



Programme Européen
Socrates - Erasmus
d'enseignement supérieur
intensif

Programme piloté par l'Université de Nice Sophia Antipolis en association avec les Universités de Bruxelles (BE) Budapest (HU), Catalogne (ES), Cottbus (GE), Lausanne (CH), Newcastle (UK)

Atelier-Table Ronde du GIR Maralpin

Fleuves, territoires et infrastructures

Regards croisés sur la Plaine du Var

Nice, le 10 novembre 2009

Le bassin versant du Var et la crue de 1994

[extraits]

Philippe GOURBESVILLE

Professeur des Universités

Directeur de l'École Polytechnique de l'Université de Nice-Sophia Antipolis (EPU-Polytech)

•
Novembre 2009
•

Le document que Philippe Gourbesville met à disposition des participants de l'Atelier-Table ronde du GIR Maralpin a été préparé par ses soins en novembre 2009 dans le cadre de la formation qu'il dispense, avec ses collègues des autres universités engagées dans le Programme HYDRO EUROPE¹. Il constitue la partie introductive du dossier d'études sur le fleuve Var soumis aux étudiants chercheurs

Hydro Europe et Vallée du Var

Hydro Europe s'adresse aux étudiants impliqués dans plusieurs formations de maîtrises spécialisée sur la gestion de l'eau et des hydro-technologies. Les objectifs de Hydro Europe visent à promouvoir, dans une vision européenne globale, les méthodologies, les outils et les concepts clés, les bonnes pratiques qui sont aujourd'hui essentiels pour une gestion durable de l'eau. Aujourd'hui, les problèmes liés à l'eau sont plus complexes et doivent être analysés de façon collective et pluridisciplinaire. La sophistication des situations impose à reconsidérer la manière de travailler : nouvelles pratiques, nouveaux outils, nouvelles technologies, nouvelles façons de concevoir.

Le projet en cours porte sur l'analyse de la crue du fleuve Var survenue en novembre 1994. Cette étude de cas vise à mettre en œuvre des méthodes modernes pour notamment évaluer les effets de la suppression de seuils dans la survenue d'événements de crue basés sur ceux de novembre, aux fins de discuter des recommandations pour la gestion du bassin du fleuve Var et d'avancer des solutions alternatives pour la prévention des inondations dans sa basse vallée.

¹ [Université de Nice - Sophia Antipolis](#) (France) ; [Brandenburg University of Technology at Cottbus](#) (Germany) ; [Budapest University of Technology and Economics](#) (Hungary) ; [Polytechnic University of Catalonia](#) (Spain) ; [Newcastle University](#) (UK) ; [Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne](#) (Switzerland) ; [Vrije Universiteit Brussel](#) (Belgium)

I. BASSIN VERSANT DU VAR : SYNTHÈSE ET CRUE DE 1994

1. Présentation du bassin versant du Var

Le Var est le principal bassin versant des Alpes-Maritimes, avec une superficie de 2822 km². La source du fleuve est située à proximité du hameau Esting à 1800 mètres d'altitude dans un ensemble géologique caractérisé par des formations métamorphiques et schisteuses. Le Var reçoit, à proximité de sa source les eaux des torrents du Colombier et de Jallorgues auxquels s'ajoutent les petits ruisseaux descendants du col de la Cayolle.

Le bassin est caractérisé par des altitudes allant de 0 - sur le littoral - jusqu'à plus de 3000 m sur la ligne de crêtes qui sépare la France de l'Italie. La forme générale du bassin s'inscrit dans un rectangle basculé vers l'ouest et restant en contact avec le domaine maritime par l'un de ses angles. Ses dimensions atteignent 70 kilomètres pour l'axe est/ouest et 75 kilomètres pour le parcours nord/sud. La morphologie du bassin, en plus de cette compacité, est marquée par les valeurs élevées des pentes qui dépassent localement les 20%. Le réseau hydrographique principal, long de 125 kilomètres, s'organise autour de quatre grandes vallées qui génèrent en plus du Var les affluents que sont la Tinée, la Vésubie et l'Estéron.

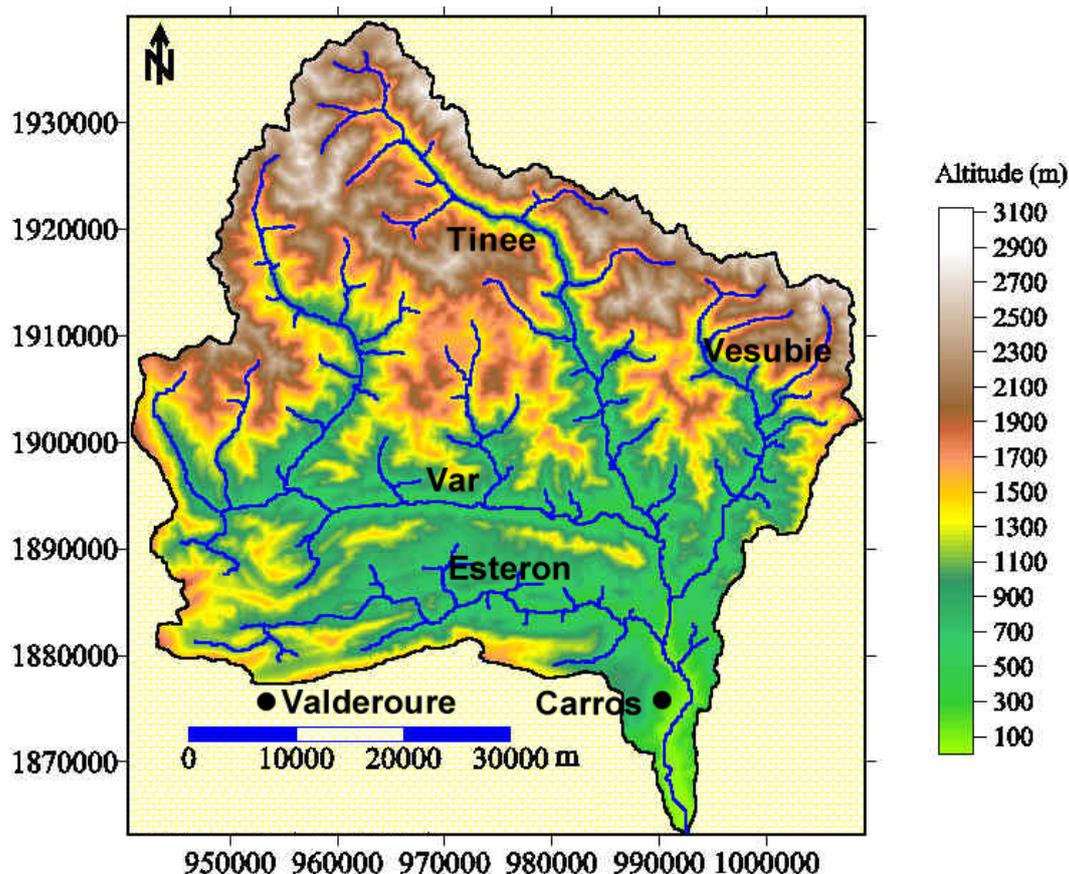


Figure II.14 : Topographie du bassin versant du var (Geoman, 1997).

Le bassin du Var est caractérisé par une très forte hétérogénéité géologique. D'une manière synthétique, quatre grandes familles de formations peuvent être individualisées:

- une large zone cristalline et métamorphique autour des reliefs du massif de l'Argentera-Mercantour. Des affleurements de ces formations occupent la partie est du bassin versant ;
- des successions Mésozoïques et Cénozoïques de l'arc de Castellane qui sont représentées d'une part par des séries calcaires et marno-calcaires ainsi que par les grès d'Annot. Ces formations occupent la partie sud/est du bassin ;
- des successions du Permien, majoritairement pelitiques, qui affleurent dans la partie centrale du bassin versant ;
- des formations Pliocènes dans la basse vallée du Var et qui rassemblent des poudingues et des marnes bleues.

Toutes ces formations géologiques supportent des sols qui ont tous comme caractéristique d'être minces et rapidement saturés lors des précipitations. Cette spécificité favorise le processus de ruissellement.

1.1. Précipitations, débits et aménagement

Le régime des précipitations qui affecte le bassin versant du Var est typique du versant méditerranéen du massif des Alpes. La lame d'eau précipitée annuelle est en moyenne de 815 mm sur l'ensemble du bassin et se trouve concentrée en une période qui varie de 65 à 80 jours. La dynamique des processus hydrologiques de surface est essentiellement déterminée par des événements pluvieux intenses qui interviennent en général en automne et, dans une moindre mesure, par la fonte de la couverture neigeuse lors du printemps. Les crues majeures suivent en général ce calendrier avec une préférence pour les premiers mois de l'automne. En période estivale, les débits dans le secteur aval du Var sont particulièrement faibles sans toutefois s'annuler totalement comme pour le Paillon: une valeur de l'ordre de 10 m³/s est fréquente. De façon générale, les débits à l'intérieur du bassin sont relativement mal connus: les principaux affluents ne font pas l'objet d'un suivi hydrométrique systématique (uniquement 2 stations limnimétriques gérées par la DIREN en 1994 sur le cours du Var) et seules deux périodes de mesures (1974-1976 et 1985-1994) sont disponibles dans le secteur aval. Cette absence de mesures qui peut être expliquée par différentes raisons comme la difficulté de mettre en place un système capable de proposer une évaluation cohérente des débits dans un cours d'eau dont le lit est en permanente évolution, induit une méconnaissance des processus hydrologiques propres au bassin et particulièrement ceux liés à la dynamique des crues.

Le secteur aval de fleuve - soit environ 25 km depuis la confluence avec l'Estéron - se développe dans l'environnement d'un delta qui s'est mis en place à la fin du tertiaire. Dans cet ensemble sédimentaire assez hétérogène, un réseau hydrographique très ramifié s'est développé. Cet environnement s'avère une contrainte majeure pour les premiers occupants de la région qui vont systématiquement éviter la plaine du Var. Néanmoins, les premiers aménagements du cours inférieur du Var remontent au XVI^e siècle, mais jusqu'au XIX^e siècle aucune mise en valeur agricole réelle n'est entreprise et seuls les coteaux à l'abri des marais insalubres et des inondations sont cultivés.

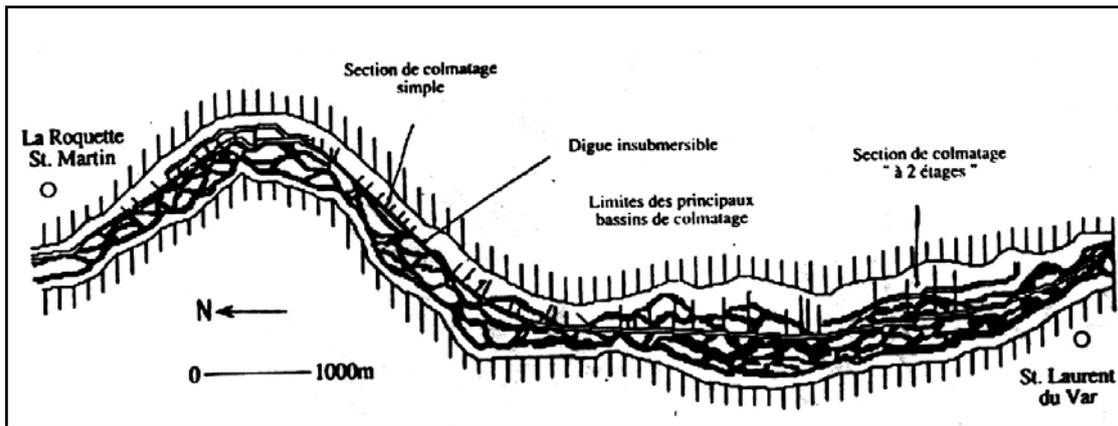


Figure II.15a : La basse vallée du Var en 1870 (d'après Girel et Vigan).

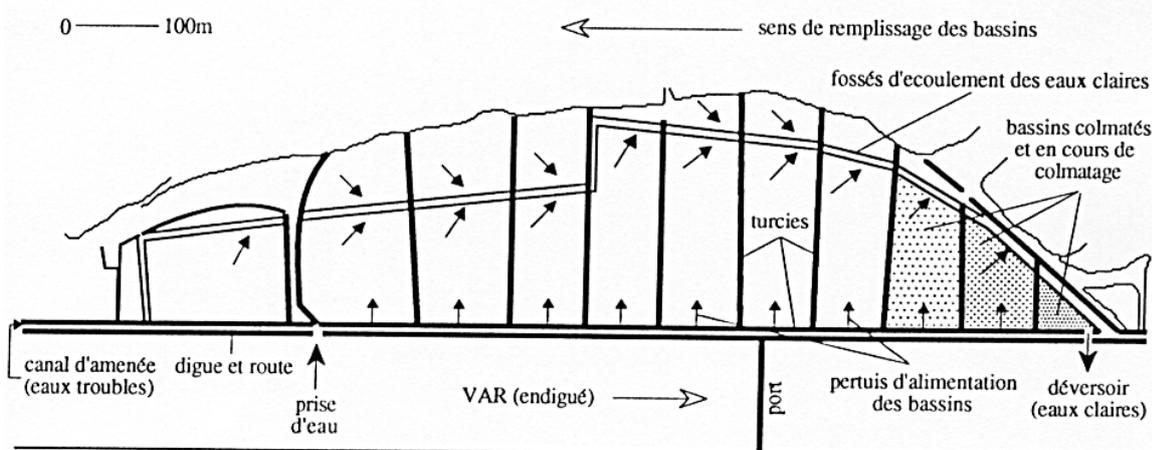


Figure II.15b : Principe de colmatage aval/amont utilisé sur le Var (d'après Girel et Vigan).

Au XIX^e siècle, les travaux d'endiguement commencent afin de concentrer le chevelu complexe du lit (Fig. II.15a) en un chenal régulier (Fig. II.15b). A cette démarche s'ajoutent les premiers projets d'aménagement d'ampleur qui ont pour objectif de faire de cette large vallée alluvial une riche plaine agricole en récupérant des espaces cultivables entre le lit majeur et le pied des coteaux. Cet aménagement s'appuie sur un réseau d'irrigation combiné à un système d'alluvionnement artificiel. Le principe général est celui du rétrécissement progressif du lit par des digues parallèles, derrière lesquelles sont aménagées les futures terres à cultiver.

Les premières interventions eurent lieu en 1762, mais surtout sous la Restauration. Durant cette période, un endiguement continu en roche dure fut mis en œuvre, ainsi qu'un projet de travaux de colmatage permettant le dépôt d'alluvions fertiles sur les terrains récupérés sur le lit majeur en contrebas de la grande digue. Cet alluvionnement artificiel fut poursuivi pendant plusieurs années et permit de recouvrir les cailloux et les poudingues d'une épaisseur de limons suffisante pour les transformer en sols exceptionnels.

Un endiguement assez haut pour contenir les plus fortes crues et assez large pour permettre un écoulement normal des hautes eaux était nécessaire. Les travaux furent réalisés dès 1844 pour la rive gauche (la plus exposée aux crues) et s'achevèrent en 1891: endiguement, élargissement du couronné de la digue pour y

faire passer la route et la voie de chemin de fer, colmatage. L'aménagement de la rive droite fut plus tardif car moins rentable du point de vue des terrains à gagner sur le lit majeur. Cependant ces travaux devinrent nécessaires au regard des inondations récurrentes provoquées par l'endiguement de l'autre rive. Les travaux débutèrent en 1867, et la construction de plusieurs tronçons s'échelonna jusqu'en 1911. Ce n'est qu'à partir de 1952 qu'un ouvrage unique fut conçu (Ceccarelli, 1962).

Le comportement morphologique du fleuve dans la basse vallée a été modifié de façon appréciable, aussi bien par la construction au cours des deux derniers siècles d'une plaine alluviale à l'aide de digues et casiers, que par des extractions démesurées des alluvions depuis la fin de la seconde guerre mondiale. A l'aval de sa confluence avec l'Estéron, le fleuve occupait auparavant la totalité de la vallée entre les pieds des collines, avec un lit en tresses dans lequel les flots pouvaient remodeler continuellement la forme des bancs et des chenaux. Les travaux précités l'ont transformé en un canal de forme transversale à peu près trapézoïdale, quasi rectiligne - à part deux changements de direction - dans lequel le mouvement des bancs et chenaux est fortement limité; la morphologie a été rendue artificielle.

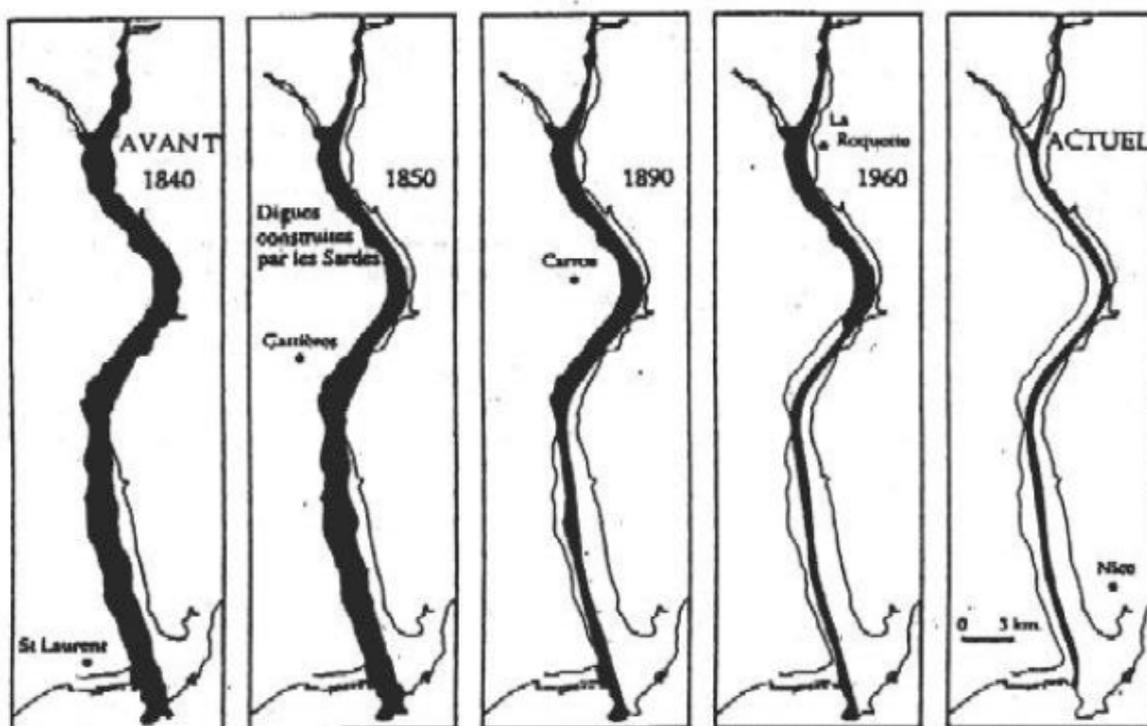


Figure II.16 : Evolution de la canalisation du Var (d'après Guglielmi)

Pour remédier à la baisse du lit consécutive à tous ces travaux, neufs seuils fixes - les numéros 2 à 10, initialement chacun avec une chute de l'ordre de cinq mètres - furent construits du kilomètre 7 jusqu'au kilomètre 15,5 en amont de l'embouchure. Un seuil de faible chute de 1,5 mètres, appelé seuil n°1, se trouve un peu en amont de l'embouchure et a pour objectif d'empêcher l'intrusion d'eau salée dans les nappes d'eau douce qu'hébergent les alluvions du Var, mais aussi de protéger le Pont Napoléon III.

La construction d'autres seuils plus en amont du n°10, tel que prévu initialement, ne fut pas réalisée, à l'exception cependant du seuil n°16, situé à 2 kilomètres en amont de la confluence de l'Estéron et destiné à protéger le Pont Charles-Albert contre

l'érosion du lit. Du fait de l'érosion progressive à l'aval des seuils 2 et 16, provoquée par l'arrêt temporaire des transports par charriage, les seuils 2 et 16 étaient dimensionnés pour tenir avec des chutes plus élevées, de l'ordre de 8,5 m pour le seuil n°2 et de 6 m pour le seuil n°16. Le pont de La Manda a été construit juste à l'amont du seuil n°7, qui est sensé le protéger de l'érosion du lit. La construction des seuils a commencé en 1971 et fut terminée en 1986. Cette réalisation est donc extrêmement récente au regard des échelles de temps morphologiques.

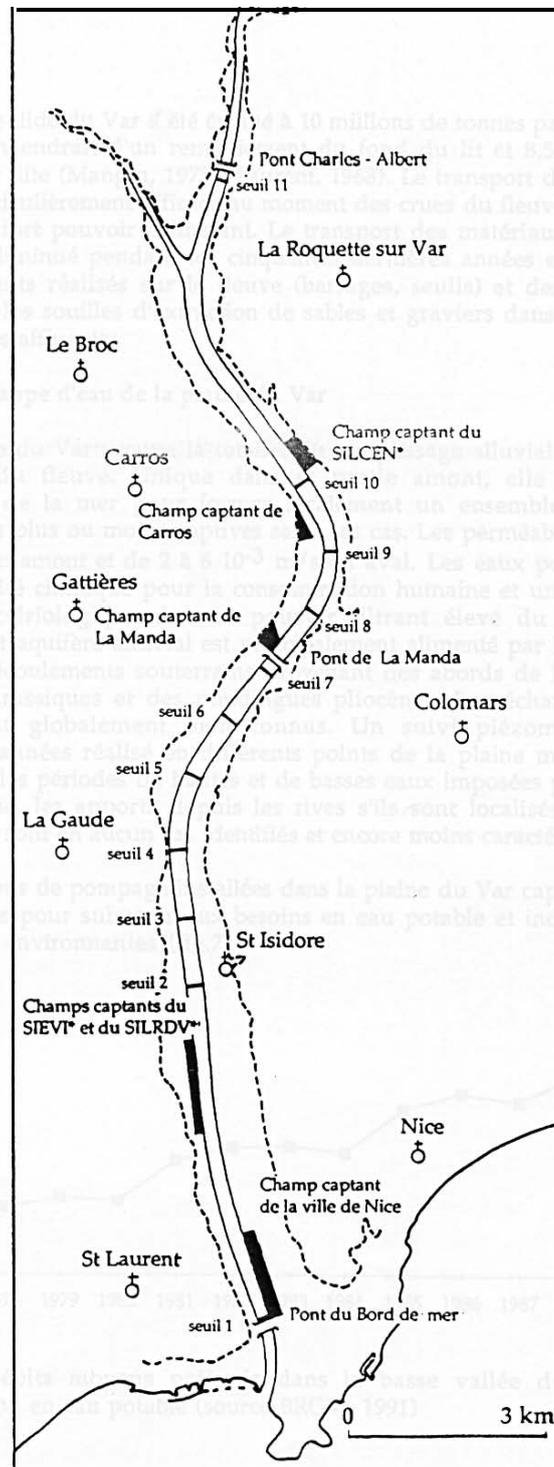


Figure II.17 : Localisation des seuils dans la basse vallée du Var (d'après Guglielmi)

Chaque seuil - 2 à 16 - a été équipé d'une centrale hydroélectrique de basse chute, turbine type bulbe, d'une puissance installée variant initialement entre 1.094 kW (seuil n°7) et 2.425 kW (Seuil n°2). La centrale et sa route d'accès forment une diminution de longueur du déversoir des seuils et induisent des écoulements obliques des flots après leur passage sur ceux-ci. Toutes les centrales se situent en rive gauche, à l'exception de celle au seuil n°16. Une route longe la rive gauche entre les seuils n°2 et n°10, mais a été détruite en partie.



Figure II.18 : Confluence de l'Estéron avec le Var (source I.G.N.)

Suite à la construction des seuils, le transport solide par charriage a cessé et tous les seuils et les biefs amont se sont remplis d'alluvions fines, allant des graviers fins aux limons. Entre les seuils n°2 et n°10, une végétation abondante – véritables forêts - s'est développée au lieu du lit naturel formé de cailloux sans végétation et parfois associé à des arbustes de petites dimensions pouvant pousser sur certains bancs de sédiments.

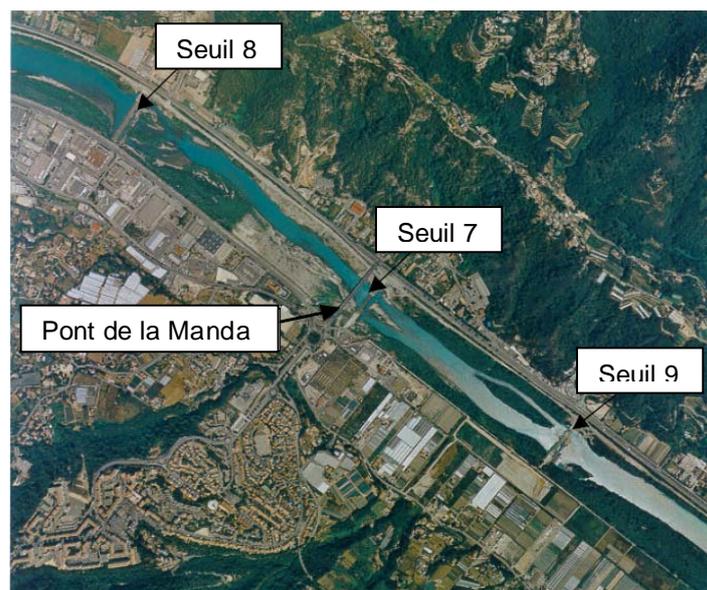


Figure II.19 : Basse vallée du Var – Seuils 8, 7 & 6 (source I.G.N.)

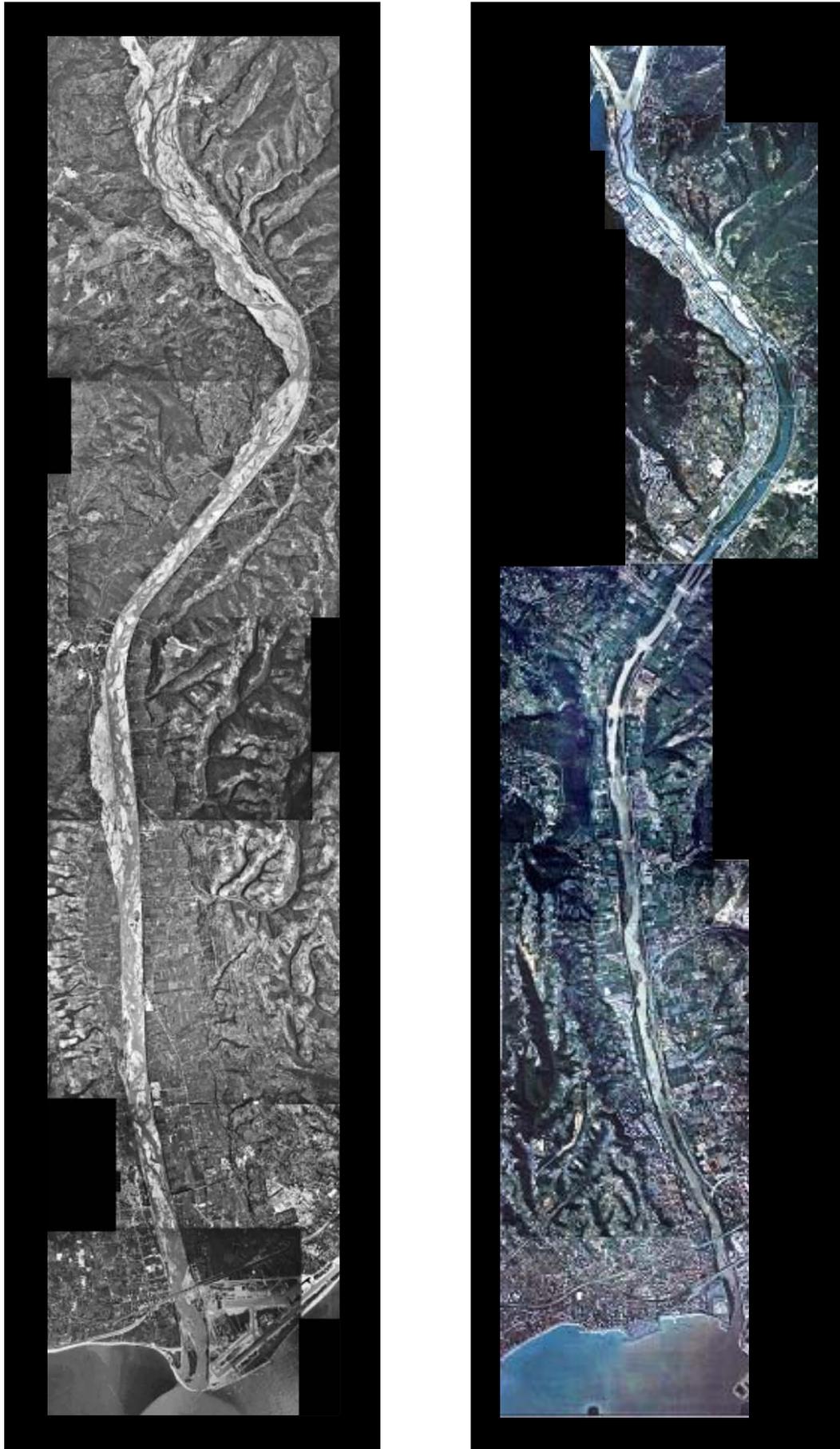


Figure II.20 : Basse vallée du vallée du Var en 1955 (gauche) et 1998 (droite) (source I.G.N.)

2. La crue de Novembre 1994

La crue du 5 novembre 1994 est sans conteste l'événement le plus spectaculaire enregistré dans la basse vallée du Var. La crue intervient après un épisode pluvieux exceptionnel non pas tant dans ses intensités mais dans son extension spatiale qui affecte plus des 2/3 du bassin versant. Cette situation n'est pas sans rappeler l'événement qui a affecté le bassin de l'Ouvèze en septembre 1992 (Gourbesville et al.) ou la crue du Rhône de décembre 2003. Les précipitations sont engendrées par un front dépressionnaire qui atteint le bassin du Var à partir du 2 novembre et qui va se concentrer sur les reliefs (Cf. Fig.II.21). Les précipitations vont se développer jusqu'au 5 novembre en produisant un volume précipité cumulé moyen de plus de 350 mm en moins de 72 heures.

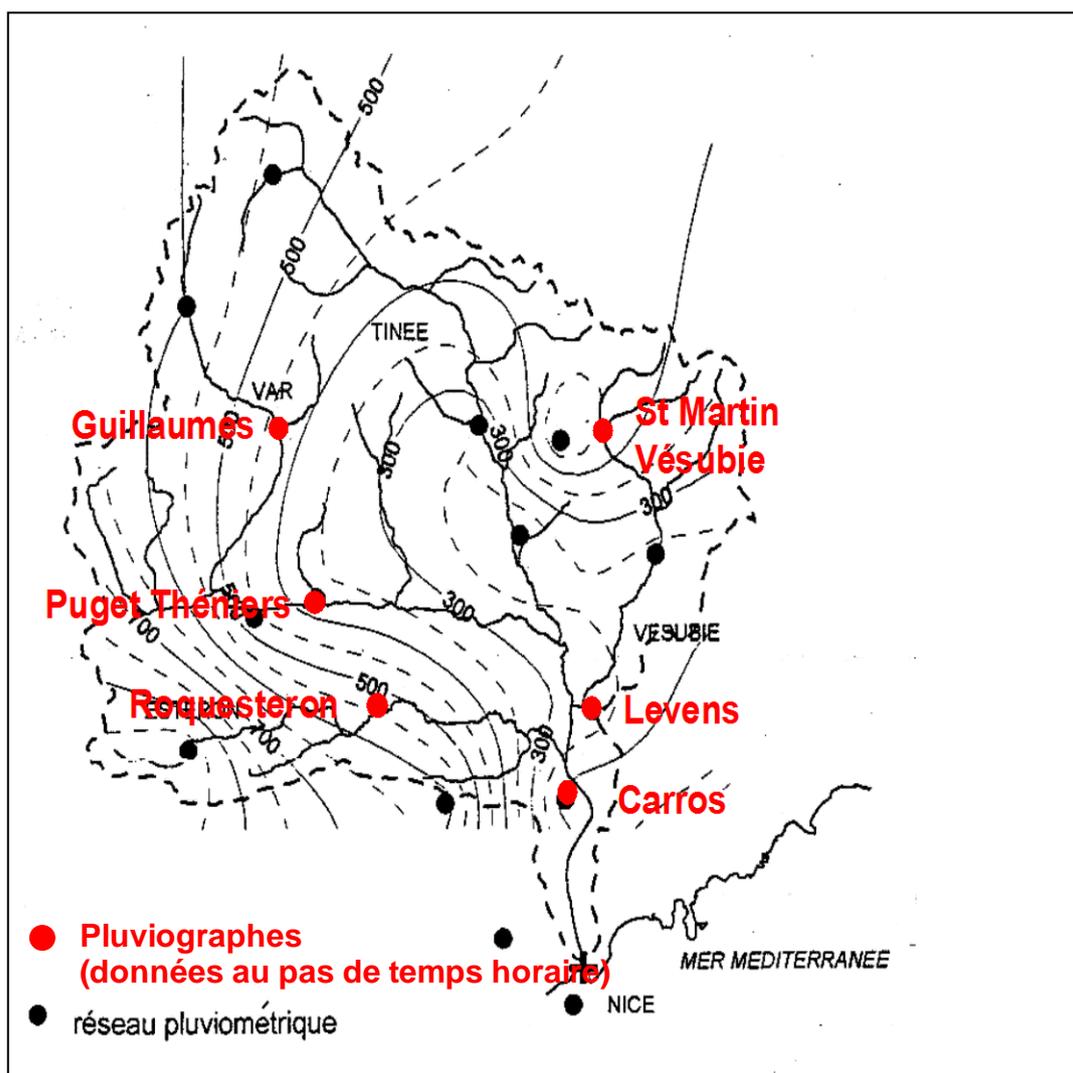


Figure II.21 : Précipitations cumulées du 2 au 5 novembre 1994 (CEMAGREF 1996)

Certaines stations situées dans la partie amont du bassin versant enregistreront lors de cet événement une valeur cumulée supérieure à 700 mm (Cf. Fig. II.21). Paradoxalement, à proximité de la côte, dans la basse vallée – station de Carros en particulier - les précipitations restent modestes et ne dépassent pas les 100 mm cumulés. (Cf. Fig. II.21 & II.23).

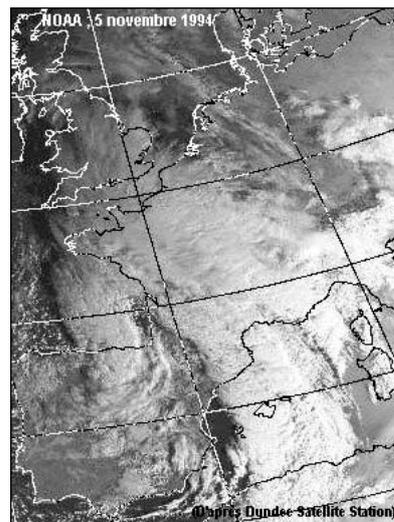
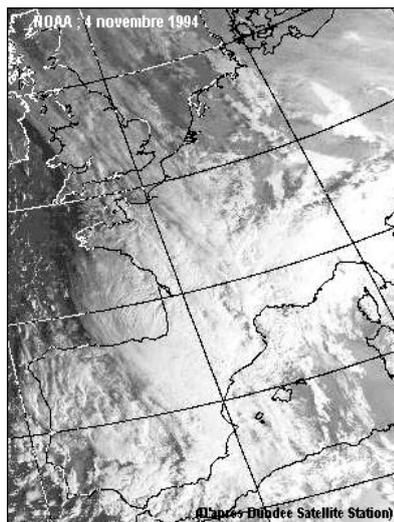
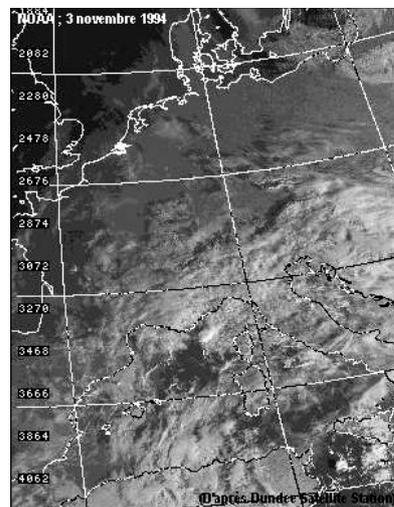
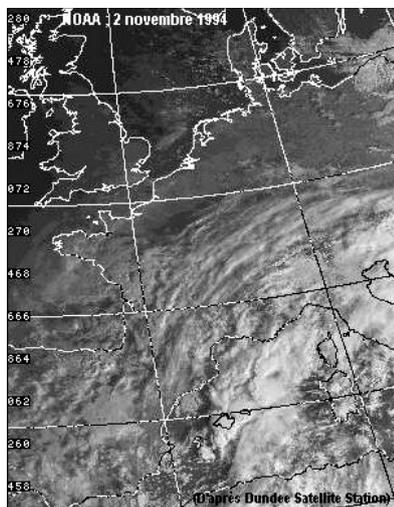
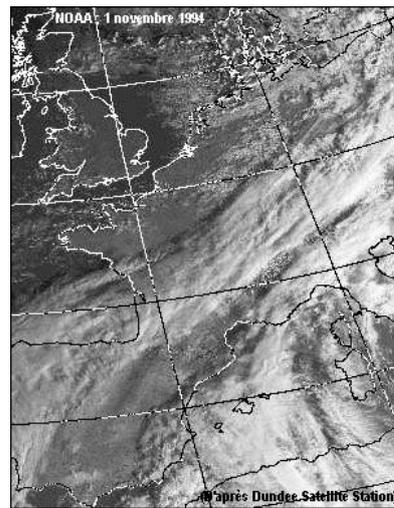
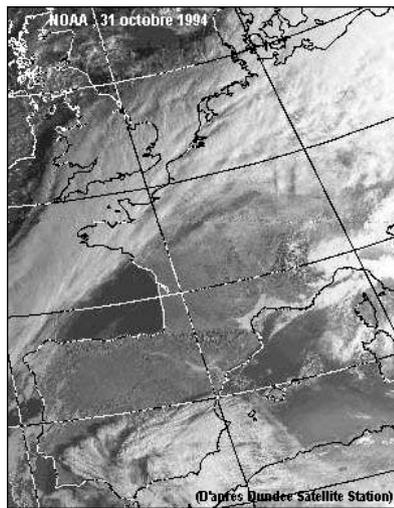


Figure II.22 : Images satellitaires enregistrées lors de l'événement de novembre 1994 (Source NOAA)

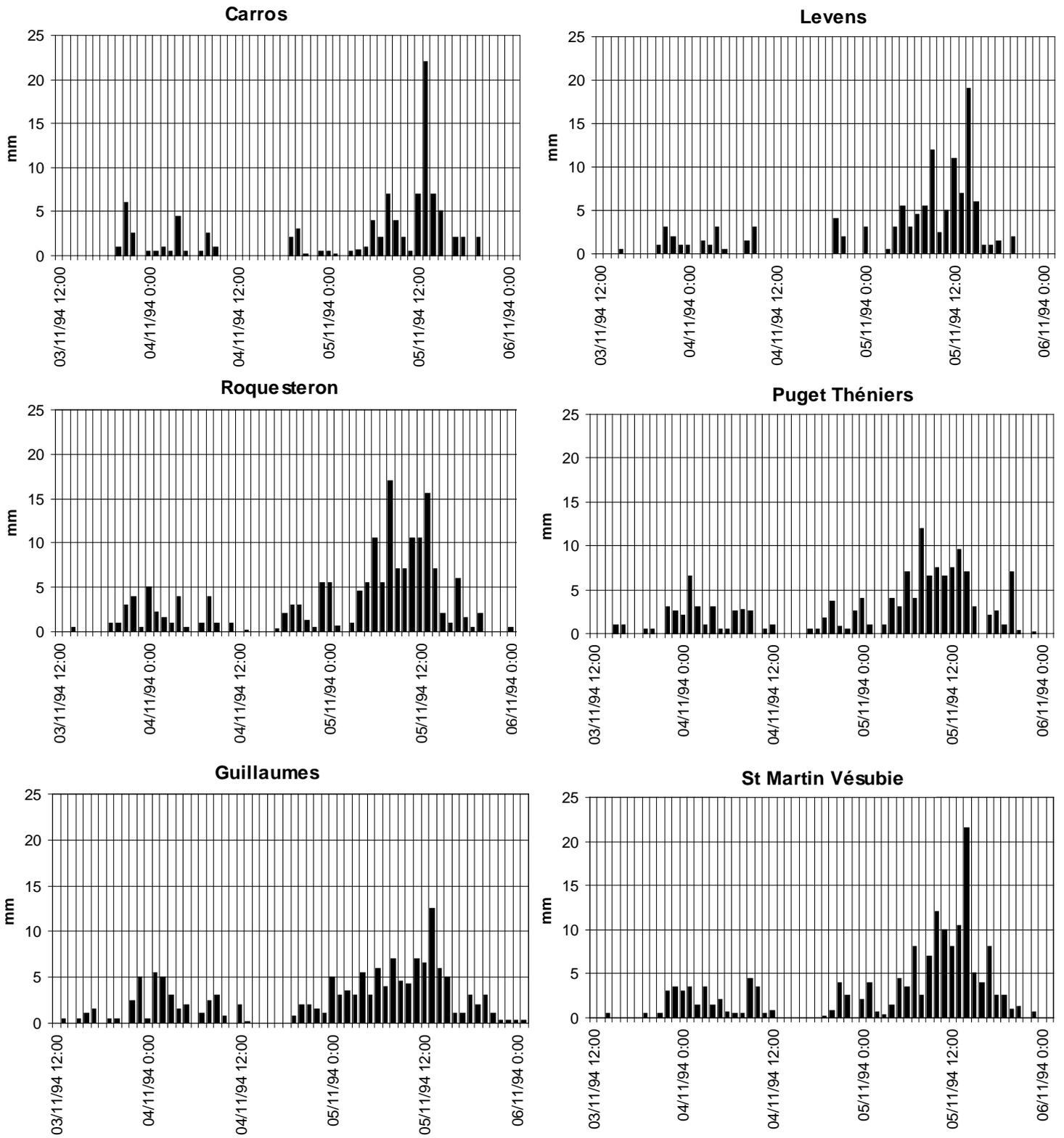
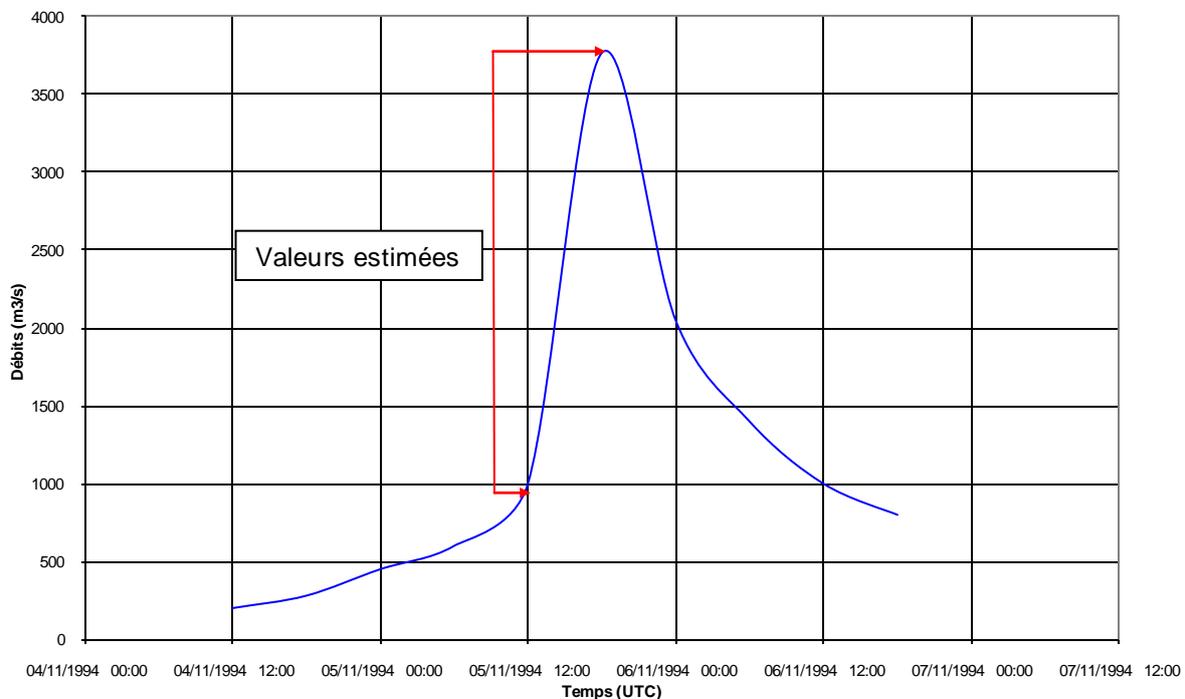


Figure II.23 : Précipitations enregistrées dans la bassin versant du Var lors de l'événement de Novembre 1994.

Compte tenu de la distribution temporelle de la pluie, l'épisode a permis une saturation rapide des sols. Ces sols, par nature faiblement épais, avaient déjà été humidifiés lors des épisodes précédents de l'automne. La phase intense survenant à partir du 4 novembre va donc induire un ruissellement particulièrement important. Cet rendement exceptionnel se retrouve dans les écoulements repris par le réseau hydrographique. Malheureusement le réseau limnimétrique s'avère insuffisant pour quantifier ce processus compte tenu du nombre limité de points de mesure et surtout par leur mise hors d'état de fonctionnement lors de l'évènement. Les seules valeurs disponibles sont celles présentées dans le document rédigé par le CEMAGREF (CEMAGREF, 1996) et dont une synthèse est proposée par la figure II.25.

L'incertitude la plus importante réside sans doute dans l'estimation du débit dans la partie aval de la basse vallée. En effet, la station limnimétrique implantée sous le pont Napoléon III a été rapidement mise en hors service - à partir de $800 \text{ m}^3/\text{s}$ - et l'hydrogramme de la crue a donc été reconstitué à partir d'informations sur les niveaux et l'utilisation de la courbe de tarage établie pour la station. L'estimation des $3770 \text{ m}^3/\text{s}$ à 19 heures est donc très incertaine.



**Figure II.24 : Hydrogramme reconstitué au pont Napoléon III
(d'après DIREN Paca & CEMAGREF 1996)**

Plusieurs remarques s'imposent:

- l'extrapolation et la validité de la courbe de tarage utilisée doivent être remises en cause. En effet, l'établissement de la relation hauteurs/débits a été établie à partir d'un nombre limité de jaugeages - moins de 10 - réalisés dans des conditions de débit très faibles - moins de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ - à l'exception d'une seule valeur de l'ordre de $600 \text{ m}^3/\text{s}$;
- la crue a induit un processus de transport sédimentaire majeur. La géométrie de la section de jaugeage a donc vraisemblablement connu un approfondissement lors du pic de la crue avant d'être progressivement

rechargée en matériaux lors de la phase de dépôt qui accompagne la décrue. Ce processus qui peut, dans le cours du Var, induire des variations supérieures à 2 mètres, n'a pas été pris en compte lors de l'application de la courbe de tarage. Une procédure d'évaluation de la modification de la section de jaugeage et permet de réduire très notablement le risque d'incertitude (Léonard & al. 2000) ;

- lors de la crue, les seuils 2 et 3 implantés dans le secteur aval de la basse vallée ont été emportés à la faveur d'un phénomène de rupture. Cet événement a provoqué une augmentation artificielle du débit dans une proportion qui peut être évaluée à $500\text{m}^3/\text{s}$ compte tenu de la morphologie et du volume des retenues développées à l'amont de ces ouvrages. L'hydrogramme aval tel que proposé par la DIREN, ne laisse pas apparaître une morphologie caractéristique d'une rupture mais indique, par sa forme "lisse", la possibilité d'une rupture lors du maximum de la crue ou lors de la phase de décroissance.

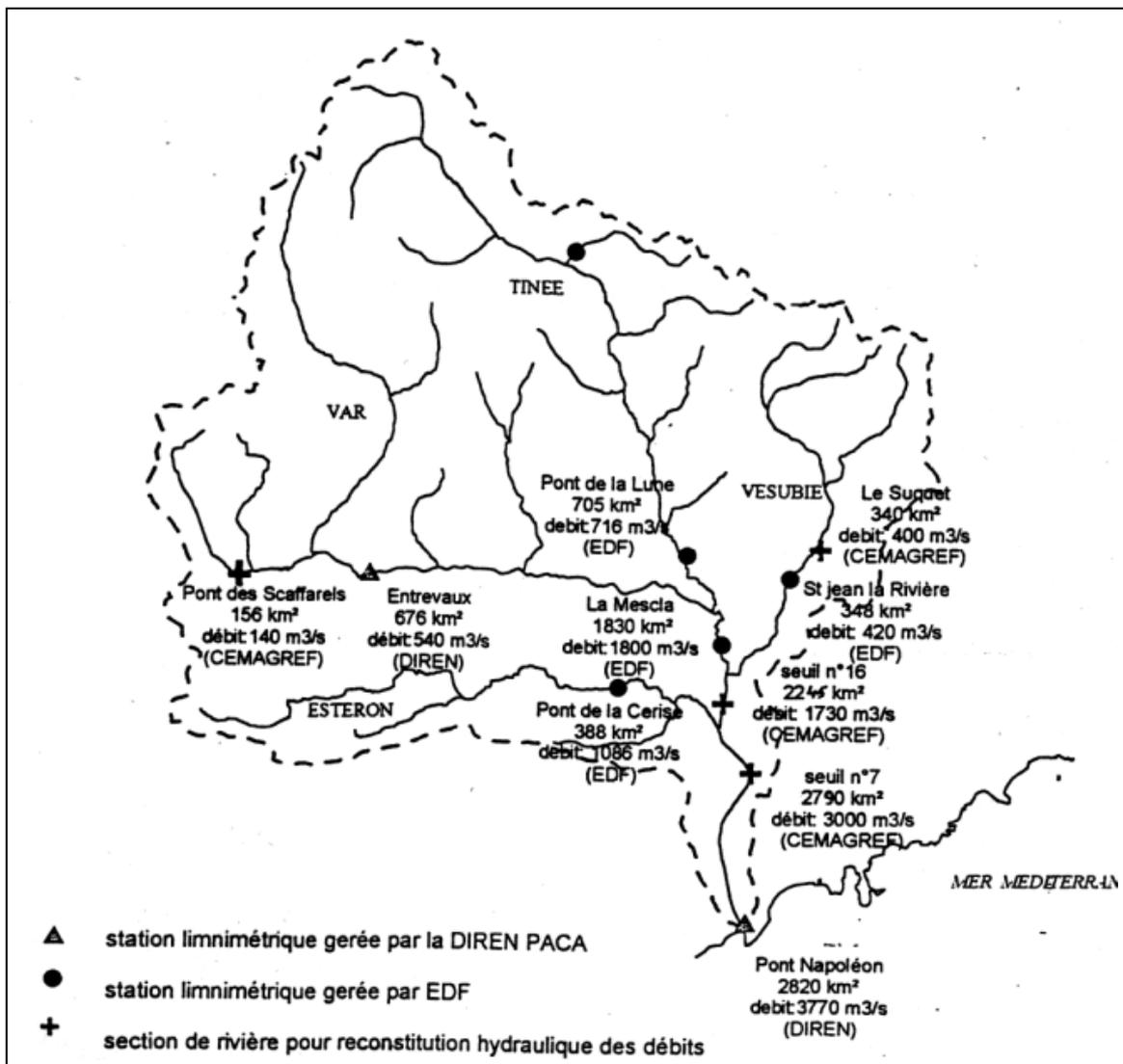


Figure II.25 : Débits maxima mesurés et évalués lors de la crue du 5 novembre 1994 (CEMAGREF, 1996)

Lors de la crue, l'endiguement s'est avéré insuffisant pour permettre une évacuation sans débordement. Les digues ont été submergées en plusieurs points - zone industrielle de Carros, rive droite - et une brèche en bordure de l'autoroute A8 - secteur aval, Nice rive gauche - aménagée dans le cadre de la réalisation de différents opérations de travaux, a été atteinte. Les volumes se sont alors déversés dans le lit majeur, empruntant la chaussée de l'autoroute et rejoignant la cote après avoir submergé les installations aéroportuaires de Nice- Côte d'Azur sous un tirant d'eau supérieur à 0,4 m.

Si, par chance, la crue n'a pas provoqué de victime ou de blessé, l'ampleur du phénomène a surpris la population locale qui se pensait à l'abri de ses digues. De nombreuses infrastructures ont été endommagées et en particulier des chaussées - routes nationales et départementales - des ouvrages d'art et de nombreux bâtiments. L'estimation des dommages directs liés à cet évènement s'élève à 23 millions d'euros. L'aéroport a été contraint d'interrompre ses opérations pendant une semaine. De manière anecdotique, le centre de gestion administratif des crues était implanté dans les sous-sols de la cité administrative située en bordure du fleuve. Cette dernière fût l'un des premiers bâtiments inondés...

Les photographies suivantes permettent d'évaluer l'intensité du phénomène et surtout de réaliser l'importance des dommages causés par cette crue.

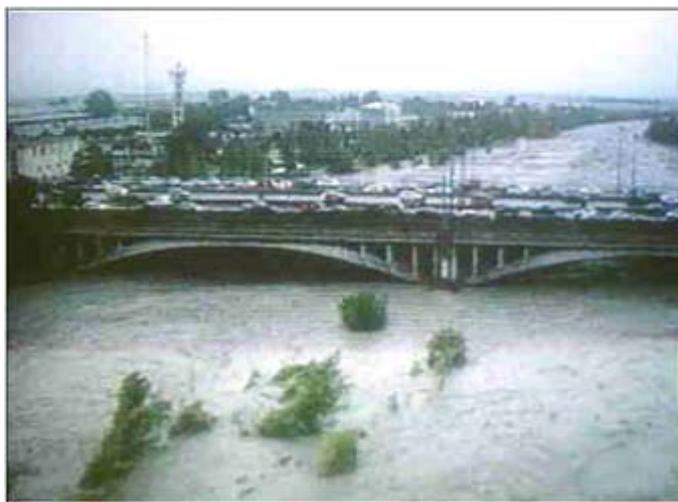


Figure II.26 : Pont Napoléon III – Nice , le 5 novembre 1994 à 19:00 (photo Nice Matin)



Figure II.27 : Autoroute A8 à proximité du centre administratif - Nice 05.11.1994 (photo Nice Matin)



Figure II.28 : Autoroute A8 à proximité de l'aéroport de Nice - Nice 05.11.1994 (photo Nice Matin)



Figure II.29 : RN 202 – Basse vallée du Var - le 6 novembre 1994 (photo Nice Matin)



Figure II.30 : Secteur aval de la basse vallée du Var - le 6 novembre 1994 (photo Nice Matin)

Lors de la crue de novembre 1994, le seuil n° 2 s'est rompu, entraînant l'évacuation des dépôts d'alluvions fins et la rupture du seuil n° 3. Les centrales des seuils n° 2 et n° 3, restées debout lors de cette crue, ont été déstabilisées depuis lors par les érosions ; la centrale du seuil n° 3 s'est effondrée dans le lit du Var en 2000.