



Programme de Recherche 2008

Financé par le Conseil Général de l'Isère

## Rapport Final

# “ Reconstitution de la situation hydrométéorologique correspondant à la crue de l'Isère de 1859”.

Coordinateur :

**Charles OBLED**

Grenoble-INP, Laboratoire des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)

Participants :

**Annick AUFRAY\*, Anne CLAVEL\*\*, Sylvie JOURDAIN\*\*\***

Météo-France, \*Direction Interrégionale Centre-Est,

\*\*Centre Départemental de la Météorologie de l'Isère, \*\*\* Direction de la Climatologie,

...

**Aurélien BEN DAOUD, Eric SAUQUET, Michel LANG**

Cemagref – Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique Lyon,

...

**Gérémy PANTHOU**

Grenoble-INP, LTHE

...

**Frédéric GOTTARDI, Remy GARCON**

EdF - DTG

...

**Alain GAUTHERON**

DDE38- Service de Prévision des Crues Alpes Nord

**Novembre 2009**



## Résumé :

La reconstitution de la séquence hydrométéorologique ayant conduit à la crue de l'Isère des 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> Novembre 1859 a été menée en 4 étapes. La première, conduite par MétéoFrance, a consisté à rechercher, collecter et critiquer les données encore disponibles aujourd'hui, notamment les stations mesurant la pression atmosphérique en France. Cela a permis de tracer pour tout le mois d'octobre 1859 les champs de pression au niveau de la mer, et de les interpréter en terme de circulation et types de temps. Ensuite, pour chaque journée de 1859, ces cartes ont été utilisées par le CEMAGREF de Lyon pour rechercher, dans la période récente (1953-2005) des situations analogues (~35) mais dont on connaissait cette fois les précipitations sur le bassin de l'Isère, d'où une idée probabiliste des quantités potentiellement tombées en 1859. En utilisant ce signal, ainsi que les précipitations mesurées en 1859 sur quelques stations, malheureusement toutes à la périphérie du bassin, l'INPG-LTHE a essayé de proposer un scénario vraisemblable des précipitations, mais aussi des températures, sur l'Isère et ses différents sous-bassins. Après expertise et modification par EdF et MétéoFrance, ce scénario a été introduit dans un modèle Pluie-Neige-Débit par le SPC-Alpes Nord. La comparaison entre débits simulés et observés à Grenoble sur le mois d'octobre 1859, et l'analyse fine des situations les plus ressemblantes, a conduit à moduler encore un peu le scénario, insuffisamment contraint par les rares stations pluviométriques disponibles. En assimilant les données de débits, qu'il reproduit alors correctement, le scénario final montre l'importance des périodes successives d'humectation du bassin par les pluies du 7 au 20 octobre, d'accumulation de neige à basse altitude entre le 21 et le 30, puis son relargage sous l'effet du réchauffement et des pluies intenses des 31 oct. et du 1<sup>er</sup> nov. C'est cette séquence exceptionnelle qui permet d'expliquer l'ampleur de la crue et de mieux apprécier sa probabilité de retour. On montre aussi la cohérence du scénario proposé avec des données qualitatives comme la réponse des torrents, mais aussi en le comparant avec des épisodes récents présentant certaines caractéristiques communes.

## Abstract :

Reconstructing the hydrometeorological scenario that has led to the 1859 historical flood of the Isère river has been performed in four steps. In the first one, MétéoFrance has searched for, collected, and criticized old data sets still available, in particular at stations measuring the atmospheric pressure, in France or nearby. This allowed to reconstruct sea level pressure fields for the month of October 1859, and to interpret them in terms of circulation and weather types. For each single day of 1859, this pressure map was used by CEMAGREF to sort out, within the recent period (1953-2008), analog situations (~35) for which we further have the precipitations on the Isère catchment, giving therefore a probabilistic hint of what has potentially been received in 1859. Using this signal, combined with the precipitation actually observed in 1859 at a few stations, unfortunately all located outside the catchment, INPG-LTHE has proposed a likely scenario for precipitation amounts, but also for temperature, over the whole catchment and several subbasins. This scenario has gone through the expertise of EdF and MétéoFrance forecasters, and then input in a Snow-Rainfall-Runoff model by the SPC Alpes Nord. . Comparisons between simulated and observed daily discharges lead to some further tuning of the scenario, insufficiently constrained by the few rain gauges available. After the assimilation of the downstream discharges, the resulting scenario reproduces well the flood peak and illustrates how important was the links between a wetting phase by the 7 to 20<sup>th</sup> October rainfalls, then the build up of a snowpack even at low elevation from the 21<sup>st</sup> to the 30<sup>th</sup>, and then its washing out by the strong warming and intense rains of October 31<sup>st</sup> and November 1<sup>st</sup>. This is this very unusual sequence that explain the large return period of this flood. The proposed scenario is shown to be consistent also with qualitative data like the quasi generalised response of the torrents but also through its comparison with recent events sharing some similarities.



## **TABLE DES MATIERES**

<b><i>Introduction</i></b> – PRESENTATION DU RAPPORT	<b><i>Pages 7 à 9</i></b>
<b><i>Première Partie :</i></b>	<b><i>Pages 11 à 27</i></b>
CONTEXTE METEOROLOGIQUE DES MOIS D’OCTOBRE ET NOVEMBRE 1859	
par <b>Annick Auffray*</b> , <b>Anne Clavel**</b> , <b>Sylvie Jourdain****</b> , <b>Météo-France</b> , *Direction Interrégionale Centre-Est - Lyon, ** Centre Départemental de la Météorologie de l’Isère, *** Direction de la Climatologie, Toulouse	
<b><i>Deuxième partie :</i></b>	<b><i>Pages 29 à 45</i></b>
RECONSTITUTION DU RISQUE NIVO-PLUVIOMETRIQUE DURANT LE MOIS D’OCTOBRE 1859 PAR UNE TECHNIQUE D’ANALOGIE	
par <b>Aurélien Ben Daoud*</b> , <b>Eric Sauquet*</b> , et <b>Charles Obled**</b> *Cemagref – Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique **INPGrenoble - Laboratoire d’étude des Transferts en Hydrologie et Environnement	
<b><i>Troisième partie :</i></b>	<b><i>Pages 47 à 71</i></b>
RECONSTITUTION DE SCENARIOS DE PRECIPITATIONS ET DE TEMPERATURES SUR LE BASSIN DE L’ISERE ENTRE LE 1 <sup>ER</sup> OCTOBRE ET LE 5 NOVEMBRE 1859	
par <b>Jeremy Panthou et Charles Obled*</b> , INPGrenoble, Laboratoire LTHE <b>Alain Gautheron**</b> , Service de Prévision des Crues alpes-Nord <b>Remy Garçon et Frédéric Gottardi****</b> , Electricité de France, Division Technique Générale	
<b><i>Conclusions</i></b>	<b><i>Pages 73 à 75</i></b>
<b><i>ANNEXES 1 à 3</i></b>	<b><i>Pages 77 à 100</i></b>



# INTRODUCTION

## 1. Rappel des objectifs du projet :

### 1.1 Objectifs :

Les études menées avant l'année 2006 en vue de commémorer le 150<sup>ème</sup> anniversaire des grandes crues de la Loire, mais aussi du Rhône et de la Seine, en 1856, avaient démontré qu'il était possible encore aujourd'hui de reconstituer, au moins partiellement, le déroulement de ces évènements, et surtout d'en tirer parti pour faire face aux problèmes actuels de prévention et de protection. A l'étranger, des exemples analogues l'ont illustré, en Allemagne sur le Neckar par exemple. C'est pourquoi des propositions d'études avaient été faites dès 2006 pour profiter du 150<sup>ème</sup> anniversaire de la crue de l'Isère et en préparer la commémoration. Il aura malheureusement fallu attendre 2008 pour trouver, grâce au Conseil Général de l'Isère et à travers le Pôle Grenoblois Risques Naturels, les moyens nécessaires et pour entreprendre le travail qui est décrit ci-après...

Pourtant, les crues de l'Isère constituent une préoccupation majeure pour le bassin grenoblois, du fait de l'étendue et de la simultanéité des dommages qui pourraient en découler. De grands aménagements ont été réalisés ou sont en voie de l'être (Projet SYMBHI - Isère Amont), prenant justement pour référence la crue des 1<sup>er</sup> et 2 Novembre 1959. Toutefois, si les effets de cette crue (hauteurs d'eau, superficies inondées, dommages résultants...) ont été relativement bien observés et répertoriés à l'époque, les causes de l'évènement sont par contre beaucoup moins connues et documentées...

D'abord, on connaît mal les situations météorologiques qui ont prévalu dans les jours précédant immédiatement la crue. La raison en est que les réseaux météorologiques n'existaient pas encore, ou plus exactement, pas sous une forme exploitable telle que nous la connaissons de nos jours (la décision de création d'un service météorologique régulier a été prise à la suite du naufrage de la flotte franco-britannique en Crimée, le 14 novembre 1854; et la fin de la décennie 1850 est encore une période de construction d'un réseau français de 24 stations; en outre, la Savoie ne relevait pas de la juridiction française à cette époque). Des données étaient cependant disponibles avant ces dates, collectées et publiées par différentes institutions ou sociétés savantes, mais dispersées aujourd'hui dans diverses archives. Ainsi, un effort important de recherche d'information était indispensable avant toute capacité d'étude de la situation météorologique.

Cette recherche d'informations météorologiques devait donc, en priorité, viser à documenter la situation à grande échelle (typiquement sur la France), puis à en préciser les caractéristiques locales. Au départ, il n'était pas envisagé de mener un effort exhaustif au-delà des départements proches de l'Isère mais nous verrons que nous sommes en fait allés bien au-delà... !

On présentait aussi que cette situation présentait certaines particularités, d'après les cumuls de précipitations qu'elle a occasionnés, mais aussi par le contexte météorologique dans lequel elle s'inscrivait. Comme pour les grandes crues de 1856, la saison d'automne 1859 avait été assez agitée puisqu'on signale une crue significative de l'Ardèche le 15 Octobre 1859 (14 m10 à Pont d'Arc contre 16 m80 en 1856- cf. Louis Bourdin 1898). Or ces épisodes antérieurs avaient peut-être pu contribuer à l'humectation des sols, et éventuellement à l'installation des premières neiges en montagne, préparant ainsi le terrain à la crue à venir ?

Plus localement, en ce qui concerne les précipitations, on connaît cependant mal les quantités de pluies tombées sur un nombre suffisant de points de mesures du bassin de l'Isère. L'une des raisons en est que deux Etats se partageaient à l'époque l'administration du bassin: la France et le royaume de Piémont Sardaigne, dont la compétence couvrait les départements actuels de Savoie et Haute Savoie, jusqu'à une quarantaine de km en amont de Grenoble, c'est à dire l'essentiel de la zone réceptrice...

L'administration sarde était certes très attentive aux crues et avait une grande tradition de travaux hydrauliques pour s'en protéger. Elle gardait la mémoire de celles-ci à travers ses archives (cf. Vassalo N. 2002), mais on peut craindre que le rattachement prochain à la France, qui devait avoir lieu quelques mois après, en Mars 1860, ne l'ait un peu détournée de ses pratiques habituelles.

Il fallait néanmoins tenter de récupérer tout ce qui pouvait l'être pour essayer de répondre à des questions comme :

- y avait-il en montagne une couche de neige préalable à l'épisode de fin Octobre 1859 ? Peut-on avoir une idée de sa répartition dans l'espace, jusqu'où descendait-elle en altitude, a-t-on des idées de son épaisseur ?
- que peut-on retrouver comme mesures journalières de précipitations? Permettent-elles de préciser la répartition spatiale de ces pluies? A-t-on une idée de l'altitude de la limite pluie-neige au cours de l'épisode ?...etc

Deux démarches complémentaires étaient donc à envisager, si possible en parallèle :

- une approche hydroclimatologique, basée sur la recherche et l'exploitation quantitative des archives du même nom (relevés d'observations), et qui fera l'objet de ce projet
- une recherche historique, basée sur des archives plus diverses mais où des informations, éventuellement qualitatives, pourront être retrouvées, et qui conforteraient les éléments chiffrés récupérés par ailleurs. Cette recherche n'est pas directement comprise dans ce projet mais a apporté quelques éléments complémentaires.

## **1.2 Déroulement de l'étude :**

On avait distingué, dans la présentation du projet, deux phases distinctes :

- la recherche de reconstitution d'une part de la séquence météorologique,
- et d'autre part celle des champs de précipitations qui ont pu en découler.

Nous verrons dans ce rapport qu'en fait il y a eu plutôt quatre phases :

- a) Recherche et extraction numérique des données météo-pluviométriques, et reconstitution des champs de pression au niveau de la mer, permettant une interprétation en terme de séquence météorologique (acteur principal : Météo-France Toulouse et Lyon).
- b) Analyse des journées de la séquence pluvio-météorologique d'octobre 1859 et recherche d'analogues dans la période récente 1953-2005 (acteur principal : CEMAGREF-Lyon)
- c) Elaboration d'un scénario de précipitations et de températures pour chacun des sept sous-bassins de l'Isère, à partir des distributions des analogues par sous-bassins et des données observées aux stations périphériques (acteur principal : LTHE et MétéoFrance-Grenoble)
- d) Validation hydrologique et améliorations du scénario (acteur principal : SPC-Alpes Nord, LTHE et EdF-DTG)

Cette dernière partie ne figurait pas initialement dans le projet et ne faisait pas l'objet d'un financement. Mais on verra qu'elle a été tout à fait déterminante pour affiner et préciser le scénario. Notre démarche était initialement linéaire et séquentielle : c'est en voulant valider le scénario dans une modélisation hydrologique que certaines incohérences sont apparues, montrant que ce scénario était insuffisamment contraint par l'amont hydrométéorologique, et que la mise en cohérence avec la séquence des débits connus à Grenoble permettait de mieux contraindre notre scénario et de réduire, par cette rétroaction, le champ des possibles. Nous verrons aussi que le modèle hydrologique, comme outil intégrateur, permettra de mieux remonter et hiérarchiser le rôle des différentes phases de la séquence hydrométéorologique dans la genèse de la crue.

Cette étude s'est déroulée pour l'essentiel entre Décembre 2008 et Novembre 2009. On verra en conclusions dans le paragraphes sur les « livrables » les réalisations qu'elle a produites, en sus de ce rapport final.

### **1.3 Contributions en dehors de l'équipe de projet:**

Cette étude a suscité un intérêt certain auprès de partenaires qui ont proposé des contributions substantielles bien que non financées par le projet lui-même.

On citera, parmi les organismes :

- le **SPC Alpes-Nord**, qui a lancé sur ses fonds propres une étude de modélisation hydrologique simplifiée du bassin de l'Isère, susceptible d'accueillir nos scénarios, mais qui s'est retrouvé finalement en interaction directe avec nous au point de faire évoluer de manière déterminantes ces scénarios .
- la **Division Technique Générale d'EdF** qui nous a donné accès à ses données, notamment ses réanalyses pluviométriques, et nous a fait bénéficier de son expertise et de sa connaissance des crues de la période récente
- le Service de Restauration des Terrains en Montagne d'Isère et de Savoie, qui nous ont ouvert leurs archives (M. Ch. PETEUILLE) et fourni le SIG des torrents (M. J-L BOISSET)
- le Service Climatologie de MétéoSuisse Genève, qui nous a fourni les données de Genève et du Grand Saint Bernard

et parmi les individualités :

- M . Luca MERCALLI, Président de la Société Météorologique Italienne, rédacteur en chef de la Revue NIMBUS, pour l'intérêt qu'il a porté à cette recherche et pour les données de Turin et de Gênes.
- M. Sylvain GACHE, chercheur à l'Université de Lyon 2, qui nous a fourni les données d'Annecy.
- Le frère Théodore BERZAL, responsable des archives de l'Association Sainte Famille (Abbaye de Tamié).
- M. Paul JARDIN, ingénieur retraité de la S<sup>té</sup> SOGREAH, qui a soutenu notre travail et mis à disposition ses archives personnelles.
- M. Daniel DUBAND, pour son soutien inconditionnel, toujours stimulant, et occasionnellement critique...

### **1.4 Organisation du rapport :**

Ce rapport est constitué, outre de cette introduction, de trois parties correspondant aux contributions respectives des trois partenaires, ainsi que de plusieurs annexes. Chaque chapitre a été organisé comme une communication indépendante, aux normes habituelles de la Société Hydrotechnique de France. En fait ces chapitres avaient été préparés pour la conférence Isère 1859-2009 organisée par le Pôle Grenoblois Risques Naturels, avec le soutien de Grenoble INP, du SPC-Alpes Nord, d'EdF-DTG et de l'Association Syndicale Drac Isère.

Ils ont été revus et augmentés pour s'intégrer à ce rapport, et éventuellement complétés par des annexes.

Modif.:

Note au lecteur :

Ce rapport, avant d'être mis en ligne sur le site du Pôle Grenoblois Risques Naturels, a fait l'objet d'une évaluation par un rapporteur qui :

- a demandé d'une part des compléments d'informations sur certains points insuffisamment documentés,
- d'autre part a manifesté des désaccords avec certaines hypothèses retenues. Nous les avons fait apparaître en fin du chapitre correspondant en ajoutant un paragraphe « discussions-débats »
- ou encore a considéré que, même si cela n'était pas possible avec les moyens et dans la durée impartie, il serait souhaitable d'aller plus loin dans l'analyse, et que ces perspectives de poursuite du travail méritaient d'être signalées. Là encore, nous les avons fait apparaître en fin de chapitre en ajoutant un paragraphe « perspectives ».

Ces ajouts figurent en bleu avec la mention Modif. pour être facilement repérés avant validation définitive.

*Première Partie :*

# **CONTEXTE METEOROLOGIQUE DES MOIS D'OCTOBRE ET NOVEMBRE 1859**

**par Annick Auffray\*, Anne Clavel\*\*, Sylvie Jourdain\*\*\*\*, Météo-France,**

**\*Direction Interrégionale Centre-Est - Lyon,**

**\*\* Centre Départemental de la Météorologie de l'Isère,**

**\*\*\* Direction de la Climatologie, Toulouse**



# CONTEXTE METEOROLOGIQUE DES MOIS D'OCTOBRE ET NOVEMBRE 1859

**Annick Auffray\*, Anne Clavel\*\*, Sylvie Jourdain\*\*\***

\*Météo-France, Direction Interrégionale Centre-Est, av. Louis Mouillard, 69500 Bron Aéroport

\*\*Météo-France, Centre Départemental de la Météorologie de l'Isère, 1441 rue de Piscine, 38400 Saint-Martin-d'Hères

\*\*\*Météo-France, Direction de la Climatologie, 42, av. G. Coriolis, F-31057 Toulouse

*Les données météorologiques françaises, italiennes et suisses de 1859 sont recherchées afin de préciser les conditions météorologiques qui ont précédé la crue du 1<sup>er</sup> Novembre 1859. Des champs quotidiens de pression niveau mer sont reconstruits du 1<sup>er</sup> Octobre 1859 au 15 Novembre 1859 sur l'Ouest de l'Europe (10°W - 20 °E et 37.5°N - 52°.5N) à partir des données collectées. Les situations météorologiques sur l'ensemble du massif sont ensuite analysées par des prévisionnistes de Météo-France, un soin tout particulier étant apporté à la région de Grenoble.*

## INTRODUCTION

L'objet de cette étude est de préciser les conditions météorologiques qui prévalaient avant la crue de l'Isère de 1859, puis d'analyser et décrire les situations météorologiques des mois d'Octobre et Novembre 1859 qui ont amené de la neige puis des pluies chaudes et intenses sur le bassin de l'Isère.

Notre stratégie est :

1. d'utiliser des éléments issus de bases de données climatologiques, de livres ou relevés archivés dans différents sites (archives de Météo-France, archives départementales, bibliothèques municipales...), de livres anciens et études numérisés afin de récupérer les données de pression, précipitations, températures, vent et état du ciel observés en France, Suisse et Italie en 1859,
2. de développer un produit de champs de pression niveau mer quotidiens, en point de grille de résolution 2°5 x 2°5, pour la période 1<sup>er</sup> Octobre –15 Novembre 1859 sur l'Ouest de l'Europe, à partir des données du projet européen EMULATE et des données station récupérées,
3. d'analyser et décrire les conditions météorologiques du 20 Octobre au 2 Novembre 1859.

On examinera dans cet article les différentes sources d'investigation de données anciennes en précisant les données et documents disponibles au début du projet et à la fin du projet. Les caractéristiques météorologiques de l'année 1859 et celles de l'événement de la crue de l'Isère de 1859 seront examinées à travers les aspects pression, vent, température et précipitations.

## LES DONNEES METEOROLOGIQUES DISPONIBLES AU DEBUT DU PROJET

### Contexte général

Les données météorologiques digitalisées et facilement accessibles, observées en France et antérieures à 1878, date de la création du Bureau Central Météorologique, sont peu nombreuses et les données antérieures à 1864, date de création du réseau d'observations des écoles normales primaires françaises sont rares. Les articles de Jones et al. (1999) et Ansell et al. (2006) insistent sur le manque de données disponibles antérieures à 1881 pour reconstruire les champs de pression de surface sur l'Europe. En effet, les institutions météorologiques de la plupart des pays d'Europe se consolident ou s'implantent entre 1872 et 1886 (Fiero, 1991). Le premier réseau d'observations Suisse démarre en décembre 1863 avec 88 stations.

En France, un réseau national d'observations régulières de pression et de température, constitué de 12 stations télégraphiques réparties sur la France, s'est mis en place en 1856 sous la direction de Le Verrier, directeur de l'observatoire de Paris. Hormis ce réseau d'observation national dédié à la prévision du temps, les observations météorologiques systématiques sont clairsemées et les réseaux climatologiques sont exceptionnels en 1859.

La commission hydrométrique de Lyon créée en 1843 par le maire de Lyon pour organiser un système d'observations hydrométriques dans tout le bassin de la Saône fait figure d'exception (Guillaume, 1929). Météo-France, conscient de l'intérêt de disposer de séries de données météorologiques antérieures à 1878, a mené des actions de numérisation des annuaires et bulletins météorologiques concernant la période 1849-1900 et de digitalisation des données inscrites dans les bulletins de l'Association de la Société Scientifique de France (ASF, 1871-1876), les Annuaires de la Société Météorologique de France (SMF, 1849-1899) et les relevés de la commission hydrométrique de Lyon (1852-1876). Malgré ces actions de saisie, le nombre de données quotidiennes disponibles pour 1859 restait insuffisant lorsque le projet a débuté. Les deux paragraphes suivants présentent le bilan des données disponibles au début du projet.

### **Base de Données Climatologiques de Météo-France (BDCLIM)**

En 2008, suite à la saisie des données des Annuaires de la SMF, on disposait dans la Base de Données Climatologiques de Météo-France (BDCLIM) des données de pression barométrique réduite au niveau de la mer à certaines heures de la journée pour seulement 3 stations françaises en 1859 : Ichtratzheim, Versailles et Dunkerque.

Concernant les cumuls quotidiens de précipitations, la BDCLIM contenait des données de 35 stations dont 24 stations provenant des relevés des commissions hydrométriques de huit départements du bassin de la Saône et du Rhône dont les départements du Rhône et de l'Ain mais malheureusement aucune valeur dans le département de l'Isère.

### **Données de projets de reconstruction de champ de pression**

Les études de circulation atmosphérique sur l'Europe sont très difficiles pour les périodes antérieures à 1881. La difficulté n'est pas due au manque de stations d'observation mais à la disponibilité des données. Plusieurs projets financés par l'Europe ont cherché à reconstruire des champs de pression moyenne mensuelle (ADVISE) et des champs de pression quotidienne (EMULATE) avant 1881 à des résolutions 5°x5°. Le projet **EMULATE** (European and North Atlantic daily to MULTidecadal climATE variability, <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/projects/emulate>) est un projet de recherche qui visait à étendre la disponibilité des données historiques de pressions quotidiennes sur l'Atlantique Nord et l'Europe de 1850 à 2003. Les données de 1850 à 1880 sont issues d'observations terrestres et marines tandis que les données du projet sont combinées avec des jeux de données en points de grille déjà existants à partir de 1881. Les séries de pressions journalières, réduites au niveau de la mer notée Pmer, des stations terrestres sont disponibles sur le site du projet ([http://www.cru.uea.ac.uk/projects/emulate/LANDSTATION\\_MSLP/](http://www.cru.uea.ac.uk/projects/emulate/LANDSTATION_MSLP/)). De plus une base de données en point de grille à résolution de 5° a été constituée dans le cadre du projet et est disponible sur le site du projet. Parmi les 86 stations répertoriées, récoltées ou numérisées dans le cadre du projet seulement **39 stations sont disponibles en 1859, dont une seule en France** (l'observatoire de Paris).

L'examen du tableau des stations fourni dans Ansell (2006) a permis de sélectionner 10 stations européennes sur la zone d'intérêt du projet : Barcelone, Cadix, Corfou, De Bilt, Durham, Londres, Madrid, Milan, Padoue et Prague.

La recherche de données météorologiques françaises en 1859, notamment dans le département de l'Isère est donc le préalable à l'étude de la situation hydrométéorologique liée à la crue de référence de l'Isère.

### **RECHERCHE DES OBSERVATIONS METEOROLOGIGUES DE 1859**

Les recherches de données météorologiques locales, nationales et internationales ont été menées auprès de multiples sources d'archives :

- Bibliothèques,
- Archives du Centre Départemental de la Météorologie de l'Isère et de la Direction de la Climatologie de Météo-France,
- Archives Départementales,
- Bibliothèques numériques ( <http://books.google.fr> et <http://gallica.bnf.fr> ),

Des demandes de documents ont été faites auprès de météorologues italiens et suisses afin d'obtenir des données au-delà de nos frontières.

### Besoin d'informations sur les observations

Aux difficultés classiques auxquelles se heurtent les climatologues travaillant sur les données anciennes s'ajoutent celles spécifiques à la pression. Les problèmes classiques concernent surtout les imprécisions dans les métadonnées comme l'heure de la mesure, la localisation, le calcul des corrections, le type d'instrument, l'altitude de l'instrument, etc...

En 1859, la mesure de la pression est une pression barométrique obtenue à partir de la hauteur de mercure du baromètre (Angot, 1899). Les problèmes spécifiques à la mesure de la pression à cette époque concernent les corrections instrumentales multiples comme celle due à la température du baromètre (Delcros, 1849). Cette correction qui consiste à réduire la hauteur de mercure en tenant compte de la température du mercure est loin d'être négligeable. Le tableau de la figure 1, extraite du tome 1 des bulletins de l'Association Scientifique de France ASF(1872), indique par exemple une correction de 2mmHg pour une pression de 760mmHg et une température du mercure de 16°C.

- 14 -

I. — TABLE POUR LA RÉDUCTION DU BAROMÈTRE A ZÉRO (suite).

Tempér. du barom.	HAUTEURS DU BAROMÈTRE.							
	745	750	755	760	765	770	775	780
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
7	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
9	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
10	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3
11	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
12	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
13	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
14	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8
15	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9
16	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
17	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
18	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3
19	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4
20	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

Figure 1 : Archives Météo-France, table de réduction du baromètre à zéro (ASF, 1872)

Les problèmes concernent aussi les différentes formules utilisées au cours du temps pour passer de la pression mesurée à la station à la pression réduite au niveau de la mer (Pmer). Cette réduction implique que la pression mesurée à chaque station soit ramenée à la valeur qu'elle aurait si la cuvette du baromètre se situait à l'altitude 0 mètre.

Il est donc nécessaire de bien distinguer la pression brute de la pression station corrigée ou de la pression corrigée et réduite au niveau de la mer sachant que les documents originaux ne permettent pas toujours de distinguer si l'on a affaire à une pression station ou à une pression mer.

La collecte des données de pression doit donc être systématiquement associée à celle des observations de température du baromètre et de température de l'air extérieur ainsi qu'à celle de l'altitude du baromètre.

Les principales actions de « Data Rescue » (terme consacré par l'Organisation Mondiale de la Météorologie au sauvetage des données climatologiques anciennes), menées pour le projet sont exposées dans ce troisième chapitre. Les exemples cités illustrent la multiplicité des sources et offrent un panel des actions possibles ainsi que nécessaires pour récupérer les données météorologiques anciennes en Europe et leurs métadonnées.

### Données nationales et internationales

*Stations françaises et italiennes : Bulletin International de l'observatoire impérial de Paris*

La bibliothèque de Météo-France, créée en 1887, possède un riche fonds documentaire météorologique ancien, notamment 750 livres du XIXème siècle et un ensemble de périodiques français et étrangers du XIXe comme les Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences (1835), l'Annuaire météorologique de la France (1849), le Bulletin international de l'Observatoire impérial de Paris (1857). Le 2 Novembre 1857 voit la

parution du premier Bulletin international de l'observatoire de Paris qui devient quotidien le 1<sup>er</sup> Janvier 1858. Tous les bulletins ont été scannés récemment sur la période 1857-1877. L'exemple du tableau du 1<sup>er</sup> Novembre 1859 est présenté en figure 2.

Le Bulletin international de l'observatoire de Paris contient des observations quotidiennes de pression effectuées à 8h du matin de 12 stations météo-télégraphiques françaises en 1859 (Dunkerque, Lyon, Mézières, Strasbourg, le Havre, Brest, Napoléon-Vendée, Limoges, Montauban, Bayonne, Avignon et Besançon) et de nombreuses données étrangères provenant des observatoires de Turin, Rome, Bruxelles et Florence. Les tableaux contiennent des données de Pmer, de température de l'air, de la direction du vent, une indication sur l'intensité du vent et l'état du ciel. Il est à noter que ces bulletins ne contiennent aucune métadonnée concernant les sites de mesure et les corrections effectuées sur la pression. Une étude bibliographique spécifique pour les stations météo-télégraphiques est toujours en cours à Météo-France pour trouver de l'information. Locher (2004) indique que les pressions françaises proposées dans les bulletins sont des Pmer réduites à 0°C et l'histoire des entreprises météorologiques (1868) renseigne sur l'organisation du réseau et de l'instrumentation.

Etat atmosphérique le 1<sup>er</sup> Novembre 1859 à 8 heures du matin

	Baromètre	Thermomètre	Vent	Etat du ciel
Dunkerque	735,9	+ 11,2	O.S.O. fort	Pluie
Mézières	742,6	+ 10,9	S.O. ass. fort	Pluie
Strasbourg	745,1	+ 12,6	O ass fort	Pluie
Paris	745,7	+	S.O. ass fort	Pluie
Le Havre	740,7	+ 4,8	O. violent	Pluie
Brest	741,9	+ 12,8	O. fort	Pluie
Napoléon-Vendée	752,6	+	Calme	Pluie
Limoges	767,7	+ 4,7	N.O. ass faible	Pluie
Montauban	767,0	+ 16,7	S. faible	Pluie
Bayonne	757,7	+ 18,2	S. faible	Pluie
Avignon	7	+ 14,7	S. fort	Pluie
Lyon	7	+ 16,8	S. ass fort	Pluie
Besançon	758,1	+ 15,3	S.O. violent	Pluie

\* Paris - Avignon'hui, 1<sup>er</sup> Novembre, pluie & tempétes de N.O. et S.O. - le Baromètre remonte rapidement.

Madrid	731,1	+ 11,2	O.S.O. faible	Pluie
San-Fernando	731,5	+ 16,0	N.S.O. faible	Pluie
Sevillla	733,6	+ 9,9	S. S.O. ass fort	Pluie
Salvonne	767,8	+ 15,6	O. faible	Pluie
Strasbourg	744,0	+ 4,8	Calme	Pluie
Stockholm	740,5	+ 6,6	S. S.O. faible	Pluie
Saparanda	755,7	+ 2,5	S. faible	Pluie
Constantinople	758,1	+ 20,4	S.O. fort	Pluie
Rome	"	+	S. faible	Pluie
Florence	756,0	+ 16,5	N.O. faible	Pluie
Livourne	754,9	+ 19,6	S.O. ass fort	Pluie

Figure 2 : Archives Bibliothèque Météo-France, Bulletin Quotidien de l'Observatoire de Paris du 1<sup>er</sup> Novembre 1859

#### Observatoire de Genève et hospice Grand Saint-Bernard : Bibliothèque universelle de Genève

Concernant les données suisses, le réseau de Météorologie Suisse débutant fin 1863, MétéoSuisse concentre ses efforts de collecte et de digitalisation des données à partir de 1864 (projet Digihom). Les recherches se sont par conséquent dirigées vers des ouvrages français et suisses de la fin du 19<sup>ème</sup> ayant publié des tableaux d'observation.

La recherche de documents anciens sur <http://books.google.fr/> a permis de récupérer plusieurs ouvrages très intéressants écrits par le directeur de l'observatoire E. Plantamour (1860) sur le climat de Genève. Des tableaux météorologiques mensuels de 1855 à 1859 sont proposés dans le tome 8 des annuaires de la SMF(1860) pour Genève et Saint-Bernard. Par ailleurs, suite à la demande de Météo-France, les résumés météorologiques complets pour Octobre et Novembre 1859 de ces 2 stations ont été envoyés par le service de climatologie de MétéoSuisse à Genève.

Les tableaux envoyés par MétéoSuisse fournissent la pression Pmer et la température de l'air, à Genève et à l'hospice Saint-Bernard 4 fois par jour, le cumul quotidien des précipitations et la direction du vent dominant sur 24h. L'altitude du baromètre et les coordonnées géographiques des deux stations suisses ont pu être retrouvées dans l'annuaire de la SMF de 1860.

#### Observatoire de Turin

Le climatologue Luca Mercalli, président de la Société Météorologique Italienne (SMI) et auteur du livre « Il Clima Di Torino », nous a fait parvenir des données de pression au niveau de la mer et réduites à 0°, les températures et précipitations quotidiennes mesurées à l’observatoire de Turin d’Octobre et Novembre 1859.

### Données de l’Isère et départements limitrophes

Pour la recherche sur le bassin de l’Isère et aux abords, plusieurs sources potentielles ont été explorées :

- en Isère, les archives de Météo-France au Centre Départemental de l’Isère et la Bibliothèque Dauphinoise et les archives départementales.
- en Savoie, les archives départementales et, en particulier, le fonds sarde,
- en Haute-Savoie et dans le Rhône, les archives départementales.

Au Centre Départemental Météo-France de l’Isère :

Deux séries de données journalières ont été découvertes :

1. A Grenoble, au jardin de Ville, rue Montorge, tout près du centre ville, des relevés ont été effectués par Monsieur Louis Demarchi (1803-1891), opticien, entre 1845 et 1877. Seules les années 1859 (janvier à novembre) et 1870 à 1877 sont présentes dans nos archives. D’autres tableaux ont été retrouvés lors de recherches dans les bulletins de la Société de statistique, des sciences naturelles et des arts industriels du département de l’Isère aux Archives Départementales de l’Isère : 1846 à 1851 et 1855 et 1856. Avril à août 1845 ont été quant à eux découverts aux archives du Rhône par nos collègues du Centre Départemental Météo-France du Rhône.

La Société de statistique du département de l’Isère de l’époque a reconnu ces relevés comme étant sérieux.

JOURS de MOIS	BAROMÈTRE.		THERMOMÈTRES EXTÉRIEURS.			PLUVIOMÈTRE.		VENT (direction et intensité).				ÉTAT DU CIEL.		OBSERVATIONS DIVERSES.		
	VIGNON du BARR.	HAUTEUR observée.	HAUTEUR corrigée et réduite à 0°.	A. MIDI.	Min.	Max.	MILLIM.	MILLIM.	SUPERIEUR		INFÉRIEUR		AVANT MIDI.		APRÈS MIDI.	
									AVANT MIDI.	APRÈS MIDI.	AVANT MIDI.	APRÈS MIDI.				
1	20	258.12	255.33	21	14	26										
2	20	257.48	254.69	22	16	25										

Figure 3 : Archives Météo-France-CDM38, observations à Grenoble en Octobre 1859 (photo Anne Clavel-Météo-France)

Les paramètres relevés en 1859 étaient la pression atmosphérique et la température du baromètre qui permettait de calculer la pression corrigée et réduite à 0, la température à midi ainsi que le minimum et le maximum de température, la hauteur de précipitations, la direction du vent, l’état du ciel avec le temps observé (cf. figures 3, 3 bis et 4).



Les paramètres, relevés trois fois par jour, matin, midi et soir, étaient la température, la pression, la direction du vent, l'état du ciel et des observations en clair (cf. figure 5). Ces mots en clair nous ont été fort utiles pour l'ajustement de l'estimation de l'isotherme zéro degré une fois que les situations analogues avaient été sélectionnées par le Cemagref-Lyon (cf. deuxième et troisième parties).

A la Bibliothèque Dauphinoise :

3. Le livre de J.-J.-A. PILOT, historien, retrace le cours des événements, recense toutes les inondations connues et donne des relevés de hauteurs d'eau pendant l'inondation de 1859. Des gravures illustrent la situation exceptionnelle.
4. Le Courrier de l'Isère, journal périodique, raconte les détails des événements : dans l'article daté du 3 novembre 1859, *...Déjà, vers les premiers jours de la semaine dernière, une pluie froide et continue, qui tombait en neige sur nos montagnes et les avait recouvertes d'une couche épaisse, avait commencé à faire grossir les cours d'eau, les torrents et les rivières ; mais depuis samedi, le temps était devenu lourd, la pluie plus chaude et plus abondante et elle a redoublé encore d'intensité pendant toute la nuit et la journée de lundi, sans cesser même hier complètement. Sous l'influence de cette pluie diluvienne et d'un vent du sud qui a élevé presque subitement la température jusqu'à 18 degrés centigrades, la neige s'est fondue rapidement et, comme le 1<sup>er</sup> novembre 1843, jour pour jour à seize ans de distance, les torrents ont commencé à se précipiter de tous côtés avec une fureur croissante dans l'Isère, qui de son côté, n'a pas tardé à déborder...* . Il cite également des articles de la Gazette de Savoie (*la rivière de l'Arc a atteint une hauteur prodigieuse... En Maurienne, l'Arvan (ndlr affluent de l'Arc) a créé des ravages considérables...*) et du Courrier de Lyon (*... une grande quantité de neige a couvert ces derniers jours les montagnes de Savoie ; les pluies survenues depuis et la fonte de ces neiges ont grossi les torrents et les rivières si rapidement que des inondations ont été signalées sur plusieurs points, particulièrement sur le chemin de fer Victor-Emmanuel...*).
5. Des données de précipitations effectuées par les élèves de M.-C. Bertrand, membre de l'Association Polytechnique, ont été récupérées par Denis Coeur, historien à Grenoble.

Aux Archives Départementales :

6. A Grenoble : un rapport de l'Ingénieur des Ponts et Chaussées daté du 6 novembre 1859 décrit les inondations dans la vallée de l'Isère

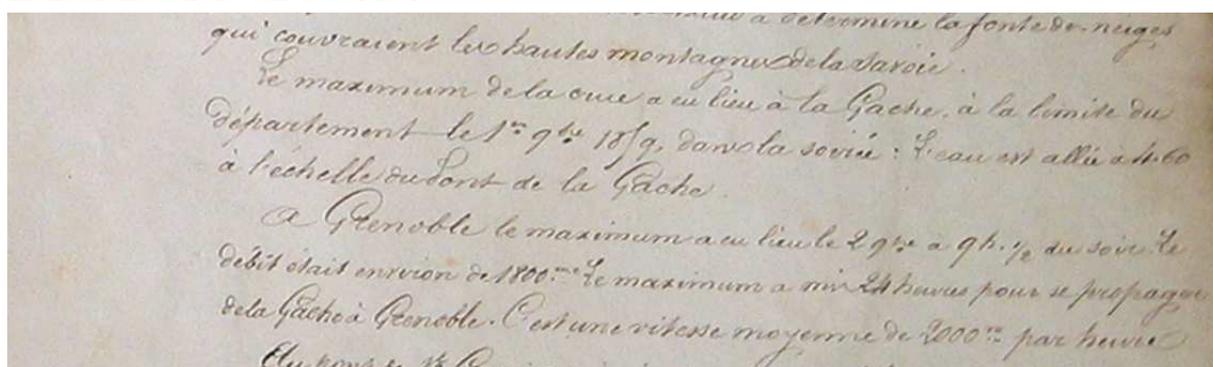


Figure 6 : AD38 cote\_7116W48 (photo Anne Clavel-Météo-France)

7. A Chambéry : la Gazette de Savoie n'est malheureusement pas disponible pour l'année 1859. Dans le fonds sarde, de nombreux courriers décrivent l'événement et les conséquences de la crue de l'Isère. Les municipalités ont informé l'intendant des dégâts subis.

Aucune mesure météorologique chiffrée n'a pu être retrouvée. Les relevés de Chambéry sont antérieurs et seules sont disponibles des données mensuelles.

Par contre, différentes descriptions ont été recueillies :

- le rapport de l'Intendant de Tarentaise à l'Intendant Général de Chambéry du 2 novembre 1859 cite les torrents en crue : *L'intendant soussigné se fait un devoir de faire connaître à Monsieur l'Intendant Général que les pluies de ces quelques jours jointes à la fonte des neiges fraîchement tombée sur les montagnes ont amené sur tous les points de la Tarentaise un grossissement des torrents tel que nous avons eu à déplorer des pertes assez*

considérables. Plusieurs ponts sur l'Isère, sur le Doron et sur les torrents aboutissants, quelques tronçons de digues, d'une grande quantité de terrains cultivés et d'arbres ont été entraînés.

Le torrent d'Arbonne de Bourg-St-Maurice a comblé son lit, s'est déversé dans les champs situé à sa gauche et a causé dit-on pour plus de 50000 livres de dommages.

Le torrent Morel a également rompu sa digue et s'est déversé sur le chef-lieu de Bellecombe en occasionnant des dégâts considérables.

L'Isère et le Doron, dans lesquels se déversent divers torrents, ont grossi dans des proportions qui dépassent les grandes crues dont on garde le souvenir....

- Le rapport de l'ingénieur Basin de la Province de Tarentaise du 4 novembre 1859 fait un compte-rendu détaillé des événements météorologiques :

*Le mois d'octobre dernier a été très pluvieux, il n'y a eu que quelques jours de beau temps ; sur les montagnes, la pluie se transformait en neige qui s'amoncelait journellement. A partir du 29 octobre, la pluie est devenue torrentielle, la température s'était élevée de 8 degrés à mi-hauteur des montagnes et la neige commença à fondre. Les eaux du Doron, qui descendaient des vallées de Bozel et de St-Martin-de-Belleville, augmentaient constamment. La masse des eaux de ce torrent qui n'est ordinairement que le sixième du volume de l'Isère, était devenue égale à celle de la rivière.*

*Le 1<sup>er</sup> novembre, à midi, les eaux de l'Isère s'étaient élevées de 2m30, elles avaient atteint la hauteur maximum des grandes crues. Vers les 4 heures de l'après-midi, leur hauteur était de 3 mètres au-dessus de l'étiage, l'eau sortait par les canaux de la ville et entrait dans les magasins du Faubourg. La pluie n'ayant pas été très forte pendant la journée du 1<sup>er</sup> novembre, on pouvait espérer que les eaux de l'Isère commenceraient à diminuer à partir de 5 heures du soir. Pendant quelques minutes, la hauteur resta la même, mais il survint un vent chaud qui fit fondre les neiges avec plus d'activité, la rivière reprit son mouvement ascensionnel jusqu'au 2 novembre, à 3 heures du matin. En ce moment, les eaux s'étaient élevées jusqu'à la clef des arches du pont Mesay, les vagues, en battant contre les murs de tympan rejaillissaient sur le pont ; la hauteur de l'eau était alors de 3m55 au-dessus de l'étiage et de 1m20 plus élevée que le 30 mai 1856, époque d'une des plus grandes crues de l'Isère.*

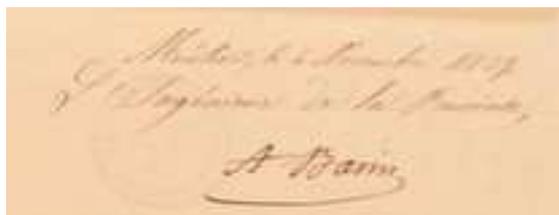


Figure 7 : Signature de l'ingénieur Basin

8. A Annecy, des mesures du Chanoine Vaullet faites à l'hôpital d'Annecy (ancien hôpital près du lac) ont été retrouvées dans les archives de l'Académie Florimontane (communiquées par Sylvain Gache, Annecy). Ces relevés s'étendent de 1830 à 1876. Les paramètres relevés matin et soir sont la pression, la température la direction du vent et le temps présent.



Figure 8 : Annecy, relevés fin octobre 1859 (photo communiquée par S. Gache)

9. A Lyon, les relevés de Lyon-Ampère ont été trouvés aux cours des recherches de données anciennes faites par la Déléguée Départementale Météo-France du Rhône, Marie-Hélène Fabry. Ces mesures sont très complètes : températures minimum, maximum et à 9 heures le matin, pression réduite à 0, hauteur de précipitations, direction et force des vents supérieurs et inférieurs, état du ciel.

## Digitalisation des données

Les nombreux relevés collectés ont été examinés afin de déterminer les paramètres et leur unité. De nombreuses données d'observations ont été saisies et mises à disposition des partenaires du projet :

- pression et température horaires pour l'année 1859 aux observatoires de Lyon, Marseille et Paris , à Grenoble Montorge et aux 12 stations météo-télégraphiques françaises (tableau 1)
- pression et température horaires du 1<sup>er</sup> Octobre au 15 Novembre 1859 à Bruxelles, Florence, Rome, Turin, Genève, Grand Saint-Bernard, Annecy, Grenoble Saint-Joseph, Bourg- en-Bresse, Fort de Joux et Chalon sur Saône.
- précipitations quotidiennes du 1<sup>er</sup> Octobre au 15 Novembre 1859 : Genève, Lyon, Grenoble Montorge, Grenoble Polytechnique, Saint-Bernard
- températures extrêmes quotidiennes : Lyon, Grenoble, **Annecy**, Genève, Saint-Bernard, **Turin**

## Contrôle spatio-temporel et sélection des séries de pression

La correction de la température du baromètre pour une température de 20°C et une pression de 1015h Pa atteignant 2.5mmHg (cf. figure 1) et la réduction au niveau de la mer étant de l'ordre de 1hPa pour 8m , il n'est pas envisageable de mélanger des pressions brutes et des pressions corrigées non réduites au niveau de la mer avec des pressions corrigées à 0°C et réduites au niveau de la mer pour reconstruire un champ de pression au niveau de la mer.

Les données de pression horaires françaises, suisses et italiennes ont été contrôlées par un contrôle spatio-temporel sur la période du 1<sup>er</sup> Octobre 1859 au 15 Novembre 1859. Ce contrôle a permis de détecter les séries de pression station brutes et nous a amené à éliminer plusieurs stations : Annecy, Bourg en Bresse, Fort de Joux, Ichtratzheim, Metz, Rochefort et Voreppe. Les séries des stations météo-télégraphiques françaises et la série de Grenoble Montorge se sont avérées de bonne qualité ainsi que les données des observatoires de Bruxelles, Genève, Lyon, Marseille, Paris et Turin. Les données italiennes du bulletin quotidien de l'observatoire de Paris (Florence, Rome et Turin) ont été éliminées à cause d'un nombre élevé de données manquantes et nous ont parues douteuses en les comparant à celles qui nous ont été fournies par Mercalli (2008). Disposant de deux séries à Lyon, la série de l'observatoire de Lyon a été préférée à la série du poste télégraphe qui a été écartée en raison du nombre de données manquantes. Enfin la série de Versailles, quasi-identique à celle de l'observatoire de Paris, a aussi été enlevée de la liste des stations.

## LES DONNEES DISPONIBLES POUR LE PROJET

### Données de Pmer quotidien

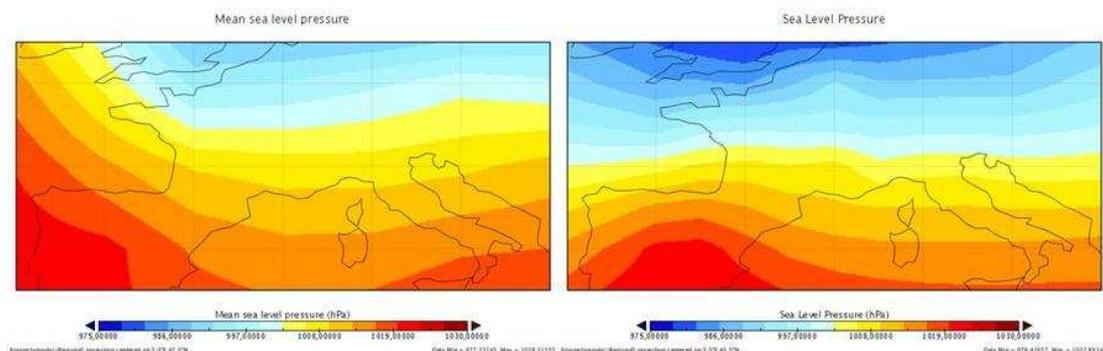
Notre stratégie est de sélectionner les Pmer observées entre 8h à 12h afin de construire un champ de Pmer sur la zone de 10W à 20E et 37.5N à 52.5N à une résolution 2.5°x2.5°. Les observations effectuées à 12h sont privilégiées dans le cas des observatoires pour lesquels plusieurs observations par jour sont disponibles (Paris, Marseille, Genève et Turin).

**On aboutit in fine à un jeu de données de Pmer pour 15 stations françaises dont une à Grenoble et 13 stations étrangères sur la période 1<sup>er</sup> Octobre-15 Novembre 1859, ce qui représente un ajout de 14 stations françaises par rapport au projet EMULATE.**

On montre ci-dessous (Figure 9) une comparaison entre une carte EMULATE originale et celle obtenue en ajoutant les stations françaises et étrangères. La perception que l'on a de la circulation est sensiblement modifiée.

## Champ Pmer moyen journalier EMULATE

## Champ Pmer à 12h Projet Crue Isère 1859



### Exemple du 1<sup>er</sup> Novembre 1859

Figure 9 Comparaison entre carte EMULATE et carte améliorée

La liste détaillée des stations est fournie dans le tableau 1. Les champs de Pmer reconstruits des 31 Octobre et 1 Novembre sont présentés figure 12.

### Données de précipitations et de température

On dispose de séries quotidiennes de précipitations et de température à Grenoble, Lyon, Genève, Turin et Grand Saint-Bernard pour octobre et novembre 1859.

### RESUME METEOROLOGIQUE DE L'ANNEE 1859

La note de Renou (1860), les tableaux de la commission hydrométrique de Lyon, le résumé météorologique de Plantamour (1860) et les relevés de Demarchi à Grenoble permettent d'avoir un aperçu météorologique de l'année 1859 respectivement à Paris, Lyon, Genève et Grenoble.

L'année 1859 est remarquable par un été sec avec de grandes chaleurs en Juillet et Août suivi par un mois de Septembre encore chaud dans le Centre-Est de la France. L'année est globalement fort sèche avec un déficit en été. Les fortes pluies se produisent en Mai et en Octobre, en particulier le 31 Octobre mais sans être exceptionnelles.

D'après Renou (1860), l'été très chaud a été suivi par une série de tempêtes des plus violentes, proches d'ouragan depuis la fin Octobre 1859 jusqu'à la fin Février 1860 sur la France.

En Juillet et Août, la température dépasse plusieurs fois 36°C à Lyon et à Grenoble. Le mois de Septembre est chaud à Grenoble et Lyon avec un maximum de 30°C à Lyon.

### Etude du mois d'octobre

Les deux premières décades d'Octobre sont douces et la chute de la température qui se produit le 21 Octobre est associée à un minimum de pression.

Plantamour (1860) indique que la plus faible valeur de pression de l'année observée à Genève se produit d'ailleurs le 21 Octobre tout comme à Lyon (cf. figure 10). La première gelée d'automne a eu lieu à Genève le 23 Octobre, coïncidant avec une chute importante de neige, phénomène très rare pour la saison.



## ANALYSE METEOROLOGIQUE DE LA SEQUENCE 1<sup>ER</sup> OCTOBRE -2 NOVEMBRE 1859

Une analyse des situations météorologiques du mois d'octobre et début novembre 1859 est menée à partir des données de température, précipitations et vent recueillies (cf. tableau 2) et des champs de Pmer reconstruits. Ces données ont été interprétées par plusieurs prévisionnistes de la région Rhône-Alpes et détaillées en annexe au tableau 2 à la fin de cette première partie.

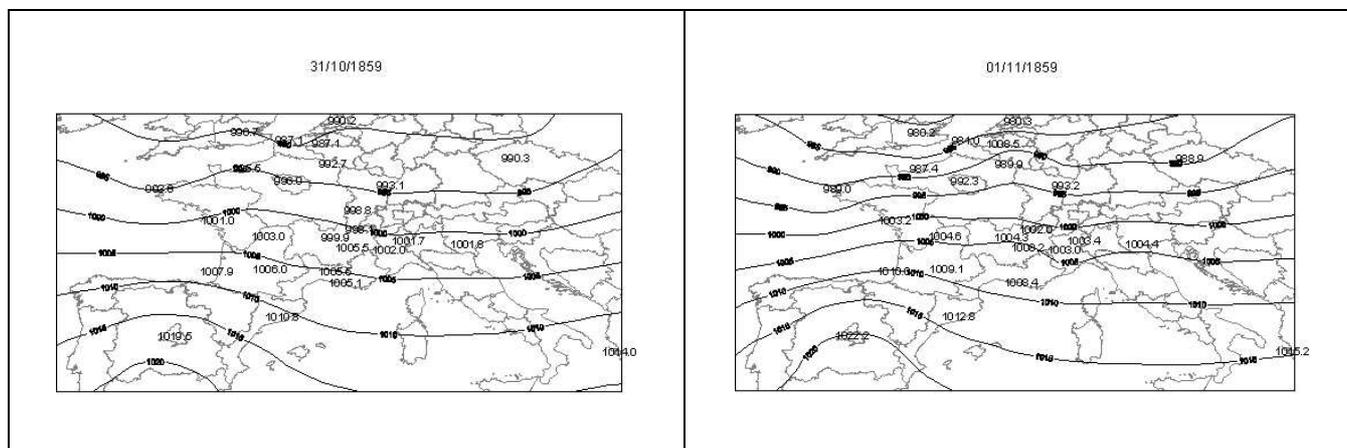


Figure 12 : champs de pression mer sur l'Europe de l'ouest les 31 octobre et 1<sup>er</sup> novembre 1859 en matinée.

### Bilan de l'expertise des prévisionnistes :

La circulation en altitude devient très zonale entre le 30 et le 31 octobre. Un flux rapide circule donc d'ouest en est. Dans ce type de situation, le vent en surface s'oriente au sud dans les vallées alpines orientées nord-sud.

Les précipitations observées à l'époque se produisent principalement les 31 octobre et 1<sup>er</sup> novembre. Elles n'ont pas un caractère exceptionnel.

Toutefois, le flux rapide en altitude provoque la remontée de l'isotherme 0°C sur l'ensemble du massif. En effet, avec une isotherme 0°C à plus de 2500m à Lyon le 31 octobre et un flux d'ouest organisé et rapide en altitude, on retrouve la même altitude de l'isotherme 0°C sur l'ensemble des massifs à l'est de Lyon. De plus, les vents étant de secteur sud dans les vallées, les phénomènes d'inversion s'atténuent.

Dans le cas probable d'un secteur chaud très actif, les forts cumuls de précipitations se seraient décalés à l'est des massifs : Mont Blanc, Beaufortin, Aravis, Tarentaise et Vanoise. Malheureusement, aucun relevé de données dans ces secteurs n'est disponible.

Par conséquent, on considèrera que l'altitude de l'isotherme 0°C à Lyon est l'altitude de référence pour l'ensemble du massif à compter du 30 octobre en soirée. Avec une isotherme 0°C vers les 3000m sur tout le massif, on peut considérer que toutes les précipitations neigeuses qui se sont produites courant octobre ont alors contribué à un fort ruissellement sur tout le massif. De plus, on peut supposer que sur la partie est du massif, il y a eu des cumuls de pluie bien plus importants que ceux dont nous disposons par ailleurs.

### CONCLUSIONS

Les recherches ont été effectuées dans de nombreuses sources d'archives et auprès de météorologues étrangers. Les efforts entrepris dans la recherche en données anciennes ont permis de collecter de nombreuses données françaises, en particulier à Grenoble et en Savoie. Les données françaises de pression collectées et les données du projet EMULATE ont été utilisées pour reconstruire des champs de pression à une résolution 2°5x2°5 sur la zone 10°W-20 °E et 37.5°N-52°.5N à partir de 28 stations dont 15 françaises.

Ce travail de climatologie a été suivi d'un travail d'expertise en prévision qui aboutit à une analyse la plus probable de la situation météorologique ayant précédé la crue du 1<sup>er</sup> novembre 1859.

La circulation atmosphérique en altitude devient très zonale fin octobre, un flux rapide circule donc d'ouest en est. Dans ce type de situation, le vent en surface s'oriente au sud dans les vallées alpines orientées nord-sud. De plus, l'altitude de l'isotherme 0°C a tendance à s'uniformiser vers 3000 mètres sur tout le massif à l'est de Grenoble. Par conséquent, le ruissellement de l'eau stockée en moyenne et haute altitude durant les

précipitations neigeuses survenues depuis le 20 octobre s'ajoute aux fortes mais non exceptionnelles précipitations du 31 octobre.

Ces travaux des climatologues et prévisionnistes de Météo-France entrepris dans le cadre du projet illustrent les possibilités d'améliorer le retour d'expérience bien des années après la survenue de l'événement.

Modif. :

### **Perspectives**

Même si la collecte de données effectuée spécifiquement pour ce projet a permis d'enrichir significativement ce qui était disponible au début de l'étude, cela reste insuffisant, comme on le verra dans les chapitres 3 et 4, pour contraindre suffisamment le spectre de scénarios possibles que l'on pourra raisonnablement proposer. Dans cette étude programmée sur 1 an, il a toutefois fallu décider d'arrêter notre collecte au bout de 5 ou 6 mois pour passer aux étapes suivantes. Durant la suite de l'étude, des recherches ont cependant été poursuivies pour retrouver soit des données soit des indications complémentaires. Cependant, les recherches entreprises durant l'été 2009 aux archives de Turin par l'historien Denis CŒUR n'ont pas permis non plus d'apporter des données météorologiques nouvelles.

Un espoir est apparu depuis (2010), qui concerne les archives stockées en milieu amianté au Fort de Fontainebleau. Un inventaire a été récupéré, et certaines de ces données pourraient être accessibles plus rapidement que prévues. Ce travail de fond est suivi par la Direction de la Climatologie de MétéoFrance (Mme S. Jourdain).

Il est cependant incertain que ces archives enrichissent, pour l'année 1859, ce qui nous fait défaut sur la Savoie, vu son statut à l'époque de l'événement. Par contre, la perspective d'accroître le nombre de stations de pression sur le territoire métropolitain à partir de ces années 1850 et jusqu'à 1900 permettrait d'améliorer encore la qualité des champs Pmer par rapport à ceux disponibles aujourd'hui dans EMULATE.

### **REMERCIEMENTS**

Les auteurs tiennent à remercier les services d'archives départementales de l'Isère, de la Savoie et la Haute-Savoie de même que ceux de la bibliothèque dauphinoise pour leur aide sans oublier bien le service de climatologie de MétéoSuisse à Genève, L. Mercalli président de la Société Météorologique Italienne, D.Coeur historien et S. Gache pour la mise à disposition de relevés respectivement à Genève, Turin et Grenoble et Annecy. Ce travail a été soutenu par le Pôle Grenoblois Risques naturels.

### **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Angot, 1899, Traité élémentaire de Météorologie, Livre II Chapitre I La pression atmosphérique (<http://gallica.bnf.fr/>).
- Bertrand M.-C., 1859, Etude sur l'inondation de Grenoble du 2 Novembre, Grenoble.
- Ansell, T. J. et al. 2006. Daily mean sea level pressure reconstructions for the European - North Atlantic region for the period 1850-2003, J. Climate, 19, 2717-2742.
- ASF (Association Scientifique de France), 1872, Instructions pour les observations météorologiques, Annales de l'Association Scientifique de France, Tome 1.
- Basin A., 1859, Rapport sur l'inondation du 1<sup>er</sup> Novembre 1859, Génie Civil, division de Chambéry.
- Commission hydrométrique de Lyon, 1859, Annales des Sciences des Physiques et naturelles d'Agriculture et d'Industrie, série 3 tome 3, Lyon.
- Courrier de l'Isère des 3, 5, 7 et 19 novembre 1859, Bibliothèque Dauphinoise, Grenoble.
- Delcros M.J., 1849, Annuaire Météorologique de la France, Tome 1, p 75-110.
- Guillaume J., 1929, Les observations météorologiques dans le Rhône. Etude rétrospective, Les études rhodaniennes, vol.5, p145-149. (<http://www.persee.fr/>)
- Locher F., 2004, Le Nombre et le Temps, La météorologie en France (1830-1880), thèse Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales.
- Observatoire impérial de Paris, 1868, Historique des entreprises météorologiques 1854-1867, tirage à part, 40 pp.
- Plantamour E., 1860a, Résumé météorologique de l'année 1859 à Genève et le Grand St-Bernard, Bibliothèque universelle, tome VIII, p5-21. (<http://books.google.com>)
- Plantamour E., 1860b, Résumé météorologique de l'année 1859 pour Genève et le Grand Saint-Bernard, archives des sciences de la bibliothèque universelle.
- Plantamour E., 1863, Du climat de Genève, Genève, 208 pp. (<http://books.google.com>)

Jones P., Davies T., Lister D., Slonovsky V., Jonsson T., Barring L., Jönsson P., Maheras P., Kolyva-Machera F., Barriendos M., Martin-Vide J., Rodriguez R., Alcoforado M., Wanner H., Pfister C., Luterbacher J., Rickli R., Schuepbach E., Kaas E., Schmith T., Jacobeit J and Beck C., 1999, Monthly mean pressure reconstructions for Europe for 1780-1995 period, *Int. J.Climatol.*, 19: 347-364.

Renou, 1860, Note sur les années 1859 et 1860, Bulletin des séances du 11 décembre 1860, *Annuaire de la Société Météorologique de France*, tome VIII.

Di Napoli G., Mercalli L., 2008 - Il clima di Torino. SMS, 936 pp.

Pilot J.-J.-A., 1859, Grenoble inondé. Editions, Etienne-Desfonds.

([http://www.bibliotheque-dauphinoise.com/grenoble\\_inonde.html](http://www.bibliotheque-dauphinoise.com/grenoble_inonde.html))

Quételet A., 1857, Sur le Climat de la Belgique, Tome second, quatrième partie, De la pression atmosphérique. (<http://books.google.com>), 121pp, Bruxelles.

**Table 1 :** liste des 28 stations pour les données de pression

Nom de station	Origine	Heure d'observation	Latitude Degrés décimaux	Longitude Degrés décimaux	Altitude (m)
Avignon	Météo-France	8h	43.94	4.81	20
Barcelone	Emulate	8h	41.50	2.01	40
Bayonne	Météo-France	8h	43.49	-1.48	20
Besançon	Météo-France	8h	47.25	6.03	250
Brest	Météo-France	8h	48.38	-4.49	40
Bruxelles	Météo-France	8h	50.85	4.36	59
Cadiz	Emulate	12h	37.46	-6.28	25
Corfou	Emulate	12h	39.61	19.91	4
De Bilt	Emulate	12h	52.10	5.18	15
Dunkerque	Météo-France	8h	51.04	2.38	7
Durham	Emulate	12h	54.76	-1.58	107
Genève	Meteosuisse	12h	46.20	6.14	407
Grenoble	Météo-France	12h	45.19	5.73	216
La Roche s/ Yon	Météo-France	8h	46.67	-1.43	79
Le Havre	Météo-France	8h	49.50	0.13	17
Limoges	Météo-France	8h	45.83	1.26	257
Londres	Emulate	12h	51.46	0	0
Lyon	Météo-France	9h	45.77	4.84	169
Madrid	Emulate	12h	40.45	-3.71	667
Marseille	Météo-France	12h	43.29	5.37	31
Mézières	Météo-France	8h	49.76	4.72	144
Milan	Emulate	12h	45.61	8.73	211
Montauban	Météo-France	8h	44.02	1.36	100
Padoue	Emulate	12h	45.40	11.85	13
Paris	Météo-France	12h	48.84	2.34	67
Prague	Emulate	12h	50.08	14.42	202
Strasbourg	Météo-France	8h	48.58	7.75	140
Turin	Mercalli	12h	45.07	7.68	240

## **Tableau 2 : Relevés météorologiques du 21 octobre au 1<sup>er</sup> novembre 1859, scénario météorologique probable**

Valeurs de températures maximales quotidiennes (Tx) et de précipitations quotidiennes (RR 24) avec indication du vent à 2200 m :

Station	21/10	22/10	23/10	24/10	25/10	26/10	27/10	28/10	29/10	30/10	31/10	1/11	2/11
Grenoble Tx (°C)	11.5	11	9.5	11.6	15.5	17	18.5	13	13.5	13	15	20	
Grenoble RR 24 (mm)	13	6	10	0	0	19	0	0	24	0	30	0.5	
St Bernard Tx (°C)	-0.1	+ 1.3	-2	-0.1	-1.5	-0.5	-3	+ 0.2	-3	-5.5	+1	+5.3	
St Bernard RR 24 (mm) (2200 m)	22	7.9	18.7	0	0	0	15.5	0	4.4	0	33.5	30	
Vent au St Bernard (2200 m)	SW	SW	SW	SW	SW	SW	NE	SW	SW	NE	SW	SW	NE

A noter qu'au 31 octobre, le Saint-Bernard cumule 119 cm de neige, et que le redoux a alors lieu (avec pluie assez forte le 31/10 et le 1/11).

Autres infos : le 31 octobre, on relevait 28 mm au Fort de Joux (La Cluse et Mijoux, au pied du Jura) et 27,6 mm à Genève.

### **Scénario probable proposé:**

Les 21 et 22 octobre, on a un flux d'ouest en altitude dans lequel circulent des perturbations donnant des précipitations aussi bien à Grenoble qu'au Saint-Bernard. La température positive sur le Saint-Bernard le 22 laisse supposer un phénomène de Foehn sur l'est du massif et donc une quantité moins importante de précipitations qu'à Grenoble.

Le 23 octobre, le Saint-Bernard est plus arrosé que Grenoble, la dépression est sur l'est de la Méditerranée. Cela évoque une situation de retour d'est sur le massif alpin, toutefois l'observation donne encore du vent de SW au Saint-Bernard ce qui n'est pas en accord avec un retour d'est. On peut tout de même supposer que le vent a tourné au nord-est dans la journée après l'heure de l'observation.

Le 24 octobre, le flux en altitude s'est ralenti, temps plus calme, moins froid que la veille et sans précipitations. En effet, dans cette situation, c'est l'évolution diurne qui est prédominante mais en cette saison, il y a peu d'averses.

Le 25 octobre, dorsale en altitude favorisant une situation sèche et stable en surface avec douceur en plaine due au vent de sud.

Le 26 octobre, passage d'une nouvelle perturbation dans un flux d'ouest, le Saint-Bernard est protégé et ne reçoit pas de précipitations contrairement à la plaine. Le vent tourne vraisemblablement au Nord-est dans la journée (situation de foehn sur l'est du massif donc pas de précipitations au Saint-Bernard).

Le 27 octobre, le foehn s'arrête, la perturbation traverse les Alpes, Grenoble à l'arrière ne reçoit plus de précipitations.

Le 28 octobre, dorsale en altitude comme pour le 25, cela entraîne un temps sec et plus frais en plaine. En altitude, on voit déjà la perturbation arriver par le sud-ouest.

Le 29 octobre, la perturbation aborde le massif par le sud-ouest ce qui explique le cumul de précipitations important sans toutefois être exceptionnel à Grenoble mais n'atteint pas encore l'est du massif (on a moins de 5 mm au Saint-Bernard).

Le 30 octobre, situation comparable à celles des 25 et 27 octobre, temps calme et frais.

Les 31 octobre et 1<sup>er</sup> novembre : un courant d'ouest en altitude de plus en plus rapide et s'orientant au sud-ouest. On a une succession de perturbations donnant des cumuls de précipitations de l'ordre de 30 mm sur tout le bassin le 31 (Grenoble, Saint-Bernard, Genève et Fort de Joux). Le plus remarquable est la hausse de température en altitude (on note des températures positives au Saint-Bernard (2200 m) dès le 31 octobre). On peut penser que l'effet orographique sur une masse d'air chaud et sans doute instable dans un flux d'ouest marqué a été important. Le 1<sup>er</sup> novembre, seul l'est du massif continue à être arrosé dans une douceur accrue (20°C en plaine et plus de 5 °C en altitude). On peut supposer que ces précipitations sont le résultat d'un effet orographique marqué (ce qui explique que Grenoble n'est pas concerné) et que les cumuls ont été importants sur l'est du massif et à de hautes altitudes (Aravis, Beaufortin, Belledonne...). De plus, étant donnée la douceur des températures à plus de 2000 mètres, ces précipitations sont tombées sous forme de pluie...



*Deuxième Partie :*

**RECONSTITUTION DU RISQUE NIVO-  
PLUVIOMETRIQUE DURANT  
LE MOIS D'OCTOBRE 1859 PAR UNE  
TECHNIQUE D'ANALOGIE**

par Annick Auffray\*, Anne Clavel\*\*, Sylvie Jourdain\*\*\*\*, Météo-France,

\*Direction Interrégionale Centre-Est - Lyon,

\*\* Centre Départemental de la Météorologie de l'Isère,

\*\*\* Direction de la Climatologie, Toulouse



# RECONSTITUTION DU RISQUE NIVO-PLUVIOMETRIQUE DURANT LE MOIS D'OCTOBRE 1859 PAR UNE TECHNIQUE D'ANALOGIE

**Aurélien Ben Daoud, Eric Sauquet**

Cemagref – Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique  
3 bis Quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon, Cedex 9, France

Tél: +33 (0)4 72 20 87 64, Fax: +33 (0)4 78 47 78 75, e-mail: [aurelien.bendaoud@cemagref.fr](mailto:aurelien.bendaoud@cemagref.fr)

**Charles Obled**

Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement  
Institut National Polytechnique de Grenoble, B.P. 53, 38041 Grenoble, Cedex 9, France  
Tél: +33 (0)4 76 82 50 53, Fax: +33 (0)4 76 82 50 14, e-mail: [charles.obled@hmg.inpg.fr](mailto:charles.obled@hmg.inpg.fr)

## INTRODUCTION

L'objectif principal de ce travail est de reconstituer la séquence pluviométrique sur la période précédant la crue majeure de l'Isère qui s'est produite les 31 octobre et 1er novembre 1859. Afin d'inclure les différents épisodes ayant contribué à l'événement durant le mois d'octobre 1859, nous retenons une période large de 36 jours, qui s'étire du 1er octobre au 5 novembre 1859. Or nous ne disposons que de très peu d'information sur les précipitations relevées sur le bassin de l'Isère au cours de cette période. Pour y remédier, nous appliquerons une technique d'analogie permettant d'identifier des situations passées considérées comme analogues, d'un point de vue météorologique, aux situations observées en 1859.

Cette méthode doit d'abord être adaptée au bassin versant de l'Isère en amont de Grenoble. Une fois optimisée, la technique peut être appliquée et les dates analogues identifiées. A partir de la distribution des précipitations des situations analogues, nous pourrions reconstituer un scénario probable d'évolution de la pluviométrie sur la période d'intérêt. Par l'intermédiaire de la technique d'analogie, d'autres paramètres météorologiques seront également étudiés, tels que la température ou le géopotential, mais aussi les régimes de temps les plus vraisemblablement rencontrés durant la période. Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux menés par Jourdain et al. (2009).

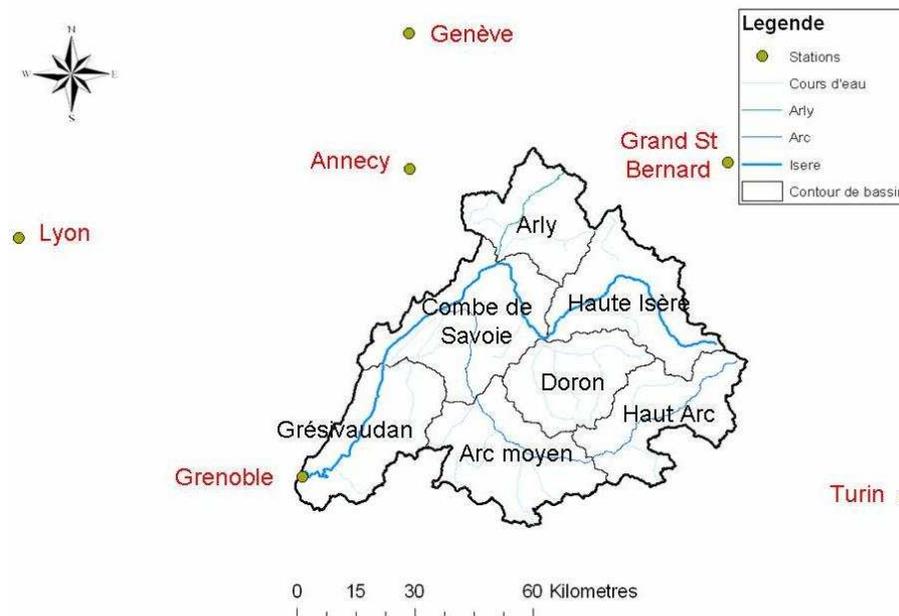


Figure 1. Bassin de l'Isère en amont de Grenoble et sous-bassins considérés pour l'étude.

Dans le cadre de ce travail, le bassin de l'Isère en amont de Grenoble a été divisé en sept sous-bassins (Figure 1), ceci afin d'évaluer la contribution de chacun d'entre eux à la crue de l'Isère (Panthou, 2009 ; Obled et al., 2009). Dans la première section de cet article, nous décrivons la méthodologie employée et présenterons les bases de données disponibles dans le cadre de cette étude. La seconde section vise à présenter les résultats de l'optimisation de la technique d'analogie utilisée. Enfin, nous reconstituerons la séquence pluviométrique de la période d'étude dans la dernière partie et nous caractériserons les régimes de temps probables auxquels le bassin de l'Isère a été soumis avant l'événement de crue.

## **METHODOLOGIE**

Dans un premier temps, nous allons décrire brièvement la technique d'analogie employée puis nous présenterons les données disponibles nécessaires à son application.

### **Technique d'analogie**

La technique d'analogie utilisée dérive d'une méthode de prévision des précipitations développée en France au cours des années 1970 (Duband, 1970). Cette méthode repose sur l'hypothèse suivant laquelle deux situations météorologiques similaires doivent engendrer des effets locaux similaires (Lorenz, 1969). Ainsi pour un jour cible dont on désire prévoir le cumul de précipitations, on recherche dans une archive les journées passées pour lesquelles la situation météorologique observée est proche de la situation prévue pour le jour cible. Les situations passées les plus similaires sont alors retenues, puis les pluies observées au cours de ces journées sont extraites d'une archive pluviométrique. Il est alors possible de construire la distribution empirique des pluies observées, puis par exemple d'en déduire les valeurs associées à des quantiles au non-dépassement. Cette méthode permet ainsi de prévoir les précipitations de manière probabiliste.

Outre l'usage courant de cette technique pour la prévision opérationnelle des précipitations, il est également possible de l'employer pour reconstituer des événements passés. C'est ainsi dans ce but que nous avons appliqué cette technique aux situations météorologiques précédant l'événement de la crue de l'Isère de 1859.

Pour caractériser une situation météorologique, les champs de pressions sont usuellement exploités pour mesurer le degré de similitude (cf. Ben Daoud et al., 2009 pour un état de l'art de la méthode employée en France). Dans notre cas, seuls les champs de pression au niveau de la mer (Pmer) observés en 1859 sont disponibles. Le critère permettant de mesurer la ressemblance entre deux situations est le critère TWS de Teweles and Wobus (1954), qui permet de comparer la forme de deux champs de Pmer. La valeur du critère TWS est de 0 pour deux formes strictement identiques, de 200 pour deux formes totalement opposées, et de 100 pour deux formes indépendantes.

L'objectif est donc de rechercher dans une période plus récente les situations les plus analogues à celles observées en 1859 en termes de champ de Pmer. Une telle technique ne peut être appliquée que si l'on dispose de deux archives dans lesquelles il est possible d'extraire, pour un jour passé, d'une part les champs de Pmer observés, et d'autre part les cumuls pluviométriques observés.

### **Données disponibles**

Pour appliquer la technique d'analogie sur la période qui nous intéresse, nous devons disposer de trois archives : une archive des champs de Pmer observés en 1859, une archive des champs de Pmer observés dans une période plus récente, et une archive des cumuls de précipitation observés dans cette même période récente.

Les champs de pression sont généralement extraits d'une archive de réanalyses météorologiques. Celles-ci sont constituées d'observations interpolées sur une grille régulière, dont les données assimilées sont contraintes par un modèle numérique atmosphérique, ce qui permet de garantir une cohérence dans le temps et dans l'espace.

### **Champs de pression observés en 1859**

Nous disposons de deux archives contenant les champs de Pmer observés entre le 1er octobre et le 5 novembre 1859 :

- les réanalyses météorologiques EMULATE à résolution 5°, au pas de temps 24h ;
- l'archive reconstituée par Météo-France à résolution 2,5°, au pas de temps 24h (cf. Jourdain et al., 2009).

## Champs de pression observés dans une période récente

Plusieurs archives de réanalyses sont à notre disposition :

- les réanalyses météorologiques EMULATE à résolution 5°, au pas de temps 24h, qui couvrent la période 1850-2003 ;
- les réanalyses météorologiques ERA-40 (Uppala et al., 2005) à résolution 2,5°, au pas de temps 6h, qui couvrent la période 1957-2002 ;
- les réanalyses météorologiques NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) à résolution 2,5°, au pas de temps 6h, qui couvrent la période 1948-2007.

Ces réanalyses ne couvrent donc pas la même période, et les champs qu'elles contiennent n'ont pas la même résolution, ce qui nous incitera plus tard à faire un choix.

## Précipitations observées dans une période récente

### Modif. :

Pour être mise en œuvre, la méthode des analogues nécessite, comme on l'a indiqué, deux archives dont une archive pluviométrique pour les bassins cibles considérés. En ce qui concerne l'Isère à Grenoble, nous avons décidé, afin d'accéder à une répartition spatiale même assez grossière, de la découper en 7 sous-bassins d'environ 800 km<sup>2</sup>. Par contre, il était exclu, dans le temps imparti, de chercher à constituer notre propre archive, sachant que cela nécessite des négociations et la signature de conventions d'accès aux données avec les fournisseurs.

Au moment de l'étude, le CEMAGREF-Lyon ne disposait que des données SAFRAN-France pixélisées (8x8 km<sup>2</sup>), sur la période 1970-2006, dans le cadre d'une convention avec MétéoFrance pour la thèse d'Aurélien BEN DAOUD, sachant que cette partie de l'étude s'intégrait dans le travail de thèse.

Dans le cadre de ce travail, nous utiliserons donc les réanalyses pluviométriques SAFRAN (Vidal et al., 2009). Les précipitations sont disponibles la période 1970-2006, au pas de temps horaire, sur une grille de résolution 8 km. Nous en avons déduit les lames d'eau journalières (6h TU le jour J à 6h TU le jour J+1) observées sur la période. Les pluies de bassin ont été construites, après ré-aggrégation, à partir des lames d'eau produites sur les mailles SAFRAN. Le contour des bassins versants a été obtenu à partir d'un modèle numérique de terrain à maille kilométrique (Global 30 Arc Second Elevation Data Set, U.S. Geological Survey (Sauquet, 2006)).

## OPTIMISATION DE LA METHODE DE RECONSTITUTION DES PRECIPITATIONS

### Modif. :

La recherche de situations météorologiques analogues ne nécessite, en tant que telle, que les archives météorologiques. Mais l'optimisation de cette recherche pour un objectif défini comme la reconstitution des précipitations sur des bassins donnés nécessite une double archive, météo- et pluviométrique, et ne peut donc se faire que sur une période commune. L'optimisation consistait ici à déterminer quel domaine synoptique et combien d'analogues il fallait utiliser pour reconstituer au mieux, en moyenne sur les 7 sous-bassins de l'Isère, les précipitations observées.

Les paramètres à optimiser sont le domaine spatial sur lequel les champs de Pmer sont comparés, fonction de la localisation géographique, et le nombre de situations analogues retenues, fonction de la taille de l'archive. Le protocole de calage des paramètres est celui retenu lorsque l'analogie est exploitée pour la prévision probabiliste de pluie.

## Choix préliminaires

L'optimisation s'appuie sur un score d'évaluation : le CRPS (Hersbach, 2000). La performance est finalement exprimée en termes de gain relatif (CRPSS) de CRPS par rapport à une prévision de référence (ici la prévision climatologique). Le score CRPSS vaut 1 pour une prévision probabiliste parfaite (distribution parfaitement fine et centrée sur l'observation), il vaut 0 (ou est négatif) pour une prévision équivalente à (ou moins bonne que) la prévision de référence.

Etant donnée que l'archive NCEP/NCAR (61 ans) est plus longue que l'archive ERA-40 (45 ans), nous allons retenir l'archive NCEP/NCAR pour la recherche de situations analogues. Nous disposons ainsi de 61 années de situations candidates pour rechercher des situations analogues à celles observées en 1859. En revanche, si nous désirons reproduire la distribution empirique des pluies associée aux analogues, il est nécessaire de se restreindre à une période plus courte, qui recouvre à la fois la période de disponibilité des champs de Pmer et celle des précipitations. Ainsi, la période commune aux archives NCEP/NCAR et SAFRAN est celle du 1/8/1970 au 30/7/2006, soit 36 années.

Deux possibilités s'offrent à nous pour les situations observées en 1859 : soit on travaille sur les champs de Pmer extraits de l'archive EMULATE (à résolution 5°), soit on travaille sur les champs de Pmer fournis par Météo-France (à résolution 2,5°). Ces dernières sont *a priori* plus fiables que celles d'EMULATE, puisque les données françaises assimilées pour les réanalyses EMULATE ne sont constituées que de celles de Paris (Jourdain et al., 2009). Le champ de Pmer n'est donc pas forcément très fiable à l'échelle de la France. Néanmoins, les deux possibilités seront explorées dans cette section.

Dans un premier temps, compte tenu des degrés de liberté, il convient de fixer le nombre d'analogues à retenir puisque celui-ci dépend *a priori* de la longueur de la période de situations candidates. Dans notre cas, avec une période longue de 36 ans, nous savons par expérience qu'un nombre de 30 doit être proche du nombre optimal. Nous fixons donc à présent le nombre d'analogues à retenir à 30. En outre, une fenêtre temporelle de plus ou moins deux mois autour d'un jour cible a été appliquée pour l'extraction des analogues, afin de tenir compte de l'effet saisonnier sur les précipitations (Lorenz, 1969). Ainsi pour une situation du mois d'octobre 1859, nous ne rechercherons l'analogie que sur les journées passées des mois d'août à décembre.

### Domaine spatial d'analogie

Le domaine est optimisé par exploration spatiale à partir d'un domaine élémentaire de départ qu'il faut préalablement choisir. La fenêtre d'analogie est agrandie d'un pas de grille dans chacune des quatre directions (nord, sud, ouest, est). Pour chaque jour, on identifie les 30 situations analogues et on construit une distribution empirique constituée des 30 valeurs de pluie correspondantes. Le score CRPSS est ainsi calculé sur toute la chronique sur les sept sous-bassins de l'Isère, et les performances obtenues pour chaque domaine sont comparées afin de retenir le domaine pour lequel les performances sont les plus élevées. On réitère le processus jusqu'à une taille de fenêtre raisonnable. C'est finalement le domaine pour lequel le score CRPSS est maximal qui sera considéré comme domaine optimal.

Les deux archives de Pmer observée sont testées pour identifier leur pouvoir prédictif respectif. Nous avons optimisé le domaine d'une part sur une grille de résolution 5° pour pouvoir chercher dans l'application les analogues aux situations extraites d'EMULATE ; et d'autre part sur une grille de résolution 2,5° pour pouvoir chercher les analogues aux situations observées, reconstituées par Météo-France.

Pour exploiter les réanalyses EMULATE, il faut dégrader les champs de pression NCEP/NCAR afin d'obtenir des données compatibles sur une grille de 5°x5°. Deux méthodes ont été testées : a) la valeur en un point est égale à celle donnée à 2,5° en ce même point, b) la valeur en un point est égale à la moyenne des valeurs aux points qui entourent celui-ci à 2,5° (huit points ainsi que le point central). En théorie, puisque la valeur associée à une maille est représentative de tous les points situés dans cette maille, c'est la méthode b) qu'il faudrait retenir.

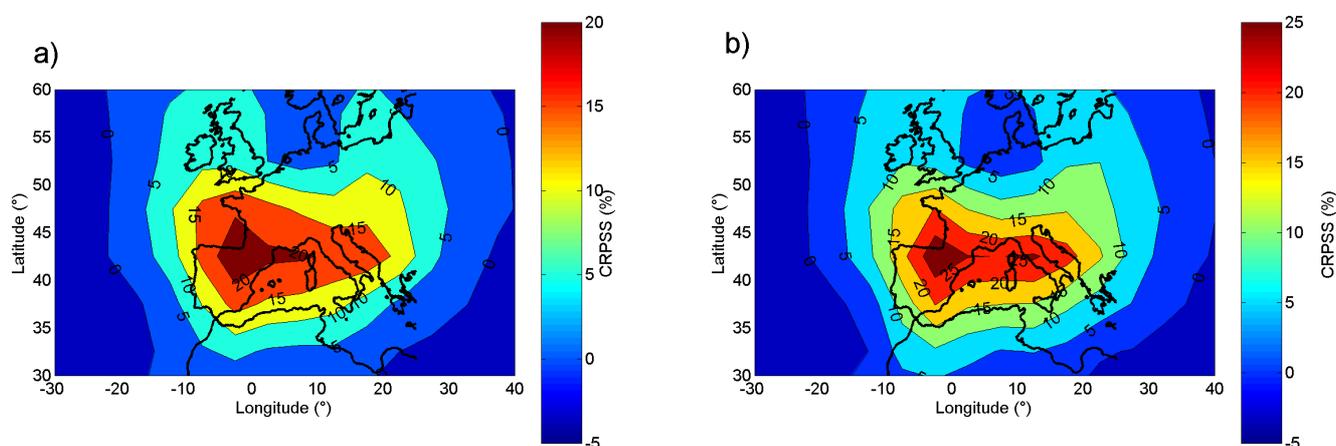


Figure 2. Performance (CRPSS) obtenue sur tous les domaines élémentaires de  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  de côté, pour l'ensemble du bassin de l'Isère en amont de Grenoble, sur la période 1970-2006, en retenant 30 analogues. a) lorsque la valeur à  $5^{\circ}$  est égale à celle à  $2,5^{\circ}$  au même point, b) lorsque la valeur à  $5^{\circ}$  est égale à la moyenne des valeurs environnantes à  $2,5^{\circ}$ .

Afin de choisir le domaine élémentaire de départ, nous avons cartographié les valeurs de CRPSS de tous les domaines élémentaires de  $2 \times 2$  points de grille, pour chacune des deux méthodes (Figure 2). La valeur maximale de CRPSS est obtenue pour le même domaine élémentaire ( $-5^{\circ}E/0^{\circ}E$  ;  $40^{\circ}N/45^{\circ}N$ ) : celle-ci vaut 24,2% avec la méthode a), et 28,8% avec la méthode b). C'est donc la seconde méthode que l'on va retenir.

La Figure 3 est identique à la Figure 2 avec des domaines élémentaires de résolution de  $2,5^{\circ}$ . La zone la plus pertinente est relativement similaire à celle obtenue à  $5^{\circ}$ . En revanche, les valeurs de CRPSS sont plus faibles à  $2,5^{\circ}$  qu'à  $5^{\circ}$ , avec une valeur maximale de 25,4%.

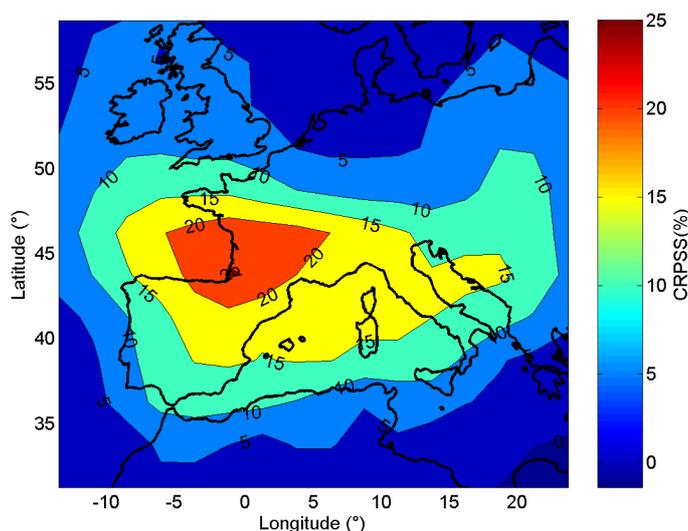


Figure 3. Performance (CRPSS) obtenue sur tous les domaines élémentaires de  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$  de côté, pour l'ensemble du bassin de l'Isère en amont de Grenoble, sur la période 1970-2006, en retenant 30 analogues.

Nous avons pu ensuite optimiser le domaine d'analogie, sur la période commune aux archives NCEP/NCAR et SAFRAN, avec les deux résolutions (Figure 4). Le domaine de départ correspond au domaine élémentaire le plus pertinent : ( $-5^{\circ}E/0^{\circ}E$  ;  $40^{\circ}N/45^{\circ}N$ ) à résolution  $5^{\circ}$ , ( $-2,5^{\circ}E/0^{\circ}E$  ;  $42,5^{\circ}N/45^{\circ}N$ ) à résolution  $2,5^{\circ}$ . Le domaine n'est donc pas identique si on travaille à résolution  $2,5^{\circ}$  ( $-7,5^{\circ}E/20^{\circ}E$  ;  $37,5^{\circ}N/52,5^{\circ}N$ ) ou à  $5^{\circ}$  ( $-5^{\circ}E/20^{\circ}E$  ;  $40^{\circ}N/45^{\circ}N$ ), et apparaît même très grand à  $2,5^{\circ}$ .

**Modif. :**

Cependant, on se rappellera que si l'optimisation demande à un moment donné un domaine un peu plus grand ou un peu plus petit, ce ne peut-être que d'un pas de résolution, d'où ici un changement « brutal » de  $5^{\circ}$  ou environ 500 km... ce qui peut expliquer en partie la différence de domaine retenu selon la résolution.

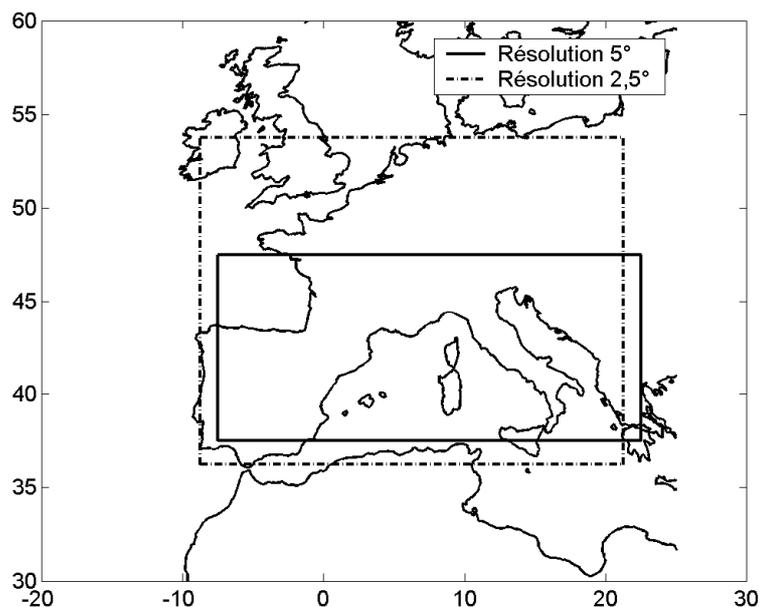


Figure 4. Domaines d'analogie optimisés avec l'archive NCEP/NCAR, pour le bassin de l'Isère, sur la période 1970-2006, avec les résolutions 5° et 2,5°.

### Nombre de situations analogues à sélectionner

Le domaine ayant été optimisé pour le bassin de l'Isère, nous pouvons à présent optimiser le nombre d'analogues à sélectionner, qui était jusqu'ici fixé à 30, avant de lancer la recherche de situations analogues aux situations observées en 1859.

Ce nombre a été optimisé avec chacune des résolutions. La Figure 5 montre l'évolution des performances (CRPSS) en fonction de ce nombre, obtenues par application du domaine optimisé précédemment pour les résolutions 2,5° et 5°.

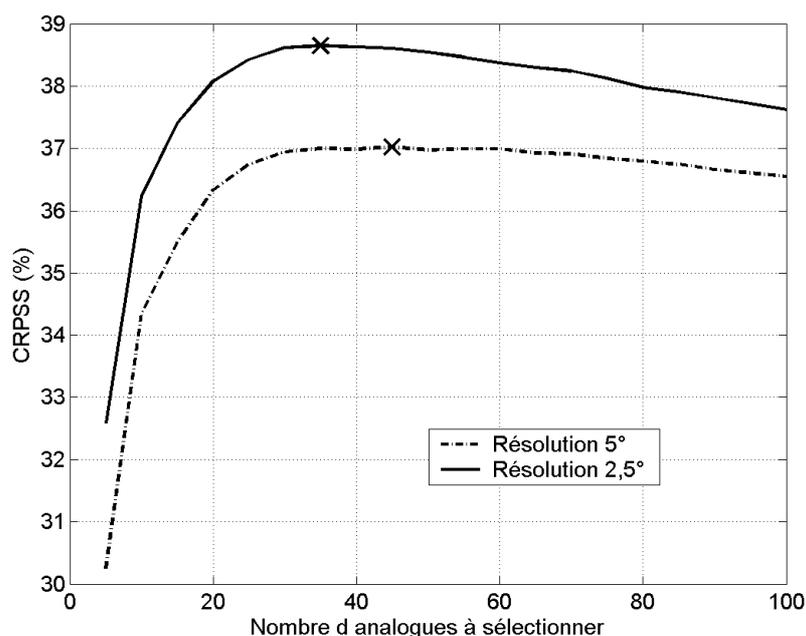


Figure 5. Evolution des performances (CRPSS) en fonction du nombre d'analogues sélectionnées, lorsque les résolutions 2,5° et 5° sont utilisées.

Finalement, le nombre optimal est de 35 si la résolution des champs de Pmer est de 2,5°, et de 45 si celle-ci est de 5°, même si l'optimum est atteint pour un nombre compris entre 35 et 60. En termes de performance, celle-ci est améliorée en appliquant la résolution 2,5° (CRPSS de 38,6%) par rapport à la résolution de 5° (CRPSS de 37%). Ce résultat peut paraître contradictoire avec celui obtenu sur un domaine élémentaire, mais il peut s'expliquer de la manière suivante. Théoriquement, la taille du domaine d'analogie doit être cohérent avec l'échelle des phénomènes météorologiques que l'on veut détecter. Ainsi lorsque le domaine est élémentaire, une résolution de 2,5° permet de capturer moins d'éléments qu'une résolution de 5°. En revanche après optimisation, il est normal d'obtenir de meilleures performances à 2,5° puisque le domaine optimisé est nettement plus grand que celui obtenu à 5.

Notre choix est donc fait : nous allons rechercher les situations analogues à celles de 1859 avec les champs de Pmer définis à 2,5°. Nous retiendrons donc par la suite 35 situations, que nous y irons rechercher dans l'archive NCEP-NCAR. Nous pouvons à présent rechercher les situations analogues aux situations du 1<sup>er</sup> octobre au 5 novembre 1859, et ainsi décrire plus précisément les événements météorologiques responsables de la crue de l'Isère des 31 octobre et 1<sup>er</sup> novembre 1859.

## **RISQUE NIVO-PLUVIOMETRIQUE: RECONSTITUTION DURANT LE MOIS D'OCTOBRE 1859**

La recherche de situations analogues permet, lorsque les précipitations observées dans le passé sont disponibles, de reconstituer l'évolution des précipitations probables. Ceci constitue notre premier objectif. De plus, à l'aide des dates des situations analogues, nous pouvons également extraire d'autres variables descriptives des situations météorologiques. Ceci nous permettra, dans le second volet de cette section, d'analyser l'évolution de la masse d'air et des types de temps rencontrés sur la période d'étude.

### **Reconstitution de l'évolution de la pluviométrie sur les sous-bassins de l'Isère**

Comme il nous fallait la pluviométrie, les 35 situations retenues, les plus analogues aux situations observées en 1859, ont été extraites sur la période allant du 1/8/1970 au 30/7/2006 pour lesquelles nous disposons de notre archive SAFRAN. Les situations de 1859, en termes de champ de Pmer, sont décrites à résolution 2,5°. Les situations analogues sont également décrites à résolution 2,5°, et ont été extraites des réanalyses NCEP/NCAR. Les cumuls observés lors des situations analogues ont été classés et des quantiles au non-dépassement ont été déduits (quantiles d'ordre 20, 60 et 90 %). La Figure 6 montre les courbes reliant ces quantiles, pour trois sous-bassins versants de l'Isère, du 01/10 au 05/11 1859. Les valeurs maximales de chaque distribution sont également indiquées afin d'avoir une idée des plus fortes précipitations observées lors des situations analogues.

Le début du mois d'octobre 1859 fut relativement sec, comme le montrent ces graphiques avec des quantiles très faibles du 1<sup>er</sup> au 5 octobre. En revanche, le reste du mois semble agité avec une alternance d'épisodes pluvieux et de courtes périodes sèches. Un premier épisode pluvieux se produit entre le 9 et le 16, puis on observe un autre épisode, plus conséquent, du 20 au 24 octobre. Un troisième épisode se produit à la fin du mois d'octobre et au tout début du mois de novembre, moment où la crue s'est produite. Néanmoins, les valeurs des quantiles obtenues sont dans l'ensemble bien inférieures à la valeur du cumul décennal, indiqué sur les graphiques. On peut supposer ainsi que les cumuls de pluie, considérés à l'échelle de la journée, ne sont pas excessifs.

Ces résultats ne représentent que le potentiel des épisodes pluvieux qui ont eu lieu durant cette période. Il faudra se reporter à l'étude de Obléd et al. (2009) pour étudier plus précisément la répartition des précipitations sur les différents sous-bassins versants retenus.

### **Etude de l'évolution de la situation météorologique sur la période**

Il est également possible d'extraire, pour chacune des dates analogues, d'autres variables météorologiques afin de caractériser les situations météorologiques de 1859. En effet, le champ de Pmer seul ne peut expliquer complètement l'événement.

La période sur laquelle les données pluviométriques sont disponibles s'étend du mois d'août 1970 à juillet 2006, tandis que la période couverte par les réanalyses NCEP/NCAR est plus large. C'est la période limitée de l'archive pluviométrique qui a restreint jusqu'à présent notre recherche de situations analogues. Or si nous ne nous intéressons plus aux précipitations, mais aux données supplémentaires disponibles dans les réanalyses,

nous pouvons étendre la période candidate dans laquelle nous recherchons les situations analogues. Puisque les réanalyses NCEP/NCAR couvrent la période allant de 1948 à 2007, nous pouvons maintenant rechercher des situations analogues, en termes de champ de Pmer, à celles de 1859, jusqu'en 1948. Pour une raison de simplicité, nous avons retenu le même nombre de situations que précédemment (égal à 35).

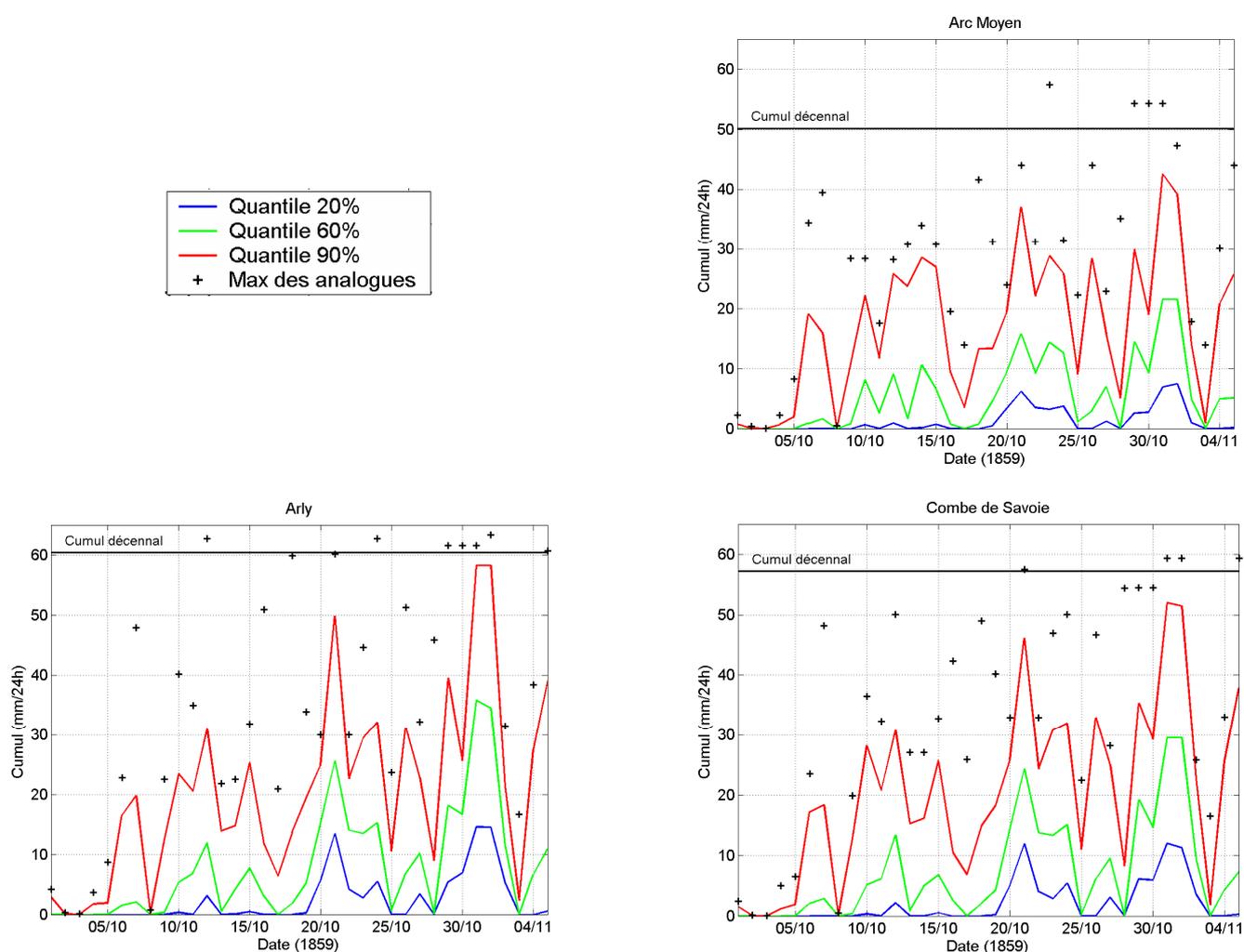


Figure 6. Evolution des quantiles au non-dépassement prévus sur la période du 01/10 au 05/11/1859, sur les sous-bassins Arc Moyen, Arly et Combe de Savoie.

## Température

Nous nous sommes intéressés à la température qui aurait pu être observée à basse altitude. Notre choix s'est orienté vers la température au niveau de pression 850 hPa (soit aux environs 1500 m). En complément, nous avons étudié le géopotential à 850 hPa, qui nous renseigne sur les altitudes associées à ces températures. Nous avons extrait ces variables au point de grille le plus proche des sous-bassins de l'Isère en amont de Grenoble (5°E ; 45°N).

Avec la fenêtre temporelle de plus ou moins deux mois autour de chaque jour cible, il est donc possible, pour les jours d'octobre 1859, que des analogues soient situées en plein mois d'août. Or c'est à l'automne que la température diminue rapidement dans les basses couches. Il serait donc plus intéressant de sélectionner les analogues dans une fenêtre temporelle plus restreinte. Nous avons donc appliqué deux fenêtres temporelles pour respecter la saisonnalité : l'une de plus ou moins un mois et l'autre de plus ou moins deux mois.

Pour chaque journée de la période considérée en 1859, 35 situations analogues ont été sélectionnées sur la période couverte par les réanalyses NCEP/NCAR (1948-2007). La température à 850 hPa a été extraite au point de grille défini précédemment. Nous avons alors construit, pour chaque jour cible de 1859, la distribution des températures, à partir de laquelle nous avons déduit les quantiles d'ordre 20, 60 et 90%. En outre, nous avons retenu la température observée lors de la situation la plus analogue à chaque situation cible (Analogue n°1).

La Figure 7 présente l'évolution des statistiques de température observée lors des situations analogues, après avoir appliqué une fenêtre de plus ou moins deux mois (gauche) et de plus ou moins un mois (droite).

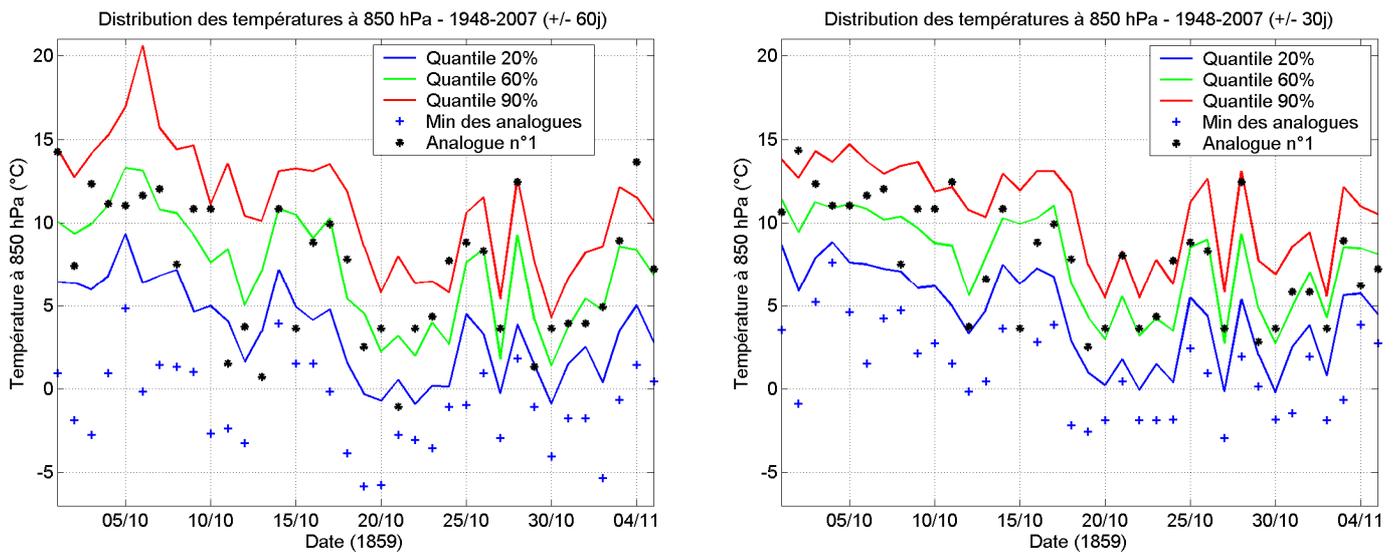


Figure 7. Evolution de la distribution des températures à 850 hPa observées lors des journées analogues à celles de 1859, sur la période 1948-2007 : en appliquant une fenêtre de +/- 2 mois (gauche) et une fenêtre de +/- 1 mois (droite).

De la même manière, la distribution des géopotentiels a pu être établie pour chaque jour cible de 1859. Le géopotentiel moyen de chaque distribution et le géopotentiel de la première analogue en ont été déduits (Figure 8). Afin de respecter la saisonnalité du géopotentiel, nous avons ici appliqué une fenêtre temporelle de plus ou moins deux mois autour de chaque jour cible.

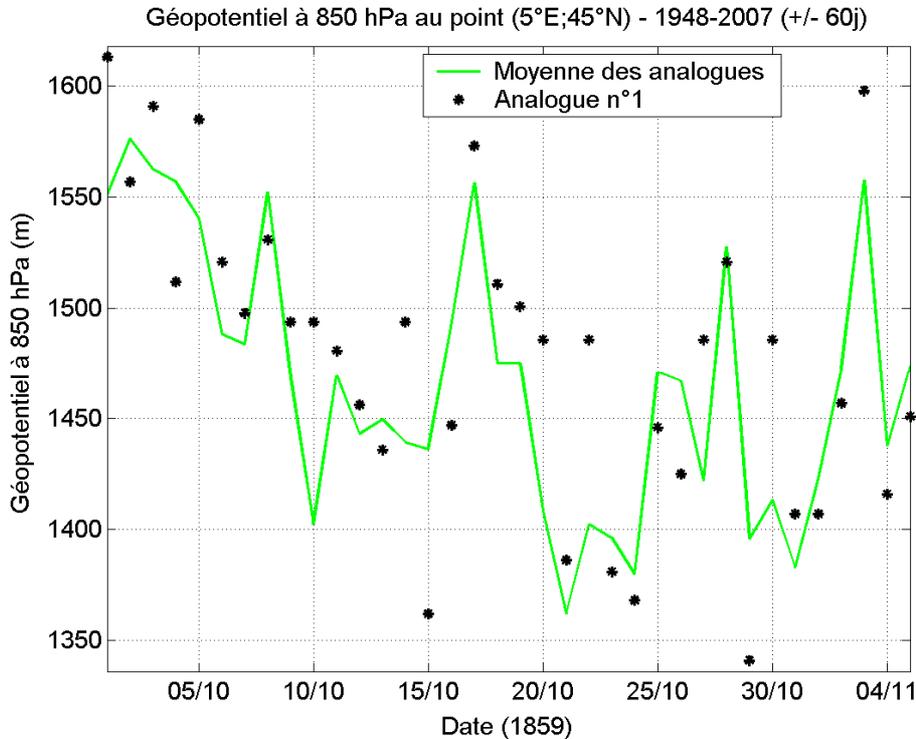


Figure 8. Evolution du géopotentiel à 850 hPa établie à partir des situations analogues aux situations cibles de 1859 : moyenne de chaque distribution et valeur du géopotentiel associé à la situation la plus analogue à chaque situation cible. La fenêtre temporelle dans laquelle les analogues ont été sélectionnées est de large de quatre mois.

L'examen de la Figure 7 montre que la fenêtre temporelle de quatre mois apparaît finalement plus pertinente. En effet en réalité, elle permet, pour les journées d'octobre 1859, de sélectionner des situations analogues du

mois de décembre. Ainsi les distributions tiennent compte de ces situations, avec notamment des températures extrêmes basses plus faibles.

Nous pouvons déduire de la Figure 7 cinq périodes distinctes :

- période douce du 1/10 au 17/10 ;
- période froide du 19 au 24/10 ;
- période assez douce du 25 au 28/10 ;
- période froide les 29 et 30/10 ;
- période douce à partir du 31/10.

En outre, la Figure 8 indique une fluctuation assez faible du géopotential. Sur notre période, l'altitude à laquelle on aurait observé la température à 850 hPa est d'environ 1450 m. Nous retrouvons néanmoins des altitudes plus basses du 21 au 24 et du 29 au 31 octobre, ce qui indique le passage probable d'une dépression ou d'un talweg à proximité durant ces journées. En revanche, le géopotential remonte fortement du 1<sup>er</sup> au 3 novembre, ce qui traduit le radoucissement observé à l'aide des températures. Une hausse du champ de pression pourrait également être à l'origine de cette brusque remontée du géopotential.

Il y aurait donc eu des épisodes de temps perturbé combinés à des changements de température. On remarque notamment, en analysant conjointement la Figure 6 et la Figure 7, que des précipitations se sont probablement produites au cours de l'épisode plus froid entre le 20 et le 24 octobre. Un manteau neigeux significatif se serait alors constitué en altitude. Ensuite, un radoucissement de la masse d'air aurait accompagné l'épisode pluvieux du 31 octobre au 2 novembre. Ceci aurait eu pour conséquence une fonte partielle des stocks de neige constitués en altitude.

Enfin, pour vérifier la pertinence des graphiques précédents, nous pouvons les comparer avec l'évolution des températures relevées par exemple à Grenoble (Figure 9).

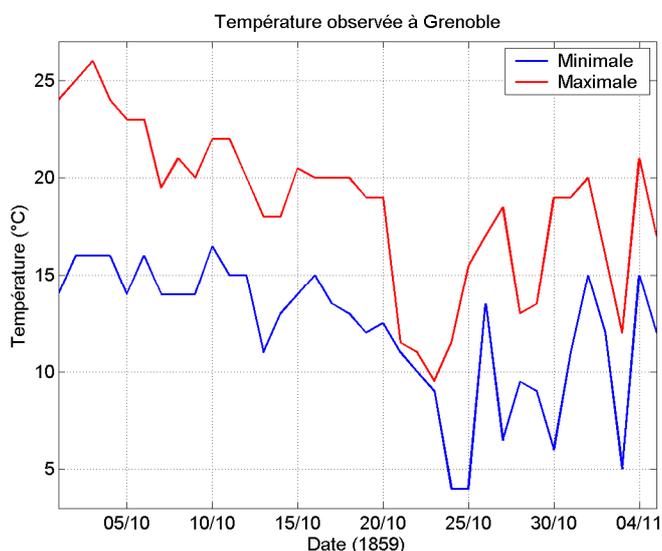


Figure 9. Evolution des températures minimales et maximales relevées à Grenoble sur la période du 1 octobre au 5 novembre 1859.

Nous retrouvons ici globalement une évolution de température à Grenoble similaire à l'évolution de la température à 850 hPa reconstituée par les analogues. Les différences, telles que celles observées les 28 et 29 octobre (températures limitées à Grenoble mais assez élevées en altitude), pourraient s'expliquer notamment par la présence de couverture nuageuse ou par l'occurrence de précipitations.

### Régimes de temps

Il est également possible, à l'aide de la technique d'analogie, d'analyser la situation synoptique de la période de 1859. Nous avons d'abord cherché à décrire l'évolution du régime de temps qui a pré-dominé durant cette période. Pour ce faire, nous avons utilisé la classification par types de temps (TDT) développée par EDF

(Paquet et al., 2006). Les champs moyens associés aux TDT sont représentés sur la Figure 10. La période totale sur laquelle les TDT sont disponibles couvrent les années 1953-2006. Dans cette partie, nous n'avons donc recherché les situations analogues à celles de 1859 en termes de Pmer que dans cette période. Nous en avons déduit, pour chaque jour cible de 1859, la proportion de situations analogues associées à chaque TDT (Figure 11).

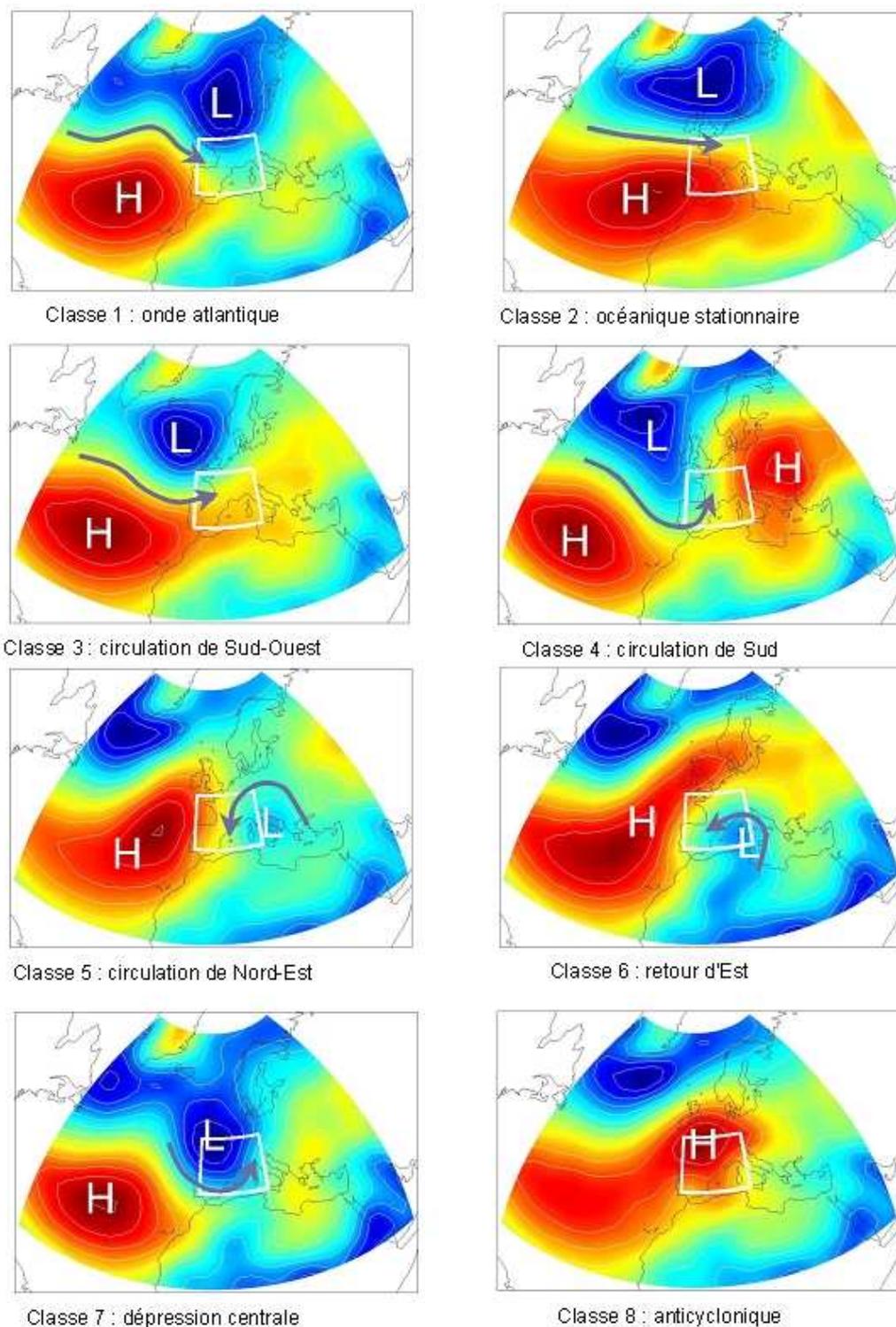


Figure 10. Classification par TDT établie par EDF.

Les résultats obtenus confirment que le début du mois d'octobre fut marqué par des conditions anticycloniques.

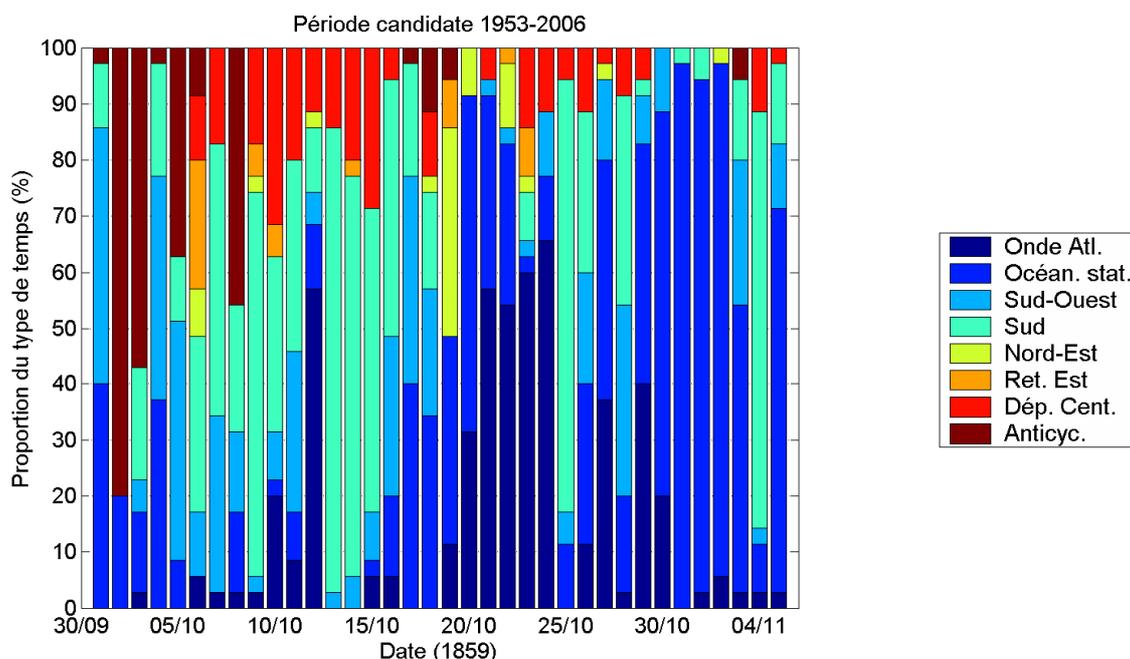


Figure 11. Répartition des TDT EDF parmi les situations analogues à chaque situation cible de la période de 1859.

Entre le 6 et le 16 octobre, le TDT le plus représenté par les analogues retenues est le type Sud (classe 4). En revanche, aucun TDT ne prédomine sur la période du 17 au 20 octobre. Nous avons vu, lors de l'analyse des précipitations obtenues par les analogues, que la période du 21 au 24 octobre était humide avec une forte probabilité de précipitations assez conséquentes. Le TDT qui prévaut durant cette période est le type Onde Atlantique (classe 1), ce qui confirme les résultats obtenus sur les précipitations. En effet, ce type de temps est associé à une alternance d'ondes baroclines génératrices de précipitations. Par ailleurs nous remarquons que pour la journée du 25 octobre, le TDT largement représenté est le type Sud (classe 4), ce qui confirme bien le radoucissement qui s'est produit à cette date là (cf. températures à 850 hPa, Figure 7). La fin du mois reste dominée par un flux d'ouest avec la récurrence du type de temps Océanique Stationnaire (classe 2). Ainsi entre le 30 octobre et le 2 novembre, pas moins de 70% des situations analogues retenues appartiennent à cette classe. Ce résultat confirme l'occurrence de précipitations sur la zone d'intérêt durant cette période, mais cela ne permet pas d'affirmer que ces précipitations furent accompagnées d'un radoucissement. En revanche, dans ce type de configuration synoptique, le risque de vents forts de secteur sud-ouest est réel. Cet élément est peut-être également à l'origine de la fonte nivale qui s'est probablement déclenchée en altitude à cette période.

Pour achever cette étude, nous avons étudié la circulation atmosphérique à partir des champs de géopotentiel à 500 hPa (Z500). Puisque nous disposons des dates des situations analogues à chaque situation cible de la période de 1859 en termes de Pmer, les champs de Z500 ont été extraits des réanalyses NCEP/NCAR pour chacune de ces dates. Finalement pour chaque jour cible entre le 1/10 et le 5/11/1859, le champ moyen de Z500 obtenu sur les champs des analogues a été calculé. Pour que l'analogie soit de meilleure qualité, nous avons recherché les dates analogues dans la période la plus longue possible (1948-2007). Nous avons cartographié ces champs pour chaque jour cible, et pour chacun de ces champs, nous avons comparé le champ de Pmer reconstitué par Météo-France (Jourdain et al., 2009). La Figure 12 illustre les situations rencontrées lors de deux journées contrastées : le 23 octobre et le 1<sup>er</sup> novembre. Les cartes restantes sont reportées en annexe I.

Le 23 octobre, journée incluse dans une période pluvieuse, nous avons vu précédemment qu'un refroidissement s'était probablement produit. Nous retrouvons ce résultat grâce à ces cartes. En effet, le champ de Z500 indique un talweg prononcé axé des îles britanniques à la Méditerranée occidentale, synonyme d'arrivée d'air froid en altitude et donc d'un changement de masse d'air. Le champ de Pmer est particulièrement cohérent avec le champ d'altitude. Une dépression se creuse ainsi en Méditerranée, entraînant le basculement du vent au secteur nord sur le sud-est de la France. Le 1<sup>er</sup> novembre, on remarque que les champs d'altitude et de surface sont fort similaires, témoignant d'un flux zonal très marqué (cf. analyse de Jourdain et al., 2009). L'air advecté sur la région d'étude est par conséquent très humide et relativement doux.

De manière générale, les résultats obtenus sur l'ensemble de la période rejoignent nos conclusions de l'analyse des TDT.

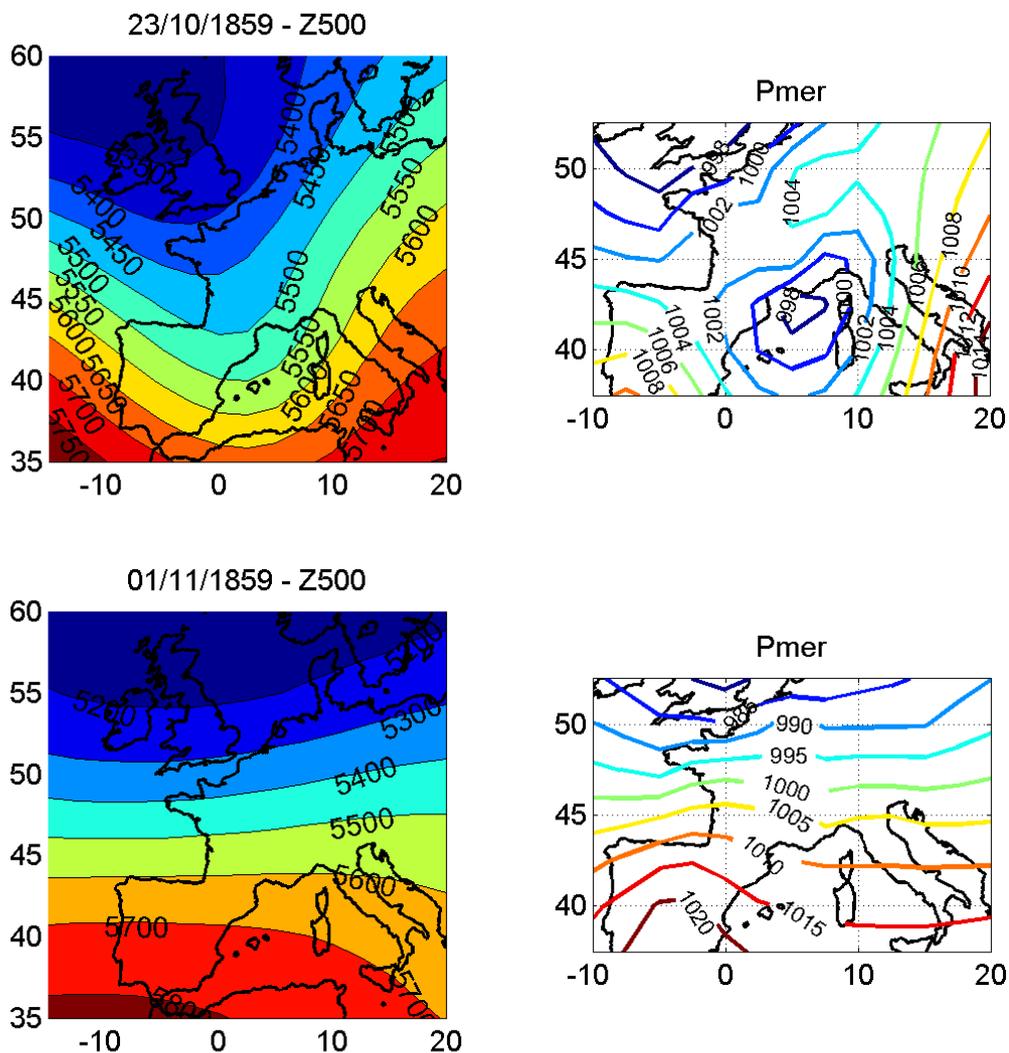


Figure 12. Situations météorologiques reconstituées pour les journées du 23 octobre et du 1er novembre 1859. Champ moyen de géopotential à 500 hPa obtenu à l'aide des analogues (gauche) et champ de Pmer reconstitué par Météo-France (droite).

## CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de reconstituer la séquence pluviométrique de la période précédant la crue de l'Isère de 1859. Pour y répondre, une technique d'analogie a été employée. Dans un premier temps, cette technique a été adaptée au bassin de l'Isère. Les paramètres (domaine d'analogie, nombre d'analogues retenues) ont ainsi été optimisés sur le bassin.

Pour chaque journée entre le 1<sup>er</sup> octobre et le 5 novembre 1859, nous avons ensuite sélectionné 35 situations analogues en termes de champ de pression au niveau de la mer, dans une période plus récente (1970-2006). Grâce aux précipitations observées au cours de ces journées, nous avons pu construire une distribution empirique des pluies pour chaque journée de 1859, et ce sur les sept sous-bassins de l'Isère définis. Nous avons déduit des résultats plusieurs périodes pluvieuses entrecoupées de périodes sèches. Nous avons notamment détecté deux séquences probablement pluvieuses : la première du 20 au 24 octobre et la seconde du 29 octobre au 2 novembre. Néanmoins, les précipitations journalières telles qu'elles ont été quantifiées ne semblent pas exceptionnelles.

Nous avons également étudié, sur la même période, les distributions des températures mesurées au niveau de pression 850 hPa, observées lors des journées analogues d'une période récente. Cette analyse a permis de mettre en évidence une alternance de périodes froides et chaudes. Notamment la période pluvieuse du début de la seconde décennie d'octobre 1859 aurait été associée à un refroidissement de la masse d'air, ce qui aurait permis à un stock de neige de se constituer en altitude. Par la suite, un radoucissement se serait produit à la toute fin du mois d'octobre, moment où un nouvel épisode de précipitations aurait probablement eu lieu. Ces éléments

combinés auraient alors engendré une fonte partielle du manteau neigeux en altitude et ainsi contribué à la crue de l'Isère.

Enfin, nous avons analysé les types de temps prédominants durant la période précédant la crue. En outre, nous avons étudié la circulation atmosphérique à échelle synoptique à l'aide du champ moyen de géopotential à 500 hPa construit grâce aux dates analogues retenues. Il s'avère que la période froide et humide du début de la seconde décennie d'octobre aurait été associée à une ondulation atlantique, avec une alternance de talwegs et de dorsales. En revanche, c'est probablement une circulation d'ouest marquée qui a prévalu durant la fin du mois d'octobre 1859. Des perturbations atlantiques accompagnées d'un radoucissement auraient alors été à l'origine de précipitations modérées mais aussi de la probable fonte partielle du manteau neigeux en altitude.

Nos travaux s'inscrivent dans la continuité et la complémentarité de ceux menés par Jourdain et al. (2009). Les résultats en terme d'interprétation du scénario météorologique semblent bien s'accorder avec leurs conclusions.

Modif. :

Cependant, nous avons été bridés, dans cette phase de l'étude, par la longueur de notre archive SAFRAN. Même si c'est avec celle-ci que nous avons optimisé la méthode, on pouvait tout à fait l'activer, en terme de recherche d'analogie météorologique, sur une archive plus longue. C'est ce qui a été fait sur l'archive NCEP/NCAR, en utilisant cette fois une période plus longue 1953-2005. Les analogues obtenues sur cette période, potentiellement un peu meilleures que sur 1970-2006, ont été utilisées ensuite par Obled et al. (2009), en complément de l'archive pluviométrique EDF -Gottardi pour reconstituer plus précisément un scénario de précipitations et de températures sur cette même période 1953-2005 (cf. partie III suivante).

Cette partie du travail révèle également le fort intérêt d'appliquer une technique d'analogie à un autre contexte que celui de la prévision, tel que celui de la reconstitution de données historiques assorties des incertitudes.

## Références bibliographiques

Ben Daoud A., 2009. **La prévision des précipitations par recherche d'analogues : état de l'art et perspectives**. La Houille Blanche (sous presse).

Duband D., 1970. **Reconnaissance dynamique de la forme des situations météorologiques. Application à la prévision quantitative des précipitations**. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle de la Faculté des Sciences de Paris.

Hersbach H., 2000. **Decomposition of the ranked probability score for ensemble prediction systems**. Weather Forecasting, 15, 559-570.

Jourdain S., Clavel A. et A. Auffray, 2009. **Contexte météorologique des mois d'octobre et novembre 1859**. Colloque Isère 1859 -2009, 150<sup>ème</sup> anniversaire de la crue de référence, 5 nov. 2009.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. and Joseph, D., 1996. **The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project**. Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 437-471.

Lorenz E.N., 1969. **Atmospheric predictability as revealed by natural occurring analogues**. Journal of the Atmospheric Sciences, 26, 636-646.

Obled Ch., Panthou G., Garçon R. et F. Gottardi, 2009. **Crue de l'Isère 1859 : Reconstitution d'un scénario de précipitations et de températures pour la période 1er Octobre- 5 Novembre 1859**. Colloque Isère 1859 -2009, 150<sup>ème</sup> anniversaire de la crue de référence, 5 nov. 2009.

Panthou G., 2009. **Etude hydrométéorologique d'un événement nivo-pluvial : La crue de l'Isère 1859**. Mémoire de Master 2P ES Université J. Fourier. 70 p.

Paquet, E., Gailhard, J. and R. Garçon, 2006. **Evolution of GRADEX method: improvement by atmospheric circulation classification and hydrological modelling**. La Houille Blanche, 5, 80-90.

Sauquet E., 2006. **Mapping mean annual river discharges : geostatistical developments for incorporating river network dependencies**. Journal of Hydrology, 331, 300-314.

Teweles J. and H. Wobus, 1954. **Verification of prognosis charts**. Bulletin of the American Meteorological Society, 35, 455-463.

Uppala, S.M., Kallberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., Da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., Van De Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hölm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, I., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J., 2005. **The ERA-40 reanalysis**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 131, 2961-3012.

Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M. and J.-M. Soubeyroux, 2009. **A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system**. International Journal of Climatology, DOI: 10.1002/joc.2003.



*Troisième partie :*

**RECONSTITUTION DE SCENARIOS DE  
PRECIPITATIONS ET DE TEMPERATURES  
SUR LE BASSIN DE L'ISERE  
ENTRE LE 1<sup>ER</sup> OCTOBRE  
ET LE 5 NOVEMBRE 1859**

par **Jeremy Panthou et Charles Obled\***, INPGrenoble, Laboratoire LTHE

**Alain Gautheron**, Service de Prévision des Crues alpes-Nord

**Remy Garçon et Frédéric Gottardi**, Electricité de France, Division Technique Générale



# RECONSTITUTION DE SCENARIOS DE PRECIPITATIONS ET DE TEMPERATURES SUR LE BASSIN DE L'ISERE ENTRE LE 1<sup>ER</sup> OCTOBRE ET LE 5 NOVEMBRE 1859

Jeremy Panthou\*, Charles Obled\*, Alain Gautheron\*\*, Remy Garçon\*\*\* et Frédéric Gottardi\*\*\*

\* Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement  
Institut National Polytechnique de Grenoble, B.P. 53, 38041 Grenoble, Cedex 9, France  
Tél: +33 (0)4 76 82 50 53, Fax: +33 (0)4 76 82 50 14, e-mail: [charles.obled@hmg.inpg.fr](mailto:charles.obled@hmg.inpg.fr)

\*\* DDE38 - Service de Prévision des Crues Alpes Nord  
17 bd Joseph Vallier BP 45 38040 Grenoble Cedex 9

\*\*\* EdF – DTG, 21 Av. de l'Europe B.P. 41 38040 Grenoble, , Cedex 9, France

*La reconstitution des champs de pression Pmer menée par MétéoFrance pour les mois d'octobre et novembre 1859 a permis au CEMAGREF de proposer, pour chacune de ces journées, une sélection de 35 dates analogues prises dans la période 1953-2005 pour laquelle les champs de précipitations et de températures sont beaucoup mieux connus. A l'aide de ces analogies, et des rares données stationnelles de 1859 disponibles seulement à la périphérie du bassin, on propose une méthodologie permettant de transférer ces informations sur 7 sous-bassins de l'Isère en amont de Grenoble. L'objectif est de reconstituer, pour le bassin global et chaque sous-bassin, un scénario plausible de précipitation journalière mais aussi de niveau de l'isotherme 0°C, afin de discriminer ce qui contribuera soit à l'écoulement immédiat, soit à la constitution d'un manteau de neige, soit à sa fusion. Ces scénarios ont été validés à travers un modèle hydrologique global lui-même contraint par les estimations de débits disponibles à Grenoble, afin de constituer un ensemble cohérent. Cela permet de vérifier que la crue a été occasionnée non par des précipitations extrêmes dans les deux jours qui l'ont précédée, mais plutôt par une séquence météorologique rare sur la quinzaine de jours qui l'ont précédée.*

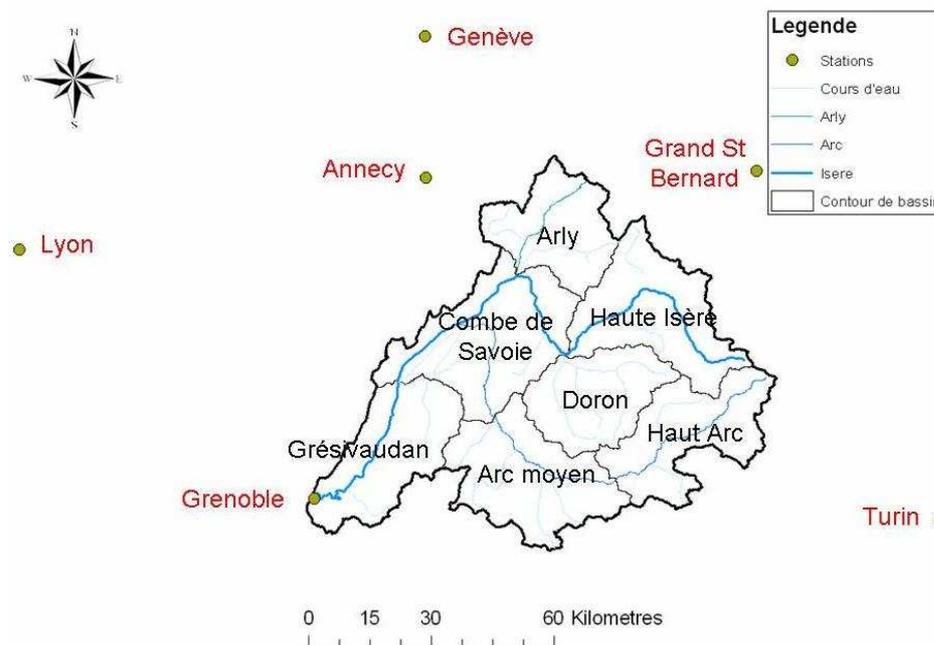
## Introduction - Données et informations disponibles

Il y a 150 ans, l'Isère inondait Grenoble et tout le Grésivaudan, au point que cette crue des 1<sup>er</sup> et 2 Novembre 1859 a été retenue comme « crue de référence » pour les aménagements en cours. D'où l'intérêt qu'il y a à bien comprendre ce qui s'est passé à cette occasion... Or aujourd'hui, pour bien comprendre un événement de crue, on effectue ce que l'on appelle un retour d'expérience (Delrieu et al. 2005, Gaume et Borga, 2008) : on rassemble les données de pluies sur le bassin concerné, l'imagerie radar, les débits mesurés à différents exutoires et les niveaux relevés en certains points, puis, à l'aide d'un modèle hydrologique, généralement calé sur une longue période, on teste et on vérifie les conditions qui ont permis d'aboutir à la crue en question. (ex : crue du Gard 2002). Nous aurions évidemment souhaité faire de même pour la crue de l'Isère de 1859, mais les données disponibles se sont révélées bien plus modestes qu'aujourd'hui... A défaut d'avoir une série dense d'informations sur le bassin, nous devons donc nous contenter d'*imaginer un ou plusieurs scénarios* susceptibles d'avoir conduit à cette crue... Le minimum à attendre de ces scénarios est qu'ils soient cohérents avec toute l'information disponible, quantitative et qualitative, et qu'ils permettent d'expliquer les débits extraordinaires qui ont été observés.

Cet exposé s'inscrit évidemment dans le prolongement des deux parties précédentes (communications Auffray et al. et Ben Daoud et al. 2009) ; la première avait pour objectifs la recherche des données et en particulier la reconstitution des champs de pression au niveau de la mer, sur la France et les pays limitrophes, pour la période du 1<sup>er</sup> Octobre au 15 Novembre 1859. La seconde appliquait sur ces champs une méthode de recherche de situations analogues. Son but est de proposer, pour chaque jour de cette période 1<sup>er</sup> octobre -5 novembre 1859, un ensemble de 35 journées assez semblables à la journée en question, mais prises ici sur la période 1953-2005, pour laquelle les précipitations sont bien connues.

Comme on l'a décrit en première partie dans Auffray et al. 2009, il y avait parmi les données disponibles en 1859, six stations météorologiques au sens classique d'aujourd'hui : Lyon, Grenoble, Annecy, Genève, le Grand Saint Bernard et Turin. Elles proposaient la pression atmosphérique à midi, les températures minimales et maximales (parfois aussi à heure fixe : midi, ou matin/soir) et mesuraient toutes la précipitation journalière, à l'exception d'Annecy. Elles donnaient aussi des indications sur le type de temps (serein, couvert, pluvieux, etc...), matin et soir et parfois la nuit et certaines indiquaient aussi la direction du vent et précisaient "calme" ou "vent fort", etc... Une station "amateur" (M. Flandrin), avec malheureusement des jours manquants, est venue conforter Grenoble en donnant de plus quelques indications sur l'enneigement ("neige au Rachais"...etc...). On a aussi pu glaner ici ou là, dans des documents ou des journaux, des indications sur des journées particulières, qu'il faudra essayer de prendre en compte dans nos scénarios.

Pour des raisons de modélisation hydrologique ultérieure (cf. Gautheron et al. 2009), nous avons découpé le bassin de l'Isère à Grenoble en sept sous-bassins (Figure 1), plus homogènes climatiquement et de tailles à peu près comparables (cf. Tableau I). On verra aussi (Tableau III) que ces sous-bassins sont certes intercorrélés en précipitations, mais pas tant que cela (notamment pour les plus fortes). D'où l'intérêt de les considérer individuellement, quitte à les réagréger ensuite.



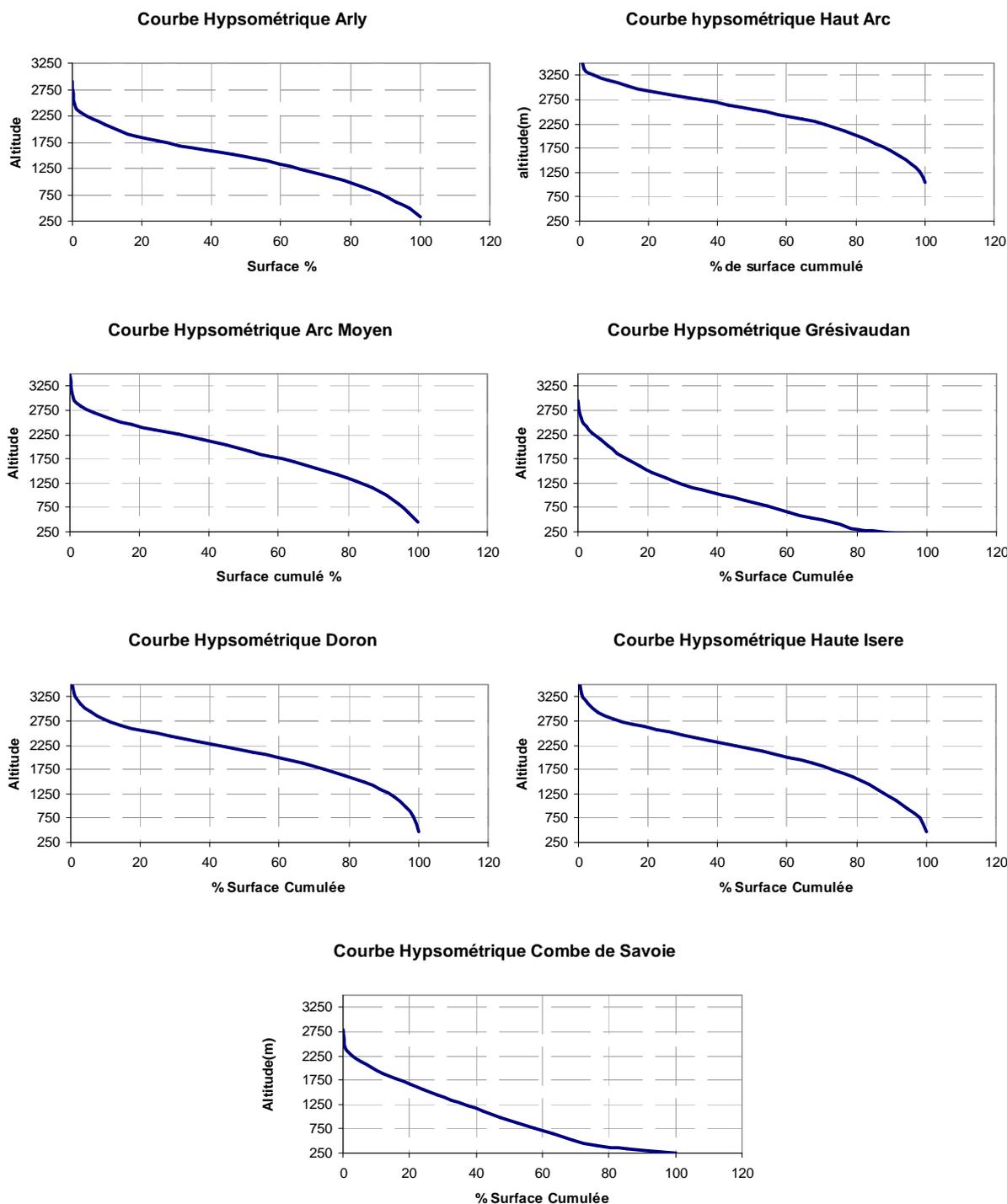
**Figure 1**

Notre objectif est en effet de proposer à la modélisation hydrologique, pour chaque jour d'octobre-novembre 1859, une valeur de précipitation moyenne sur chaque sous bassin, ainsi qu'une idée du profil de température. En pratique on fournira l'altitude de l'isotherme 0°C et le gradient altitudinal de température.

Cela permettra :

- d'une part, de décider au dessus de quelle altitude la précipitation tombe sous forme de neige (il neige à peu près jusqu'à +1°C)
- d'autre part, pour les altitudes plus basses, de calculer la lame de fonte en fonction des températures et du stock de neige disponible à chacune de ces altitudes (en fait par bandes d'altitude de 300 m)

Naturellement pour en déduire les volumes d'eau liquide disponible (pluie et fonte de neige) il faut prendre en compte les surfaces réelles comprises dans ces bandes d'altitude, ce grâce à la courbe hypsométrique de chaque sous-bassin (cf. figure 2).



**Figure 2** Courbes hypsométriques des différents bassins

Enfin, pour compléter la liste des données disponibles, rappelons que nous disposons sur la période récente (1953-2005) d'une longue archive pluviométrique et thermométrique journalière, au pas de 1x1 km<sup>2</sup>, élaborée par EdF dans le cadre de la thèse de F. Gottardi (2009). Outre l'utilisation qui en sera faite dans le chapitre suivant, celle-ci a permis d'élaborer, (Villacorta 2009), *pour chaque station et sous-bassin considéré*, la distribution statistique des précipitations maximales annuelles, et saisonnières d'automne, sur des durées de 1 à 4 jours (cf. tableau I pour la seule durée journalière), ce qui nous permettra de positionner nos scénarios en terme de périodes de retour (cf. tableau I pour la seule durée journalière, et Annexe 3 pour des résultats plus détaillés sur 1 et 2 jours).

**Tableau I**

		Précipitations maximales (mm)			
		Saisonniers d'automne (Durée 1 jour)		Annuelles (Durée 1 jour)	
BV	surface (km <sup>2</sup> )	Temps de retour		Temps de retour	
		10 ans	100 ans	10 ans	100 ans
Arly	652	93	135	105	144
haut Arc	785	93	142	111	162
Doron	666	79	118	97	141
Arc moyen	916	80	114	96	138
haute Isere	908	89	132	102	144
Combe de Savoie	1072	84	125	91	130
Grésivaudan	789	88	129	94	132
Global	5788	76	98	88	124

## 2- Elaboration d'un scénario de précipitations et de températures

### 2-1) Scénarios de précipitations

On dispose donc, pour cinq stations seulement, de données de précipitations mesurées dont, malheureusement, aucune ne se trouve dans le bassin proprement dit.

Une première méthode, linéaire et globale, aurait pu consister à utiliser la corrélation existant entre la valeur journalière à une station et la valeur journalière sur le sous bassin proche (cf. Détail en Annexe 2). On peut calculer cette corrélation pour la période 1953-2005, éventuellement en se limitant à des valeurs de précipitations supérieures à un seuil. Malheureusement, cette corrélation n'est pas très forte (cf. tableau II), voire franchement médiocre pour certains couples station / bassin.

Les résultats sont satisfaisants pour Turin vs. le haut Arc et pour Grenoble vs. le Grésivaudan, mais beaucoup moins encourageants pour Genève vs. l'Arly et Grand Saint Bernard vs. la haute Isère...

L'une des explications de ces résultats est la « rigidité » de la linéarité, recherchée ici sur l'ensemble des situations alors que la relation est certainement dépendante du type de temps : par exemple, en régime de sud-ouest, Grand St Bernard et Turin sont sous le vent dominant et en situation de foehn par rapport aux bassins haute Isère et haut Arc, donc certainement déficitaires. C'est l'inverse en régime de retour d'est ...! On aurait certes pu faire ces corrélations par types de temps, ce qui est présenté en annexe, mais une autre approche a été retenue

**Tableau II**

BV	Station	BV ayant une précipitation > T=2ans	Nombre de journées retenues	R <sup>2</sup>
Haut arc	Turin	Haut Arc et haute Isère	28	0,74
Grésivaudan	Saint Martin d'Hères	Grésivaudan, Arc moyen, et Combe de Savoie ou BV global	86	0,75
Arly	Genève	Arly, Doron et haute Isère	39	0,23
Haute Isère	Grand St Bernard	Haute Isère, Arly et Combe de Savoie	54	0,24

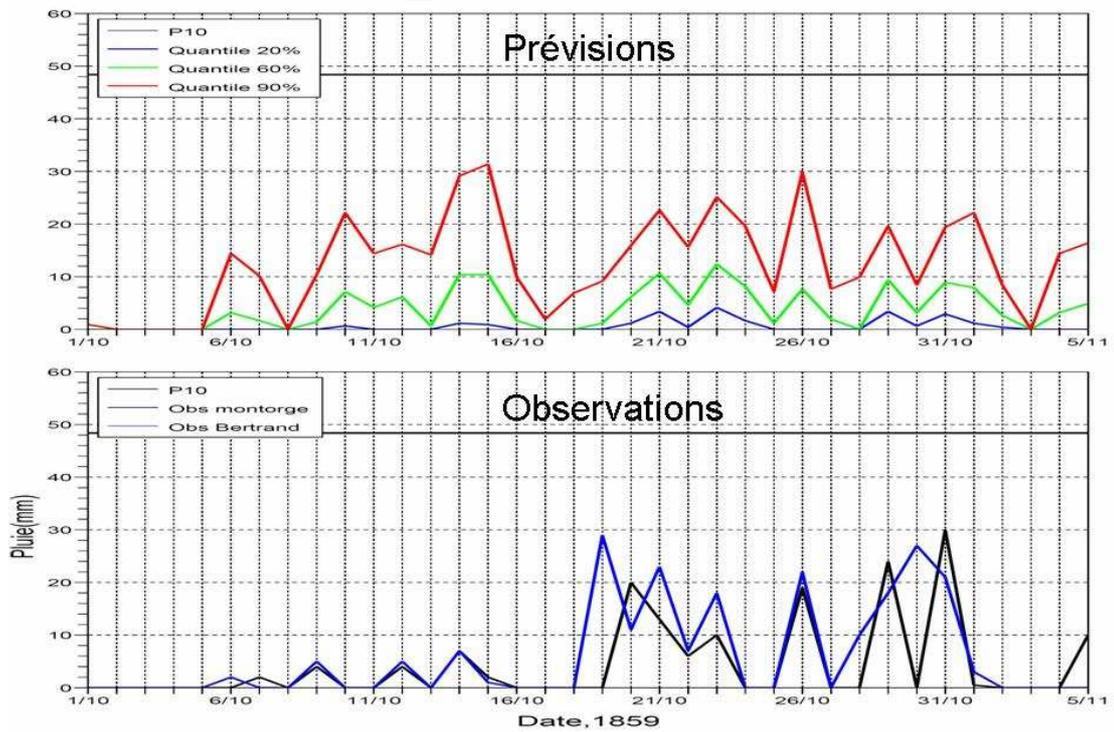
Cette deuxième approche, beaucoup plus flexible, va consister à s'appuyer sur la méthode des analogues. Celle-ci a été optimisée pour expliquer au mieux les précipitations (cf. deuxième partie, Ben Daoud et al. 2009). Elle nous propose, pour chaque journée-cible de 1859, un échantillon de journées "analogues" au moins en circulation de basses couches. Et pour ces journées analogues, prises ici dans la période 1953-2005, on dispose désormais d'une archive plus longue que celle proposée par SAFRAN (1970-2006) et utilisée au début du projet par Ben Daoud et al. 2009, dans la deuxième partie de ce rapport. Cette archive EDF, élaborée par F. Gottardi et mise à disposition courant 2009, fournit la précipitation à la fois sur les stations isolées (un pixel) et sur les sept sous-bassins (moyenne des pixels du bassin).

Pour une station par exemple, et une journée-cible, on peut donc prendre les 35 valeurs de précipitations des journées analogues à cette journée-cible, les classer, et ajuster une loi (Gamma) sur leur distribution empirique. On peut alors en tirer des valeurs caractéristiques de la journée-cible, comme les quantiles 20, 60 et 90% au non-dépassement. On peut ensuite tracer ce "signal pluviométrique" (**figure 3a**) pour chaque jour de la période considérée, et le comparer aux précipitations observées. On peut faire de même pour le sous-bassins le plus proche de cette station. On constate alors que :

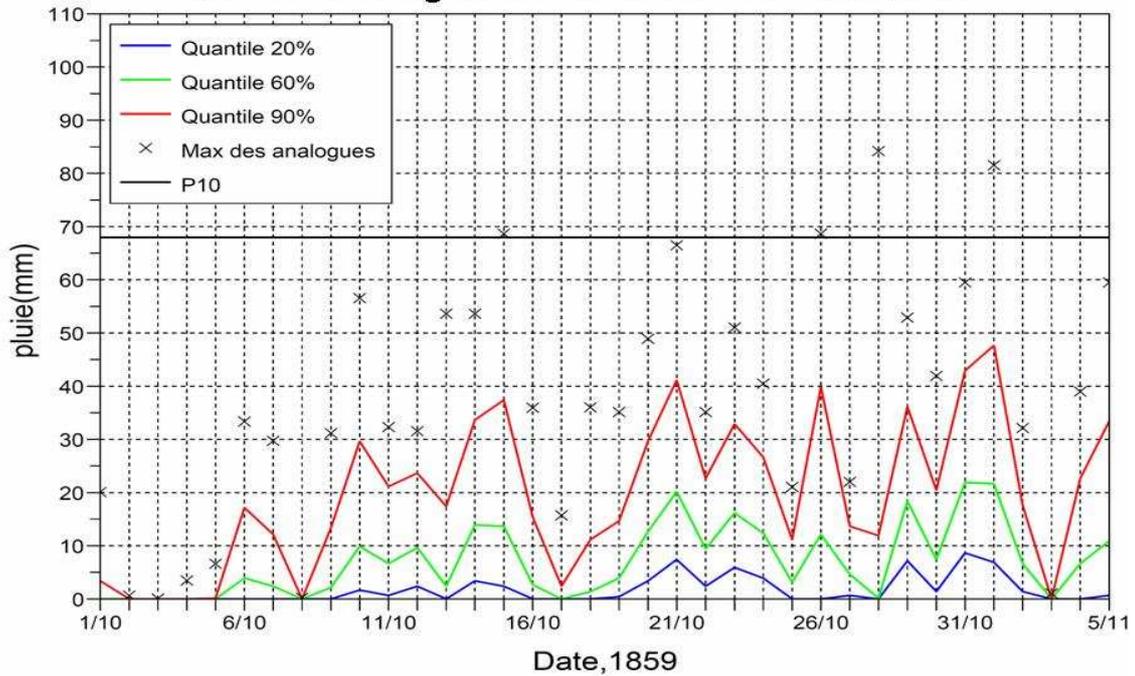
- d'une part, aux stations, le signal pluviométrique à la station correspond assez bien avec les précipitations qui y ont été observées (**figure station 3a**) ;
- et que, d'autre part, si les valeurs absolues de précipitations diffèrent, la forme du signal est assez ressemblante entre la station et le bassin voisin. (**figure bassin 3b**).

Naturellement, même si les signaux respectifs (-à la station et au bassin proche-) confluent, la distribution des valeurs absolues n'est pas la même. D'abord, elle n'est pas la même *climatologiquement* (en moyenne interannuelle) car par exemple l'altitude joue un rôle et diffère entre St Martin d'Hères et la moyenne du sous bassin Grésivaudan qui inclue les hauteurs de Belledonne. Mais de plus cette distribution n'est pas la même *au jour le jour*, car les effets orographiques, de foehn, etc...peuvent être accentués / atténués selon le type de temps, et ce sont ces « modulations » au jour le jour que les analogues permettent de suivre en proposant chaque jour un sous-échantillon représentatif des conditions spécifiques de la journée.

### Prévision analogue à la station saint martin d'hères



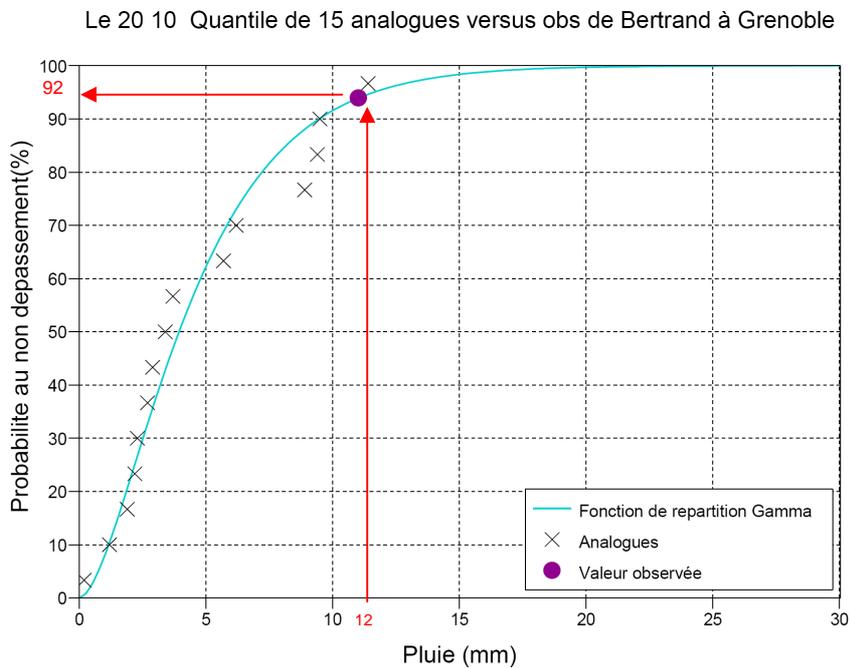
### Prévision analogue sur le Bassin Grésivaudan



**Figure 3** -a) Station Saint Martin d'Hères -b) Sous-bassin Grésivaudan

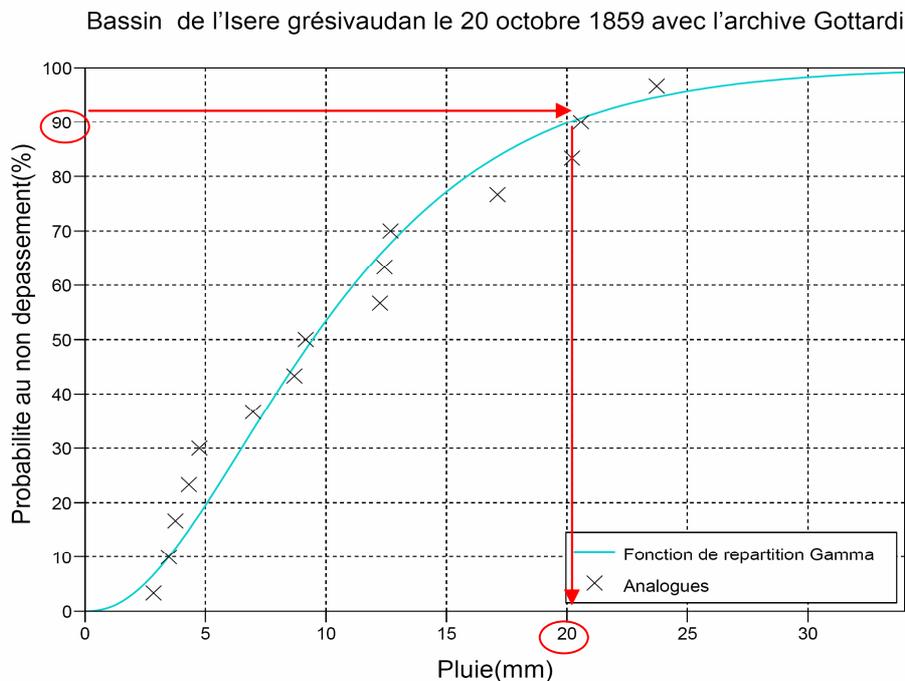
Pour affecter des pluies aux sous-bassins retenus, cette méthode Quantile-Quantile retient donc l'idée:

a) - de regarder d'abord, pour la journée cible J, la probabilité d'avoir la valeur observée Pobs à la station, par exemple :  $\text{Prob}[P_{\text{station}} < P_{\text{obs}}] = 92\%$  (cf. figure 4.a) .



**figure 4.a**

Cela signifie dans cet exemple que, par rapport à ce qui était attendu de la circulation synoptique de cette journée, les précipitations à la station ont une valeur assez forte, plutôt rare pour cette station dans de telles conditions.



**figure 4.b**

**b)** - Ensuite on considère *le bassin voisin* de la station (cf. figure 4.b), et on suppose que la précipitation a une probabilité voisine, - donc ici une valeur assez rare aussi -, mais prise cette fois dans la distribution des valeurs moyennes sur le bassin pour ce jour J.

Le principe est donc de considérer que l'on a le quantile de même probabilité sur le bassin et à la station voisine, sauf que leurs valeurs absolues sont différentes car leurs distributions respectives n'ont pas les mêmes paramètres, du fait de l'intégration spatiale et de l'orographie.

On fait cela d'abord pour les 4 bassins considérés comme proches d'une station (Grenoble pour le Grésivaudan, Genève pour l'Arly, Le Grand Saint Bernard pour la Haute Isère et Turin pour le Haut Arc respectivement).

Ensuite, pour les bassins intermédiaires n'ayant pas de station "proche", on interpole en tenant compte des corrélations entre bassins ( par exemple, la combe de Savoie est plus corrélée avec l'Arly qu'avec le Grésivaudan (cf. Tableau III matrice des corrélations inter bassins). Et on arrive ainsi à un ensemble de 7 valeurs (une par sous-bassin) pour chaque jour de la période.

Un premier scénario a donc été élaboré selon ce schéma, relativement « automatique », et que nous remettrons partiellement en cause dans les chapitres suivants.

**Tableau III** Corrélations des précipitations journalières entre sous-bassins

<b>Seuil:</b> Tous les BV sont supérieurs à P = 10mm ( il y a 613 journées)								
	haut Arc	Arly	Doron	haute Isere	Arc moyen	Combe Savoie	Gresivaudan	BV global
haut Arc	1,00	0,16	0,68	0,46	0,67	0,27	0,30	0,61
Arly	0,16	1,00	0,45	0,72	0,38	0,83	0,38	0,69
Doron	0,68	0,45	1,00	0,74	0,81	0,59	0,49	0,87
haute Isere	0,46	0,72	0,74	1,00	0,55	0,67	0,33	0,82
Arc moyen	0,67	0,38	0,81	0,55	1,00	0,56	0,62	0,84
Combe Savoie	0,27	0,83	0,59	0,67	0,56	1,00	0,66	0,84
Gresivaudan	0,30	0,38	0,49	0,33	0,62	0,66	1,00	0,69
BV global	0,61	0,69	0,87	0,82	0,84	0,84	0,69	1,00

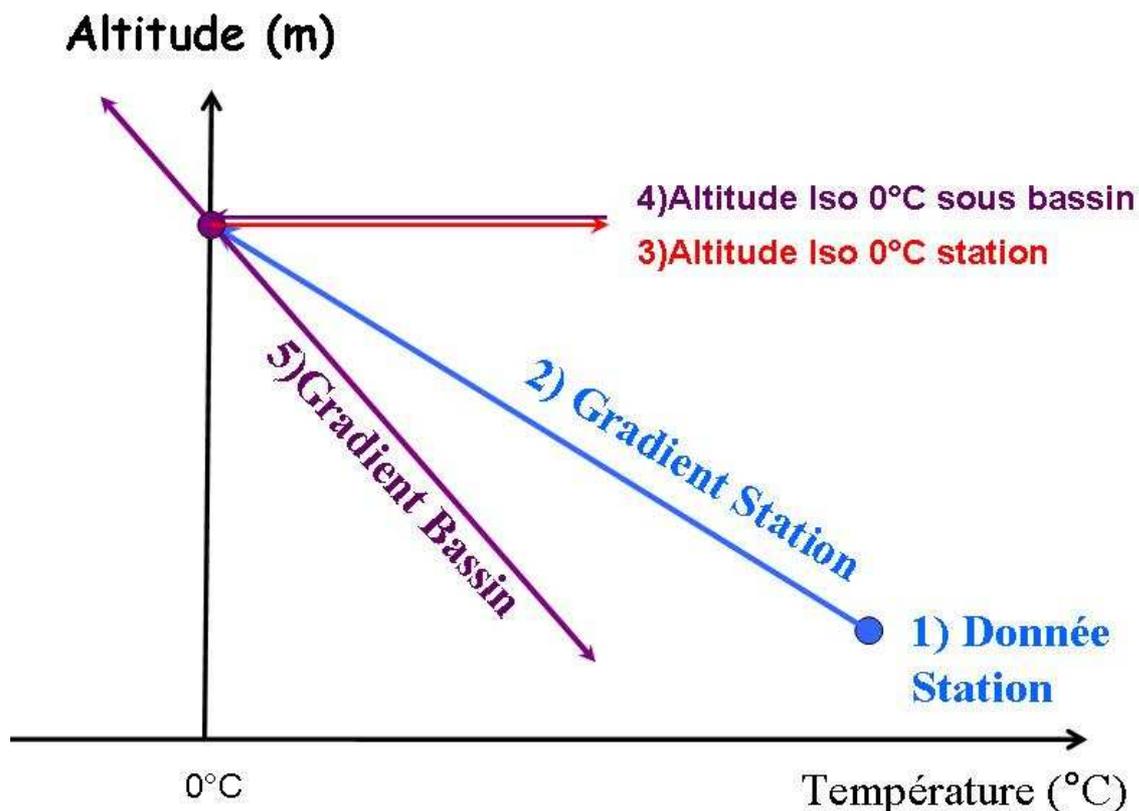
Signalons cependant que cette deuxième façon de procéder ( hypothèse d'identité des quantiles entre sous bassin et station proche) a été testée de manière extensive sur la période d'apprentissage 1953-2005, où l'on connaît à la fois la vraie valeur à la station, comme en 1859, mais aussi sur le sous-bassin (cf. analyse détaillée dans l'Annexe 2). Elle a été comparée à la première approche décrite, et à une troisième utilisant une corrélation linéaire « locale » calée sur les 35 analogues du jour. C'est cette deuxième approche qui est apparue la meilleure, tous types de temps confondus, mais plus encore sur le type de temps 2, qui a été dominant sur la seconde quinzaine d'octobre 1859. Comme on l'a déjà signalé, le détail de ces comparaisons est présenté en Annexe 2.

## 2-2) scénario de température

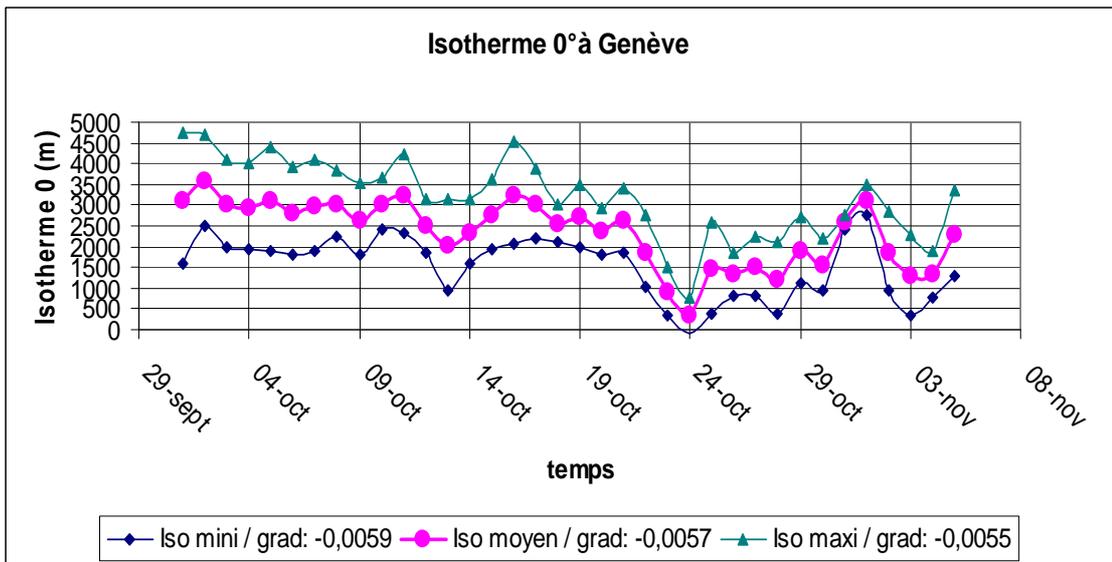
A chacune de nos 7 stations, (on a ajouté cette fois Grenoble-Flandrin et surtout Annecy, qui n'avaient pas de donnée de précipitations), on dispose de même de températures plus ou moins bien définies (mini et maxi, ou mesures à heures fixes, etc...). Pour cette raison, nous avons finalement décidé de nous concentrer d'abord sur la température moyenne journalière, variable requise pour une modélisation hydrologique ultérieure. Nous disposons donc d'une température moyenne à la station, de l'altitude de cette dernière, et nous cherchons l'altitude moyenne de l'isotherme 0°C pour chaque jour et chaque sous bassin.

Nous avons procédé de façon similaire aux précipitations en regardant d'abord chaque station et son bassin le plus proche (cf Figure 5). Le problème était de choisir un gradient altitudinal de température : celui-ci, comme l'a montré F. Gottardi (2009), est différent selon la localisation, la saison, la variable considérée (ici Tmoy) et selon le type de temps... Finalement, nous avons opté pour un gradient unique, moyenné spatialement, et spécifique à la température moyenne du mois d'Octobre. Cela permet alors d'affecter à chaque sous-bassin un niveau de l'isotherme 0°C et, avec ce gradient, de définir un profil de température autour de cette isotherme 0°C .

**Figure 5**



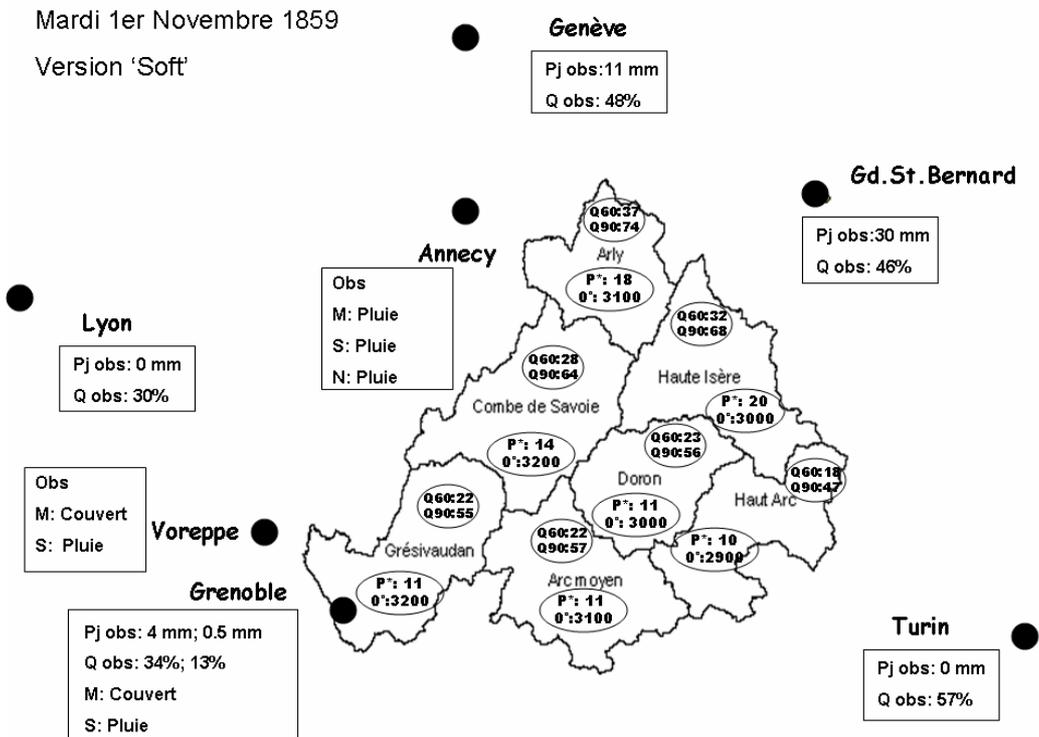
On donne un exemple de thermogramme pour la station de Genève (cf. figure 6).



**Figure 6**

A ce stade de l'étude, le résultat prend la forme d'un document comportant, pour chaque journée de la période (figure 7) :

- une carte des sous-bassins
- avec le pointé des données stations,
- et des estimations de précipitations et de niveau d'isotherme 0°C par sous-bassins.



**Figure 7**

### 3) Ajustement du scénario obtenu

Comme on le verra, la procédure a comporté un certain nombre d'allers-retours

#### 3-1) *Expertises - réunions de consensus*

Pour affiner les procédures relativement "automatiques" utilisées ci-dessus, nous avons d'abord organisé deux réunions d'expertise avec des prévisionnistes de MétéoFrance et d'EdF. Toutes les journées ont été scrutées une à une, ce qui a permis d'affiner les scénarios d'isotherme 0°C d'une part, et de précipitations d'autre part, en prenant en compte leur expérience d'analyse quotidienne de ces variables sur les Alpes du Nord. A cette occasion, on a utilisé un certain nombre d'informations annexes : annotations contenues dans les registres d'observation, ou autres sources (rapport Plantamour, archives de Tamié, etc...). Le résultat en a été un scénario I, fournissant l'équivalent de la carte de la figure 7 pour l'ensemble des journées de 1859.

#### 3-2) *Prise en compte de la modélisation hydrologique*

Cependant, il était difficile, avec les trop rares informations météorologiques disponibles (informations « amont ») de contraindre suffisamment les scénarios possibles sans tenir compte des effets hydrologiques constatés (informations « aval »).

Nous avons donc entrepris, en collaboration avec le Service de Prévision des Crues Alpes Nord SPC-AN, un premier jeu de modélisations hydrologiques. Le modèle (GR4J avec routine Neige) et son calage préalable sont décrits dans Gautheron et al. (2009). Pour éviter d'entrer dans des problèmes de propagation le long des rivières principales, le modèle a été appliqué en mode global (une entrée : la pluie moyenne journalière sur le bassin complet, une sortie : le débit moyen journalier à Grenoble).

Signalons qu'il était très difficile de caler le modèle sur le bassin complet : compte tenu de l'état d'équipement actuel en ouvrages hydroélectriques, il était impossible de trouver de bonnes séries de débits naturels reconstitués sur cette entité. On a donc calé le modèle sur des petits sous bassins naturels, puis sur le sous bassin de Moûtiers pour lequel on a une série récente de débits naturels reconstitués. Les paramètres ont ensuite été étendus à l'ensemble du bassin.

L'approche réalisée a considéré trois scénarios différents.

Les premières simulations ont été réalisées en utilisant d'abord notre scénario I : elles ont d'emblée suggéré un certain déficit en volume dans la simulation de la crue du 1<sup>er</sup> et 2 Novembre 1859, de l'ordre de 30 à 40 mm en moyenne sur le bassin global... Si le volume en eau de la neige stockée les jours précédents est suffisant pour reconstituer l'hydrogramme de crue, il est cependant nécessaire pour y parvenir d'augmenter le coefficient de fonte à des valeurs plutôt rencontrées au printemps, et d'utiliser l'isotherme de la température maximale pour arriver faire fondre le volume nécessaire. Ce scénario ne semble donc pas réaliste : ce n'est pas en « suractivant » la fonte de neige que l'on va trouver le complément d'eau nécessaire pour reproduire la crue. La seule voie raisonnable est d'envisager un renforcement des pluies

Le second scénario s'est quand même attaché à mieux valoriser les données qualitatives retrouvées dans les récits ou dans les archives. Il a amené à modifier la structure du modèle neige pour distinguer la température retenue pour l'accumulation nivale et la fusion, et prendre explicitement en compte les apports caloriques associés à la pluie (renforcement du coefficient de fonte en cas de précipitation seulement). Si ce dernier phénomène est souvent négligé, les cumuls présumés sur cet événement commencent à jouer un rôle sensible. De plus, afin de prendre en compte les observations indiquant des chutes de neige en basse altitude, l'isotherme de la température minimale a été retenue pour l'accumulation, et la température moyenne pour la fonte. Ce scénario fait jouer un rôle significatif à la neige (en terme de saturation préalable des sols). Il nécessite un renforcement limité des cumuls de pluie sur les journées des 30 octobre et 1<sup>er</sup> novembre.

Une attention particulière a donc été apportée au cas des 31 octobre et 1<sup>er</sup> novembre 1859. En effet, les valeurs de précipitations attribuées par notre procédure “automatique” semblaient relativement modestes, notamment en niveau de probabilité, pour un événement ayant provoqué une crue bicentennale... Et plusieurs prévisionnistes avaient attiré notre attention sur des évènements de ce type qui s'étaient révélés particulièrement étendus et avec un renforcement orographique substantiel causé par l'intensité des flux synoptiques, même si les valeurs en vallée restaient assez communes.

Or l'événement de 1859 a toute chance d'appartenir à ce dernier type, puisqu'on sait qu'il a frappé toutes les Alpes du Nord (bassin de l'Arve, du Fier, des Dranses et jusqu'aux préalpes vaudoises et à l'Oberland bernois – cf. Ph. Schoneich 1996). Et ceci ne s'est retrouvé récemment, avec une telle extension, qu'en Février 1990 (cf. Rinaldi et al. 2009)

Ceci nous a donc conduit à tester un scénario II assez caricatural, puisque nous avons ajouté 40 mm en moyenne sur le bassin, mais en totalité sur la seule journée du 1<sup>er</sup> novembre, et en ne modulant que entre les sous-bassins. Ceci a bien eu l'effet attendu, à savoir une bonne reproduction de la pointe de crue. Par contre, il peut sembler brutal de tout mettre sur le 1<sup>er</sup> novembre, alors que le 31 octobre a eu un type de temps comparable.

De plus, une analyse attentive montrait que pour arriver à ce bilan, la contribution de la neige était un peu excessive et nécessitait des coefficients de fonte un peu trop élevés.

### **3-3) *Prise en compte de la spécificité des situations les 31 oct. et 1<sup>er</sup> nov. 1859***

#### Modif.

Le dernier scénario s'attache à ne pas modifier les paramètres du modèle et se limite à renforcer les pluies sur les deux jours précédant le pic de crue.

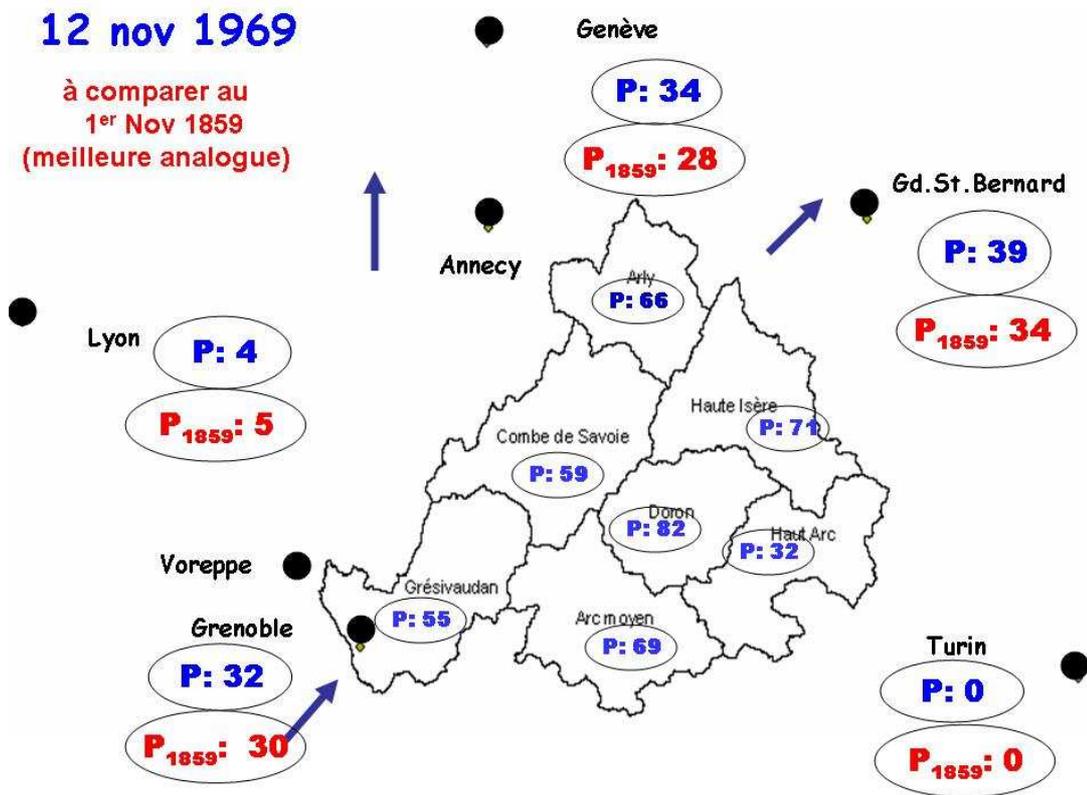
Cela nous a donc conduit à *reconsidérer certaines dates proposées comme analogues* pour les journées des 31 octobre et 1<sup>er</sup> novembre 1859. Ces dates étant recherchées dans les plus ou moins deux mois de part et d'autre de la date cible, on ne peut y trouver les 14 et 15 Février 1990 évoqué par Rinaldi et al. (2009).

Mais on y trouve par exemple les 11 et 12 Novembre 1969, et surtout les 27 et 26 Novembre 1983 ( en 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> rang respectivement sur 35 analogues !). Ce dernier événement, particulièrement étendu, avait été commenté par G. Blanchet (1984) : le 26/11, on avait recueilli 51 mm à Grenoble mais 133 à Vaujany et 130 aux Gets, et le vent avait atteint 134 km/h à Chambéry et 214 dans le Jura suisse !

Ceci dit, cet événement de 1983 était assez rare surtout par son extension spatiale : en effet, si on recherche dans l'archive Gottardi les journées où tous les sous-bassins de l'Isère (sauf le Haut Arc) dépassent leurs pluies quinquennales respectives, on ne trouve que 9 journées en 52 ans, dont le 26 Novembre 1983... ! Et si l'on impose que tous les bassins soient supérieurs à leurs pluies quinquennales (haut Arc inclus) alors il ne reste plus que 4 journées en 52 ans... dont le 26 novembre 1983. En conséquence, vu la ressemblance des 31 octobre et 1<sup>er</sup> novembre 1859 avec cette séquence des 26-27 novembre 1983, on peut raisonnablement augmenter les précipitations sur les 31 octobre- 1<sup>er</sup> novembre 1859.

L'analogie du 12 Novembre 1969 est elle aussi remarquable, puisque outre l'excellente analogie de circulation, on constate (figure 8) un remarquable analogie de précipitation entre les valeurs observées aux stations en 1859 et en 1969. On notera aussi, en 1969, l'accroissement considérable des précipitations dans la partie centrale du bassin, notamment sur le Doron.

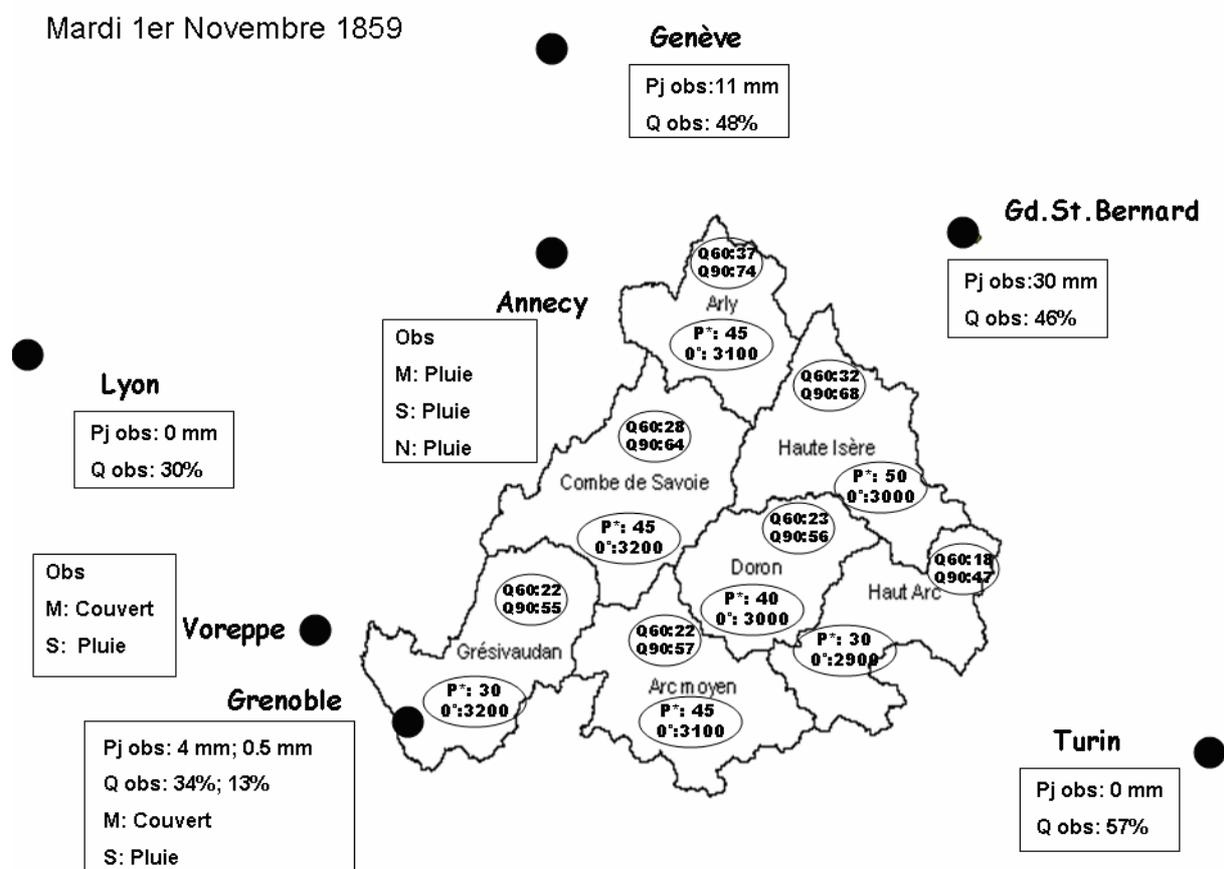
**Figure 8**



Ceci dit, il ne s'agissait pas de forcer inconsidérément les données d'un épisode récent sur cette journée de 1859: comme la modélisation hydrologique ne faisait état que d'un déficit de l'ordre d'une quarantaine de mm, nous pouvions nous limiter à cet accroissement, ce que l'on a fait en s'inspirant du 12 Novembre 1969. De plus, la question se posait de les affecter au seul 1<sup>er</sup> novembre 1859, ou de les répartir aussi sur le jour précédent. En effet, les pluies ont été intenses la journée du 31, et elles ne peuvent avoir été exceptionnelles le 1<sup>er</sup>, puisque l'on signalait, à Grenoble, un temps couvert mais non pluvieux le matin, et à Annecy un temps faiblement pluvieux le matin... Les pluies ont du reprendre dans l'après-midi du 1<sup>er</sup>, puisqu'on signale, à Moûtiers, un palier de débit vers midi, mais qui n'a malheureusement pas duré, sans doute avec une reprise des pluies dans l'après-midi.

Ceci nous a conduit au scénario III, (illustré sur la figure 9 par la carte synthétique du 1<sup>er</sup> nov), et dans lequel on répartit l'accroissement des pluies entre le 31 oct. et le 1<sup>er</sup> nov. On a aussi modifié un peu la répartition pluie / neige en tenant compte de la température minimale et de son isotherme 0°. En effet, on a pu déposer de la neige plus bas que ne le laisserait penser l'isotherme 0° de la température moyenne journalière (cf. les annotations de Grenoble-Flandrin)

**Figure 9** Exemple de la journée du 1<sup>er</sup> Novembre dans le scénario III



On trouvera aussi le déroulement complet de ce scénario III, moyenné sur l'ensemble du bassin sur la figure 10 et l'ensemble des diagrammes *par sous-bassins* sur la figure 11. Le renforcement appliqué aux pluies du 31 octobre et du 1<sup>er</sup> novembre y est figuré en vert. Ce scénario III montre encore le rôle important des précipitations antérieures en terme de saturation des sols, et permet de définir un scénario pluviométrique raisonnablement renforcé, mais réparti sur les deux jours.

Evidemment, un travail similaire sur des évènements plus récents permettrait d'un part de mieux quantifier le rôle des différents processus physiques impliqués, mais aussi de travailler à une échelle de temps et d'espace plus fine, qui permettrait aussi d'évaluer l'impact de la dynamique de la crue.

## 4) Interprétation - Cohérence du scénario avec des données qualitatives

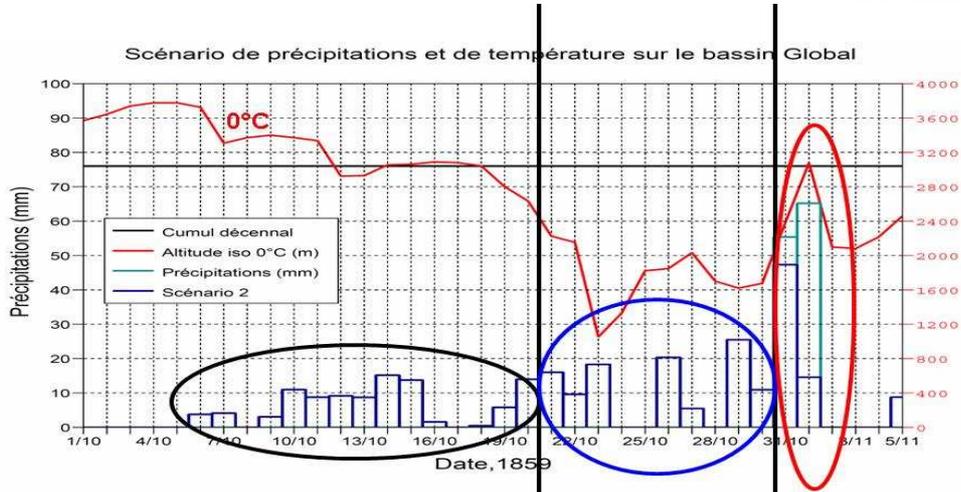
### 4-1) Le scénario proposé :

Globalement sur la période, le scénario III proposé est le suivant ( **Figures 10 et 11**):

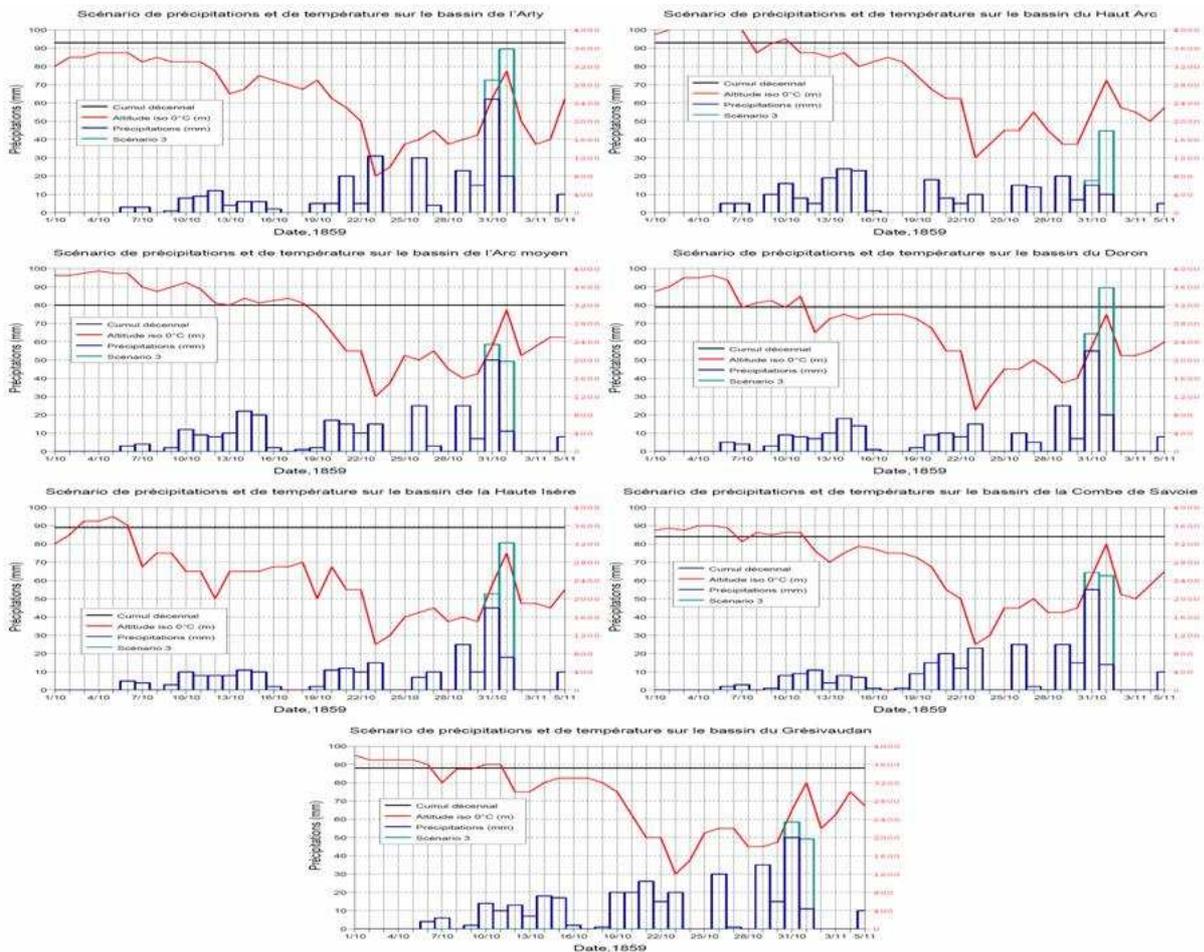
- du **5 au 17 octobre**, une période perturbée, avec des pluies modérées de 10 mm/j en moyenne, mais avec une isotherme 0°C élevée surtout sur l'ouest du bassin (> 3000 m) s'abaissant un peu (~ 2600-2800 m en fin de période). Cette séquence n'a du laisser que peu de neige au sol, seulement à haute altitude, mais a pu contribuer à une première humectation des bassins avec des cumuls de 70 à 100 mm.
- Après deux jours de rémission, arrivée d'une perturbation très active du **19 au 24 octobre**, avec à nouveau des cumuls assez substantiels, de 40 à 70 mm, plus marqués à l'ouest du bassin. Elle est marquée aussi et surtout par une dégringolade de l'isotherme 0°C qui passe de 2800 m au début de l'événement à moins de 1000 m par endroit le 24 Octobre. Une part importante de cette précipitation est tombée en neige à partir du 22, et jusqu'à basse altitude le 23 (il fait ce jour là entre 0 et 1°C à Genève toute la journée) et le 24.
- Il cesse de neiger le 24 et le 25, mais cet épisode froid se poursuit : E. Plantamour (1860) signale à Genève le 24 une température de -2,8°C, et une dizaine de cm de neige en plaine (~ 500 m) qui a tenu au sol jusqu'au 26 octobre. Il signale aussi que le petit lac du Grand St Bernard a entièrement regelé le 25 octobre. Cela a donc pu préserver de la fonte le manteau constitué jusqu'à basse altitude les 22 et 23 octobre.
- Le **26 octobre**, passage perturbé bien marqué apportant pratiquement 30 mm en une journée, un peu moins au nord-est, mais toujours avec des températures assez froides (isotherme 0°C vers 1600-1800 m), ce qui a donc continué à accumuler de la neige à moyenne et haute altitude sans permettre trop de fonte à basse altitude. Sur les hauts bassins, le manteau de neige devient conséquent.
- Reprise des précipitations **le 29** et un peu moins marquées **le 30**, avec des intensités de l'ordre de 20 mm/j toujours avec une isotherme 0°C assez basse au début (vers 1600 m) et nouvelle accumulation de neige à moyenne altitude (on signale « plusieurs pieds de neige folle au Mont Cenis » donc au moins un mètre...). On signale cependant aussi un temps « lourd dès le 29 et le 30 à Grenoble, avec des pluies abondantes, qui ont redoublé d'intensité dans la nuit du 30 et toute la journée du 31 »
- Brusque renforcement des précipitations **le 31**, où elles atteignent 40 à 60 mm/j (sauf sur le haut Arc), accompagnées cette fois d'une remontée brutale des températures. Le vent, très fort, étant passé au sud, l'isotherme 0°C passe de 1600 m le 30 à 3200m le 1<sup>er</sup> novembre. Après une accalmie dans la matinée du 1<sup>er</sup>, (ciel couvert le matin à Grenoble, pluie notée « faible » à Annecy), les pluies reprennent l'après-midi avec des cumuls de 30 à 45 mm.
- Cependant, à ces abats de pluie jusqu'à des altitudes élevées (~ 3200m, presque tout le bassin reçoit de la pluie), il faut ajouter la fonte apportée par un manteau neigeux qui est resté largement présent jusqu'à une altitude relativement basse (~ 1500 m) et où règnent désormais des températures élevées (jusqu'à 10°C à 1500 m) et un vent de sud soutenu.
- On estimera donc que (cf Gautheron et al. 2009), sur le 31 octobre et le 1<sup>er</sup> novembre, la fonte aura pu contribuer pour 10 à 15 mm/j, ce qui, ajouté aux précipitations pluvieuses, suffit à expliquer la pointe de crue.

**Figure 10 Scénario III pour le BV global**

6-20 oct	21-30 oct	31 oct & 1 <sup>er</sup> nov
Humectation du bassin	Accumulation stock de neige	Pluies intenses
~100 mm	~110 mm	~120 mm
		+ fonte
		~25 mm

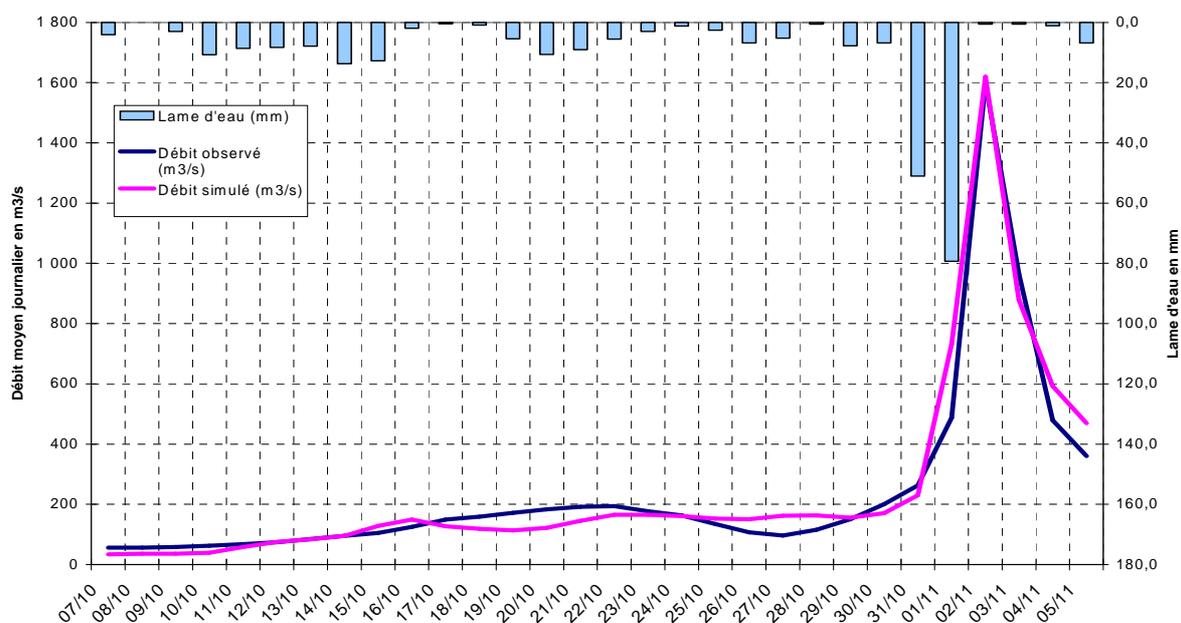


**Figure 11 Scénario III par sous bassins**



On rappelle cependant, et on insiste sur le fait qu'il ne s'agit que d'un scénario, que celui-ci n'a pas pu être complètement validé sur des données indépendantes, et qu'il y a eu des rétroactions entre partenaires, le scénario ayant ainsi été construit et modifié pour permettre une reconstitution correcte des débits estimés avec un modèle donné. Celle-ci est expliquée plus en détail par Gautheron et al. (2009), mais nous la donnons ci-dessous (figure 12).

**Figure 12** Reconstitution de la crue avec le scénario III (d'après Gautheron et al. 2009)



L'appel à une contribution significative de la fonte de neige semble donc nécessaire, mais suppose d'abord que l'on n'ait pas trop mal estimé les températures, car celles-ci décident à la fois :

- *le jour de la précipitation* : du pourcentage du bassin qui va recevoir cette précipitation sous forme de neige et la stocker
- *et dans les jours suivants* : de la fraction du manteau qui va fondre, donc de la remontée progressive de la ligne d'enneigement, et donc aussi du stock qui va rester disponible pour les jours suivants et pour un futur "coup de chaud" éventuel...

Cependant, dans ce scénario III, on constate que, (pour reconstituer la crue !), l'épisode n'a pas « besoin » d'avoir été exceptionnel en précipitations le jour et la veille de l'évènement :

- les cumuls en 1, 2, 3 et 4 jours proposés pour la période 29 octobre -1<sup>er</sup> novembre n'excèdent pas, même après le renforcement des 31 octobre.- 1<sup>er</sup> novembre, des valeurs à peine décennales (à l'exception du Doron, plutôt trentennal)
- et si on y ajoute l'équivalent de 25 à 30 mm de fonte sur la période 31 octobre et 1<sup>er</sup> novembre, alors la lame d'eau résultante sur 2 jours devient équivalente à une pluie de période de retour ~ 25-30 ans (à l'exception là encore du Doron, plutôt cinquannal)

C'est donc plutôt la forte humectation du bassin par les épisodes antérieurs (5 au 17 octobre, puis du 19 au 23, et les 26 et 29-30 octobre, avec à chaque fois de 30 à 50 mm) qui explique, combinée peut-être avec l'état de dégradation du bassin, le fort rendement en débit du dernier épisode et le fait que l'on passe d'une pluie décennale et d'une lame d'eau à peine trentennale, à une crue plus que centennale... C'est en tout cas ce que suggère la modélisation hydrologique qui cumule et combine les effets depuis le début Octobre.

#### **4-2) Cohérence du scénario proposé :**

Une autre façon qualitative de valider notre scénario consiste par exemple à considérer la réponse des torrents. En effet, P. Mougin (1914), pionnier de la Restauration des Terrains en Montagne, a recensé dans un ouvrage célèbre toutes les crues significatives des torrents de Savoie. Combiné à d'autres sources, notamment pour l'Isère, la Drôme et les Hautes Alpes, on voit bien ressortir, sur la carte des torrents qui ont réagi le 1<sup>er</sup> novembre 1859 (figure 13), un certain nombre de caractéristiques cohérentes avec notre scénario de l'évènement. On voit bien notamment l'orientation sud-ouest nord-est de la trace de l'évènement.

On constate aussi, par exemple, que les torrents du Grésivaudan n'apparaissent pas sur la carte. Certes grossis par les pluies, ils n'ont semble-t-il pas contribué significativement à la crue : c'est ce que corrobore J. de Lisle, syndic-directeur du Haut-Tencin (« nos ruisseaux n'ont pas été très forts »). Sans doute les pentes de Belledonne et de Chartreuse étaient-elles un peu trop basses pour avoir stocké de la neige en abondance, et la neige n'a donc pas pu contribuer suffisamment. Ce n'est pas le cas sur l'autre face de Belledonne, côté Eau d'Olle, où les Grandes Rousses ont provoqué des crues, qui se retrouvent aussi de l'autre côté du col du Glandon, sur l'Arvan.

#### **Modif.**

Cependant, on remarquera que la carte de réactions des torrents coïncide assez bien avec les zones de précipitations fortes que l'on observe sur la situation du 12 Novembre 1969 meilleure analogue du 1<sup>er</sup> Novembre 1859. Cette similitude conforte et justifie qu'on lui emprunte son organisation spatiale dans la reconstitution des pluies du 1<sup>er</sup> Novembre 1859, comme on l'a décrit plus haut.

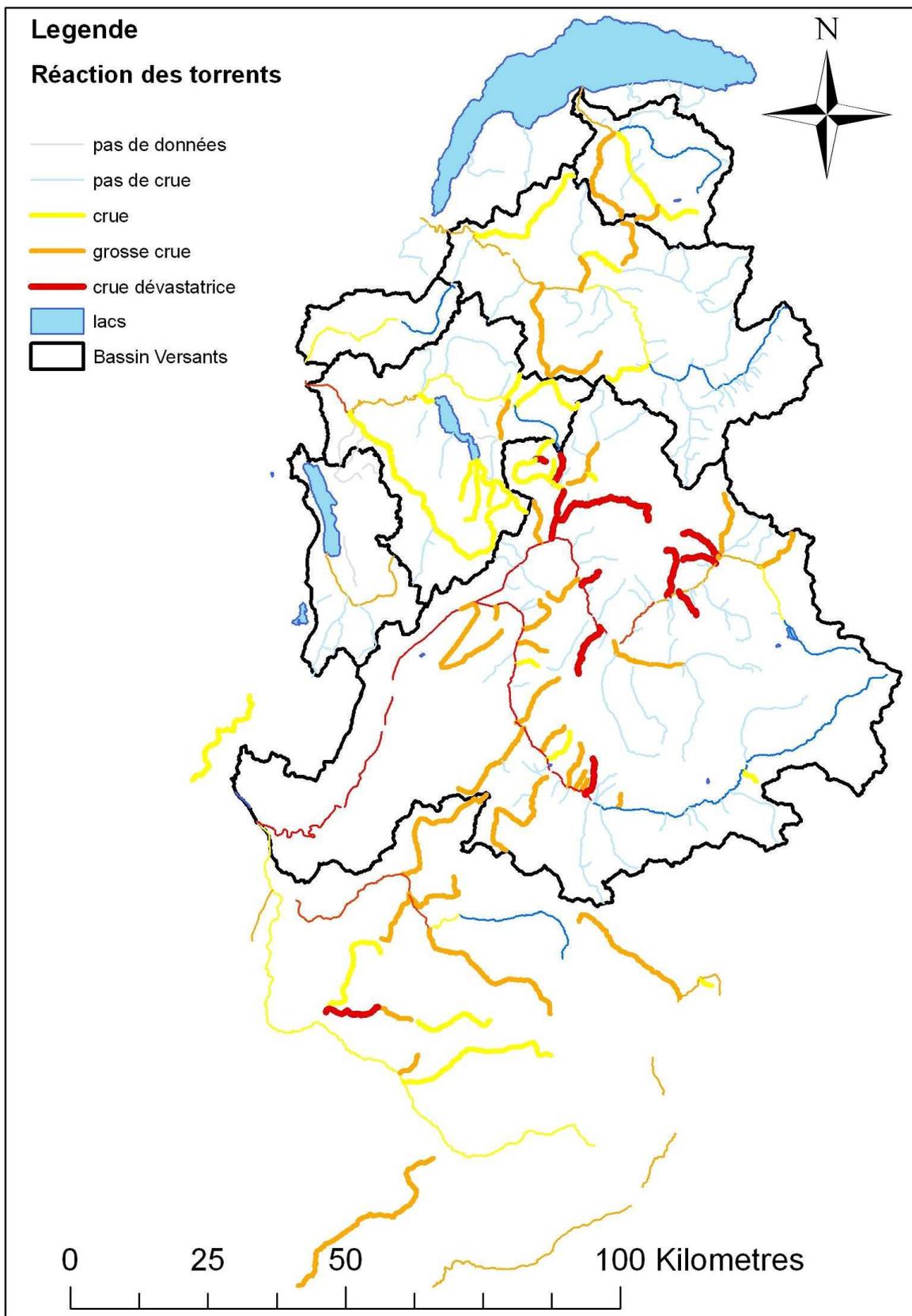
Quelques informations resteraient à exploiter, comme celle de A. Basin (ingénieur génie civil de la Tarentaise), qui signale qu'à Moûtiers le Doron, « vers midi le 1<sup>er</sup> novembre, apportait presque autant que l'Isère ». Il faudrait imposer cette contrainte dans le modèle hydrologique, et voir si on peut la satisfaire avec les précipitations que l'on a affectées au Doron. Cela nécessiterait une modélisation à un pas infra-journalier, car cela n'a pas duré toute la journée, mais nos données ne nous permettent pas de descendre en dessous de la journée...

#### **Discussions - Conclusions**

Une hypothèse forte qui nous a servi à transférer de l'information depuis des stations proches, mais hors bassin, est l'hypothèse que les probabilités étaient voisines entre valeurs à la station et valeurs au sous-bassin voisin... De ce fait, on a pris pour le bassin le quantile de même probabilité, i.e. la valeur de même probabilité qu'à la station voisine.

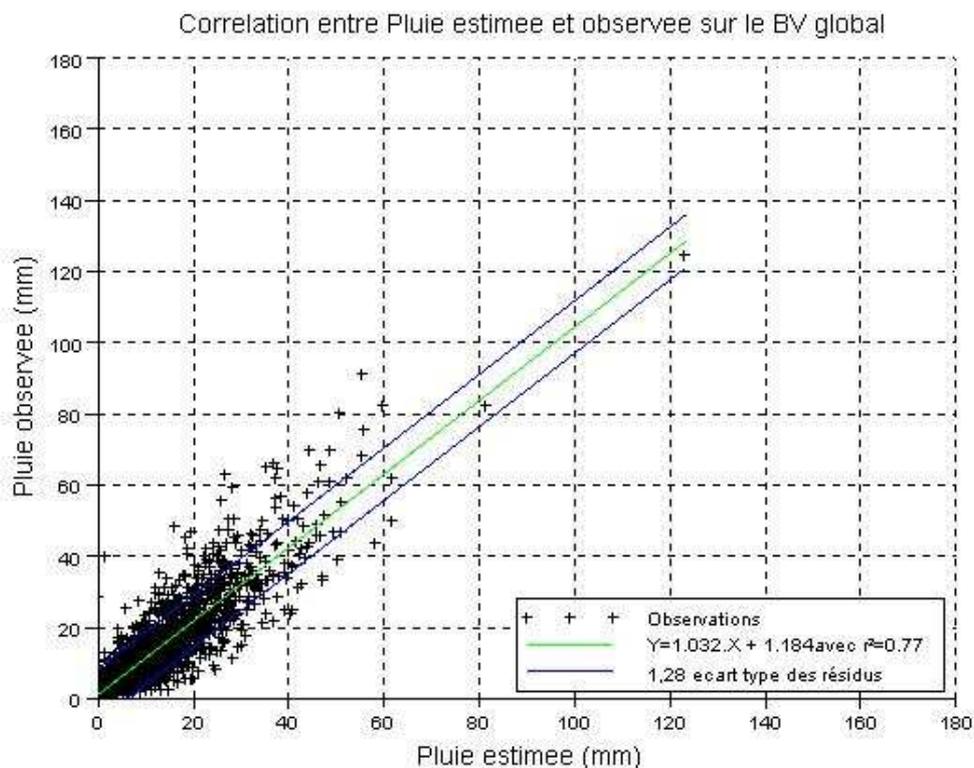
Cette hypothèse méritait vérification, ce qui ne pouvait être fait sur l'année 1859 mais devenait possible sur les années récentes (1953-2005). On verra figure 14 la liaison entre les valeurs de pluie moyenne observée sur le bassin global (valeur utilisée par le modèle hydrologique) et celles estimées avec notre protocole d'affectation, calculée pour toutes les journées d'automne de pluie moyenne >2 mm sur le bassin global. Certes, ce résultat est à nuancer (Tableau IV) selon les sous-bassins et leur station associée, mais il est globalement acceptable, ce qui est rassurant. On notera qu'il est même plutôt amélioré quand on est en type de temps 2 (Sud ouest)... Comme indiqué déjà au paragraphe 2-1, ces résultats sont développés en annexe.

**Figure 13**



Surtout, ces résultats sont bien meilleurs que si l'on avait utilisé la corrélation directe entre station et bassin voisin pour estimer la pluie de bassin, comme on le voit dans la dernière colonne du tableau IV : les reconstitutions, (limitées aux seuls bassins qui disposent d'une station proche) sont toutes plus mauvaises que notre protocole, sauf pour le haut Arc, mais qui joue un rôle secondaire dans l'évènement.

**Figure 14**



**Tableau IV**

<b>Corrélation entre la pluie estimée et observée par sous bassin</b>			
	<b>Méthode des quantiles</b>		<b>Méthode directe</b>
	<b>Tous TTP</b>	<b>TTP= 2</b>	
<b>haut Arc</b>	<b>0,46</b>	<b>0,2</b>	<b>0,38</b>
<b>Arc moyen</b>	<b>0,55</b>	<b>0,5</b>	<b>/</b>
<b>haute Isère</b>	<b>0,54</b>	<b>0,58</b>	<b>0,36</b>
<b>Arly</b>	<b>0,64</b>	<b>0,67</b>	<b>0,28</b>
<b>Doron</b>	<b>0,56</b>	<b>0,65</b>	<b>/</b>
<b>Combe de Savoie</b>	<b>0,74</b>	<b>0,81</b>	<b>/</b>
<b>Grésivaudan</b>	<b>0,9</b>	<b>0,91</b>	<b>0,81</b>
<b>Global</b>	<b>0,77</b>	<b>0,82</b>	<b>/</b>

En conclusion, on peut répéter que l'on ne dispose pas de données suffisantes pour contraindre fortement et valider de manière vraiment indépendante le scénario proposé. En particulier, un certain

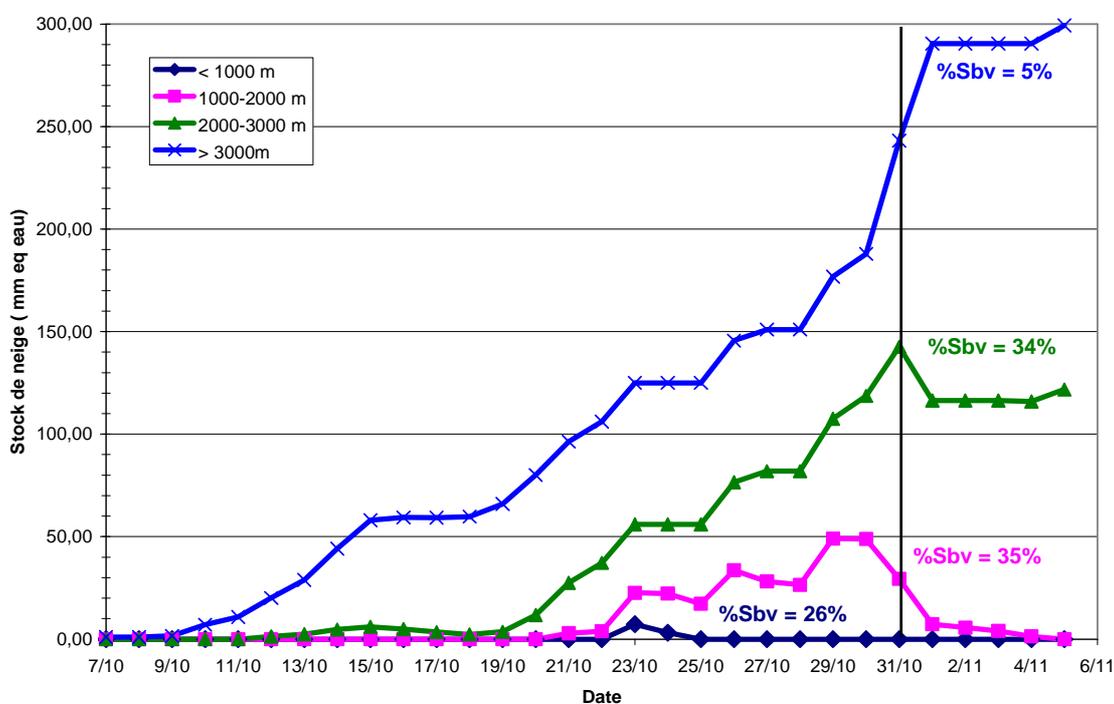
flou demeure sur l'évolution des températures, entre un réchauffement progressif à partir du 29 ou un temps relativement froid le 29 et le 30 suivi d'un réchauffement brutal le 31 et le 1<sup>er</sup>. On pencherait plutôt pour la seconde hypothèse, puisqu'on a signalé de la neige à St Nizier le 27 et de la neige au Rachais le 29 et le 30 Octobre 1859, ce qui suppose un temps assez froid. De même il semble y avoir eu une accalmie dans les pluies le 1<sup>er</sup> novembre au matin, ce qui exclue en partie un abat exceptionnel ce jour là, et nous conduit à renforcer plutôt le 31.

Mais ceci dit, parmi les conclusions assez robustes que l'on peut avancer, on insistera sur le caractère exceptionnel de la séquence météorologique du mois précédant la crue. Le chargement en neige jusqu'à basse altitude, suivi d'une vague de froid qui a préservé ce stock et limité la remontée progressive de l'enneigement vers des altitudes moyennes à élevées, a manifestement créé un danger potentiel. Celui-ci s'est concrétisé par l'arrivée brutale d'une perturbation active et intense, mais aussi particulièrement chaude, ce qui a permis de combiner des précipitations pluvieuses quasiment jusqu'en haut du bassin avec une fonte nivale où les températures trouvaient à s'employer quasiment sur les deux tiers supérieurs du bassin, où le manteau de neige antérieur avait été préservé.

Curieusement, les précipitations cumulées au cours de ce dernier épisode (31 oct et 1<sup>er</sup> nov), pour substantielles qu'elles furent, n'atteignirent guère qu'une valeur à peine décennale sur les bassins pris isolément (à l'exception du Doron), et un peu plus que décennale sur l'ensemble du bassin car il est rare qu'autant de sous-bassins soient touchés en même temps. Par contre l'adjonction d'une lame de fonte estimée à 25 mm fait que la précipitation de même cumul en deux jours sur le bassin global aura cette fois une période de retour de 25 à 30 ans (voire cinquantiennale sur le Doron). Mais remarquons que cela n'est possible que parce qu'il y a eu constitution préalable, dans la décade qui a précédé, et préservation par des températures suffisamment basses, d'un manteau de neige jusqu'à moyenne et basse altitude.

**Figure 15**

Evolution du stock de neige par bande de 1000 m



En effet, comme le suggère la chronologie du manteau proposée par le modèle hydrologique, ce sont les tranches d'altitude 1000 à 2000 et 2000 à 3000m qui ont contribué, par leur fusion respectivement totale ou partielle, au renforcement des lames d'eau liquide disponibles.

Enfin, ce peut être l'état de saturation du bassin, fortement humecté par les trois autres séquences pluvieuses d'octobre, qui expliqueraient que l'on soit passé à un événement plus que centennal en débit à Grenoble... En effet, autre résultat intéressant proposé par le modèle hydrologique : même partant d'un niveau très bas début octobre, suite à un été chaud et sec, son « réservoir sol » (interprété comme son indice de saturation) ne cesse de se remplir tout au long du mois d'Octobre sans pratiquement jamais trouver d'occasion de se vider. Il faut dire que les trois dernières décades comportent chacune un événement de 80 à 100 mm qui font que l'on a recueilli presque 300mm entre début octobre et début novembre. Ceci peut expliquer une réactivité et un coefficient de ruissellement assez élevé lorsqu'arrivent les lames d'eau des 31 octobre et du 1<sup>er</sup> novembre.

On comprend donc qu'il ne suffit pas d'interroger les seules précipitations juste antérieures et concomitantes à l'évènement, mais aussi le manteau de neige constitué durant la décade précédente ainsi que l'état de saturation atteint grâce aux 300 mm des trois décades précédentes... Et la probabilité de réunir conjointement ces trois conditions devient rare et plus difficile à évaluer...

On constate par exemple que pour deux autres crues plus récentes évoquées précédemment :

- celle des 26-27 Novembre 1983 et celle des 14-15 Février 1990
- qui ont connu des cumuls de précipitations, (et de pluie pour celle de 1983) plutôt supérieurs à celles de 1859 sur l'évènement lui-même, i.e. sur deux ou trois jours,
- mais qui ne comportaient pas toute la séquence antérieure de mise en condition du bassin,
- leurs réponses en débit à Grenoble n'ont même pas été décennales (cf. figure 16 - en débits moyens journaliers pour être cohérent avec ce dont dispose en 1859) ...

#### Modif.

Une autre incertitude à lever concerne l'état de surface du bassin. Le modèle utilisé n'a été calé que pour le bassin de Moûtiers, et sur des données récentes, avec un bassin relativement bien reboisé aujourd'hui. Or il faut se rappeler l'état de surface du bassin, signalé en 1859 comme très dégradé par plusieurs auteurs (Gueymard 1858). Ceci a pu avoir comme effet de renforcer sa capacité de ruissellement et réduire sa capacité de stockage ? Dans ce cas, il faudrait modifier en conséquence les paramètres du modèle, pour se rapprocher de l'état de 1859. Et si dans ce cas le coefficient de ruissellement se trouve augmenté, il ne faudrait pas trop renforcer les pluies pour reproduire la pointe, car on risquerait de l'outrepasser...

On voit donc à nouveau que plusieurs scénarios sont également possibles pour arriver à une simulation voisine...

Voilà donc ce que nous avons pu déduire, à partir des maigres données de 1859 encore disponibles aujourd'hui, mais en transférant au maximum des informations disponibles sur la période récente. Le scénario que nous proposons pour cette crue nous semble plausible. Nous pensons en avoir amélioré la compréhension, et en mettant le doigt sur les différents mécanismes et les possibles interactions qui y ont conduit, nous espérons avoir fait oeuvre utile pour mieux prévenir ou anticiper de tels évènements dans le futur.

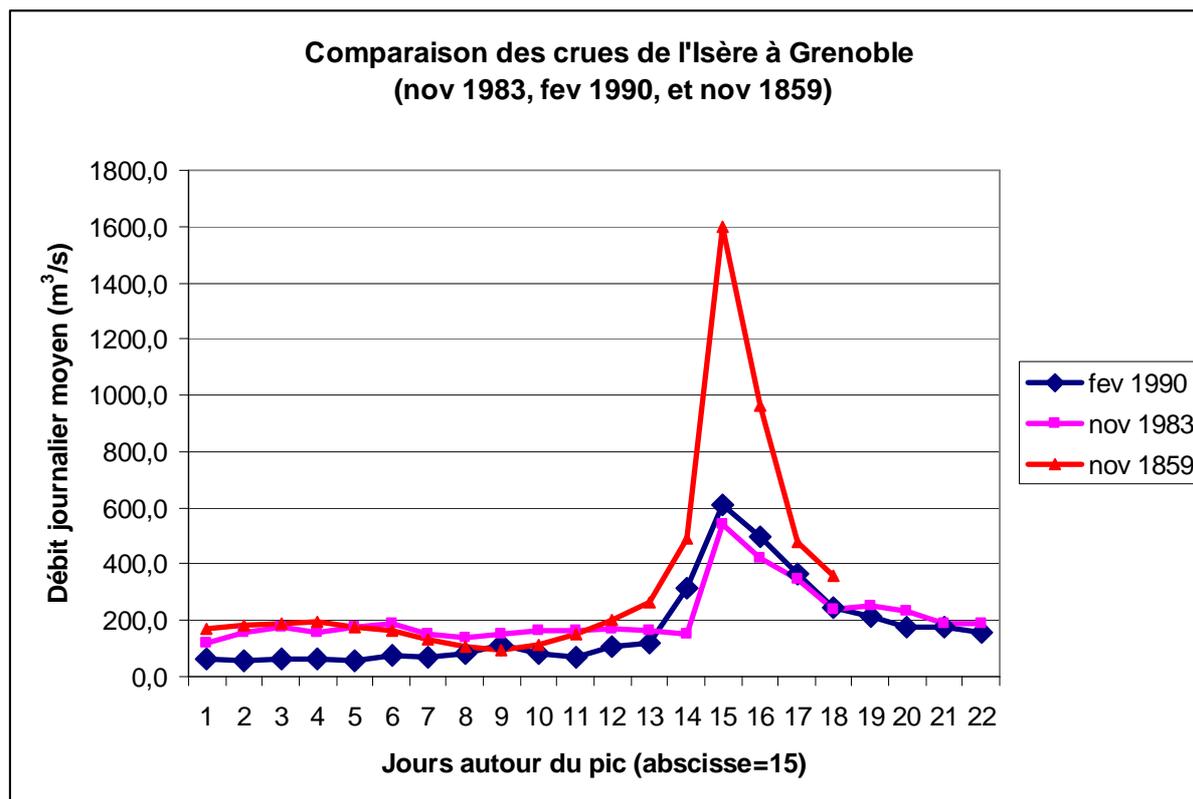
#### Remerciements:

Ce travail a été réalisé en collaboration avec MétéoFrance (Grenoble CDM, Lyon DIRCE et Toulouse DCLIM) et le CEMAGREF-Lyon, grâce à un financement du Conseil Général de l'Isère attribué par le Pôle Grenoblois Risques Naturels, que nous remercions.

Nous remercions aussi nos collègues de MétéoFrance, du CEMAGREF, ainsi que ceux d'EdF-DTG et du Service de Prévision des Crues-Alpes Nord pour l'excellente ambiance dans laquelle ce travail a été réalisé.

Plusieurs stagiaires ont contribué à ces travaux, dont notamment G. Panthou, qui en fut véritablement, du côté INPG-LTHE, la cheville ouvrière.

**Figure 16**



## Bibliographie :

A. Auffray, A. Clavel et S. Jourdain.( 2009)

### **Contexte météorologique des mois d'Octobre et Novembre 1859**

Colloque Crue Isère 1859-2009 –Grenoble 5 Nov 2009 – 15 p.

A. Ben Daoud, E. Sauquet, et Ch. Obled( 2009)

### **Reconstitution du risque nivo-pluviométrique durant le mois d'Octobre 1859 par une technique d'analogie à l'aide des situations des années 1953-2005**

Colloque Crue Isère 1859-2009 –Grenoble 5 Nov 2009 – 25 p.

G. Blanchet 1984

### **Le temps dans la région Rhône Alpes en 1983**

Revue de Géographie de Lyon, Vol. 59, N° 59-4, pp. 347-365

Delrieu, G., V. Ducrocq, E. Gaume, J. Nicol, O. Payrastré, E. Yates, P.-E. Kirstetter, H. Andrieu, P. A. Ayrat, C. Bouvier, J. D. Creutin, M. Livet, A. Anquetin, M. Lang, L. Neppel, Ch. Obled, J. Parent-du-Chatelet, G. M. Saulnier, A. Walpersdorf, and W. Wobrock, 2005

### **The catastrophic flash-flood event of 8-9 September 2002 in the Gard region, France: a first case study for the Cévennes-Vivarais Mediterranean Hydro-meteorological Observatory.**

*Journal of Hydrometeorology*, **6**, 34-52

Gaume, E. and M. Borga, (2008):

### **Post flood field investigations after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations.** *Journal of flood risk management*, **1**, 175-189

E. Gueymard (1858)

Mémoire sur les causes des inondations et les moyens d'en prévenir le retour  
Imprimerie Maisonville – Grenoble, 23 p.

Gautheron, A, E . Balmand et A. Valéry 2009

**Modélisation hydrologique de la crue de l'Isère de 1859**

Colloque Crue Isère 1859-2009 – Grenoble 5 Nov 2009 – 25 p.

F. Gottardi (2009)

**Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français.**

Thèse INPG Grenoble – 261 p.

G. Panthou (2009)

**Etude hydrométéorologique d'un événement nivo-pluvial : la crue de l'Isère de 1859**

Mémoire de Master 2P ES Université J. Fourier. 70 p

P. Mougin (1914)

**Les Torrents de Savoie**

Le champ Régional Ed. - Réédité par la Fontaine de Siloé - Chambéry 2004.

E. Plantamour (1860)

**« Résumé météorologique de l'année 1859 pour Genève et le Grand Saint Bernard »**

Archive des sciences de la bibliothèque universelle. 27 p.

F.Rinaldi, J. Gailhard et R. Garçon (2009)

**« Réflexions sur la crue de l'Isère de novembre 1859 et sur les phénomènes analogues »**

Note interne EDF-DTG, 3 p.

G . Roethlisberger 1991

**Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz,**

Birmensdorf, WSL, Bericht N° 330 (disponible sur internet)

Ph. Schoeneich, 1991

**“ Effets des intempéries des 14 et 15 Février 1990 aux Ormonts (Alpes vaudoises) ”** Bulletin de la société vaudoise de sciences naturelles ” vol 80-3, p 279-297

Ph. Schoeneich, 1992

**“ Pluie sur neige, un type spécifique d'événement- L'exemple des Ormonts – Alpes Vaudoises ”**

International symposium INTERPRAEVENT Vol 1, p. 181-192 :

Ph. Schoeneich 1996

**“ Reconstitution d'événements de pluie sur neige dans la vallée des Ormonts ( Préalpes vaudoises-Suisse) 1740-1918 ”,** International symposium INTERPRAEVENT Vol 4, p. 165-174

K. Villacorta (2009)

**Reconstitution du scénario hydrométéorologique de la crue des 1<sup>er</sup> et 2 novembre 1859, crue de référence de l'Isère à Grenoble.**

Mémoire de Stage 2<sup>ème</sup> année ENSE3 –Grenoble-INP 32 p.

# Conclusions

Modif.

Sur le plan scientifique :

En ce qui concerne la genèse des crues extrêmes, ce travail a permis des réflexions intéressantes notamment pour les bassins de montagne. En effet, il ne suffit pas d'un abat de précipitations important en volume pour que cela génère une crue.

Il y a déjà l'aspect de la répartition spatiale de cette précipitation : si on considère une période de temps assez longue (on prend en général comme base de temps le temps de concentration, qui pour un bassin de plaine peut effectivement être assez long), alors on peut espérer, notamment en plaine, que l'ensemble du bassin soit affecté par les précipitations sur ce laps de temps.

En montagne par contre, à taille identique, le temps de concentration sera généralement plus court, et les effets locaux liés à la topographie rendront déjà cette répartition des précipitations moins uniforme sur l'ensemble du bassin (c'est ce que l'on constate sur l'événement de 1859 avec la Haute Maurienne, mais aussi le Grésivaudan, même en cumul sur 2 jours).

Et surtout, si on considère non plus les précipitations totales, mais la lame d'eau mise à disposition sous forme de pluie, elle aura un volume et une répartition spatiale très dépendante du niveau de l'isotherme 0°C. Et s'il n'y a pas une indépendance complète entre ce niveau et les précipitations, notamment ici par régime de sud-ouest, il faut quand même une certaine concomitance des deux pour mettre beaucoup d'eau à disposition en lame moyenne sur le bassin.

On notera ensuite que les conditions antérieures sont elles aussi critiques dans la préparation de la crue. Certes, comme en plaine, les événements antérieurs peuvent venir plus ou moins saturer les sols du bassin. On peut cependant imaginer qu'un bassin de montagne se ressuie relativement plus rapidement qu'un bassin de plaine, et qu'il ait ainsi « une mémoire » plus courte, vis à vis d'un événement antérieur. Par contre, quand ces événements antérieurs se succèdent sans discontinuer comme en Octobre 1859, cela permet de garder un fort niveau de saturation à la veille d'un événement pluvieux plus intense.

Mais surtout, la « mémoire » du bassin ne se fait pas seulement par le stockage dans les sols : au dessus de l'isotherme 0°C, qui peut se trouver à moyenne et même à basse altitude, on peut stocker de l'eau sur le sol, sous forme de manteau neigeux. Et même si celui-ci fond en partie progressivement (entretenant d'ailleurs ainsi une certaine saturation), on peut en garder suffisamment pour qu'il apporte une contribution, même modeste, à l'occasion d'un événement ultérieur intense, et en particulier plus chaud. En effet, si l'on regarde la statistique des pluies, sur nos sous bassins, il ne faut pas beaucoup d'eau pour passer d'une pluie décennale à une trentennale ou cinquantennale. *Quelques 10 à 15 ou 20 mm suffisent, or c'est la contribution que peut apporter en deux jours un manteau précoce qui serait resté stocké avant d'être relargué.* En plaine aussi, la présence d'un manteau de neige préalable est bien sûr aussi un facteur d'aggravation du risque, et il sera encore renforcé dans certaines régions par l'occurrence de sols gelés sur une grande étendue. Ce dernier aspect est plus rare en montagne, mais peut être significatif sur des zones de plateaux.

Perspectives de poursuite de l'étude :

On pourrait suggérer d'abord d'étendre le domaine d'étude pour 1859 à l'Arve et à l'Ain, mais aussi à la Suisse (zone des Diablerets) pour mieux connaître l'extension spatiale du phénomène météorologique.

On pourrait aussi entreprendre une démarche similaire d'analyse des événements sur une période récente, puis de remonter dans l'historique de situations analogues

Le projet a montré l'intérêt de l'utilisation des pressions de surface pour la recherche de situations analogues. L'enrichissement envisageable de la base EMULATE sur le territoire national, notamment sur la période 1870 à 1953, permettrait d'étendre le domaine temporel de recherche pour les analogues. Ce travail pourrait bénéficier à l'ensemble des bassins français. Cette démarche est

complémentaire à la constitution de longues séries de données aux stations, pouvant servir de base pour la constitution d'archives pluviométriques de référence.

Enfin, certains aspects hydrauliques liés à la topologie du bassin et à l'hydraulique de la crue n'ont pas pu être abordés avec les données à notre disposition. Dans le cas de l'Isère, la concomitance des crues à la confluence Arc –Isère pourrait jouer un rôle pénalisant. A surface comparable, le bassin du Rhône à l'entrée du Léman, avec sa structure en « arête de poisson » (un drain principal alimenté par des bassins de tailles relativement modestes), présente un risque de concomitance bien moindre. Ce risque de concomitance existe bien sûr aussi sur les bassins de plaine (on connaît la problématique entre Loire et Allier, ou entre Yonne et Marne...) et il ne faut pas oublier celle entre Isère et Drac...!

Cette problématique de crue est peut-être plus simple quand on considère des bassins plus petits (le Haut Arc, ou l'Arly...). Mais le projet a permis de se poser nombre de questions intéressantes tant pour la prévision que pour la prédétermination des crues de l'Isère.

### Sur le plan de la mise en œuvre et de l'organisation

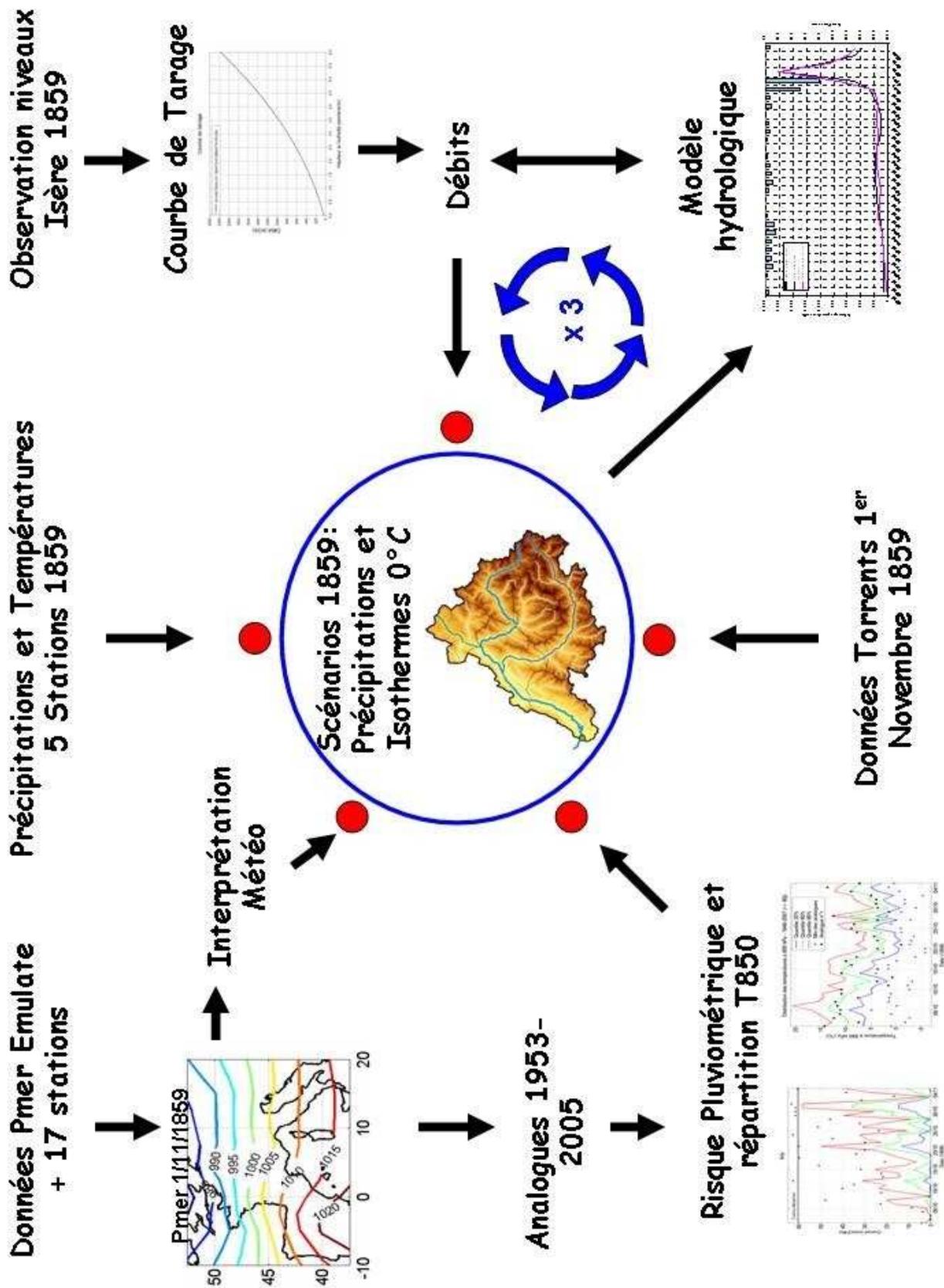
Le projet nous semble avoir largement rempli les objectifs proposés, et même au-delà. Cela est dû d'abord à l'engagement des partenaires initiaux, qui sont souvent allés au delà de ce que le financement obtenu pouvait couvrir. Mais cela est dû aussi à des participations non prévues initialement comme celle d'EdF et plus encore du SPC Alpes Nord, dont la contribution s'est révélée après coup déterminante pour réduire le spectre de scénarios possibles.

En effet, si l'on considère les données disponibles au début de l'étude, on pouvait craindre la mission impossible! Il est vrai que nous espérons retrouver des données pertinentes à l'intérieur du bassin, mais en dépit de tentatives nombreuses et variées, cet espoir a été déçu... C'est donc grâce à un faisceau convergent d'approches que nous avons pu contraindre nos scénarios dans une frange d'incertitude raisonnable, à défaut d'une unicité inaccessible. La reconstitution des champs de pression *Pmer* a déjà permis de se faire une bonne image de la séquence météorologique. Elle a permis aussi la mise en œuvre d'une approche par analogie qui, à son tour, nous permis de retrouver dans les années récentes (1953-2005) des situations assez similaires à celles de 1859 pour se faire une idée, jour par jour, des probabilités de précipitations et des températures associées. On a ensuite contraint ces distributions à la fois par les valeurs observées aux stations périphériques, mais aussi par les débits qui en sont résultés à l'exutoire du bassin. Grâce au SPC Alpes-Nord, l'utilisation d'un modèle hydrologique comme outil d'inversion permettant de remonter aux scénarios de précipitation et de températures, afin de les contraindre, a aussi permis de proposer une évolution du stock de neige sur les quinze jours qui ont précédé la crue. Enfin, pour certaines journées particulières, essentiellement les 31 octobre et 1<sup>er</sup> novembre 1859, les deux ou trois meilleures analogues nous ont montré que l'on pouvait avoir des répartitions spatiales très particulières, liées à des effets orographiques exacerbés. Et ceux-ci, ainsi que la spatialisation associée, se sont trouvés corroborés par les réponses des torrents, à la fois exceptionnelles mais aussi très différenciées spatialement.

C'est ce que nous avons tenté de résumer dans la figure de la page suivante.

Plus généralement, cette étude a montré les difficultés, mais aussi les espoirs à attendre d'une entreprise de ce genre : un retour d'expérience 150 ans après l'événement ! Nous espérons avoir prouvé que l'on pouvait encore faire progresser la connaissance, avec des recherches historiques certes, mais aussi en transférant astucieusement de l'information climatologique récente vers la période où a eu lieu l'évènement. Au-delà du cas particulier traité, on peut espérer que cette approche constitue un exemple type, applicable à d'autres régions et à d'autres crues remontant au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Elle éclaire à la fois l'évènement passé lui-même, mais permet aussi de le mettre en perspective et d'offrir pour le présent une vision et une hiérarchisation des causes qui s'avèreront utiles pour la surveillance d'un bassin à fort enjeux économiques et humains...



### Les résultats concrets :

Parmi les « délivrables », on signalera, outre ce rapport final :

- 1) Un **colloque** intitulé **Isère 1858-2009**, qui s'est tenu à Grenoble le 5 Novembre 2009 (Cf. programme du colloque en annexe). Ce colloque a réuni plus de 160 personnes, dont un tiers ont pu visiter la Station de Mesures Hydrométriques Isère-Campus, financée par EDF et par le Conseil Général de l'Isère.

Ce colloque a reçu des financements complémentaires :

- du SPC Alpes Nord (2000€)
- d'EDF DTG (1000 €)
- de l'Association Syndicale Drac Isère (ASDI) (1000€)
- et de l'INPG (1000€)

Il a donné matière à 14 présentations dont on trouvera les **diaporamas**, ainsi que, pour certaines, une **communication** écrite associée à l'exposé, sur le site du Pôle Grenoblois Risques Naturels.

- 2) des interventions dans diverses manifestations :
  - Conférence FRAPNA , le 22 Avril 2009  
**La crue l'Isère des 1<sup>er</sup> et 2 Novembre 1859 : Apprendre du Passé pour Préparer l'Avenir**
  - Conférence des Amis du Muséum (dans le cadre des journées Fêtes de la Science), le 14 Novembre 2009
  - Colloque de la Société Hydrotechnique de France « **Risques d'inondation en Ile de France, 100 ans après les crues de 1910** » – Paris 24-25 mars 2010. Cette communication donnera matière à un article dans la Revue « La Houille Blanche ».
  - Un article en anglais est en préparation.

Pour finir, et au risque de répéter ce que chaque équipe a déjà mis en conclusion de son chapitre spécifique, ce travail a été l'occasion d'une coopération exemplaire entre les différents partenaires. La coordination, assurée par le laboratoire LTHE de l'INP-Grenoble, s'est faite à travers des réunions trimestrielles régulières, à Lyon, rassemblant tous les partenaires, et complétées par de nombreuses réunions bilatérales informelles.

En sus du financement du Conseil Général de l'Isère attribué par le Pôle Grenoblois Risques Naturels, que nous remercions, nous avons bénéficié de l'expertise mais aussi des concours financiers d'EDF-DTG et du Service de Prévision des Crues-Alpes Nord, DDEA 38, qui pour ce dernier a affecté un stagiaire sur la modélisation hydrologique proprement dite. Nous tenons aussi à les remercier chaleureusement..

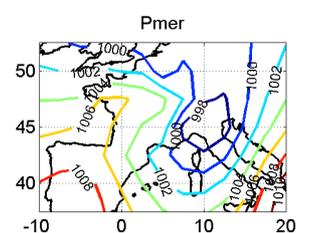
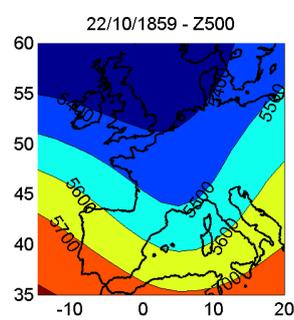
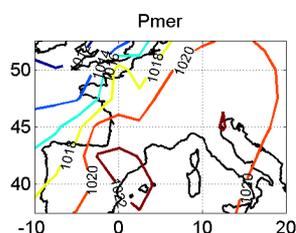
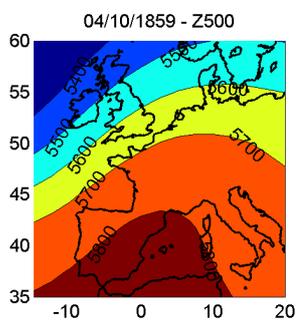
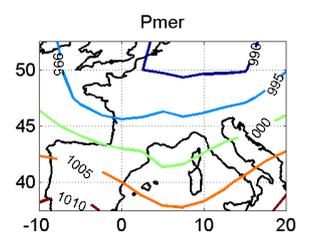
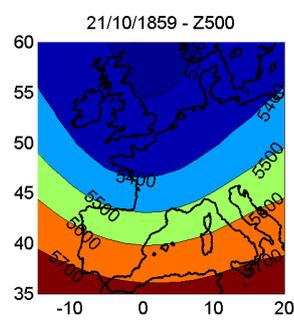
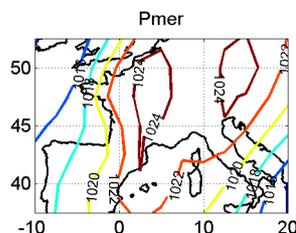
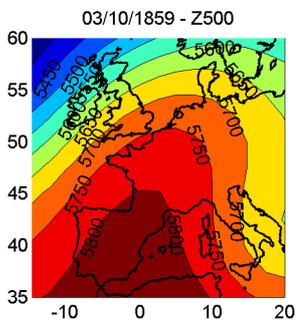
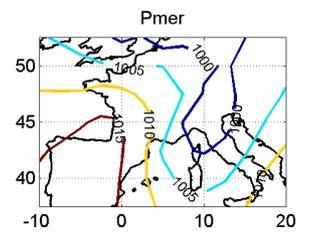
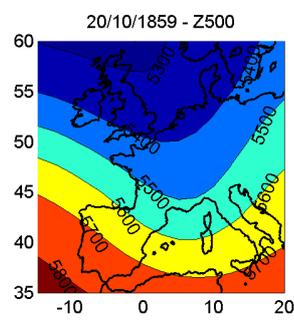
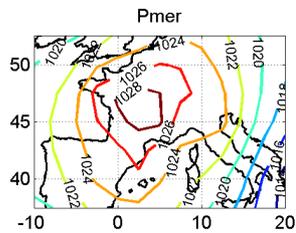
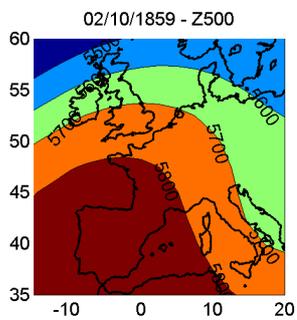
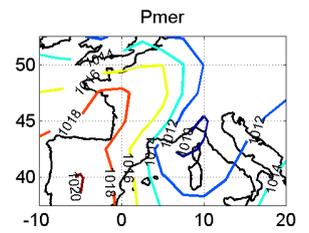
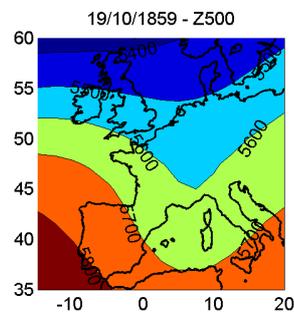
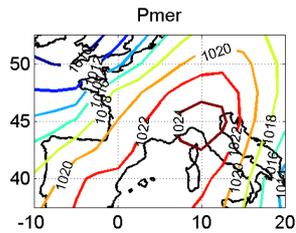
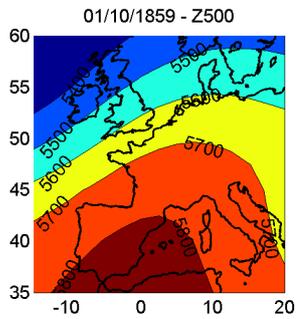
# **Annexes**

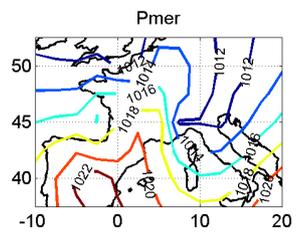
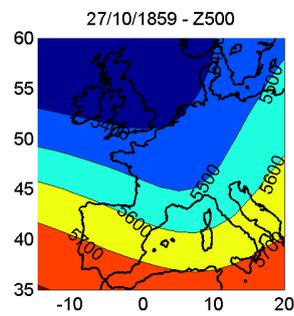
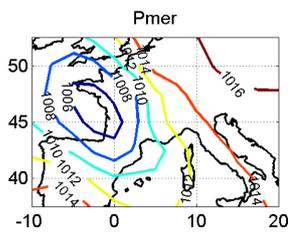
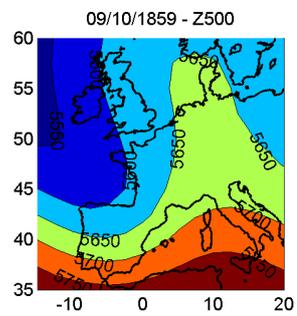
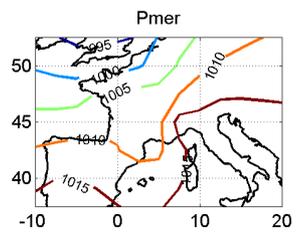
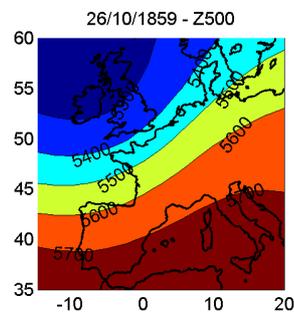
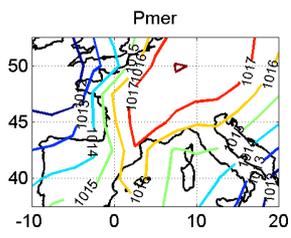
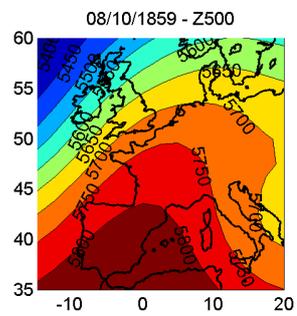
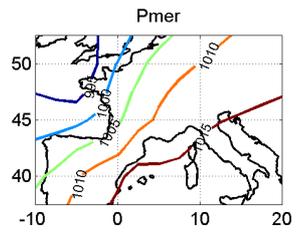
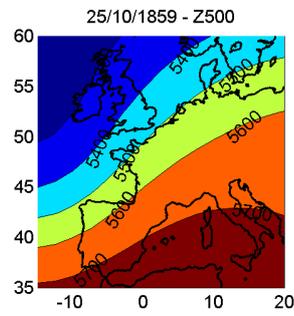
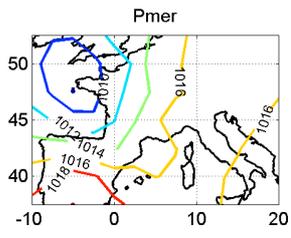
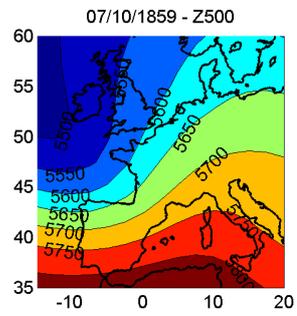
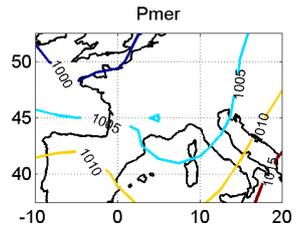
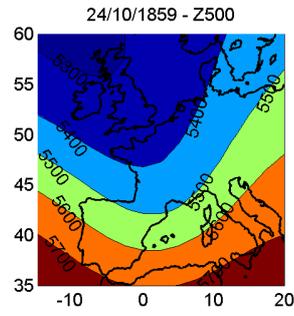
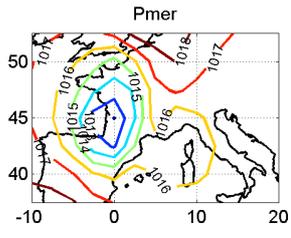
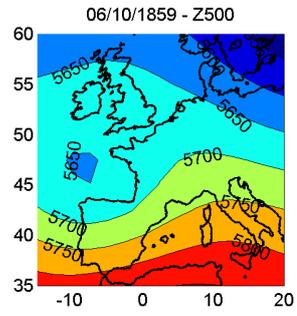
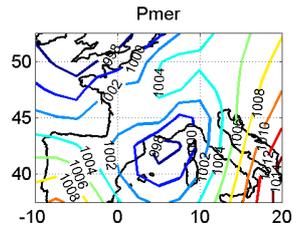
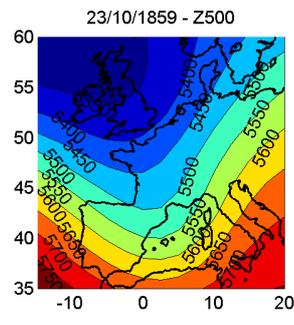
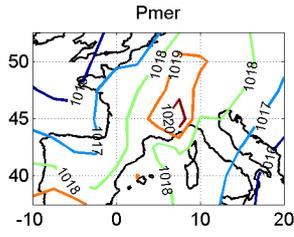
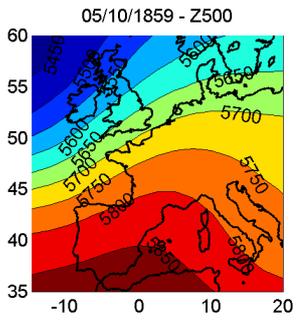


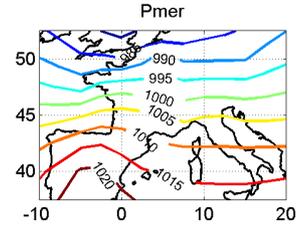
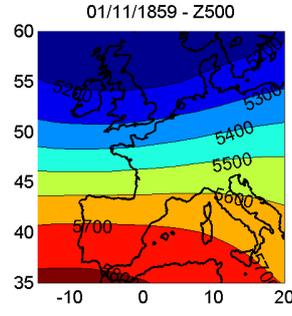
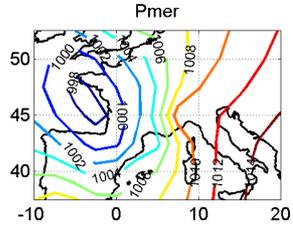
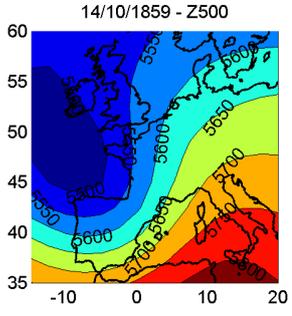
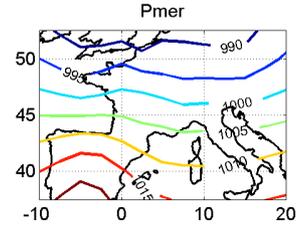
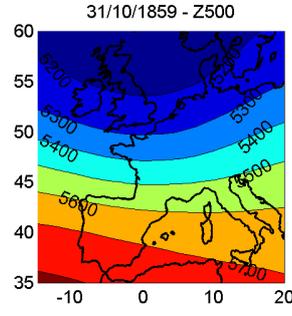
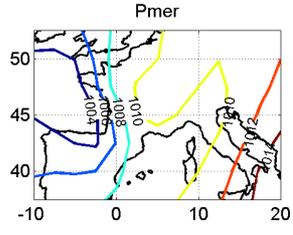
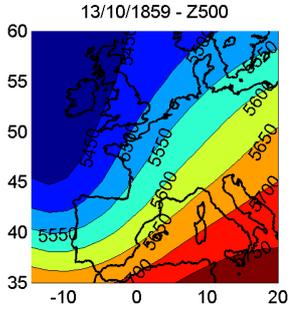
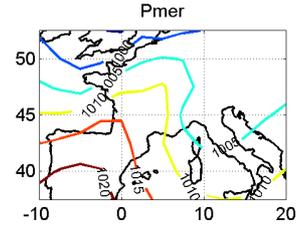
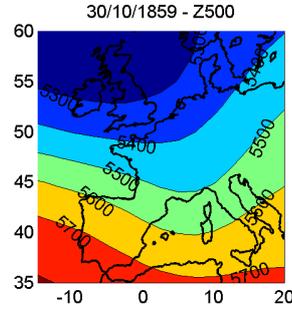
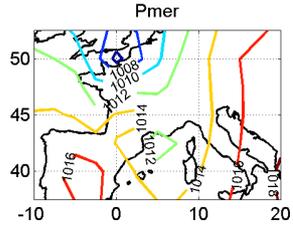
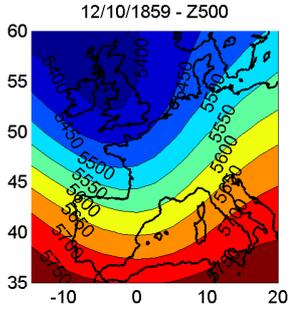
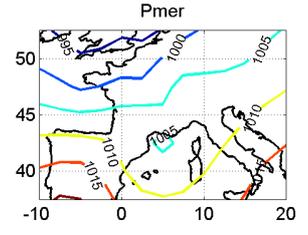
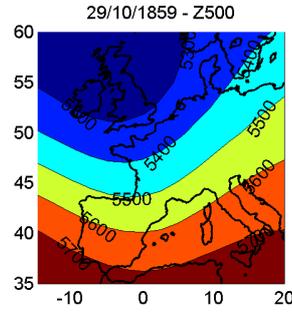
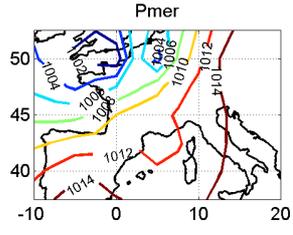
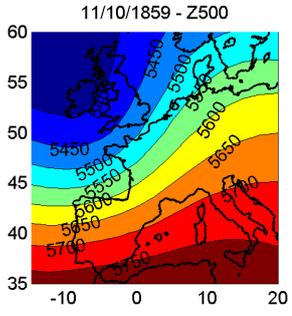
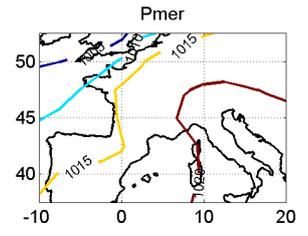
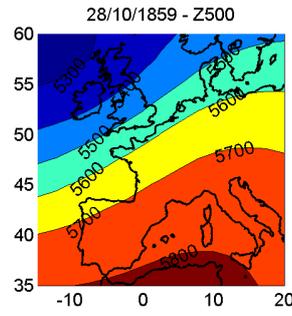
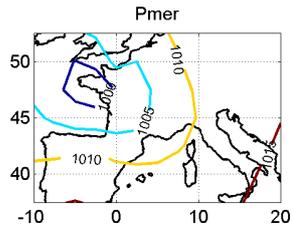
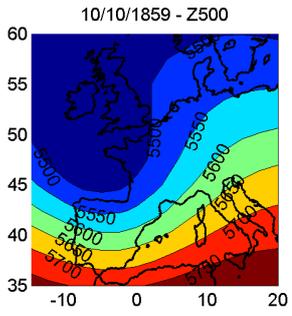
# ANNEXE 1

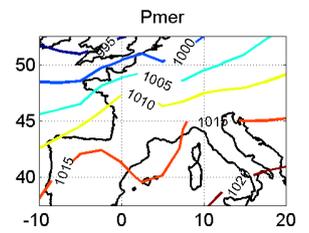
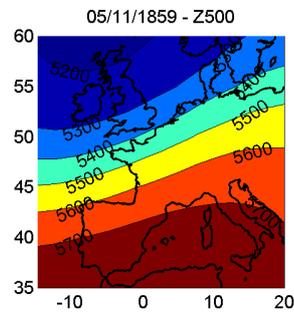
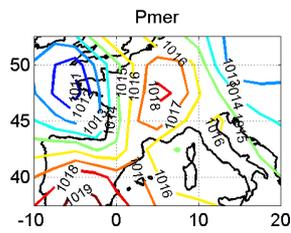
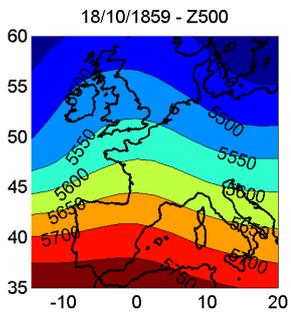
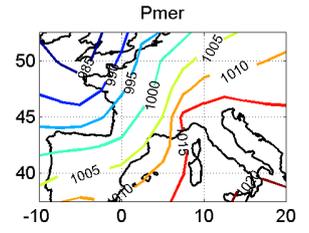
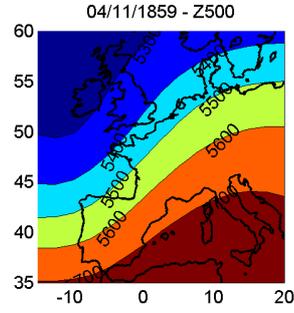
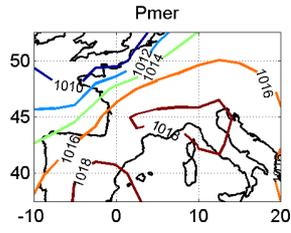
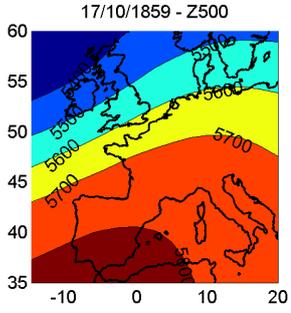
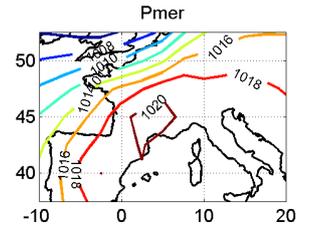
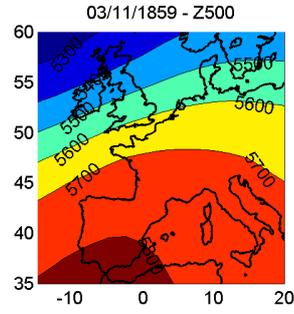
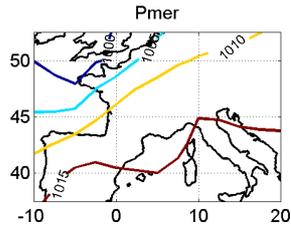
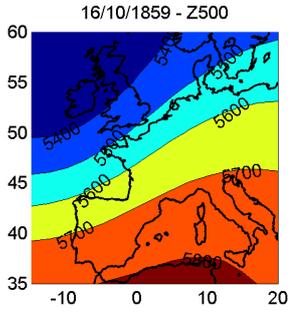
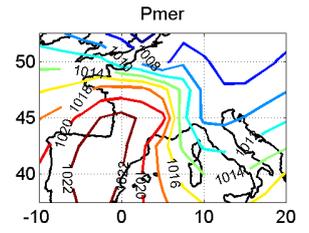
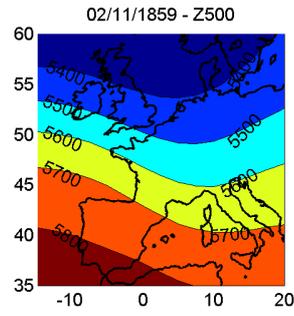
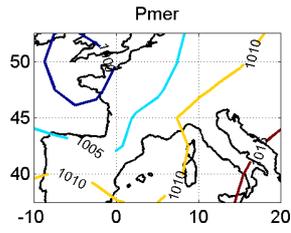
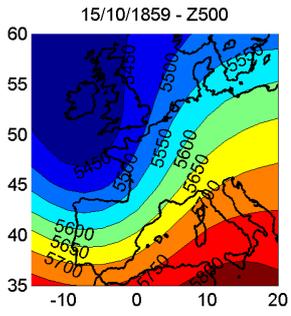
(au rapport final du projet Isère 1859)

On trouvera ci dessous la séquence complète du scénario météorologique avec, pour chaque jour, la carte au niveau de la mer de la pression atmosphérique  $P_{mer}$  (vignette de droite), et au niveau 500hPa, de l'altitude Z500 moyennée sur les 35 analogues du jour (vignette de gauche)









# ANNEXE 2

(au rapport final du projet Isère 1859)

## Affectation des valeurs journalières de précipitations par sous-bassins.

On a vu qu'à l'issue des deux premières parties du projet (MétéoFrance et Cemagref), on disposait pour chaque journées d'octobre-novembre 1859 :

- de valeurs observées aux stations de Lyon, Grenoble, Genève, Grand St Bernard et Turin
- et d'une loi de probabilité conditionnelle obtenue par la méthode des analogues, disponible à la fois pour chaque station et chaque sous-bassin, et caractérisant le risque pluviométrique en fonction de la situation météorologique Pmer.

Parallèlement nous disposons, à partir de l'archive EdF Gottardi, des valeurs de précipitations journalières aux stations et sur chaque sous-bassin sur la période 1953-2005. L'archive contient les précipitations estimées avec des pixel de 1km<sup>2</sup>. La valeur station est prise comme celle du pixel qui la contient. La valeur sous-bassin est l'intégrale des pixels qui le constituent.

Trois approches possibles s'offraient à nous pour affecter des valeurs à chaque sous-bassins en 1859.

### Première approche :

Par *corrélation directe* entre les valeurs recherchée Y sur un sous-bassin avec la valeur connue X à la station la mieux corrélée, ou avec les valeurs X mesurées à plus d'une station.

Pour cela, nous avons effectué l'apprentissage sur l'archive EdF Gottardi, en calculant les corrélations (en données journalières), entre toutes les stations et tous les bassins, sur la période 1953-2005.

Nous avons effectué cela pour différents seuils :

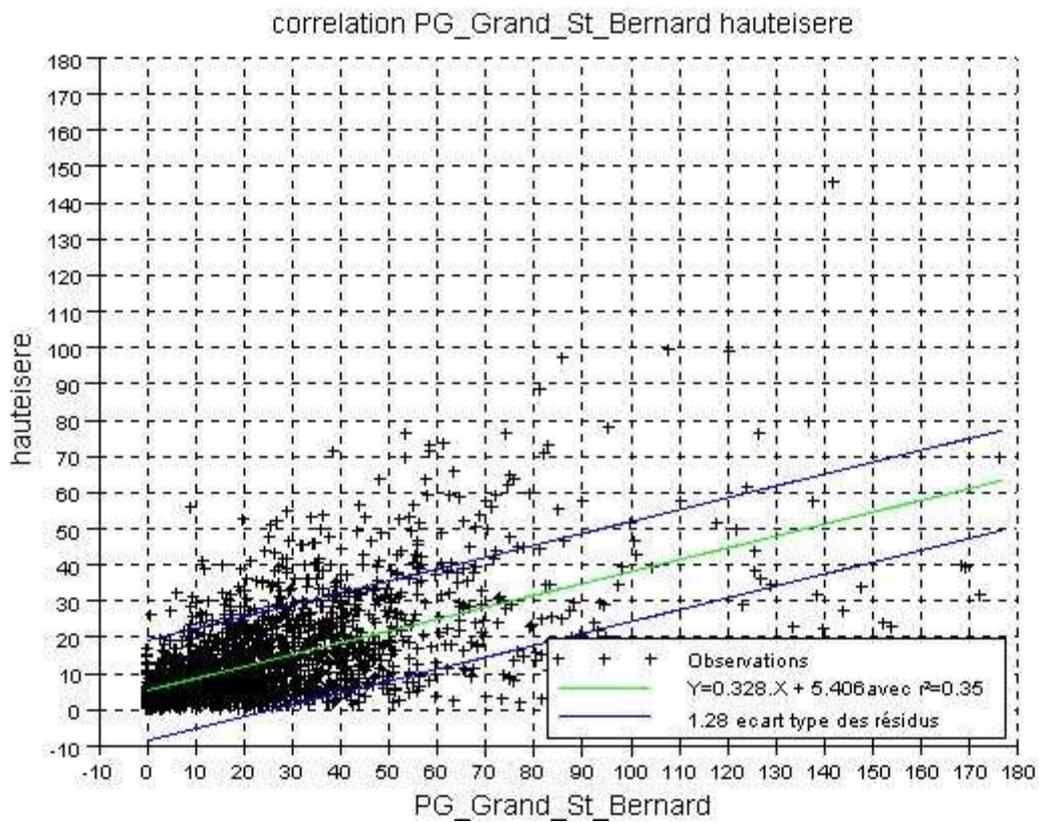
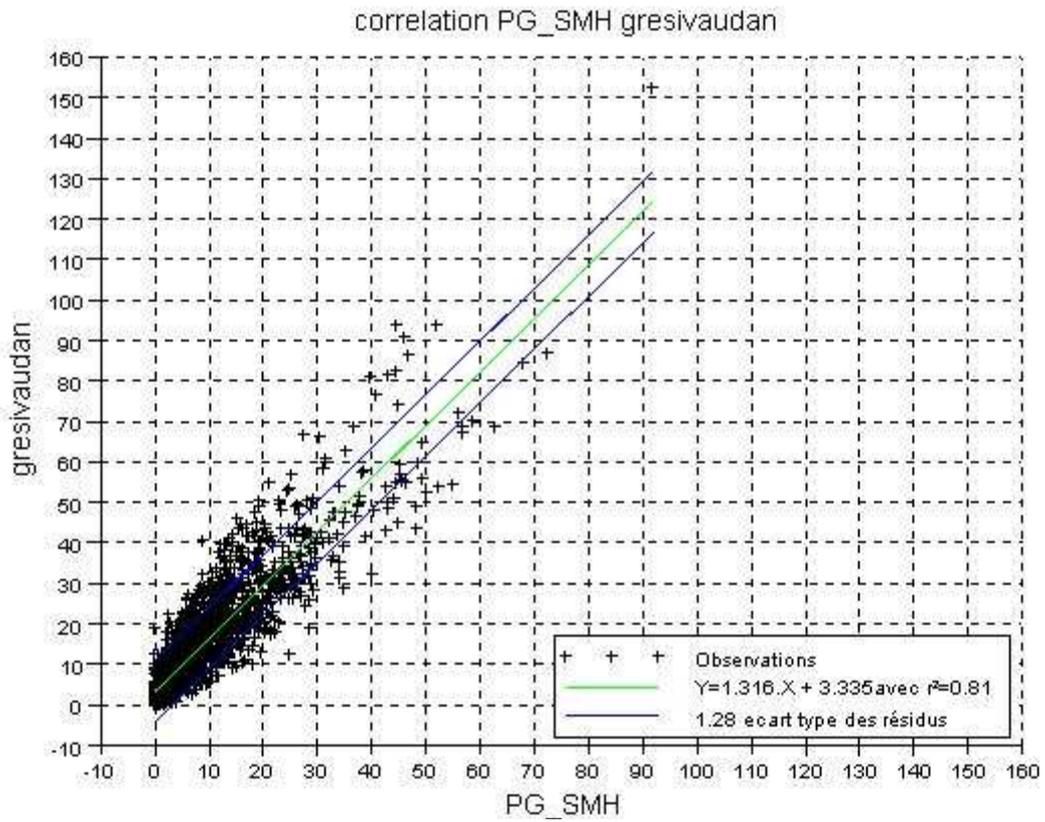
- d'abord pour éliminer les jours sans pluie et éviter de « doper » les corrélations par des couples de zéros, nous n'avons pris que les couples où les deux valeurs étaient positives
- ensuite en seuillant à 2 mm
- puis à 5 mmm

afin de privilégier la mesure de la corrélation pour les pluies fortes, puisque c'était cela qui nous intéressait.

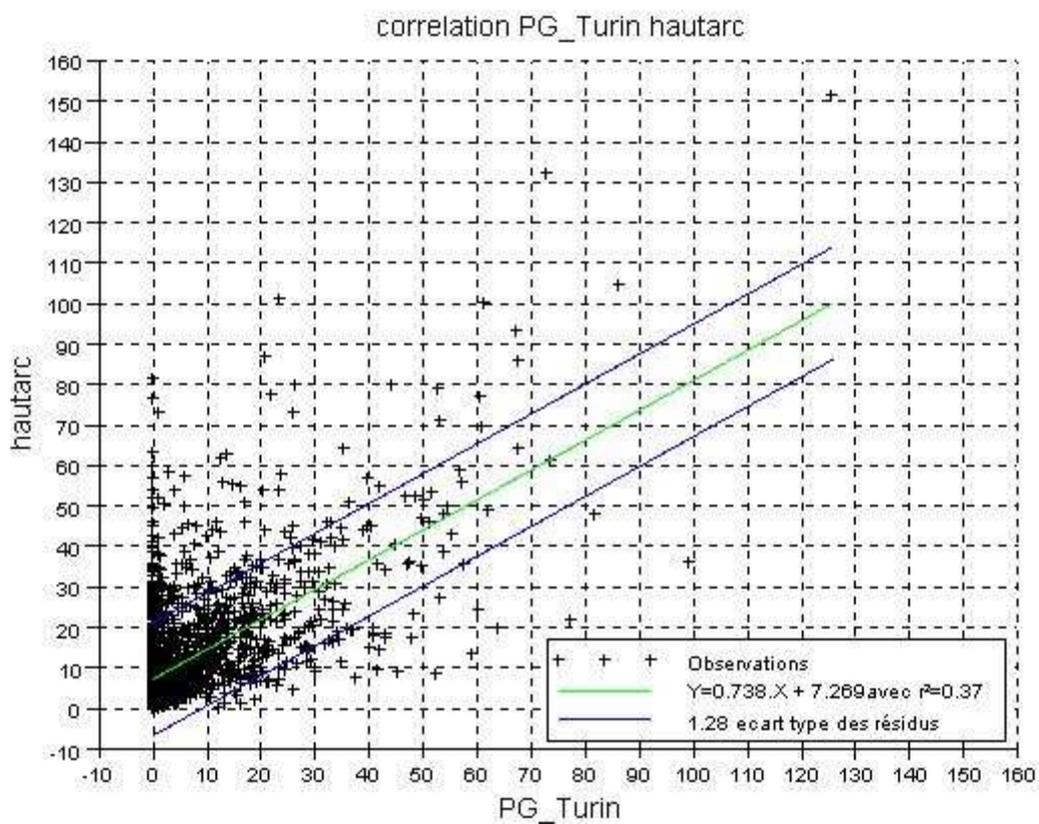
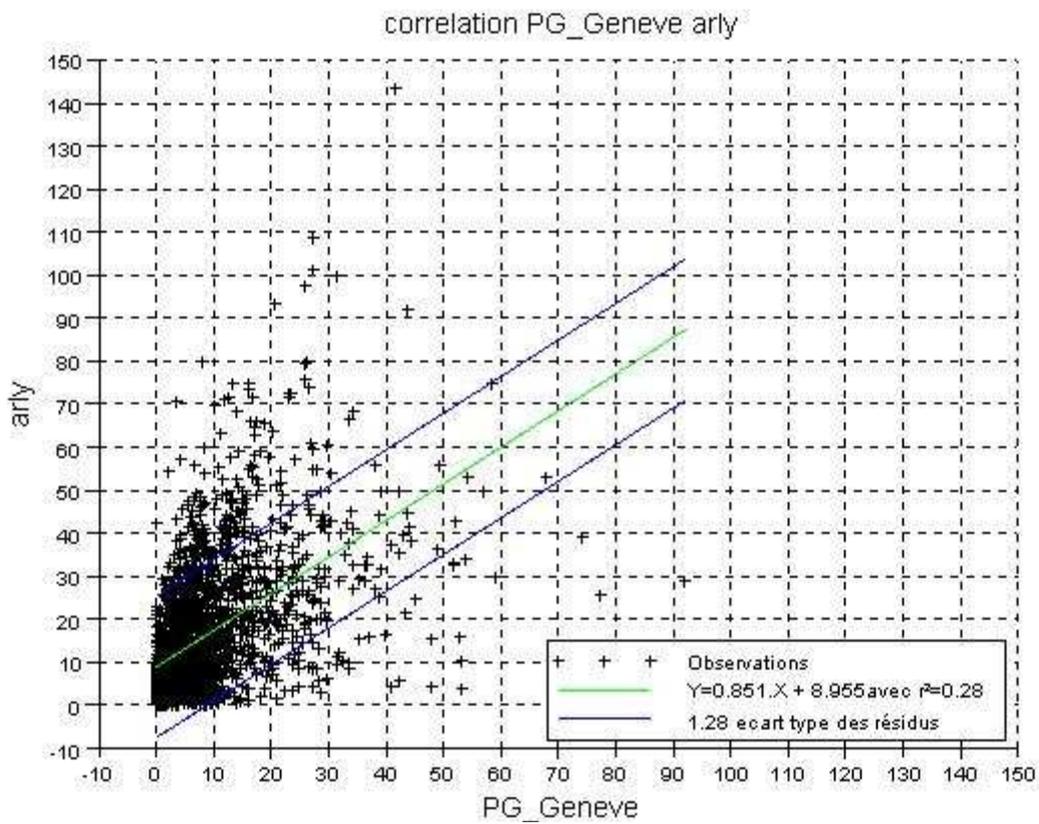
Nous donnons les résultats suivants au seuil de SEUIL > 0 mm **sur le bassin global** ( Figures A2 – 1 à 4) , ce qui fait qu'il peut y avoir des 0 et même des couples de 0 au niveau des bassins individuels.

On constate que sauf pour la relation entre Grenoble et sous bassin Grésivaudan, les relations sont de qualité médiocre ( $r^2 < 0,4$ )

## Figures A2-1et 2



### Figures A2-3 et 4



## Deuxième approche :

Dans cette deuxième approche, nous avons plutôt privilégié la proximité géographique et la probabilité d'occurrence de la précipitation à la fois à la station et sur un bassin proche.

Dans le premier cas, nous espérons une relation linéaire, unique et stable dans le temps, entre valeur ponctuelle à une station et valeur intégrée sur le bassin proche. Or celle-ci peut différer selon le niveau de précipitation, la saison, le type de temps, etc...

Cette seconde approche fonctionnera donc plutôt comme une « liaison » limitée à des journées qui ressemblent à la journée cible.

L'idée directrice est que :

- si à une station (dont on a la distribution attendue), la valeur est anormalement forte
- donc a une probabilité forte de ne pas être dépassée, i.e. c'est une valeur rare pour un tel jour
- alors sur le bassin proche, la valeur moyenne a toute chance d'être rare elle aussi, donc d'avoir une probabilité élevée, du même ordre qu'à la station.
- et la valeur à attendre sur ce bassin sera celle qui aura (à peu de chose près), la même probabilité rare pour ce jour là qu'à la station

Nous avons donc cherché à valider cette hypothèse de transfert de la probabilité des précipitations d'une station vers un sous-bassin proche. Pour cela nous avons rejoué notre méthode de spatialisation sur l'archive de F. Gottardi pour la période récente (1953-2005), grâce aux « prévisions » par analogues, on devrait plutôt dire aux sélections réalisées par A. Ben Daoud sur cette période (35 analogues comprises entre 1953-2005 pour chaque journée de 1953-2005). Chaque journée de l'archive météorologique NCEP-NCAR a été considérée successivement comme cible, et on a cherché ses analogues dans le reste de l'archive météo.

Or dans cette période nous disposons des précipitations journalières aux 4 stations pilotes déjà disponibles en 1859 (Saint Martin d'Hères, Genève, Grand-Saint-Bernard, Turin) et pour nos 7 sous bassins, ainsi que des 35 dates analogues à chaque journée. Nous avons utilisé ces 35 analogues et les distributions conditionnelles de précipitations qui s'en déduisent pour activer notre protocole d'allocation des valeurs aux sous-bassins, en tenant compte à la fois des valeurs observées aux 4 stations pilote et des prévisions analogues à ces stations et aux bassins. Cependant, comme nous connaissions ici les vraies valeurs « bassins » (ou en tout cas de bonnes estimations), nous avons pu comparer les valeurs de précipitations estimées avec notre méthode de transfert et les précipitations réellement observées.

Plus précisément, nous avons calculé la probabilité de la précipitation observée aux 4 stations (Grenoble, Genève, Grand saint Bernard et Turin) et nous l'avons affectée aux 4 bassins les plus proches (Grésivaudan, Arly, haute Isère et haut Arc). Ensuite les probabilités pour la Combe de Savoie et l'Arc moyen ont été calculées comme étant la moyenne (des probabilités pour ce jour là) entre Grésivaudan et Arly et entre Grésivaudan et haut Arc. Pour le Doron, sa probabilité a été estimée comme étant la moyenne des 6 autres sous-bassins. A partir de cette probabilité nous recalculons la précipitation associée à cette probabilité (la loi de probabilité étant spécifique à la journée cible et au bassin) en prenant le quantile correspondant dans la distribution conditionnelle du bassin considéré. Quant à la précipitation du bassin global, nous prenons une moyenne des précipitations estimées aux sous bassins, pondérées par la surface de chaque sous bassin.

Nous avons donc cherché à vérifier notre hypothèse, mais nous imaginions bien que celle-ci n'était pas valide pour des événements pluvieux localisés comme les orages d'été par exemple, où une station peut recueillir une précipitation importante alors qu'à 20 km, il n'a pas plu. C'est pourquoi nous avons décidé de tester notre hypothèse selon certaines conditions :

- la période considérée est restreinte à l'automne (de septembre à décembre),
- et nous avons testé différents seuils de précipitations (de 2 mm à 20 mm)
- ainsi que pour tous les types de temps confondus

- puis uniquement pour les jours de type de temps 2, (selon classification EdF), qui a été le type de temps majoritaire à l'automne 1859), et celui qui nous intéresse pour le dernier épisode des 31 octobre et 1<sup>er</sup> novembre.

Pour valider nos estimations nous avons calculé l'erreur moyenne par sous bassins et réalisé des régressions linéaires entre les précipitations réellement observées (entre 1953 et 2005) et nos précipitations réaffectées, pour chaque sous-bassins. (Cf. **Figures A2 – 5 à 22**). Nous n'avons considéré ici que les valeurs positives de précipitation. On donne, pour chacun des 7 sous-bassins :

- à gauche, le nuage de corrélation tous types de temps confondus (TTP)
- à droite, le nuage de corrélation pour le seul type de temps 2 (TTP2)

Les résultats de ces validations sont concluants et vont bien dans le sens de nos suppositions initiales:

- Nos estimations sur le haut Arc ne sont pas bonnes, et se dégradent encore si l'on ne considère que le TTP 2 (flux de sud-ouest). En effet nos régressions montrent un biais important (30% tous types de temps confondus et 50% si l'on ne considère que le TTP 2) et un coefficient de régression faible (tous TTP  $r^2=0.46$  mais 0.2 pour TTP 2). Ceci s'explique par le fait que le haut Arc a un fonctionnement particulier (sensible aux retours d'est) et que Turin est sur l'autre versant. Donc lorsque la perturbation passe la frontière (d'un sens comme dans l'autre) nos estimations vont être correctes. Par contre, lorsque que l'air ne possède pas assez d'humidité, un versant va être arrosé et pas l'autre. Par exemple, un retour d'est qui ne déborde que très peu en France ou un flux d'ouest (TTP 2) ou il ne pleut pas à Turin par exemple mais sur le haut Arc (on le remarque très bien sur notre graphique TTP 2 ou il y a un grand nombre de précipitations observées sur le bassin, et où notre estimation considère qu'il ne pleut pas.

- Malgré un meilleur  $r^2$  (aux alentours de 0.5) et un biais moins important (de l'ordre de 10%) de nos estimations sur l'Arc moyen, nos estimations sont aussi moins bonnes lorsque que l'on considère uniquement le type de temps 2.

- Nos estimations sur le bassin de la Haute Isère à partir du Grand St Bernard et de l'Arly à partir de Genève montrent une meilleure corrélation ( $r^2$  respectivement égal à 0.54 et à 0.64) avec les observations mais nous indiquent que nos estimations surestiment avec un biais de l'ordre de 20%. Par contre ici, on remarque que pour ces deux bassins, si l'on ne considère que le TTP 2, nos estimations s'améliorent.

- Nos estimations sur la Combe de Savoie et le Doron se révèlent bonnes et peu biaisées, elles s'améliorent aussi si l'on ne considère que le TTP 2

- Enfin, nos estimations sont particulièrement bonnes (peu biaisées et bien corrélées, surtout par TTP 2) sur le Grésivaudan.

Ces validations dans la période récentes nous montre donc que nos estimations pour le BV global ne sont pas entachés d'une incertitude trop grande (écart type des résidus de 6mm et  $r^2=0.77$ ) et semble sous estimer légèrement (biais de 3%) la pluie, si l'on considère tout type de temps confondus. Lorsque l'on se restreint au journées de type de temps 2 il semble que l'on sous estime un peu plus (11%) mais la corrélation est meilleure ( $r^2=0.82$ ).

La conclusion est que, en moyenne statistique, notre protocole d'affectation de pluies journalières aux sous-bassins est raisonnable. Comme on pouvait le pressentir :

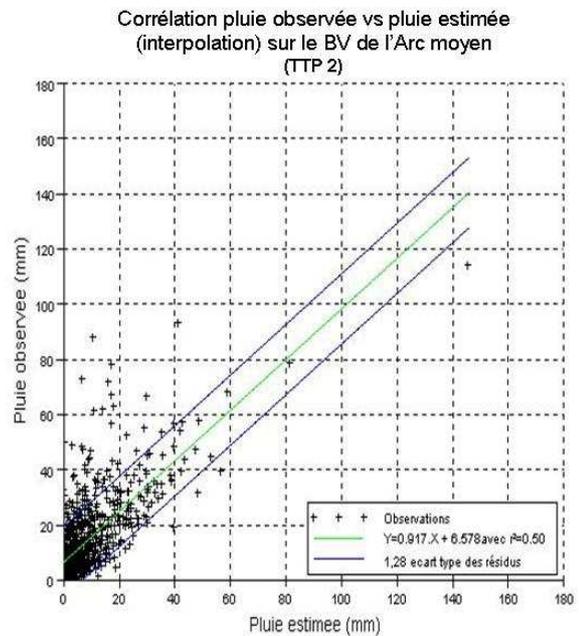
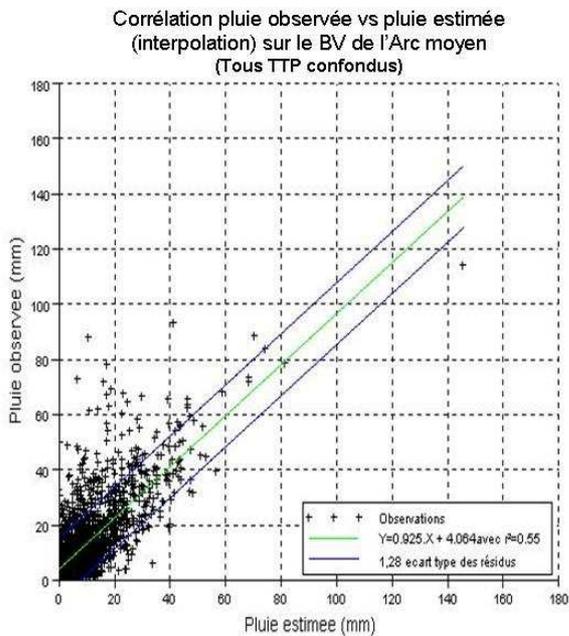
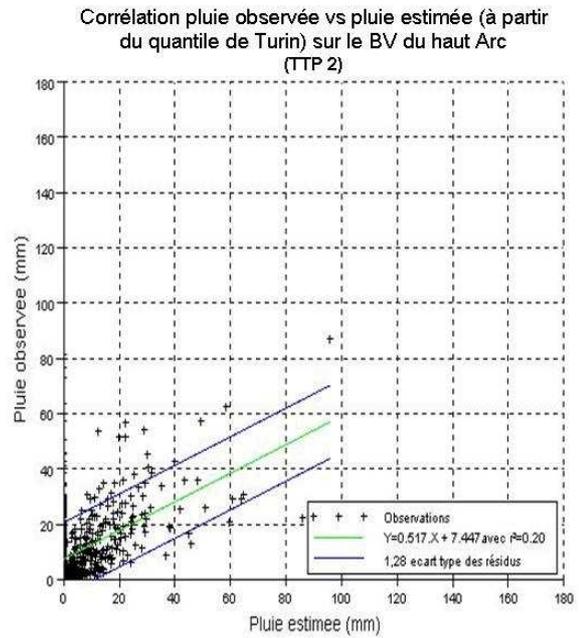
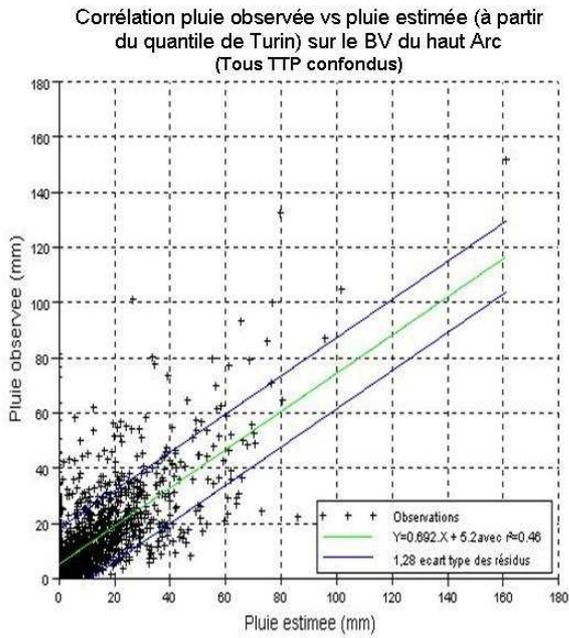
- il est d'autant meilleur que la station est proche du bassin et située sur au même vent de la perturbation. C'est le cas de Grenoble et du Grésivaudan. C'est le cas aussi de Genève et de l'Arly, même si la distance est assez importante. Annecy aurait été

- préférable comme station de référence pour l'Arly, mais n'avait pas de données de précipitations en 1859.
- Par contre, le Grand St Bernard, et surtout Turin, sont sous le vent de la crête par type de temps de sud-ouest TTP2, et donc en effet de foehn. Cela explique la dégradation forte, pour le haut Arc, quand on se restreint à ce type de temps.
  - A l'inverse, pour ce type de temps, l'Arly et le Grésivaudan, mais surtout la Combe de Savoie et le Doron, voient leurs performances s'améliorer.

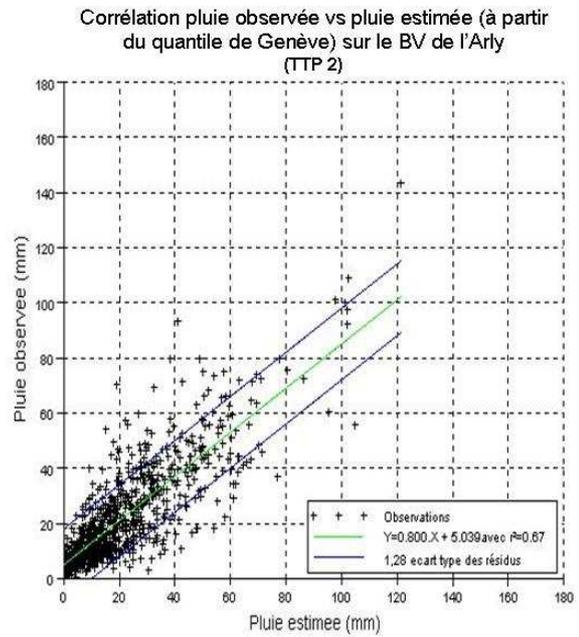
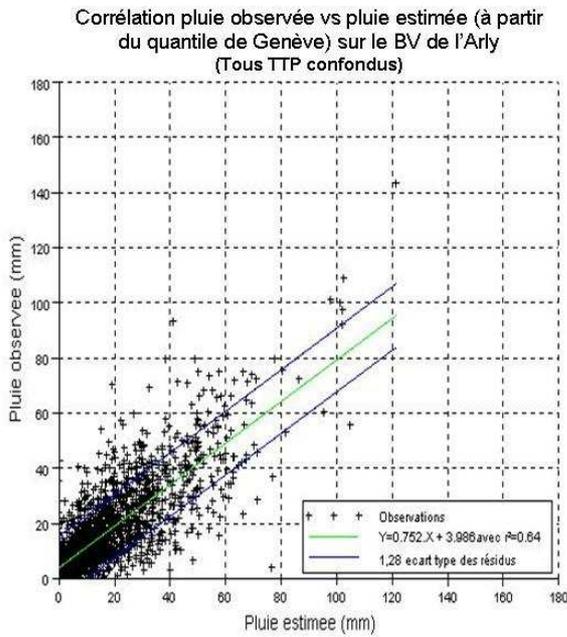
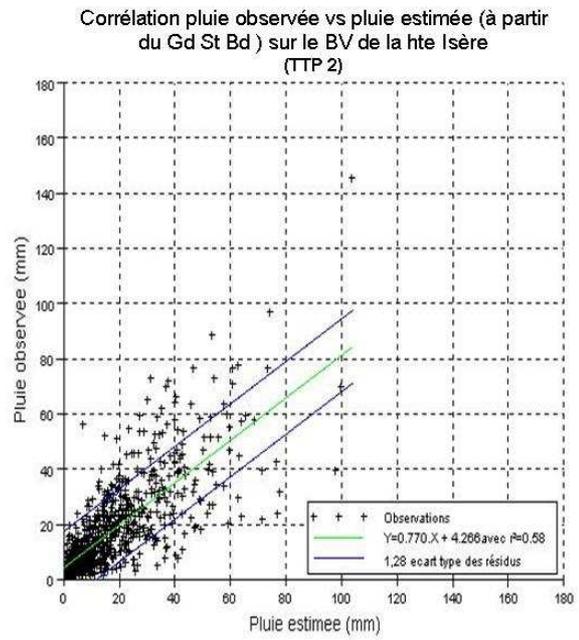
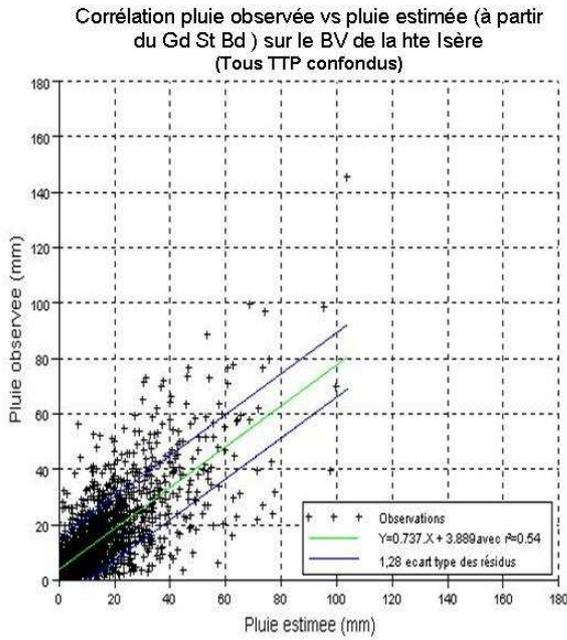
Nous pouvons donc considérer que notre protocole est la meilleure façon de réaffecter des valeurs de précipitations sur le bassin de l'Isère avec les seules données périphériques disponibles en 1859. Le passage par les probabilités conditionnelles semble mieux prendre en compte les non-linéarités et la variabilité des relations entre pluie-station et pluie-bassin selon les types de temps.

On donne aussi (Figures 21 et 22) les résultats de la comparaison valeurs vraies –valeurs estimées mais pour le bassin global cette fois. En effet, c'est avec les données du bassins global que seront réalisées les modélisations hydrologiques. On voit qu'avec des  $R^2$  de 0.77 tous types de temps confondus, et de 0.81 pour le type de temps 2 qui nous intéresse, l'entrée précipitation du modèle est de qualité au moins comparable à celle que l'on aurait obtenue en utilisant seulement quelques stations observées plus ou moins bien réparties sur le bassin. Nous bénéficions ici, grâce à l'analogie, d'un transfert d'informations de bonne qualité (les réanalyses EdF-Gottardi) qui incluent les effets orographiques et les types de circulation.

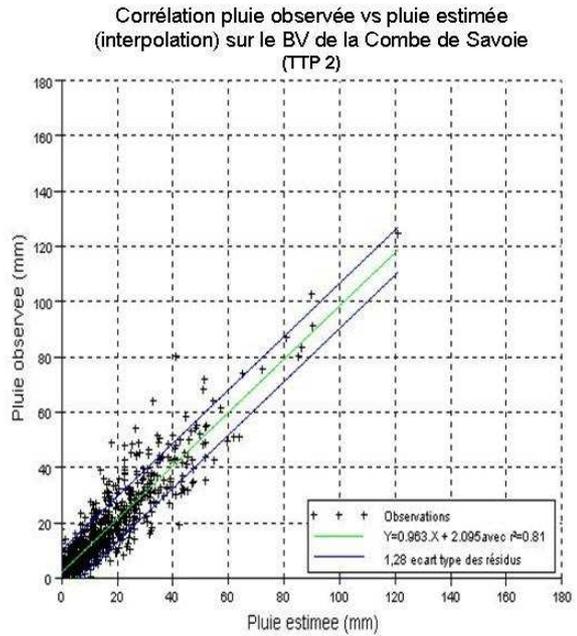
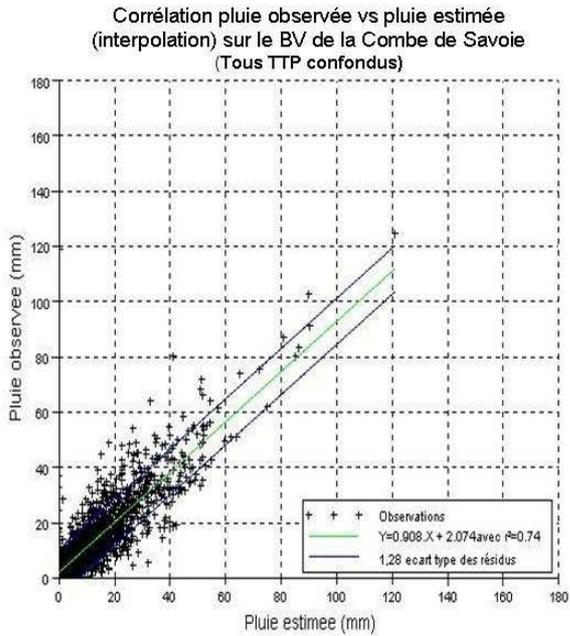
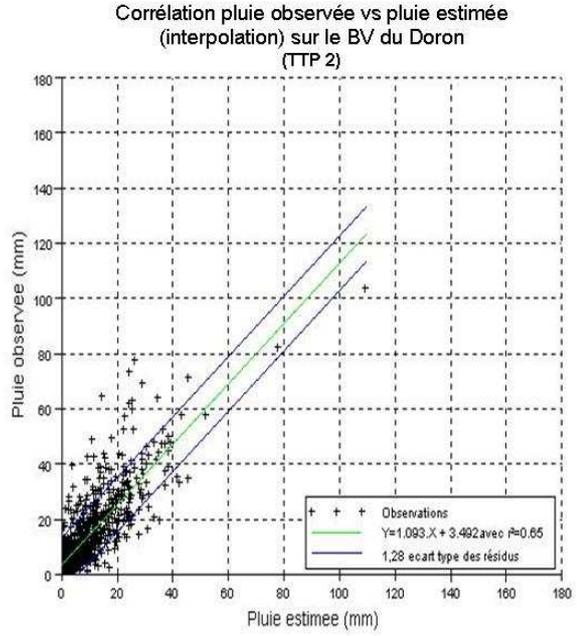
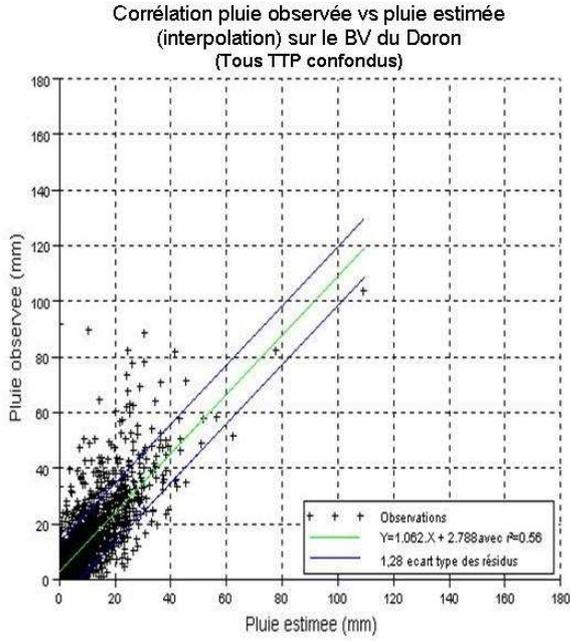
## Figures A2 - 5 à 9



## Figures A2 - 10 à 14

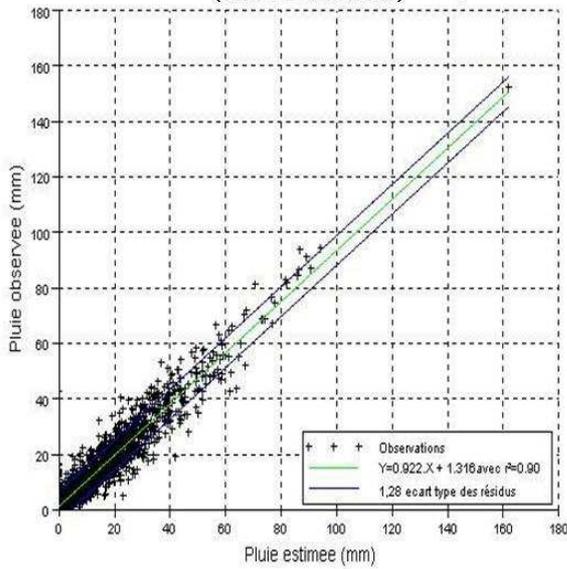


**Figures A2 - 15 à 18**

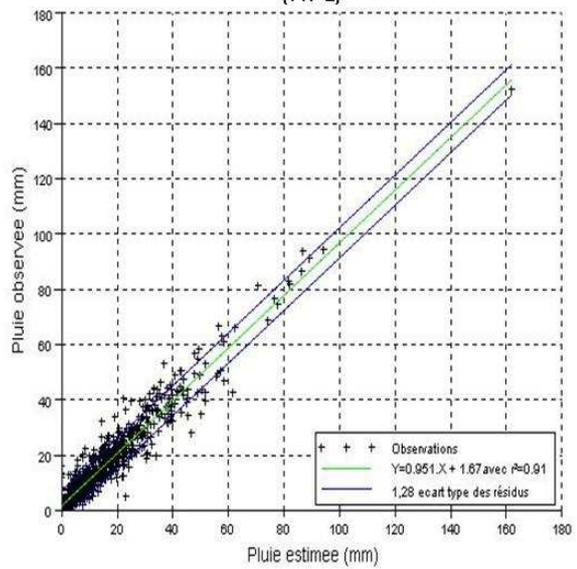


## Figures A2 - 19 à 22

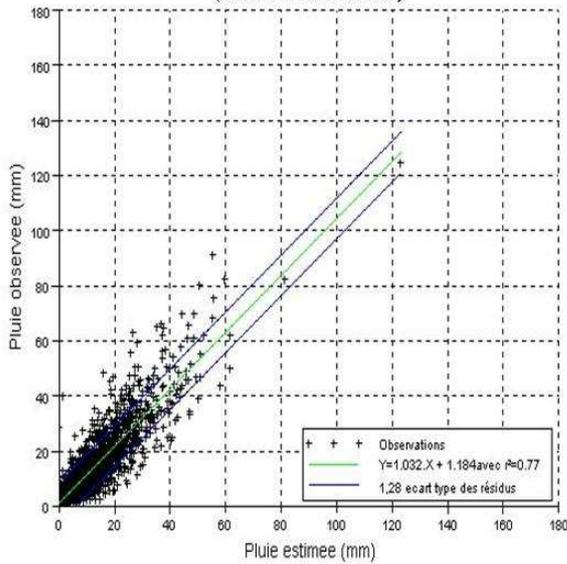
Corrélation pluie observée vs pluie estimée (à partir de SMH) sur le BV du Grésivaudan (Tous TTP confondus)



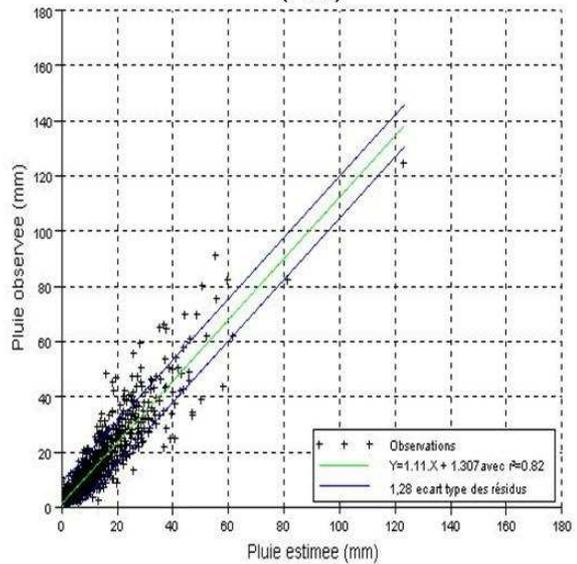
Corrélation pluie observée vs pluie estimée (à partir de SMH) sur le BV du Grésivaudan (TTP 2)



Corrélation pluie observée vs pluie estimée (moyenne pondérée des sous BV) sur le BV Global (Tous TTP confondus)



Corrélation pluie observée vs pluie estimée (moyenne pondérée des sous BV) sur le BV Global (TTP 2)



### **Troisième approche :**

Sachant que pour chaque journée cible, il semble que les précipitations observées aux stations et aux bassins confluent (notre hypothèse de transfert de probabilité de la station vers le bassin donne de bonnes estimations), nous ne pouvons nous empêcher de vérifier une autre méthode possible.

Celle-ci consisterait à effectuer (pour chaque journée cible indépendamment) une régression entre précipitations observées à la station et précipitations estimées sur le bassin le plus proche à partir de l'échantillon de journées analogues sélectionné pour cette journée cible :

$$P_{BV,analogues} = a \times P_{Station,analogue} + b$$

Puis, connaissant la valeur à la station de la journée cible (qui ne fait pas partie des analogues du jour), on affecte, par la relation obtenue une valeur estimée de précipitation sur le bassin :

$$P_{BV,estimé} = a \times P_{Station,JC} + b$$

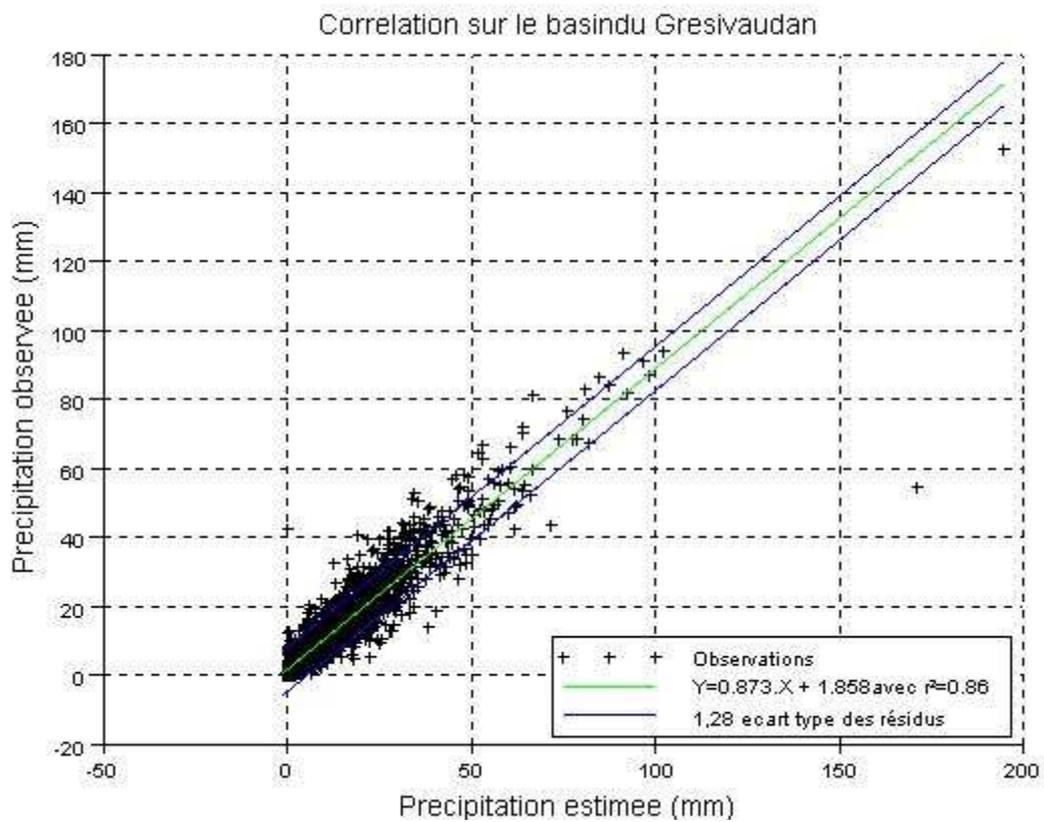
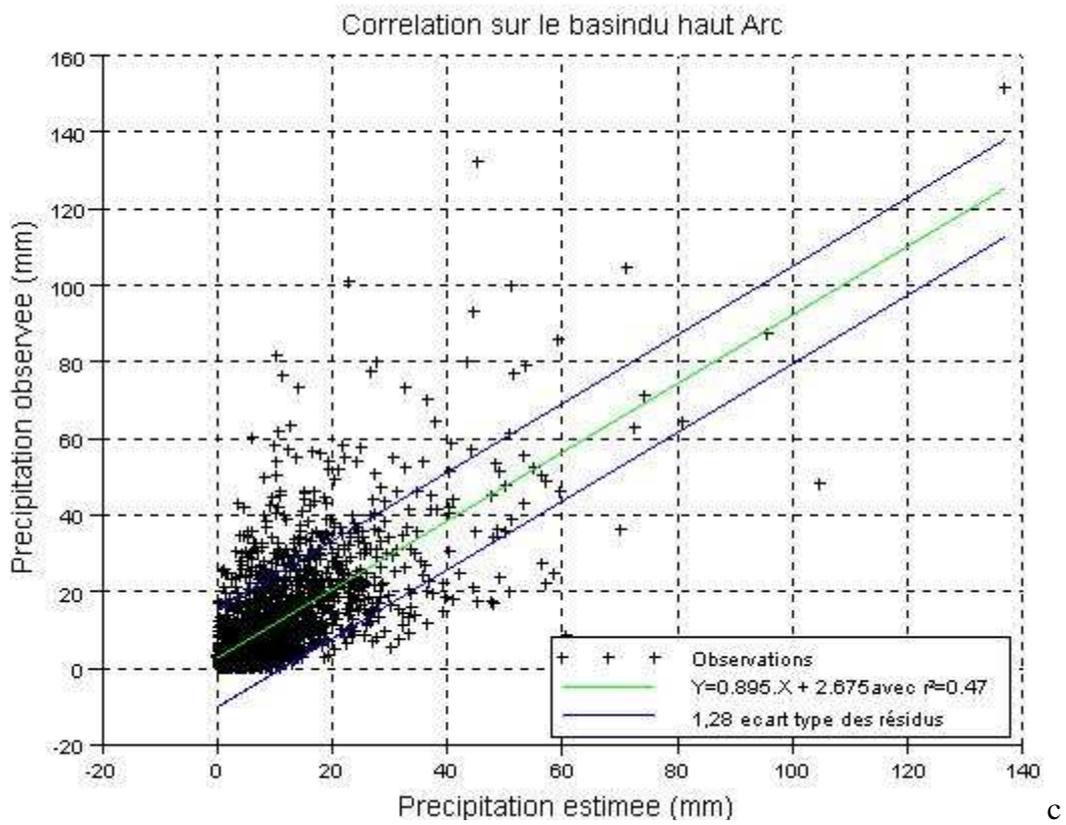
On réalise cela jour par jour sur la période 1953-2005, et on compare ensuite, sous-bassin par sous-bassin, les valeurs estimées et les valeurs vraies disponibles.

On donne quelques résultats dans les Figures A2-23 à 26. Il n'y a plus de raison de considérer le type de temps, puisque chaque journée tend à sélectionner des analogues de son propre type de temps, et donc à ajuster une régression qui en tient déjà compte.

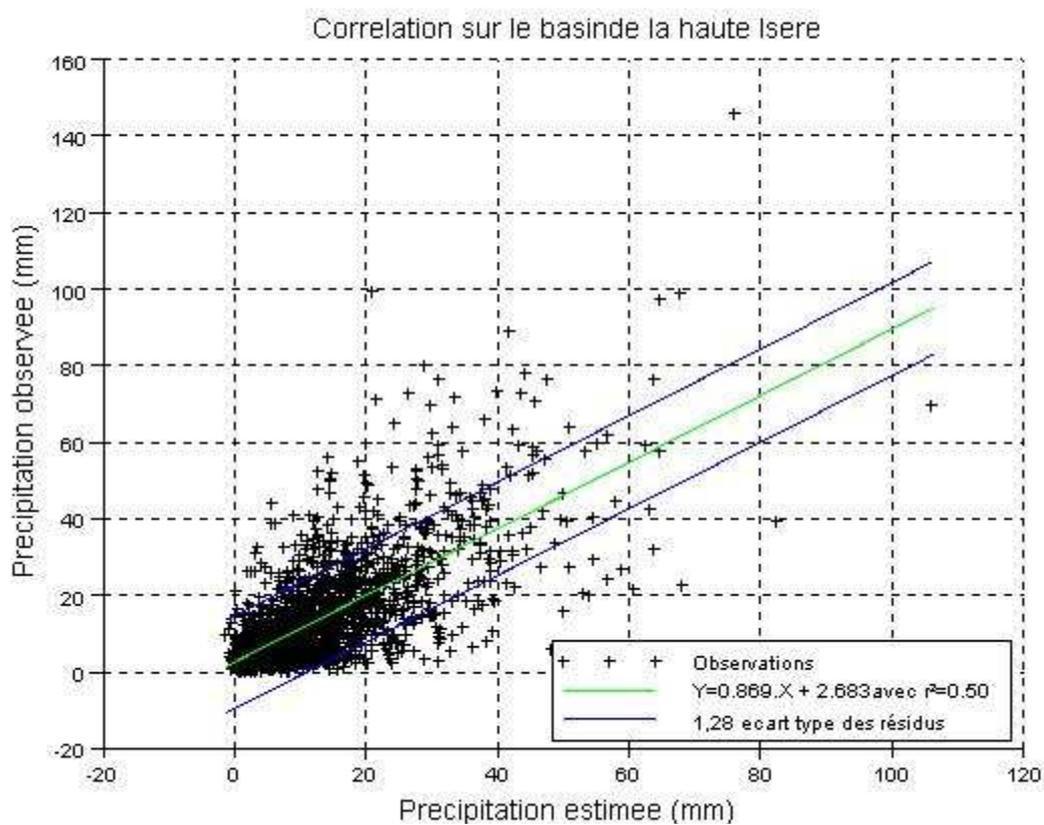
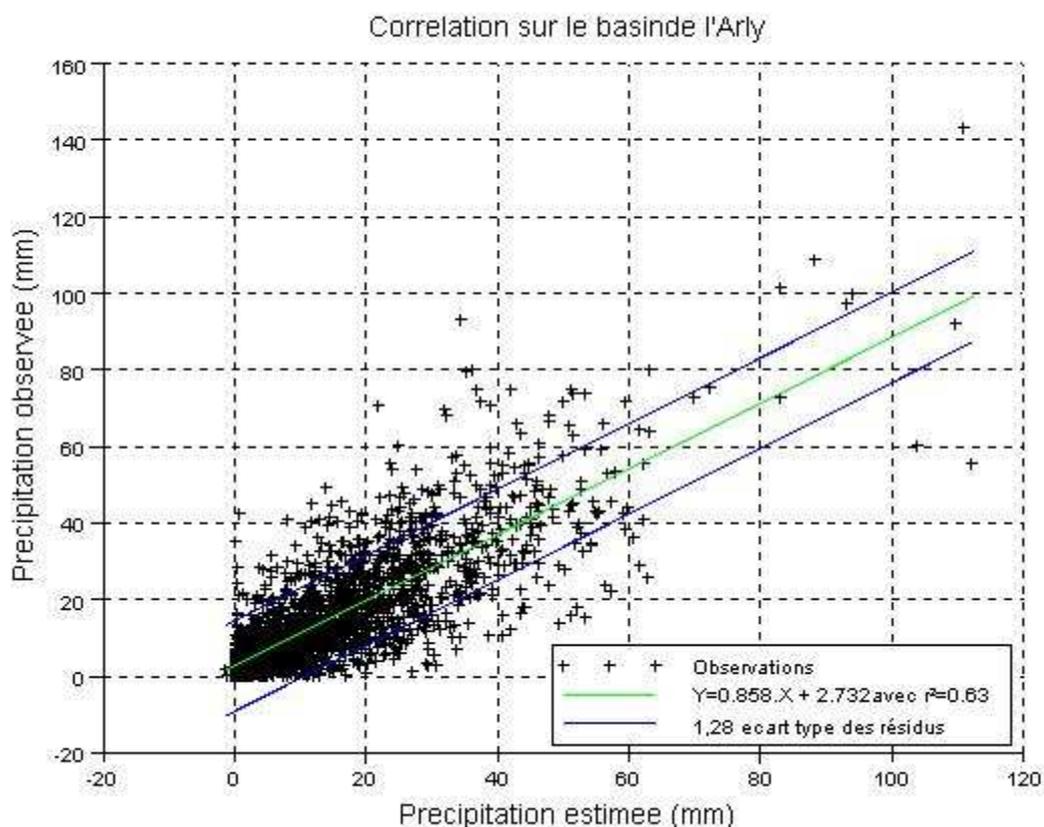
Les résultats sont du même ordre que dans la méthode quantilique de la deuxième approche, mais plutôt systématiquement inférieurs, alors qu'ils nécessitent le calcul supplémentaire d'une régression. De plus, quand celle-ci est mauvaise, cela induit un biais dans la variance des valeurs estimées.

C'est la raison pour laquelle la deuxième approche a été retenue pour affecter nos valeurs de précipitations par sous-bassins en 1859.

Figures A2 - 23 et 24



## Figures A2 - 25 et 26





# ANNEXE 3

(au rapport final du projet Isère 1859)

Nous donnons ici un tableau récapitulatif de l'estimation de la période de retour de l'événement. Ces résultats correspondent à des ajustements d'une loi de Gumbel sur les pluies maximales saisonnière **d'automne (septembre-décembre)** pour la période 1953-2005 et tirées de l'archive Gottardi. Il s'agit de la pluie moyenne journalière intégrée sur chacun des sept sous-bassins définis dans le texte principal. Ces ajustements sont visibles sur les graphiques présentés dans les pages suivantes.

Si on positionne les précipitations de notre scénario III sur ces ajustements par bassin, on obtient les périodes de retour suivantes (pour le 1<sup>er</sup> novembre et les deux jours 31 octobre et 1<sup>er</sup> novembre) :

<b>BV</b>	<b>cumul 1 jour</b>	<b>cumul 2 jour</b>
<b>haut Arc</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>Arly</b>	<b>8</b>	<b>27</b>
<b>Doron</b>	<b>17</b>	<b>59</b>
<b>haute Isere</b>	<b>6</b>	<b>14</b>
<b>Arc moyen</b>	<b>2</b>	<b>8</b>
<b>Combe de Savoie</b>	<b>3</b>	<b>17</b>
<b>Gresivaudan</b>	<b>2</b>	<b>7</b>
<b>BV global</b>	<b>5</b>	<b>16</b>

<b>BV global precip + fonte</b>	<b>12</b>	<b>25</b>
---------------------------------	-----------	-----------

Si maintenant, on ajoute aux précipitations la lame d'eau relarguée par la fonte de neige, (calculée seulement pour le bassin global), on obtient les temps de retour ci-dessus (voir aussi les deux derniers graphiques).

