cavité GG, granulométrie (D50), activité du ^{137}Cs , activité du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, facteur d'enrichissement du plomb, historique des débits mesurés à Remoulins. L'enveloppe du débit minimum pouvant submerger le site est présentée en grisée. Chaque dépôt de crue est annoté par deux lettres (GG) et un chiffre qui suit l'ordre stratigraphique.

2.5.2 Le problème des datations au ^{14}C

Une des techniques de datation la plus couramment utilisée en paléohydrologie est la datation au radiocarbone, généralement sur des charbons de bois préservés dans les sédiments. La datation au radiocarbone sur des dépôts de crue datant des deux derniers siècles n'est pas très précise (Trumbore, 2000), mais a été utilisée dans cette étude pour comparer les différentes techniques de datation.

Dans la terrasse GE, 17 datations au ^{14}C ont été réalisées sur des charbons de bois et des graines. Toutes les dates obtenues sont présentées sur la Figure 12, elle ont été corrigées du fractionnement isotopique et calibrées en année calendaire. Nous nous attendions à obtenir des âges radiocarbones jeunes sur la terrasse GE compte tenu des résultats que nous avons obtenus avec d'autres traceurs chronologiques. A l'exception des deux premières datations, l'unité GE1 (200 ans BP) et GE2 (285 ans BP), les datations au radiocarbone sont plus âgées que prévues (entre 520 et 6540 ans BP). Quarante pour cent des dates sur les charbons de bois sont trop vieilles. Une remobilisation des sédiments peut expliquer ces âges trop vieux et les inversions d'âges. Pendant les crues extrêmes, la zone inondée est considérablement augmentée et peut couvrir une partie des anciennes terrasses. Les sédiments de ces anciennes terrasses peuvent être remobilisés et se déposer de nouveau au

dessus d'une terrasse. Des charbons de bois anciens peuvent donc se retrouver dans des dépôts plus récents.

Les datations au radiocarbone sur graines semblent donner de meilleurs résultats (Figure 12). Deux raisons peuvent expliquer cette différence entre les résultats de datations sur charbons et sur graines. Tout d'abord, la graine est le produit annuel d'une plante vivante alors que le charbon est produit par la combustion incomplète d'un arbre peut-être déjà très vieux. Deuxièmement, les charbons sont des matériaux de tailles relativement grandes et résistants au pourrissement, ils sont susceptibles de rester le long des berges plus longtemps que les graines plus petites et plus facilement décomposables (Oswald et al. 2005). Sur le site GE, les graines ont une origine locale. Les graines sont essentiellement des *Polycnemum*, *Carex*, *Sambucus Ebulus* et *Medicago Wich*, présentes actuellement sur les berges du gardon dans les Gorges. Au bilan, bien que les datations sur graines donnent de meilleurs résultats que sur les charbons, la précision de cette technique est limitée en raison de la grande incertitude des dates ^{14}C sur cette période. Seule l'utilisation combinée du plomb-210, du césium-137, de l'analyse géochimique des sédiments contaminés par les mines et l'historique des crues nous ont permis de discriminer et dater les différents dépôts de crue de ce dernier siècle dans la cavité GG et la terrasse GE.

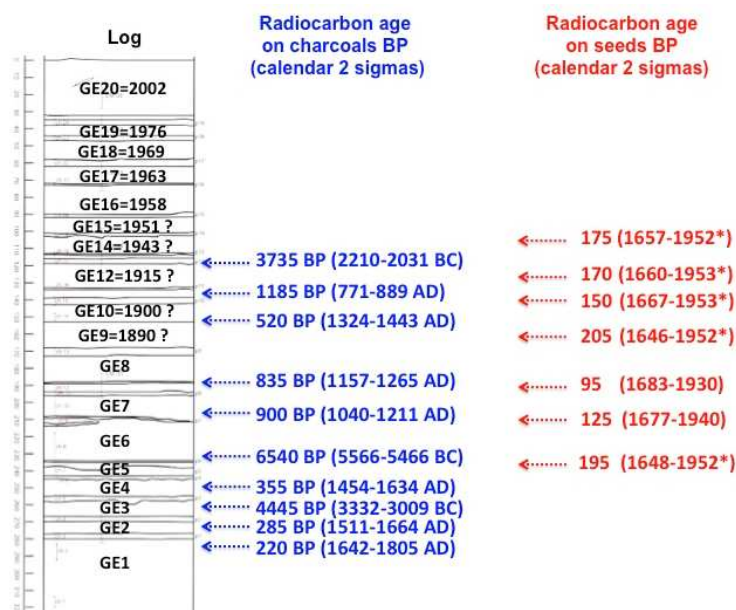


Figure 12 : Stratigraphie et modèle d'âge pour le site GE. Ages radiocarbones pour les charbons de bois (en bleu) et les graines (en rouge) en BP et âges calendaires (à 2 sigmas)

2.5.3 Corrélation avec les autres enregistrements paléohydrologiques de la région

Dans une précédente étude, Sheffer et al., (2008) décrivent une série de 10 unités de dépôts de crue identifiés dans une cavité localisée à 12 m au-dessus du lit de la rivière (Cavité GH) à 400 m en aval du site GE. La Cavité GH est située sous le niveau atteint par la crue de 2002 et enregistre potentiellement les crues qui dépassent un seuil de 2600 m³/s (Sheffer et al., 2008). D'après les auteurs, la cavité GH contient au moins 7 unités déposés au cours des 2000 dernières années ; la deuxième unité positionnée tout juste sous la surface a été datée à 260 +/- 35 BP (à 20 cm de profondeur), et la sixième et huitième unités ont été datées à 2260 +/- 40 BP et 2850 +/- 45 BP à 60 et 90 cm de profondeur respectivement. Les résultats de Sheffer et al. (2008) ont permis de mettre

en évidence un lien entre ces événements et la variabilité climatique à l'échelle régionale et de manière plus large, à l'échelle du sud de l'Europe puisque ces événements seraient associés au Petit Age Glaciaire et à une autre phase plus froide et plus humide autour de 2850 ans qui aurait touché le continent Européen . Ce lien entre événements et changement climatique passé est peut être vrai, mais nous sommes surpris de constater si peu de dépôts de crue dans la partie supérieure de cette cavité. En supposant un débit minimal de $2600 \text{ m}^3/\text{s}$, cette grotte aurait dû enregistrer au moins huit événements de crue datant du XX^{ème} siècle ! (Figure 12). Comment expliquer cette différence? Comme l'ont suggéré Sheffer et al. (2008), il est possible que la cavité GH ait souffert de processus d'érosion en raison de sa position basse. Une autre possibilité serait de suggérer que cette cavité, qui est actuellement remplie de sédiment ne peut en accumuler plus et cela depuis le Petit Âge Glaciaire. Il est également possible que les datations radiocarbone utilisées dans l'article de Sheffer et al., (2008) soient erronées et que la remobilisation des sédiments explique ces âges trop rapidement anciens dans la partie supérieure de la coupe, comme nous l'avons observé sur la terrasse GE à peu près à la même altitude et localisée à peine à 400 m en amont. Pour conclure, il est clair que les enregistrements paléohydrologiques de Sheffer et al. (2008) sont incomplets et qu'il est nécessaire de revoir et réinterpréter les conclusions paléoclimatiques de cette étude en travaillant davantage sur cette cavité et/ou sur d'autres sites. Pour cela, il est primordial de revoir de plus près l'approche géochronologique des travaux de Sheffer et al. (2008) en adoptant comme nous l'avons fait ici une approche multi-traceurs géochronologiques.

3. Reconstitution des crues extrêmes du Gardon au cours du dernier millénaire

L'objectif de cette partie est de reconstituer les crues extrêmes du Gardon sur le dernier millénaire à partir de l'étude d'archives sédimentaires. Pour cela, nous avons travaillé sur la partie inférieure des dépôts identifiés dans la cavité GG ainsi qu'à deux cavités Baume 1 et Baume 3 localisées à 19 et 21 m respectivement (Figure 13). Le césium-137, le plomb-210 ont été utilisés pour dater les dépôts laissés par les crues les plus récentes et le carbone-14 ainsi que les objets archéologiques découverts dans les dépôts pour dater les crues plus anciennes.

3.1 Sites d'étude

Comme mentionné précédemment, la cavité contient plus de 1,1 m de sédiments de dépôt de crue. dont les 35 premiers cm ont été discutés; dans ce chapitre nous discuterons de l'ensemble de la coupe. Les cavités contiennent 20 cm (Baume 1) et 10 cm (Baume 3) de dépôt sédimentaire, . Les cavités Baume 1 et 3 semblent correspondre respectivement aux sites GL et GU décrits dans l'article de Sheffer et al., (2008).

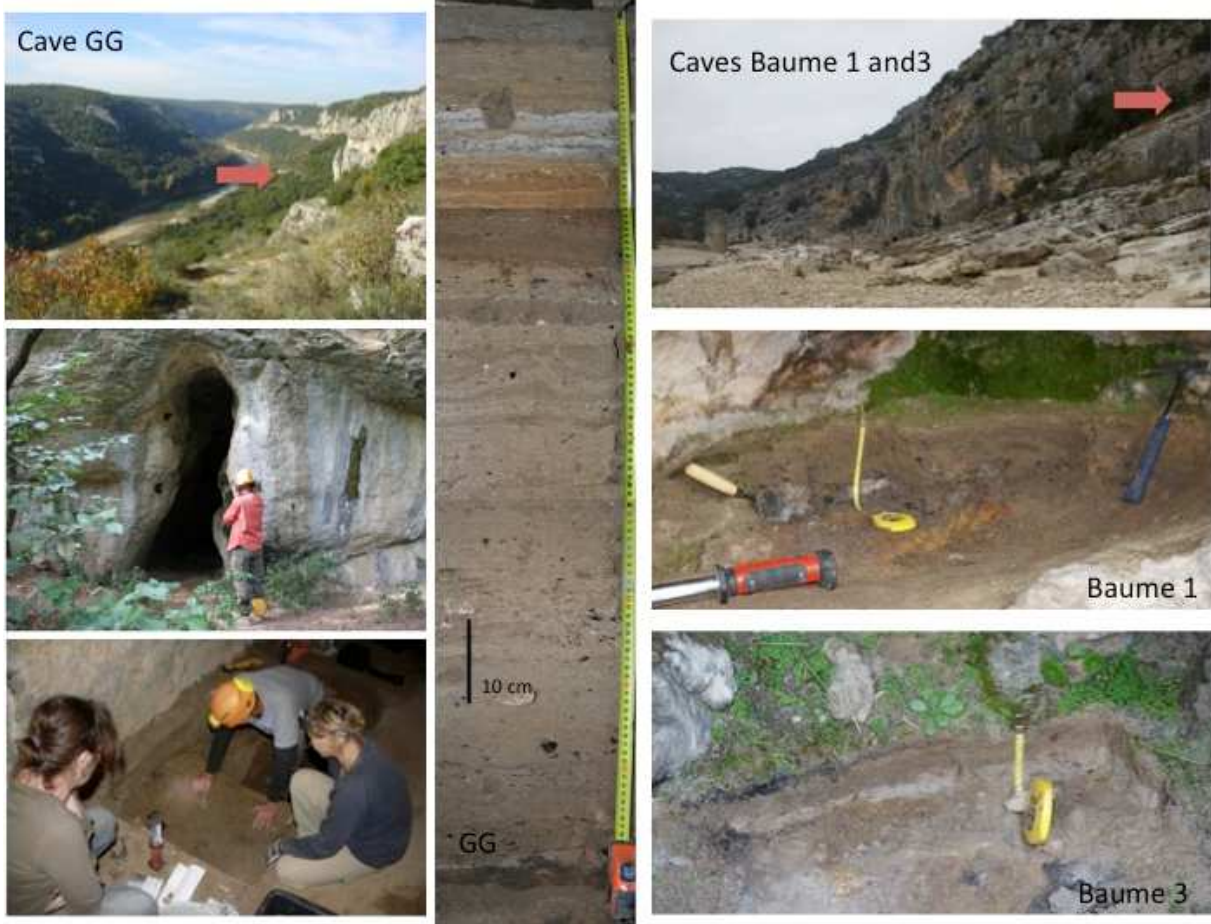


Figure 13 : (a) Carte des sites d'étude ; (b) Cavité GG, Baume 1 et 3 avec les coupes des archives sédimentaires correspondantes

3.2. Résultats et discussions

3.2.1 La cavité GG

Vingt-cinq unités sédimentaires sont détectées sur 90 cm, dont vingt-trois correspondant à des dépôts de crue (Figure 14). Ces dépôts se composent de sables à grains fins et moyens et des limons, présentant des laminations diffuses dans la partie supérieure et bien marquées dans la partie centrale de la coupe. La granulométrie moyenne (D50) est influencée par la présence des charbons et des niveaux de cendre dans la partie supérieure de la coupe mais est contrôlée principalement par les dépôts de crue dans la partie inférieure et médiane de la coupe.

Le ^{137}Cs est présent dans les trois premiers centimètres (valeur de $7 \mu\text{Bq/g}$). Le même résultat est observé pour le $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (environ $20 \mu\text{Bq/g}$). Aucune activité en ^{137}Cs et $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ n'a été mesurée dans les dépôts plus anciens (cf. Figure 11). La géochimie du profil indique que le facteur d'enrichissement (FE) du Pb varie dans une plage de 3 à 12. Les valeurs les plus basses (autour de 2,5) ont été mesurées sur la partie inférieure et médiane de la coupe. Le FE du Pb est plus élevé dans les unités supérieures à partir de 10 cm (cf. Figure 11). La fin du XIX^{ème} et le début du XX^{ème} siècle sont donc représentés dans les 10 premiers cm.

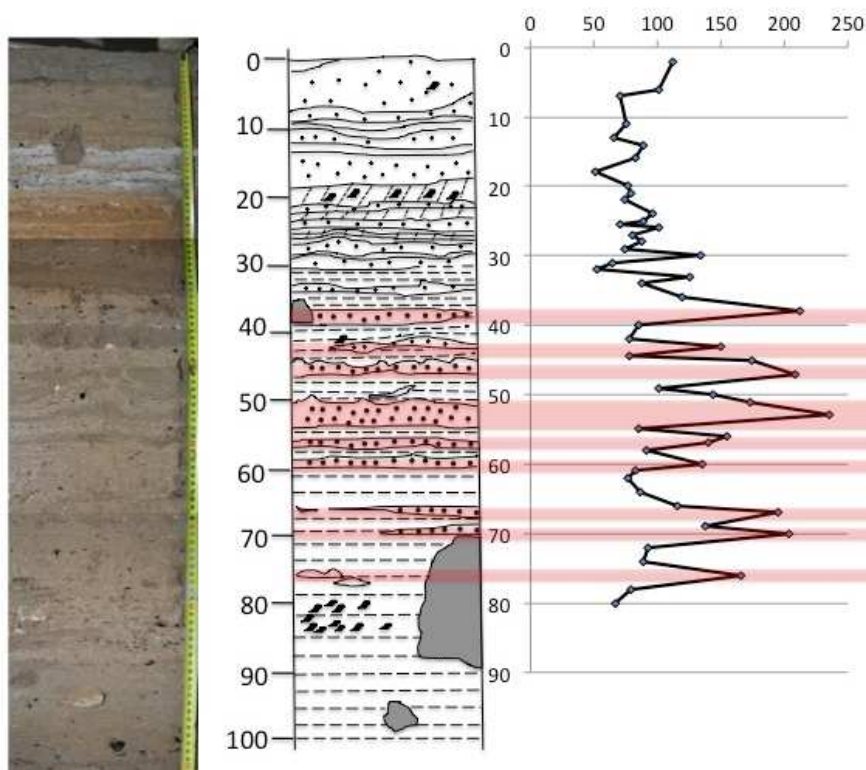
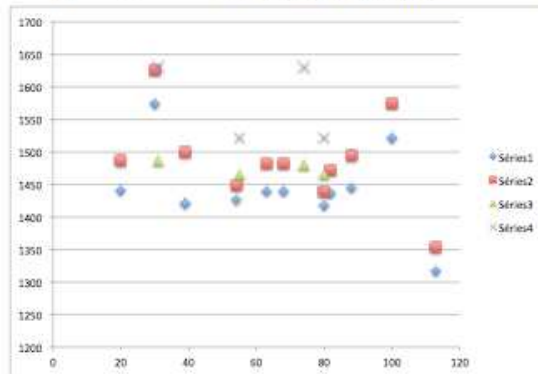


Figure 14 : Photo, log et granulométrie de la coupe GG

Au total 15 datations ^{14}C ont été réalisées sur charbons de bois. Nous avons vu précédemment la limite de l'utilisation de cet outil géochronologique. Toutefois, il permet de donner une idée sur l'âge approximatif de ces dépôts de crue (Figure 15). Il existe quelques inversions et quelques aberrations d'âge. Une sélection de différents âges ^{14}C et la découverte sur le site de différents objets archéologiques permet de mettre en place un modèle d'âge ^{14}C de la coupe GG (Figure 16).

Nom de l'échantillon	Profondeur	Ages 14C BP	erreur	Ages calendaires	Ages calendaires inf	Ages calendaires sup
GG 20	20	410	30	1441-1486	1441	1486
GG 30-32	30	355	30	1472-1522 et 1574-1626 (51%)	1574	1626
GG 39	39	430	30	1421-1499	1421	1499
GG 54	54	460	30	1427-1448	1427	1448
GG 63	63	415	30	1440-1482	1440	1482
GG 68-70	68	415	30	1440-1483	1440	1482
GG 80	80	490	30	1418-1439	1418	1439
GG 80-85	82	425	30	1437-1472	1437	1472
Bar A 87-90	88	395	30	1445-1494 et 1602-1615 (15%)	1445	1494
Bar A 100	100	295	30	1522-1574 (67%) et 1626-1648 (30%)	1522	1574
Bar A 110-115	113	580	30	1317-1353 (67%) et 1389-1407 (32%)	1317	1353
Bar B 31-32	31	345	30	1487-1524 (36%) et 1567-1604 (36%) et 1607-1631 (23%)	1487	1631
Bar B 52-57	55	360	30	1466-1522 (57%) et 1590-1625 (35%)	1466	1522
Bar B 73-75	74	350	30	1481-1523 (42%) et 1571-1630 (56%)	1481	1630
Bar B 78-81	80	360	30	1466-1522 (57%) et 1590-1625 (35%)	1466	1522

sigma calib 6.1 avec Intcal09



MODELE AGE			
Nom de l'échantillon	Profondeur	ages calendaires inf	ages calendaires sup
GG 20	20		
GG 30-32	30	1574	1626
GG 39	39		1499
GG 54	54		1448
GG 63	63	1440	1482
GG 68-70	68	1440	1482
GG 80	80		1439
GG 80-85	82	1437	1472
Bar A 87-90	88	1445	1494
Bar A 100	100		
Bar A 110-115	113	1317	1353
Bar B 31-32	31	1487	1631
Bar B 52-57	55	1466	
Bar B 73-75	74	1481	
Bar B 78-81	80	1466	

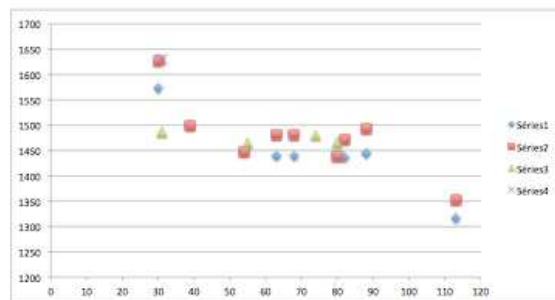


Figure 15 : Mise en place d'un modèle d'âge à partir des données ¹⁴C

Sur les 23 dépôts de crue identifiés, une dizaine d'événements peut être associée à la période XV^{ème}/XVI^{ème} siècle et une autre dizaine pour la période XVII^{ème}/XX^{ème} siècle (Figure 16 et Tableau 3). La chronologie reste encore à affiner mais nous pourrions associer 8-9 événements pour le XV^{ème} siècle, 3-4 pour le XVI^{ème}, 4-5 pour le XVII^{ème} et le XVIII^{ème}, 4-5 pour le XIX^{ème} et 2-3 pour le XX^{ème}-début du XXI^{ème} siècle. D'après les résultats de la modélisation hydraulique décrits dans le paragraphe 2.4, la période du XV^{ème} et XVI^{ème} siècle aurait connu de nombreux événements de crue présentant un débit supérieur à 4500 m³/s (valeur du débit défini avec le modèle hydraulique et permettant d'atteindre la cavité). D'autre part, si le lien entre la granulométrie (D50) et l'intensité des événements est avéré alors il semble que les crues du XV-XVI^{ème} siècle aient été les plus intenses de ces 600 dernières

années En tout cas, il semble que l'entrée dans le petit âge glaciaire, induit une augmentation d'évènements intenses dans notre région. Ces résultats rejoignent les conclusions de Thorndycraft et Benito (2006) sur des sites espagnols et suggéraient un impact large échelle des changements climatiques au XV^{ème} siècle sur l'Europe occidentale concernant les évènements de crue extrême. Cette conclusion est à confirmer par l'étude d'autres sites dans le Sud de la France.

Tableau 3 : Epaisseurs moyennes des dépôts de sédiments de crue dans la cavité GG

Unités	Siècle associé (1)	Siècle associé (2)	Remarques
U23	20	20	Certain
U22	20	20	Certain
U21	19	20	Incertain
U20	19	19	Incertain
U19	19	19	Incertain
U18	18	19	Incertain
U17	18	18	Incertain
U16	18	18	Incertain
U15	17	17	Incertain
U14	17	17	Incertain
U13	16	17	Quasi - certain
U12	16	16	Incertain
U11	16	16	Incertain
U10	16	16	Incertain
U9	15	16	Incertain
U8	15	16	Incertain
U7	15	16	Incertain
U6	15	16	Incertain
U5	15	16	Incertain
U4	15	15	Quasi - certain
U3	15	15	Quasi - certain
U2	15	15	Quasi - certain
U1	15	15	Quasi - certain
U0	15	15	Quasi - certain

(1) borne inférieure ; (2) borne supérieure

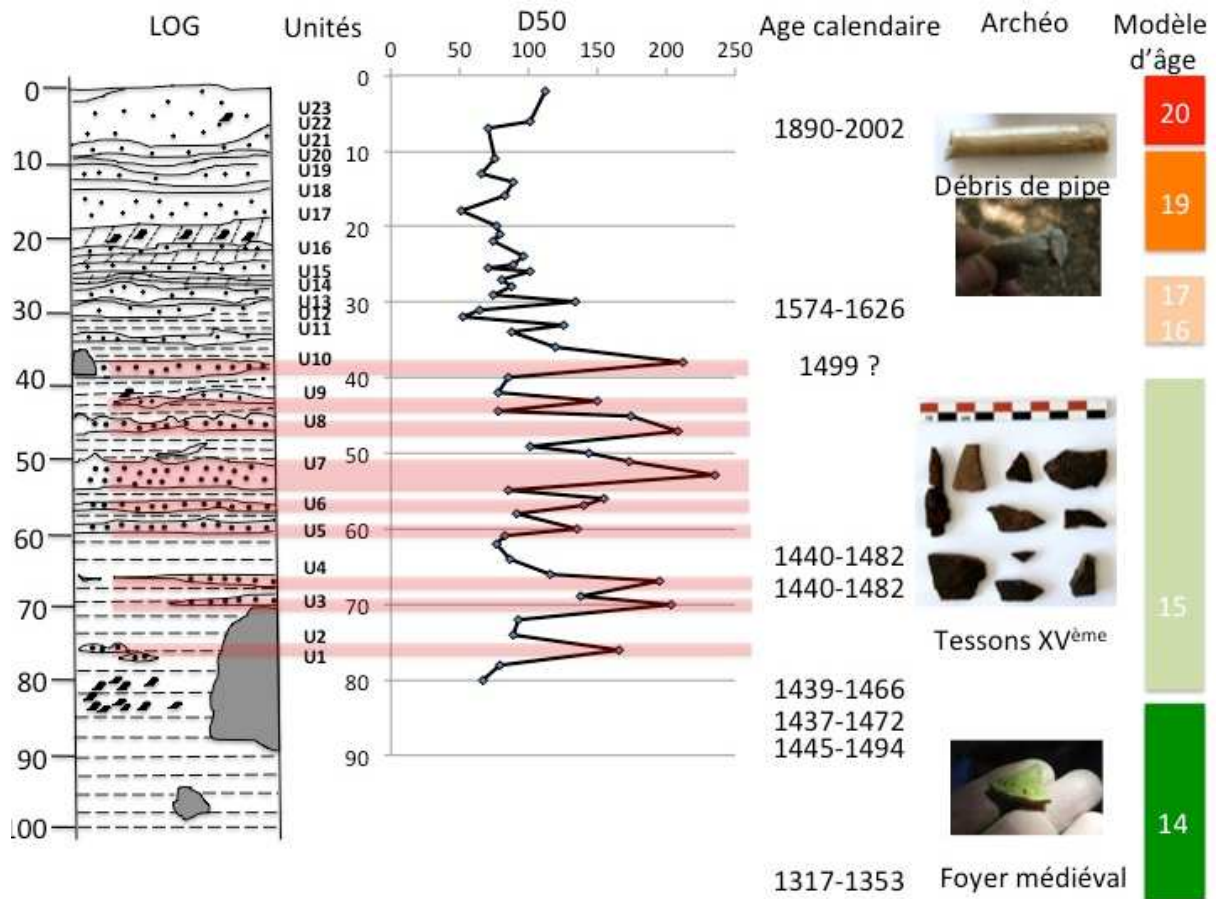


Figure 16 : Log de la coupe GG, unités de dépôts de crue, granulométrie (D50), âges 14C, objets archéologiques et modèle d'âge.

3.2.2 Les baumes 1 et 3

Baume 1

Dans la cavité Baume 1, située à 19 m au dessus du Gardon, trois unités ont été plus ou moins identifiées, chacune relativement riche en charbons de bois. La stratigraphie est peu visible et très perturbée. A la base de cette coupe de 20 cm, un foyer est présent ainsi que des dépôts de chaux. Il s'agit probablement d'un four à chaux à l'origine. Comme mentionné précédemment, la position du site Baume 1 semble correspondre au site GL et le descriptif de la coupe est similaire. Sur les 3 unités identifiées dans l'article, deux correspondraient à des dépôts de crue. D'après Sheffer et al. (2008), il faudrait un débit de 7100 m³/s pour atteindre le site. Cette valeur est supérieure au débit minimal de submersion de 6075 m³/s, calculé avec les modélisations hydrauliques effectuées pour le projet ExtraFlo (valeur moyenne de l'estimation) ; toutefois, la valeur de 6075 m³/s est comprise dans l'intervalle de débits fourni par Sheffer et al. (2008) (gamme de débits associés à GL: 5960 m³/s - 8250 m³/s) La crue de 2002 aurait affleuré la cavité (cote de seuil de la cavité 47.43 m(NGF)) d'après les résultats de la modélisation hydraulique de la présente étude avec une cote de l'eau atteignant 46,9 m(NGF) alors que la laisse de crue relevée par Scheffer est estimée à une altitude de 46,5 m(NGF). Les données de laisses de crues et altitudes fournies dans l'article de Scheffer sont difficilement exploitables ; en effet une erreur de notation sur les altitudes de la figure 7 de l'article rend la comparaison des résultats complexes.

Leurs datations ^{14}C n'ont rien donné sur ce site, ils n'ont donc aucune chronologie des dépôts. A partir des archives historiques textuelles, ils ont associés un de ces dépôts à l'événement de 1403 qui aurait atteint un débit de $8000\text{ m}^3/\text{s}$. Nous avons prélevé 6 charbons de bois pour datation. Nous connaissons la limite de cette approche géochronologique mais elle peut nous permettre d'avoir une idée de la chronologie (Figure 17).



Figure 17 : Stratigraphie et chronologie ^{14}C des dépôts sédimentaires pour le site Baume 1

Le foyer et le matériel sédimentaire juste au dessus est daté du XIX^{ème} début du XX^{ème} siècle. Ce foyer est relativement récent et correspond à une période où l'on fabriquait de la chaux dans les Gorges du Gardon. Toutes les unités sédimentaires sont déposées au dessus de ce foyer. Le matériel sédimentaire qui constitue ces unités a été déposé postérieurement à l'âge du foyer. L'incertitude sur les âges est importante mais nous pouvons constater qu'ils couvrent tous la période du XIX^{ème} siècle.

Des mesures de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ et ^{137}Cs ont été réalisées sur chacune des couches (Figure 18). La couche superficielle contient en activité suffisante ces deux radioéléments. Leur présence signifie que les dépôts sont en effet récents, appartenant au XIX^{ème} et XX^{ème} siècle. Nous avons mesuré la composition en quartz, chlorite, micas, calcite et feldspath des différentes unités. Il s'avère que contrairement aux dépôts de crue des coupes GE et GG, il existe ici dans toutes les unités de la calcite. Nous pensons donc que ces dépôts ne correspondent pas à des dépôts de crue mais plutôt à un mélange de matériel provenant de l'altération de la cavité au moment de la mise en fonction du four à chaux et de matériel provenant de l'érosion des dépôts de sol présent au dessus de la cavité, ou encore plus simplement du matériel transporté par l'homme pour éteindre le foyer.

Nous pensons que les interprétations de Sheffer et al. (2008) sur l'identification de l'événement exceptionnel de 1403 sont erronées puisque qu'aucune datation ^{14}C ne donne d'âges aussi anciens.

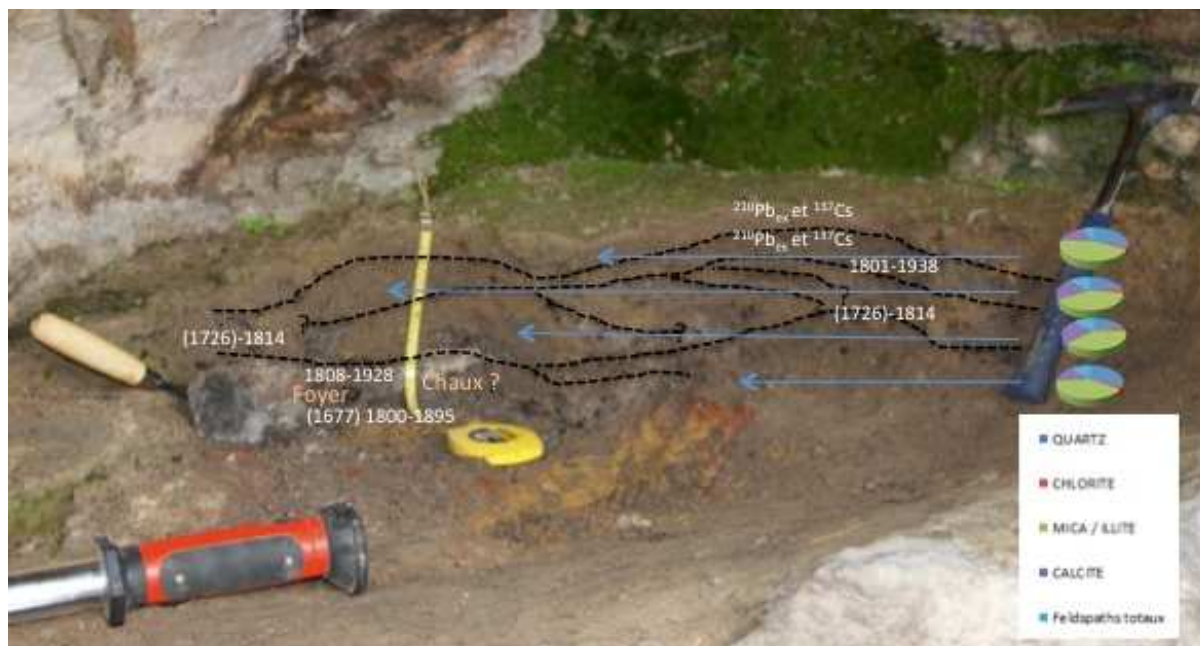


Figure 18 : Stratigraphie, chronologie ^{14}C , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ et ^{137}Cs des dépôts sédimentaires sur le site Baume
1. Résultats des mesures en quartz, chlorite, micas, calcite et feldspath par fluoX

Baume 3

La cavité Baume 3 est située à 21 m au dessus du Gardon. Cinq unités ont été plus ou moins identifiées, chacune relativement riche en charbons de bois. La stratigraphie est visible, sur les cinq unités, deux correspondent à des foyers et une à un niveau de chaux. Il reste à savoir si les deux unités restantes sont des dépôts de crue ou pas. Là encore, nous pensons que Sheffer et al. (2008) ont travaillé sur cette cavité, la position du site Baume 3 correspond à leur site GU, le descriptif de la coupe est similaire. Ils ont identifiés 4 unités dont deux correspondraient à des dépôts de crue. D'après Sheffer et al., (2008), il faudrait un débit de $8760 \text{ m}^3/\text{s}$ pour atteindre le site. Les modélisations hydrauliques effectuées pour le projet ExtraFlo ont donné un débit de submersion de $7500 \text{ m}^3/\text{s}$. Leurs datations ^{14}C n'ont rien donné sur ce site, ils n'ont donc aucune chronologie des dépôts. De la même manière que le site précédent, ils pensent que l'événement de 1403 aurait laissé une trace sur ce site. Nous avons prélevé 2 charbons de bois pour datation (Figure 19).



Figure 19 : Stratigraphie, chronologie ^{14}C , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ et ^{137}Cs des dépôts sédimentaires. Résultats des mesures en quartz, chlorite, micas, calcite et feldspath par fluoX sur la coupe Baume 3

Nos datations ^{14}C donnent des âges correspondant aux XVIII^{ème} ou XIX^{ème} siècle. Des mesures de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ et ^{137}Cs ont été réalisées sur chacune des couches (Figure 18). La couche superficielle contient en activité suffisante ces deux radioéléments, ils sont absents dans les couches les plus profondes. Nous avons mesuré la composition en quartz, chlorite, micas, calcite et feldspath des différentes unités. Toutes les unités contiennent de la calcite. Nous pensons donc que ces dépôts ne correspondent pas à des dépôts de crue mais plutôt à un mélange de matériel provenant de l'altération de la cavité au moment de la mise en fonction du four à chaux et de matériel provenant de l'érosion des dépôts de sol présent au dessus de la cavité.

Là encore, nous pensons que les interprétations de Sheffer et al. (2008) sur l'identification de l'événement exceptionnel de 1403 sont erronées puisque qu'aucune datation ^{14}C ne donne d'âges aussi anciens.

3.3.3 Lien entre l'épaisseur, la granularité des dépôts et l'intensité des crues

Les modélisations bidimensionnelles avec transport de sédiment décrites dans le paragraphe 2.3.3 permettent de relier les épaisseurs des dépôts mesurées dans la cavité GG avec l'intensité des crues mais également de définir une valeur de débit minimale permettant de diffuser une certaine granularité jusque dans la cavité. Les résultats obtenus pour les crues du dernier siècle (1907, 1958 et 2002) ainsi que pour des événements plus forts sont présentés dans le Tableau 4. Pour la crue de 2002, l'analyse des strates de la cavité révèle un dépôt de 4 cm, ce qui est très proche des résultats obtenus avec le modèle. Les résultats obtenus pour les crues de 1907 et 1958 sont satisfaisants au vu des incertitudes sur l'hydrologie, la granularité et les concentrations. Enfin, en se basant sur l'hydrogramme de la crue de 2002, une crue présentant un débit de pointe de 8 000 m³/s a été simulée en considérant différentes tailles de sédiment et plusieurs durées ; la simulation notée 2*t correspond ainsi à un hydrogramme 2 fois plus long que précédemment. On notera que plus le diamètre est élevé, plus le dépôt est faible et que la durée de la crue influe sur les dépôts.

Tableau 4 : Epaisseurs moyennes des dépôts obtenue dans la cavité GG

Événement modélisé	Diamètre adopté dans le modèle	Épaisseur moyenne du dépôt (cm)	
		calculée	mesurée
Crue de 2002	80 µm	4,2	4
Crue de 1958	100 µm	2,7	5
Crue de 1907	120 µm	3,8	5
Q = 8000 m ³ /s	200 µm	2,1	-
Q = 8000 m ³ /s	150 µm	5,1	-
Q = 8000 et 2 × t	150 µm	3,2	-

Dans un second temps, la valeur minimale de débit nécessaire pour mobiliser un grain de 80 µm et déposer 2 cm de sédiment dans la cavité a été déterminée. Un débit d'au moins 5 300 m³/s est nécessaire.

4. Synthèse

Les crues du dernier siècle

Le plomb-210, le césium-137 et de l'analyse géochimique des sédiments contaminés par les mines ont été utilisés pour reconstituer l'histoire des dépôts de crue au cours du dernier siècle. Cette approche a été combinée avec l'historique des crues du Gardon depuis 1890 pour affiner l'approche géochronologique. Au niveau de la cavité GG et de la terrasse GE, ces techniques de datation ont été appliquées avec succès et ont permis de mettre en évidence l'intérêt de cette approche multi-datation. La datation au radiocarbone n'est pas la technique la plus appropriée pour dater avec précision des dépôts de crue des derniers siècles, mais a été utilisée dans cette étude pour comparer les différentes techniques de datation. Sur la terrasse GE, 80% des dates ¹⁴C sur charbon de bois sont beaucoup trop vieilles par rapport aux résultats donnés par les autres approches chronologiques. Ces inversions d'âge ¹⁴C et ces âges si vieux sont probablement le résultat d'une remobilisation/déstocage de charbons de bois anciens. Les datations radiocarbone sur graines semblent donner de meilleurs résultats. Deux raisons peuvent expliquer cette différence entre les résultats de datations sur charbons et sur graines. Tout d'abord, la graine est le produit annuel d'une plante vivante alors que le charbon est produit par la combustion incomplète d'un arbre peut-être déjà très vieux. Deuxièmement, les charbons sont des matériaux de tailles relativement grandes et résistants au pourrissement, ils sont susceptibles de rester le long des berges plus longtemps que les graines plus petites et plus facilement décomposables. Au bilan, bien que les datations sur graines donnent de meilleurs résultats que sur les charbons, la précision de cette technique est limitée en raison de la grande incertitude des dates ¹⁴C sur cette période. Seule l'utilisation combinée du plomb-210, du césium-137, de l'analyse géochimique des sédiments contaminés par les mines et l'historique des hauteurs d'eau et de débits de crue nous ont permis de discriminer et dater les différents dépôts de crue de ce dernier siècle dans la cavité GG et la terrasse GE.

Les crues extrêmes du dernier millénaire

La reconstitution des crues extrêmes du Gardon sur le dernier millénaire est réalisée à partir de l'étude d'archives sédimentaires. de la cavité GG située à 15 m de hauteur au dessus du Gardon, de la cavité Baume 1 et Baume 3 localisées à 17 et 20 m respectivement. . D'après les résultats de la modélisation hydraulique, le site GG aurait été submergé par 2,7 m d'eau lors de la crue de 2002 ; pour le site Baume 1, la crue de 2002 aurait affleuré le site sans le submerger. Le césium-137, le plomb-210 ont été utilisés pour dater les dépôts laissés par les crues les plus récentes et le carbone-14 ainsi que les objets archéologiques découverts dans les dépôts pour dater les crues plus anciennes.

La cavité GG met en évidence vingt-cinq unités sédimentaires sur 90 cm de profondeur, dont vingt-trois correspondant à des dépôts de crue. Ces dépôts se composent de sables à grains fins et moyens

et des limons, présentant des laminations diffuses dans la partie supérieure et bien marquées dans la partie centrale de la coupe. Sur les 23 dépôts de crue identifiés, une dizaine d'événement peut être associé à la période 15^{ème}/16^{ème} siècle et une autre dizaine pour la période 17/20^{ème} siècle (Figure 16). La chronologie reste encore à affiner mais nous pourrions associer 8-9 évènements pour le 15^{ème} siècle, 3-4 pour le 16^{ème}, 4-5 pour le 17^{ème} et le 18^{ème}, 4-5 pour le 19^{ème} et 2-3 pour le 20^{ème}-début du 21^{ème} siècle. La période du 15^{ème} et 16^{ème} siècle semble plus propice aux évènements de crue de débit supérieur à 4500 m³/s. D'autre part, si le lien entre la granulométrie (D50) et l'intensité des évènements est avéré alors il semble que les crues du 15-16^{ème} siècle aient été les plus intenses de ces 600 dernières années. En tout cas, il semble que l'entrée dans le petit âge glaciaire, induit une augmentation d'évènements intenses dans notre région. Ces résultats rejoignent les conclusions de Thorndycraft et Benito (2006) sur des sites espagnols et suggéraient un impact large échelle des changements climatiques au 15^{ème} sur l'Europe occidentale concernant les évènements de crue extrême. Cette conclusion est à confirmer par l'étude d'autres sites dans le Sud de la France.

5. Références

- Bonnifait, L., Delrieu, G., Le Lay, M., Boudevillain, B., A.Masson, Belleudy, P., Gaume, E. et Saulnier, G. (2009). Hydrologic and hydraulic distributed modelling with radar rainfall input : Reconstruction of the 8-9 September 2002 catastrophic flood event in the Gard region, France. *Advances in Water Resources*, 32:1077–1089.
- Elbaz-Poulichet, F., Bruneel, O., Casiot, C., 2006. The Carnoules mine. Generation of As-rich acid mine drainage, natural attenuation processes and solutions for passive in-situ remediation. Documentation IRD, p 1-8
- Ely, L.L., Webb, R.H., Enzel, Y., 1992. Accuracy of post-bomb ^{137}Cs and ^{14}C in dating fluvial deposits. *Quaternary Research* 38, 196–204.
- Huet, P.X., Martin, J.L., Prime, P., Foin, C., Laurain, P., Cannard, 2003. Retour d'expérience des crues de septembre 2002 dans les départements du Gard, de l'Hérault, du Vaucluse, des Bouches du Rhône, de l'Ardèche et de la Drome. Rapport de l'Inspection Générale de l'Environnement. Ministre de l'Ecologie et du Développement Durable, République Française. 133 pp [<http://www.environnement.gouv.fr/infopratt/Publications/publi-ige.htm>].
- Knox, J.C., Daniels, J.M., 2002. Watershed scale and the stratigraphic record of large floods. In House, P.K., Webb, R.H., Baker, V.R., and Levish, D. R., eds. *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology*. Water Science and Application Series, Vol. 5. American Geophysical Union. pp. 237-255.
- Nuissier, O., Ducrocq V., Ricard D. , Lebeauupin C., Anquetin 658 S., 2008. A numerical study of three catastrophic precipitating events over southern France. I : Numerical framework and synoptic ingredients. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134, 111-130.
- Oswald W. W., Anderson P. M., Brown T. A., Brubaker L. B., Hu F. S., Lozhkin A. V., Tinner W., Kaltenrieder P., 2005. Effects of sample mass and macrofossil type on radiocarbon dating of arctic and boreal lake sediments. *The Holocene*, 15, 758-767.
- Paquier, A. (2012), Notice d'emploi de RubarBE et de Rubar20 (versions d'août 2012) . Rapport technique, Irstea.
- SAGE des Gardons, 2000. Annexe 1 au Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux des gardons, SAGE, pp 187
- Sheaffer, J., et al. (1976). Flood hazard mitigation through safe land use and construction practices, Sheaffer and Roland, Chicago.
- Sheffer, N.A., Enzel, Y., Benito, G., Grodek, T., Porat, N., Lang, M., Naulet, R. and Coeur, D. 2003a. Paleofloods and historical floods of the Ardeche River, France. *Water Resources Research* 39: 1376.
- Sheffer NA, Rico M, Enzel Y, Benito G and Grodek T (2008) The palaeoflood record of the Gardon River, France: A comparison with the extreme 2002 flood event. *Geomorphology* 98, 71–83.
- Stuiver M, Reimer PJ. 1993. Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program. *Radiocarbon* 35, 1, 215–30.
- Thorndycraft, V.R., Benito, G., Rico, M., Sopeña, A., Sánchez-689 Moya, Y., Casas-Planes, A., 2004. A Late Holocene Paleoflood record from slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain. *Journal Geological Society of India* 64 (4), 549–559.
- Thorndycraft, V., Benito, G., Rico, M., Sopeña, A., Sánchez-Moya, Y., Casas, A., 2005. Paleoflood hydrology of the Llobregat River, NE Spain: a 3000 year record of extreme floods. *Journal of Hydrology* 313 (1-2), 16–31.
- Thorndycraft, V. & Benito, G. 2006 Late Holocene fluvial chronology in Spain: the role of climatic variability and human impact *Catena*. 66, p. 34-41.
- Trumbore, S.E., 2000. Radiocarbon geochronology. In: Noller, J.S., Sowers, J.M., Lettis, W.R. (Eds.), *Quaternary Geochronology: Methods and Applications*. AGU, Washington, DC, pp. 41–60.