HAL
open science

Etude de la stationnarité des chroniques hydrologiques du Mercube, petit bassin versant rural au bord du lac Léman

Hortense Bourgeois

To cite this version:

Hortense Bourgeois. Etude de la stationnarité des chroniques hydrologiques du Mercube, petit bassin versant rural au bord du lac Léman. [Stage] Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes (ENSAR), Rennes, FRA. 2009, 106 p. hal-02817614

HAL Id: hal-02817614

https://hal.inrae.fr/hal-02817614v1

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Hortense BOURGEOIS
Promotion 158

Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes
Stage de 2ème année

Etude de la stationnarité des chroniques hydrologiques du Mercube, petit bassin versant rural au bord du lac Léman.

Equipe *Bassins Versants*
UMR CARRTEL
Station d'Hydrobiologie Lacustre de Thonon-les-Bains

Octobre 2008 - février 2009

Institut National de la Recherche Agronomique

Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes Limniques

DE L'ALIMENTATION AU CADRE DE VIE

REMERCIEMENTS.

A l'issue de ce stage, je tiens à remercier la Direction d'Unité, J.M. Dorioz et J. Guillard, ainsi que toute l'équipe *Bassins Versants* pour m'avoir accueillie parmi eux, dans la station INRA de Thonon les Bains.
Je souhaite plus particulièrement adresser mes remerciements à D. Trévisan, le Chef de l'Equipe Bassins Versants, qui m'a permis de partager son bureau, et D. Barbet, mon maître de stage, pour sa patience, son aide et sa gentillesse.

Par ailleurs, je ne peux oublier Ph. Quetin dont l'aide concernant la recherche et la préparation des données a été précieuse, ainsi que J.P. Moille pour m'avoir fait découvrir le terrain.
Une pensée également pour J. Lazzarotto, responsable du laboratoire d'analyses physico-chimiques.

Il me faut souligner que le logiciel Hydraccess©, que j'ai utilisé pour les transformations hauteur-débit, est développé par M. Vauchel de l'I.R.D. et gracieusement mis à disposition.
Et enfin, un grand merci à la DIREN Rhône Alpes qui m'a permis d'accéder aux données journalières du Foron et du Redon.

PARTIE 1 : PRÉSENTATION GÉNÉRALE 8

I. PRÉSENTATION DE L'INRA. 9

I.1. L'INRA EN GENERAL. 9
I.2. LA STATION D'HYDROBIOLOGIE LACUSTRE: UNITE MIXTE DE RECHERCHE. 13
I.3. L'EQUIPE BV : BASSINS VERSANTS & TRANSFERTS DE SEDIMENTS. 13
I.3.1. LES MISSIONS DE L'EQUIPE BV: 14
I.3.2. LES PROJETS DE L'EQUIPE: 15
a). Traçage de l'origine des sédiments et conséquences sur les propriétés du P (Phosphore) particulaire. 15
b). Transferts de contaminants fécaux et qualité microbiologique des eaux à l'échelle du bassin versant. 15

II. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU STAGE 17

III. HYPOTHESES ET DEMARCHE DE TRAVAIL. 21

III.1. LA DÉMARCHE SCIENTIFIQUE EN 6 ÉTAPES. (FIGURE 3) 21
III.2. RAPPEL SUCCINCT DU CONTEXTE ET DES OBSERVATIONS (ETAPE 1 DE LA DEMARCHE) 22
III.3. RAPPEL DES QUESTIONS POSÉES AU PRÉALABLE (ETAPE 2) 22
III.4. HYPOTHESES DE TRAVAIL (ETAPE 3) 22
III.5. TESTS D'HYPOTHESES, EXPERIMENTATION (ETAPE 4) 22

PARTIE 2 : LE SITE D'ÉTUDE 24

I. LE BASSIN VERSANT-GENERALITES. 25

I.1. LE BASSIN VERSANT COMME UNITE D'ETUDE. 25
I.1.1. METROLOGIE D'UN BASSIN VERSANT. 25
I.2. FONCTIONNEMENT D'UN BASSIN VERSANT. 25
I.2.1. LES TRANSFERTS D'EAU DANS LES BASSINS VERSANTS. 25
a). Les écoulements. 25
b). L'infiltration. 27
I.2.2. LA REPONSE HYDROLOGIQUE D'UN BASSIN VERSANT. 29
I.2.3. LES TRANSFERTS D'ELEMENTS. 30
a). La conductivité. 30
b). Les nutriments. 30
I.2.4. FLUX ET EXPORTATIONS A L'EXUTOIRE DU BV : ORDRES DE GRANDEUR 31

II. LE SITE D'ETUDE : LE BASSIN VERSANT DU MERCUBE 33

II.1. LE BASSIN VERSANT DU MERCUBE DANS SON COMPLEXE 33
II.1.1. DESCRIPTION TOPOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT. 33
II.1.2. GEOLOGIE ET PEDOLOGIE. 34
II.1.3. UN RESEAU HYDROGRAPHIQUE EN PLEINE EVOLUTION. 36
II.1.4. L'OCCUPATION DES SOLS. (FIGURE 14) 36

II.1.5 . CLIMATOLOGIE ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN. 37
II.3. PÉRIODE D'ÉTUDE, INVENTAIRE DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES & MÉTROLOGIE DU MERCUBE. 38
II.3.1. LES HAUTEURS D'EAU DU MERCUBE 38
II.3.2. LES ANALYSES CHIMIQUES. 40
II.3.3. LA METEOROLOGIE. 40
II.3.4. LES DEBITS A L'ECHELLE REGIONALE. 41

PARTIE 3 : MÉTHODOLOGIE 42

I. LA TRADUCTION DES HAUTEURS D'EAU EN DÉBITS :UN TRAVAIL PRÉALABLE & INDISPENSABLE. 43

I.1. RAPPELS : CONTEXTE, DONNÉES & METROLOGIE SUR LE BV DU MERCUBE. 43
I.2. LES COURBES DE TARAGE OU D'ÉTALONNAGE. 43
I.2.1. DEFINITION 43
I.2.2. TABLE DES RELATIONS HAUTEUR-DEBIT. (CF. TABLE 2) 44
I.2.3. COURBES DE TARAGE ISSUES DE LA TABLE DES RELATIONS HAUTEUR-DEBIT. 44
I.3. LE CHOIX DE LA COURBE DE TARAGE. 46
I.3.1. LE CYCLE HYDROLOGIQUE. 46
a). Définition et composantes. 46
b). Le bilan hydrologique. 46
I.3.2. COMPARAISON DES DEBITS THEORIQUES ET DES DEBITS MESURES : APPRECIATION PAR LA METHODE DES MOINDRES CARRES. 47
I.3.3. COMPARAISON DES LAMES D'EAU ANNUELLES ECOULEES SUR LE MERCUBE AVEC CELLES DES AUTRES BASSINS VERSANTS DE LA REGION PROCHE. 47
a). Définition. 47
b). Les bassins versants du Foron et du Redon. 47
I.5. ÉVALUATION DU DÉBIT DU TUYAU. 48
I.6. TRADUCTION DES HAUTEURS EN DEBITS A L'AIDE DU LOGICIEL HYDRACCESS© 49
I.5.1 PRESENTATION DU LOGICIEL ET DE SES FONCTIONNALITES. 49
I.5.2 EXEMPLE D'UNE CHRONIQUE DE DEBITS. 49

II. ÉTUDE DE LA STATIONNARITÉ DES DONNÉES HYDROLOGIQUES _ MÉTHODES GRAPHIQUES _ 50

II.1. TECHNIQUES DE DÉTECTION DES RUPTURES D'HOMOGENEITE. 50
II.1.1. LA METHODE DU SIMPLE CUMUL. 50
II.1.2. LE DOUBLE CUMUL. 50
II.1.3. LA METHODE DU CUMUL DES RESIDUS. 51

III. ÉTUDE DE LA STATIONNARITÉ DES DONNÉES HYDROLOGIQUES _ MÉTHODES STATISTIQUES _ 52

III.1. CHOIX DES OUTILS STATISTIQUES: TESTS PARAMETRIQUES CONTRE TESTS NON PARAMETRIQUES. 52
III.1.1. LOI DE DISTRIBUTION DE LA VARIABLE ALEATOIRE X. 52
III.1.2. LA DISTRIBUTION DE X NE SUIT PAS UNE LOI NORMALE. 53
a). Transformation des données en vue d'obtenir une distribution normale. 53
b). Le postulat de Normalité est objectivement une mauvaise approximation 53
III.1.3. LA DISTRIBUTION DE X SUIT UNE LOI NORMALE OU ON POSTULE QU'ELLE EN SUIT UNE. 53
III.2. THEORIE DES TESTS STATISTIQUES DE COMPARAISON 54

III.2.1. LES TESTS PARAMETRIQUES. 54
a). Test de comparaison des variances : Fisher ou Test F 54
b). Tests de comparaison des moyennes 54
c). Test de comparaison des distributions 55
III.2.2. TESTS NON PARAMETRIQUES POUR 2 ECHANTILLONS INDEPENDANTS. 55
a). Comparaison de la position : Test de la médiane. 55
b). Test de Mann-Whitney-Wilcoxon : Test de position. 56
c). Test de Van Der Waerden pour 2 échantillons ou plus: test de position de distribution 56
d). Test de Kruskal-Wallis : test de position. 57
e). Test d'identité de deux distributions : Test de Kolmogorov-Smirnov. 57
III.3. LA RÉGRESSION LINEAIRE SIMPLE. 58
III.3.1. PRINCIPE 58
III.3.2. MODELES ET ESTIMATION DES PARAMETRES. 58
III.3.3. TEST DES PARAMETRES : COEFFICIENT DE REGRESSION (B) ET CONSTANTE (A). 58
III.3.4. DECOMPOSITION DE LA VARIABILITE. 59
III.4. PRÉSENTATION DU LOGICIEL JMP. 59

PARTIE 4 :RESULTATS COMMENTES 60

I. VÉRIFICATION, AJUSTEMENT ET VALIDATION DES DÉBITS. 61

I.1. CHOIX DE LA COURBE DE TARAGE : COMPARAISON DES DÉBITS CALCULÉS À L'AIDE DU BILAN HYDROLOGIQUE AVEC CEUX MESURÉS SUR LE MERCUBE. 61
I.1.1. REPRESENTATION GRAPHIQUE. 61
I.1.2. ÉVALUATION PAR LA METHODE DES MOINDRES CARRES ET CONCLUSION. 62
I.2. APPRÉCIATION DES DÉBITS: COMPARAISON LAMES D'EAU ÉCOULÉES SUR LE MERCUBE AVEC CELLES DES AUTRES BASSINS VERSANTS. 62
I.2.1. EVOLUTION DES LAMES D'EAU ANNUELLES. 62
I.3. DISCUSSION. 63

II. ÉTUDE DES PRÉCIPITATIONS. 65

II.1. ÉTUDE GRAPHIQUE DE LA STATIONNARITÉ DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES: LA MÉTHODE DU SIMPLE CUMUL. 65
II.1.1. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES PRECIPITATIONS CUMULEES. (GRAPH 5.) 65
II.1.2. COMMENTAIRES. 65
II.2. ANALYSE DES PRÉCIPITATIONS PAR LES OUTILS STATISTIQUES. 66
II.2.1. ETUDE DE LA DISTRIBUTION. 66
a) Echelle annuelle. 66
b). Echelle journalière. 67

PLANCHE 3 : TRANSFORMATION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES. 68

II.2.2. TESTS DE COMPARAISON D'ECHANTILLONS INDEPENDANTS. 69
II.3 COMMENTAIRES ET DISCUSSION. 72
II.3.1. LA REPRESENTATIVITE DES PLUIES DU MERCUBE. 72
II.3.2. LE SIMPLE CUMUL. 72
II.3.3. LES TESTS STATISTIQUES. 72

III. ÉTUDE DE LA STATIONNARITÉ DES DÉBITS (1) -LE CHANGEMENT DE SEUIL- 73

III.1. COMPARAISON DES DÉBITS DU MERCUBE AVEC UNE STATION DE RÉFÉRENCE. 73
III.1.1. COMPARAISON PAR LA METHODE DES DOUBLES CUMULS. 73
III.1.2. ETUDE PAR LA METHODE DU CUMUL DES RESIDUS. 74
a) Régression linéaire : estimation des débits journaliers du Mercube par ceux du Foron, tests du modèle et des paramètres. 74
b) Représentation graphique du cumul des résidus et du test de l'ellipse. 75
III.1.3. RECHERCHE DU TYPE D'ANOMALIE. 76
a). Etude globale des modèles. 76
b). Comparaison des coefficients de la régression linéaire. 77
c). Comparaison des constantes. 77
III.2. CONCLUSIONS ET DISCUSSION. 78
III.2.1. RESULTATS ET RESILIENCE DU SYSTEME. 78
III.2.2. POINT DE VUE CRITIQUE QUANT AUX METHODES ET OUTILS EMPLOYES. 78
a). La méthode du double cumul. 79
b). Le cumul des résidus de Blois. 79

IV. CORRECTION DES DÉBITS DU MERCUBE. 80

IV.2. MÉTHODE GRAPHIQUE DES DOUBLES CUMULS MERCUBE/FORON. 80
IV.2.1. RAPPELS : DOUBLES CUMULS. 80
IV.2.2. DOUBLES CUMULS MERCUBE/FORON DECOMPOSES EN 2 PERIODES. 80
IV.2. CORRECTION, VÉRIFICATION & COMMENTAIRES 81
IV. 1. AJUSTEMENT DES DEBITS DU MERCUBE. 81
IV.2. EVALUATION DE LA CORRECTION APPORTEE AUX DEBITS JOURNALIERS DU MERCUBE PAR LA METHODE DU CUMUL DES RESIDUS DE BOIS. 81

V. ÉTUDE DE LA STATIONNARITÉ DES DÉBITS (2) -LA SÉCHERESSE DE 2003- 85

V.1. ÉTUDE DES DEBITS JOURNALIERS. 85
IV.1.1. RAPPELS SUR LES VARIABLES D'ENTREE ET DE SORTIE DU SYSTEME. 85
V.1.2. COMPARAISON DES DEBITS JOURNALIERS « AVANT » / « APRES » SECHERESSE DE 2003 : METHODES GRAPHIQUES. 86
a) Représentation graphique des débits journaliers du Mercube . (Figure 34) 86
b) Débits journaliers du Foron : graphique (figure 35) 87
c) Graphique des débits journaliers du Redon. (figure 36) 87
V.1.3. COMPARAISON DES DEBITS JOURNALIERS « AVANT » / « APRES » SECHERESSE DE 2003 : METHODES STATISTIQUES. 88
a) Bassin versant du Mercube 88
b) Les Bassins versants du Foron et du Redon. 89
V.1.4. EVOLUTION COMPAREE DES DEBITS JOURNALIERS « AVANT » VS « APRES » SECHERESSE 90
a) Etude des débits moyens. 90
b) Variance des débits. 91
V.2. CONCLUSIONS ET COMMENTAIRES. 91

PARTIE 5 : CONCLUSION GÉNÉRALE, BILAN ET PERSPECTIVES 93

ANNEXES 95

ANNEXE 1 : ETP, ETR & COEFFICIENT CULTURAL KC **1**

ANNEXE 2 : TRANSFORMATION DES VARIABLES ET TESTS STATISTIQUES **99**

ANNEXE 3 : TESTS DE COMPARAISON : AVANT SECHERESSE 2003 VS ANNEES 2006 & 2007 **100**

BIBLIOGRAPHIE 104
LIVRES ET OUVRAGES DE REFERENCE. **105**
SUPPORTS DE COURS, THESES ET MEMOIRES **105**
ARTICLES ET PUBLICATIONS **105**
DOCUMENTS SUR INTERNET & SITES. **106**

PARTIE 1 : PRÉSENTATION GÉNÉRALE

I. PRÉSENTATION DE L'INRA.

I.1. L'INRA EN GENERAL.

● Créé en 1946, l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) est devenu en 1984 un Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique (EPST), placé sous la double tutelle des ministères de la Recherche et de l'Agriculture.
Il avait alors pour mission **« l'organisation, l'exécution et la publication de tous travaux de recherche sur l'amélioration et le développement des productions végétales et animales ainsi que la conservation et la transformation des produits agricoles »**.

Les activités de recherche de l'INRA, aujourd'hui considérablement élargies, s'appliquent essentiellement aux trois domaines que sont, l'agriculture, l'agro-industrie et l'environnement. Ces activités se concentrent sur trois grands axes : connaître le vivant, adapter l'agriculture et maîtriser la qualité alimentaire, toujours dans une perspective de développement durable.
En dehors des activités scientifiques et d'innovation s'adaptant constamment aux demandes de la société, l'INRA a aussi comme missions, la diffusion des connaissances, et la contribution à l'expertise, à la formation et à la promotion de la culture scientifique et technique.

● L'INRA s'insère dans l'ensemble du dispositif de recherche publique en multipliant les collaborations scientifiques avec ses homologues et en prenant part aux différents programmes inter-organismes initiés au plan national.

Ses principaux partenaires étant les Ecoles Nationales Supérieures Agronomiques et Agroalimentaires, les universités, le CNRS (Centre National pour la Recherche Scientifique), l'INSERM (Institut National de la Santé et de la Recherche Médical), le Cemagref (Recherche pour l'Ingénierie de l'agriculture et de l'environnement), l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique), l'IFREMER (Institut Français de la Recherche et de l'Exploitation de la Mer) …
Par ailleurs, il mène une politique de plus en plus active d'échanges et de coopérations avec la communauté scientifique mondiale. Ces relations étroites avec les entreprises agricoles et industrielles, les organismes professionnels et les centres techniques des différents pays et régions, contribuent à un transfert rapide des connaissances et des innovations, et en amont des recherches, à une prise en compte de la demande socio-économique.

● Avec 14 départements, 250 unités de recherche, 20 centres régionaux, ainsi que 80 unités expérimentales et plate-formes technologiques ; l'INRA est le 1er centre de recherche agronomique d'Europe et le 2ème à l'échelle mondiale.
L'INRA mobilise 1828 chercheurs, 2427 ingénieurs, 4249 techniciens et administratifs, 1784 doctorants, 1000 chercheurs étrangers et 1901 stagiaires accueillis chaque année dans les laboratoires.
En 2003 le budget de l'Institut était de 573 millions d'euros, il est de 800,5 M € en 2007.

L'organigramme général est présenté sur la planche 1

PLANCHE 1 :

ORGANIGRAMME GENERAL DE LA STATION D'HYDROBIOLOGIE LACUSTRE DE THONON LES BAINS.

DIRECTION

Directeur : J.M. Dorioz
Directeur Adjoint : Jean Guillard

SERVICES COMMUNS

SECRETARIAT COMPTABILITE
Delalex Eric
Hamelet Valérie

MAINTENANCE
Chifflet Pascal

BIBLIOTHEQUE
Mottin Véronique

LABORATOIRE DE PHYSICO-CHIMIE

J. Lazzarotto IE, responsable du labo
Lacroix D.(TR),
Perney P.(TR),
Hebert A. (TR)

LABORATOIRE BIODIVERSITE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE

Bouchez Agnès (CR),
Rimet Frédéric (IE).
Responsables labo
Druart Jean-Claude IE
Le Berre-Trévisan Brigitte (AI),
Lainé Leslie (TR)

SERVICE DES PRELEVEMENTS

SERVICE INFORMATIQUE
Ghislaine Monet

3 EQUIPES DE RECHERCHE

Equipe BV :
Bassin Versant et transferts de sédiments

Dirigée par J.M. Dorioz

Actions :

Ressources en eau et transfert de nutriments et de germes pathogènes du bassin versant agricole à l'écosystème aquatique.

Dominique Trévisan (IR, responsable équipe)
Denis Barbet (IE)
Pierre Faivre (Prof),
Jérôme Poulenard (MC),
Louis Trosset (MC),
Philippe Quetin (IE),
Jean-Paul Moille(TR)
Laurent Espinat (TR).

Equipe BioFEEL
Biodiversité, Fonctionnement et Evolution des Ecosystèmes Lacustres

Dirigée par J.F. Humbert

Actions:

Les micro-algues d'eau douce bio-indicateurs de pollutions par les toxiques. Dynamique et génétique des cyanobactéries toxiques

Domaizon Isabelle (MC, responsable équipe)
Jacquet Stefan (CR, HDR)
Perga Marie-Elodie (CR)
Tadonléké Rémy (CR)

Equipe RITOXE :
Ressources Ichtyologiques et écoTOXicologie des Ecosystèmes lacustres

Dirigée par C. Gillet

Actions :

Facteurs de productivité piscicole en lacs : étude des relations trophiques zooplancton poisson, apport de la boucle microbienne, dynamique du recrutement larvaire. Fonctionnement, réhabilitation et gestion des ressources piscicoles en écosystèmes alpins. Biologie, dynamique et impacts de populations de la macrofaune benthique.

Agnès Bouchez (CR, responsable équipe)
Orlane Anneville (CR),
Alexis Champigneulle (IR),
Jean-Paul Dubois (CR),
Dominique Fontvieille (Prof),
Daniel Gerdeaux (DR),
Christian Gillet (CR),
Jean Guillard (IR),
Michel Colon (AI),
Valérie Hamelet (TR)
Pascal Perney (TR)

Abréviations utilisées :
IR : Ingénieur de Recherche
IE : Ingénieur d'Etude
CR : Chargé de Recherche
DR : Directeur de Recherche
AI : Assistant Ingénieur
MC : Maitre de Conférences
TR : Technicien Recherche
Prof : Professeur

I.2. LA STATION D'HYDROBIOLOGIE LACUSTRE: UNITE MIXTE DE RECHERCHE.

● En 1964, l'INRA reprend la Station de Recherches Lacustres qui dépendait des Eaux et Forêts depuis 1884. Apres de nombreux remaniements de direction et de locaux, la station est aujourd'hui dirigée par Jean-Marcel Darioz et rattachée administrativement au centre INRA de Dijon.

● La Station d'Hydrobiologie Lacustre de Thonon-les-Bains, située en bord de lac, travaille essentiellement sur l'écologie des lacs subalpins.
Ses thèmes de recherche ont d'abord été focalisés sur les conséquences de l'eutrophisation sur l'écosystème lacustre. Puis au début des années 1980, afin de répondre à la demande sociale, cette thématique a été élargie aux transferts de phosphore dans les bassins versants ainsi qu'à la dynamique des populations de poissons.
En 1998, un dernier groupe s'est structuré autour de l'écotoxicologie des microorganismes photosynthétiques et de l'étude des proliférations des cyanobactéries.
Depuis 1999, la station est une Unité Mixte de Recherche par association avec les laboratoires de microbiologie aquatique et de Sciences du sol de l'Université de Savoie.
Aujourd'hui, le centre de ses recherches est l'étude du fonctionnement et de l'évolution des systèmes lacustres en relation avec leurs bassins versants.
Les travaux sont conduits dans une perspective de **l'aide à la décision en matière de gestion des ressources naturelles que sont les grand Lacs** et avec **la volonté de se placer au cœur des grands débats scientifiques actuels.**

● Le CARRTEL (Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes limniques) comprend 45 personnes permanentes et une quinzaine de personnes en doctorat, séjours post-doctoraux et stages de recherche. Il dispose d'un laboratoire d'analyses chimiques de l'eau agréé, d'un laboratoire de microbiologie, d'une pisciculture expérimentale, de matériels de mesures et de prélèvements de terrain et de matériels d'analyses biologiques des échantillons et de marquage de poissons. L'UMR bénéficie aussi des services analytiques communs de l'Université, en particulier pour la caractérisation physique des sédiments et matières en suspension.
Le budget de la Station pour l'année 2002 était de 523307,67 euros. Les ressources proviennent du Ministère de Recherche (30%), des activités de l'INRA (36%) (prestations de services, vente) et 34% des contrats de recherche. Les dépenses ont été distribuées cette année de la façon suivante: 64% en dotations globales (part des chercheurs , entretient), 21,7% en investissements (équipement sur contrat, immobilier) et 14 ,3% en fonctionnement (personnel).

I.3. L'EQUIPE BV : BASSINS VERSANTS & TRANSFERTS DE SEDIMENTS.

● Mon stage s'est déroulé au sein de l'équipe BV, dirigée par ***Jean-Marcel Dorioz*** également directeur de la station depuis 2002.
Elle est composée de ***Dominique Trévisan***, ingénieur de recherche et responsable de l'équipe, de ***Denis Barbet***, mon maitre de stage, et également ingénieur, ainsi que de ***Philippe Quétin*** ingénieur d'étude.
Deux techniciens se joignent à l'équipe BV : ***Jean-Paul Moille*** et ***Laurent Espinat*** ; de même que les enseignants-chercheurs et professeurs du laboratoire de Sciences des Sols et

d'Hydrologie de l'Université de Savoie à savoir, ***Pierre Faivre*** (Professeur), ***Jérôme Poulenard*** (Maître de Conférences) et ***Louis Trosset*** (également M.C.).
●Tout le travail d'analyses chimiques a été réalisé au sein du plateau technique d'analyses physico-chimiques de l'unité dont le responsable est ***Jérôme Lazzarotto***, ingénieur d'étude. Quatre techniciens et plusieurs stagiaires participent au fonctionnement du laboratoire, orienté sur l'analyse minérale des eaux naturelles ainsi que sur l'analyse minérale des matières solides (sédiments et sols).
Le plateau technique est engagé dans une démarche qualité selon le référentiel INRA, ce qui permet d'assurer la fiabilité des résultats émis.

I.3.1. Les Missions de l'équipe BV:

Depuis la création de la Station, la première préoccupation des chercheurs a été le phénomène de l'eutrophisation du lac. Ils ont étudié les effets dans le plan d'eau mais aussi les causes sur le bassin versant. Le but étant de mieux gérer les bassins versants ruraux de manière à limiter leurs pertes en substances capables de détériorer la qualité des eaux de surface.
Les recherches sont articulées autour de bassins de grand lacs diversifiés en termes de taille et de mode d'occupation de sol, et sont organisées en 3 axes complémentaires :

→ L'étude des régimes d'exportation du phosphore et l'usage des bassins.
Ce thème centré sur le phosphore s'intéresse aux possibilités de traçage des origines de celui-ci, pour développer les connaissances sur les relations Bassin versant-lac.

→ L'Analyse et la caractérisation des systèmes de transfert à l'échelle bassin versant.
Il s'agit d'aborder en les comparant, les mécanismes de transfert de divers composés (nutriments, matières particulaires, germes fécaux…), ceci dans le but de contribuer à la modélisation des bassins versants.

→ Les Recherches opérationnelles sur la pollution diffuse.
Il convient ici de mettre en place des projets pilotes de restauration de la qualité des eaux dans les bassins versants (contribution à l'ingénierie environnementale).

<table>
<tr><td rowspan="2">Régimes d'exportation du Phosphore et anthropisation des bassins</td><td>Bassins versants de grands lacs
Suivis de longue durée des dynamiques d'exportation du Phosphore</td><td>Tête de bassin versant
Relations Profils sédimentaires – érosion –phosphore - pédogénèse et usage des sols en montagne.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Analyse et caractérisation des systèmes de transfert Bassin versant - lac</td><td rowspan="2">Dynamiques comparées du P et des nutriments (N, COD,…)</td><td>Origine des matières en suspension et des matières organiques transférables ; relations avec le P particulaire</td></tr>
<tr><td>Dynamique et transfert des contaminants fécaux</td></tr>
<tr><td colspan="2">Modélisation spatialisée des transferts de contaminants</td></tr>
<tr><td>Ingénierie environnementale</td><td>Bilans, origine et déterminismes des pollutions</td><td>Effet de l'application de bonnes pratiques agricoles à l'échelle du bassin versant</td></tr>
</table>

Figure 1 : Les échelles d'investigation de l'équipe bassin versant
(d'Apres G. Monet, INRA, 2007)

I.3.2. Les Projets de l'équipe:

a). Traçage de l'origine des sédiments et conséquences sur les propriétés du P (Phosphore) particulaire.

× Ce projet, mis en place depuis 2006 sur bassin versant de l'Albenche, bassin de 900 ha à proximité du lac du Bourget, est mené en association avec l'université de Savoie et le CNRS. Il est prévu jusqu'à 2009 et coordonné par Jérôme Poulenard.

× L'objectif est de mettre au point des méthodes spectroscopiques (visibles et infra-rouges) de reconnaissance de l'origine des sédiments et des matières en suspension. Ceci afin d'établir des relations entre l'origine et les propriétés du P particulaire exporté.

× En effet, dans les pays développés, les politiques de contrôle des flux de P ont d'abord porté sur le P d'origine ponctuelle (rejets d'eaux usées). Elles ont conduit à une très large diminution des flux de P-dissous.
En revanche, les flux de P associés à la phase particulaire en suspension (MES), fraction en général dominante du P-total et dont l'origine est principalement diffuse (ruissellement et érosion des sols), demeurent élevés.

L'impact de ces transferts particulaires sur l'eutrophisation des systèmes aquatiques (cours d'eau, lacs…) est un phénomène complexe qui dépend **(i)** du devenir des suspensions (transfert rapide, sédimentation, remise en suspension) et **(ii)** de certaines propriétés biogéochimiques des MES, en particulier de leur aptitude à céder ou à fixer des ions phosphates (pouvoir fixateur des sédiments) ainsi que **(iii)** de leur biodisponibilité en P.
Or, ces propriétés des MES sont très liées à la nature, à l'usage des sols dont elles sont issues, à la charge en P résultante ainsi qu'à l'histoire de leur transfert en relation avec les conditions hydrologiques.

× L'origine et la dynamique des MES s'avèrent des éléments clés pour rendre compte des comportements et de l'impact du P particulaire dans les écosystèmes récepteurs. Or l'origine des MES est souvent mal connue, en particulier pour les bassins versants dominés par des prairies, où les marques d'érosion sont peu visibles dans le paysage. On souffre en effet d'un déficit de méthodes pour reconnaître l'origine des sédiments.

b). Transferts de contaminants fécaux et qualité microbiologique des eaux à l'échelle du bassin versant.

× Ce projet a été mis en place en 2005, sur le bassin versant des Cornettes de Bise (Haute-Savoie). il est coordonné par Dominique Trévisan en partenariat avec l'UMR (Université de Lyon/CNRS) d'écologie microbienne du sol ainsi que l'INRA et l'ENSA de Rennes.

× Les objectifs de ce programme sont ***(i)*** d'apporter des connaissances sur le comportement environnemental des bactéries fécales (Escherichia coli, Ec) introduites par les activités pastorales et d'analyser leur devenir en termes de survie et d'aptitude au transfert dans les différents niveaux d'organisation du bassin versant ; ***(ii)*** de mettre en perspective ces connaissances pour rendre compte des niveaux de contamination des eaux à l'exutoire du bassin versant ; d'en déduire des éléments d'évaluation du risque et d'identification des périodes et zones sensibles ; et enfin ***(iii)*** de dégager des modèles relatifs au transfert des

contaminants dans un objectif d'analyse des relations bassin versant – milieux aquatiques récepteurs.

× En effet, les contaminations microbiologiques des eaux de surface sont une problématique mondiale pour la santé humaine et animale. Dans les Alpes, elles sont d'une ampleur particulière du fait de la rapidité des transferts d'eau et de la forte connexion amont-aval. Elles compromettent un certain nombre d'activités et d'usages de l'eau, notamment l'alimentation en eau potable, la baignade en lac, les sports d'eaux vives en rivière, l'industrie agroalimentaire et l'élevage.

L'agriculture est souvent incriminée, car il est constaté une dégradation de la qualité de l'eau lors des périodes d'épandage des effluents d'élevage ou après la mise en pâture des troupeaux. Dans ce contexte, il se pose la question de l'origine des micro-organismes, des périodes sensibles, des zones contributives et finalement des alternatives correctives.

II. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU STAGE

Le bassin versant est une notion essentielle et incontournable en hydrologie de surface.
Il constitue, en effet, l'unité fondamentale pour toute étude, qu'elle soit d'ordre fonctionnel, technique, prévisionnel, ou encore écologique.
La définition-même du bassin versant est complexe, bien plus qu'elle ne peut le paraître en prime abord. En effet, il n'en existe pas d'universelle, chacune étant plus ou moins relative au domaine d'application ou à l'objet d'étude.
→ Ainsi, on appelle bassin versant ou bassin de drainage d'une rivière, l'ensemble des points qui alimentent en eau un même exutoire. Il s'agit donc d'une unité territoriale et fonctionnelle composée de différents compartiments entre lesquels l'eau s'écoule *(Noirot, 1998).*
→ D'un point de vue purement topographique, le bassin versant correspond à une zone délimitée par des lignes de crête (ou lignes de partage) et dont les eaux alimentent un exutoire commun ; une manière plus pragmatique de le définir consiste à le faire par ses limites souterraines, limites qui ne sont pas nécessairement les mêmes que celles des eaux de surface.
Cette distinction, qui nous permet d'introduire la notion de <u>bassin versant topographique</u> et de <u>bassin versant réel,</u> témoigne de la difficulté et de la complexité avec lesquelles il convient de définir le système.
→ En 1962, *Roche* définit le bassin versant comme « un collecteur chargé de recueillir les pluies et de les transformer en écoulement à l'exutoire. Cette transformation s'accompagne de pertes en eau qui dépendent des conditions climatologiques régnant sur le bassin, de ses caractéristiques physiques (taille, pente, orientation, types de sols, couvert végétal…), et des caractéristiques du réseau hydrographique »
→ La représentation de l'*objet bassin versant* en tant que « système de transfert » de la pollution traite souvent le bassin comme un ensemble qui « produit, consomme, transforme, stocke, en bref « métabolise » avant de transférer, en différé, à l'exutoire ». *(Cassell A., Kort R., Dorioz J.M., 2002)*

Connaître et comprendre le fonctionnement d'un bassin versant, requière une étude minutieuse de sa topographie, de sa géomorphologie, de son hydrologie, de l'occupation de son espace, ainsi que de tous les autres paramètres physicochimiques qui le caractérisent.
Chaque bassin versant est unique, à replacer dans son contexte spatial, géographique et historique, aucun ne fonctionnant à l'identique tant les éléments à considérer sont nombreux variables et changeants avec le temps. L'anthropisation et ses effets, étant sans doutes un des paramètres les plus difficile à évaluer, il convient de s'y attarder davantage.
Si comme nous venons de le dire, il n'y a pas de bassin versant idéal ou modèle, il n'existe pas moins quelques modes de fonctionnement, mécanismes et grands principes, applicables à tout bassin versant, tels que les modes d'écoulements, les phénomènes d'infiltration et de transferts de matières….
C'est également dans cette optique que l'INRA de Thonon-les-Bains étudie les bassins versants, dans le but de comprendre et de modéliser le fonctionnement des bassins et cours d'eau qui s'y rapportent.

Depuis 1992, l'INRA observe à titre expérimental le bassin versant du Mercube, situé à proximité de la station de Thonon-les-Bains. De nombreuses données hydrologiques et physiquo-chimiques ont ainsi été récoltées depuis plus de 17 ans et ont servi à plusieurs études, telles que la thèse de Lionel Jordan-Meille en 1998, sur les modes de transferts du

phosphore d'origine diffuse ; ou encore le projet SWAT, mené en 2004 par Julien Renaud visant la modélisation des transferts de phosphore dans le bassin.
En effet, le bassin versant du Mercube présente des caractéristiques avantageuses pour de nombreuses études : il a une taille optimale car assez grand pour permettre une diversité des modes d'occupation des sols, et suffisamment petit pour avoir une pluviométrie homogène et être étudié de façon détaillée. De plus, l'assainissement sur le bassin est quasi-total, l'inventaire des rejets montre que la pollution ponctuelle (domestique et industrielle) est négligeable, ce qui permet d'étudier les transferts uniquement liés à la nature du bassin.

Ces 20 dernières années, le bassin a subi des modifications susceptibles d'entrainer des variations du régime hydrologique du cours d'eau. En effet, le drainage des terrains agricoles, l'intensification de la production, ou encore l'urbanisation sont connus pour avoir des conséquences sur les débits en période de crue, le raccourcissement des temps de transfert des eaux, ou encore la déstabilisation des berges du cours d'eau.
Il est dès lors important de vérifier si ces modifications ont eu un impact sur le régime du bassin, afin d'identifier les causes et les mécanismes et d'en mesurer les effets.
Ceci dans le but de mettre en place, dans la mesure du possible, des dispositions adéquates et d'en évaluer les résultats.
La question de la résilience du système se pose dans la mesure où un événement important dans l'histoire du Mercube a eu lieu en novembre 2002. En effet, suite à une crue exceptionnelle, le matériel de mesure a été emporté, et un autre limnigraphe a du être installé quelques mois plus tard sur un nouveau site d'études.
Par ailleurs, cette même année 2003, nous avons subi une grande sécheresse dont on suppose les effets sur le fonctionnement hydrologique, se pose alors la même question sur la résilience du système suite à cette perturbation.

C'est dans ce contexte, que mon stage au sein de l'unité *Bassin Versant* du CARRTEL, s'est inscrit. Contexte, indispensable à intégrer dans ma démarche de travail afin d'élaborer un projet rationnel et pertinent, dans la continuité de tous les travaux effectués précédemment.
Mon travail, s'échelonnant sur quatre mois, a été guidé par plusieurs questions majeures, auxquelles j'ai fait allusion précédemment.

→ L'objectif à terme, est d'évaluer dans quelle mesure les modifications du Mercube sont susceptibles d'impacter ses réponses hydrologiques :

- En effet, suite au changement du site de mesure en 2003, peut-on considérer que les débits mesurés restent stables et cohérents sur la toute la période?
- Il y a t il eu des conséquences sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant, imputables à la grande sécheresse de 2003, qui soient encore mesurables aujourd'hui?

La théorie des systèmes, et notamment le principe d'homéostasie, qui stipule que *« tout système a tendance à maintenir un équilibre de fonctionnement »*, nous éclaire sur la façon dont on doit procéder, à savoir, vérifier l'homogénéité et la stationnarité des séries chronologiques, et s'assurer que des perturbations, d'ordre météorologiques, physiques, ou autres, n'ont pas modifié l'état d'équilibre du bassin versant.
En effet lors d'une trop forte perturbation extérieure qui mène à la rupture de l'équilibre du système, celui-ci se réorganise et évolue pour rentrer dans un nouvel état d'équilibre. La **figure 2** illustre bien ces changements d'états.

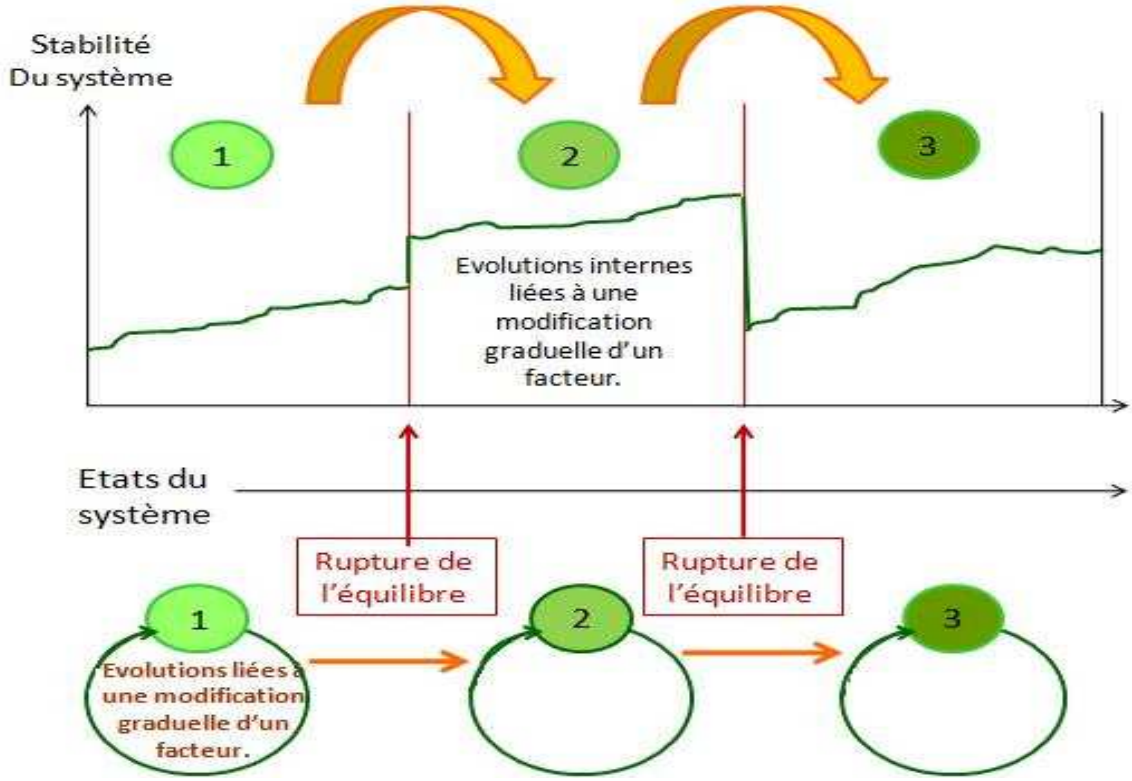


Figure 2 : Théorie des systèmes et états d'équilibre.

Ceci dit, toute analyse, toute étude, tant qualitative que quantitative, repose sur l'utilisation de données nécessairement valides et fiables.
Le travail indispensable et préalable à tout projet consiste donc à vérifier et valider les données afin de constituer une base sûre, complète et exploitable.

→ Dans un premier temps, il m'a donc fallu prendre connaissance, rechercher et ordonner les données relatives au Mercube, puis traduire les hauteurs d'eau en débits sur toute la période d'étude.
La vérification et la validation de ces nouvelles données, se sont appuyées sur un travail global à l'échelle du bassin versant (bilans hydriques, comparaisons de lames d'eau…), ainsi que sur des outils graphiques et mathématiques nécessitant de nombreuses recherches bibliographiques.

→ Comme annoncé précédemment, j'ai étudié dans un deuxième temps, l'homogénéité des chroniques de données, pluies et débits, sur toute la période d'étude du Mercube (de 1993 à 2007).
Dans le cas de rupture de stationnarité, j'ai tenté d'identifier, les causes les plus probables de ce changement de réponse hydrologique du système, puis apporté les corrections qu'il était possible de faire.
Ce travail repose également sur de nombreuses méthodes appliquées à l'hydrologie ; méthodes tant comparatives, que mathématiques ou statistiques qui mériteront une description détaillée dans une partie de *méthodologie.*

Le sujet du prochain chapitre sera la présentation plus précise et conceptuelle de ma démarche de travail, incluant, comme il se doit, les différentes hypothèses, ainsi que les tests et expérimentations réalisés en vue d'apporter des réponses à mes questions.

Dans une 4 ème partie, je présenterai mes résultats, leur interprétation et leur discussion.
J'y intégrerai également les commentaires relatifs aux méthodes utilisées, ainsi que l'apport d'éventuelles améliorations des moyens d'investigation.

Enfin, la dernière partie sera l'objet de la conclusion générale, du bilan et des perspectives de travail à envisager. J'essaierai de me replonger dans le contexte d'étude pour évaluer dans quelle mesure mon travail s'est finalement inscrit dans le projet commun de l'INRA.

III. HYPOTHESES ET DEMARCHE DE TRAVAIL.

Maintenant que nous avons exposé dans quel projet commun mon stage s'inscrivait, et quelles étaient les grandes interrogations auxquelles il convenait de répondre, nous pouvons introduire la démarche scientifique dans son ensemble.

III.1. LA DÉMARCHE SCIENTIFIQUE EN 6 ÉTAPES. (figure 3)

La démarche scientifique repose sur 6 grandes étapes qu'il convient de décrire brièvement.
A partir d'un constat, d'un contexte ou d'une observation, qui soulèvent un certain nombre de questions, nous en venons à formuler une/des hypothèse(s) qui tente(nt) de fournir une explication plausible à ces questions.
Une hypothèse de travail, comme son étymologie l'indique, n'est en rien un postulat, même si elle repose sur la connaissance de certains concepts, mécanismes ou relations entre différents phénomènes.
Nous tenterons donc par la suite de la/(les) confirmer, la/(les) infirmer, ou de la/(les) confronter, à l'aide de tests expérimentaux, d'arguments théoriques, également élaborés à partir de nos pré-requis scientifiques.
Cette expérimentation aboutit à de nouvelles observations, de nouveaux résultats, qui peuvent d'une part, nous permettre de valider ou non l'hypothèse initiale, et même conduire à l'élaboration de nouvelles hypothèses reposant sur ces dernières données.

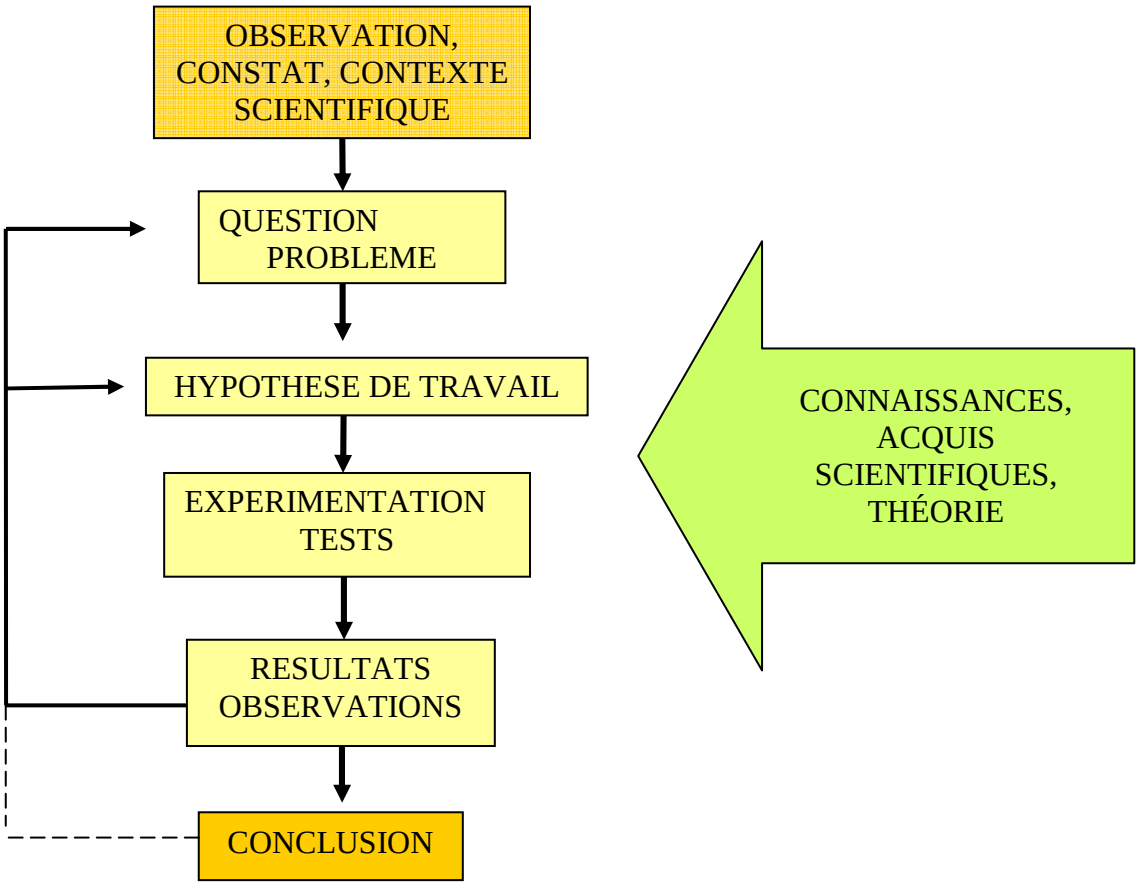


Figure 3 : schéma conceptuel de la démarche scientifique.

III.2. RAPPEL SUCCINCT DU CONTEXTE ET DES OBSERVATIONS (étape 1 de la démarche)

_ Le Mercube, bassin versant observé depuis 1993 par l'INRA : un jeu de données conséquent.
_ Des données météorologiques disponibles depuis 1951.
_ Des faits importants : changement de seuil de mesure des hauteurs d'eau en 2003, grande sécheresse cette même année, effondrement des berges en 2001, mauvaises mesures en 93.
_ Une évolution continuelle du bassin en adéquation avec l'urbanisation et autres besoins anthropiques.

III.3. RAPPEL DES QUESTIONS POSÉES AU PRÉALABLE (étape 2)

Les séries de données dont nous disposons, à savoir, les hauteurs d'eau, les débits, géochimie du Mercube: NO_3, conductivité, matières en suspension (MES), sont-elles homogènes et stationnaires sur la période d'étude (1993-2007) ?

(1) Les changements de seuil de mesure en 2003, a-t-il entrainé une modification dans l'enregistrement des débits?

(2) La sécheresse exceptionnelle de 2003 a-t-elle eu des répercussions sur la réponse hydrologique du bassin versant?

III.4. HYPOTHESES DE TRAVAIL (étape 3)

(1) Suite au déplacement du site, et au changement du limnigraphe en 2003, il est possible qu'un biais expérimental ait été introduit. En effet, les débits ne sont pas forcément mesurés avec la même sensibilité, de même que les hauteurs d'eau ne sont peut être pas traduites de la même manière, ceci étant par exemple attribuable à la géométrie de la section adjacente au seuil de mesure**.**

(2) La sécheresse de 2003 a pu modifier le régime d'écoulement du bassin versant ainsi que les transferts de matières et d'éléments solubles, de par l'épuisement considérable des réserves en eaux souterraines, ou encore par le remaniement important du réseau aquifère.

III.5. TESTS D'HYPOTHESES, EXPERIMENTATION (étape 4)

Les tests, outils et méthodes mis en œuvre pour tester les hypothèses sont synthétisés dans les 2 tableaux suivant **(tableaux 2 et 3)** pour plus de clarté et de lisibilité.

TRAVAIL PREALABLE	OBJECTIF	METHODES	OUTILS INFORMATIQUES
Recherche, organisation, formatage des données. Traduire les hauteurs d'eau du Mercube en débits	utiliser la courbe de tarage qui traduit le mieux les débits en s'approchant des Q theoriques	bilan hydrologique, methode des moindres carrés, comparaison des lames d'eau annuelles	Hydraccess; acces; (prethy), excell, Access

Tableau 1 : synthèse des tests et des méthodes utilisés pour atteindre les objectifs du travail à réaliser au préalable.

EVENEMENTS	HYPOTHESES		TESTS/ OBJECTIF	METHODES	OUTILS STATISTIQUES	OUTILS INFORMATIQUES
Changement de seuil et de limnigraphe suite à la crue de 2002	1	Changement dans la mesure des débits du Mercube, introduction d'un biais experimental	Comparaison des débits du Mercube, avant et après le changement de site.	Double et simple cumuls, cumul des résidus de Bois.	Comparaison de deux échantillons: μ, σ^2 et distributions, régression linéaire, IC	JMP, Hydraccess, excell, (Prethy)
Sécheresse de 2003	2	modifications du régime d'écoulement, des réponses hydrologiques dues entre autre à l'epuisement des nappes	Compaison des débits du Mercube et des bassins versants voisins : Foron et Redon avant et après la sécheresse de 2003.	évolution de la différence "ante 2003 "- 2004, puis ante 2003- 2005, ante 2003-2006 et enfin ante 2003- 2007, representation graphique	Comparaison de deux échantillons: μ, σ^2 et distributions	JMP, Hydraccess, excell (prethy)

Tableau 2 : synthèse des tests, méthodes et outils utilisés pour atteindre les objectifs conduisant à valider ou non les hypothèses de travail.

PARTIE 2 : LE SITE D'ÉTUDE

I. LE BASSIN VERSANT-GENERALITES.

Dans la présentation générale de mon stage et de ses objectifs, j'ai déjà mentionné les différentes définitions du bassin versant, définitions plus ou moins orientées selon l'objet d'étude ou domaine d'application.

I.1. LE BASSIN VERSANT COMME UNITE D'ETUDE.

I.1.1. Métrologie d'un bassin versant.

La métrologie est la science de la mesure au sens le plus large. La mesure étant l'opération qui consiste à donner une valeur à une observation, elle met donc en œuvre un certain nombre d'appareils, d'installation et d'équipement visant à enregistrer des variables et leurs donner une valeur.

▪ D'une manière générale, pour mesurer les flux d'eau sur une section de l'écoulement, on l'équipe d'un contrôle hydraulique stable (déversoirs rectangulaires ou trapézoïdaux lorsque les débits sont importants et triangulaires pour les plus faibles).
Pour relier hauteur d'eau mesurée en amont du déversoir au débit d'écoulement, il est nécessaire de réaliser une série de jaugeages qui sont effectués selon différentes méthodes (seau, moulinet, dilution) et conditions d'écoulement, ce qui permet de dresser une courbe de tarage.
On peut également, selon les propriétés et les caractéristiques de la section de mesure, s'appuyer sur des formules théoriques pour établir la relation hauteurs-débits et par conséquent la courbe d'étalonnage.

▪ Pour mesurer cette fois ci les flux de polluants et de nutriments, on équipe le bassin de préleveurs d'eau en continu dont l'extraction est faite par le vide. Ceci permet de purger les tuyaux de prélèvement et de réduire ainsi les risques de contaminations de l'échantillon. Les concentrations des différents éléments chimiques (Phosphore, Azote, Carbone et Chlorures) sont suivies à partir des échantillons prélevés automatiquement, puis stockées dans des enceintes réfrigérées avant analyse au laboratoire
D'autres paramètres de qualité peuvent être mesurés en continu, grâce à des sondes spécifiques (Conductivité, Matières en Suspension, Température).

I.2. FONCTIONNEMENT D'UN BASSIN VERSANT.

I.2.1. Les transferts d'eau dans les bassins versants.

a). Les écoulements.

On peut distinguer quatre types classiques d'écoulements. **(figure 5)**

(i) Le ruissellement de type hortonien :
Il se produit lorsque la capacité limite d'infiltration de l'eau est dépassée. C'est le type de ruissellement que l'on trouve sur les zones imperméabilisées urbaines mais aussi sur des

sols de faible conductivité hydraulique quand les intensités des pluies sont telles que la capacité d'infiltration du sol est dépassée.

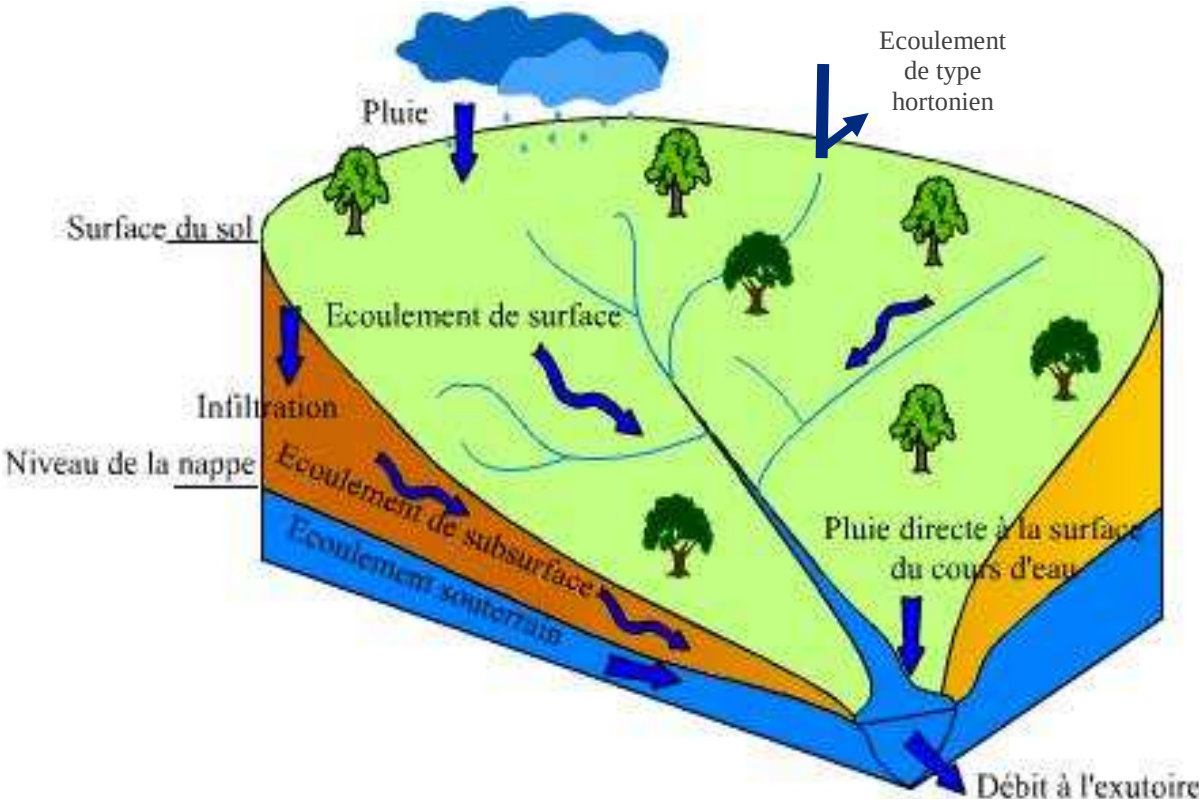


Figure 5 : Ecoulements et processus d'infiltration à l'échelle du bassin versant.

(ii) Le ruissellement par saturation.
Ce phénomène se produit lorsque l'eau infiltrée parvient à saturer le profil de sol par dépassement de sa capacité de stockage.

(iii) Les écoulements latéraux, hypodermiques ou de subsurface.
Il s'agit d'un transfert d'eau horizontal qui se produit dans les couches supérieures du sol pour réapparaître à l'air libre dans un cours d'eau. Ils sont dus à l'existence d'une anisotropie verticale des perméabilités.

(iv) Les écoulements souterrains.
L'eau s'infiltre vers la nappe phréatique et peut couler vers la surface. Cet écoulement est appelé écoulement de base et il est à l'origine des sources.

La détermination de la provenance de l'eau à l'exutoire peut se faire d'une manière graphique à partir de l'hydrogramme de la crue **(figure 6)** par diverses méthodes de décomposition qui se basent sur l'allure de la courbe (Roche, 1962 ; Réméniéras, 1999).

▪ Le flux d'eau qui arrive en premier à la rivière correspond à l'écoulement de surface. Dans un schéma de fonctionnement théorique, l'arrivée de cette eau correspond au pic de la crue.
▪ Cependant la montée du débit n'est en fait pas directement due à des eaux nouvelles mais à de l'eau qui était déjà présente dans la rivière et qui est poussée par l'eau de ruissellement.

Ce phénomène, bien connu et notamment très clairement mis en évidence par Dorioz et Ferhi (1994), correspond à un effet piston de l'eau nouvelle chassant l'eau ancienne et est provoqué par le fait que la vitesse de l'onde de crue est plus grande que la vitesse de l'eau.

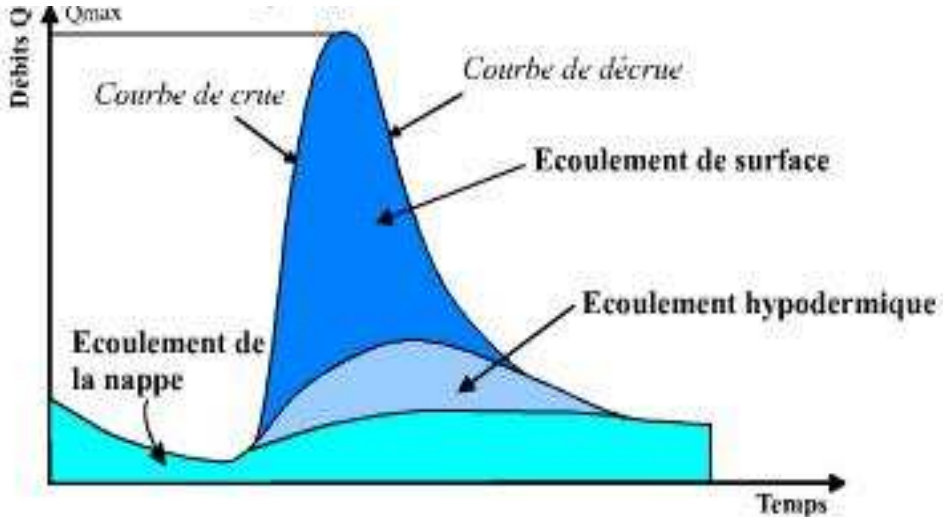


Figure 6: hydrogramme de crue.

Il existe donc une première arrivée d'eau ancienne, susceptible de mobiliser les sédiments de la rivière, avant l'arrivée à l'exutoire de l'eau de pluie issu du ruissellement hortonien et des zones saturées (Matthieu, 1996).

b). L'infiltration.

L'estimation de l'importance du processus d'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains et donc également participer à la recharge des nappes. **(figure 5)**

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion.
L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface, et pénètre par la suite dans le sol, sous l'action de la gravité et des forces de succion.

L'infiltration est largement conditionnée par les principaux facteurs que sont :

(i) Le type de sol :structure, texture et porosité. **(Figure 7)**
Les caractéristiques de la matrice du sol influencent les forces de capillarité et d'adsorption dont résultent les forces de succion, qui elles-mêmes, régissent en partie l'infiltration.

(ii) La compaction de la surface du sol due à l'impact des gouttes de pluie (battance) ou à d'autres effets (thermiques et anthropiques). En effet, certaines pratiques de travail du sol (nombre élevé de passages pour la préparation du lit de semence, tassement lors des récoltes…) peuvent avoir pour conséquences la dégradation de la structure de la couche de surface du sol, la formation d'une croûte dense (la croûte de battance),ainsi que l'imperméabilisation du sol à une certaine profondeur (sensible au labour).

(iii) La couverture du sol.
La végétation influence positivement l'infiltration en ralentissant l'écoulement de l'eau à la surface, lui donnant ainsi plus de temps pour pénétrer dans le sol. D'autre part, le système racinaire améliore la perméabilité du sol. Enfin, le feuillage protège le sol de l'impact de la pluie et diminue par voie de conséquence le phénomène de battance.

(iv) La topographie et la morphologie.
La pente par exemple, agit à l'opposé de la végétation. En effet, une forte pente favorise les écoulements au dépend de l'infiltration.

(v) Le débit d'alimentation (intensité de la précipitation, débit d'irrigation).

(vi) La teneur en eau initiale du sol (conditions antécédentes d'humidité).
L'humidité du sol est un facteur essentiel du régime d'infiltration car les forces de succion sont également fonction du taux de celle-ci.

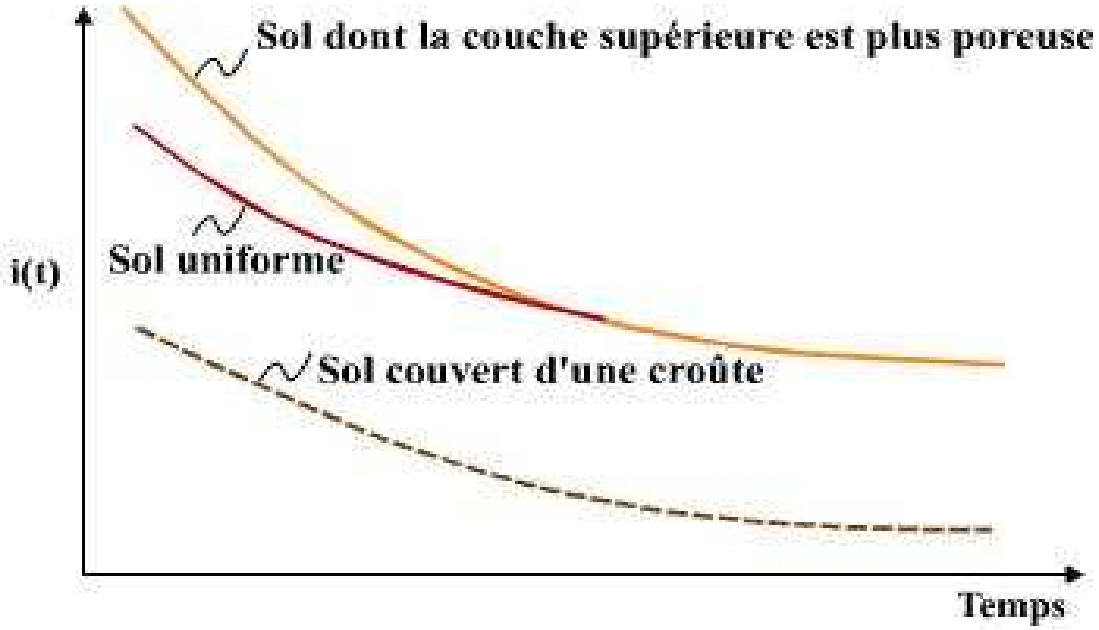


Figure 7 : Différentes évolutions du régime d'infiltration au cours du temps selon le type de sol. (D'après Musy et Soutter 1991)

Le régime d'infiltration au cours du temps évolue différemment selon que le sol est initialement sec ou humide. L'humidité d'un sol est généralement appréhendée en étudiant les précipitations tombées au cours d'une certaine période, précédant un événement pluvieux.
(Figure 8) Sur le versant, une fraction de l'eau infiltrée verticalement dans les sols subit, au contact d'horizons moins perméables, une réorientation des transferts avec un ***écoulement latéral de subsurface*** voire même ***de surface***, qui va alimenter le cours d'eau.
On parle de sources variables pour caractériser les portions d'espace où les excès d'eau se manifestent.
C'est ***la nappe*** qui à cause des apports reçus va contribuer au débit en fin de crue. Ces apports sont les plus tardifs et ils expliquent la hausse du niveau du débit une fois la crue terminée.

Cette discrimination, basée sur les vitesses de transfert, est complétée par des analyses chimiques qui constituent des compléments indispensables pour caractériser les arrivés des différents écoulements (Jordan-Meille, 1994).

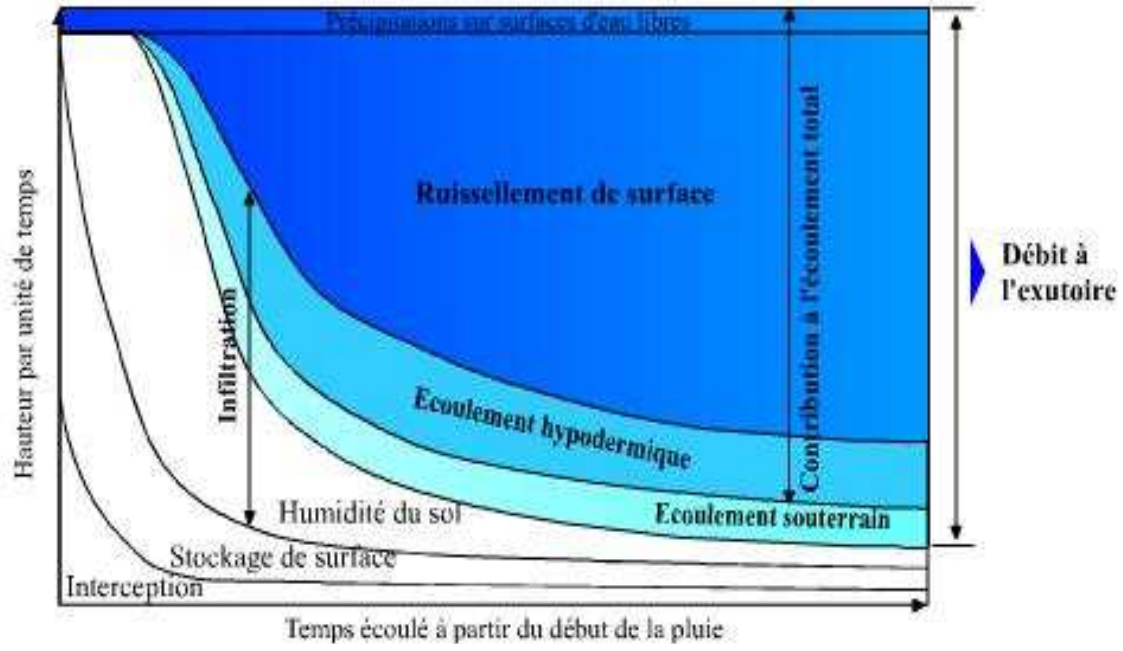


Figure 8: Répartition des hauteurs de précipitations au cours d'une averse d'intensité constante. (d'après Réméniéras, 1976)

I.2.2. La réponse hydrologique d'un bassin versant.

Lors de pluies, le bassin versant répond selon ses caractéristiques pour donner un signal se traduisant par la variation temporelle du débit à l'exutoire. La réponse hydrologique est donc définie comme *la manière dont réagi le bassin versant lorsqu'il est soumis à des précipitations*.

La réponse hydrologique d'un bassin versant est influencée par une multitude de facteurs qui sont liés **(i)** aux conditions climatiques du milieu, **(ii)** à la pluviosité (répartition spatiale et temporelle, intensité et durée des pluies), **(iii)** à la morphologie (forme, dimension, altimétrie, orientation des versants), **(iv)** aux propriétés physiques (nature des sols, couverture végétale), **(v)** à la structuration-même du réseau hydrographique (extension, dimension, propriétés hydrauliques), **(vi)** aux états antécédents d'humidité des sols.

Ceci dit, un événement pluvieux sur un bassin versant, peut avoir une réponse nulle (absence de modification du débit, ou absence de crue, notamment lorsqu'un événement de faible pluviométrie survient sur des sols secs) ou positive (modification du débit ou crue).
Cette réponse peut s'inscrire différemment dans le temps et dans l'espace, c'est ainsi qu'elle peut être :

_ Rapide.
La réponse rapide est imputable aux ***écoulements de surface***, à un ***effet piston***, ou encore à l'effet de la ***macroporosité du sol***.

_ Retardée.

C'est notamment le cas lorsque la réponse hydrologique est due principalement aux ***écoulements souterrains***.

_ Totale.

Dans ce cas, la réponse hydrologique est composée à la fois par des ***écoulements de surface et souterrains.***

_ Partielle .

La réponse est la résultante des ***écoulements de surface OU des écoulements souterrains.***

I.2.3. Les transferts d'éléments.

a). La conductivité.

La conductivité des eaux permet par exemple de différencier les eaux provenant de la circulation dans le sol de celles provenant du ruissellement superficiel.
En effet, les eaux fortement minéralisées correspondent à des eaux ayant subi un contact prolongé avec la matrice minérale des sols et les formations au sein desquelles les nappes d'eau se forment (source, sortie des drains, sorties des points de bas de pente ou de versant).
Les eaux faiblement minéralisées quant à elles, proviennent souvent de zones inondées, de flaques constituées sur prairies, forêts, ou des terrains cultivés (ruissellement de surface ou à sources variables)

b). Les nutriments.

La distribution des éléments dans le profil du sol détermine en grande partie la façon par laquelle ces éléments vont être mobilisés et donc l'ordre et la dynamique de leur arrivée dans le réseau hydrique.
Du fait notamment de son affinité pour la phase solide, ***le phosphore*** est un élément qui se concentre dans les horizons de surface.
A l'inverse, les éléments plus solubles, comme les ***nitrates*** et les ***chlorures***, peuvent s'infiltrer en profondeur et présentent un pic de concentration en position de subsurface.
Cette distribution largement fonction des transferts dans les premiers horizons du sol, évolue au cours du temps en fonction des conditions hydro-pédologiques.
Enfin, les ***minéraux produits de l'altération des roches*** sont particulièrement présents dans les horizons d'altération les plus profonds, citons à ce titre ***Na*** et ***Ca***.

Si on considère une crue théorique (**figure 9)**, on observera successivement :

(i) les éléments liés aux particules présentes dans la rivière (MES, P particulaire) soumis à l'effet de chasse des "eaux anciennes" (cf. supra).
(ii) Le phosphore dissous (dont la plus grande partie sont des orthophosphates) transporté principalement par le ruissellement apparaîtra dans un deuxième temps.
(iii) Enfin le pic des nitrates, transportés essentiellement par des écoulements de subsurface apparaîtra encore plus tard.
La distribution avec la profondeur du carbone organique total présente généralement une décroissance avec un maximum en surface. Ce trait général est plus ou moins net et marqué en fonction :

_ Des types de couverts végétaux (la diminution des teneurs en carbone avec la profondeur est rapide dans les sols sous forêt avec un maximum dans la litière, plus lente dans les sols sous prairies du fait de l'importance des apports de matières organiques endogées).
_ Des pratiques agricoles (amendements organiques, présence et profondeur des labours….)
_ Des dynamiques pédologiques (les sols de type podzolique présentent un très net pic de carbone dans les horizons d'accumulations Bh et Bs et échappe ainsi au modèle de décroissance progressive des teneurs en carbone).

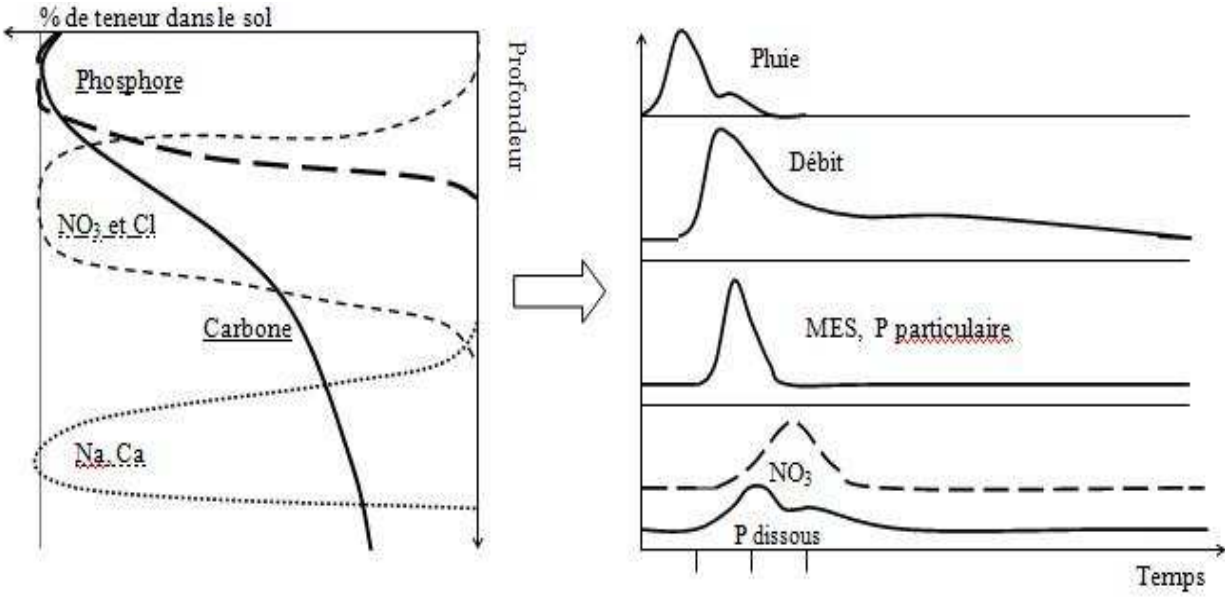


Figure 9 : Distribution des éléments dans le profil du sol son apparition théorique lors de crues (d'après L. Manjon, 2003)

I.2.4. Flux et exportations à l'exutoire du BV : ordres de grandeur

Afin d'avoir une idée des ordres de grandeurs, les quantités exportées à l'exutoire des bassins versants pour le P, le N et le COD sont présentées dans le **tableau 3 ;** et le **tableau 4** montre les concentrations trouvées dans différentes rivières pour ces trois éléments.

	Exportations *(kg/ha/an)*	Caractéristiques	Références
P total	<0,1	« Bassins naturels »	*Dorioz, 1996*
	1-3	Ruissellement urbain	*Dorioz, 1996*
	0,2-2,5	Terres agricoles	*Dorioz, 1996*
N total	0,3-150	BV de 14 ha	*Dorioz et Ferhi, 1994*
COD	25	BV de 10 ha	*David et Vance, 1992*
	10-100	Systèmes boréals	*Hope, 1997*
	20	BV de 1300 à 2100 ha	*Hope, 1997*
	10 à 20	BV de 60 ha	*Tate et Meyer, 1983*
	50-500	Tourbières	*David et Vance, 1992*

Tableau 3 : Exportation des éléments : P total, N total et COD d'après quelques auteurs.

	Concentrations *(mg/L)*	Caractéristiques	Références
P soluble	0,007-0,15	BV de 14 ha	*Dorioz et Ferhi, 1994*
N total	0,2-16	BV de 14 ha	*Dorioz et Ferhi, 1994*
COD	3-15	Fleuves des climats tempérés chauds	*Thurman, 1985*
	2-8	Fleuves des climats tempérés froids.	*Thurman, 1985*
	1-4	Cours d'eau avec débits < 100 m^3	*Thurman, 1985*
	0,8-3	Bassins forestiers entre 9-16 ha.	*Tate et Meyer, 1983*
	30-40	Tourbières	*Thurman, 1985*

Tableau 4 : Concentrations dans les rivières de P total, N total et COD d'après quelques auteurs.

En résumé : Le bassin versant est une unité naturelle d'étude des transferts hydriques. C'est un intégrateur de processus complexes liés à une diversité dans la nature des écoulements et dans la dynamique des éléments chimiques. La relation entre concentrations et temps de réponse dans la rivière nous apporte beaucoup d'informations sur le fonctionnement d'un bassin versant. Cette information peut servir pour tracer les origines des eaux et nous permet de réaliser des comparaisons avec d'autres éléments.

II. LE SITE D'ETUDE : LE BASSIN VERSANT DU MERCUBE.

II.1. LE BASSIN VERSANT DU MERCUBE DANS SON COMPLEXE

II.1.1. Description topographique du bassin versant.

Le site d'étude choisi correspond à un petit bassin versant de 310 hectares qui se trouve sur la rive gauche du Lac Léman, entre les communes de Nernier, Yvoire et Merserey, communes du bas Chablais proches de Thonon les bains. **(figure 10)**.

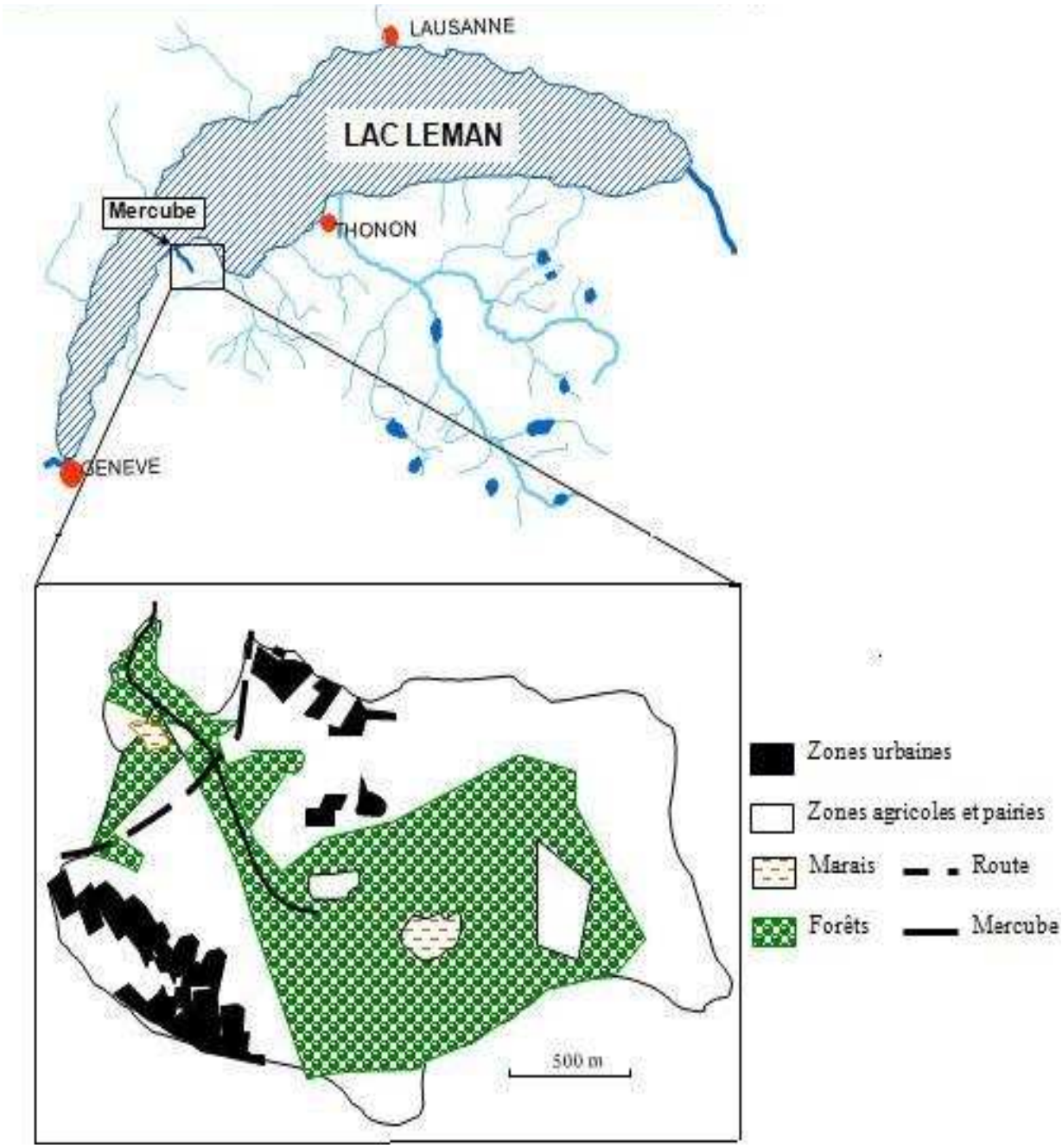
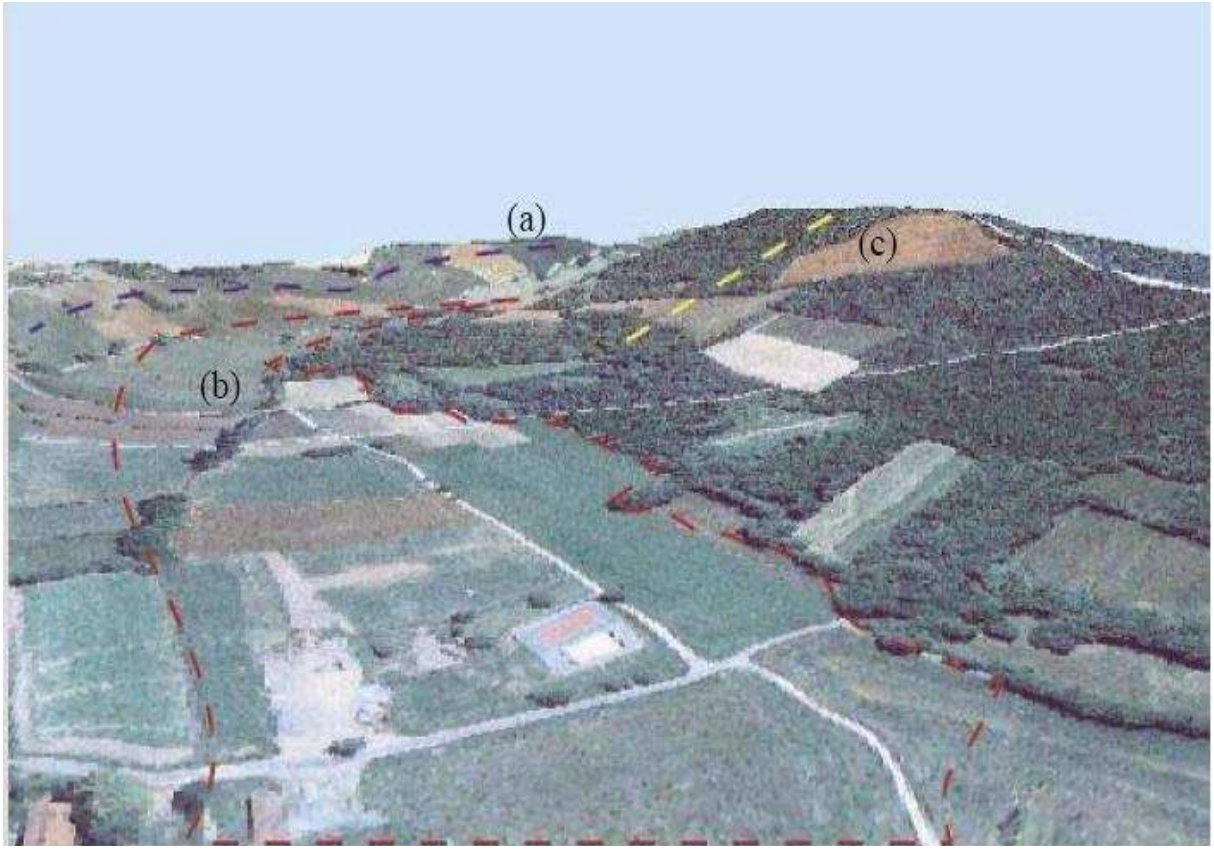


Figure 10: Bassin versant du Mercube: situation, limites du bassin et principaux modes d 'occupation des sols

(d'après L. Ninane, 2004)

Le bassin présente un allongement maximal de 2,7 km d'Est en Ouest. Son altitude varie entre 451 m et 372 m pour l'exutoire (altitude du lac Léman). La plus grande partie de sa surface (80%) est constituée de faibles pentes n'excédant jamais 8%. On ne constate donc pas l'existence de phénomènes érosifs très marqués, sauf dans la partie près de l'exutoire où le relief s'accentue.

Les profils en long, réalisés dans les premiers temps où le bassin a été équipé, mettent en évidence des sous-unités topographiques **(figure 11)**, à savoir : **(i)** des versants linéaires de pentes constantes, **(ii)** des versants concaves, situés le long et en aval des vallums ; et enfin, **(iii)** des zones plates. (Jordan 1998)



(a) **ride morainique** (b) **zone plate**
(c) **versant linéaire à pente constante.**

Figure 11 : Vue en 3D du bassin versant du mercube (Réalisation Renaud 2004)

II.1.2. Géologie et pédologie.

Trois formations géologiques quaternaires, déposées lors des retraits glaciaires, composent le bassin.

Le bassin repose sur un socle morainique, dont le dépôt, généralement argilo-limoneux, affleure au niveau des crêtes Sud et Est du bassin. Des dépôts fluvio-glaciaires comblent les fonds de vallons. On note également dans ces formations, la présence de dépôts glacio-lacustres, sableux à graveleux à l'origine de sols filtrants, peu sensibles au ruissellement.

L'altération de ces matériaux est à l'origine des différents types de sols présents sur le bassin.

On distingue ainsi, sur les rides morainiques, des sols calcaires peu profonds et très caillouteux.
Des sols assez contrastés, avec une granulométrie dominée par des argiles ou des sables, se développent plus en aval, sur les placages fluvio-glaciaires. Ces sols très généralement sains et ne présentant pas, ou peu de traces d'hydromorphie, sont utilisés à des fins agricoles .
En foret et à proximité du cours d'eau, se forment également des sols profonds, nettement plus argileux que les autres et présentant de nombreuses tâches d'hydromorphie. Ces sols, fortement gleyfiés témoignent d'un excès d'eau.

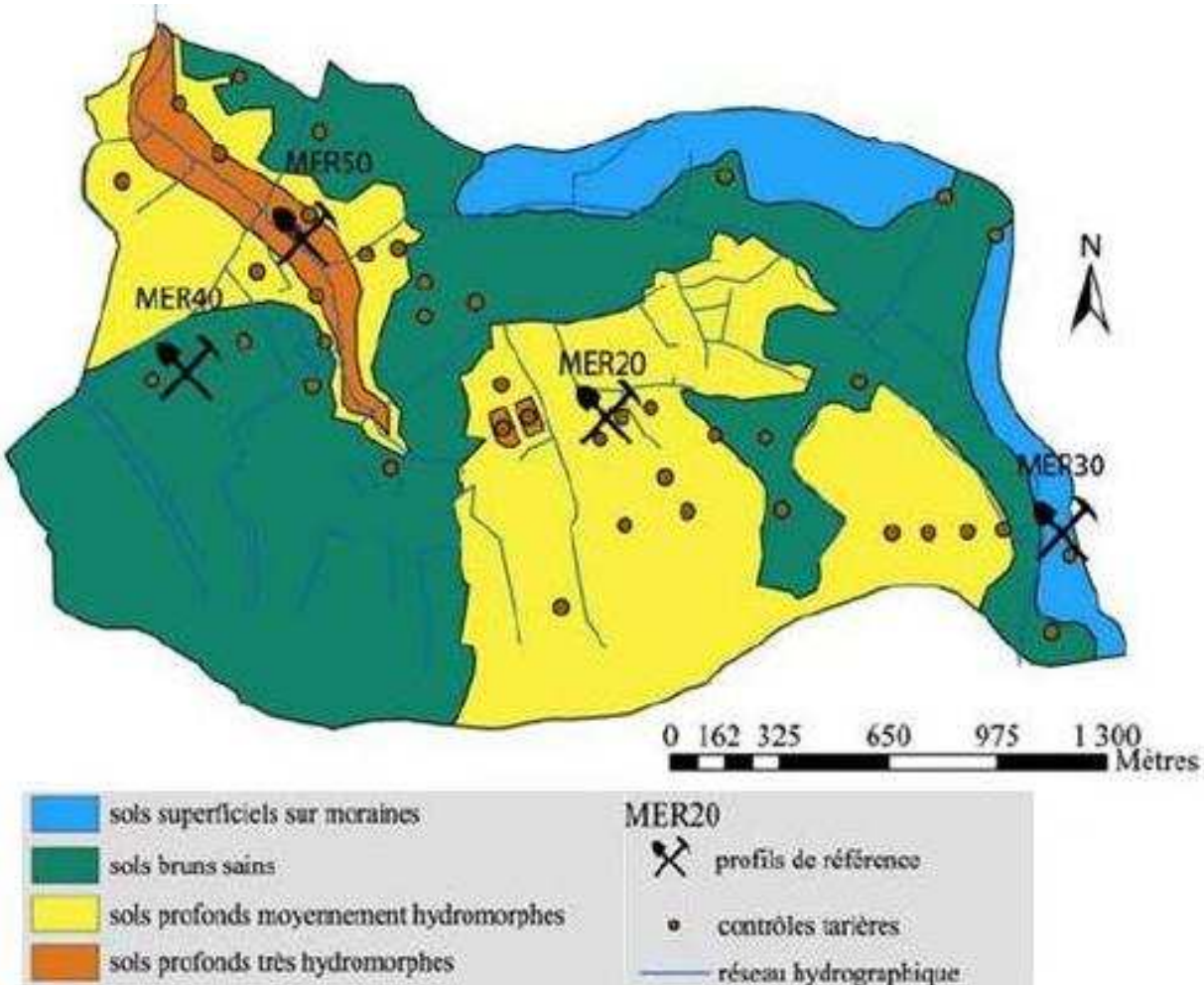


Figure 12 : Cartographie des sols du bassin versant du Mercube (Renaud 2004)

La carte des sols **(figure 12)**, a fait l'objet d'une campagne de terrain réalisée en 2004, elle détaille également les étapes conditionnant la distribution et la pédogénèse des sols sur le bassin. (J. Renaud, 2004).

II.1.3. Un réseau hydrographique en pleine évolution.

Le réseau hydrographique **(figure 13)** a fortement évolué ces dernières années, avec un développement important des fossés entre 1995 et 2000, ceci, modifiant sensiblement les limites du bassin versant.

Figure 13 : hydrographie, et types de réseaux hydrographiques du Mercube.

Il se caractérise également par de nombreuses zones de ralentissement des eaux (zones potentiellement inondables) et par l'existence d'endoréisme (zones non connectées à l'exutoire). La densité de drainage moyenne est de 2,7 km/km^2 mais n'est pas représentative de la forte emprise agricole présente.
Le réseau est alimenté par les pluies, le ruissellement agricole et urbain, les drainages, les nappes et trois sources pérennes. Les deux affluents principaux du Mercube étant :

- L'affluent de la rive droite qui se trouve à 420 mètres d'altitude et ne présente pas de pente.
- L'affluent de la rive gauche, qui lui présente des pentes (390 à 425 mètres d'altitude). Il s'agît d'un fossé longeant la route dont les eaux proviennent principalement du ruissellement urbain.

La branche principale, le Mercube, présente un profil intermédiaire, avec une altitude entre 370 et 415 mètres. Elle trouve sa source principale dans la forêt.

II.1.4. L'occupation des sols. (figure 14)

L'agriculture occupe une place d'importance dans le bassin versant, les cultures céréalières y sont prédominantes, sachant que la SAU (Surface Agricole Utile) couvre environ 155 ha, soit plus de la moitié de la superficie du bassin.

Une zone urbaine (habitats, chemins, routes…) représente près d'une trentaine d'hectares, et les habitations sont généralement concentrées, sauf en bordure du Lac.
Le reste du bassin, environ 120 ha, est occupé par des forêts de feuillus, dont les sols lourds sont marqués par l'hydromorphie, et souvent saturés d'eau en hiver.

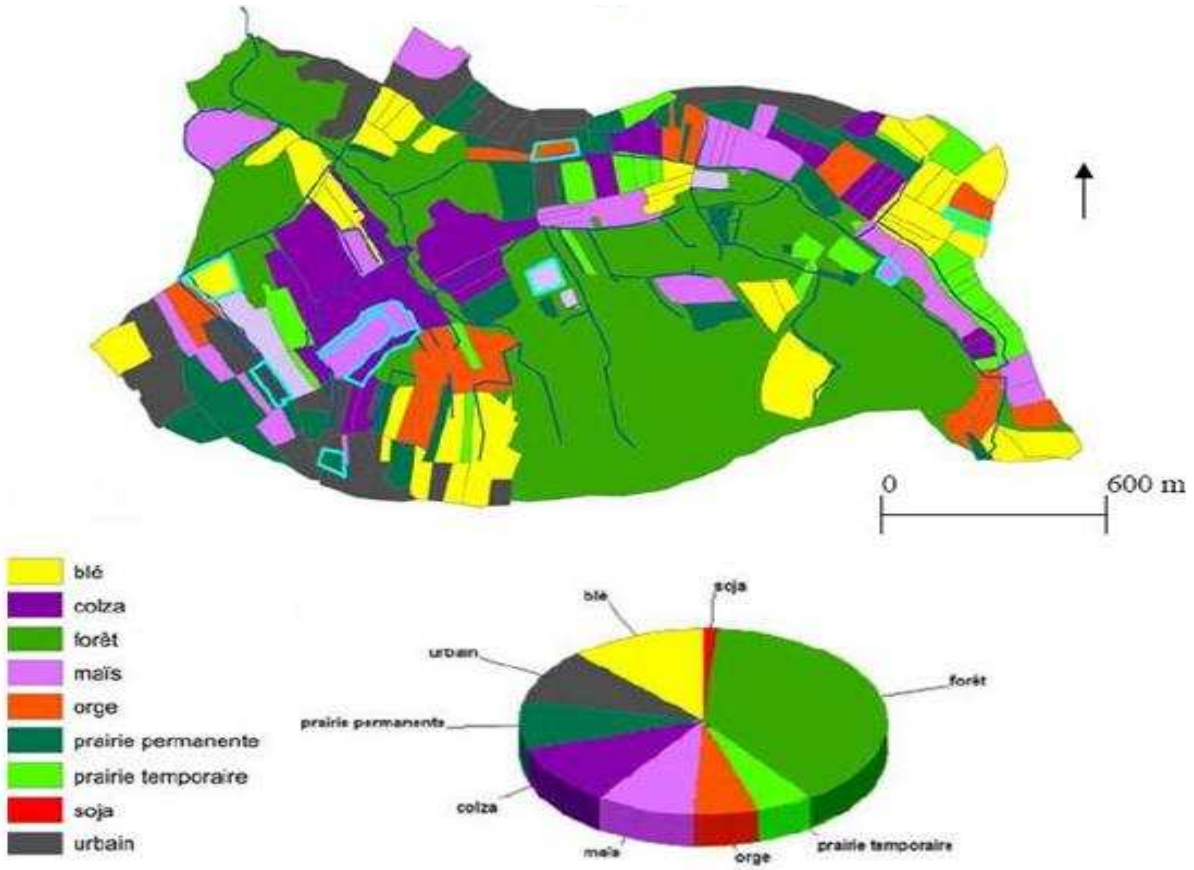


Figure 14 : Occupation des sols sur le bassin versant du Mercube.

La nature des sols conditionnant le mode d'occupation de l'espace, les sols les moins hydromorphes sont destinés à la cultures des céréales, alors que les moins favorables sont laissés aux prairies et aux forêts.

II.1.5 . Climatologie et fonctionnement hydrologique du bassin.

● D'un point de vue climatologique le bassin du Mercube se situe dans une plaine dont la pluviosité y est relativement importante, avec une lame annuelle précipitée peu variable, située aux alentours de 1000 mm. Les températures moyennes s'échelonnent entre +2 et +20°C avec une amplitude de 6-7°C.

● Selon Jordan-Meille (1998), le bassin versant présente différents états caractéristiques tout au long de l'année selon l'extension des écoulements. Il a observé 6 états hydriques soit 6 zones du bassin se mettant en eau successivement. Pendant l'étiage d'été l'eau provient des sources et le réseau se trouve dans l'état 1. Les pluies d'été, courtes et orageuses, provoquent la mise en eau de quelques zones, et on peut considérer que le réseau passe à l'état 2, suivi d'un retour rapide à l'état 1. Ces pluies apportent des eaux provenant du ruissellement urbain.

Quand les pluies d'automne, hiver, avec une durée de plusieurs jours, arrivent, le réseau va progressivement jusqu'à l'état 6. Les eaux apportées proviennent en plus de la forêt, des marais, et si les pluies sont très abondantes, des terrains agricoles (annexe 2, figure 4).

II.3. PÉRIODE D'ÉTUDE, INVENTAIRE DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES & MÉTROLOGIE DU MERCUBE.

II.3.1. Les hauteurs d'eau du Mercube

Les hauteurs d'eau du Mercube sont relevées en continu à l'exutoire au pas de temps 30 min, depuis 1992. Mais, suite à une crue qui a emporté le matériel d'enregistrement en novembre 2002, il y a une interruption des chroniques jusqu'à mars 2003. l'INRA a donc installé un nouveau dispositif, celui-ci étant situé plus en amont que le précédent, **figure 15.**

Par contre, il nous faut dorénavant prendre en compte le débit d'un tuyau, drainant une partie de la zone forestière proche, et qui se déverse entre les 2 seuils. **(figure 15)**
L'accès à ce tuyau est difficile, voire quasi impossible lors des crues. Son débit, mesuré au seau, est évalué en fonction de la hauteur d'eau du Mercube.

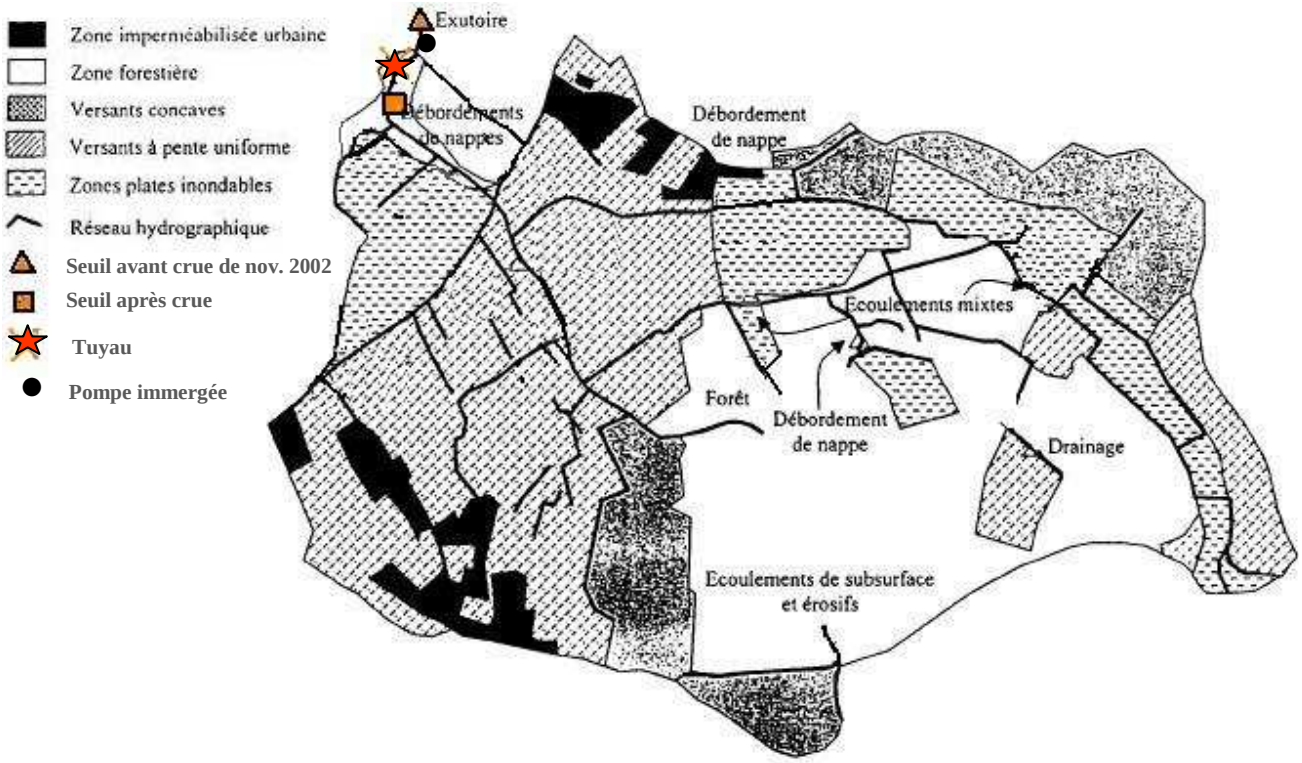


Figure 15 : Le bassin versant du Mercube et son équipement. Diversité des écoulements liée à la couverture du sol et aux grandes unités topographiques.

Deux autres incidents, plus mineurs, cette fois-ci, conduisirent également à la suspensions des mesures :

- Fin 1993 suite à un problème technique dont j'ignore la cause, les hauteurs d'eau ont été mal mesurées.
- En 2001, les berges du cours d'eau se sont effondrées sur un court espace, juste devant le seuil de mesure.

Quelque soit le seuil, les hauteurs d'eau sont mesurées à l'aide d'un limnigraphe à flotteur, adjacent à une section en double v jaugée. Ce type de matériel permet l'enregistrement fiable des débits les plus faibles (gamme de 0 à 25 l/s pour la partie basse de la section) aux plus importants (de 25 à 1100 l/s pour la section élargie). **(figures 17, 18 et 19)**.

Figure 17 : Capteur limnimétrique du Mercube avant la crue de novembre 2002. Section en double V.

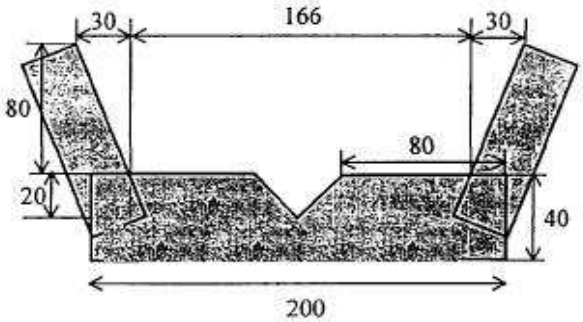


Figure 18 : Section en double v du premier seuil de mesure

Figure 19 : Capteur limnimétrique du Mercube après 2003.

II.3.2. Les analyses chimiques.

Nous possédons les résultats des analyses chimiques du Mercube, sans interruption de la chronique : la pompe immergée chargée du prélèvement automatique des eaux ayant toujours fonctionné correctement.
Nous possédons, entre autres, les mesures du Phosphore (P_{total}, $P_{particulaire,}$ ions phosphates…), de l'azote (NH_4^+, NO_3 , $N_{particulaire}$…), des matières en suspension (MES), des minéraux (Na^+, Cl^-, K^+), du carbone organique et inorganique ainsi que d'autres paramètres tels que le PH et la conductivité (χ).
Les échantillons d'eau sont conservés au froid (4°), et rapidement acheminés vers le laboratoire. 21 flacons sont prélevés par semaine, soit un par tranche de 8h. Ceux-ci sont ensuite mélangés proportionnellement au débit moyen correspondant à cet intervalle de temps, afin de constituer un échantillon moyen journalier.

II.3.3. La météorologie.

Les données météorologiques, et notamment les pluies journalières, proviennent de la station de L'INRA de Thonon qui enregistre les pluies depuis 1951 à un pas de temps journalier.

La mesure des précipitations est l'une des plus complexes en météorologie car on observe une forte variation spatiale selon le déplacement de la perturbation, le lieu de l'averse, la topographie et les obstacles géographiques locaux gênant sa captation.

▪ Les erreurs de représentativité spatiale ou d'échantillonnage sont difficiles à estimer, car nous ne savons pas dans quelle mesure les quantités recueillies ponctuellement sont représentatives du volume total d'eau précipitée sur l'ensemble du bassin.

▪ Les erreurs instrumentales ont presque toutes pour conséquence de sous-estimer les quantités précipitées. Parmi celles-ci, on distingue :

- Les erreurs de captation (5 à 80 %) : pluie inclinée, fortes pentes, turbulences du vent autour du pluviomètre.
- Les erreurs de l'instrument (environ 0,5 %) : déformation de l'appareil de mesure (par exemple déformation du papier enregistreur).
- Les erreurs dues aux rejaillissements (environ 1%).
- Les pertes par mouillage (environ 0,5 %) : déficit équivalent à l'eau qui humecte les parois intérieures du pluviomètre.
- Les erreurs dues à l'évaporation dans le récipient (environ 1%).

▪ Les erreurs d'observation sont en principe systématiques mais ne sont pas trop graves du moment que l'on ne change pas d'observateur, (possibilité de corrections).

Ceci dit, les pluies enregistrées sur la station sont comparables à celles mesurées sur le bassin versant du Mercube. En effet, l'écart entre les pluviométries annuelles mesurées pour chaque station est compris entre -3 et +10 %. (thèse de Lionel Jordan-Meille 1998).

II.3.4. Les débits à l'échelle régionale.

Nous avons en notre possession les débits mensuels et journaliers de plusieurs bassins voisins de celui du Mercube, à savoir, le *Foron* à Siez**,** *le Redon* à Margencel**,** et le *Pamphiot* à Allinges, (en attente…) ; afin d'établir d'éventuelles comparaisons de débits et de flux à l'exutoire. Ces données nous ont été fournies par la DIREN (Direction Régionale de l'Environnement), et par la ville de Thonon pour le Pamphiot.

PARTIE 3 : MÉTHODOLOGIE

I. LA TRADUCTION DES HAUTEURS D'EAU EN DÉBITS : UN TRAVAIL PRÉALABLE & INDISPENSABLE.

En 1909 Louis Barbillon affirmait : *« Le problème de la mesure des débits constitue l'une des plus pénibles incertitudes scientifiques actuelles »*.

La traduction des hauteurs d'eau en débit constitue une étape essentielle pour l'hydrologue. Elle est indispensable avant toute étude et s'avère être beaucoup plus complexe qu'elle n'y paraît. En effet, de nombreux paramètres physiques interviennent pour établir la relation hauteur-débit, notamment la géométrie du seuil de mesure.
Les fonctions qui relient les côtes aux débits, sont relativement instables, et doivent en conséquence être vérifiées régulièrement. En effet, elles peuvent varier dans le temps selon l'évolution du fond mobile, le développement de la végétation aquatique, ou encore l'accumulation de débris.

I.1. RAPPELS : CONTEXTE, DONNÉES & METROLOGIE SUR LE BV DU MERCUBE.

Le **tableau 5** présente de manière synthétique, les éléments relatifs aux données et au matériel de mesure, déjà présentés dans la partie précédente. (cf. II.3.)

TYPE DE DONNEES	MESURES DISPONIBLES	PAS DE TEMPS LE PLUS FIN	MATERIEL	REMARQUES
Hauteurs d'eau du Mercube	(1) 01/01/1993 au 29/09/93	30'	Limnigraphe à flotteur adjacent à une section en double v jaugée.	(1) Probleme technique
	(2) 01/01/94 au 20/12/2000			(2) Effondrement des berges
	(3) 22/06/2001 au 14/09/2002			(3) Matériel emporté
	(4) 20/03/2003 au 31/12/2007			(4) Nouveau seuil
Metéorologie:	1951-2009	Journalier	Station INRA de Thonon	Données +/- representatives de celles qui auraient pu etre mesurées sur le BV du Mercube.
▪ précipitations ▪ ETP/ température ▪ insolation et vent			Pluviomètre, thermometre à cristaux liquides, ETP calculé par la formule de Penman...	
Débits :	01/01/93- 31/12/2008, Données fournies par la DIREN	journalier	Matériel de mesure non communiqué	Lacune du 17/11/03 au 03/12/03 raison ignorée.
▪ Redon ▪ Foron				
Chimie	01/01/93 au 31/12/2007	journalier	Pompe immergée, récolte automatisée, réfrigération à 4°, 1 flacon/8h, Analyse rapide au labo de l'INRA	mélange proportionnel au débit → échantillon moyen journalier representatif
P (Ptot, PO_4^{3-}, Ppart...) N (Ntot, NO3-, NH4+) PH/ X / MES/ PH				

Tableau 5 : récapitulatif de l'équipement du Mercube et des mesures disponibles.

I.2. LES COURBES DE TARAGE OU D'ÉTALONNAGE.

I.2.1. Définition

Le passage des hauteurs d'eau aux débits, nécessite l'utilisation de relations mathématiques plus ou moins complexes selon le type de seuil de mesure utilisé.
Ces équations peuvent-être issues de la littérature (formules théoriques), ou ajustées par des jaugeages.

Pour une section d'un cours d'eau, la courbe de tarage ou d'étalonnage, donne la relation entre la hauteur du niveau d'eau relevé sur un échelle limnimétrique et le débit. Elle permet de ramener la mesure du débit à celle de la hauteur.
Ainsi, une courbe de tarage n'est valide que sur un intervalle de temps, un cours d'eau et une section de seuil donnés.

I.2.2. Table des relations hauteur-débit. (cf. table 2)

Cette table est à utiliser selon les périodes, les seuils de mesure et les hauteurs d'eau considérés.
Notons à titre informatif qu'en 2001, suite à une crue qui avait emporté les berges, la courbe de tarage a été réévaluée.
Nous remarquerons également qu'à une hauteur caractéristique du seuil, en conséquence du changement de géométrie de la section de mesure, les relations hauteurs-débits sont modifiées.

I.2.3. Courbes de tarage issues de la table des relations hauteur-débit.

Il est intéressant de constater combien, il est important de bien choisir sa courbe d'étalonnage. En effet, si pour les petits débits la différence n'est pas très conséquente, dès que ceux-ci augmentent l'erreur devient rapidement considérable, compte tenu de la divergence drastique des courbes qui ont une allure exponentielle. **(graph 1)**

Graph. 1: courbes d'étalonnage selon les différentes relations hauteurs-débits.

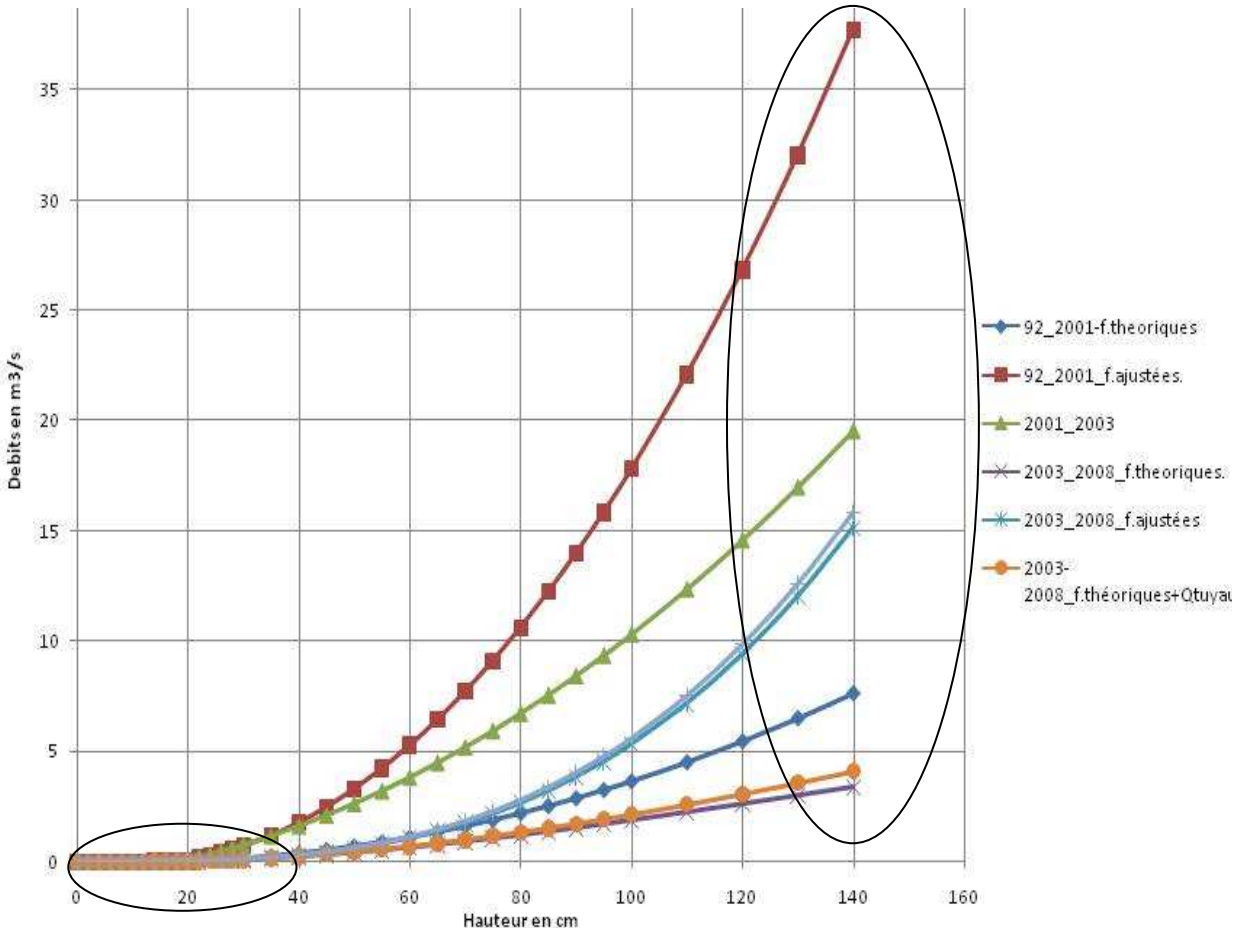
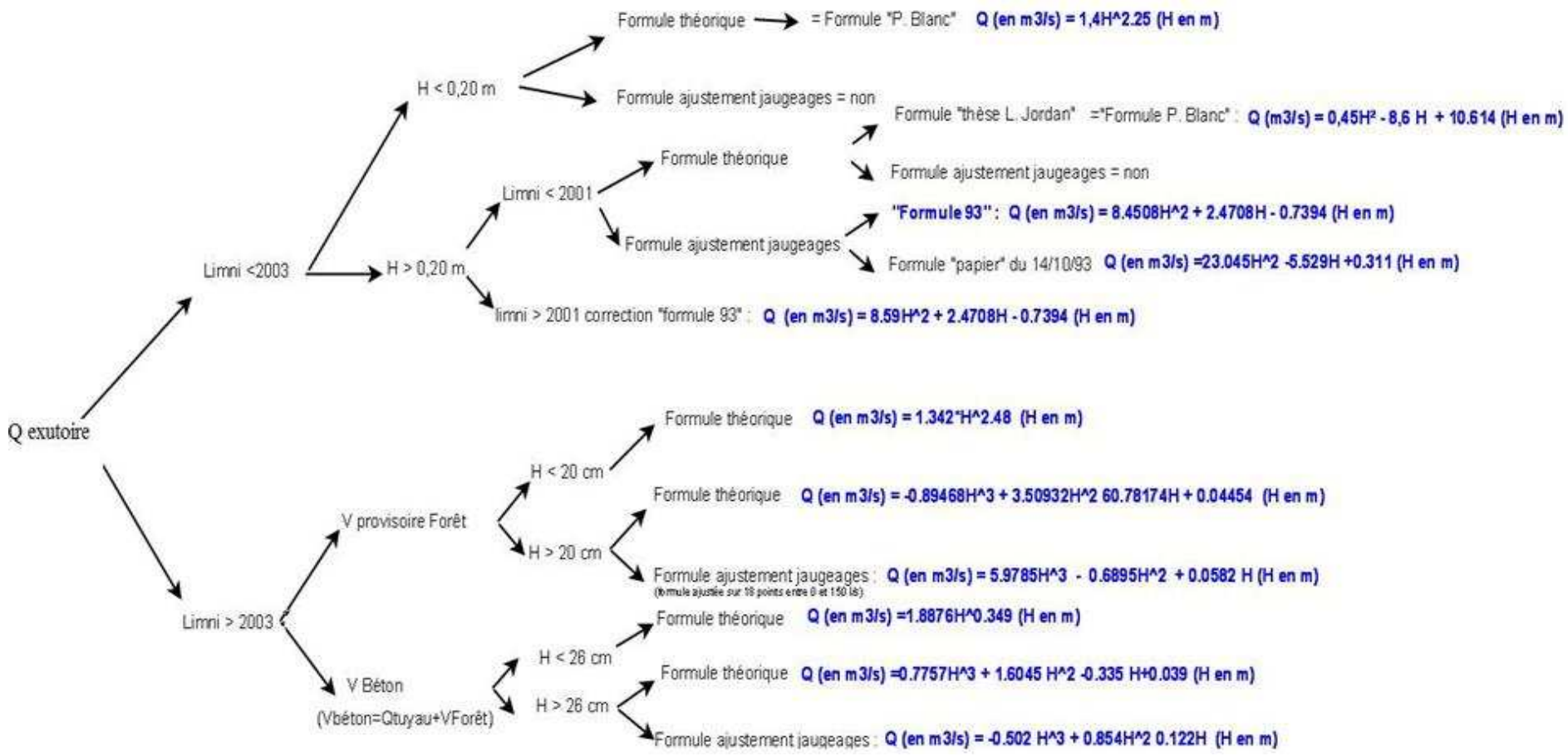


PLANCHE 2 :

RELATIONS HAUTEURS-DÉBITS (ETABLIES AVANT L'AJUSTEMENT HYDRACCESS) EN FONCTION DE LA PÉRIODE, DU SEUIL DE MESURE ET DE LA HAUTEUR D'EAU. (D'APR□S D. BARBET 2007)



I.3. LE CHOIX DE LA COURBE DE TARAGE.

Le choix de la courbe de tarage est une étape délicate et décisive pour la suite du travail. Comme nous pouvons le constater sur le graphique précédent **(graph 1),** la traduction des hauteurs d'eau peut considérablement varier d'une courbe à l'autre, notamment dans la gamme des hauts débits.
Pour faire ce choix, et être en adéquation avec les débits théoriques, ou attendus , nous nous sommes appuyés sur le bilan hydrologique, et sur la comparaison des lames d'eau annuelles du Mercube avec celles des bassins avoisinants.

I.3.1. Le cycle hydrologique.

a). Définition et composantes.

Le cycle hydrologique (**figure 20**) est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre. Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont aussi concomitants.

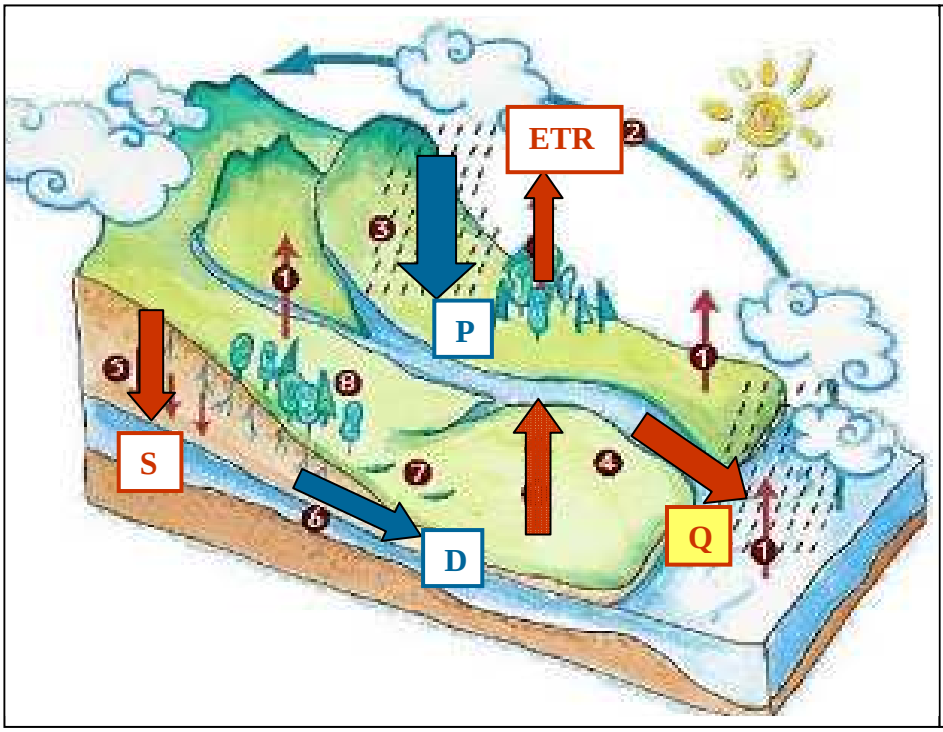


Schéma des entrées et des sorties d'eau à l'échelle du bassin versant.

Récapitulatif des données dont nous disposons.

Entrées d'eau :

_ Précipitations **P**
_ Relargage par drainage **D**

Sorties d'eau :

_ Débit à l'exutoire **Q = Q_{cal}**
_ Evapotranspiration Réelle **ETR***
_ Stockage dans les sols **S**

**nous ne disposons que de la mesure de l'évapotranspiration potentielle (ETP).*

Figure 20 : Cycle hydrologique et principales composantes.

b). Le bilan hydrologique.

D'après ***le principe de conservation de la masse***, à l'échelle du bassin versant que nous considérons comme un système fermé, nous avons :

$\sum$ **entrées d'eau** = $\sum$ **sorties d'eau** soit $P + D = Q_{cal} + S + ETR$
En regroupant **D** et **S** sous un même terme, qui n'est autre que la variation du stock d'eau dans le sol, il vient : $Q_{cal} = P - ETR + \Delta S$

Cette relation est vraie quel que soit l'intervalle de temps considéré.
Cependant, à l'échelle d'une année, le drainage **D** et le stockage **S** tendent vers une même valeur absolue, si bien que **ΔS** est négligeable, soit **ΔS≈0**
Nous obtenons donc $\mathbf{Q_{cal} = P - ETR}$

Notons que par commodité, les termes du bilan hydrique sont exprimés en hauteurs d'eau ou lames d'eau (précipitée, écoulée, évaporée, stockée…), ceci afin de conserver des volumes comparables puisque indépendants de la surface du bassin versant considéré.

I.3.2. Comparaison des débits théoriques et des débits mesurés : appréciation par la méthode des moindres carrés.

Afin de comparer les débits mensuels déduits du bilan hydrologique $\mathbf{Q_{calc}}$, avec ceux issus des mesures de hauteur d'eau à l'exutoire du Mercube : $\mathbf{Q_{obs}}$.
On note l'erreur relative, le rapport $\mathbf{(Q_{calc} - Q_{obs})/ Q_{obs}}$, et nous le calculons pour chaque année avec chacune des courbes de tarage, pour une appréciation globale.

Pour déterminer mathématiquement quelle(s) courbe(s) de tarage minimise(nt) le plus ces écarts relatifs, ou « résidus », nous avons recours à <u>la méthode des moindres carrés</u>.
Ici, elle se réduit au cas le plus simple, les résidus étant indépendants et distribués normalement* autour de 0.
*Les résidus transformés par $x \rightarrow \log(x^2+1)$ suivent une loi normale.
<u>La méthode des moindres carrés ordinaires (MCO) minimise la quantité:</u>

$$\chi^2(m) = \sum \omega_i (y_i - m)^2$$

avec $m = 0$ et $\omega_i = 1$

I.3.3. Comparaison des lames d'eau annuelles écoulées sur le Mercube avec celles des autres Bassins Versants de la région proche.

a). Définition.

Une lame d'eau correspond à un *volume d'eau écoulé à l'exutoire par unité de temps et rapporté à la superficie du bassin.*. Elle est homogène à une hauteur (mm).
Selon ce à quoi elle se rapporte, on parle de lame d'eau précipitée, écoulée, évaporée, stockée…
L'avantage de cette unité réside dans le fait que les lames d'eau sont indépendantes de taille du bassin versant et peuvent donc être aisément comparées les unes aux autres.

b). Les bassins versants du Foron et du Redon.

Les bassins versants les plus proches du Mercube, tant géographiquement que fonctionnellement, sont ceux du Foron et du Redon. Leur comparaison constitue donc un véritable intérêt pour l'étude des débits et leur validation.

Le *Redon* est un affluent du lac Léman long de 11,7 kilomètres, et draine un bassin versant topographique de 30,5 km². Il traverse les communes d'Allinges et de Margencel, située à trois kilomètres à l'ouest de Thonon-les-Bains.
Le bassin versant du *Foron* occupe une surface de 66 km², le Foron se déverse également dans le Léman après avoir cheminé à travers les communes de Sciez et Perrignier.

I.5. ÉVALUATION DU DÉBIT DU TUYAU.

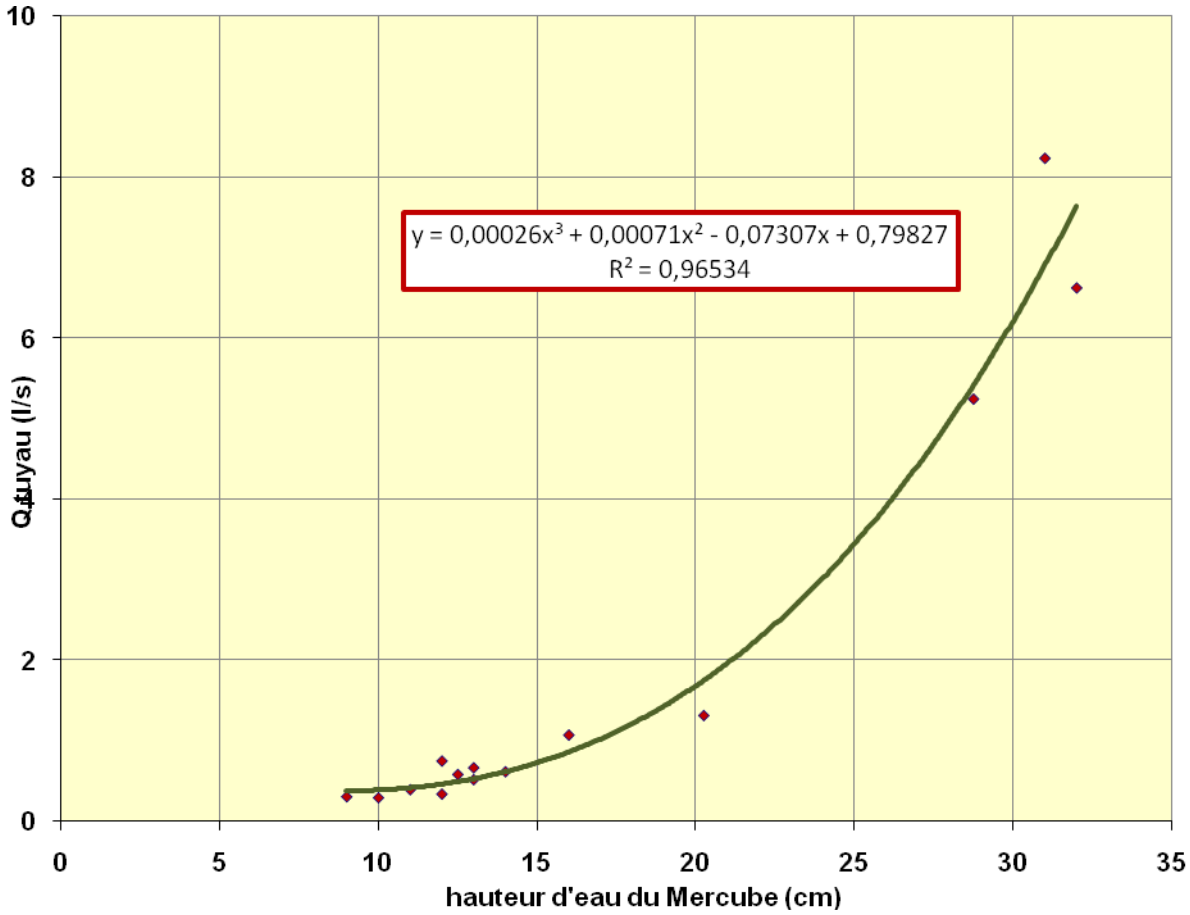
De 2003 à 2008, Ph. Quetin a mesuré au seau le débit du tuyau s'écoulant entre les 2 sites, et l'a relié à la hauteur d'eau du Mercube.
Ceci a permis d'établir la relation suivante, résultat d'une 15aine de jaugeages, essentiellement faits sur de petits débits .

$$Q_{tuyau}\ (m^3/s) = 0{,}00026\ x^3 + 0{,}00071\ x^2 - 0{,}07307\ x + 0{,}79827$$

Avec x, la hauteur d'eau du Mercube en cm.

Compte tenu de la configuration du site **(figure 16),** la courbe est extrapolée pour les débits correspondant à des hauteurs d'eau du Mercube supérieures à 35 cm ainsi que pour celles inférieures à 8 cm.

Graph 2 : Courbe de jaugeages : débit du tuyau mesuré en fonction de la hauteur de Mercube.



Ce débit doit être ajouté à celui mesuré au 2ème seuil afin de prendre en compte la totalité de l'eau écoulée à l'exutoire.

I.6. TRADUCTION DES HAUTEURS EN DEBITS A L'AIDE DU LOGICIEL HYDRACCESS©

I.5.1 Présentation du logiciel et de ses fonctionnalités.

Hydraccess© est un logiciel de gestion et de traitements des données hydro-météorologiques. Il permet d'importer, de stocker et de visualiser divers types de données hydrologiques.
Il peut également réaliser un certains nombre de traitements de base tels que la traduction des hauteurs d'eau en débits, l'analyse des événements de crues ou encore l'étude des relations pluies-débits…
Hydraccess© a été développé par un hydrologue de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), Philippe Vauchel, et ne cesse d'évoluer depuis 2000.
Disponible en téléchargement libre, il est la propriété de l'IRD et de P. Vauchel qui se dégagent de toutes responsabilités en cas de mauvais fonctionnement.

I.5.2 Exemple d'une chronique de débits.

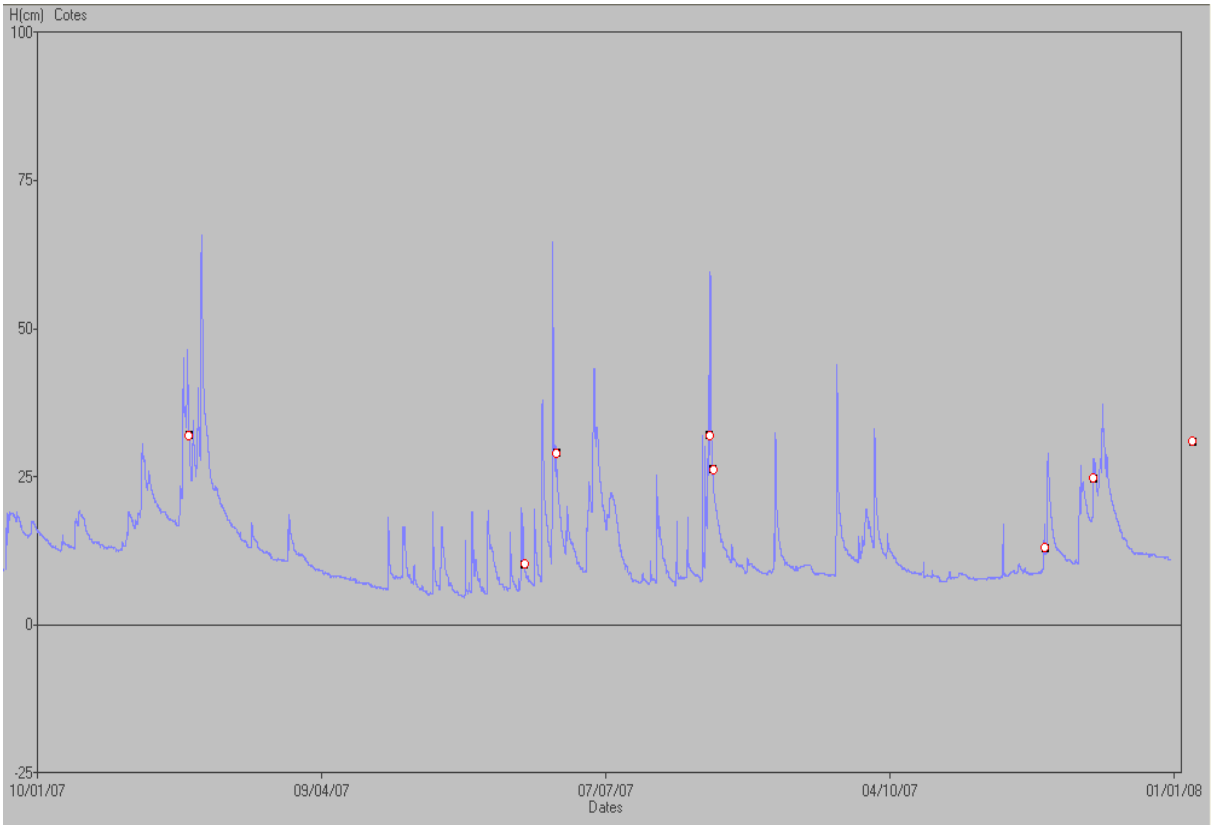


Figure 21 bis : chronique de débit étudiée avec Hydraccess, les cercles rouges représentent les points de jaugeage.

II. ÉTUDE DE LA STATIONNARITÉ DES DONNÉES HYDROLOGIQUES _ MÉTHODES GRAPHIQUES_

Les méthodes qui suivent sont applicables à un grand nombre de données environnementales, et plus précisément à celles relatives à l'hydrologie telles que les débits ou les précipitations. Elles visent à identifier et à analyser ensuite les ruptures de stationnarité, d'homogénéité ou de tendance générale des séries de données.

II.1. TECHNIQUES DE DÉTECTION DES RUPTURES D'HOMOGENEITE.

II.1.1. La méthode du simple cumul.

On cherche par cette méthode à tester l'organisation temporelle des données. Elle est couramment utilisée en hydrologie quand on veut contrôler des séquences en monovariable, alors qu'on ne dispose que d'une seule série de valeurs.
On porte en abscisses le temps écoulé k, et en ordonnées le cumul des valeurs correspondantes Y_k.

$$Y_k = \sum_{i=1}^{k} xi$$

Le principe consiste à supposer que, si les données restent stables dans le temps, les points de mesure oscillent de part et d'autre de la droite qui joint le premier point au dernier de la série. Si par contre, ils se répartissent selon plusieurs segments de droite, on peut l'interpréter comme le signe de séquences (sèches ou humides), ou comme une dérive de l'appareil de mesure (déplacement, changement de matériel….) soit dans tous les cas comme une rupture de stationnarité des données dans le temps.

II.1.2. Le double cumul.

Le principe de la méthode consiste à vérifier la proportionnalité des valeurs mesurées entre deux stations. L'une des stations (station X) est la station de base ou station de référence, supposée correcte. L'autre station (Y) est la station à contrôler. Un effet de lissage est obtenu en comparant, au pas de temps choisi (année, saison, mois, décade), non pas les valeurs observées, mais leur cumul. La méthode est d'un concept extrêmement simple, puisqu'il suffit de tracer un graphe des quantités :

$$X(t) = \sum_{i=0}^{t} x(i) \quad \text{et} \quad Y(t) = \sum_{i=0}^{t} y(i)$$

La méthode du double cumul a l'avantage d'être simple, bien connue de tous et très rapidement réalisable. Par contre, l'interprétation des graphes obtenus n'est pas toujours aisée et, surtout, la méthode ne propose aucune graduation en probabilité des défauts constatés: un

test, au sens statistique, est donc exclu. Enfin, si elle permet de détecter une anomalie ou une erreur, elle ne permet pas de la corriger, du moins pas directement. Après une analyse approfondie d'une situation critique constatée, une correction peut être toutefois envisagée.

II.1.3. La méthode du cumul des résidus.

La méthode du cumul des résidus, due à ***Philippe Bois*** de l'Ecole Nationale Supérieure d'hydraulique de Grenoble, est une extension de l'idée de la méthode du double cumul, à laquelle elle ajoute un contenu statistique autorisant la pratique d'un véritable test d'homogénéité.
Pour une série double de valeurs x_i (série de base) et y_i (série à contrôler), l'idée consiste à étudier, non pas directement les valeurs x_i et y_i mais le cumul des résidus e_i de la régression linéaire :

$$y_i = a_0 + a_1 x_i + \varepsilon_i \qquad \text{Ou encore :} \qquad \varepsilon_i = y_i - (a_0 + a_1 \cdot x_i) = y_i - \hat{y}_i$$

Il vient que : $\sum \varepsilon_i = 0$; Cov $(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ et $\varepsilon_i \sim$ □ $(0, \sigma_\varepsilon)$ avec $\sigma_\varepsilon = \sigma_Y \sqrt{1 - r^2}$

où r est le coefficient de corrélation linéaire entre X et Y .

Le cumul des résidus SE_k, devrait, pour une corrélation avérée entre X et Y, osciller aléatoirement autour de zéro. La présence d'une inhomogénéité se manifeste par des déviations non aléatoires autour de la valeur nulle.

Ainsi, pour un niveau de confiance 1 – α/2, le graphe des SE_k doit être inscrit dans une ellipse de grand axe n et de demi petit axe : □ $_{(1-\alpha/2)} \cdot \sigma_{SE\,(k=N/2)}$

Avec E $[SE_k] = 0$ et Var $[SE_k] = \sigma_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{K(N-K)}{N-1}}$

III. ÉTUDE DE LA STATIONNARITÉ DES DONNÉES HYDROLOGIQUES _ MÉTHODES STATISTIQUES_

Les outils statistiques décrits dans cette partie sont ceux couramment utilisés par les hydrologues, et sont généralement bien adaptés à ce type de données.
Ceci dit, pour une étude rigoureuse des chroniques, il convient de procéder par étapes, et de choisir les méthodes qui semblent le mieux convenir aux différents cas de figures qui se présentent.

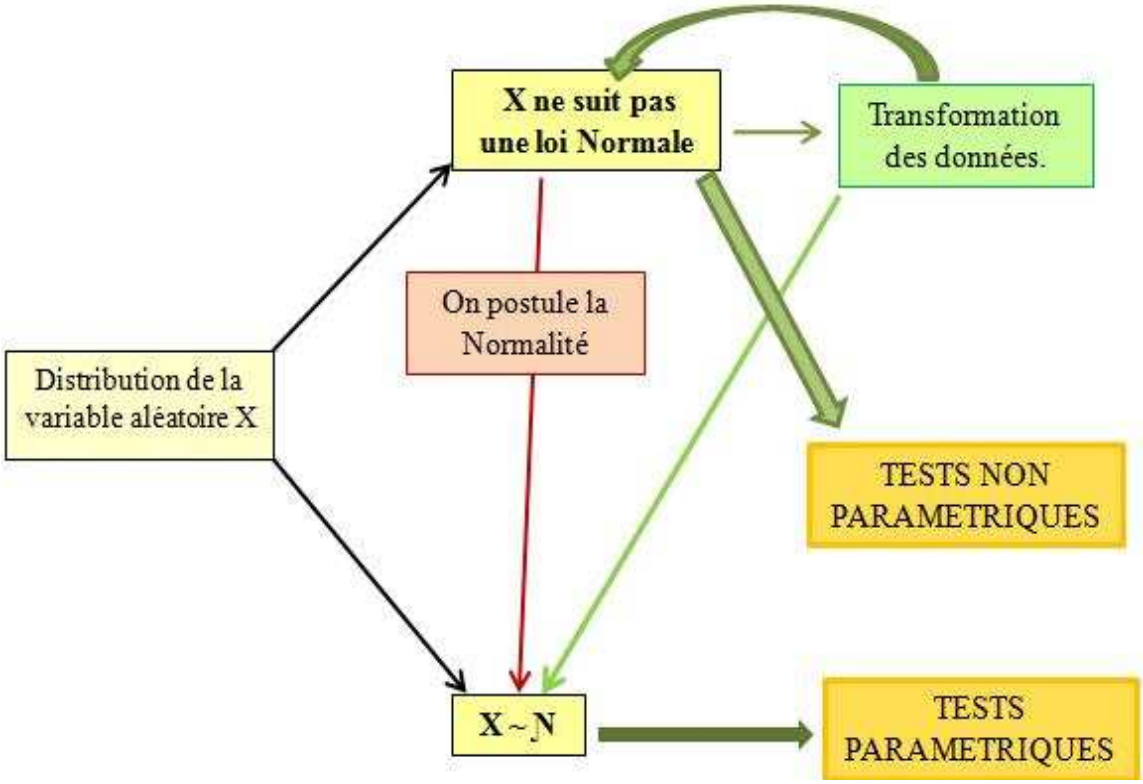


Figure 22 :représentation schématique des cas de figures rencontrés et des possibilités offertes.

III.1. CHOIX DES OUTILS STATISTIQUES: TESTS PARAMETRIQUES CONTRE TESTS NON PARAMETRIQUES.

III.1.1. Loi de distribution de la variable aléatoire X.

Test de la Normalité : Le test Shapiro-Wilks.

$$\begin{cases} H_0 : \text{la distribution mère suit une loi Normale } X \sim N(\mu, \sigma^2) \\ H_1 : X \neq N(\mu, \sigma^2) \end{cases}$$

Il repose sur la statistique : $W_n = T^2 / S^2$

En général les tests de normalité manquent de puissance, de plus il est rare de rencontrer des distributions suivant parfaitement une loi Normale.
Ainsi, il est recommandé de postuler la normalité lorsque le nombre d'observations est relativement grand (disons 30-40 pour fixer les idées), et dès lors que les histogrammes de distribution ne sont pas scandaleusement asymétriques, ne présentant pas de multi-modalité.

Encadré 1 : remarque concernant la normalité

III.1.2. La distribution de X ne suit pas une loi normale.

a). Transformation des données en vue d'obtenir une distribution normale.

On tente de transformer les données brutes par des fonctions racines, logarithmiques, exponentielles ou trigonométriques…
Si la distribution des variables transformées est à peu près symétrique, uni-modale et que le nombre d'observations est relativement grand on peut POSTULER que la distribution suit une loi normale.**(encadré 1).**
→ Tests paramétriques.

b). Le postulat de Normalité est objectivement une mauvaise approximation

→Utilisation de tests non paramétriques:

- Test de Mann et Whitney pour l'équivalent du test t.
- Test de Kruskall et Wallis pour l'analyse de variance.
- Test de Spearman pour l'étude de la corrélation linéaire.

III.1.3. La distribution de X suit une loi normale ou on postule qu'elle en suit une.

→Test de comparaison des variances : Test □

→Test de comparaison des moyennes :

- Cas 1 : Les variances théoriques , σ^2_1 et σ^2_2 sont connues : Test □
- Cas 2 : Les variances des échantillons sont inconnues mais égales : Test □
- Cas 3 : Les variances des échantillons sont différentes : ASPIN- WELCH

→ Test de Comparaison des distributions : Kolmogorov-Smirnov, Khi-2 de Pearson.

III.2. THEORIE DES TESTS STATISTIQUES DE COMPARAISON

III.2.1. Les tests paramétriques.

a). Test de comparaison des variances : Fisher ou Test F

Hypothèses à tester : $H_0 : \sigma^2_1 = \sigma^2_2$
$H_1 : \sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$

Conditions d'application: Indépendance des 2 échantillons
Distribution Normale.

Sous H_0 : $\mathbf{(S^2_1/S^2_2) \sim F^{v1}_{v2}}$

Avec : $v_1 = n_1 - 1$ et $v_2 = n_2 - 1$;
S^2_2 la plus grande variance au dénominateur.

Règle de décision : si $F_{obs} = (S^2_1/S^2_2) \geq F^{v1}_{v2}\ (1-\alpha/2) \rightarrow$ on rejette H_0 au risque α.

b). Tests de comparaison des moyennes

(i) Les variances, σ^2_1 et σ^2_2 sont connues : Test □

Ce cas est extrêmement rare car il est difficile de connaitre les variances dans une population. Il revient à faire un test Z, $D \sim N(\mu_1 - \mu_2, \sigma^2_D)$ avec $\sigma^2_D = \sigma^2_1 / n_1 + \sigma^2_2 / n_2$

Hypothèses à tester : $H_0 : \mu_1 = \mu_2$
$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$

Soit : $D = \overline{X_1 - X_2}$
$E[D] = \mu_1 - \mu_2$
$V[D] = \sigma^2_D = \sigma^2 (1/n_1 + 2/n_2)$
$D \sim N(\mu_1 - \mu_2, \sigma^2_D)$

Sous Ho : $D \sim N(0, \sigma^2_D)$
$D/\sigma_D \sim N(0, 1)$

Règle de décision : si $|d/\sigma_D| \geq u_{(1-\alpha/2)} \rightarrow$ on rejette H_0 au risque α
$(d = m_1 - m_2)$

(ii) Les variances des échantillons sont inconnues mais égales : Test □

On peut effectuer un test de Student, ou test t « classique », les deux échantillons étant indépendants.

Hypothèses : $H_0 : \mu_1 = \mu_2$
$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$

Soit : $D = \overline{X_1 - X_2}$
$E[D] = \mu_1 - \mu_2$
$V[D] = \sigma^2_D = \sigma^2 (1/n_1 + 2/n_2)$
$\sigma'^2_D = [(n_1-1).s'^2_1 + (n_2-1).s'^2_2] / (n_1+n_2-2)$

Sous Ho : $D/\sigma'_D \sim t_{\nu = n1 + n2 - 2}$

Règle de décision : si $|d/\sigma'_D| \geq t_{\nu = n1 + n2 - 2}(1-\alpha/2)$ → on rejette H_0 au risque α
$d = m_1 - m_2$

(iii) Les variances sont différentes (ASPIN- WELCH).

On applique la même procédure mais dans la relation qui donne σ^2_D on remplace σ^2_1 et σ^2_2 par leur estimation :

$$\sigma'^2_D = s'^2_1/n_1 + s'^2_2/n_2$$

Sous Ho : $D/\sigma'_D \sim t_\nu$
$1/\nu = [1/(n_1-1)].[(s'^2_1/n_1)/\sigma'^2_D]^2 + [1/(n_2-1)].[(s'^2_2/n_2)/\sigma'^2_D]^2$

Règle de décision : si $|d/\sigma'_D| \geq t_\nu(1-\alpha/2)$ → on rejette H_0 au risque α

c). Test de comparaison des distributions

i) Le test de Kolmogorov-Smirnov.

ii) Le test du Khi-2 de Pearson.

III.2.2. Tests non paramétriques pour 2 échantillons indépendants.

a). Comparaison de la position : Test de la médiane.

Hypothèses : H_0 : les médianes des 2 populations coïncident.
H_1 : les médianes des 2 populations sont différentes.

Soit : M la médiane des échantillons regroupés.
a_1, le nombre d'observations > M dans l'échantillon 1
n_1-a_1, le nombre d'observations < M dans l'échantillon 1
a_2, le nombre d'observations > M dans l'échantillon 2
n_2-a_2, le nombre d'observations < M dans l'échantillon 2

Sous Ho : $T = (2a_1-n_1)^2(n_1+n_2)/n_1n_2 \sim \chi^2$ à 1 d.d.l.

Règle de décision : si $|t_{obs}| \geq \chi^2_{\nu=1}(1-\alpha)$ → on rejette H_0 au risque α

b). Test de Mann-Whitney-Wilcoxon : Test de position.

▪ Méthode fondée sur les rangs :

L'ensemble des observations des 2 échantillons sont classées par ordre croissant, et les rangs des éléments de chacun des échantillons sont additionnés séparément. Si les échantillons proviennent tous deux de la même population, nous nous attendons à un mélange équilibré d'observations de rangs faibles, moyens et forts dans chacun des échantillons. Au contraire, si les populations dont sont issus les échantillons ne diffèrent que par la position (médiane ou moyenne), nous pouvons raisonnablement nous attendre à ce que les rangs faibles dominent dans l'une des population et les rangs forts dans l'autre.

Lorsque nous fondons notre test sur les rangs, pour déterminer une région critique, nous calculons d'abord la probabilité de chaque somme de rangs, pour chacune des façons possible d'attribuer des rangs à deux échantillons de taille donnée. Nous rejetons l'hypothèse nulle si notre résultat tombe dans un ensemble de probabilité faible sous H_0 mais plus élevé sous H_1.

▪ Formules et notations :

Pour des tailles d'échantillons m et n, il existe des tables de valeurs critiques des sommes de rangs S_n et S_m , appelées statistiques de Wilcoxon, aux niveaux 5% et 1%, ainsi que pour les statistiques de Mann-Whitney : U_m et U_n.
Nous calculons donc une des deux sommes S_m ou S_n. D'une manière générale, on calcule plus facilement celle des deux qui fait intervenir, soit l'échantillon dans lequel les rangs sont les plus faibles, soit, si m et n sont très différents, l'échantillon de plus petite taille.
Les tables donnent, pour diverses valeurs de n et m, les valeurs critiques de S_n et S_m ou de :

$$\boxed{U_m = S_m - \tfrac{1}{2}\, m.(m+1) \quad \text{et} \quad U_n = S_n - \tfrac{1}{2}\, n.(n+1)}$$

Puisque $S_m + S_n$ est la somme de tous les rangs de 1 à $m + n$, soit $\frac{1}{2}.(m+n).(m+n+1)$, on vérifie facilement que : $\boxed{U_m + U_n = m.n}$, de sorte qu'il suffit de calculer un seul des deux pour obtenir à la fois U_m et U_n .

Les tables donnent pour la plus petite des deux statistiques U_m et U_n , la plus grande valeur qui permette de conclure à une différence significative.

→ Approximation pour les grands échantillons :

Lorsque les valeurs de n ou de m ne sont pas dans les tables, (soit généralement pour n ou m > 20), une approximation normale satisfaisante, prend le relais.

Hypothèses : H_0 : Il n'y a pas de différence de position entre les deux échantillons.
H_1 : Il a une différence de position entre les deux échantillons.

Sous H_0 : $Z = [U + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}.\, m.n] / (\sqrt{[(m.n.\,(m+n+1)/12]}) \sim N(0,1)$
Avec U le plus petit entre U_m et U_n .

Règle de décision : si $|Z| \geq u_{(1-\alpha/2)}$ → on rejette H_0 au risque α

c). Test de Van Der Waerden pour 2 échantillons ou plus: test de position de distribution

▪ Méthode fondée sur les scores normaux :

Ce test est fondé sur les scores de Van Der Waerden qui reposent sur les quantiles de la distribution normale d'ordres r / (m+n+1), r = 1,2 , …, (m+n).

On peut également utiliser des scores normaux fondés sur les espérances des statistiques d'ordre de la loi normale standard.
Dans un cas comme dans l'autre, les **scores ressemblent beaucoup à un échantillon d'une distribution normale** et les tests sont formulés en conséquence.

Lorsqu'il n'y a pas d'ex aequo, la symétrie implique que la moyenne des $m + n$ scores de Van Der Waerden est nulle.

Hypothèses : H_0 : Il n'y a pas de différence de distribution entre les deux échantillons.
H_1 : Il a une différence de position de distribution entre les deux échantillons.

Sous H_0 :
T= somme des scores associés à l'un des échantillons,
E[T]= 0
Var[T]= $S^2 = mn.(\sum_i w_i^2)/[(m + n-1).(m+n)]$, si w_i est le i-ème des m+n scores.
Z= T/ S ~ N (0,1)

Règle de décision : si $|Z| \geq u_{(1-\alpha/2)}$ → on rejette H_0 au risque α.

d). Test de Kruskal-Wallis : test de position.

Hypothèses : H_0 : Les échantillons suivent la même distribution
H_1 : Au moins un des échantillons suit une distribution de position différente.

e). Test d'identité de deux distributions : Test de Kolmogorov-Smirnov.

▪ Formulation et postulats :

Pour chaque valeur observée nous calculons les répartitions $S_X(x_i)$ et $S_Y(y_j)$, ainsi que les différences absolues $|S_X(z) - S_Y(z)|$ en chacune de ces valeurs observées z (= x_i ou y_i).
Pour des échantillons e taille m et n $S_X(y)$ et $S_Y(y)$ sont des fonctions en escalier avec des sauts de 1/m et 1/n respectivement.
En cas d'ex aequo dans un échantillon, la valeur du saut sur l'observation correspondante est multipliée par le nombre d'observations égales.

Hypothèses : H_0 :les deux échantillons proviennent de la même distribution.
H_1 :les échantillons proviennent de distributions ayant des repartions différentes.

Règle de décision : Le plus grand écart $|S_X(z) - S_Y(z)|$, est comparé aux valeurs critiques des tables pour des m et n donnés. Si $\sup_z |S_X(z) - S_Y(z)| \geq KS_{(m,n)}$ → on rejette H_0.

Précédemment, nous avons vu que la méthode du cumul des résidus de Bois ***(cf. II.1.3.)*** *reposait sur la régression linéaire, ce qui lui conférait d'ailleurs, une certaine puissance par rapport aux doubles cumuls. Il convient donc de décrire cette méthode statistique*

III.3. LA RÉGRESSION LINEAIRE SIMPLE.

III.3.1. Principe.

On dispose de deux variables quantitatives, X et Y, celles-ci ne jouant pas un rôle symétrique, on souhaite en expliquer une par rapport à l'autre, ou encore en prédire une grâce à l'autre, soit y = f(x), qui dans le cas de la régression linéaire revient à y = a. x+ b **(1)**

III.3.2. Modèles et estimation des paramètres.

Pour obtenir l'équation **(1)** Il nous faut postuler d'un modèle dont on estime les paramètres.

▪ Le modèle de la régression simple s'écrit : $\boxed{Y_i = \alpha + \beta\, x_i + \varepsilon_i}$ **(2)**

Avec : α et β des paramètres inconnus, β est appelé coefficient de régression.
ε_i le résidu et loi $(\varepsilon_i) \sim \square\ (0,\sigma)$; $E[\varepsilon_i] = 0$ et $Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ pour tout i, j

▪ Le modèle estimé est : $\boxed{y_i = a + b.x_i + e_i}$ **(3)**

e_i sont les résidus observés et on cherche les valeurs de a et b qui s'ajustent le mieux aux données, c'est-à-dire que les e_i soient petits ou encore que $\sum e_i^2$ minimale (critère des moindres carrés).

▪ la solution de ce problème de modélisation est :

$$\boxed{\begin{array}{l} b = Cov(x,y)/\ Var(x) \\ a = y_m - b.\ x_m \end{array}}$$

$B = [\ \sum (x_i - x_m).(Y_i - Y_m)\ ] / [\ \sum (x_i - x_m)^2]$
$A = Y_m - B\ x_m$

Avec : $E[B] = \beta$; $V[B] = \sigma^2_B$
$E[A] = \alpha$; $V[A] = \sigma^2_A$

III.3.3. Test des paramètres : coefficient de régression (β) et constante (α).

<u>Hypothèses</u> : $H_0 : \beta = 0$
$H_1 : \beta \neq 0$

<u>Statistique de test</u> : $t_{obs} = b / \hat{\sigma}_B$

<u>Sous Ho</u> : $(B/\hat{\sigma}_B) \sim t_{\upsilon=n-2}$

<u>Règle de décision</u> : si $t_{obs} > t_{\upsilon=n-2}(1-\alpha/2) \rightarrow$ on rejette H_0 au risque $(1-\alpha/2)$

▪ On construit un test analogue pour tester $\alpha = 0$ contre $\alpha \neq 0$.

III.3.4. Décomposition de la variabilité.

Comme pour toute modélisation, il importe de quantifier la part de la variabilité des données expliquée par le modèle.
Pour le point *i* on peut décomposer son écart à la moyenne générale par :

$y_i - y_m = (\hat{y}_i - y_m) + (y_i - \hat{y}_i)$ **(4)**	$\sum (y_i - y_m)^2 = \sum(\hat{y}_i - y_m)^2 + \sum(y_i - \hat{y}_i)^2$ **(5)**

(5) peut également s'écrire : $SCE^*_T = SCE_M + SCE_R$
(*SCE : Somme des Carrés des Ecarts)

$SCE_M / SCE_T = R^2$ soit le pourcentage de variabilité expliquée par le modèle.
La statistique $F_{obs} = CM^*_M / CM_R$ peut être utilisée pour tester globalement le modèle.
(*CM : Carré Moyen)

III.4. PRÉSENTATION DU LOGICIEL JMP.

JMP (John's Macintosh Product, puisqu'il a été écrit à l'origine pour le Macintosh**)** est un logiciel initialement développé par John Sall pour exécuter des analyses de statistiques simples ou complexes.
L'ensemble très complet d'outils statistiques conjoint à l'utilisation d'une interface « pointer-cliquer » permet la mise en forme, l'exploration et l'analyse des données expérimentales de façon simple et agréable. De plus, il peut fonctionner avec divers formats de données, tels que les fichiers de texte, les fichiers de Microsoft Excel, les fichiers de données SAS Institute, et les bases de données accessibles en ODBC.
Enfin, JMP est une division du SAS Institute, ce dernier ayant été co-fondé avec John Sall.
(source Wikipédia).

PARTIE 4 :RESULTATS COMMENTES

I. VÉRIFICATION, AJUSTEMENT ET VALIDATION DES DÉBITS.

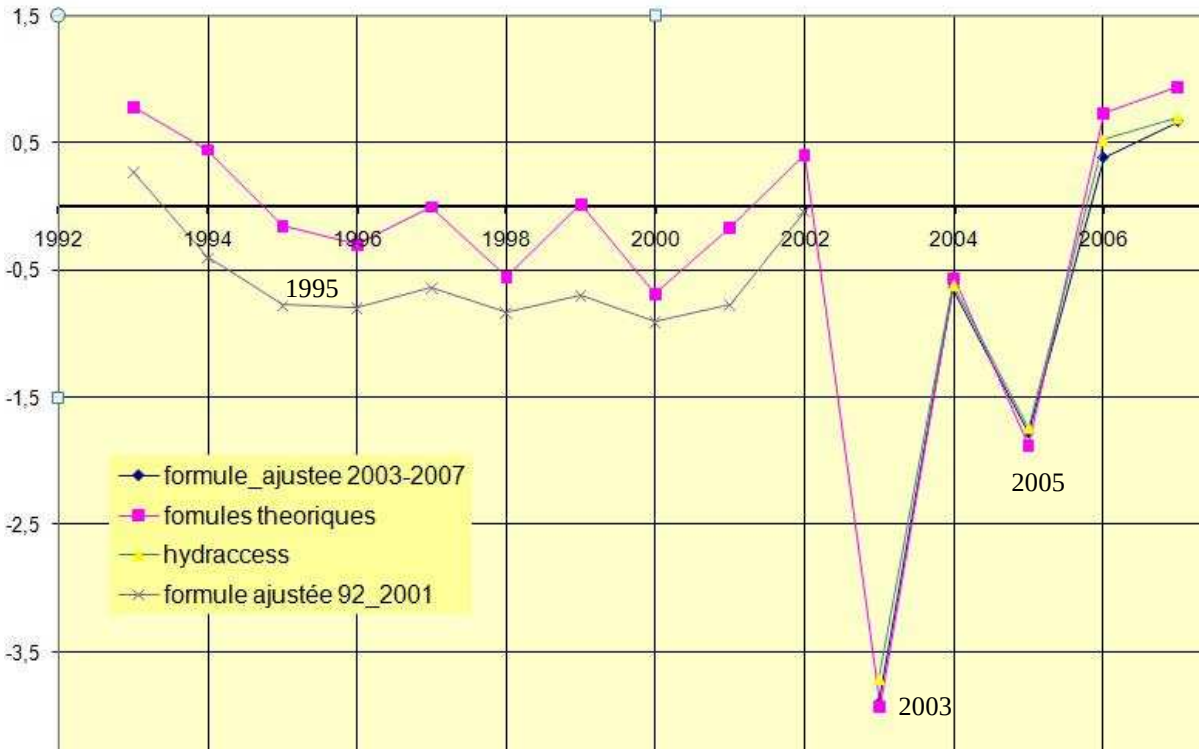
I.1. CHOIX DE LA COURBE DE TARAGE : COMPARAISON DES DÉBITS CALCULÉS À l'AIDE DU BILAN HYDROLOGIQUE AVEC CEUX MESURÉS SUR LE MERCUBE.

I.1.1. Représentation graphique.

Rappelons que l'erreur relative est le rapport $(Q_{calc.\,(i)} - Q_{obs.\,(i)})/ Q_{obs.\,(i)}$,
Avec :

$Q_{calc.\,(i)}$ le débit déduit du bilan hydrologique pour l'année i ≡ lame écoulée théorique.
$Q_{obs.\,(i)}$ le débit issu de la mesure de hauteur d'eau pour l'année i ≡ lame écoulée mesurée.

Graph 3 : Représentation graphique de l'erreur relative selon les années et les courbes de tarage utilisées pour traduire les débits.



D'une manière générale :

- Les débits mesurés sont d'autant plus proches des débits calculés, que le rapport $(Q_{calc} - Q_{obs})/ Q_{obs}$ tend vers 0.
- On observe une grande divergence en 2003, année pour laquelle quelque soit l'étalonnage utilisé, le rapport atteint des valeurs absolues d'ordre 3-4.
- L'erreur relative, $(Q_{calc} - Q_{obs})/ Q_{obs}$, affiche une large tendance à être négative sur toute la période d'étude, c'est-à-dire que $Q_{obs} > Q_{calc}$ ou encore que les débits observés à l'exutoire du Mercube sont supérieurs à ceux prédits par le bilan hydrologique (P- ETP).

▪ Si pour la première période, il apparait évident que les débits calculés à partir des formules théoriques minimisent l'erreur relative, ceci l'est beaucoup moins pour la période post 2003 où les courbes se superposent.

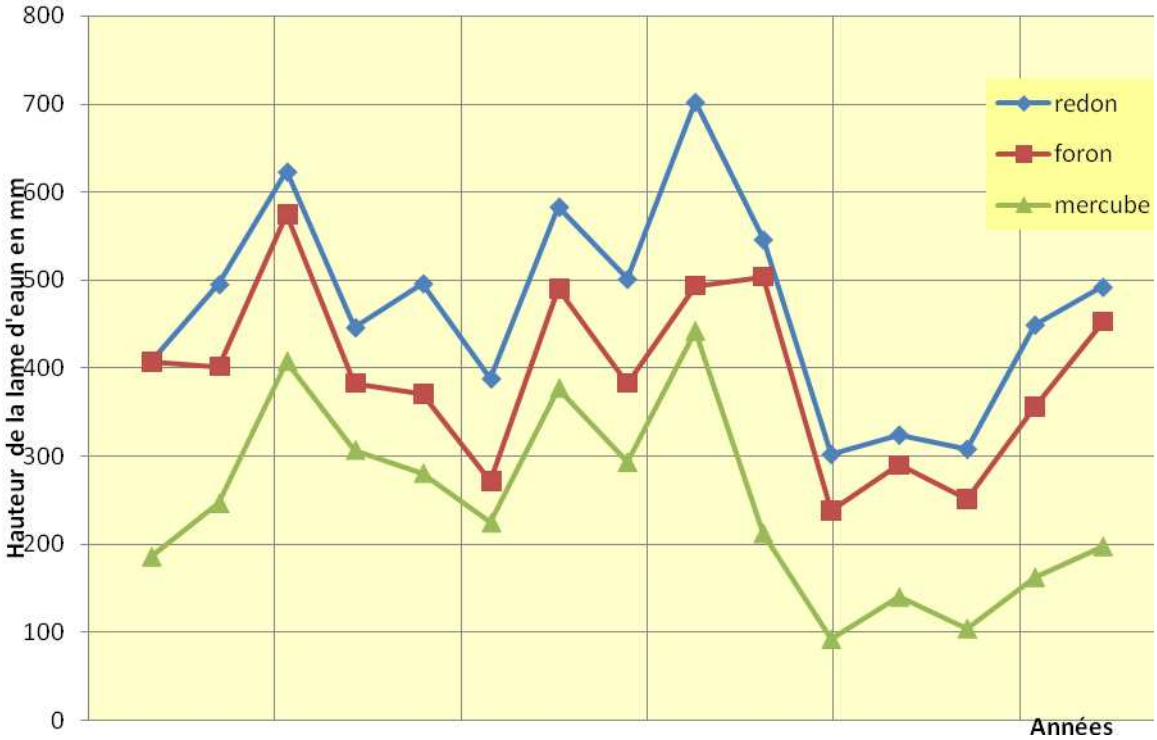
I.1.2. Évaluation par la méthode des moindres carrés et conclusion.

En plus de l'appréciation graphique que nous avons pu faire précédemment, il vient que la somme des carrés des résidus est minimale pour la courbe de tarage établie à partir des équations théoriques avant 2003, et celle ajustée avec le logiciel Hydraccess®, après 2003.
Ce sont donc ces 2 courbes de tarage que nous sélectionnerons pour traduire les hauteurs d'eau en débits.

I.2. APPRÉCIATION DES DÉBITS: COMPARAISON LAMES D'EAU ÉCOULÉES SUR LE MERCUBE AVEC CELLES DES AUTRES BASSINS VERSANTS.

I.2.1. Evolution des lames d'eau annuelles.

Graph 4: Comparaison des lames d'eau annuelles entre le Foron, le Redon et le Mercube.



La représentation graphique proposée est intéressante dans la mesure où elle nous permet de comparer intuitivement et rapidement les lames d'eau entre elles. Globalement, on constate que les courbes présentent le même profil d'évolution au cours du temps.
Même si les lames d'eau annuelles du Mercube, calculées à partir des débits mensuels moyens, semblent quelque peu sous-estimées, elles nous rassurent quant à la cohérence des débits mesurés.

I.3. DISCUSSION.

Le choix de la courbe de tarage repose sur la minimisation de l'erreur relative, $(Q_{calc}-Q_{obs})/Q_{obs}$, établie entre les débits théoriquement attendus suite au calcul du bilan hydrologique et ceux mesurés à l'exutoire du Mercube selon les différents étalonnages.
Or nous avons constaté que ce rapport était très largement négatif sur toute la période étudiée soit que $Q_{obs} > Q_{calc}$ = P-ETP.
Il est légitime de se demander si **(i)** nous sous-estimons le Q_{calc} par rapport au Q_{obs} ; si **(ii)** nous sur-estimons le débit mesuré à l'exutoire du Mercube, ou si **(iii)** nous sous-estimons le Q_{calc} par rapport au Q_{obs} et nous sur-estimons le débit mesuré à l'exutoire du Mercube.

(i) Dans le premier cas, l'explication est très simple à apporter et repose sur les lacunes et les limites de la méthode de calculs du bilan hydrologique.
En effet, nous ne disposons pas de la mesure de l'ETR, et nous approximons le bilan hydrologique par $Q_{calc} = P\text{-}ETP$ alors qu'en toute rigueur il est défini par $P\text{-}ETR$.

▪ L'ETP correspond à *la perte en eau par évaporation directe du sol et par transpiration d'un couvert végétal (fétuque de 7cm de hauteur) dense et bien alimenté en eau*. Elle a été calculée à partir de la formule de Penman **(voir annexe)** dans un laboratoire à Avignon.
Or, nous pouvons supposer que cette valeur-même de l'ETP n'est pas tout à fait exacte car l'humidité relative du sol du bassin versant n'est pas réellement prise en compte mais évaluée à distance.
▪ L'EPR, évapotranspiration réelle, est une valeur observée, toujours inferieure à l'ETP, puisqu'elle prend en compte la résistance stomatique des plantes. Elle est fonction de la quantité d'eau disponible, du pouvoir évaporant de l'air et de la capacité de rétention du sol.
Cette résistance stomatique est d'autant plus grande que le déficit hydrique important, or en assimilant le débit à P-ETP, nous le sous-estimons beaucoup puisque ETP>>ETR.
▪ Pour plus de justesse quant au calcul du bilan hydrologique il nous faut introduire la notion d'évapotranspiration maximale (ET_M) et le coefficient cultural K_c.
En effet, l'ET_M est la valeur maximale de l'évapotranspiration d'une culture donnée, à un stade végétatif donné, dans des conditions climatiques définies et prises en compte dans la mesure de l'ETP.
L'évapotranspiration maximale est définie par : $ETM = K_c \times ETP$; il s'agit donc d'une correction de l'ETP en fonction de la nature du couvert végétal et de son stade de développement. **(voir annexe)**.

A l'échelle du bassin versant, afin de minimiser l'erreur provenant de la mesure du bilan hydrologique, il faudrait approcher l'ETM plutôt que l'ETP, en tenant compte des coefficients culturaux K_c, affectés aux différents types de couvert végétal, sachant que l'occupation des sols est approximativement connue.

(ii) Dans le deuxième cas l'explication repose sur le terme **P** du bilan hydrologique, soient les précipitations. Nous avons déjà signalé les nombreuses erreurs de mesure qui pouvaient survenir, mais aussi et surtout le problème de la représentativité des pluies.

▪ Les diverses erreurs de mesures des précipitations peuvent affecter plus ou moins sérieusement le bilan hydrique, puisqu'elles constituent la principale variable d'entrée du bilan.

▪ Les pluies sur le Mercube ne sont peut être pas tout à fait celles enregistrées à la station, voire même être singulièrement différentes puisque nous n'avons pas réitéré de comparaisons depuis 10 ans, et pourtant, ce sont celles dont nous disposons pour calculer le bilan hydrique et *a fortiori* le Q_{calc}.
Il se peut donc que le pluies s'abattant sur le Mercube soient plus abondantes que celles mesurées à la station, (tendance déjà annoncé dans la thèse de Jordan-Meille), ce qui entrainerait la sur-évaluation du débit mesuré par rapport à celui attendu.

(iii) Enfin, le 3ème cas de figure, celui dans lequel nous aurions commis les 2 types d'erreurs de manière concomitante, à savoir une sous-évaluation des débits calculés et la sur-évaluation des débits mesurés sur le Mercube, est également tout à fait envisageable.

II. ÉTUDE DES PRÉCIPITATIONS.

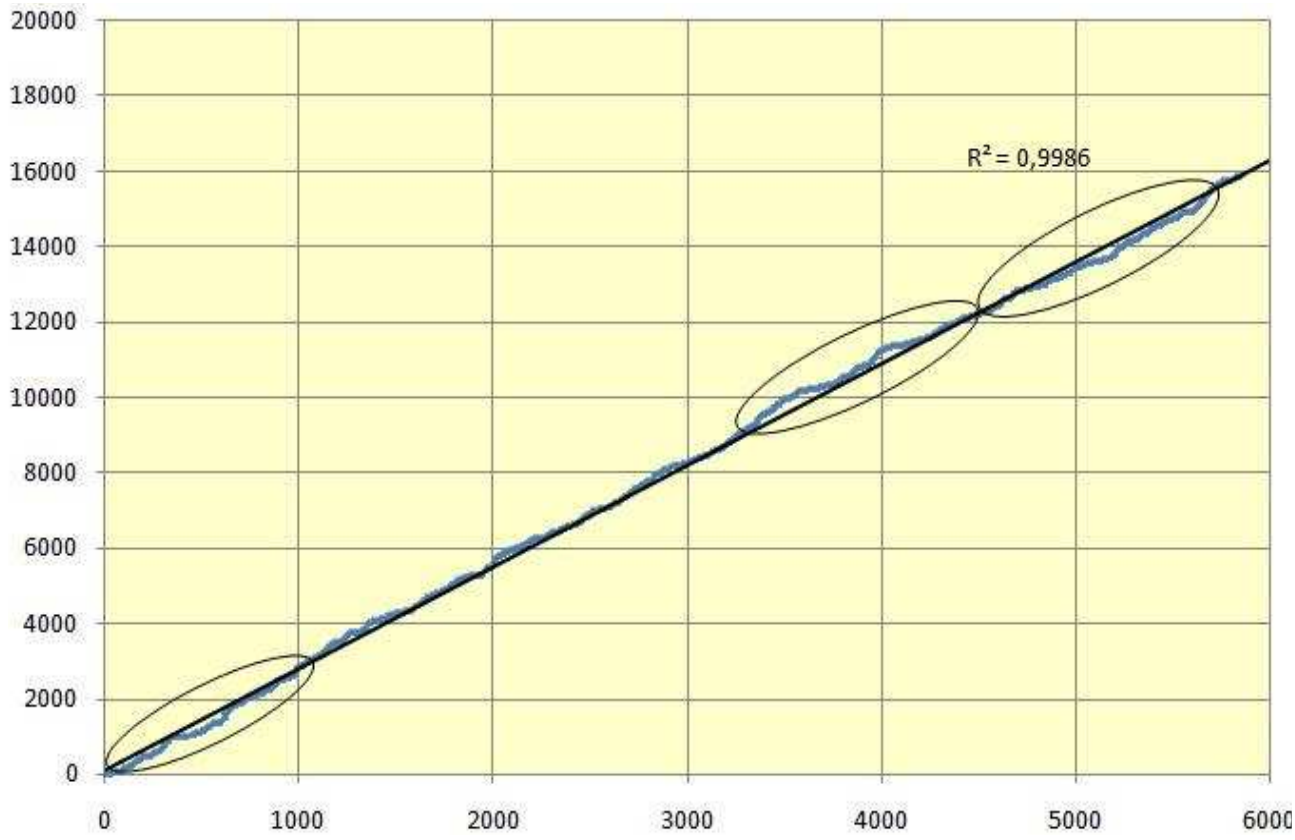
Les précipitations constituant l'unique entrée des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants, il convient de les étudier avant de poursuivre notre travail sur les débits.

Sont dénommées précipitations : « *toutes les eaux météoriques _provoquées par un changement de température ou de pression_ qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous formes solide (neige, grésil, grêle), déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...).*

II.1. ÉTUDE GRAPHIQUE DE LA STATIONNARITÉ DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES: LA MÉTHODE DU SIMPLE CUMUL.

II.1.1. Représentation graphique des précipitations cumulées. (graph 5.)

Graph 5 : Cumul des précipitations sur la période 1992-2007 (station Inra de Thonon).



II.1.2. Commentaires.

▪ La droite de régression souligne une corrélation quasi parfaite (R^2=0,9986) entre le cumul des précipitations et le temps.

▪ Les points se répartissent très bien le long de la droite et on ne peut pas considérer qu'il y aient de véritables ruptures de tendance, même s'il semble que certaines périodes dérivent légèrement.
Ainsi les années 1992-93-93, de même que 2003-04-05, paraissent un peu plus sèches, et les années 2001-02 plus humides.
Ceci dit, il ne s'agit ici que d'une première approche des données ; cette méthode n'est pas des plus précises et nous permet seulement de visualiser grossièrement les « grandes tendances d'évolution».

II.2. ANALYSE DES PRÉCIPITATIONS PAR LES OUTILS STATISTIQUES.

II.2.1. Etude de la Distribution.

Nous procéderons à une analyse intra-période, afin d'apprécier la distribution des pluies journalières au sein d'une même année et ainsi de convenir d'un test approprié.

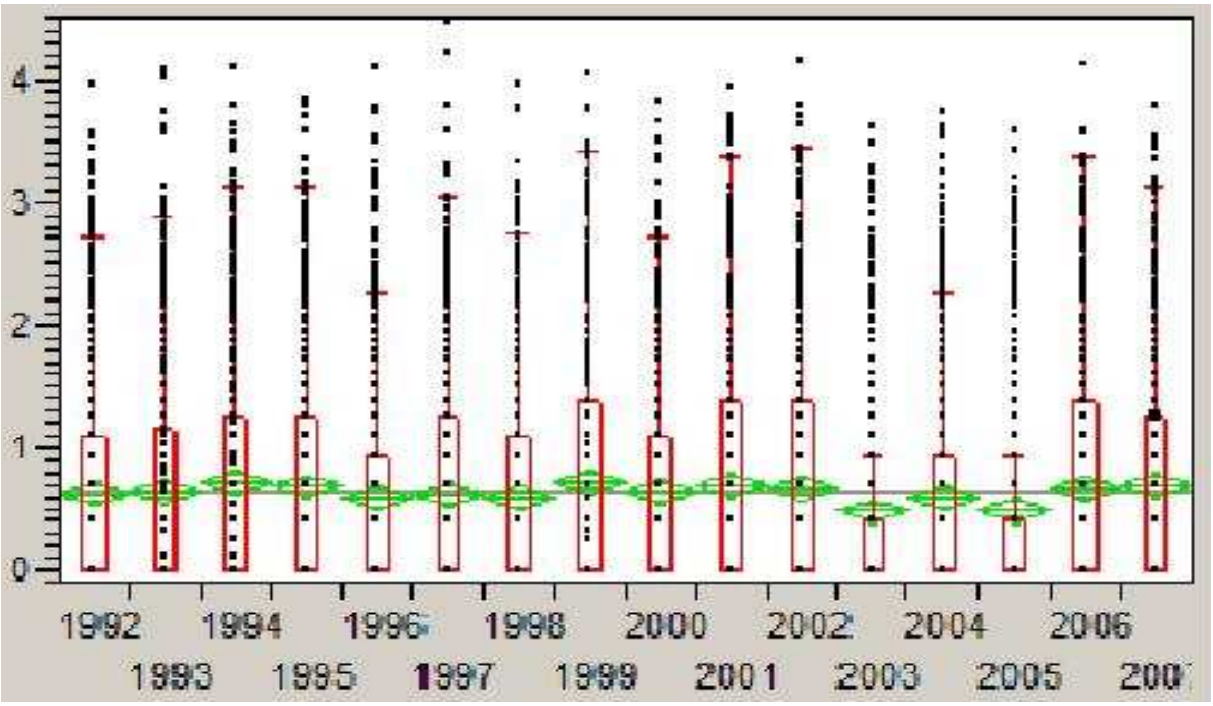


Figure 23 : Représentation graphique des pluies journalières par année (JMP) ***: box plot et diamants moyens.***

a) Echelle annuelle.

Les données sur les pluies journalières étant assez conséquentes (près de 6 000 valeurs), il est intéressant de commencer par étudier les précipitations à l'échelle annuelle.
▪ La distribution des lames précipitées suit une loi normale (950.31 ; 165.99), **(figure 24)** j'ai donc centré et réduit les données pour les replacer dans leur contexte et identifier ainsi les valeurs remarquables.**(tableau 6)**

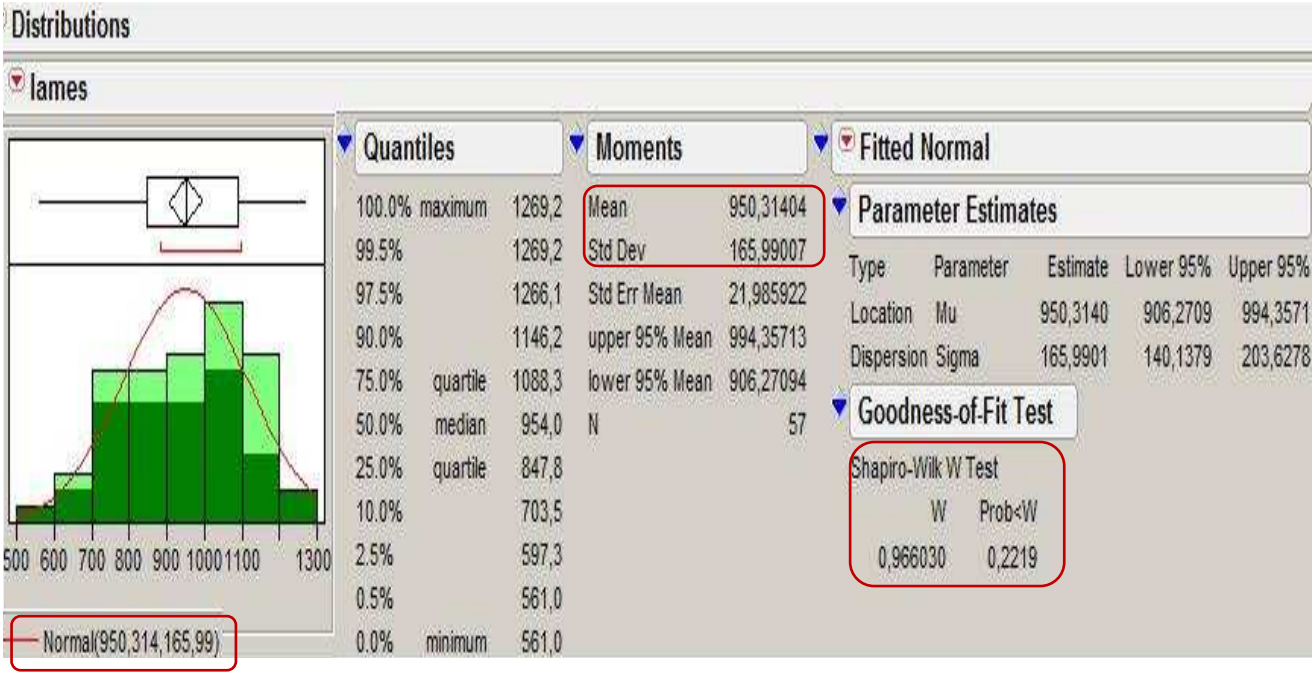


Figure 24 : Sortie Jmp, distribution des lames d'eau annuelles sur la période 1951-2007.

	Lames d'eau annuelles	Valeurs centrées-réduites
1992	993,0	0,2572
1993	1011,7	0,3698
1994	1105,9	0,9373
1995	1114,5	0,9891
1996	954,0	0,0222
1997	1012,0	0,3716
1998	855,5	-0,5711
1999	1134,6	1,1102
2000	885,6	-0,3898
2001	1168,5	1,3144
2002	1066,0	0,6969
2003	691,5	-1,5591
2004	908,5	-0,2519
2005	749,0	-1,2127
2006	1065,0	0,6909
2007	1164,5	1,2903

Tableau 6 : Table des lames annuelles et des valeurs-centrées réduites sur la période d'étude.

▪ Au seuil α = 5% , aucune valeur n'est significativement différente des autres, ($\square_{\alpha=5\%}$ = 1,96 ; $\square_{\alpha=10\%}$ = 1,64) . même si les années 2005, et surtout 2003, semblent avoir été plus sèches que les autres.
On se souvient d'ailleurs de l'année 2003 comme celle de « la grande sécheresse »

▪ 1999 et 2001 semblent au contraire, avoir été relativement plus pluvieuses.

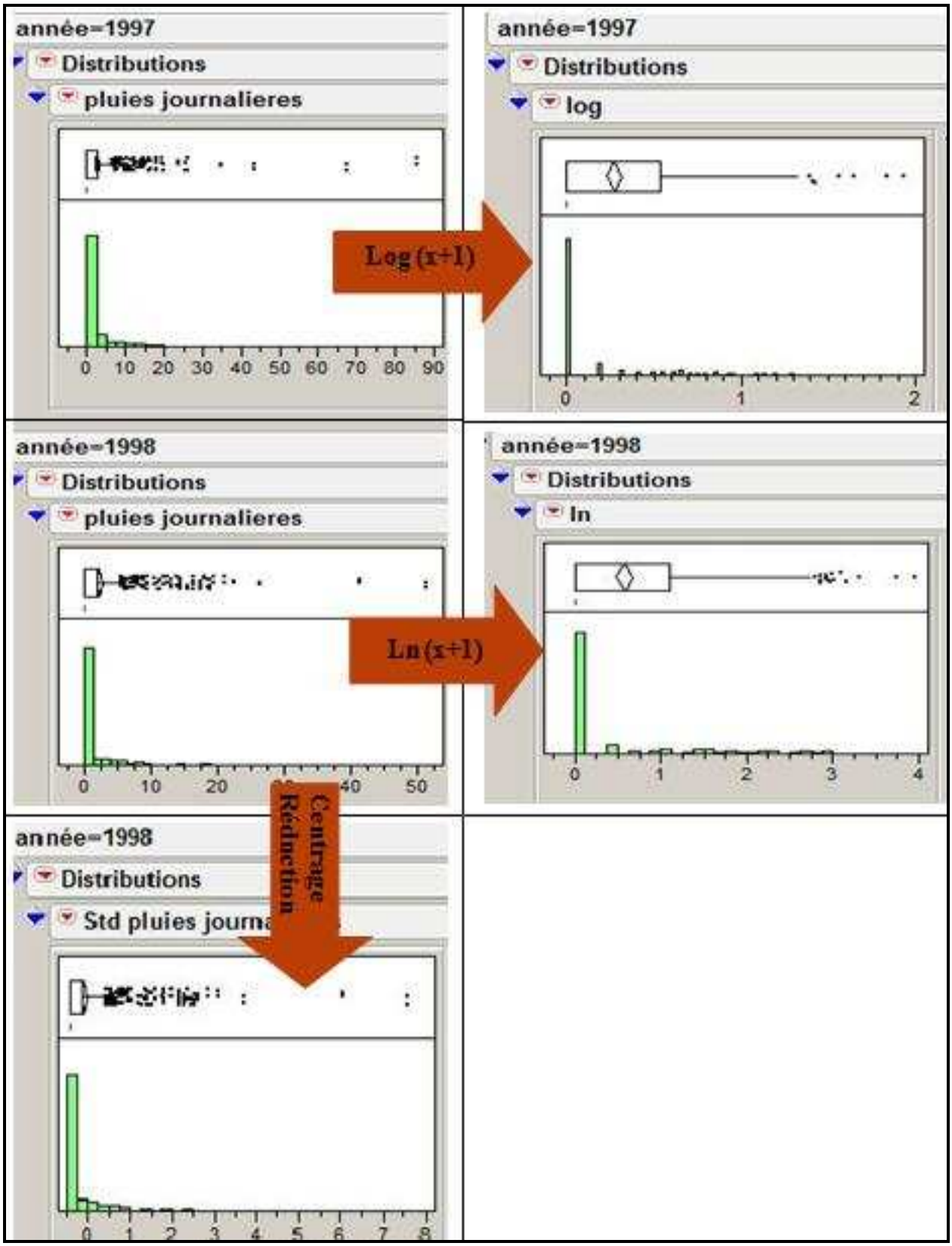
Ces différences, surtout pour les années sèches, sont aisément visualisables sur le graphe précédent **(figure23)**

Ces tendances sont cohérentes avec celles énoncées précédemment (cf. résultats du simple cumul)

b). Echelle journalière.

Les distributions, comme il est souvent le cas pour les données environnementales, ne suivent pas une loi normale.
J'ai tenté de les transformer afin qu'elles s'en approchent et qu'il soit acceptable de postuler la normalité. **(planche 3)**

PLANCHE 3 :
TRANSFORMATION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES.



La meilleure transformation est celle qui, à x associe Ln (x+1), mais les résultats peu concluants, à savoir des distributions complètement asymétriques, ne me permettent pas de faire le postulat de normalité, même si les données sont relativement nombreuses pour chaque échantillon (n = 365).
La normalité des données est une condition d'application de nombreux tests bien connus et puissants, mais il existe cependant des outils statistiques adaptés à des données dont la distribution n'est pas définie.

II.2.2. Tests de Comparaison d'échantillons indépendants.

Compte tenu des résultats précédents, j'ai donc eu recours à des tests non paramétriques.

Les résultats des tests **(figure 25),** nous permettent de conclure qu'au moins une année présente une pluviométrie différente, tant au niveau de la variance, et de la moyenne que de la distribution

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
1992	732	4244714	5798,79	-0,434
1993	730	4376427	5995,11	1,429
1994	730	4506589	6173,41	3,121
1995	730	4318011	5915,08	0,670
1996	732	4134008	5647,55	-1,872
1997	730	4230073	5794,62	-0,473
1998	730	4140127	5671,41	-1,643
1999	730	4498635	6162,51	3,018
2000	732	4347090	5938,65	0,895
2001	730	4389867	6013,52	1,604
2002	730	4400073	6027,50	1,737
2003	730	3886147	5323,49	-4,945
2004	732	4194262	5729,87	-1,090
2005	730	3997811	5476,45	-3,493
2006	730	4277905	5860,14	0,148
2007	730	4368777	5984,63	1,330

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
69,3554	15	<.0001

Median Test (Number of Points Above Median)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
1992	732	268	0,366120	-0,694
1993	730	302	0,413699	2,045
1994	730	322	0,441096	3,621
1995	730	276	0,378082	-0,005
1996	732	250	0,341530	-2,111
1997	730	270	0,369863	-0,478
1998	730	254	0,347945	-1,739
1999	730	314	0,430137	2,990
2000	732	294	0,401639	1,353
2001	730	294	0,402740	1,414
2002	730	302	0,413699	2,045
2003	730	212	0,290411	-5,049
2004	732	266	0,363388	-0,852
2005	730	238	0,326027	-3,000
2006	730	272	0,372603	-0,320
2007	730	286	0,391781	0,783

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
73,4759	15	<.0001

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
1992	732	-8,343	-0,01140	-0,373
1993	730	27,429	0,03757	1,229
1994	730	64,866	0,08886	2,907
1995	730	19,975	0,02736	0,895
1996	732	-37,012	-0,05056	-1,656
1997	730	-8,472	-0,01161	-0,380
1998	730	-39,450	-0,05404	-1,768
1999	730	64,008	0,08768	2,868
2000	732	8,855	0,01210	0,396
2001	730	40,823	0,05592	1,829
2002	730	36,591	0,05012	1,640
2003	730	-109,671	-0,15023	-4,915
2004	732	-25,004	-0,03416	-1,119
2005	730	-77,785	-0,10655	-3,486
2006	730	7,400	0,01014	0,332
2007	730	35,791	0,04903	1,604

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
67,1014	15	<.0001

Figure 25 : Sortie JMP des tests non paramétriques effectués sur toute la période 92-2007.

Pour identifier la ou les années qui se singularisent, je me suis appuyée sur les résultats précédents, à savoir l'utilisation des données centrées-réduites des lames d'eau annuelles :

_ 2003, étant une année plus extrême que les autres (-1,56), j'ai effectué les mêmes tests mais en l'excluant de l'échantillon. **(figure 26)**
_J'ai suivi la même démarche pour les années qui semblaient se distinguer des autres (1999,2001 et 2005) **(planche 3, figure 1)**

_ Et enfin, procédé par couple d'années. **(figure 27)** et **(planche 3, figure 2)**

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
1992	366	989119,5	2702,51	-0,536
1993	365	1019761	2793,87	0,769
1994	365	1050332	2877,62	1,966
1995	365	1006376,5	2757,20	0,246
1996	366	963139,5	2631,53	-1,552
1997	365	985625	2700,34	-0,566
1998	365	964580,5	2642,69	-1,390
1999	365	1048587	2872,84	1,897
2000	366	1012920,5	2767,54	0,394
2001	365	1023132,5	2803,10	0,901
2002	365	1025429	2809,39	0,991
2004	366	977145,5	2669,80	-1,004
2005	365	931017	2550,73	-2,703
2006	365	997001,5	2731,51	-0,121
2007	365	1018293	2789,84	0,712

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
22,2645	14	0,0733

Median Test (Number of Points Above Median)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
1992	366	134	0,366120	-0,728
1993	365	151	0,413699	1,207
1994	365	161	0,441096	2,321
1995	365	138	0,378082	-0,241
1996	366	125	0,341530	-1,730
1997	365	135	0,369863	-0,575
1998	365	127	0,347945	-1,466
1999	365	157	0,430137	1,875
2000	366	147	0,401639	0,718
2001	365	147	0,402740	0,761
2002	365	151	0,413699	1,207
2004	366	133	0,363388	-0,840
2005	365	119	0,326027	-2,357
2006	365	136	0,372603	-0,464
2007	365	143	0,391781	0,316

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
23,8464	14	0,0478

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
1992	366	-7,7704	-0,02123	-0,492
1993	365	9,9903	0,02737	0,633
1994	365	28,7016	0,07863	1,818
1995	365	6,3284	0,01734	0,401
1996	366	-22,1205	-0,06044	-1,399
1997	365	-7,9766	-0,02185	-0,505
1998	365	-23,2774	-0,06377	-1,474
1999	365	28,3135	0,07757	1,793
2000	366	0,7646	0,00209	0,048
2001	365	16,6825	0,04571	1,057
2002	365	14,5882	0,03997	0,924
2004	366	-16,1412	-0,04410	-1,021
2005	365	-42,4675	-0,11635	-2,690
2006	365	0,1149	0,00031	0,007
2007	365	14,2695	0,03909	0,904

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
21,2576	14	0,0952

Figure 26: sortie JMP, tests de comparaison sans l'année 2003

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
1992	366	918765	2510,29	-0,723
1993	365	947093,5	2594,78	0,570
1994	365	975528	2672,68	1,762
1995	365	935008	2561,67	0,064
1996	366	894484,5	2443,95	-1,739
1997	365	915400	2507,95	-0,758
1998	365	895804	2454,26	-1,579
1999	365	974033,5	2668,58	1,699
2000	366	940633,5	2570,04	0,192
2001	365	950370,5	2603,75	0,707
2002	365	952428,5	2609,39	0,794
2004	366	907382	2479,19	-1,200
2006	365	926182	2537,48	-0,306
2007	365	945942	2591,62	0,522

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
14,7729	13	0,3217

Median Test (Number of Points Above Median)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
1992	366	134	0,366120	-0,897
1993	365	151	0,413699	1,039
1994	365	161	0,441096	2,154
1995	365	138	0,378082	-0,410
1996	366	125	0,341530	-1,899
1997	365	135	0,369863	-0,744
1998	365	127	0,347945	-1,635
1999	365	157	0,430137	1,708
2000	366	147	0,401639	0,550
2001	365	147	0,402740	0,593
2002	365	151	0,413699	1,039
2004	366	133	0,363388	-1,009
2006	365	136	0,372603	-0,632
2007	365	143	0,391781	0,148

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
18,2164	13	0,1495

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
1992	366	-10,7091	-0,02926	-0,678
1993	365	6,9163	0,01895	0,438
1994	365	25,4924	0,06984	1,615
1995	365	3,4326	0,00940	0,217
1996	366	-25,0889	-0,06855	-1,587
1997	365	-10,9513	-0,03000	-0,694
1998	365	-26,1854	-0,07174	-1,659
1999	365	25,1789	0,06898	1,595
2000	366	-2,3244	-0,00635	-0,147
2001	365	13,5761	0,03719	0,860
2002	365	11,4734	0,03143	0,727
2004	366	-19,1768	-0,05240	-1,213
2006	365	-2,8112	-0,00770	-0,178
2007	365	11,1774	0,03062	0,708

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
13,8352	13	0,3856

Figure 27: sortie JMP, tests de comparaisons sans l'année 2003 ni 2005.

Pour plus de clarté, j'ai choisi de synthétiser la démarche de travail et l'interprétation des tests de comparaison avec les années retirées sous forme de tableau **(figure 28)** :

Seule 1999 est retirée de la série : les tests de comparaison montrent qu'au moins une année diffère des autres en ce qui concerne la variance, la distribution et la moyenne.
1999 n'est donc pas significativement différente des autres années quant à ses paramètres pluviométriques.

Paramètres singulière-ment différents. (x : aucun).

Quand on n'exclut que 2003 de la chronique, variance et distribution sont identiques pour toute la série :
2003 se distingue donc significativement des autres années par sa variance et sa distribution. **(figure 26)**.

Années pluviométriques retirées, simultanément ou successivement, de la série de données.

	1999	2001	2003	2005
1999	**x**			
2001	x	x		
2003	σ^2; distribution	σ^2; distribution	**σ^2; distribution**	
2005	x	x	σ^2; μ; distribution	x

L'année 2005 n'est pas significativement différente des autres en ce qui concerne son profil pluviométrique.
(planche 3, figure1)

2005 et 2003 sont conjointement retirées de la chronique :

Aucune année pluviométrique ne diffère des autres quant à sa variance, sa moyenne ou encore sa distribution. **(figure 27)**
L'ensemble des valeurs du couple 2003-2005 ont une moyenne de pluies différente des autres années.

Finalement, sur toute la période d'étude (1993-2007) du bassin versant du Mercube, les pluies journalières sont stationnaires et homogènes.
Il n'y a que l'année 2003 qui se distingue des autres, de par la variance et la distribution de ses pluies journalières.

Ces résultats sont en adéquation avec ceux obtenus à l'échelle annuelle, puisque les lames d'eau précipitées ne reflètent ni la variance ni la distribution des pluies à l'échelle de la journée, mais seulement un volume global qui semblait seulement être inferieur aux autres sans être significativement différent.

Figure 28 : tableau de synthèse des résultats des tests de comparaison réalisés sur les données pluviométriques journalières.

II.3 COMMENTAIRES ET DISCUSSION.

II.3.1. La représentativité des pluies du Mercube.

En plus des erreurs de mesure imputables au matériel d'enregistrement, des erreurs d'appréciation ou de manipulation, revient encore la question de la représentativité des pluies.
En effet, bien que la thèse de Jordan-Meille (1998) stipule que les données météorologiques, notamment les pluies journalières, provenant de la station de L'INRA de Thonon soient comparables à celles mesurées sur le bassin versant du Mercube, on en vient tout de même à s'interroger quant à la véracité de ces informations 10 ans plus tard.
Dans quelle mesure les précipitations sont-elles comparables, sachant que lui-même préconise de « cadrer » les données ?
Je n'ai eu aucune source à ma disposition concernant les données pluviométriques qui avaient été relevées sur le Mercube à cette période, je n'ai donc pu procéder à cet étalonnage.

II.3.2. Le simple cumul.

Le simple cumul, bien qu'il s'agisse d'une méthode peu exigeante et facile à mettre en œuvre, n'est pas d'une très grande précision. Elle permet seulement de visualiser graphiquement d'éventuels changements de tendance, sans pour autant les apprécier d'un point de vue statistique.
Nous verrons par la suite que d'autres méthodes sont plus puissantes telles que le cumul des résidus de Bois mais celles-ci nécessitent une autre série de « valeur-témoins » (qu'il serait opportun de se procurer….)

II.3.3. Les tests statistiques.

N'ayant pas réussi à transformer les valeurs de manière à ce qu'elles s'approchent raisonnablement d'une loi normale, j'ai utilisé les outils statistiques en ma possession à savoir le test de Wilcoxon pour les comparaisons de variance, le test de la médiane pour les moyennes, et enfin le test de Van der Waerden pour les distributions.
Ces tests étaient disponibles sur le logiciel jmp, mais je pense que pour la comparaison des distributions le test de Kolmogorov-Smirnov ou le test de Kruskall Wallis (à partir de 3 échantillons) auraient pu être plus puissants.
Malheureusement je n'ai pas eu le temps de les mettre en œuvre même si je les ai décrits dans la partie méthodologie.
En conséquence, la méthode à laquelle j'ai eu recours[1] est loin d'être élégante ou puissante, pour ne pas dire lourde et incomplète…J'ai raisonné par déduction à partir des éléments que j'avais en ma possession et tenté de répondre avec les outils les plus appropriés et auxquels j'avais accès.

[1] Enlever les années une à une, les remettre, puis les exclure par couple ou groupe, et réitérer les tests à chaque fois pour déterminer quelle(s) année(s) est(sont) sensiblement différente(s) des autres.

III. ÉTUDE DE LA STATIONNARITÉ DES DÉBITS (1)
-LE CHANGEMENT DE SEUIL-

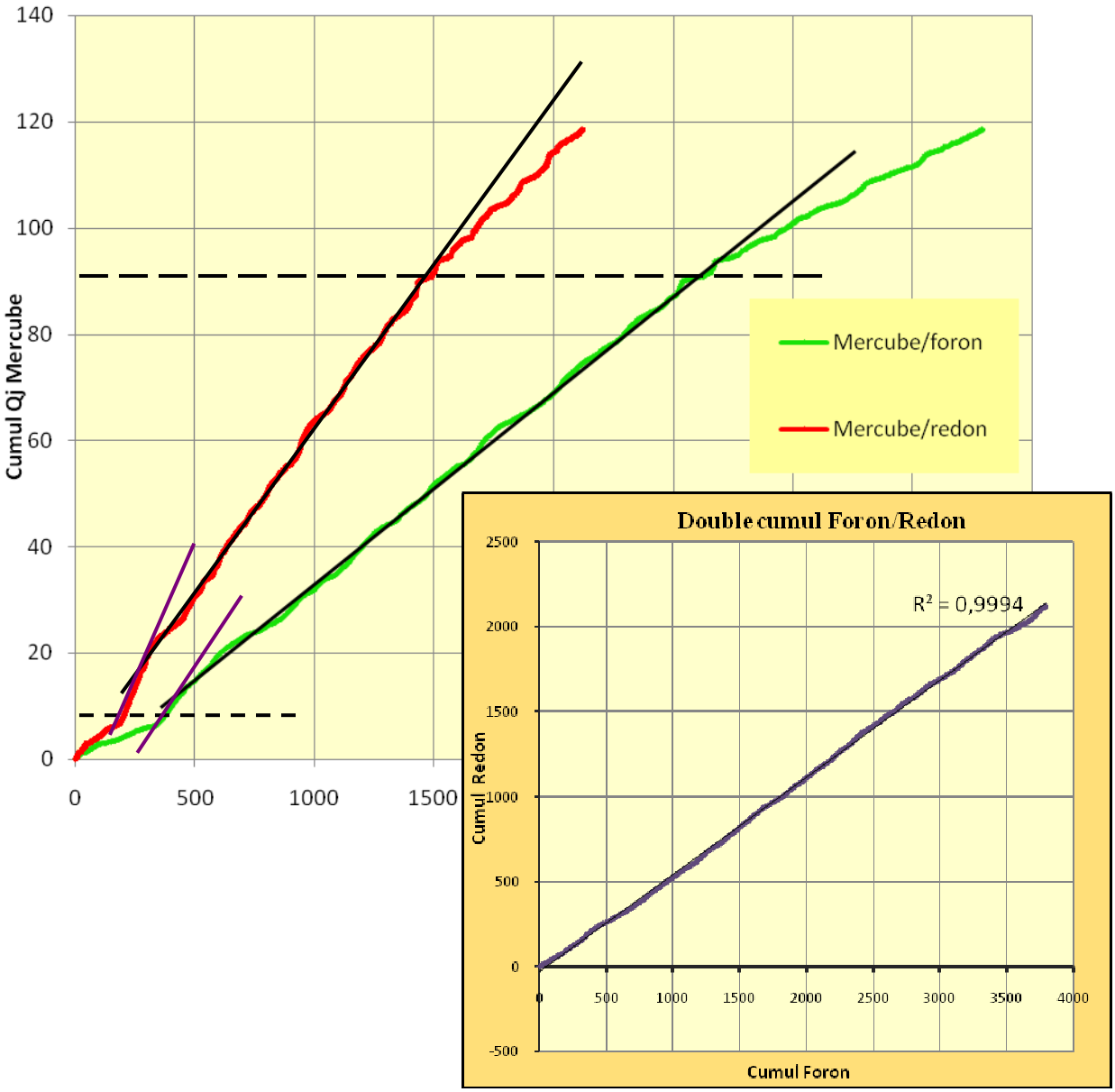
Les hauteurs d'eau ayant été traduites avec la courbe de tarage la plus appropriée, il convient maintenant d'étudier la stationnarité des données sur toute la période, à l'aide des méthodes exposées précédemment.

III.1. COMPARAISON DES DÉBITS DU MERCUBE AVEC UNE STATION DE RÉFÉRENCE.

Nous cherchons à confronter les débits du Mercube à ceux du Foron et du Redon que nous supposerons fiables.

III.1.1. Comparaison par la méthode des doubles cumuls.

Graph 7 : Méthode des doubles cumuls appliquée aux débits journaliers du Redon, Foron et Mercube afin d'en en vérifier la stationnarité



▪ Le double cumul établi entre les débits journaliers du Redon et du Foron, nous permet de confirmer que ces bassins versants ont de très grandes similitudes de comportement et de fonctionnement (R^2 = 0,999). Nous pouvons donc choisir l'un l'autre des bassins comme référence.

▪ Par ailleurs, on constate que les débits du Mercube sont légèrement inférieurs à ceux du Foron et Redon pour les années 1993-1994, et que les 2 courbes de cumuls accusent une rupture de tendance est très visible. En effet, la pente de la tangente change aux points de coordonnées (2675 ; 93) et (1510 ; 93), points qui correspondent à la date du changement de seuil.

▪ Il semble donc que les débits du Mercube soient systématiquement sous-estimés à partir des changements de matériel et de site de mesure, ce qui conduit inéluctablement à une rupture de stationnarité.

	Date	Qj Mercube	Cumul Mercube	Qj redon	Cumul Redon	Qj foron	Cumul Foron
3325	11/11/2002	0,2110	92,7270	1,91	2670,982	0,929	1508,242
3326	12/11/2002	0,3910	92,9380	1,7	2672,892	0,869	1509,171
3327	13/11/2002	0,2870	93,3290	1,24	2674,592	0,796	1510,040
3328	20/03/2003	0,0050	93,6160	0,327	2675,832	0,256	1510,836
3329	21/03/2003	0,0050	93,6210	0,321	2676,159	0,250	1511,092
3330	22/03/2003	0,0050	93,6260	0,316	2676,48	0,244	1511,342

Tableau 7: Extrait *Excel* mettant en évidence le changement de seuil au moment de la rupture de stationnarité des débits du Mercube.

III.1.2. Etude par la méthode du cumul des résidus.

a) Régression linéaire : estimation des débits journaliers du Mercube par ceux du Foron, tests du modèle et des paramètres.

QJ mercube = -0,002867 + 0,0350485 QJ foron

Summary of Fit

RSquare	0,602125
RSquare Adj	0,602046
Root Mean Square Error	0,030349
Mean of Response	0,02343
Observations (or Sum Wgts)	5058

Lack Of Fit

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	1	7,047729	7,04773	7651,504
Error	5056	4,657034	0,00092	Prob > F
C. Total	5057	11,704762		0,0000

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	-0,002867	0,000522	-5,49	<.0001
QJ foron	0,0350485	0,000401	87,47	0,0000

Estimation du modèle de régression linéaire, celui dont les paramètres α et β minimisent le cumul des résidus.

Le débit du Foron explique plus de 60% de la variabilité du modèle . (R^2=0,602= 0,776²)
Sachant que N= 5058, le coefficient de corrélation est significatif (tables)

Le test global du modèle indique qu'au moins un des paramètres est significativement différent de 0. (statistique $F_{obs} = CM_M/CM_F$)

Le coefficient de régression et la constante sont significatifs.

Figure 29 : sortie jmp du modèle de régression linéaire. Les *débits journaliers du Mercube* est la variable à prédire en fonction de ceux du Foron.

b) Représentation graphique du cumul des résidus et du test de l'ellipse.

Graph 10: Méthode du cumul des résidus de Bois (1971) et test de l'ellipse.
Appréciations graphique et statistique de l'homogénéité des débits journaliers du Mercube.

De part sa construction, pour que la chronique de débits du Mercube soit considérée comme stationnaire, l'ellipse doit contenir 95% des valeurs (N= 5058 et σ_ε= 0,037), qui doivent se répartir de manière aléatoire autour de 0. Ainsi plus de 250 points peuvent se trouver à l'extérieur par le « simple fait du hasard ».
Nous sommes ici très loin de cette situation, car quasiment l'ensemble de la chronique se trouve être hors de l'ellipse, il y a donc des ruptures de stationnarité et d'homogénéité significatives.

On constate effectivement qu'il y a 2, voire 3 périodes distinctes : *1993-1994*, comme nous l'avions prédit par la méthode des doubles cumuls, ainsi que *1995-2003* et *2003-2007*.
Il est impressionnant de constater combien cette technique est précise et efficace par rapport à celle des doubles cumuls par exemple. En effet, le point qui correspond au changement brutal de pente, et à la rupture d'homogénéité n'est autre que le point du 13 novembre 2002 (point n° 3327), soit celui du changement de site de mesure !

3325	0,14692465	8,79098037	11/11/2002
3326	0,33428484	9,12526521	12/11/2002
3327	0,24640716	9,37167237	13/11/2002
3328	-0,0035935	9,36807887	20/03/2003
3329	-0,0033832	9,36469567	21/03/2003
3330	-0,003208	9,36148767	22/03/2003

Figure 30 : (extrait Excel), tableau du cumul des résidus montant que le point de rupture correspond au changement de seuil de 2003 suite à la crue.

III.1.3. Recherche du type d'anomalie.

Afin d'essayer de préciser le type d'anomalie qui a pu engendrer cette rupture singulière et ces deux grandes périodes : « avant » / « après » le changement de seuil, je propose d'analyser les coefficients de la régression linéaire ainsi que les constantes sur ces deux phases bien distinctes, en ayant au préalable exclu de la série, les années 93-94, qui risqueraient de fausser la relation.

a). Etude globale des modèles.

Linear Fit

débits Mercube = -0,00347 + 0,0406012 débits Foron

Summary of Fit

RSquare	0,652471
RSquare Adj	0,652342
Root Mean Square Error	0,033351
Mean of Response	0,030178
Observations (or Sum Wgts)	2691

Lack Of Fit

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	1	5,6155053	5,61551	5048,492
Error	2689	2,9910105	0,00111	Prob > F
C. Total	2690	8,6065157		0,0000

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	-0,00347	0,000799	-4,35	<.0001
débits Foron	0,0406012	0,000571	71,05	0,0000

Figure 31 : Sortie jmp, modèle de régression linéaire sur la période 95-2002 : <u>avant le changement de seuil</u>

Linear Fit

débits Mercube = -0,005634 + 0,0309542 débits Foron

Summary of Fit

RSquare	0,67118
RSquare Adj	0,670989
Root Mean Square Error	0,021733
Mean of Response	0,014381
Observations (or Sum Wgts)	1731

Lack Of Fit

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	1	1,6669002	1,66690	3529,188
Error	1729	0,8166383	0,00047	Prob > F
C. Total	1730	2,4835385		0,0000

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	-0,005634	0,000622	-9,06	<.0001
débits Foron	0,0309542	0,000521	59,41	0,0000

Figure 32 : Sortie jmp, modèle de régression linéaire sur la période 2003-07 <u>: après le changement de seuil</u>

- Les modèles sont tous deux significatifs, de même que les 4 coefficients α, β, α' et β'.
- Pour la période « avant le changement de seuil », il permet d'expliquer plus de 65% de la variabilité totale. Avec $R^2 = 0{,}807^2$ et $n = 2691$, il est par conséquent significativement différent de 0.
- Pour la période « après le changement de seuil », le modèle explique plus de 67% de la variabilité totale avec un R^2 également significatif.

Les R^2 étant du même ordre pour les deux modèles, ils expliquent donc aussi bien la variabilité totale quelque soit la période étudiée, ce qui permet de comparer les deux modèles en toute légitimité.

Nous nous attacherons à comparer les deux équations de prédiction :

$$\begin{cases} Q_{mercube} = -0,00347 + 0,04060\, Q_{foron} \\ Q'_{mercube} = -0,00563 + 0,03095\, Q'_{foron} \end{cases} \quad \text{soit} \quad \begin{cases} \hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}\, x \\ \hat{y}' = \hat{\alpha}' + \hat{\beta}'\, x' \end{cases}$$

b). Comparaison des coefficients de la régression linéaire.

Le coefficient de la régression linéaire n'est autre que la pente de l'équation de prédiction. Il s'agit de comparer les pentes en testant leur égalité.

Hypothèses : $H_0 : \beta = \beta'$
$H_1 : \beta \neq \beta'$

Soit : $D = \beta - \beta'$ estimé par $d = \hat{\beta} - \hat{\beta}'$; $\hat{\beta}$ et $\hat{\beta}'$ ~ □ et indépendants.

Sous Ho : $E[D] = 0$
$V[D] = \sigma^2_D$ inconnue dans la population est estimée par :
$Var(d) = Var(\hat{\beta}) + Var(\hat{\beta}')$
D/σ_D ~ □ $_{\nu = n + n' - 4}$

Avec : n + n' : le nombre total d'observations et
4 : le nombre de paramètres estimés (α, α', β et β)

Compte tenu du grand nombre d'observations, on peut considérer que la statistique D/σ_D ~ □ $_{\nu = n + n' - 4}$ est approximativement distribuée selon une loi normale.

Règle de décision : si $|d/\sigma'_D| \geq t_{\nu = n1 + n2 - 4}(1 - \alpha/2)$ → on rejette H_0 au risque α

Nous avons donc $d = 0{,}04060 - 0{,}03095 = 0{,}00965$
$\hat{\sigma}_d = \sqrt{0{,}000571^2 + 0{,}000521^2} = 0{,}000773$
□$_{obs}$ = d / $\hat{\sigma}_d$ = 0,00965 /0,000773 = 12,484
□ $\nu = n + n' - 4 = 2691 + 1731 - 4 = 4418$ d.d.l.

□$_{obs}$ = 12,484 >> □$_{4418}$ (0,975)
On rejette H_0 au risque α= 5%, les deux pentes des droites de régression sont significativement différentes.

c). Comparaison des constantes.

On procède de manière similaire afin de comparer les constantes des droites de régression des 2 modèles. On teste cette fois-ci $H_0 : \alpha = \alpha'$ contre $H_1 : \alpha \neq \alpha'$.
La statistique de test est la même que pour le coefficient de régression.

d = - 0,00347- (-0,00563) = 0,00216
$\hat{\sigma}_d = \sqrt{0{,}000799^2 + 0{,}000622^2} = 0{,}0101$
□$_{obs}$ = d / $\hat{\sigma}_d$ = 0,00216 / 0,0101= 2,133

□$_{obs}$ = 2,133 > □$_{4418}$ (0,975) → on rejette H_0 au risque α= 5%, les deux constantes sont donc significativement différentes à ce seuil.

III.2. CONCLUSIONS ET DISCUSSION.

III.2.1. Résultats et résilience du système.

Toutes les méthodes utilisées (double cumul, cumul des résidus) ont détecté une non stationnarité des débits du Mercube et une rupture de tendance significative au moment du changement de seuil.
Ces résultats nous permettent de valider l'hypothèse qui stipule qu'un biais expérimental a été introduit suite au déplacement du seuil et à la mise en place d'un nouveau matériel d'enregistrement. En d'autres termes, cet événement a eu des répercussions significatives sur la mesure des débits du Mercube qui ont été sous estimés à partir de ce moment.

La comparaison des paramètres de la régression linéaire nous éclaire sur le type de problème qui a pu survenir suite à ce changement de seuil. En effet, même si les constantes sont significativement différentes, il semblerait que la différence fondamentale entre les 2 équations porte essentiellement sur le coefficient de régression, le terme proportionnel au débit , ($\square_{obs}$ = 2,133 contre $\square_{obs}$ = 12,484).
En plus d'une erreur de mesure systématique et additive (sans doutes liée à l'appareil), qui sous estime le débit de quelques 10èmes de litres/s se répercutant ainsi sur toute la 2ème période, une anomalie (de type multiplicatif), plus conséquente encore affecte les mesures de débits.
Si la constante de l'équation représente le type d'erreurs systématiques qui s'accumulent sur toute la période, la pente de la droite, ou le terme proportionnel au débit, suppose qu'il y a un problème de tout autre espèce.
En effet, ce type d'erreurs est fonction du débit, et nous pousse à penser que la source du problème est le débit du tuyau qui est mal évalué.

Nous avions vu précédemment **(cf. partie 2, II.5.)** que, de part l'emplacement du tuyau, il était très difficile d'évaluer son écoulement lors des forts débits, du moins par les méthodes classiques de jaugeage. Il serait fort utile de l'étudier plus en détail, (pente, diamètre, configuration, matériel) et de calculer le volume d'eau déversé lors de son remplissage.
D'autre part l'extrapolation des courbes d'étalonnage est contraire à toutes les règles d'usage : la zone de validité des débits ne peut excéder celle sur laquelle les points de mesure ont été pris.

III.2.2. Point de vue critique quant aux méthodes et outils employés.

L'avantage d'utiliser plusieurs méthodes (et types de méthode), qu'elles soient mathématiques, statistiques, graphiques ou encore physiques, réside dans le fait que nous pouvons confronter, compléter et renforcer nos résultats.
Ceci dit, cet enrichissement n'est envisageable que si les principes, les propriétés, les forces et les faiblesses de chaque test sont connus et maitrisés.
Cette connaissance nous permettra également d'apporter un point de vue critique sur nos résultats et la méthodologie en général, et ainsi de réfléchir à une éventuelle amélioration de la démarche, ou des outils par exemple.

a). La méthode du double cumul.

▪ La méthode des doubles cumuls est plus puissante que celle des simples cumuls dans la mesure où elle nous permet de comparer l'évolution d'une série de données par rapport à une autre, que l'on suppose fiable et exempt d'erreurs.
Mais, une telle supposition peut s'avérer être un peu audacieuse, surtout dans les cas de mesure des débits…Cependant, le fait que ces données soient fournies par un organisme tel que la DIREN ainsi que notre approche du problème de manière « croisée »[2], limitent nos doutes.
▪ J'ai déjà mentionné les difficultés que la méthode pouvait présenter pour l'interprétation des graphes et le manque d'appréciation statistique des défauts constatés. Ceci dit, la méthode est relativement précise puisque les 2 graphes montrent une rupture de stationnarité au même moment.
▪ Une autre faiblesse de cette méthode, tout comme celle du simple cumul, repose sur le caractère séquentiel des données, et sur le fait qu'à partir d'une certaine date toutes les données suivantes soient affectées par un changement de fonctionnement. Il arrive pourtant que l'hétérogénéité ne soit pas organisée ainsi mais conditionnée par une situation particulière qui apparait de manière intermittente et qu'il nous faille identifier (par exemple une hétérogénéité qui n'affecte que les débits supérieurs à un certain seuil….)

b). Le cumul des résidus de Blois.

▪ Cette méthode est une amélioration de celle des doubles cumuls puisqu'elle permet, en outre d'être plus précise, une évaluation statistique des erreurs. Par contre, elle repose toujours sur une analyse séquentielle des données, ce qui, comme nous en avons déjà fait part, peut s'avérer insuffisant quand l'hétérogénéité est intermittente ou liée à une situation particulière.
▪ La régression linéaire simple peut être sensible aux distributions, aux unités et aux ordres de grandeur des variables aléatoires, il convient donc de transformer les données dans la mesure du possible.

[2] Nous avons comparé les débits du Mercube avec ceux du Redon, puis avec ceux du Foron, et qu'enfin nous les avons tous deux confrontés.

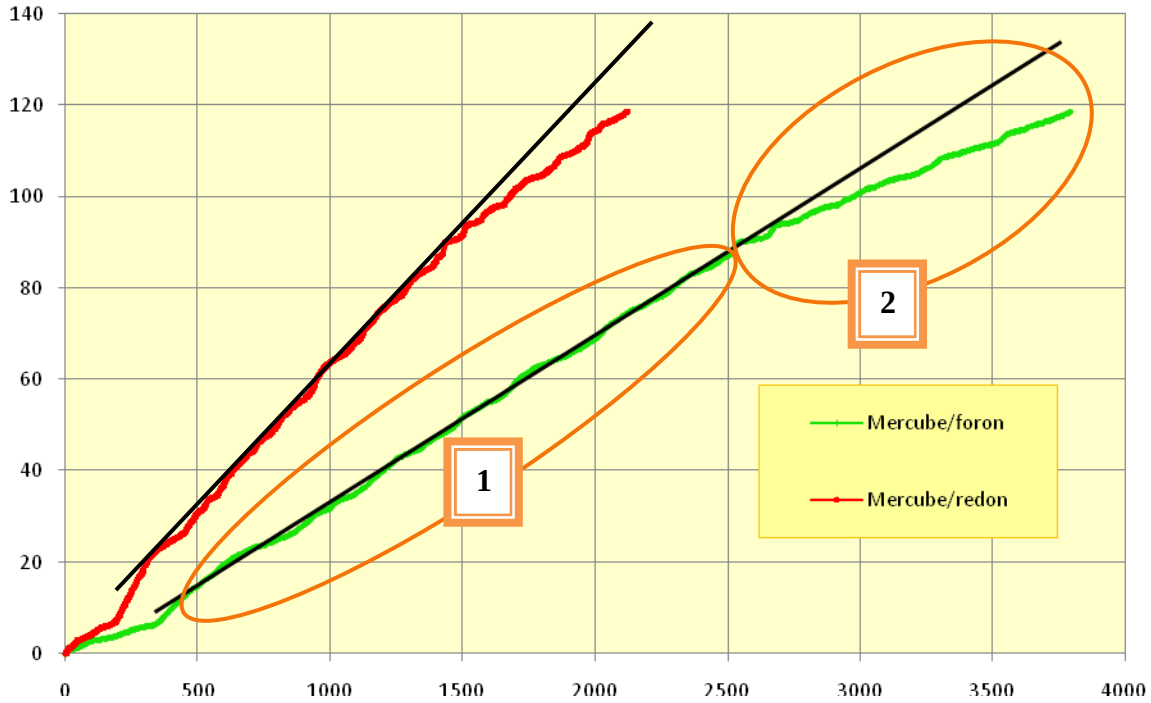
IV. CORRECTION DES DÉBITS DU MERCUBE.

Nous venons de démontrer que suite au changement de seuil, les débits du Mercube ont été sous-estimés, sans doutes à cause de l'écoulement du tuyau entre les deux points de mesure qui n'avait pas été correctement évalué. Dans ce chapitre nous nous attacherons donc à corriger ces débits en nous appuyant sur les résultats du chapitre précédent.

IV.2. MÉTHODE GRAPHIQUE DES DOUBLES CUMULS MERCUBE/FORON.

IV.2.1. Rappels : doubles cumuls.

Graph 11: Rappel des doubles cumuls Mercube/Foron et Mercube/Redon.



Deux périodes bien distinctes : « avant le changement de seuil » et « après » sont observables tant pour les doubles cumuls avec le Redon qu'avec le Foron.
Nous allons considérer individuellement ces deux périodes afin d'évaluer le biais introduit par le changement de seuil de 2003.

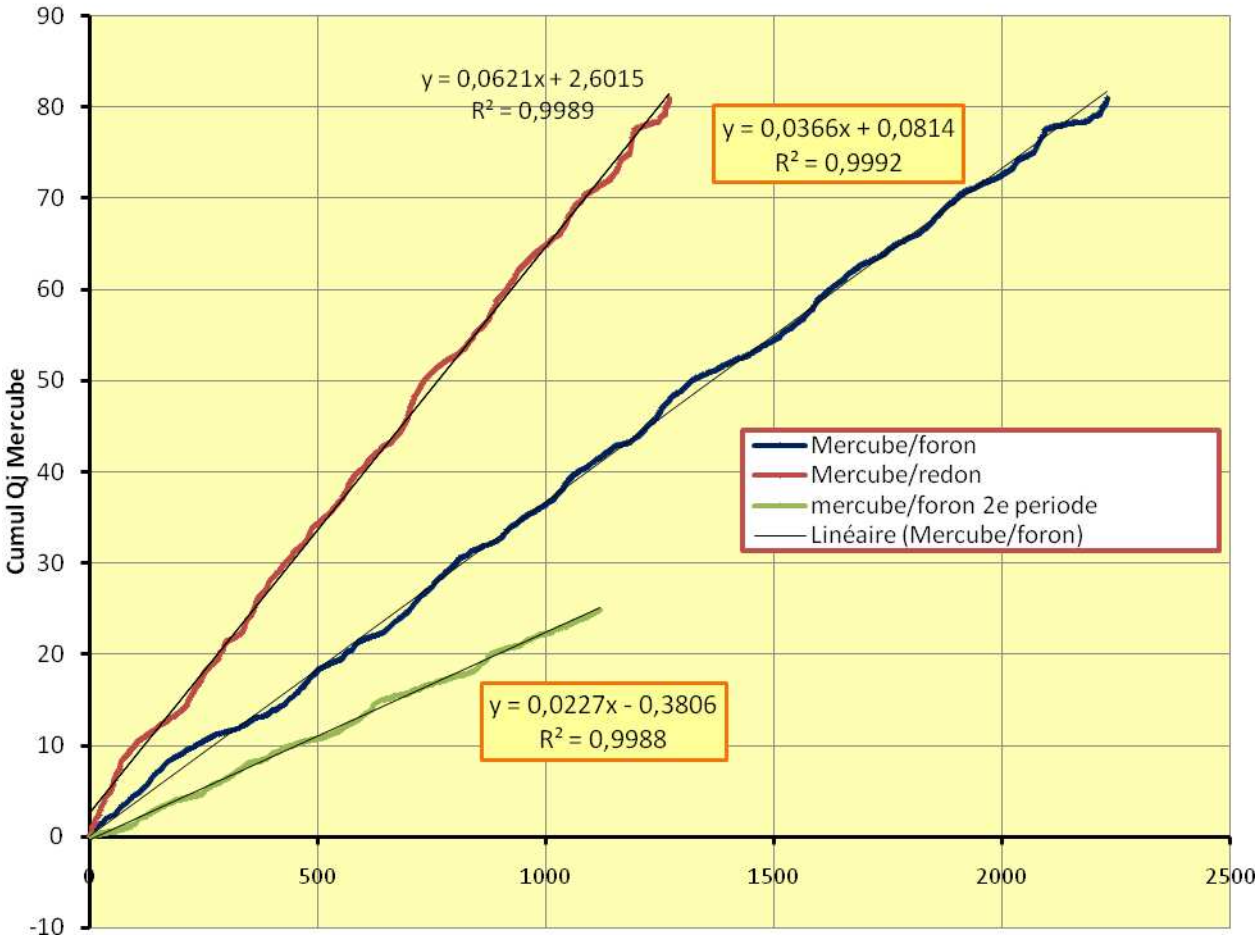
IV.2.2. Doubles cumuls Mercube/Foron décomposés en 2 périodes.

Notons que nous aurions pu appliquer de manière similaire cette méthode au Redon, **(cf. III.3.1)**

Les corrélations sont très bonnes quand on considère les débits période par période **(graph 12).** Comme nous le savons déjà, les débits du Mercube à partir de 2003 sont largement sous-estimés : essayons de les corriger en considérant la période ante 2003 comme référence.

Ainsi, les débits du Mercube devraient évoluer dans le temps de la même façon que les débits du Foron.

Graph 12: doubles cumuls Mercube Foron par période.



IV.2. CORRECTION, VÉRIFICATION & COMMENTAIRES

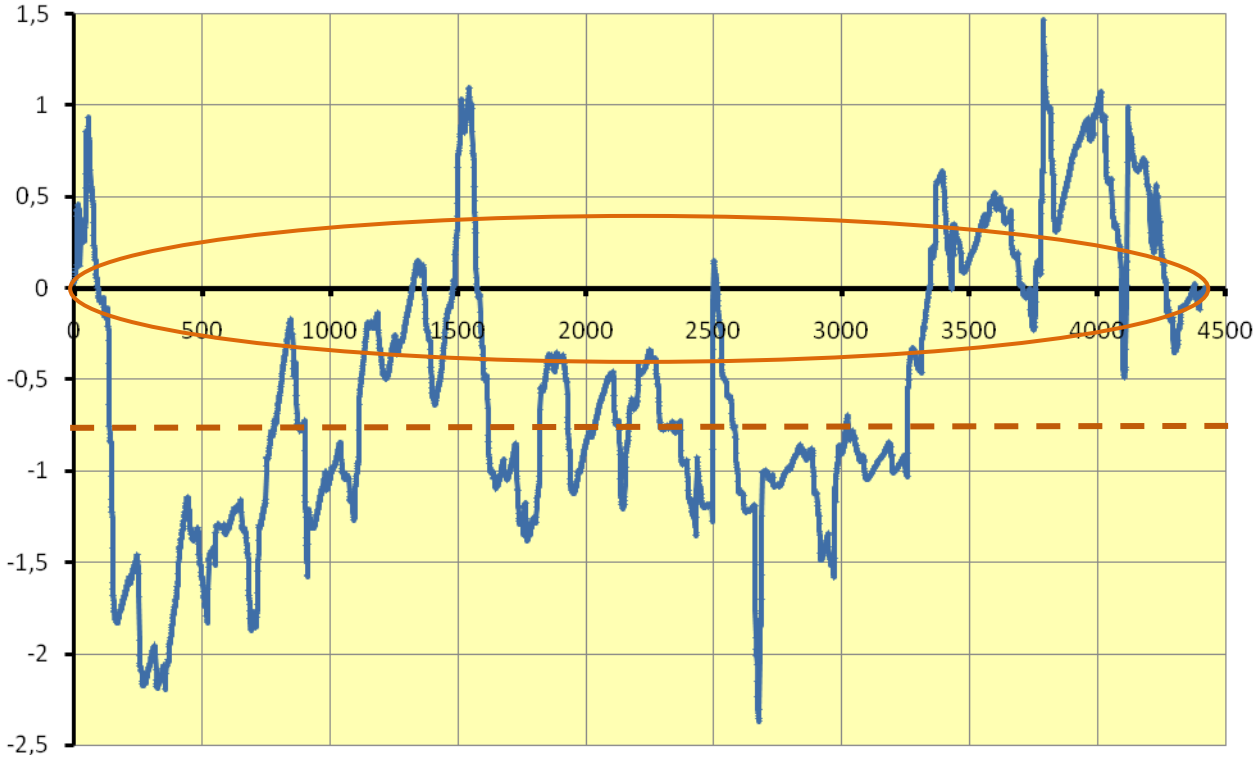
IV. 1. Ajustement des débits du Mercube.

Le terme correctif que j'ai apporté aux débits du Mercube après 2003 est un coefficient de proportionnalité k déterminé à partir des équations des courbes de tendance (ou droites de régression).
Par une simple règle de 3 ,on obtient : k= 1,6123.
Les débits du Mercube deviennent donc : Q_j corrigés = k. Q_j = 1,6123 Q_j

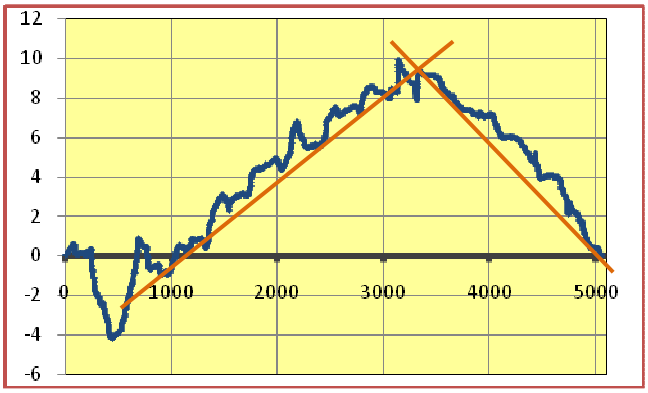
IV.2. Evaluation de la correction apportée aux débits journaliers du Mercube par la méthode du cumul des résidus de Bois.

Les débits journaliers du Mercube corrigés, nous pouvons leurs appliquer la méthode du cumul des résidus de Bois et observer les éventuels changements sachant que N= 4422 et σ_ε= 0,035). **Graph 13.**

Graph 13: cumul des résidus issus de la régresion linéaire établie entre les débits du Mercube corrigés et les débits du Foron (à l'échelle journaliere).



▪ Même s'il n'y a plus la grande rupture de tendance que nous pouvions observer avant la correction, le cumul des résidus ne se situe pas dans l'ellipse.



Voici, à titre de rappel, la représentation graphique du cumul des résidus avant la correction des débits journaliers du Mercube .
On décèle très facilement la rupture de tendance singulière qui survient précisément au moment du changement de seuil de mesure.

▪ Le cumul des résidus semble décalé vers le bas, ce décalage est peut être attribuable au fait que la correction des débits n'ait été faite que sur le terme multiplicatif et non sur la constante, alors que nous avions remarqué qu'il y avait également un biais (certes moindre) introduit par celle-ci.
▪ Mais beaucoup de mes craintes reposent sur la régression linéaire elle-même. En effet, si les variables ont les mêmes unités et concernent le même objet (débits journaliers de bassins voisins) suis-je autorisée à établir une relation linéaire entre elles sachant qu'elles ne sont pas distribuées selon un loi normale ?
Ne disposant que peu de sources à ce sujet, je m'y suis quand même risquée...

V. ÉTUDE DE LA STATIONNARITÉ DES DÉBITS (2)
-LA SÉCHERESSE DE 2003-

Nous savons que les états de sécheresse affectent les réponses hydrologiques des bassins versants. En effet, les nappes souterraines s'épuisent, le réseau aquifère est remanié, les transferts de matières et les types d'écoulements modifiés.
En 2003, année très sèche, nous avons pu mettre en évidence le fait que, tant dans la variance que dans la distribution, les pluies de cette année étaient singulièrement différentes des autres.
Qu'en est-il du comportement hydrologique des bassins versants ?
Notre étude portera sur le bassin de Mercube bien sûr mais également sur ceux du Foron et du Redon, que nous savons de comportement et de fonctionnement très proches.

V.1. ÉTUDE DES DEBITS JOURNALIERS.

IV.1.1. Rappels sur les variables d'entrée et de sortie du système.

Pour comprendre de façon globale le fonctionnement hydrique d'un bassin versant, il nous faut, dans un premier temps, considérer les entrées et les sorties d'eau du système. Elles sont schématisées et résumées dans la **figure 33.**

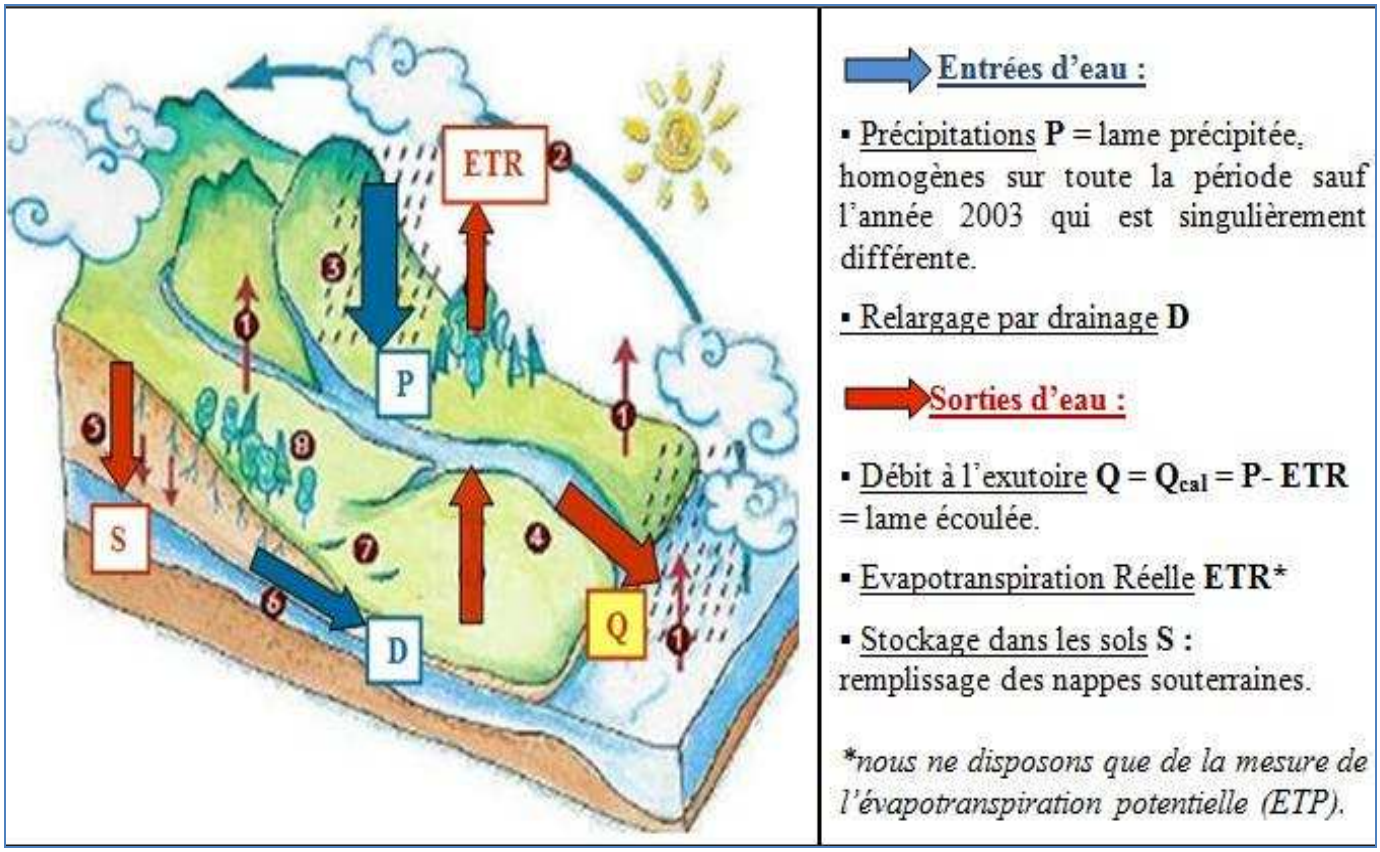


Figure 33 : Entrées et sorties d'eau à l'échelle du bassin versant (issu du bilan hydrologique)

V.1.2. Comparaison des débits journaliers « avant » / « après » sécheresse de 2003 : Méthodes graphiques.

Dans cette partie nous étudierons les débits journaliers des 3 bassins versants, Foron, Redon et Mercube, ceci afin de voir comment cette période de sécheresse a pu affecter le comportement hydrique de ces différentes unités.
En effet, s'il y a eu des conséquences sur le fonctionnement hydrologique du Mercube imputables à cette sécheresse, il n'y a aucune raison que les bassins voisins aient été totalement épargnés
Ceci dit, comme nous en parlerons dans la discussion, l'étude des débits du Mercube est entachée par le fait que le changement de seuil est survenu la même année que la sécheresse, même si les valeurs utilisées sont celles qui ont été corrigées.

a) Représentation graphique des débits journaliers du Mercube . (Figure 34)

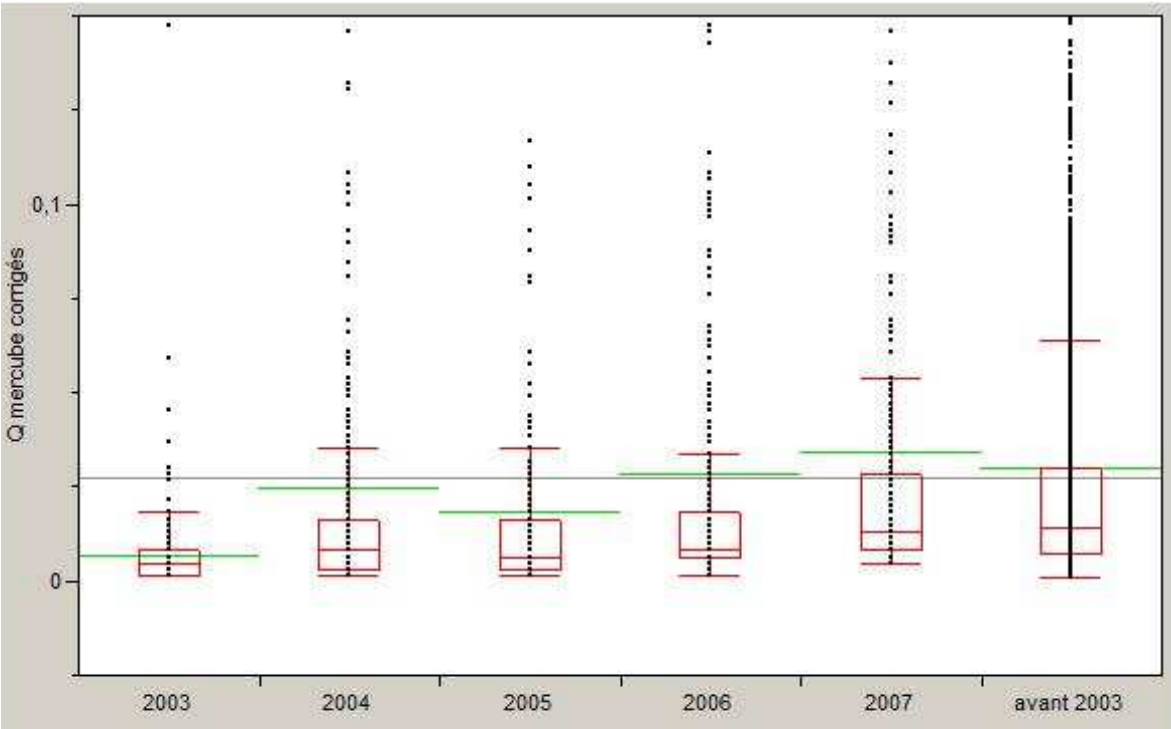


Figure 34 : sortie Jmp, représentation graphique des débits journaliers du Mercube avant la sécheresse et chaque année suivante : box plot, moyenne générale (ligne noire) et moyenne par échantillon (ligne verte) .

▪ Ce graphique permet de mettre en évidence le fait que les années suivant la sécheresse, (2004-2005-2006) sont différentes de celles la précédent (93-2002).
Les débits journaliers diffèrent par leur moyenne, leur variance ou leur répartition (années 2006 et peut-être même 2007), ou par ces trois paramètres (2004, 2005).

▪ Cependant cette représentation n'est qu'une approche globale et visuelle, des tests statistiques viendront compléter nos analyses. **(cf. V.1.3 .)**

▪ Il semble donc que le comportement hydrique du Mercube ait été modifié par la sécheresse : même si 2003 est l'année qui se démarque le plus ; 2004, 2005, ont des débits journaliers moyens inférieurs à la période ante 2003.

▪ Pour 2006 et 2007, même si une tendance à un retour initial semble très amorcée, la distribution, les écarts inter-quantiles ainsi que la variance des débits journaliers ont l'air également moindre.

b) Débits journaliers du Foron : graphique (figure 35)

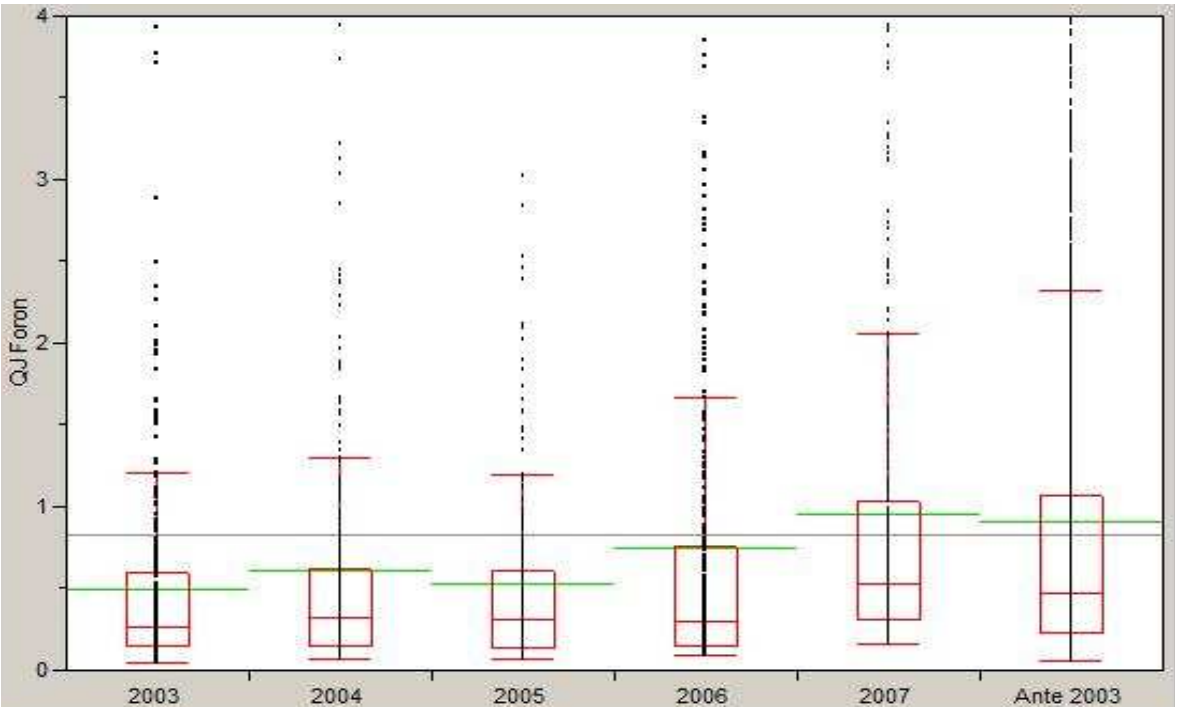


Figure 35 : sortie Jmp, représentation graphique des débits journaliers du Foron avant la sécheresse et chaque année qui la suit : box plot et moyenne générale.

▪ Ici, on peut également déceler un changement de régime hydrique après la sécheresse (années 2004, 2005, 2006).

▪ En 2007, soit 4 ans après cet évènement météorologique, les débits journaliers semblent avoir retrouvé les mêmes moyennes et variances qu'auparavant, et cette tendance est confirmée en 2008. En d'autres termes, le fonctionnement hydrique a probablement retrouvé son niveau « normal » ou « d'avant la sécheresse ».

c) Graphique des débits journaliers du Redon. (figure 36)

Les même remarques sont valables pour le fonctionnement du Redon avec un retour aux débits initiaux quasi complet dès 2006.
Il semble que le Redon ait une rémanence plus précoce mais ceci doit être confirmé de manière plus rigoureuse que par une simple appréciation visuelle par graphique.

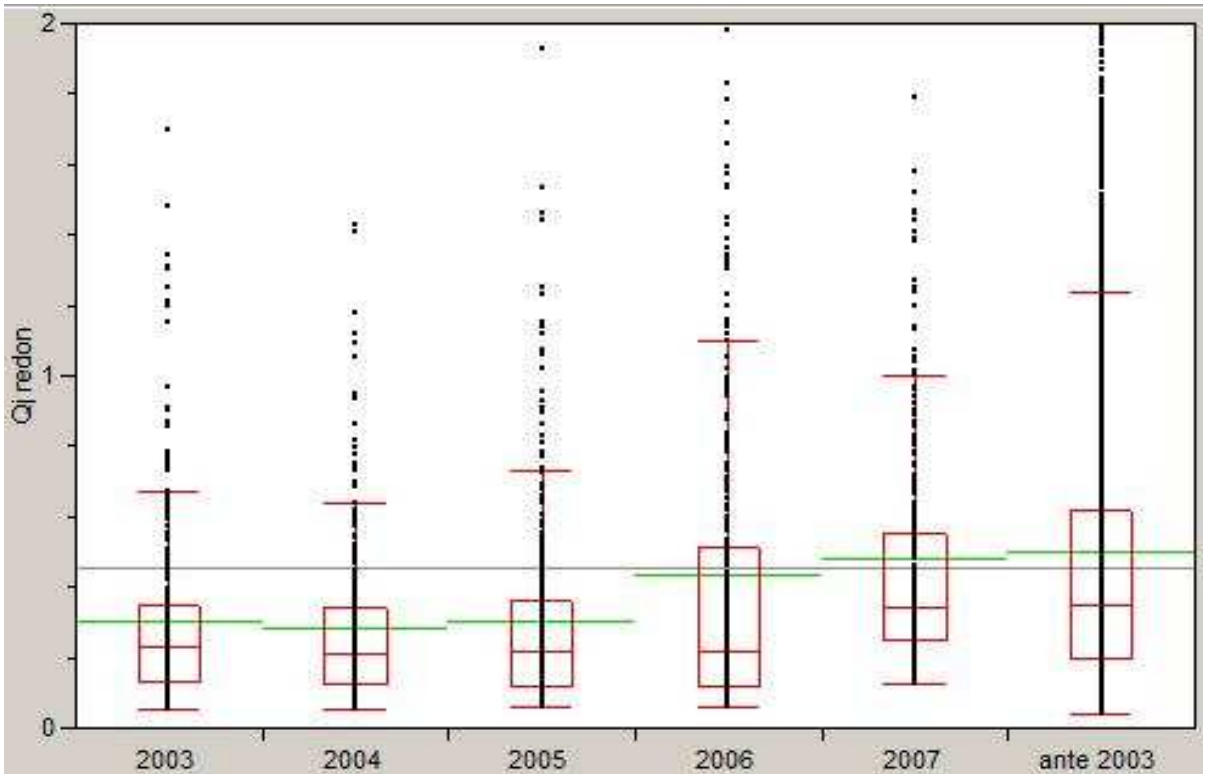


Figure 36: sortie Jmp, représentation graphique des débits journaliers du Redon avant la sécheresse et chaque année qui la suit : box plot, moyenne générale et moyenne par échantillon.

V.1.3. Comparaison des débits journaliers « avant » / « après » sécheresse de 2003 : Méthodes Statistiques.

a) Bassin versant du Mercube

▪ En m'appuyant sur le graphique des box plot **(figure 34),** j'ai cherché à vérifier statistiquement si les années 2006 et 2007 (les plus proches en terme de débits, à la période précédent la sécheresse) étaient encore singulièrement différentes de la période 1993-2003. Ceci de manière à évaluer l'impact de la sécheresse 4 ans après cet événement, et d'avoir également des éléments de comparaison fiables.

→ En 2006, les débits du Mercube sont encore très différents (moyenne, distribution, variance) de ceux d'avant la période de sécheresse, elle a donc particulièrement marqué le régime d'écoulement du bassin du Mercube.

→Par contre, en 2007 on assiste à un retour à la normale. En effet, les probabilités critiques des tests de comparaison remontent jusqu'à n'être pratiquement plus significatives au seuil α=5 % pour les moyennes des débits journaliers.

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2006	365	464232,5	1271,87	-5,924
avant 2003	2691	4206863,5	1563,31	5,924

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
464232,5	-5,92430	<.0001

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
35,0978	1	<.0001

Median Test (Number of Points Above Median)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2006	365	127	0,347945	-5,580
avant 2003	2691	1355	0,503530	5,580

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
127	-5,58021	<.0001

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
31,1387	1	<.0001

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2006	365	-86,6946	-0,23752	-4,852
avant 2003	2691	86,6946	0,03222	4,852

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
-86,69462	-4,85225	<.0001

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
23,5443	1	<.0001

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2007	365	593826	1626,92	2,272
avant 2003	2691	4077270	1515,15	-2,272

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
593826	2,27199	0,0231

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
5,1621	1	0,0231

Median Test (Number of Points Above Median)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2007	365	182	0,498630	0,677
avant 2003	2691	1291	0,479747	-0,677

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
182	0,67738	0,4982

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
0,4588	1	0,4982

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2007	365	56,6610	0,15524	3,171
avant 2003	2691	-56,6610	-0,02106	-3,171

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
56,661038	3,17141	0,0015

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
10,0578	1	0,0015

Figure 38 a) : Avant sécheresse vs 2006 **Figure 38 b) : Avant sécheresse vs 2007**

Figure 38 : sortie Jmp, tests de comparaison, débits journaliers du Mercube avant sécheresse / 2006 et 2007

b) Les Bassins versants du Foron et du Redon.

Les tests statistiques que j'ai appliqués aux autres bassins : Foron et Redon, confirment les tendances que j'avais pu mettre en évidence dès la représentation graphique à savoir que le Foron et le Redon ne retrouvent leur niveau d'avant sécheresse (moyenne, variance et distribution des débits journaliers) qu'en 2007.

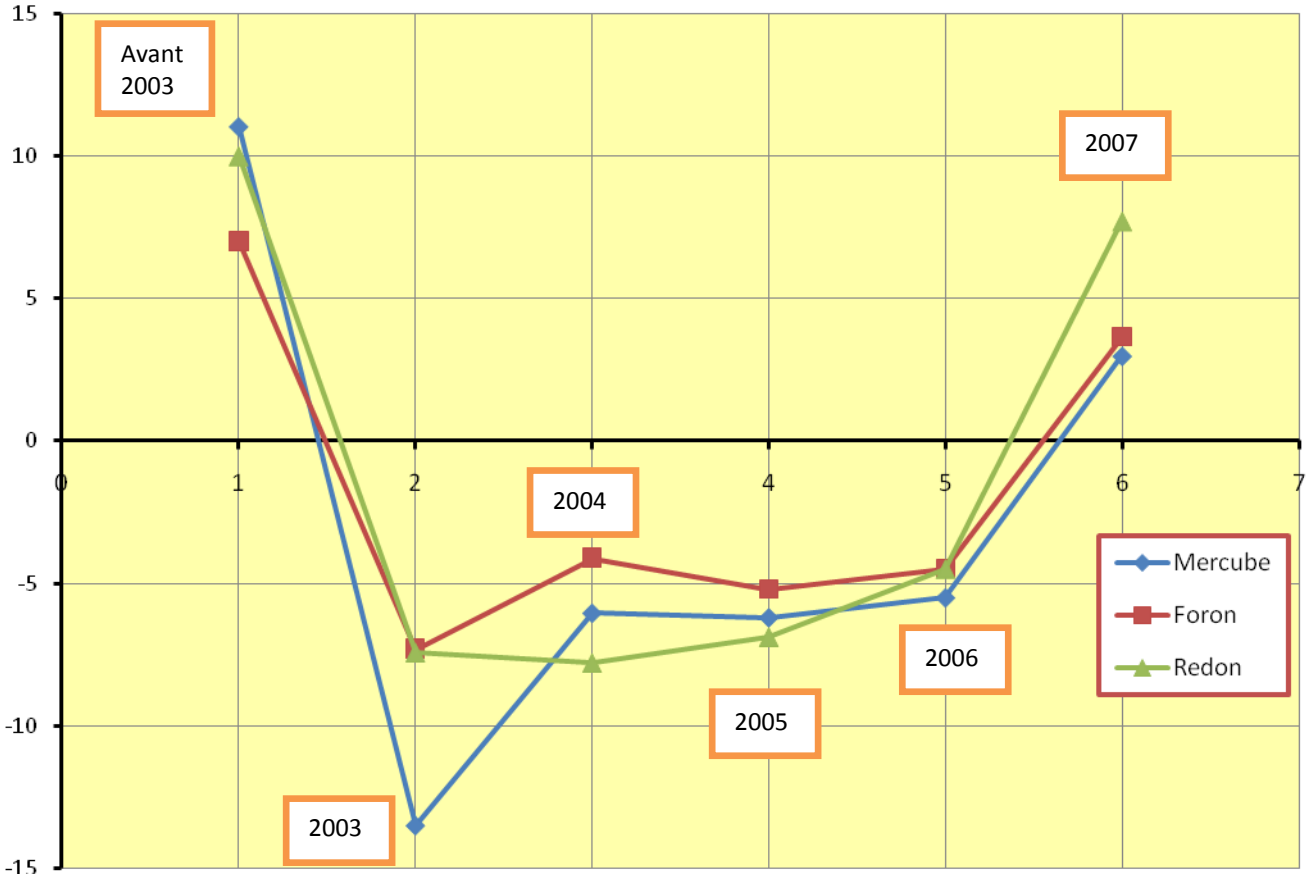
Les sorties jmp de ces tests sont disponibles dans **l'annexe 3**.

V.1.4. Evolution comparée des débits journaliers « avant » vs « après » sécheresse

Cette troisième approche, par la représentation graphique des valeurs centrées réduites, est intéressante dans la mesure où elle nous permet de mieux visualiser l'évolution des débits journaliers après la sécheresse. En effet, le centrage et la réduction des données nous permettent de les replacer dans leur contexte.

a) Etude des débits moyens.

Graph 14: Comparaison des débits journaliers moyens année par année (valeurs centrées réduites)



▪ Il est aisé d'observer que le Mercube et le Foron présentent des réponses hydriques similaires suite à la sécheresse. Ceci n'est pas étonnant puisque toutes les sources bibliographiques citent le Foron comme bassin de référence pour le Mercube, stipulant que leurs fonctionnements hydrologiques sont très proches.

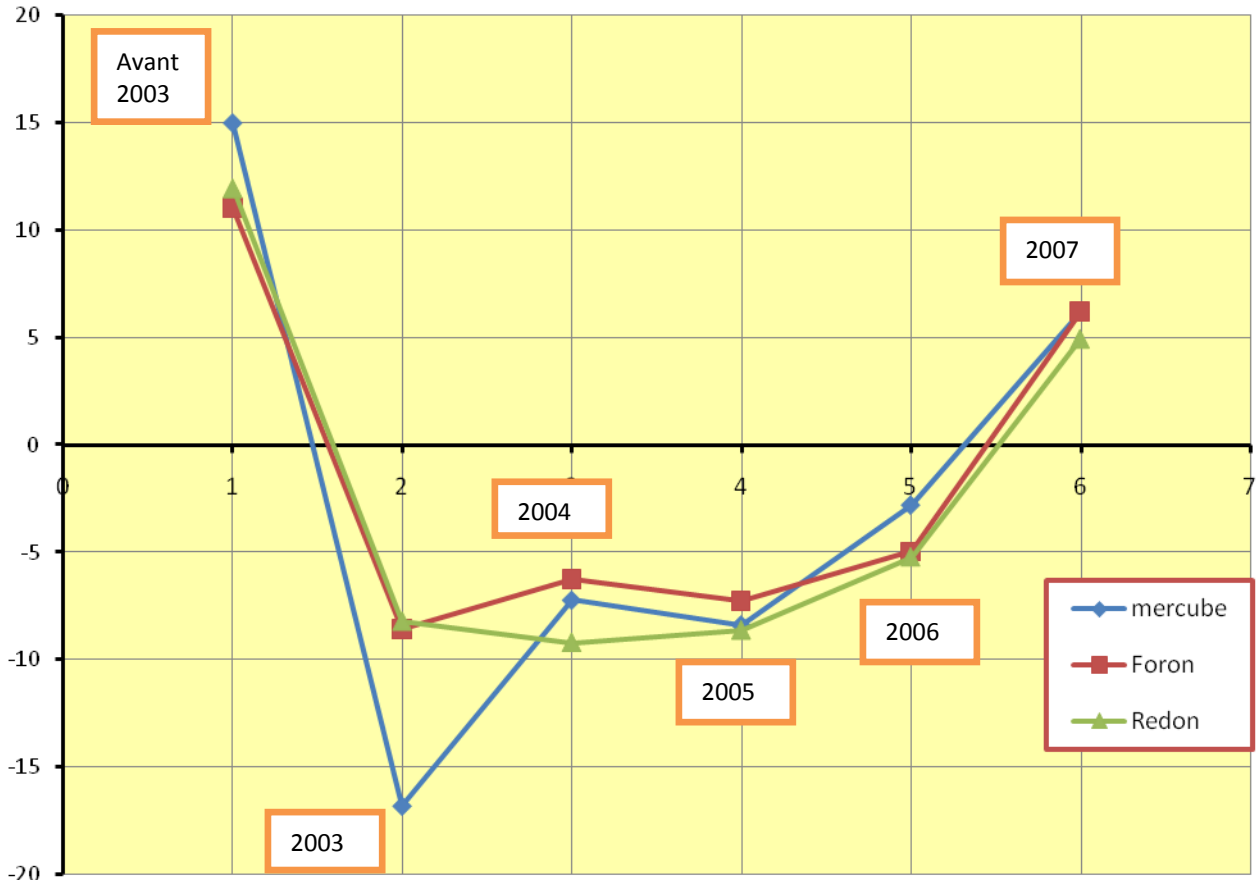
▪ Mais, plus que pour les autres bassins versants, l'année 2003 a beaucoup affecté les débits moyens du Mercube, qui se sont alors trouvés extrêmement abaissés.

▪ Le Redon semble répondre différemment à la sécheresse, il accuse une évolution beaucoup plus lissée, avec une année 2004 particulièrement marquée puisque les débits moyens sont inferieurs à ceux de 2003.
Il semblerait donc que la distribution des eaux, et leur utilisation ne soient pas les mêmes pour le Redon.

▪ On confirme encore une fois que les débits moyens tendent à retrouver leur niveau d'avant la perturbation et qu'en 2007 ils en sont relativement proches.

b) Variance des débits.

Graph 15: Comparaison de la variance des débits journaliers, par année. (valeurs centrées réduites)



Les profils d'évolution de la variance des débits sont très similaires à ceux de la moyenne. Les mêmes remarques peuvent donc s'y appliquer.
Il est intéressant de constater que la sécheresse n'a pas seulement perturbé les débits moyens en les abaissant considérablement, mais aussi les variances des débits journaliers mesurés.

V.2. CONCLUSIONS ET COMMENTAIRES.

▪ En ce qui concerne le Mercube, le fait que la sécheresse ait eu lieu la même année que le changement du seuil de mesure ne nous facile guère la tâche. Ceci dit, les débits utilisés dans cette étude sont ceux qui ont été corrigés et le fait qu'ils suivent le même profil d'évolution que le Foron nous conforte quant à la correction apportée.

▪ Par le biais de 3 approches différentes, nous avons pu mettre en évidence le fait que la sécheresse ait affecté le fonctionnement et le comportement des bassins versants. Même si les réponses hydriques ne sont pas tout à fait identiques, on observe dans tous les cas, une baisse

significative des débits moyens et de leurs variances après la sécheresse, alors que les pluviométries sont normales.
Ce déficit hydrique mesuré à l'exutoire des bassins versants est sans doute dû à la reconstitution des réserves souterraines, qui mettent plus de quatre ans à retrouver leur niveau initial. Mais, d'autres phénomènes et mécanismes imputables à la sécheresse peuvent être responsables de la modification des débits, par exemple le remaniement du réseau aquifère ou l'imperméabilisation des sols.
Malheureusement, les seuls paramètres étudiés ici sont les débits, mais la géochimie pourrait nous apporter des informations supplémentaires quant aux scenarii probables. En effet, même si ces informations ne sont pas absolues, l'étude de la conductance peut dans certains cas, nous informer sur le type d'eau qui s'écoule à l'exutoire, de même que les MES (Matières En Suspension) sur le type d'écoulement mis en cause.

Il serait donc intéressant d'analyser en parallèle, l'évolution d'autres paramètres, tels que ceux cités précédemment, et de les relier aux mécanismes et phénomènes provoqués par la sécheresse.

Alors que la pluviométrie des années suivant la sécheresse est normale, il est étonnant de constater combien l'impact de la sécheresse est important : il ne faut pas moins de 4 ans à de petits bassins comme ceux-ci pour reconstituer leurs nappes souterraines….

PARTIE 5 : CONCLUSION GÉNÉRALE, BILAN ET PERSPECTIVES

Mon stage, au sein de l'équipe *bassins versants* de l'INRA de Thonon-les-Bains, s'est achevé au bout de 4 mois, à la suite desquels j'ai pu répondre à un certain nombre de questions importantes concernant les débits du Mercube, et notamment leur stationnarité.

▪ La première étape du travail concernait la traduction la plus juste possible des hauteurs d'eau mesurées en débits. Ceci reposait sur le choix d'une courbe de tarage adaptée, et sa validation qui s'appuyaient sur différentes méthodes hydrologiques, graphiques et statistiques.

▪ Une fois les débits traduits, il nous faillait vérifier si le changement de seuil de mesure en 2003, suite à la crue qui avait emporté le matériel, avait entrainé une modification dans leur enregistrement. En effet, il était fort possible qu'un biais expérimental ait été introduit suite à cet événement.
Les divers outils que j'ai utilisés, et en particulier les différentes méthodes de cumuls, m'ont permis de mettre en évidence deux périodes bien distinctes (« avant le changement de seuil » et « après ») et ainsi de conclure que cet événement a entrainé une mesure erronée des débits.

L'étude de la régression linéaire entre les débits journaliers du Mercube et du Foron, nous a orientés vers la mauvaise appréciation de l'écoulement du tuyau entre les deux sites d'enregistrement, même si une erreur systématique due à l'appareillage n'est pas négligeable.
Ceci m'a aidée à corriger les débits de cette période par un terme multiplicatif et d'en vérifier la pertinence.

▪ La Troisième partie de mon travail consistait à déterminer si la sécheresse de 2003 avait affecté les fonctionnements hydrologiques des bassins. Une analyse statistique, graphique et comparative des débits journaliers de trois bassins versants, dont le Mercube, a confirmé le fait que la sécheresse avait eu un impact important sur les réponses hydriques et que ses effets étaient encore mesurables 4 ans plus tard.

▪ Même si j'ai pu apporter quelques éléments de réponse pendant ce stage, d'autres questions encore ont été soulevées :

- la représentativité des pluies. Une comparaison des pluies de la station de Thonon avec l'historique des pluies collectées sur le Mercube, et également avec la station météo de Sciez permettrait de s'affranchir de cette question.
- l'apport du tuyau en de la station. Son débit reste incertain surtout sur les fortes valeurs. Une approche hydraulique comblerait le manque d'information sur le sujet.
- Une approche en débit durée fréquence sur les valeurs extrêmes de débit est en cours et permettra de vérifier la stationnarité ou non de la chronique sur les fortes valeurs.
- Enfin, celles concernant l'étude des données géochimiques à mettre en parallèle avec l'évolution des débits, ou encore les interrogations sur la correction des débits et leur extrapolation sont particulièrement intéressantes et ne resteront pas, j'espère, en suspens….

ANNEXES

ANNEXE 1 :
ETP, ETR & COEFFICIENT CULTURAL Kc

Calcul de l'ETP par la formule de Penman :

ETP = a R + b.Ea (en mm. $jour^{-1}$)

Avec :

a = (1/L) . (P/P' + γ), b = 1- (P/P') + γ
Ea= 0,26 (1+ 0,54 V). (e_s - e_a)

1) L= 59 cal ou 2,5 MJ

2) (P/P') + γ ≈ 0,51 + 0,0009 t_{air}

3) R = bilan total de rayonnement (cal.cm^{-2}.$jour^{-1}$ ou MJ. m^{-2}.$jour^{-1}$)

4) e_a (mb) pression de vapeur d'eau réelle (e_a) ou à saturation (e_s) ;
e_a = e_s (Humidité Relative/100) ;

5) V= vitesse du vent à 2 mètres de hauteur (m. s^{-1})

En pratique :

t en °C	*5*	*10*	*15*	*20*	*25*	*30*
a (cal)	0,007	0,009	0,0105	0,0115	0,0125	0,013
a (MJ)	0,193	0,223	0,252	0,278	0,301	0,322
b	0,52	0,44	0,38	0,32	0,26	0,22
e_s (mb)	8,7	12,3	17	23,4	31,7	42,4

Exemple :

t=25 ;
V=1,7 ;
R=175 cal.cm^{-2}.j^{-1}
a= 0,0125
a.R= 2,18
HR=31%
e_a=9,8
E_a=10,9 mm
b.E_a=2,83
ETP=5mm.j^{-1}

Notons que dans cette formule la nature du couvert végétal n'est pas explicitement representée. Mais les calculs sont établis sur une fétuque manade (gazon) de 7 cm de hauteur, couvrant complètement le sol, bien alimentée en eau, en phase active.

Calcul empirique de l'évapotranspiration réelle.

L'évapotranspiration réelle diminue à mesure que les sols s'assèchent. Quand les précipitations sont inferieures à l'évapotranspiration potentielle, une partie de l'eau provient du sol, cette contribution diminue à mesure que celui-ci s'assèche.
Eagleman (1971) a directement calculé les rapports ETR/ETP (Penman) en fonction de l'humidité relative du sol et de la « vitesse » de la demande représentée ici par ETP seule.
Quand la demande journalière est faible l'évaporation du sol se poursuit à un taux quasi potentiel même pour des sols assez secs. Par contre, lorsque la demande est forte les rapports s'abaissent rapidement en dessous d'une humidité de 60 à 70 %.

L'équation polynomiale de Eagleman repose sur les valeurs suivantes :

$$ETR/ETP = a + b.H + c.H^2 + d.H^3$$

Avec :

H= l'Humidité Relative du sol,
d'une manière pratique le rapport entre la réserve disponible et la réserve utile (RU)
a = -0,05 + 0,732/ETP
b = 4,97 - 0,661. ETP
c = -8,57 + 1,56. ETP
d = 4,35 - 0,88. ETP
ETP en $mm.mois^{-1}$

Notion d'évapotranspiration maximale $ET_{c,max}$ ou ETM, introduction du coefficient cultural K_c.

L'ETM est la valeur maximale de l'évapotranspiration d'une culture donnée, à un stade végétatif donné, dans des conditions climatiques définies et prises en compte dans la mesure de l'ETP.

Il s'agit d'une correction de l'ETP en fonction de la nature du couvert végétal et de son stade de développement.

$$ETM = K_c \times ETP$$

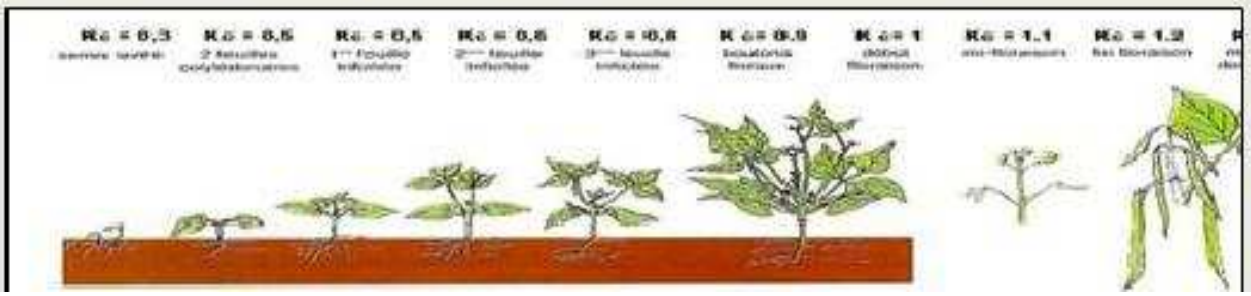
Avec :
K_c le coefficient cultural
$K_c = ETM/ETP$

	Foret	Blé	Maïs	Tournesol +orge	Prairies
Janv.	1	0,50	0,50	0,50	1,00
Fév.	1	0,50	0,50	0,50	1,00
Mars	1	0,90	0,90	0,80	1,00
Avr.	1	0,90	0,50	0,70	1,00
Mai	1	1,00	0,50	0,90	0,90
Juin	1	1,00	0,60	0,90	0,80
Juil.	1	0,40	0,90	0,80	0,90
Août	1	0,50	1,00	0,50	0,90
Sept	1	0,50	0,80	0,50	0,90
Oct.	1	0,50	0,40	0,50	1,00
Nov.	1	0,50	0,50	0,50	1,00
Déc.	1	0,50	0,50	0,50	1,00

Kc en fonction du type de culture et du stade de développement.

Selon la littérature le K_c peut être supérieur à 1, surtout pour la culture légumière. Ceci dit pour les céréales on trouve couramment des K_c atteignant les 1,2, notamment à partir de la floraison ou de la maturation des grains. L'ETM peut donc être supérieur à l'ETP.

Représentation du Kc selon le stade de développement.



ANNEXE 2 :
TRANSFORMATION DES VARIABLES ET TESTS STATISTIQUES

Généralités sur les données environnementales :

Il est rare de voir ce type de données suivre une distribution Normale, elles ont plutôt tendance à décrire une loi Log-Normale.
Nous serons alors souvent amenés, pour des raisons pratiques, à transformer les données afin que nous puissions faire le postulat de normalité (si la distribution du phénomène est à peu près unimodale, symétrique et peu étalée aux extrémités.)
En effet, la Normalité est une condition essentielle quant à l'application de nombreux tests.

Ceci dit, dans le cas où les données seraient transformées, il est important de rappeler que lors de l'interprétation des résultats, la rigueur est nécessaire.
En effet, si T, la transformation qui associe à $x \rightarrow T(x) = Y$*, il est aisé de retourner aux données initiales par la fonction réciproque soit* $x = T^{-1}(Y)$.
Par contre, $T^{-1}(E[Y]) \neq E[T^{-1}(Y)]$ *!*
Pour pallier à cet inconvénient, Patterson propose alors de trouver une fonction h telle que l'image de $E(Y)+h(Y)$*, par la transformation inverse* T^{-1}*, soit à peu près égale à* $E(X)$*. L'expression est simple dans le cas de la transformation logarithmique :* $h(Y)= V(Y)/2$.

ANNEXE 3 : TESTS DE COMPARAISON : AVANT SECHERESSE 2003 VS ANNEES 2006 & 2007

A) Foron. :

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2006	365	597619,5	1637,31	-6,415
Ante 2003	3651	7468516,5	2045,61	6,415

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
597619,5	-6,41462	<.0001

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
41,1477	1	<.0001

Median Test (Number of Points Above Median)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2006	365	132	0,361644	-5,534
Ante 2003	3651	1875	0,513558	5,534

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
132	-5,53388	<.0001

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
30,6238	1	<.0001

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2006	365	-110,981	-0,30406	-6,103
Ante 2003	3651	110,981	0,03040	6,103

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
-110,981	-6,10284	<.0001

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
37,2446	1	<.0001

Comparaison débits journaliers :
Ante sècheresse /2006

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2007	365	810180,5	2219,67	3,649
Ante 2003	3651	7255955,5	1987,39	-3,649

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
810180,5	3,64935	0,0003

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
13,3179	1	0,0003

Median Test (Number of Points Above Median)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2007	365	198	0,542466	1,712
Ante 2003	3651	1809	0,495481	-1,712

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
198	1,71156	0,0870

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
2,9294	1	0,0870

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2007	365	74,6881	0,20463	4,107
Ante 2003	3651	-74,6881	-0,02046	-4,107

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
74,688145	4,10709	<.0001

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
16,8682	1	<.0001

Comparaison débits journaliers :
Ante sècheresse /2007

B) Redon.

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2006	365	587835	1610,51	-6,885
ante 2003	3652	7482318	2048,83	6,885

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
587835	-6,88473	<.0001

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
47,3998	1	<.0001

Median Test (Number of Points Above Median)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2006	365	131	0,358904	-5,639
ante 2003	3652	1876	0,513691	5,639

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
131	-5,63860	<.0001

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
31,7938	1	<.0001

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2006	365	-121,758	-0,33358	-6,695
ante 2003	3652	121,758	0,03334	6,695

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
-121,7579	-6,69536	<.0001

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
44,8279	1	<.0001

Comparaison débits journaliers :
Ante sècheresse/2006

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2007	348	727300,5	2089,94	1,512
ante 2003	3652	7274699,5	1991,98	-1,512

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
727300,5	1,51208	0,1305

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
2,2865	1	0,1305

Median Test (Number of Points Above Median)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2007	348	170	0,488506	-0,410
ante 2003	3652	1826	0,500000	0,410

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
170	-0,40972	0,6820

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
0,1679	1	0,6820

Van der Waerden Test (Normal Quantiles)

Level	Count	Score Sum	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
2007	348	35,8381	0,10298	2,014
ante 2003	3652	-35,8381	-0,00981	-2,014

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob>|Z|
35,838055	2,01400	0,0440

1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
4,0562	1	0,0440

Comparaison débits journaliers :
Ante sècheresse/2007

BIBLIOGRAPHIE

LIVRES ET OUVRAGES DE REFERENCE.

_ **Musy A., Higy Ch.** « Hydrologie une science de la nature », volume 1, 2004. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Coll. *Gérer l'environnement*.

_ **Pagès J.** « Statistiques Générales pour utilisateurs » *Tome 1 : Méthodologie*, 2005. PUR Presses Universitaires de Rennes.
_**Pagès J. et Husson F**. « Statistiques Générales pour utilisateurs » *Tome 2 : Exercices et corrigés*, 2005. PUR Presses Universitaires de Rennes.

_ **Sprent P**. « Pratique des statistiques non paramétriques », 1992. INRA Editions.

_**Georges W. Snedecor, William G. Cochran** « Statistical Methods », sixième édition, 1971. The Iowa State University Press

SUPPORTS DE COURS, THESES ET MEMOIRES

_ **Bois Ph., Oled Ch. & Zin I.** "traitement des données en hydrologie », 2007.
Institut National Polytechnique de Grenoble.
Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et Mécanique de Grenoble.

_ **Renard B., Lang M**. « éléments de probabilités et statistiques appliqués à l'hydrologie », 2006.
Cemagref Lyon
Université Lyon I

_ **Jordan-Meille L.,** « Modes de transfert du phosphore d'origine diffuse dans un petit bassin versant rural lémanique » thèse n° 1775, 1998.
Département génie rural, Ecole Polytechnique de Lausanne.

_**Renaud J**., «Mise en place du modèle agri-environnemental SWAT sur le bassin versant du Mercube (Haute-Savoie) : vers une modélisation des transferts de phosphore », stage encadré par Poulenard J. , 2004.
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne,
Université Jean Monnet, Saint-Etienne.

_**Ninane L.** « Étude des mécanismes de transfert du Carbone Organique Dissous dans un bassin versant rural : Influence de la diversité spatiale et des conditions hydrométéorologiques », 2004.
Université de Savoie.

_**Duband D**. « hydrologie statistique approfondie », 1982.
Institut National Polytechnique de Grenoble.

ARTICLES ET PUBLICATIONS

_ **Geary R. C.** « Tests de la normalité » annales de l'Institut Henry Poincaré , *tome 15, n °1*, 1956. *Article numérisé dans le cadre du programme : Numérisation de documents anciens Mathématiques : Numdam*

_ **Daumas F** . « Méthodes de normalisation des données » Revue de Statistique Appliquée, *Tome 30 no. 4*, 1982.
_ **Der Megreditchian G.** « Un test non paramétrique unilatéral de rupture d'homogénéité de «k» échantillons ». Revue de Statistique Appliquée, 34 no. 1 (1986).

_ **Ferignac P.** « Test de Kolmogorov-Smirnov sur la validité d'une fonction de distribution ». Revue de Statistique Appliquée, 10 no. 4 (1962).

_ **Rouanet H., Leclerc B**. « Le rôle de la distribution normale en statistique ». Mathématiques et Sciences Humaines, 32 1970.

DOCUMENTS SUR INTERNET & SITES.

_ Les publications diffusées dans le cadre Numdam sont disponibles à l'adresse suivante : http://www.numdam.org/.

_ **Laborde J.-P.** « Méthodes de détection des anomalies et de comblement des lacunes dans les séries de données, à l'usage des climatologues »
http://cnfg.univ-paris1.fr/com/clima2.htm

_ **Wikipédia** « Hydrométrie » http://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrom%C3%A9trie.

_« Réseau partenarial des données sur l'eau »
http://document.observatoire-environnement.org/eaudocs/Bassin_versant.pdf.

_ Site du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire.
DIREN : « Direction régionale de l'environnement »
http://www.ecologie.gouv.fr

_Banque hydro
http://www.hydro.eaufrance.fr/.

_ **Hufty A.** « introduction à la climatologie »
http://books.google.fr/.

_Site du CARRTEL
http://www.dijon.inra.fr/thonon.

_ **Bois PH.** « Contrôle des séries chronologiques par étude du cumul des résidus de la corrélation »
http://horizon.documentation.ird.fr/exldoc/pleins_textes/pleins_textes_4/colloques/25963.pdf.