

Les différentes approches méthodologiques de reconstitution des paléo-inondations : une revue de la littérature

Different methodological approaches in paleoflood reconstruction: a literature review

D. Saint-Laurent and L. Lavoie

Volume 17, Number 1, 2004

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705524ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705524ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this document

Saint-Laurent, D. & Lavoie, L. (2004). Les différentes approches méthodologiques de reconstitution des paléo-inondations : une revue de la littérature. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 17(1), 91–115. <https://doi.org/10.7202/705524ar>

Article abstract

The last two decades of scientific research have been characterized by an increase in the number of studies on global warming and its impact on the earth's various environments (e.g., terrestrial and aquatic ecosystems, river systems). The research concerns different fields such as geomorphology, ecology, hydrology and many others. In the context of climatic change, there is growing interest in the study of past floods or paleofloods. Researchers are attempting to reconstruct the chronology of past floods, especially with respect to past or subrecent (past centuries) climatic changes. The work involves using different methodological approaches borrowed from various disciplines including geology, geomorphology and ecology. The reconstruction of ancient hydrological events such as paleofloods in fact requires that different methods and techniques be combined in order to retrace the chronology of events as precisely as possible using different biological and physical indicators. The earliest research in this field was conducted in the United States, more specifically in the southern and southwestern parts of the country, which are regions characterized by an arid and semi-arid climate. Over the last few years, however, there have been an increasing number of studies from various parts of the world. Much of this research is based on previous work but with new elements of interpretation, which are mainly related to the many fluvial environments and climatic patterns associated with floods.

A wide variety of indicators are used in the chronological reconstruction of ancient fluvial environments, whether in humid, sub-humid or desert regions. These indicators involve analyzing stratigraphic sequences and sedimentary deposits, organic matter and microfossil deposits, as well as using radiocarbon dating (^{14}C), thermoluminescence (TL), and even dendrochronology. Some research uses statistical and mathematical models to evaluate river flow rates, which are transposed and adapted to ancient flood events. In fact, most of the work pertaining to the reconstruction of the frequency and magnitude of ancient floods uses several methods and techniques to obtain the long-term chronology of flood events in relation to the specific conditions (e.g. climate, geomorphology) of a region or study area.

Many studies have analyzed slackwater deposits to reconstruct the paleoflood history of rivers (ELY and BAKER, 1985 ; JONES et al., 2001 ; KOHEL and BAKER, 1982 ; WOHL et al., 1994). These kinds of deposits are mainly composed of fine-grained sediments (silt and fine sand) from river banks that were deposited during "large floods in areas of reduced flow velocity caused by ponding, eddying, or back-flooding up tributaries" (ELY and BAKER, 1985, p. 104). These deposits were found in different fluvial environments and for many researchers serve as adequate physical and geomorphologic indicators in the reconstruction of relic floods. Also, in many studies researchers used both slackwater deposits (SWD) and paleostage indicators (PSI) for the reconstruction of ancient floods. In addition to slackwater sediments, flood debris and silt lines (paleostage indicators) are often well-preserved along the river terraces (BAKER, 1987; OSTENAA et al., 2002; WOHL et al., 1994) and facilitate the reconstruction of ancient flood events.

The main problem in reconstructing paleofloods essentially lies in finding layers of organic matter in the sedimentary sequences, which makes it difficult to date the flood events using radiocarbon methods (^{14}C). In arid or semi-arid environments, these organic layers are often rare because the prevalent climatic conditions do not favor the formation of a thick vegetation cover. However, this problem is not limited to these environments but also characterizes humid regions (YANG et al., 2000). The frequent absence of such organic matter layers in sediments is either due to an overly short vegetation cover formation period between phases of flooding or the erosion of such layers through the action of different natural phenomena (e.g. streaming, gliding, bioturbation, fluvial erosion). Other methods through which flood events can be dated include dendrochronology and thermoluminescence (TL). This last method can be used to obtain relatively precise dating of archaeological artefacts but at present is not very reliable for dating mineralogical samples (e.g. quartz or feldspath grains). The various problems involved in dating ancient floods make us aware of the importance of using as many physical and biological field indicators as possible in order to reconstruct the chronology of flood events as precisely as possible.

Les différentes approches méthodologiques de reconstitution des paléo-inondations : une revue de la littérature

Different methodological approaches in paleoflood reconstruction: a literature review

D. SAINT-LAURENT*, L. LAVOIE

Reçu le 18 février 2003, accepté le 3 octobre 2003**.

SUMMARY

The last two decades of scientific research have been characterized by an increase in the number of studies on global warming and its impact on the earth's various environments (e.g., terrestrial and aquatic ecosystems, river systems). The research concerns different fields such as geomorphology, ecology, hydrology and many others. In the context of climatic change, there is growing interest in the study of past floods or paleofloods. Researchers are attempting to reconstruct the chronology of past floods, especially with respect to past or subrecent (past centuries) climatic changes. The work involves using different methodological approaches borrowed from various disciplines including geology, geomorphology and ecology. The reconstruction of ancient hydrological events such as paleofloods in fact requires that different methods and techniques be combined in order to retrace the chronology of events as precisely as possible using different biological and physical indicators. The earliest research in this field was conducted in the United States, more specifically in the southern and southwestern parts of the country, which are regions characterized by an arid and semi-arid climate. Over the last few years, however, there have been an increasing number of studies from various parts of the world. Much of this research is based on previous work but with new elements of interpretation, which are mainly related to the many fluvial environments and climatic patterns associated with floods.

A wide variety of indicators are used in the chronological reconstruction of ancient fluvial environments, whether in humid, sub-humid or desert regions. These indicators involve analyzing stratigraphic sequences and sedimentary deposits, organic matter and macrofossil deposits, as well as using radiocarbon dating (^{14}C), thermoluminescence (TL), and even dendrochronology. Some research uses statistical and mathematical models to evaluate river flow rates, which are transposed and adapted to ancient flood events. In

Université du Québec à Trois-Rivières, Géographie, C.P. 500, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, téléphone : (819) 376-5011 (poste 3674), télécopieur : (819) 376-5179.

* Correspondance : courriel : diane_saint-laurent@uqtr.ca.

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 septembre 2004.

fact, most of the work pertaining to the reconstruction of the frequency and magnitude of ancient floods uses several methods and techniques to obtain the long-term chronology of flood events in relation to the specific conditions (e.g. climate, geomorphology) of a region or study area.

Many studies have analyzed slackwater deposits to reconstruct the paleo-flood history of rivers (ELY and BAKER, 1985 ; JONES *et al.*, 2001 ; KOCHER and BAKER, 1982 ; WOHL *et al.*, 1994). These kinds of deposits are mainly composed of fine-grained sediments (silt and fine sand) from river banks that were deposited during "large floods in areas of reduced flow velocity caused by ponding, eddying, or back-flooding up tributaries" (ELY and BAKER, 1985, p. 104). These deposits were found in different fluvial environments and for many researchers serve as adequate physical and geomorphologic indicators in the reconstruction of relic floods. Also, in many studies researchers used both slackwater deposits (SWD) and paleostage indicators (PSI) for the reconstruction of ancient floods. In addition to slackwater sediments, flood debris and silt lines (paleostage indicators) are often well-preserved along the river terraces (BAKER, 1987 ; OSTENAA *et al.*, 2002 ; WOHL *et al.*, 1994) and facilitate the reconstruction of ancient flood events.

The main problem in reconstructing paleofloods essentially lies in finding layers of organic matter in the sedimentary sequences, which makes it difficult to date the flood events using radiocarbon methods (^{14}C). In arid or semi-arid environments, these organic layers are often rare because the prevalent climatic conditions do not favor the formation of a thick vegetation cover. However, this problem is not limited to these environments but also characterizes humid regions (YANG *et al.*, 2000). The frequent absence of such organic matter layers in sediments is either due to an overly short vegetation cover formation period between phases of flooding or the erosion of such layers through the action of different natural phenomena (e.g. streaming, gliding, bioturbation, fluvial erosion). Other methods through which flood events can be dated include dendrochronology and thermoluminescence (TL). This last method can be used to obtain relatively precise dating of archaeological artefacts but at present is not very reliable for dating mineralogical samples (e.g. quartz or feldspath grains). The various problems involved in dating ancient floods make us aware of the importance of using as many physical and biological field indicators as possible in order to reconstruct the chronology of flood events as precisely as possible.

Key-words: *paleohydrology, paleofloods, climatic change, multidisciplinary approach, literature review.*

RÉSUMÉ

Les deux dernières décennies en recherche scientifique se caractérisent par la multiplication des travaux concernant le réchauffement planétaire et les conséquences appréhendées de ce phénomène dans les divers milieux du globe. Ces travaux de recherche touchent différents champs disciplinaires dont la géomorphologie, l'hydrologie, l'écologie et bien d'autres. Dans le contexte des changements climatiques, on voit apparaître un intérêt grandissant pour l'étude des inondations anciennes ou des paléo-inondations. On tente de reconstituer la chronologie des inondations du passé notamment en regard des changements climatiques anciens ou subactuels (derniers siècles). Devant l'émergence de nombreux travaux dans ce domaine de la paléohydrologie, il nous est apparu intéressant d'examiner à travers une revue de la littérature scientifique les différentes approches méthodologiques utilisées dans l'étude des paléo-inondations. On s'attarde à décrire les principales méthodes et techniques employées dans la reconstitution des anciennes inondations, en particulier pour les environnements fluviaux (rivières, fleuves). On passe en revue les différents indicateurs biophysiques utilisés, notamment

l'analyse des séquences stratigraphiques et sédimentaires, l'analyse des macrorestes, les méthodes de datation radiocarbone (^{14}C) et les techniques comme la thermoluminescence optique (TLO) et la dendrochronologie. Aussi, on présente les principaux modèles mathématiques utilisés dans la reconstitution des paléo-inondations, lesquels servent notamment à évaluer les variations niveaux/débits et la fréquence des inondations anciennes.

Mots clés : *paléohydrologie, paléo-inondations, changement climatique, approche multidisciplinaire, revue de la littérature.*

1 – INTRODUCTION

Plusieurs recherches réalisées au cours des deux dernières décennies se sont intéressées aux impacts du réchauffement climatique sur la modification des différents écosystèmes et milieux (terrestres, aquatiques, fluviaux, etc.). La multiplication des travaux scientifiques dans ce domaine s'explique d'une part par la nécessité de mieux comprendre les phénomènes associés aux changements climatiques, lesquels touchent l'ensemble du système planétaire, et d'autre part, par le besoin de mettre en commun des bases de données exhaustives pouvant mener à l'application des modèles climatiques explicatifs à ces changements globaux. Il faut souligner, par ailleurs, les efforts consentis par plusieurs gouvernements et pays pour contribuer au financement et à la mise sur pied de réseaux nationaux et internationaux de chercheurs travaillant dans ce domaine.

Parmi les travaux scientifiques concernés par la problématique des changements climatiques, on compte un certain nombre de recherches qui touchent plus spécifiquement au domaine de l'hydrologie et de la paléohydrologie. Ces travaux cherchent notamment à établir des liens entre les changements climatiques et les variations des régimes fluviaux. Certaines recherches s'intéressent par exemple aux impacts du réchauffement planétaire sur le phénomène des inondations dans les dernières décennies et à la modification des systèmes hydrologiques en regard des changements climatiques (GALE *et al.*, 1990 ; KNOX, 1993 ; MORIN et SLIVITZSKY, 1992 ; NEWSON et LEWIN, 1991 ; PANAGOULIA-DIONYSIAL et DIMOU, 1997 ; RIND *et al.*, 1992 ; WELLS, 1990). Toutefois, il ressort que les échelles chronologiques utilisées sont souvent trop courtes pour évaluer correctement les impacts des changements climatiques sur les phénomènes hydrologiques (ALILA et MTIRAOUI, 2002 ; BROWN *et al.*, 2000 ; SMITH, 1992 ; STEDINGER et COHN, 1986). D'autre part, il devient difficile d'évaluer la part induite par les changements climatiques eux-mêmes et celle liée aux modifications anthropiques, en particulier depuis les derniers siècles et même davantage si l'on tient compte des modifications survenues (canalisation, dérivation, endiguement, déboisement des rives, etc.) sur plusieurs rivières et fleuves d'Europe par exemple, et qui remontent dans certains cas au-delà de plusieurs dizaines de siècles (MACKLIN et LEWIN, 2003 ; MORHANGE *et al.*, 1996 ; NEWSON et LEWIN, 1991 ; POESEN et HOOKE, 1997). Ces modifications anthropiques ont eu bien entendu une incidence importante sur le comportement hydrologique des cours d'eau affectés par ces activités

humaines. Outre ces facteurs anthropiques (déboisement, endiguement, etc.) qui modifient les conditions d'écoulement du bassin versant et des cours d'eau qui le composent, il faut également tenir compte des modifications liées à des processus naturels (sédimentation, érosion des rives, etc.) qui modifient progressivement les cours d'eau et leur régime hydrologique (GODARD, 1995).

Pour mieux évaluer justement les impacts des changements climatiques et leurs incidences sur les régimes fluviaux, plusieurs chercheurs ont tenté de reconstituer des échelles chronologiques beaucoup plus longues, soit l'échelle du millénaire (BAKER *et al.*, 1993 ; BROWN *et al.*, 2000 ; ELY *et al.*, 1993 ; ENZEL, 1992 ; GREENBAUM *et al.*, 2000 ; GROSSMAN, 2001 ; KNOX, 1985 ; MACKLIN *et al.*, 2003 ; SMITH, 1992). Ainsi, depuis quelques années, on voit apparaître un intérêt grandissant pour les études paléohydrologiques, notamment dans le domaine de la reconstitution des inondations anciennes ou des paléo-inondations (SAINT-LAURENT, 2003). Ces travaux cherchent en effet à mieux comprendre le contexte climatique et géomorphologique dans lesquels ces événements s'insèrent et ainsi à mieux comprendre l'incidence de tels événements en regard des changements des conditions climatiques actuelles et anciennes.

Devant la multiplication de ces travaux concernant l'étude des paléo-inondations, il nous est apparu intéressant d'examiner cette littérature scientifique, notamment en regard des approches méthodologiques utilisées pour reconstruire la chronologie de ces événements hydrologiques du passé. Par ailleurs, ces travaux ouvrent une perspective nouvelle aux études hydrologiques, mettant de l'avant des approches pluridisciplinaires qui permettent de comprendre les phénomènes dans leur globalité et sur une échelle plus longue.

2 – LES ÉTUDES PORTANT SUR LES PALÉO-INONDATIONS

Les études consacrées à la paléohydrologie et plus spécifiquement aux paléo-inondations sont relativement récentes, soit une vingtaine d'années (STARKEL, 1996). Il faut dire, toutefois, que les toutes premières études intéressées à comprendre le contexte des environnements fluviaux reliques remontent au début du 19^e siècle avec les travaux du naturaliste suisse L. AGASSIZ (1838), lesquels travaux auraient eu une importante influence sur les travaux américains de l'époque, dont ceux de J.D. DANA (1882) dans les Appalaches (É.-U.), et plus tard, ceux de J.H. BRETZ (1923) dans la région de la rivière Columbia (Washington) (voir COSTA, 1987, p. 49 ; PATTON, 1987). Les chercheurs tentaient de comprendre la mise en place des séquences stratigraphiques dont certaines étaient associées à des événements d'inondations majeures. Si ces travaux ont ouvert des perspectives nouvelles dans la recherche paléohydrologique, il faut dire cependant que les efforts soutenus de recherche dans l'étude des inondations anciennes sont très récents et couvrent essentiellement les deux dernières décennies. À cet égard, il faut mentionner les travaux pionniers de KOCHER et BAKER (1982) et de KNOX (1985) pour leur contribution au développement des méthodes d'analyse des paléo-inondations, notamment pour

l'identification de paramètres sédimentologiques permettant de caractériser les dépôts associés aux inondations anciennes.

Bien que le nombre de travaux américains domine dans ce domaine de la paléohydrologie, on constate que les dernières années sont marquées par la multiplication de travaux provenant de différentes régions du monde, notamment d'Australie, d'Afrique et d'Europe (AGASSE, 2003 ; ARNAUD-FASSETTA, 2002 ; BENITO *et al.*, 1998, 2003 ; BRUNETON *et al.*, 2002 ; HEINE et HEINE, 2002 ; HOUSE *et al.*, 2002a et 2002b ; JOHNSON et WARBURTON, 2002 ; JONES *et al.*, 2001 ; MACKLIN *et al.*, 1992 ; PICKUP *et al.*, 1988 ; WERRITTY *et al.*, 2003 ; YANG *et al.*, 2000 ; ZAWADA et HATTINGH, 1994). Ces travaux de recherche s'intéressent notamment à l'analyse des paléo-inondations en regard des changements climatiques des derniers millénaires (~10 000 ans), ou encore à l'analyse chronologique des inondations en utilisant différents indicateurs géomorphologiques et biologiques. Dans bien des cas, ces recherches s'appuient sur des approches menant à l'utilisation de méthodes et techniques variées, lesquelles sont généralement associées aux études paléoenvironnementales (paléoécologie, paléoclimatologie, paléosols, stratigraphie, etc.). Ceci permet de combiner différents indicateurs biophysiques qui fournissent un cadre d'analyse nécessaire pour reconstituer des événements hydrologiques anciens dans des environnements changeants.

3 – DIVERSITÉ DES ENVIRONNEMENTS FLUVIAUX

La majorité des travaux consacrés à l'étude des paléo-inondations a été réalisée dans des environnements caractérisés par des régimes fluviaux de climats arides ou semi-arides, telles que les régions du Sud ou du Sud-Ouest américain (BAKER, 2000 ; CHATTERS et HOOVER, 1994 ; ELY, 1997 ; EKY *et al.*, 1993 ; ENZEL *et al.*, 1993 ; GRIMM *et al.*, 1995 ; HOUSE et BAKER, 2001 ; HOUSE *et al.*, 2002b ; MCQUEEN *et al.*, 1993 ; O'CONNOR *et al.*, 1994 ; PARTRIDGE et BAKER, 1985 ; WEBB et RATHBURN, 1989 ; WEBB *et al.*, 2002), de l'Australie ou d'Afrique (BAKER *et al.*, 1985 ; GALE *et al.*, 1990 ; HEINE et HEINE, 2002 ; OSTENNA *et al.*, 2002 ; PICKUP *et al.*, 1988 ; WOHL *et al.*, 1994 ; ZAWADA et HATTINGH, 1994). Mais on trouve aussi un certain nombre de travaux réalisés dans des régions soumises à des conditions climatiques humides ou sub-humides, comme au Japon, en Inde ou en Chine (ELY *et al.*, 1996 ; GROSSMAN, 2001 ; JONES *et al.*, 2001 ; KALE *et al.*, 1997 ; THORSON, 1989 ; YANG *et al.*, 2000). Il existe aussi des travaux réalisés en régions tempérées ou froides, comme en Europe et au Canada (ARNAUD-FASSETTA, 2002 ; BENITO *et al.*, 1998 ; DUBAND, 2003 ; LIVINGSTON *et al.*, 2001 ; MACKLIN *et al.*, 1992 ; NEWSON et LEWIN, 1991 ; PASSMORE et MACKLIN, 1994 ; POESEN et HOOKE, 1997 ; SAINT-LAURENT et LAVOIE, 2003 ; SAINT-LAURENT et SAUCET, 2003 ; SAINT-LAURENT *et al.*, 2001 ; WOLFE et EDWARDS, 2001). Pour la plupart de ces travaux, les chercheurs s'intéressent à établir des chronologies des événements d'inondation qui s'étendent sur plusieurs siècles ou plusieurs millénaires (période Holocène). On compte également un certain nombre de travaux qui tentent d'établir des chronologies beaucoup plus longues, soit celles associées aux époques glaciaires

(Suite)

Auteurs	Année	Localisation géographique		Méthodes appliquées*				
				E	S	P	D	M
Enzel <i>et al.</i>	1993	Rivière Colorado	États-Unis					X
Knox	1993	Vallée du Mississippi	États-Unis		X		X	
McQueen <i>et al.</i>	1993	Rivière Black Bear	États-Unis (Oklahoma)		X		X	X
Smith et Fisher	1993	Rivière Clearwater	Canada		X		X	X
Enzel	1992	Rivière Mojave	États-Unis (Californie)				X	X
Macklin <i>et al.</i>	1992	Ruisseau Thinhope	Angleterre	X	X		X	
Smith	1992	Rivière Orange	Afrique		X		X	
Jarrett	1990	Rivière Big Thompson	États-Unis (Colorado)	X	X		X	X
Wells	1990	Littoral Péruvien	Pérou		X		X	
Thorson	1989	Rivière Porcupine	États-Unis (Alaska)		X		X	
Pickup <i>et al.</i>	1988	Rivière Fink	Australie		X		X	
Chatters et Hoover	1986	Rivière Columbia	États-Unis (Washington)		X		X	X
Baker <i>et al.</i>	1985	Gorge Katherine	Australie		X		X	X
Ely et Baker	1985	Rivière Verde	États-Unis (Arizona)		X		X	X
Knox	1985	Vallée du Mississippi	États-Unis					X
Partridge et Baker	1985	Rivière Salt	États-Unis (Arizona)		X		X	X
Kochel et Baker	1982	Rivières Pecos et Devils	États-Unis (Texas)		X		X	X

*E : Paléocécologie ; S : Sédimentologie et stratigraphie ; P : Paléosol ; D : Datation (^{14}C , thermoluminescence) ; M : Modèles mathématiques.

4.1 Les méthodes de caractérisation (stratigraphie, sédimentologie, paléocécologie, pédologie)

4.1.1 Stratigraphie et sédimentologie

L'analyse des séquences stratigraphiques et sédimentaires fournit des indicateurs largement utilisés pour reconstituer les différentes périodes d'inondation (ELY et BAKER, 1985 ; ELY *et al.*, 1996 ; ENZEL *et al.*, 1993 ; GREENBAUM *et al.*, 2001 ; HOUSE *et al.*, 2002b ; JONES *et al.*, 2001 ; KITE *et al.*, 2002 ; KRAWON *et al.*, 2000 ; KNOX et DANIELS, 2002 ; KOCHHEL et BAKER, 1988 ; MANVILLE *et al.*, 1999 ; O'CONNOR *et al.*, 1986). Les variations granulométriques des dépôts, la consistance et la coloration des couches, la présence de lits organiques, les altérations pédogénétiques, sont tous des paramètres qui permettent dans un premier temps d'identifier des dépôts d'inondation, et dans un second temps de les caractériser (contexte, évolution, magnitude, etc.). La chronologie précise des événements d'inondation doit par ailleurs s'appuyer sur la datation des matières organiques (débris ou couches organiques, etc.) trouvées dans les séquences sédimentaires, en utilisant des méthodes de datation au radio-carbone, ou encore en s'appuyant sur d'autres techniques de datation (voir section 4.2).

Dans les séquences stratigraphiques, il faut mentionner l'importance de l'analyse des dépôts « d'inondation », qualifiés de « *slackwater deposits* »

(SWD) en anglais, et qui constituent l'un des indices sédimentologiques les plus couramment utilisés pour établir la chronologie des inondations dans une région donnée (BAKER, 1987 ; BAKER *et al.*, 1988 ; BROWN *et al.*, 2000 ; COSTA, 1978 ; ELY et BAKER, 1985 ; GREENBAUM *et al.*, 2000, 2001 ; HOUSE *et al.*, 2002b ; JONES *et al.*, 2001). Ces dépôts sont constitués généralement de sédiments fins (limon, sable fin) qui servent en quelque sorte d'indicateurs pour retracer des inondations anciennes (voir figure 1). Ces dépôts occupent habituellement les niveaux supérieurs de la rive, marquant ainsi les limites atteintes par les inondations, et ils sont très souvent localisés à l'embouchure des rivières, là où les courants diminuent, permettant ainsi la sédimentation. La présence de ces dépôts est souvent combinée à d'autres indices de terrain, tels que les traces des niveaux d'eau laissées sur les parois rocheuses par exemple, ou les fragments grossiers de débris organiques (amas de feuilles, écorces, etc.) transportés lors d'inondations (ces indices additionnels sont qualifiés en anglais de *paleostage indicators* ou PSI) (BAKER, 1987 ; JARRETT et ENGLAND, 2002 ; KITE *et al.*, 2002 ; WEBB *et al.*, 2002). La superposition des couches sédimentaires permet donc de retracer les différentes phases d'inondation. On peut citer les travaux de KOCHÉL et BAKER (1982, 1988) et d'autres chercheurs qui ont couramment utilisés ces paramètres sédimentologiques pour l'étude des paléo-inondations, notamment dans le sud-ouest américain et d'autres régions chaudes (ELY et BAKER, 1985 ; ENZEL, 1992 ; GREENBAUM *et al.*, 2000, 2001 ; OSTENAA *et al.*, 2002 ; WOHL *et al.*, 1994 ; YANG *et al.*, 2000). KNOX (2000) rappelle à cet effet que les dépôts d'inondation (SWD) constituent une sorte de « donnée d'archive » pour reconstituer les anciennes inondations.

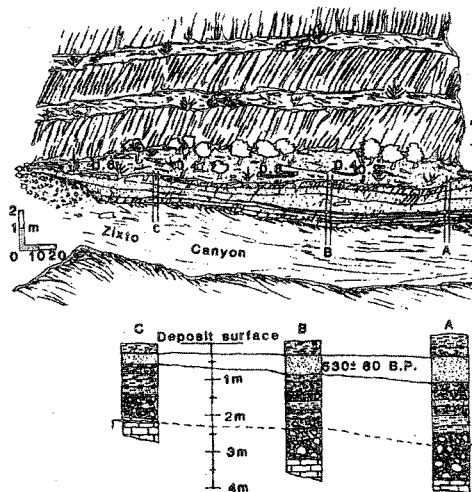


Figure 1 Illustration schématique de sédiments d'inondation (SWD) situés au Canyon Zixto (Texas). Source : KOCHÉL et BAKER (1982) modifié par les auteurs.

Schematic drawing of the slackwater deposits (SWD) localised at Zixto Canyon (Texas). Source: KOCHÉL and BAKER (1982) modified by the authors.

Dans les régions arides ou semi-arides, on comprend que la présence de tels dépôts devient un indice sédimentologique relativement précis pour reconstituer la chronologie des inondations, puisque ces événements n'interfèrent nullement avec les crues printanières associées aux rivières soumises à un régime pluvio-nival par exemple. Ceci est un paramètre important à considérer lors de la reconstitution des périodes d'inondation. En effet, l'absence de crues annuelles (ou crues printanières) facilite grandement le travail d'interprétation sur le terrain et ce, en permettant d'identifier plus facilement les sédiments transportés lors des inondations. Dans le cas des rivières soumises à des crues annuelles, on comprend qu'il devient plus difficile d'identifier, le long des terrasses fluviales, les sédiments laissés par les crues printanières ou par le débordement de la rivière lors d'une forte inondation par exemple. En effet, lors des crues normales, l'écoulement des eaux en lit mineur augmente et déborde sur le lit majeur (BULL, 1997 ; LARONNE *et al.*, 1994 ; SERRAT et DEPRAETERE, 1997), laissant généralement une mince couche de sédiments fins (sable, limons, etc.) sur les terrasses. Une des difficultés est donc d'identifier chacune des couches sédimentaires provenant de crues printanières ou de fortes inondations. Enfin, soulignons que le principal problème dans la reconstruction chronologique des paléo-inondations provient essentiellement de la difficulté de trouver des couches ou des débris de matière organique dans les séquences sédimentaires, ce qui rend difficile la datation chronologique des événements associés aux inondations.

4.1.2 Les méthodes paléocéologiques

Les différentes approches paléocéologiques utilisées dans l'étude des paléo-inondations consistent à combiner différents indicateurs biologiques afin de reconstituer les environnements fluviaux anciens. Les indicateurs les plus fréquemment utilisés sont les microfossiles (pollens, diatomées, etc.) et les macrorestes (fragments de plantes ou insectes). L'analyse dendrochronologique et la lichénométrie sont aussi des méthodes utilisées bien que moins fréquemment. Les organismes résiduels enfouis dans les dépôts sédimentaires constituent en effet des indicateurs biologiques valables pouvant renseigner sur les conditions environnementales et climatiques du passé (BARTLEIN et WEBB, 1982 ; BERNADO et WEBB, 1982 ; ELY *et al.*, 1996 ; GRIMM *et al.*, 1995 ; HUPP, 1988 ; KNOX, 1985). Les travaux de KNOX (1985) et d'autres chercheurs (BARTLEIN et WEBB, 1982 ; WEBB *et al.*, 1988) ont par exemple utilisé les analyses polliniques pour reconstituer des environnements fluviaux reliques. L'abondance de certaines espèces dans les diagrammes polliniques peut en effet fournir des indications sur les conditions hydrologiques et climatiques qui prévalaient dans les sites étudiés et tenter de les associer à certaines périodes de l'Holocène. Par exemple, les diagrammes polliniques réalisés dans la vallée supérieure de la rivière Mississippi, indiqueraient une augmentation des conditions froides et humides entre 6 000 et 4 500 ans BP et seraient associés à des phases d'inondations majeures pour cette période (BARTLEIN et WEBB, 1982 ; KNOX, 1985). Les macrorestes (graines, diaspores, etc.) sont aussi utilisés dans la reconstitution des paléo-inondations. Ces fragments organiques peuvent se retrouver dans les dépôts alluviaux et fournir des indications sur les conditions paléoenvironnementales. Ils peuvent être identifiés à certaines conditions climatiques spécifiques et être combinés à des méthodes de datation, lesquelles peuvent fournir un cadre chronologique des événements anciens (BARTLEIN et WEBB, 1982 ; GRIMM *et al.*, 1995 ; KNOX, 1985).

Outre ces indicateurs biologiques, les lichens et leur taux de croissance ont aussi été utilisés pour la reconstruction des paléo-inondations (JARRETT et TOMLINSON, 2000 ; JOHNSON et WARBURTON, 2002 ; MACKLIN *et al.*, 1992 ; WAYTHOMAS et JARRETT, 1994). La lichénométrie est une technique généralement utilisée en géomorphologie glaciaire et permet d'établir une datation relative en évaluant le taux de croissance des lichens qui poussent sur les substrats rocheux (blocs et cailloux). Certains chercheurs ont appliqué cette technique pour déterminer la fréquence de certaines inondations anciennes (HARVEY *et al.*, 1984 ; INNES, 1983 ; MACKLIN *et al.*, 1992). Ainsi, on tente d'évaluer la chronologie des phases d'inondation en se basant sur la période qui s'écoule entre le début de la colonisation des lichens sur les substrats et le taux de croissance atteint par ces organismes. L'emplacement des galets et cailloux situés le long des terrasses fluviales peut servir aussi d'indice additionnel pour évaluer les limites maximales atteintes par les fortes crues et les inondations.

Enfin, certains chercheurs ont utilisé la dendrochronologie¹ pour connaître l'âge et la formation des plaines inondables (ASTRADE et BÉGIN, 1997 ; COSTA, 1978 ; GOTTESFELD, 1996 ; GOTTESFELD et GOTTESFELD, 1990 ; GRIMM *et al.*, 1995 ; HARRISON et REID, 1967 ; HUPP, 1988 ; JARRETT, 1990 ; ST. GEORGES et NIELSON, 2000 ; YANOSKY et JARRETT, 2002). Cette méthode consiste à déterminer l'âge des peuplements arborescents qui occupent les plaines alluviales en calculant le nombre de cerne de croissance des arbres matures, sachant que chaque cerne de croissance de l'arbre correspond à une année. La dendrochronologie s'avère en ce sens une méthode de datation précise (soit à l'année près) pour déterminer les événements hydrologiques (YANOSKY et JARRETT, 2002). L'application de cette méthode est d'autant plus intéressante si l'on trouve dans les dépôts des terrasses fluviales, d'anciens troncs d'arbres enfouis qui peuvent permettre d'établir une chronologie plus longue. Enfin, les cicatrices sur les troncs d'arbres laissées par le passage des glaces lors des crues printanières peuvent servir d'indication sur les niveaux maximums atteints par les eaux (HARRISON et REID, 1967 ; HUPP, 1988). Certains chercheurs ont même utilisé les marques laissées sur les troncs par le transport des billes de bois en rivière pour identifier les niveaux maximums atteints par les inondations (GOTTESFELD, 1996 ; MCCORD, 1990).

4.1.3 Les méthodes pédologiques

La description morphologique des sols enfouis (paléosols) le long des terrasses fluviales et leur degré de maturité constituent aussi des indices pédogénétiques qui permettent de reconstituer la chronologie des paléo-inondations. Des auteurs comme HEINE et HEINE (2002) ont utilisé par exemple des critères pédologiques pour établir la chronoséquence des événements d'inondation dans le Désert du Namib (Namibie). La présence de couches indurées (croûtes de gypses et de sels) intercalées dans les limons de crues suggère des phases de stabilité des terrasses fluviales. Ils ont pu reconnaître ainsi différentes périodes associées à des événements d'inondations majeures. MCQUEEN *et al.*

1. On attribue à A.E. DOUGLAS (1919) le développement de la méthode dendrochronologique (voir RAAP et HILL, 1998) et les travaux de R. SIGAFOOS (1964) sont parmi les premiers travaux permettant d'identifier la fréquence des inondations à partir de l'analyse dendrochronologique (YANOSKY et JARRETT, 2002).

(1993) et CHATTERS et HOOVER (1986) ont utilisé eux aussi des critères pédologiques (texture, couleur, présence de lits organiques, etc.) pour reconstituer des périodes d'inondation. De manière générale, la présence de sols enfouis dans les sédiments des terrasses correspond à des périodes de stabilité indiquant l'absence de phases d'inondation. Dans les séquences sédimentaires, on peut ainsi retrouver plusieurs paléosols intercalés dans les couches de sédiments déposés lors de phases d'inondations successives. Les travaux de KNOX (1985, 2000) et de ELY (1997) par exemple ont tenté d'interpréter à travers les séquences sédimentaires, la formation des paléosols à des périodes climatiques « sèches », entrecoupées par des périodes climatiques plus « humides » favorisant l'augmentation des inondations et qui se traduisent notamment par la mise en place de plusieurs couches de sédiments.

La présence et l'épaisseur d'horizons illuviaux (cf. horizons d'accumulation enrichis par illuviation en éléments fins ou amorphes (ex. argile, oxyde de fer et d'aluminium, humus, etc.) et habituellement qualifiés d'horizon B), et la concentration des oxydes de fer dans ces horizons d'accumulation, constituent aussi des paramètres pédogénétiques utilisés pour évaluer le taux de développement des sols enfouis dans les terrasses fluviales (JARRETT et TOMLINSON, 2000). Ces indicateurs combinés aux séquences stratigraphiques, par exemple, permettent de présumer de l'âge relatif des terrasses et aussi d'évaluer les phases d'exondation (formation de sols) et celles associées aux inondations (accumulation des sédiments de crues).

4.2 Les outils de datation (^{14}C et thermoluminescence)

La méthode de datation radiocarbone (^{14}C) est fréquemment utilisée pour établir la chronologie des séquences stratigraphiques en géologie et en géomorphologie (STUIVER *et al.*, 1998). Toutefois, son utilisation se limite à des dépôts relativement récents, soit de l'ordre de 60 Ka (STUIVER et REIMER, 1993). Dans l'étude des paléo-inondations, l'utilisation des datations au ^{14}C s'avère nécessaire pour établir une chronologie relativement précise des périodes d'inondation (BAKER *et al.*, 1985 ; ELY *et al.*, 1992). À cet effet, on compte un grand nombre de travaux qui ont utilisé cette méthode afin d'établir des chronologies locales ou régionales des événements d'inondation (BAKER *et al.*, 1985, 1988 ; ELY *et al.*, 1992 ; GREENBAUM *et al.*, 2000 ; HEINE et HEINE, 2002 ; HOUSE et BAKER, 2001 ; KNOX, 1993 ; OSTENAA *et al.*, 2002). Ainsi, la présence de dépôts organiques (couches ou débris de matière organique) à l'intérieur des sédiments déposés par les inondations successives permet d'établir des séquences chronologiques. La difficulté première de cette méthode provient de l'incapacité de trouver suffisamment de matière organique pour permettre la datation, ou encore, de ne pouvoir observer aucune trace de dépôts organiques dans les séquences sédimentaires. Ce type de problème est d'ailleurs soulevé par différents auteurs qui ont travaillé à reconstituer des chronologies sur les inondations des régions chaudes (GREENBAUM *et al.*, 2001 ; KOCHER et BAKER, 1988). En effet, dans les environnements désertiques ou semi-désertiques, ces couches organiques se font souvent rares en raison des conditions climatiques qui ne favorisent pas la formation d'une épaisse couverture végétale au sol. Mais ce problème n'est pas exclusif aux régions désertiques, il se rencontre aussi dans les milieux humides (KNOX, 2000 ; SAINT-LAURENT et LAVOIE, 2003 ; YANG *et al.*, 2000). L'absence de

couches de matière organique ou de débris organiques dans les sédiments s'explique soit par une durée trop courte de formation du couvert végétal entre les phases d'inondation, ou par l'érosion des couches et débris organiques par l'action de divers phénomènes naturels qui agissent parfois de façon concomitante (ruissellement, glissement, bioturbation, érosion fluviale, oxydation, etc.). Dans de telles circonstances, il faut s'appuyer sur d'autres méthodes de datation qui présentent d'autres particularités d'application (thermoluminescence, ^{137}Cs , ^{210}Pb , etc.). Par exemple, les techniques par thermoluminescence fréquemment utilisées en archéologie (RAAP et HILL, 1998) sont parfois utilisées dans les travaux en paléo-inondations. Toutefois, cette technique demande de trouver des pièces archéologiques (artéfacts) *in situ* sur les sites étudiés, ce qui s'avère plutôt rare (ELY *et al.*, 1996 ; PORAT *et al.*, 1996). La présence d'artéfacts dans les terrasses fluviales peut aider par exemple à dater l'âge des dépôts d'inondation. Enfin, les techniques de datation par luminescence qui utilisent les défauts cristallins des grains de quartz ou de feldspaths s'avèrent à ce jour peu précises pour les sédiments fluviaux (LAMOTHE, 1996). Les chercheurs qui ont eu à utiliser cette technique pour la datation des sédiments d'inondation, mentionnent des marges d'erreur importantes comparativement aux dates obtenues par datation radiocarbone (GREENBAUM *et al.*, 2000, 2001 ; PORAT *et al.*, 1996).

4.3 Les méthodes de reconstitution du débit de pointe des paléo-inondations

Il existe différentes méthodes et techniques de modélisation pour tenter de reconstituer les régimes fluviaux anciens (voir tableau 2), lesquelles ont été d'abord développées en hydrologie pour l'étude des cours d'eau soumis aux conditions actuelles. Dans ces modèles, on cherche le plus souvent à définir les débits maximums et les fréquences des inondations. Plusieurs travaux ont tenté de définir les anciens débits maximums à l'aide de diverses méthodes ou modèles mathématiques disponibles. Des auteurs comme YANG *et al.*, (2000), par exemple, ont utilisé la méthode de calcul de pente et de surface (*slope-area method*) pour évaluer les débits des anciennes inondations. Pour calculer les débits, ils utilisent en tout premier lieu l'équation de Manning (voir appendice A), développée pour des écoulements uniformes. À cet égard, WEBB et JARRETT (2002, p. 115) nous rappellent les premières applications de cette méthode : « ...*Manning's equation was developed for uniform flow, for which discharge, n , R and S_f do not vary over a specified reach. Uniform flow is characterized by parallel elevations of the channel bed, water-surface profile, and energy-grade lines* ». La méthode de calcul de pente et de surface est conçue pour des cours d'eau qui se caractérisent par un écoulement uniforme. Dans l'étude de YANG *et al.* (2000), cette méthode de calcul a été appliquée avec succès sur la rivière Jaune (section *Xiaolangdi*) qui présente un débit uniforme. D'autres chercheurs ont aussi utilisé cette méthode de calcul pour déterminer les anciens débits des cours d'eau et ont combiné leur analyse avec des indicateurs biophysiques observés sur le terrain (CHATTERS et HOOVER, 1986 ; GRIMM *et al.*, 1995 ; HEINE et HEINE, 2002 ; O'CONNOR et WEBB, 1988).

Tableau 2 Principales méthodes mathématiques et modèles utilisés pour les études en paléo-inondations.**Table 2** *Principal mathematical methods and models used in paleoflood studies.*

Méthodes et modèles mathématiques	Applications	Auteurs
Méthode de calcul de pente et de surface – Équation de Manning-Strickler	Évaluation des débits	Heine et Heine (2002)
Méthode « Step backwater » Programme HEC-RAS – Hydrological Engineering Center, US	Évaluation des débits	House et Baker (2001)
Méthode de calcul de pente et de surface – Équation de Manning	Évaluation des débits	Yang <i>et al.</i> (2000) Grimm <i>et al.</i> (1995) Chatters et Hoover (1986)
Méthode « Step backwater » Programme HEC-2 – Hydrological Engineering Center, US Log-Pearson Type III (LP3), Courbe-enveloppe de crues (précipitations maximales)	Évaluation des débits	Webb <i>et al.</i> (2002) Wohl <i>et al.</i> (1994) Ely et Baker (1985)
Programme HEC-2 (<i>Water surface profiles</i>) – Hydrological Engineering Center, US	Évaluation des débits maximums	Enzel <i>et al.</i> (1993)
Programme HEC-2 (<i>Water surface profiles</i>) – Hydrological Engineering Center, US	Évaluation des débits	McQueen <i>et al.</i> (1993)
Méthode du maximum de vraisemblance Programme MAX (voir Stedinger <i>et al.</i> 1988) Programme EMA (voir Cohn <i>et al.</i> (1997), Log-Pearson type III (LP3)	Analyse de la fréquence des crues	Blainey <i>et al.</i> (2002) Webb <i>et al.</i> (2002) Greenbaum <i>et al.</i> (2000, 2001) Frances <i>et al.</i> (1994)
Expérimentation d'un nouveau modèle basé sur des données hydrométriques et analyse des fréquences d'inondation	Analyse de la fréquence des crues	Alila et Miraoui (2002), Jarrett et Tomlinson (2000)
Comparaison de différentes méthodes (méthode des moments ajustés, simulation Monte Carlo, etc.)	Développement d'un modèle mathématique	Stevens (1994)
Comparaison de différentes méthodes (méthode des moments ajustés, simulation Monte Carlo, etc.)	Analyse de la fréquence des crues	Stedinger et Cohn (1986) Ouarda <i>et al.</i> (1998)

D'autres chercheurs (ELY et BAKER, 1985 ; HOUSE et BAKER, 2001 ; KITE *et al.*, 2002 ; KUTIJA, 2003 ; LANG *et al.*, 2003 ; O'CONNOR *et al.*, 1986 ; PARTRIDGE et BAKER, 1985 ; STEVENS, 1994 ; WEBB et JARRETT, 2002 ; WOHL *et al.*, 1994) utilisent plutôt la méthode de calcul de « résolution itérative » (*Step backwater method*). Cette dernière permet d'établir (par simulation) le profil longitudinal de la surface libre et ce, afin de reconstituer les débits des inondations anciennes, et elle est mieux adaptée aux cours d'eau où les effets de stockage ou de déformation des hydrogrammes ne sont plus négligeables. WEBB et JARRETT (2002, p. 114) mentionnent que la méthode de « résolution itérative » (*Step backwater method*) et la méthode « profondeur-critique » (*Critical-depth*) sont largement utilisées dans la reconstruction des débits des paléo-inondations, « ...*The step-backwater and critical-deph methods are widely used in paleoflood discharge reconstructions* ». Enfin, ces différents travaux combinent généralement d'autres approches méthodologiques, notamment l'utilisation des indicateurs géomorphologiques (hauteur des terrasses, stratigraphie, granulométrie des sédiments, etc.) et biologiques (*microfossiles*, *marcorestes*, etc.), afin de vérifier les résultats obtenus par ces différents modèles hydrologiques.

APPENDICE A

Équation de Manning :

$$V = 1/nS^{1/2} R^{2/3} \tag{1}$$

$$K = 1/nS^{1/2} \tag{2}$$

Où V : est la vélocité moyenne ; n : facteur de rugosité ; R : le rayon hydraulique ; S : la pente de la surface de l'eau ; K : le facteur de vélocité qui est fonction de n et S de l'équation (2).

Ensuite, le débit est calculé par :

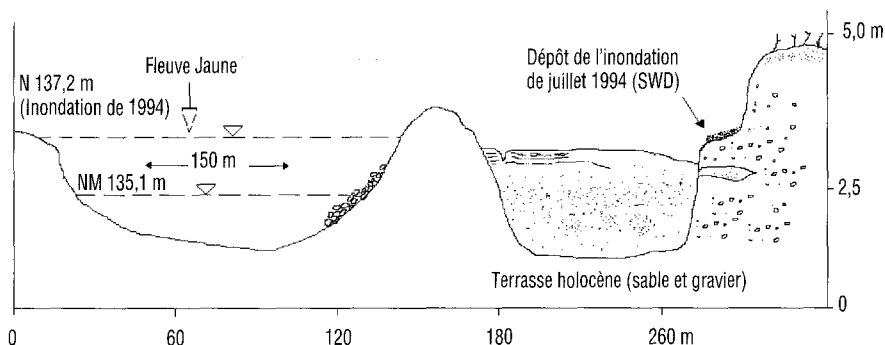
$$Q = V1S1 + V2S2 \tag{3}$$

$$= K1R1^{2/3} S1 + K2R2^{2/3} S2$$

$$= K1R1^{2/3} S1 + K2R2^{2/3} (H2 - H1)$$

$$X (2L + \Delta L)/2$$

où V , S , R et K sont les mêmes que l'équation (1) et (2), alors que 1 et 2 représentent chacun le paramètre du chenal et le débordement du lit principal (*flow-overbank*) respectivement. Q : débit calculé ; $H1$: élévation de la surface du chenal ; $H2$: élévation de la surface inondée en utilisant l'élévation de chaque dépôt d'inondation à sa surface avec les pentes longitudinales des deux côtés des terrasses fluviales ; L : longueur transversale du chenal (150 m) ; et ΔL : distance entre la surface du chenal (niveau moyen (135,1 m) et la surface maximale (137,2 m) atteinte par l'inondation de juillet 1994 par exemple (voir YANG *et al.* 2000, p. 87).



Source : YANG *et al.* (2000) modifié par les auteurs.

Figure 2 Profil transversal du fleuve Jaune (Chine), section Xianlangdi. Le dépôt d'inondation sur la rive droite (montré par la flèche) provient de l'inondation majeure de juillet 1994 et est évalué à un débit de 5 490 m³/s. Source : YANG *et al.* (2000) modifié par les auteurs.

*Cross-section of the Yellow River (China), Xianlangdi section. Slack-water depositional unit on the right bank (show by arrow) deposited by a large flood of approximately 5 490 m³/s in July 1994. Source: YANG *et al.* (2000) modified by the authors.*

Il existe également différents programmes informatiques qui peuvent déterminer les anciens débits des inondations. L'un d'entre eux, le HEC-2 (Hydrologic Engineering Center, 1982 – *Water Surface Profiles*), est utilisé pour calculer le profil de surface de différents types de cours d'eau (GREENBAUM *et al.*, 2001 ; WOHL *et al.*, 1994). La procédure d'ordination utilisée, qui est une méthode standard de calcul, est basée sur la prise en compte de différents paramètres, dont la géométrie du chenal (largeur, profondeur), la hauteur des terrasses alluviales, la rugosité du lit, la vitesse d'écoulement, etc. (ELY et BAKER, 1985 ; MCQUEEN *et al.*, 1993, p. 141). Il existe aussi le programme MAX (*Maximum likelihood analysis*) développé par STEDINGER *et al.* (1988), lequel est utilisé pour l'analyse de la fréquences des crues (voir aussi COHN et STEDINGER, 1987). Ce programme intègre des données fréquence/magnitude provenant de différentes sources (ex. stations de jaugeage, chroniques historiques). Il combine les valeurs maximales des débits enregistrés ou estimés et fournit ainsi une appréciation des variations du régime hydrologique du cours d'eau étudié sur une certaine période de temps (FRANCES *et al.*, 1994 ; GREENBAUM *et al.*, 2001 ; OUARDA *et al.*, 1998). Ce programme a été largement utilisé dans les travaux de GREENBAUM *et al.* (2000, 2001) pour la vallée d'Arava et le bassin Nahal Zin dans le désert du Negev. Enfin, il existe aussi le programme EMA (*Expected moments algorithm*) qui a été développé par COHN *et al.* (1997). Ce modèle s'apparente au programme MAX sauf que les intervalles de récurrence des inondations sont ajustées à des échelles plus longues (ex. 5 000 ans). La performance de ces deux programmes (MAX et EMA) a d'ailleurs été analysée en détail par BLAINEY *et al.* (2002).

Enfin, on peut mentionner que certains chercheurs complètent leurs modèles mathématiques en utilisant des documents cartographiques et des photographies aériennes, lesquels permettent de vérifier leurs analyses mathématiques en s'appuyant sur des évidences de terrain (HOUSE et BAKER, 2001 ; WAYTHOMAS et JARRETT, 1994). Ces documents ne peuvent toutefois couvrir que des périodes relativement courtes (soit les soixante ou cinquante dernières années). En fait, l'utilisation de tels documents permet surtout de vérifier les changements récents le long des terrasses fluviales survenus suite à une inondation catastrophique ou alors à évaluer la surface des plaines inondables par exemple (BROOKS et LAWRENCE, 2000 ; CAIN et BEATTY, 1968 ; HOUSE et BAKER, 2001 ; JOHNSON et WARBURTON, 2002).

4.4 Limite des approches utilisées dans la reconstitution des paléo-inondations

La reconstitution des paléo-inondations demeure un travail fastidieux qui doit faire appel non seulement à des approches et méthodes variées, mais aussi qui exige des travaux de terrain minutieux et une bonne compréhension des environnements fluviaux. Aussi, les difficultés peuvent être nombreuses. Il suffit de penser à la qualité des sites, au manque d'évidences ou traces visibles sur le terrain ou encore à la détérioration des sites étudiés, soit par des processus naturels (érosion des terrasses fluviales, glissements de terrain, altération par des crues successives, etc.), soit par des actions anthropiques (terrassement, mise en culture, déboisement des rives, etc.).

La chronologie des paléo-inondations peut aussi s'avérer ardue, notamment par la difficulté d'individualiser chaque événement d'inondation. Par

exemple, la superposition de plusieurs inondations successives sur une courte période de temps (une décennie par exemple) rend difficile de discriminer chacun des événements qui se sont produits. Ce genre de problème se rencontre notamment dans les milieux tempérés froids soumis à un régime pluvio-nival (SAINT-LAURENT et LAVOIE, 2003 ; WERRITTY *et al.*, 2003). L'identification des différents événements d'inondation dans les séquences stratigraphiques peut s'avérer aussi difficile, en raison notamment de la faible différenciation entre les dépôts. Enfin, STARKEL (1996, p. 12) soulève la difficulté d'identifier chaque événement d'inondation : « *...In the case of the famous Missoula flood it is not know whether it was a single or several events, close or distant time* ».

Certaines autres difficultés surviennent quant à l'interprétation des niveaux atteints par les inondations anciennes. Il faut en effet tenir compte des diverses modifications (changement dans la géométrie du chenal par exemple) qu'a pu subir le cours d'eau dans son évolution. À ce titre, BLAINEY *et al.* (2002, p. 164) rappellent que l'évaluation des débits pour la reconstitution des paléo-inondations peut être biaisée par une méconnaissance des changements survenus du cours d'eau : « *...Errors in discharge reconstruction include uncertainties in indirect-discharge estimates caused by channel change and/or mis-specification of roughness values...* ». Enfin, WEBB et JARRETT (2002) mentionnent que le comblement des lits des rivières doit être pris en compte dans l'évaluation des niveaux atteints lors des inondations anciennes. Ces chercheurs estiment que plusieurs rivières du sud-ouest américains ont subi un rehaussement de leur niveau de base depuis plusieurs milliers d'années : « *...Alluvial channels in the southwestern United States are unstable and have fluctuated up to 30 m in base level over the last several thousand years.* » (WEBB et JARRETT, 2002, p. 113). Enfin, certains modèles mathématiques présentent certaines difficultés méthodologiques ou d'applications. C'est le cas notamment de la méthode du maximum de vraisemblance (COHN et STEDINGER, 1986) qui utilise l'analyse fréquentielle pour modéliser de l'information historique imprécise sur les crues. OUARDA *et al.* (1998, p. 45) émettent quelques réserves quant à l'utilisation de cette méthode. Selon eux, la plus « *grande faiblesse de cette méthode porte sur l'existence des maximums locaux de la fonction de vraisemblance* », ce qui impliquerait des « *difficultés pour trouver une solution optimale* ».

Toutes ces difficultés qui peuvent être rencontrées dans la reconstitution des paléo-inondations amènent à réfléchir sur la précision de certains événements (fréquence et magnitude des inondations, durée, etc.) et demandent aux chercheurs qui travaillent dans ce domaine une certaine vigilance quant aux interprétations qu'ils doivent poser sur ces événements du passé.

5 – CONCLUSION

L'étude des paléo-inondations demande de mettre en commun différentes méthodes et techniques pouvant permettre de reconstituer des environnements fluviaux plus anciens. Les différents indicateurs physiques et biologiques utilisés impliquent nécessairement une approche multidisciplinaire qui

sans elle rendrait difficile de telles reconstitutions paléoenvironnementales. La reconstitution des conditions hydrologiques passées s'avère par ailleurs une tâche relativement difficile puisque plusieurs indices morphologiques, sédimentologiques, stratigraphiques ou autres, ont été altérés ou encore modifiés soit par des agents naturels soit par des agents anthropiques.

La reconstitution chronologique à l'échelle du millénaire pour des événements majeurs tels que les fortes inondations ou les crues exceptionnelles, n'apparaît possible qu'en utilisant différentes approches méthodologiques qui sont empruntées à divers champs disciplinaires (géomorphologie, climatologie, pédologie, écologie, etc.). La nécessité d'utiliser des méthodes et des techniques variées (stratigraphie, sédimentologie, datation radiocarbone, dendrochronologie, etc.) s'explique par le fait qu'il est difficile de reconstituer des environnements anciens sans faire appel à différents indicateurs biophysiques. La reconstitution de chronologies plus longues (soit à l'échelle du millénaire) permet, entre autres, de mieux comprendre le déroulement des événements hydrologiques du passé et sans doute de mieux prévoir les conséquences de changements rapides qu'annonce notamment le réchauffement planétaire.

Enfin, bien que ces méthodes et techniques soient généralement associées aux disciplines de la géologie, de la géomorphologie ou de la biologie, on comprend qu'elles constituent des outils de recherche incontournables pour développer l'ensemble des travaux en paléohydrologie. Le développement de ces approches multidisciplinaires ouvre par ailleurs des avenues de recherche fort intéressantes et qui méritent d'être davantage explorées dans le domaine de l'hydrologie en général.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les trois réviseurs (anonymes) ainsi que la rédaction de la revue pour les commentaires constructifs. Cette revue de la littérature s'inscrit à l'intérieur d'un programme de recherche financé par le CRSNG et les fonds institutionnels de recherche de l'UQTR.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGASSE E., 2003. Historical evidence of extreme flood events from the 17th to the 20th century in western France (Normandy). Paleofloods, Historical data and climatic variability: Applications in flood Risk Assessment (PHEFRA), Colloque international, Barcelone, Espagne, 16-19 octobre 2002, 99-106.
- AGASSIZ L., 1838. Upon glaciers, moraines, and erratic blocks. *Edinburg New Philology Journal*, 24, 364.
- ALILA Y., MTIRAOU I. A., 2002. Implications of heterogeneous flood-frequency distributions on traditional stream-discharge prediction techniques. *Hydrology Processes*, 16, 1065-1084.
- ARNAUD-FASSETTA G., 2002. Geomorphological records of a "flood-dominated regime" in the Rhône Delta (France) between the 1st century BC and the 2nd century AD. What correlations with the catchment paleohydrology? *Geodynamica Acta* 15, 79-92.
- ASTRADE L., BÉGIN Y., 1997. Tree-ring response of *Populus tremula* L. and *Quercus robur* L. to recent spring floods of the Saone River. France, *Écoscience*, 4, 232-239.
- BAKER V.R., 2000. Paleoflood hydrology and the estimation of extreme floods. In: "Inland flood hazards", WOHL E.E. [Ed], pp. 359-377.
- BAKER V.R., BENITO G., RUDOY A.N., 1993. Paleohydrology of Late Pleistocene superflooding, Altay Mountains, Siberia. *Science*, 259, 348-350.
- BAKER V.R., KOCHER R.C., PATTON P.C., 1988. Flood geomorphology. John Wiley, New York.
- BAKER V.R., 1987. Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *Journal of Hydrology*, 96, 79-99.
- BAKER V.R., PICKUP G., POLACH H.A., 1985. Radiocarbon dating of flood events, Katherine Gorge, northern Territory, Australia. *Geology*, 13, 344-347.
- BARTLEIN P.J., WEBB T., 1982. Holocene climatic changes estimated from pollen data from the northern Midwest. In: "Quaternary History of the Driftless Area", J.C. KNOX J.C., CLAYTON L. and MICHELSON D.M. [Eds], pp. 83-87.
- BENITO G., THORNDYCRRAFT V.R., RICO M., SOPENA A., SANCHEZ Y., CASAS M., 2003. Palaeoflood hydrology applications for flood risk assessment in Spanish Mediterranean rivers. Third International Paleoflood Workshop (Abstract), Hood River, Oregon, August 1-7, 2003.
- BENITO G., MACHADO M. J., PEREZ-GONZALEZ A., SOPENA A., 1998. Paleoflood hydrology of the Tagus River, central Spain. In: "Palaeohydrology and Environmental Change", BENITO G., BAKER V.R. and GREGORY K.J. [Eds], 317-333.
- BERNADO P.J., WEBB T., 1982. Holocene climatic changes estimated from pollen data from the northern Midwest. In: "Quaternary History of the Driftless Area", KNOX J.C., CLAYTON L. and MICHELSON D.M. [Eds], pp. 83-87.
- BLAINEY J.B., WEBB R.H., MOSS M.E., BAKER V.R. 2002. Bias and information content of paleoflood data in flood-frequency analysis. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 161-174.
- BRETZ J.H., 1923. The channelled scablands of the Columbia Plateau. *Journal of Geology*, 33, 97.
- BROOKS G.R., LAWRENCE D.E., 2000. Geomorphic effects of flooding along reaches of selected rivers in the Saguenay region, Québec, July 1996. *Géographie physique et Quaternaire*, 54, 281-299.
- BROWN S.L., BIERMAN P.R., LINI A., SOUTHON J., 2000. 10 000 yr record of extreme hydrologic events. *Geology*, 28, 335-338.
- BRUNETON H., ARNAUD-FASSETTA G., PROVANSAL M., SISTACH D., 2002. Geomorphological evidence for fluvial change during the Roman period in the lower Rhône Valley. *Catena*, 45, 287-312.

- BULL L.J., 1997. Magnitude and variation in the contribution of bank erosion to the suspended sediment load of the River Severn, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 1109-1123.
- CAIN J.M., BEATTY M.T., 1968. The use of soil maps in the delineation of floods plains. *Water Resources Research*, 4, 173-182.
- CHATTERS J.C., HOOVER K.A., 1994. Response of the Columbia River fluvial system to Holocene climatic change. *Quaternary Research*, 37, 42-59.
- CHATTERS J.C., HOOVER K.A., 1986. Changing late Holocene flooding frequencies on the Columbia River, Washington. *Quaternary Research* 26, 309-320.
- COHN T.H., LANE W.L., BAIER W.G., 1997. An algorithm for computing moments-based flood quantile estimated when historical information is available. *Water Resources Research*, 33, 2089-2096.
- COHN T.H., STEDINGER J.R., 1987. Use of historical information in a maximum-likelihood framework. *Journal of Hydrology*, 96, 215-223.
- COSTA J.E., 1987. A history of paleoflood hydrology in the United States, 1800-1970. In: "The History of Hydrology", LANDA E.R. and INCE S. [Eds], pp. 49-53.
- COSTA J.E., 1978. Holocene stratigraphy in flood-frequency analysis. *Water Resources Research*, 14, 626-632.
- DANA J.D., 1882. The flood of the Connecticut River Valley from the melting of the Quaternary glacier. *American Journal of Science* (parts 1 & 2), 123, 87-179.
- DOUGLAS A.E., 1919. Climate cycles and tree growth. Washington, DC, Carnegie Institution of Washington.
- DUBAND D., 2003. Extreme rainfall and flood events in autumn during the 19th and 20th centuries in basins of southern Europe influenced by mediterranean meteorological conditions. Paleofloods, Historical data and climatic variability: Applications in flood Risk Assessment (PHEFRA), Colloque international, Barcelone, Espagne, 16-19 octobre 2002, 313-320.
- ELY L.L., 1997. Response of extreme floods in the southwestern United States to climatic variations in the late Holocene. *Geomorphology*, 19, 175-201.
- ELY L.L., ENZEL Y., BAKER V.R., KALE V.S., MISHRA, S., 1996. Changes in the magnitude and frequency of late Holocene monsoon floods on the Narmada River, central India. *Geological Society of America Bulletin*, 108, 1134-1148.
- ELY L.L., ENZEL Y., BAKER V.R., CAYAN D.R., 1993. A 5000-year record of extreme floods and climate change in the southwestern United States. *Science*, 262, 410-412.
- ELY L. L., WEBB R. H., ENZEL Y., 1992. Accuracy of post-bomb ¹³⁷Cs and ¹⁴C in dating fluvial deposits. *Quaternary Research*, 38, 196-204.
- ELY L.L., BAKER V.R., 1985. Reconstructing paleoflood hydrology with slackwater deposits : Verde River, Arizona. *Physical Geography*, 5, 103-126.
- ENZEL Y., ELY L.L., BAKER V.R., HOUSE P.K., WEBB R.H., 1993. Paleoflood evidence for a natural upper bound to flood magnitudes in the Colorado River Basin. *Water Resources Research*, 29, 2287-2297.
- ENZEL Y., 1992. Flood frequency of the Mojave River and the formation of late Holocene playa lakes, southern California, USA. *The Holocene* 2, 11-18.
- FRANCES, F., SALAS J.D., BOES D.C., 1994. Flood frequency analysis with systematic and historical or paleoflood data based on the two-parameter general extreme value models. *Water Resources Research*, 30, 1653-1664.
- GALE S.J., BAINBRIDGE A., BAINBRIDGE S., 1990. Megafloods in inland eastern Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. 38, 1-11.
- GODARD A., 1995. Le système bassin-versant, fonctionnement naturel, interventions humaines. *Annales de Géographie*, 581-582, 3-5.
- GORDON F.T., 1993. Glacial Lake Agassiz: The Northwest Outlet and Paleoflood Spillway, N.W. Saskatchewan and N.E. Alberta. Th. Doct. University of Calgary, Canada, 168 p.
- GOTTESFELD A.S., 1996. British Columbia flood scars : maximum flood-stage indicators. *Geomorphology*, 14, 319-325.

- GOTTESFELD A.S., GOTTESFELD L.D., 1990. Floodplain dynamics of a wandering river, dendrochronology of the Morice River, British Columbia, Canada. *Geomorphology*, 3, 159-179.
- GREENBAUM N., ENZEL Y., SCHICK A.P., 2001. Magnitude and frequency of paleofloods and historical floods in the Arava basin, Negev Desert, Israel. *Journal of Earth Science*, 50, 159-186.
- GREENBAUM N., SCHICK A.P., BAKER V.R., 2000. The palaeoflood record of a hyperarid catchment, Nahal Zin, Negev Desert, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 951-971.
- GRIMM M.M., WOHL E.E., JARRETT R.D., 1995. Coarse-sediment distribution as evidence of an elevation limit for flash flooding, Bear Creek, Colorado. *Geomorphology*, 14, 199-210.
- GROSSMAN M.J., 2001. Large floods and climatic change during the Holocene on the Ara River, Central Japan. *Geomorphology*, 39, 21-37.
- HARRISON S.S., REID J.R., 1967. A flood-frequency graph based on tree-scar data. *Proceedings N.D. Academy Science*, 21, 23-33.
- HARVEY A.M., ALEXANDER R.W., JAMES P.A., 1984. Lichens, soil development and the age of Holocene valley floor landforms: Howgill Fells, Cumbria. *Geografiska Annaler*, 66A, 353-366.
- HEINE K., HEINE J.T., 2002. A paleohydrologic reinterpretation of the Homeb Silts, Kuiseb River, central Namib Desert (Namibia) and paleoclimatic implications. *Catena*, 48, 107-130.
- HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R., LEVISH D.R., 2002a. Ancient floods, modern hazards: principles and applications of paleoflood hydrology. *Water Science and Application 5*, American Geophysical Union, Washington, DC.
- HOUSE P.K., PEARTHREE P.A., KRAWON J.E., 2002b. Historical flood and paleoflood chronology of the Lower Verde river, Arizona: stratigraphic evidence and related uncertainties. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], *Water Science and Application 5*, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 267-294.
- HOUSE P.K., BAKER V.R., 2001. Paleohydrology of flash floods in small desert watersheds in western Arizona. *Water Resources Research*, 37, 1825-1839.
- HUPP C.R., 1988. Plant ecological aspects of flood geomorphology and paleoflood history. In: "Flood geomorphology", BAKER V.R., KOCHER R.C. and PATTON P.C. [Eds], pp. 393-402.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER 1982. HEC-2 Water surface profiles: Program user's manual. US Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- INNES J. L., 1983. Lichenometric dating of debris flow activity in the Scottish Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, 579-588.
- JARRETT R.D., ENGLAND J.F.(Jr), 2002. Reliability of paleostage indicators for paleoflood studies. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], *Water Science and Application 5*, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 267-294.
- JARRETT R.D., TOMLINSON E.M., 2000. Regional interdisciplinary paleoflood approach to assess extreme flood potential. *Water Resources Research*, 36, 2957-2984.
- JARRETT R.D., 1990. Paleohydrologic techniques used to define the spatial occurrence of floods. *Geomorphology*, 3, 181-195.
- JOHNSON R.M., WARBURTON J., 2002. Flooding and geomorphic impacts in a mountain torrent: Raise Beck, Central lake District, England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 945-969.
- JONES A.P., SHIMAZU H., OGUCHI T., OKUNO M., TOKUTAKE M., 2001. Late Holocene slackwater deposits on the Nakagawa River, Tochigi Prefecture, Japan. *Geomorphology*, 39, 39-51.
- KALE V.S., MISHRA S., BAKER V.R., 1997. A 2000-year paleoflood record from Sakarghat on Narmada, central India. *Journal of the Geological Society of India*, 50, 283-288.
- KITE J.S., GEBHARDT T.W., SPRINGER G.S., 2002. Slackwater deposits as paleostage indicators in canyon reaches of the central Appalachians: reevaluation

- after the 1996 Cheat River flood. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 257-266.
- KLAWON J.E., LEVISH D.R., O'CONNELL D.R.H., 2000. Paleofloods and paleosols on the north Platte River. Stratigraphic records of exceedance and nonexceedance. *Geological Society of America*, Abstr. Progr., 32, A-509.
- KNOX J.C., DANIELS J.M. 2002. Watershed scale and the stratigraphic record of large floods. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 237-256.
- KNOX J.C., 2000. Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change. *Quaternary Science Reviews* 19, 439-457.
- KNOX J.C., 1993. Large increases in flood magnitude in response to modest changes in climate. *Nature*, 361, 430-432.
- KNOX J.C., 1985. Responses of floods to Holocene climatic change in the upper Mississippi Valley. *Quaternary Research*, 23, 287-300.
- KOCHEL R.C., BAKER V.R., 1988. Paleoflood analysis using slackwater deposits. In: "Flood geomorphology", BAKER V.R., KOCHEL R.C. and PATTON P.C. [Eds], pp. 357-376.
- KOCHEL R.C., BAKER V.R., 1982. *Paleoflood Hydrology. Science, New Series*, 215, Issue 4531, 353-361.
- KUTIJA V., 2003. Hydraulic modelling of floods. Paleofloods, Historical data and climatic variability: Applications in flood Risk Assessment (PHEFRA), Colloque international, Barcelone, Espagne, 16-19 octobre 2002, 163-170.
- LAMOTHE M., 1996. Datation par les méthodes de luminescence des feldspaths de milieux sédimentaires : le problème de la remise à zéro. *Géographie physique et Quaternaire*, 50, 365-376.
- LANG M., MOUSSAY D., RECKING A., NAULET R., 2003. Hydraulic modelling of historical floods: a case study on the Ardèche River at Vallon Pont d'Arc. Paleofloods, Historical data and climatic variability: Applications in flood Risk Assessment (PHEFRA), Colloque international, Barcelone, Espagne, 16-19 octobre 2002, 183-190.
- LARONNE J.B., REID I., YITSHAK Y., FROSTICK L.E., 1994. The non-layering of gravel streambeds under ephemeral flood regimes. *Journal of Hydrology*, 159, 353-363.
- LIVINGSTON J.M., SMITH D.G., FROESE D.G., PARKSTROM G.J., PARKER M.K., 2001. Reconstructing the late Holocene (last 3000 years) ice-jam flood history on the middle Yukon River. CANQUA Congress, Whitehorse, TNO, Canada, August, 20-24, 2001.
- MACKLIN M.G., LEWIN J., 2003. River sediments, great floods and centennial-scale Holocene climate change. *Journal of Quaternary Science*, 18, 101-105.
- MACKLIN M.G., LEWIN J., JOHNSTONE E., 2003. Holocene river dynamics and flooding in Great Britain: Evaluating regional responses to climate and land-use change. Third International Paleoflood Workshop (Abstract), Hood River, Oregon, August 1-7, 2003.
- MACKLIN M.G., RUMSBY B.T., HEAP T., 1992. Flood alluviation and entrenchment: Holocene valley-floor development and transformation in the British Uplands. *Geological Society of America Bulletin*, 104, 631-643.
- MANVILLE V., WHITE J.D.L., HOUGHTON B.F., WILSON C.J.N., 1999. Paleohydrology and sedimentology of a post-1.8 ka breakout flood from intracaldera Lake Taupo, North Island, New Zealand. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 1435-1447.
- MCCORD V.A.S., 1990. Augmenting flood frequency estimates using flood-scarred trees. Th. Doct., University of Arizona, Tucson, USA, 182 p.
- MCQUEEN K.C., VITEK J.D., CARTER B.J., 1993. Paleoflood analysis of an alluvial channel in the south-central Great Plains: Black Bear Creek, Oklahoma. *Geomorphology*, 8, 131-146.

- MORHANGE C., PROVANSAL L., HESNARD A., BOUIRON M., BOURCIER M., CARBONEL P., WEYDERT P., 1996. Morphogénèse et impacts anthropiques sur les rives du Lacydon à Marseille (6000 av. J.-C.-500 ap. J.-C.). *Annales de Géographie*, 587, 32-46.
- MORIN G., SLIVITZKY M., 1992. Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique: le cas de la rivière Moisie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 5, 179-195.
- NEWSON M., LEWIN J., 1991. Climatic change, river flow extremes and fluvial erosion-scenarios for England and Wales. *Progress in Physical Geography*, 15, 1-17.
- O'CONNOR J.E., ELY L.L., WOHL E.E., STEVENS L.E., MELIS T.S., KALE V.S., BAKER V.R. 1994. A 4500-year record of large floods on the Colorado River in the Grand Canyon, Arizona. *Journal of Geology*, 102, 1-9.
- O'CONNOR J.E., WEBB R.H., 1988. Hydraulic modeling for paleoflood analysis. In: "Flood geomorphology", BAKER V.R., KOCHER R.C. and PATTON P.C. [Eds], 383-402.
- O'CONNOR J.E., FULLER J.E., BAKER V.R., 1986. Late Holocene flooding within the Salt River basin, central Arizona. Department of Geosciences paper, University of Arizona, Tucson, 84 pp.
- OSTENAA D.A., O'CONNELL D.R.H., WALTERS R.A., CREED R.J., 2002. Holocene paleoflood hydrology of the Big Lost River, western Idaho. National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho. *Geological Society of America Special Paper*, 353, 91-110.
- OUARDA T.B.M.J., RASMUSEN P.F., BOBÉE B., BERNIER J., 1998. Utilisation de l'information historique en analyse hydrologique fréquentielle. *Revue des Sciences de l'Eau*, n° Spécial, 41-49.
- PANAGOULIA-DIONYSIAL M., DIMOU G., 1997. Sensitivity of flood events to global climate change. *Journal of Hydrology*, 191, 208-222.
- PARTRIDGE J.B., BAKER V.R., 1985. Paleoflood hydrology of the Salt River, Arizona. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 109-125.
- PASSMORE D.G., MACKLIN M.G., 1994. Provenance of fine-grained alluvium and late Holocene land-use change: The Tyne basin, northern England. *Geomorphology*, 9, 127-142.
- PATTON P.C., 1987. Measuring the rivers of the past: A history of fluvial paleohydrology. *American Geophysical Union*, 55-67.
- PICKUP G., ALLAN G., BAKER V. R., 1988. History, paleochannels and paleofloods of the Fink River, central Australia. In: "Fluvial geomorphology of Australia", WARNER R.F. [Ed], pp. 177-200.
- POESEN J.W.A., HOOKE J.M., 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21, 157-199.
- PORAT N., WINTLE A.G., AMIT R., ENZEL Y., 1996. Late Quaternary earthquake chronology from luminescence dating of colluvial and alluvial deposits of the Arava valley, Israel. *Quaternary Research*, 46, 107-117.
- RAAP G.(Jr), HILL C.L., 1998. Geoarchaeology. The earth-science approach to archaeological interpretation. Yale University Press, London.
- RICARD B., BÉGIN Y. 1999. Le développement d'une pessière à épinette blanche et à lichens sur la côte en émergence rapide de la baie d'Hudson au Québec subarctique. *Géographie physique et Quaternaire*, 53, 351-364.
- RIND D., ROSENZWEIG C., GOLDBERG R., 1992. Modelling the hydrological cycle in assessments of climate change. *Nature*, 358, 119-122.
- SAINT-LAURENT D., 2003. Paleoflood hydrology : an emerging science. *Progress in Physical Geography* (accepté).
- SAINT-LAURENT D., LAVOIE L., 2003. Chronology of recent and ancient flood sequences in the Saint-François river, Québec, Canada. Third International Paleoflood Workshop (Abstract), Hood River, Oregon, August 1-7, 2003.
- SAINT-LAURENT D., SAUCET J.-P., 2003. Chronological reconstitution of Floods of the Saint-François Drainage Basin, Québec, Canada. Proceedings 3rd Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards, Edmonton, Alberta, June, 9-10, 2003.
- SAINT-LAURENT D., COUTURE C., MCNEIL É., 2001. Spatio-temporal ana-

- lysis of floods of the Saint-François drainage basin, Québec, Canada. *Environnements*, 29, 73-89.
- SERRAT P., DEPRAETERE C., 1997. Incidences de facteurs géomorphologiques dans le fonctionnement d'un bassin en situation de crue : L'exemple de l'Agly (Pyrénées-Orientales). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 1, 73-88.
- SIGAFOOS R., 1964. Botanical evidence of floods and flood-plain deposition. U.S. *Geological Survey Professional Paper*, 485A, 35 p.
- SMITH A.M., 1992. Holocene palaeoclimatic trends from palaeoflood analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, (Global and Planetary Change Section)*, 97, 235-240.
- SMITH D.G., FISHER T.G., 1993. Glacial Lake Agassiz : The northwestern outlet and paleoflood. *Geology*, 21, 9-12.
- ST. GEORGE S., NIELSEN E., 2000. Signatures of high-magnitude 19th century floods in *Quercus macrocarpa* (Michx.) along the Red River, Manitoba, Canada. *Geology*, 28, 899-902.
- STARKE L., 1996. Palaeohydrological reconstruction: advantages and disadvantages. In : *"Global continental Changes : The context of palaeohydrology"*, BRANSON, J., BROWN A.G. and GREGORY K.J. [Eds], Geological Society Special Publication, 115, pp. 9-17.
- STEDINGER J.R., SURANI R., THERIVEL R., 1988. Flood Frequency Analysis Package, Version 3.0 and MAX User's Guide. Department of Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, 51 p.
- STEDINGER J.R., COHN T.A., 1986. Flood frequency analysis with historical and paleoflood information. *Water Resources Research*, 22, 785-793.
- STEVENS E.W., 1994. Multilevel model for gage and paleoflood data. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120, 444-457.
- STUIVER M., REIMER P.J., BARD E., BECK J. W., BURR G.S., HUGHEN K.A., KROMER B., MCCORMAC G., VAN DER PLICHT J., SPURK M., 1998. Intcal98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, 40, 1041-1083.
- STUIVER M., REIMER P.J., 1993. Extended ¹⁴C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 35, 215-230.
- THORSON R.M., 1989. Late quaternary paleofloods along the Porcupine River, Alaska: Implications for regional correlation. *U.S. Geological Survey Circular*, 1026, 51-54.
- WAYTHOMAS C.F., JARRETT R.D., 1994. Flood geomorphology of Arthurs Rock Gulch, Colorado: paleoflood history. *Geomorphology*, 11, 15-40.
- WEBB R.H., JARRETT R.D., 2002. One-dimensional estimation techniques for discharges of paleofloods and historical floods. In : *"Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology"*, HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 111-126.
- WEBB R.H., BLAINEY J.B., HYNDMAN D.W., 2002. Paleoflood hydrology of the Paria River, southern Utah and Northern Arizona, U.S.A In : *"Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology"*, HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 295-310.
- WEBB R.H., RATHBURN S.L., 1989. Paleoflood hydrologic research in the southwestern United States. *Trans. Resources Research*, 1201, 9-21.
- WEBB R.H., O'CONNOR J.E., BAKER, V.R., 1988. Paleohydrological reconstruction of flood frequency on the Escalante River. In : *"Flood geomorphology"*, BAKER V.R., KOCHER V.R. and PATTON P.C. [Eds], pp. 403-418.
- WELLS L.E., 1990. Holocene history of the *El Nino* phenomenon as recorded in flood sediments of northern coastal Peru, *Geology*, 18, 1134-1137.
- WERRITTY A., PAINE J., ROWAN J., MACDONALD N., MCEWEN L., 2003. Improved estimates of flood risk based on proxy flood series on the lower River Tay, Scotland. Third International Paleoflood Workshop (Abstract), Hood River, Oregon, August 1-7, 2003.

- WOHL E.E., FUERTSCH S.J., BAKER V.R., 1994. Sedimentary records of late Holocene floods along the Fitzroy and Margaret Rivers, western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 41, 273-280.
- WOLFE B.B., EDWARDS T.W.D., 2001. Determining flood and climate history of the Peace-Arthabasca delta using a multidisciplinary paleolimnological approach. CANQUA Congress, Whitehorse, TNO, Canada, August, 20-24, 2001.
- YANG D., YU G., XIE Y., ZHAN D., LI Z., 2000. Sedimentary records of large Holocene floods from the middle reaches of the Yellow River, China. *Geomorphology*, 33, 73-88.
- YANOSKY T.M., JARRETT R.D., 2002. Dendrochronologic evidence for the frequency and magnitude of paleofloods. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 77-90.
- ZAWADA P.K., HATTINGH J., 1994. Studies on the palaeoflood hydrology of South African rivers. *Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Wetenskap*, 90, 567-568.