

# Étude spatiale et temporelle des réseaux de mesure. Les cas des stations hydrométriques depuis le XIX<sup>e</sup> siècle et des stations de mesure de la qualité de l'AESN depuis 1971

Laurence Lestel<sup>1\*</sup>, Ronan Steinmann<sup>1,2</sup>, Kamel Chemlal<sup>1</sup>, Catherine Carré<sup>3</sup>, Michel Meybeck<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis, 4 place Jussieu, 75005 PARIS, France.

<sup>2</sup>Université de Bourgogne, Laboratoire ArTeHis UMR 6298, 21000 DIJON, France.

<sup>3</sup>Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR LADYSS, 75005 Paris, France

\*laurence.lestel@upmc.fr

## Résumé

*Des réflexions sur la conceptualisation optimale de réseaux de stations de mesures ont été menées par des chercheurs et des gestionnaires, mais leur mise en place, leur évolution et leur efficacité à apporter des réponses aux questions environnementales posées sont rarement analysées.*

*Au travers des deux études de cas des réseaux des points d'observation hydrométrique du bassin de la Seine, dont le premier d'envergure a été mis en place par Belgrand à partir de 1854, et du réseau national de la surveillance de la qualité des eaux mis en place en 1971, nous montrerons que ces réseaux ont nettement évolué au cours du temps, tant dans leurs dimensions temporelles (durée et fréquence de mesure) que dans leur distribution spatiale, ou encore dans le nombre de paramètres suivis. Quelques stations patrimoniales subsistent, dont les données permettent d'appréhender des évolutions d'état sur le temps long.*

*La transformation de ces réseaux met également en évidence des évolutions d'objectifs, de stratégie et de gouvernance (locale, par bassin, nationale) où, après des phases d'expansion puis de rétractation, on observe aujourd'hui une redistribution des points de mesures en faveur des petits cours d'eau.*

## 1 Introduction

Les deux réseaux de surveillance étudiés ici ont fait l'objet de rapports PIREN Seine partiels en 2015. Nous soulignons ici ce qu'apporte la comparaison de ces deux réseaux en termes de connaissance du bassin de la Seine et de stratégies de sa surveillance.

Après avoir réuni des informations sur ces deux réseaux et établi une typologie des stations selon leurs missions et leur longévité à partir des données recueillies (chapitre 2), nous avons analysé leur évolution temporelle et spatiale (chapitre 3).

## 2 Les réseaux étudiés

### 2.1 Les données traitées

#### 2.1.1 Stations hydrométriques 1853-1975

Une base de données a été élaborée à partir de la consultation de documents d'archives et de publications qui a nécessité le traitement de six mille clichés de documents des Archives Nationales (AN). Elle couvre la période de 1854, date de la mise en place officielle du premier réseau dense de mesures par Belgrand à 1975, date de la publication d'une synthèse sur les stations existantes par l'Agence de Bassin Seine-Normandie (AESN, 1975). Les pièces les plus intéressantes pour l'étude et la reconstitution du maillage du réseau des stations hydrométriques consistent en des rapports d'ingénieurs, des fiches de station, des cartes représentant le réseau à différentes périodes et des données bibliographiques.

Les principaux documents utilisés comprennent :

- un rapport de 1853 de l'ingénieur des Ponts et Chaussées Belgrand, alors ingénieur en chef de la navigation de la Seine entre Paris et Rouen, réclamant la création d'un service central d'annonce des crues de la Seine. Il liste les stations existantes et propose la mise en place de nouveaux points de mesure dans des localités permettant de mieux comprendre le régime de la Seine et de prévenir les populations de la survenue des inondations en calculant de manière prévisionnelle la montée des eaux (Belgrand, 1853).
- la carte que Belgrand a dessinée en 1854, où figurent les stations hydrométriques et pluviométriques du bassin de la Seine permettant de concourir à l'annonce des crues (source : BNF GED-7782).
- les règlements et instructions des stations de mesures hydrométriques du bassin de la Seine, éditions de 1885 et 1929 (Lefébure de Fourcy *et al.* 1885 ; Monet et Le Besnerais 1929). Ces documents formalisent le fonctionnement du réseau d'observations hydrométriques et d'annonce des crues de l'ensemble du bassin.
- une carte de 1941 des stations d'annonce des crues du bassin de la Seine. Ce document a été dressé par le « Service Central hydrométrique et d'annonce des crues » (source : AN 20060019/29). Le tirage est d'« octobre 1941 » et le fond de carte issu de l'IGN. Ce document est très vraisemblablement une version actualisée de la carte de 1854, car en plus des différents types de stations hydrométriques et pluviométriques, elle précise la nature des terrains géologiques du bassin, comme le document dressé par Belgrand.
- un ensemble de fiches de l'« Inventaire des stations hydrométriques, pluviométriques et des stations de jaugeage des cours d'eau », établies suite à la circulaire n°887 du 8 septembre 1953 par le Service Central Hydrométrique et d'annonce des crues (Ministère des Travaux Publics, des Transports et du Tourisme, AN 19840535/6). Ces documents recensent et décrivent les stations d'annonce des crues actives et abandonnées du bassin. Les informations y sont similaires à celles compilées par Frolov en 1950 (Frolov, 1950)
- des cahiers de stations datés du 31/12/1968, établis par le Service Central Hydrologique (auquel a été rattaché le service d'annonce des crues de la Seine en 1962) du Ministère de l'Équipement et du Logement, comprenant de nombreuses courbes de tarage et des informations détaillées quant à l'équipement des stations et leur localisation précise (AN 19840535/13).
- une carte de 1969 annotée à la main et recensant toutes les stations du bassin de la Seine, avec des précisions quant à l'avancement des jaugeages et les appartenances administratives (AN 19840535/13). Le document de base a été édité en novembre 1969 par l'Agence financière de Bassin Seine-Normandie. On ne connaît cependant pas l'auteur des annotations manuscrites, ni la date exacte de celles-ci.

- un atlas de 1973 recensant toutes les échelles du bassin de la Seine ainsi que leurs fonctions, établi par l'Agence de l'Eau à l'occasion de l'inventaire de pollution de 1971 où elle réunit alors toutes les informations disponibles sur le bassin (annonce des crues, navigation, jaugeage, etc. ; AESN, 1973, Pl. 3-6)

- une liste des stations du bassin classées par tutelles (Service d'Annonce des Crues, EDF, Ministère de l'Agriculture, etc.), réalisée par Goubet *et al.* et annexée à un ouvrage publié en 1975 par la Mission Déléguée et l'Agence Financière de Bassin Seine-Normandie (AESN, 1975).

D'autres informations plus partielles ont été ajoutées à la base de données au gré des documents découverts dans les archives, comme par exemple le répertoire de 1974 des stations gérées par le Ministère de l'Agriculture (AN 19850535/12).

L'ensemble des renseignements ont été saisis sous forme d'un tableau Excel de plus de 1500 entrées correspondant à autant d'échelles de mesures à un instant t.

### **2.1.2 Stations de surveillance de la qualité de l'eau**

La base de données de qualité des eaux de l'Agence de l'eau Seine Normandie (AESN) est énorme, de l'ordre de plusieurs Go. Elle ne peut donc pas être extraite dans sa totalité, d'autant qu'elle est sous-traitée à l'extérieur de l'agence. Lors d'une réunion tenue le 13 mars 2015 avec plusieurs acteurs de l'agence, M. Heriniaina ANDRIAMAHEFA, ancien chef service Connaissances des Milieux Aquatiques, actuellement à la Direction de la Stratégie Territoriale, M. Sébastien TELLIER et Mme Audrey PELLET, ingénieurs au service connaissances des milieux aquatiques (SCMA) dirigé par Mme Aline CATTAN, il fut convenu que nous aurions de leur part deux extractions, l'extraction AESN et l'extraction ANDRIAMAHEFA.

Il s'est ajouté deux autres extractions fournies par William Thomas, du Service Police de l'Eau et SNS, Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie d'Île-de-France, et la base de Florence Curie, Maître de Conférence à l'université de Tours, Laboratoire GéHCO / UFR de Sciences et Techniques, Tours. Cette dernière base comprend les bassins Seine-Normandie et Loire-Bretagne.

Ces quatre bases ont des caractéristiques différentes et des provenances variées (Agence ou Ministère de l'environnement). Elles ont aussi été collectées à des périodes légèrement différentes, de 2009 à 2013. Elles sont détaillées ci-dessous.

#### **- Extraction de l'AESN (BDD AESN)**

Il s'agit d'une extraction à quatre fenêtres de temps, correspondant à des stades précis de la surveillance : 1971, 1988, 1996 et 2009, pour une sélection de 21 stations très surveillées (elles seront appelées patrimoniales dans notre typologie). Elle se compose de 316 686 lignes et 19 colonnes, environ 6 millions de cases. Chaque ligne représente un résultat (une analyse) pour une date précise. Chaque colonne contient des informations relatives au nom de la station de mesure, la date, support, résultat d'analyse, limite de quantification ; elle comprend tous les paramètres de qualité, y compris les familles de micropolluants.

#### **- Extraction d'Heri ANDRIAMAHEFA (BDD Heri)**

Du fait du délai nécessaire à l'extraction précédente, M. H. ANDRIAMAHEFA (AESN, Nanterre) nous a par ailleurs obligeamment proposé de nous communiquer son extraction personnelle de la base de données. Elle comporte les données brutes de toutes les mesures effectuées dans les 21 stations patrimoniales concernant 10 macropolluants et un pesticide (Triadiméno).

Il y a 129 171 lignes, chacune concerne un résultat obtenu d'une mesure d'un paramètre sur une période indiquée.

Chaque ligne est composée de 18 colonnes (attributs) comportant: Code station, Nom station, Point de prélèvement, Année, Date et heure de prélèvement, Date et heure de l'analyse, Code réseau, Code paramètre, Code support, Code fraction, Limite de détection, Limite de quantification, Résultat analyse, Libellé court unité SANDRE, Nom paramètre SANDRE, Commentaire, Qualification et Statut.

#### **- Extraction de Florence Curie, laboratoire GéHCO, université de Tours (BDD Curie)**

C'est une extraction de la base de données des bassins Seine-Normandie et Loire-Bretagne (AELB) directement depuis les sites internet des deux agences. Elle a été réalisée par F. Curie pour ses propres travaux.

L'extraction Curie pour le bassin Seine-Normandie concerne essentiellement les paramètres généraux de qualité (n=23), mesurés la plupart depuis 1971 et couvre toutes les stations (n=2527) pour la période 1971-Évolution spatiale et temporelle des réseaux de mesure

2009. Elle se compose d'un ensemble de 2527 fichiers textes (.txt) ouvrables sous Excel. Chaque fichier correspond à une station de mesure et contient les différents résultats d'analyses pour les années de mesure de 1971 jusqu'à 2009. Le nombre de lignes varie selon les mesures effectuées sur une station. Sur certaines stations, un seul prélèvement a été effectué sur une période donnée, apparaissant sur une ligne unique dans le fichier.

Les 27 colonnes représentent la date, l'année, le mois et le jour du prélèvement et les paramètres analysés (T°C, PH, conductivité, O2, DBO5, MES, COD, NH4+ ...).

L'extraction Curie pour le bassin Loire-Bretagne regroupe 2 211 fichiers textes correspondants au nombre de stations de mesures, avec les mêmes paramètres généraux de la grille 1971 (Tableau 1). Elle est architecturée de la même manière que celle du bassin Seine-Normandie.

**Tableau 1 : Récapitulatif des 23 paramètres généraux analysés dans l'extraction Curie par famille de paramètres**

Familles de paramètres	Éléments
Physiques	température, PH, conductivité, MES
Oxygène	O2, DBO5
Nutriments et carbone organique	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N <sub>KJ</sub> , P <sub>TOT</sub> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , COD
Ions majeurs	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> , SiO <sub>2</sub>
chlorophylle	PheoP (phéo pigment) CHLA (chlorophylle A)

- Base de William Thomas, Service Police de l'Eau de la Seine (BDD Thomas)

M. William THOMAS, expert technique et animateur, (Service Police de l'Eau et SNS, Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie d'Île-de-France) nous a proposé d'extraire les données correspondantes à la fréquence de prélèvement de l'ensemble des paramètres mesurés dans les 21 stations patrimoniales sélectionnées, mais compte tenu du temps consacré à l'extraction et le volume de données, seules 14 stations nous ont été fournies. Cette extraction a été réalisée à partir de la base AESN.

L'extraction est structurée sous Access (mdb). A l'ouverture du fichier, on trouve neuf tables, six dédiées aux bilans d'analyses dans une année indiquée (de 1971 à 2013) et les trois restantes aux paramètres, prestataires et stations. Cette base permet d'établir la chronologie de l'attribution des analyses à des laboratoires pour chaque paramètre. Le Tableau 2 récapitule le contenu des neuf tables.

**Tableau 2 : Récapitulatif des contenus de l'extraction des données du Service Police de l'Eau / DRIEE IF**

Période de résultats	Nom de la table	Nombre de lignes	Nombre de colonnes
[1971 - 1990]	BILAN_01	19053	11
[1991 - 2000]	BILAN_02	8020	11
[2001 - 2005]	BILAN_03	14732	11
[2006 - 2008]	BILAN_04	26217	11
[2009 - 2011]	BILAN_05	38620	11
[2012 - 2013]	BILAN_06	24152	11
[1971 - 2013]	PARAMETRE	1792	8
[1971 - 2013]	PRESTATAIRES	79	4
/	STATIONS	14	23

Les lignes des tables BILAN correspondent aux différents paramètres mesurés pendant une année donnée. Elles se décomposent en colonnes présentant des informations sur le lieu de prélèvement, la date, le nombre de mesures par an et le laboratoire d'analyses. Dans la table PARAMETRE, nous trouvons l'ensemble des paramètres analysés de 1971 jusqu'à 2013 et d'autres informations sur la fraction analysée et l'unité de mesure. La table PRESTATAIRES contient des informations sur tous les laboratoires d'analyses depuis 1971. Dans la table STATIONS figure la liste des 14 stations patrimoniales et les données requises à leur géolocalisation. Le Tableau 3 résume les avantages et les inconvénients de chaque base de données.

**Tableau 3 : Comparaison entre les différentes extractions acquises**

Extraction	Nb stations	Période	Nb paramètres	Avantages	Inconvénients
Extraction de Curie	2 527	1971 -2009	23 (paramètres généraux)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Possibilité de faire une analyse spatiale fine de l'effort surveillance.</li> <li>➤ Très bonne couverture temporelle des stations de mesures.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ paramètres analysés très limités</li> <li>➤ Plusieurs cases ne contiennent pas de résultats.</li> </ul>
Extraction d'Heri Andriamahefa	21	1971 -2014	11 (10 paramètres généraux et un pesticide)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Les cases de la base représentent bien les résultats d'analyses.</li> <li>➤ Possibilité de faire une analyse par rapport à un seul paramètre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ paramètres analysés très limités</li> <li>➤ Nombre de stations limité</li> <li>➤ Difficulté de faire une analyse représentative de l'effort de surveillance pour l'ensemble du réseau.</li> </ul>
Extraction de Thomas	14	1971 -2013	1 499 (macropolluants + micropolluants)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Résultats annuels d'analyses jusqu'à 2013 pour 14 stations patrimoniales ; paramètres complets</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nombre de stations limité</li> </ul>
Extraction de l'AESN	21	1971, 1988, 1996 et 2009	837 (macropolluants + micropolluants)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Quatre fenêtres de temps ; seulement pour les stations primaires ; paramètres complets</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nombres de stations et d'années limités</li> </ul>

## 2.2 Constitution des bases de données (BD)

### 2.2.1 BD des stations hydrométriques géoréférencées

Les données étant de natures et qualités disparates, les informations indexées varient considérablement selon le document traité.

Le cœur de l'élaboration de cette base de données a été la spatialisation des informations, à laquelle un grand soin a été apporté. En effet, dans beaucoup de localités, les échelles ont été déplacées et/ou remplacées au cours du temps, et les positions des stations actuelles elles-mêmes sont souvent assez imprécises. Il était donc important d'arriver à réduire les doutes quant aux emplacements précis des points d'observation au cours du temps. Lorsque l'on dispose d'informations textuelles détaillées, comme « culée amont rive droite du pont X », on cherche tout d'abord à savoir si ledit pont est toujours au même endroit en consultant les cartes anciennes et les photographies IGN, puis en acquérant les coordonnées de la station sur un fond géoréférencé. Il a même été parfois possible d'observer d'anciennes échelles *via* Google Street View. Ont été adjointes à ces coordonnées une incertitude exprimée en m, ainsi qu'une indication qualitative sur la pertinence des coordonnées choisies (bonne, assez bonne, incertaine, communale). Lorsque l'imprécision est de l'ordre de la commune, dans le cas où l'on intègre une carte à l'échelle du bassin versant de la Seine par exemple, l'incertitude n'est pas exprimée en mètres mais la mention « chef-lieu » a été précisée, ce qui indique que les coordonnées de la station correspondent à celles du chef-lieu de la commune<sup>1</sup>. Dans ce cas, la qualité du géoréférencement est indiquée comme « communale ». De nombreuses stations, surtout à partir des années 1950, comportent plusieurs dispositifs de mesure, souvent une ou deux échelles associées à un limnigraphe. Lorsque l'ensemble de ce dispositif est inscrit dans un cercle d'une centaine de mètres, un seul jeu de coordonnées XY a été pris. Cependant certaines stations ont des appareillages distants de plusieurs centaines de mètres voire de plusieurs kilomètres. Des entrées distinctes ont alors été créées, avec des coordonnées spécifiques et des intitulés différents. Ce dernier choix peut tendre à légèrement surreprésenter

<sup>1</sup> Reprises de la BD Geofla de l'IGN : <http://professionnels.ign.fr/geofla>

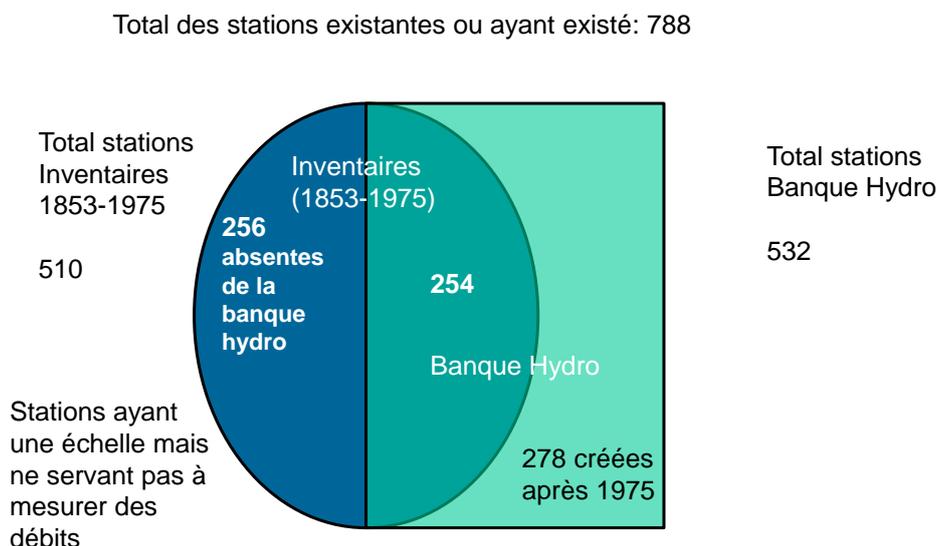
le nombre de stations pour les documents dont les localisations sont précises au détriment de celles des cartes à grande échelle, cependant ce dédoublement n'est jamais opéré sur plus de quatre stations pour un même document, ce qui n'est pas un chiffre très important pour des réseaux comptant toujours plus de cent points.

L'ensemble des informations propres à chaque station à un temps t a été reporté dans un tableau de transcription qui contient le plus de détails possibles extraits du document étudié quant à une série de stations.

Dans une deuxième étape, les données ont été compilées en un tableau unique où les informations concernant une même station ont été regroupées, ce qui a permis d'établir les durées de fonctionnement d'une station ainsi que l'évolution des gestionnaires et du statut de la station au sein du réseau. C'est à partir de ces données qu'ont été lancées la plupart des requêtes pour extraire des informations à traiter sous SIG.

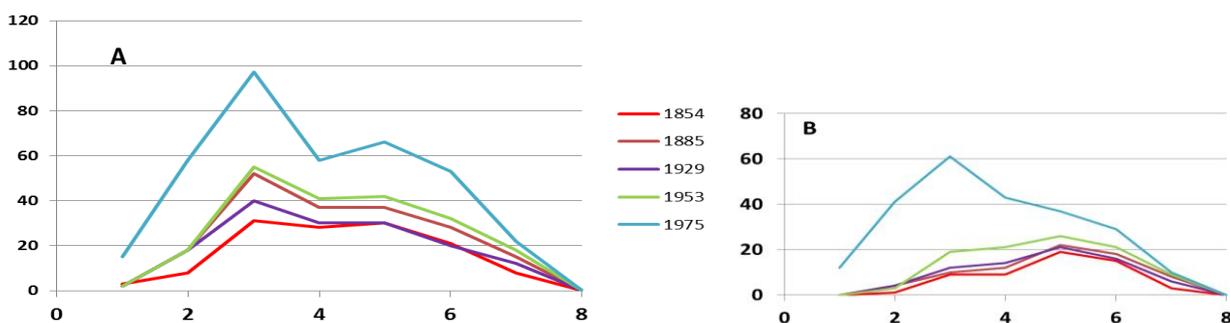
Une base de données de 510 stations ayant existées entre 1854 et 1975 dans le bassin de la Seine a ainsi été établie. Elle ne recoupe que partiellement celle de la Banque Hydro ([www.hydro.eaufrance.fr](http://www.hydro.eaufrance.fr)) dont ont été extraites 532 stations existant sur le bassin de la Seine. Cette différence s'explique par deux facteurs :

- Beaucoup de stations ont été établies après 1975, elles ne sont donc pas présentes dans l'inventaire étudié
- Beaucoup de stations présentes dans l'inventaire mais absentes de la Banque Hydro concernent des échelles ayant un intérêt local mais où n'ont pas été mesurés de débits.



**Figure 1 : Recouvrement des inventaires des stations hydrométriques du bassin de la Seine**

Pour mieux comprendre les différences entre les deux inventaires, nous avons représenté d'une part le nombre de stations de l'inventaire réalisé à partir des archives à différentes périodes (de 1850 à 1970) selon l'ordre hydrométrique de la rivière sur laquelle ces stations sont implantées (ici l'ordre de Strahler). Puis nous avons réitéré l'opération sur les seules 254 stations de cet inventaire également présentes dans la Banque Hydro. Cette analyse montre clairement le biais actuel de la Banque Hydro où les stations anciennes situées sur des rivières de petit ordre sont sous-représentées (Figure 2). Dans la suite de ce rapport, nous nous appuyerons sur notre propre inventaire de 510 stations.



**Figure 2 : A. Nombre de stations hydrométriques par ordre de Strahler dans l’inventaire réalisé à partir des archives. B. Nombre de stations de l’inventaire existant dans la banque HYDRO, par ordre de Strahler.**

### 2.2.2 BD des chrono-diagrammes des stations de surveillance de la qualité de l’eau

Le *chrono diagramme* de l’activité d’une station présente la succession, année par année, de son activité, depuis sa création.

La *création* d’une station correspond à son établissement à une position significativement différente de stations voisines sur le même cours d’eau. En pratique, les agences considèrent qu’une station est nouvelle si elle est située à plus de 250m de ses voisines (Andriamahefa, communication personnelle). Une station est dite *active* lorsqu’elle comprend au moins une analyse (ou une observation) dans l’année considérée, quel que soit le nombre de celles-ci.

Les chrono-diagrammes de chaque station de surveillance enregistrée dans la base extraite Curie (AESN et AELB) ont été élaborés par un programme sous Matlab développé à l’université de Tours par Florence Curie. Il traite tous les résultats d’analyses de toutes les stations de mesures avec l’année d’analyse et la fréquence de l’ensemble des fichiers textes, et il convertit les résultats d’analyses en effort binaire – présence/absence de la surveillance pour chaque année ; indiquée en " 1 " ou " 0 ", selon les données, dans un seul fichier Excel :

" 1 " signifie qu’il y a eu au moins une mesure sur l’année et donc station surveillé.

" 0 " signifie qu’il n y a pas eu de surveillance.

La base créée à partir de ces chrono-diagrammes englobe 41 colonnes-années et 2528 lignes-stations. Les colonnes sont dédiées aux code station (nom) et les années (de 1971 jusqu’à 2009), soit :

$$2527stations \times 40ans = 101080cases$$

Les lignes correspondent à l’effort de la surveillance dans chaque station exprimé en " 1 " ou " 0 ".

Le Tableau 4 présente quelques exemples de séries chronologiques d’activité des stations combinant la plupart des critères de temporalité, sur lesquels nous reviendrons en partie 3.2.1.

**Tableau 4 : Exemples de chrono-diagrammes d’activité des stations (AESN)**

Code SM	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	...
03006000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
03247140								1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	...
03034720														1					1	...
03047000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
03004095															1					...
03080580							1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...

Dans un deuxième temps, cette base a été présentée à Sébastien Tellier (AESN) pour un encodage des stations selon son appartenance, en 2009, aux réseaux actifs suivants :

- RCO : réseau de contrôle opérationnel

- RCB : réseau de contrôle de bassin
- RCS : réseau de contrôle de surveillance
- RRP : réseau de référence pérenne
- RT : réseau tournant réactivé en 2010

A chaque station ont été associés son codage, l'ordre hydrologique de la rivière à l'endroit de la station et la taille des bassins versants en amont de la station, ce qui a permis une analyse de l'évolution spatio-temporelle du réseau de surveillance, selon ces différents paramètres. Pour cela, nous avons supprimé de la base initiale celles dont les ordres hydrologiques et les tailles de bassins versants n'étaient pas cohérentes, ainsi que les stations positionnées sur les canaux, correspondant à un ordre hydrologique « 0 ». Il reste 2334 stations dont 704 étaient actives en 2009.

Enfin, d'autres analyses sur la fréquence de mesures à chaque station ou le nombre de paramètres analysés ont été entreprises mais ne seront pas rapportées ici.

### 3 Analyse des réseaux de mesure

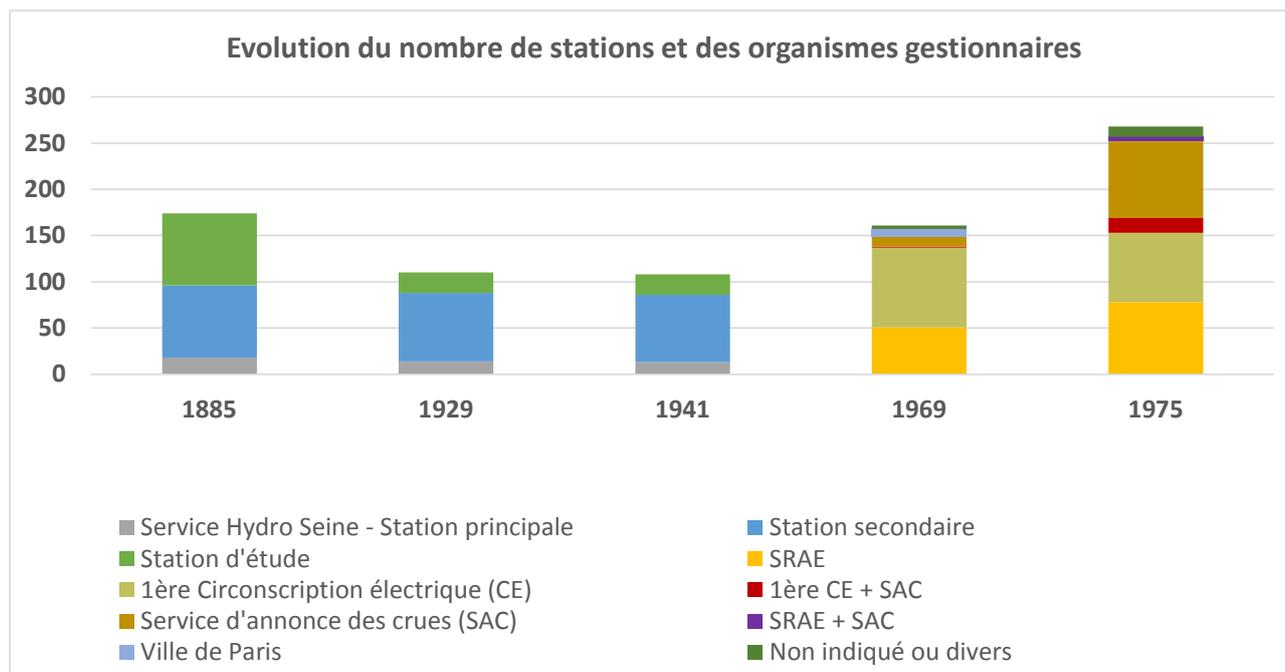
#### 3.1 Evolution du réseau de stations hydrométriques (1853-1975)

##### 3.1.1 *Les institutions en charge du réseau*

Le réseau de mesures voit le jour suite à un rapport d'Eugène Belgrand daté du 8 octobre 1853 proposant la création d'un service hydrométrique du bassin de la Seine. Le but est d'annoncer les hautes eaux, principalement pour favoriser la navigation et non pour prévenir les risques, les crues de la Seine étant qualifiées de « non dangereuses » (Belgrand 1853, p.1). Un réseau de 29 stations hydrométriques associées à 27 stations pluviométriques est envisagé. 14 stations hydrométriques produisent déjà des mesures, ce qui montre qu'un premier réseau existait déjà. Le service est créé le 3 février 1854, et Belgrand chargé de le diriger. Dès la fin 1854, une carte comprenant 121 stations hydrométriques est publiée, sans qu'il soit mentionné si elles sont alors toutes opérationnelles. Dès le début, toutes les stations n'ont pas le même statut, elles sont divisées en stations principales (qui centralisent les informations) ou secondaires d'annonce des crues et en stations d'étude du régime des eaux.

Entre 1854 et 1885, le réseau s'étoffe puisqu'on passe de 121 à 174 stations, les nouvelles étant surtout implantées à l'ouest du bassin versant de la Seine. Entre 1885 et 1929, le réseau se rétracte et passe de 174 à 110 stations. La plupart des suppressions concernent des stations d'étude, ce qui est probablement dû à une focalisation du service sur l'annonce des crues à la suite de la crue de 1910. Entre 1929 et 1941, le réseau est remarquablement stable puis est en partie réorganisé entre 1941 et 1953 (Figure 3).

A partir de 1955, non plus un mais plusieurs réseaux se mettent en place avec les stations de la Première Circonscription Électrique (AESN 1975, p.21), mais aussi avec les stations dépendant d'autres administrations comme les SRAE du Ministère de l'Agriculture ou EDF. Très peu d'anciennes stations subsistent en 1969, les points de mesure ont été redistribués et peuvent dépendre de plusieurs administrations. C'est la mise en place du réseau moderne, celui pour lequel on cherchera bientôt à mesurer des débits et non plus des hauteurs d'eau. Au milieu des années 1970, on compte 312 échelles sur le bassin versant de la Seine, un chiffre qui augmentera encore pour atteindre le nombre actuel de 411 stations hydrométriques.



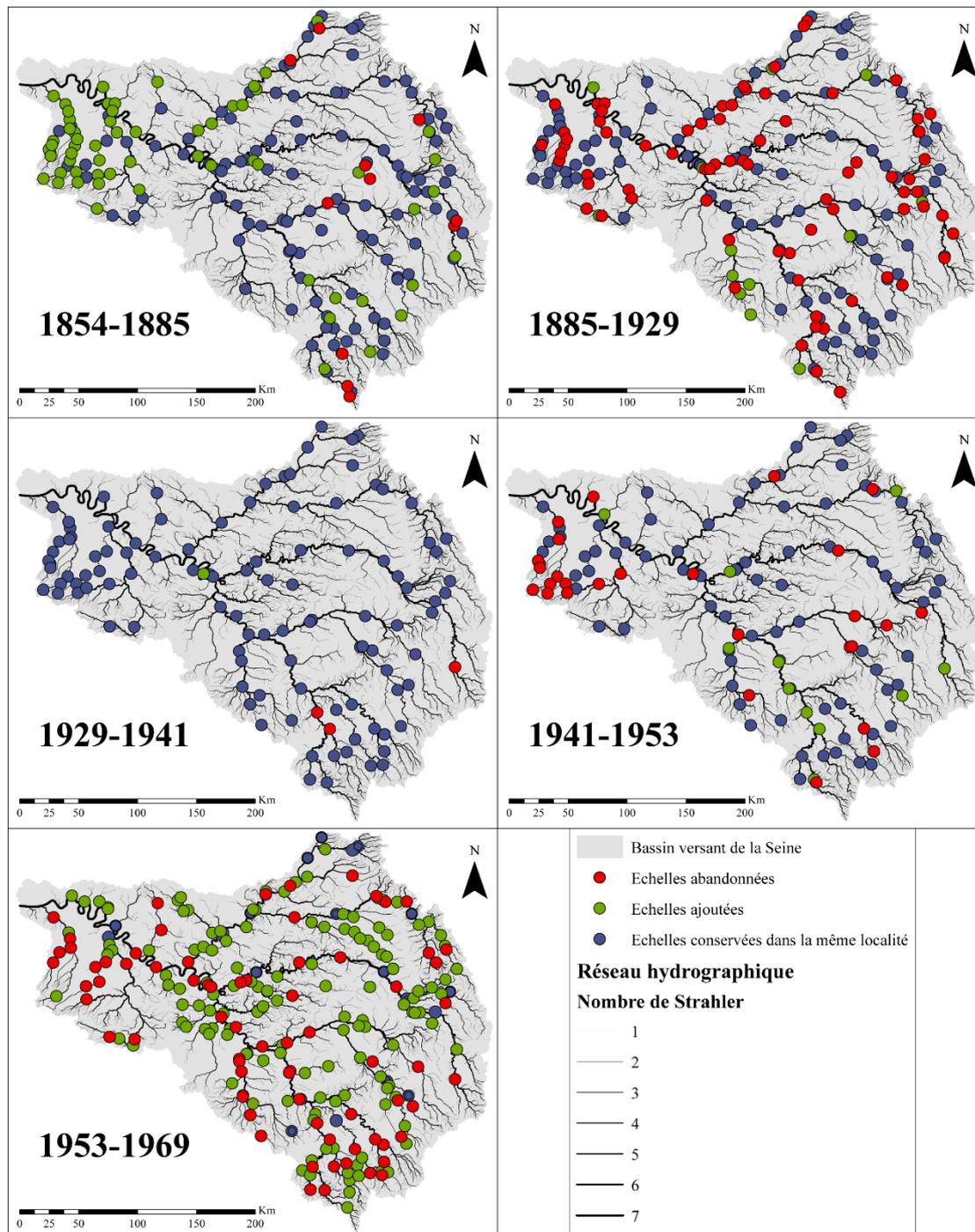
**Figure 3 : Evolution du réseau de stations hydrométriques (1853-1975)**

### 3.1.2 Evolution spatiale du réseau

La localisation de l'ensemble des stations autorise une analyse spatiale des points pour comprendre l'implantation et l'évolution du réseau des stations du bassin versant de la Seine (voir Figure 4).

L'étude de la répartition des stations des différentes époques en fonction de la taille du cours d'eau montre que les stratégies d'implantation ne dépendaient pas de la taille du cours d'eau avant les années 1960 (Figure 2 A). En effet, les seules variations que l'on peut observer avant cette période concernent des jaugeages réalisés sur des sources et dont on perd la trace après les années 1940. On peut éventuellement relever une plus grande représentation des rangs 2 à partir des années 1880 et jusqu'aux années 1920, ainsi qu'une très légère diminution du rang 1 au cours de cette même période. Les années 1960 et 1970 marquent l'apparition de nombreuses stations sur les cours d'eau de rang 1 à 3. Lorsque l'on examine la répartition des stations selon leur finalité, on distingue des comportements différents liés à leurs attributions respectives. Les échelles de navigation sont situées sur les plus grands cours d'eau ; les stations d'annonce des crues se retrouvent sur l'ensemble des types de cours d'eau, et ce quelle que soit la période considérée. En ce qui concerne les autres tutelles principales, c'est-à-dire les stations du nouveau réseau de jaugeage des années 1960-1970, on constate une distribution très différente. Les stations du ministère de l'Agriculture, inféodées aux cours d'eau non domaniaux, ne se trouvent jamais sur des cours d'eau de rang supérieur à 4, et préférentiellement sur les tracés de rangs 2 et 3. Les stations du ministère de l'Industrie peuvent se trouver sur des cours d'eau de rangs 1 à 6, et surtout de 3 à 5. On ne les rencontre en revanche jamais sur la Seine en aval de sa confluence avec la Marne, où le rang de Strahler passe à 7. Ces constatations illustrent la tripartition du réseau de jaugeages moderne entre stations des ministères de l'Équipement, de l'Industrie et de l'Agriculture, chargés de missions différentes.

La comparaison de l'implantation des stations aux différentes périodes (Figure 4) montre que ce réseau a évolué spatialement dans le temps. Si le réseau est resté particulièrement stable entre 1929 et 1941, on constate l'influence de la crue de la Risle, de l'Eure et de la Charentonne en janvier 1881 qui a conduit au développement d'un réseau dense de stations d'études et d'annonce de crue dans l'ouest du bassin. La refonte du réseau en 1929, au profit des seules stations principales et secondaires (Figure 3), conduit à un allègement du réseau sur l'ensemble du territoire. La diversification des institutions après 1953 conduit à une nette redistribution territoriale du réseau.



*Figure 4 : Principales étapes de l'évolution spatiale du réseau des stations du bassin versant de la Seine*

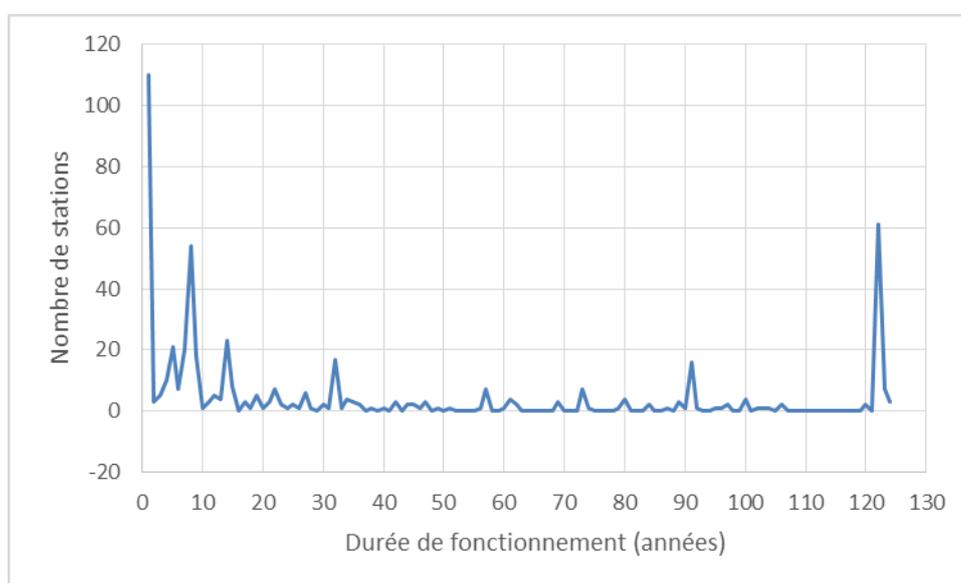
### 3.1.3 Typologie des stations et distribution temporelle du réseau

Une des retombées potentielles de ce travail était également de fournir des informations sur les stations anciennes d'enregistrement des hauteurs d'eau pour l'étude des variations de l'hydrologie à l'échelle pluriséculaire. Or, il s'est avéré de nombreux points d'observation intégrés à la base de données remontent aux années 1850, ce qui est bien antérieur à la plupart des données présentes, par exemple, sur la Banque Hydro. Les jaugeages anciens sont souvent considérés comme insuffisants pour traduire en débit les données anciennes (AESN 1975, p.21 ; Cœur *et al.*, 2003, p. 11), bien que dans le bassin de la Seine certaines courbes hauteurs-débits remontent aux années 1850 et que l'on mentionne des jaugeages ponctuels dans années 1850 à 1880 (De Préau deau 1884 ; Bresse 1895, pp. 7-22). Les relevés des hauteurs d'eau ont en revanche existé, même de façon discontinue, en de nombreux points du bassin. L'étude de ces anciennes séries passe par la

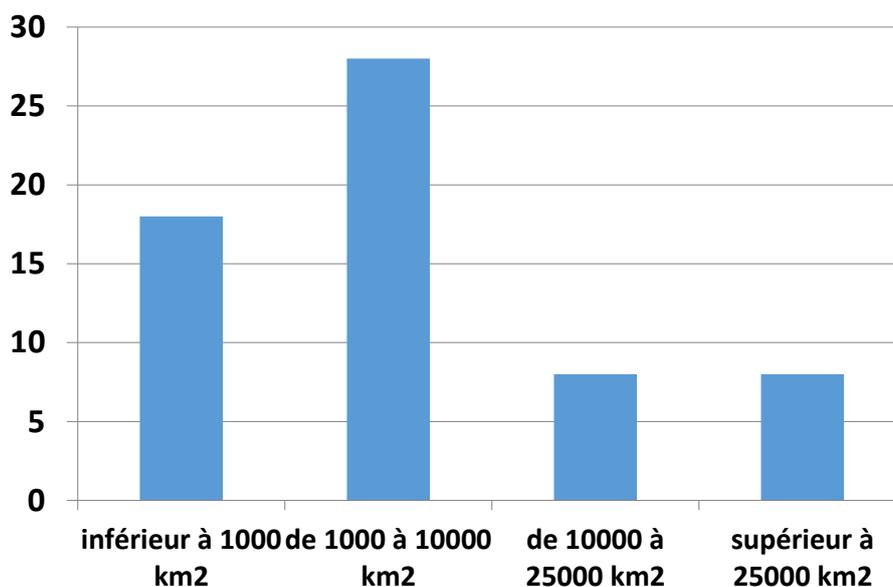
localisation correcte des points de mesure et la prise en compte des changements survenus, comme un déplacement d'échelle par exemple. Les mentions de tels changements ont été systématiquement intégrées aux données.

La durée moyenne de fonctionnement des 511 échelles du tableau de compilation est de 36 ans, la médiane est de 12 ans et l'écart-type de presque 44 ans. Les stations les moins pérennes n'ont fonctionné qu'une année. Il s'agit en fait d'échelles qui ne sont mentionnées que sur un seul document et sans indication de durée. Ces données tirent la distribution des valeurs de durée vers le bas (Figure 5).

Ce graphique permet d'examiner la distribution des données et de considérer quatre types de stations : les stations « uniques », qui ne sont mentionnées que sur un seul document et qui ont été considérées comme n'ayant fonctionné qu'une année, les stations courtes ayant existé entre 2 et 12 ans, les stations de moyenne durée entre 13 et 61 ans et les stations longues entre 62 et 124 ans, c'est-à-dire qu'elles ont été créées avant 1913. Ces stations « longues » dites patrimoniales sont réparties sur l'ensemble du territoire et sont représentatives de bassins versants de tailles très diverses (Figure 6). Nous avons recherché les données journalières de hauteur d'eau à ces stations patrimoniales. Lorsqu'elles ont été conservées, elles le sont généralement depuis 1876.



**Figure 5 : Distribution des stations en fonction des durées de fonctionnement**



**Figure 6 : Distribution des stations patrimoniales par taille du bassin versant en amont de la station**

## 3.2 Le réseau de surveillance de la qualité de l'eau de l'AESN (1971-2009)

### 3.2.1 Evolution de la surveillance et de ses objectifs

La surveillance de la qualité des eaux à l'échelle nationale a débuté en 1971. Elle s'est construite progressivement en plusieurs étapes qui ont combiné une approche réglementaire nationale et une certaine liberté de stratégie, surtout de 1982 à 2005, comme on a pu le constater en comparant les agences Seine-Normandie (AESN) et Loire-Bretagne (AELB). Le Tableau 5 résume les caractéristiques des principaux réseaux de mesure nationaux du suivi de la qualité des cours d'eau (Laronde et Petit, 2010).

**Tableau 5 : Caractéristiques des réseaux de mesure du suivi de la qualité des cours d'eau (Laronde et Petit, 2010)**

	Inventaire du degré de pollution	Réseau National de Bassin	Réseau de Contrôle de surveillance	Réseau de Contrôles opérationnels
<b>Période de fonctionnement</b>	De 1971 à 1986 Campagnes quinquennales : 1971, 1976 et 1981. Campagnes annuelles de 1981 à 1986.	De 1987 à 2006	A partir de 2007	A partir de 2008/2009 Le contrôle cesse lorsque la masse d'eau revient en bon état.
<b>Finalités</b>	Inventaire pour établir le degré de pollution des eaux superficielles.	Obtenir une connaissance générale de la qualité des cours d'eau (degré de pollution ainsi que de son évolution) impact des mesures de dépollution.	Evaluation de la qualité globale des cours d'eau.	Suivi des masses d'eau identifiées comme risquant de ne pas atteindre les objectifs environnementaux de la DCE. Evaluation des changements de l'état de ces masses d'eau suite aux programmes de mesures.
<b>Contexte réglementaire</b>	Mise en application de la loi de 1964	Mise en application de la loi de 1992	Mise en application de la DCE	Mise en application de la DCE
<b>Objectifs de qualité</b>	Atteindre les objectifs définis à partir de la grille 71 (satisfaction des usages)	Atteindre les objectifs définis à partir du SDAGE	Objectifs environnementaux de la DCE dont le bon état	Objectifs environnementaux de la DCE dont le bon état
<b>Choix des stations</b>	Principalement sur les grandes rivières	Principalement sur les grandes rivières (les petites rivières et ruisseaux qui forment l'essentiel du linéaire sont peu suivis) et souvent en aval de rejets	Fonction de la taille du bassin, du linéaire par taille de cours d'eau et de la typologie des masses d'eau. Prise en compte de très petits cours d'eau.	Une station représentative par masse d'eau risquant de ne pas atteindre les objectifs.
<b>Nombre de stations</b>	957 stations en 1971 et 1298 en 1981	1508 en 1987 et 1967 en 2006	1584 (rapportage 2008)	Prévisionnel : 2070 (rapportage 2008)
<b>Nature des mesures</b>	Mesures physico-chimiques et bactériologiques (60 paramètres en 1971 et 136 en 1981)	Mesures physico-chimiques, biologiques et bactériologiques (130 paramètres en 1987 et 758 en 2006)	Mesures physico-chimiques, biologiques et hydro-morphologiques (895 paramètres en 2007)	Liée aux paramètres déclassant. Suivre l'impact des pressions au travers les éléments de qualité ou paramètres les plus sensibles à ces pressions.
<b>Outil d'évaluation</b>	Grille 71	SEQ-EAU	SEEE	SEEE

### 3.2.2 Typologie des stations de mesure et évolution temporelle

De 1971 à 2006, la surveillance de la qualité s'est considérablement développée, tant qualitativement (problèmes de qualité pris en compte ; supports utilisés), que quantitativement (nombre de stations surveillées, nombre d'analyses effectuées). Sur un même territoire, le bassin Seine-Normandie, la qualité est définie en 2013 par au moins cent fois plus d'analyses effectuées chaque année qu'en 1971.

Les réseaux de surveillance ont changé de nom et d'objectifs plusieurs fois depuis 1971, INP71, RNB, RCS, RCO, tout en conservant un noyau dur de stations d'origine, que nous appelons ici **stations patrimoniales (PA)**.

En 1971 le réseau initial comprend 108 stations quinquennales (12 analyses/an) qui ont été suivies à trois reprises (1971-1976-1981), et n'ont pas été poursuivies après. Elles sont distribuées sur l'ensemble du bassin, comme les stations patrimoniales, en moyenne sur des rivières d'ordre de Strahler 4+ (Figure 8 B). Entre ces inventaires, il ne demeure que quelques stations de surveillance légères, qui vont progressivement être pérennisées. De 1983 à 1992, l'AESN a développé une stratégie de surveillance supplémentaire, légère - en fréquence et en paramètres- mais très dense, avec 592 **stations tournantes (TN)**, surveillées deux ou trois fois à plusieurs années de distance (Figure 7). Pendant cette période le réseau patrimonial continue à se développer. L'AESN aura ainsi en 1989 une densité de stations deux fois plus élevée que la moyenne

nationale et 7.5 fois plus élevée qu'en AELB. De 1992 à 2000, période que nous appelons du SEQ-Eau, le réseau n'évolue guère, même si les paramètres analysés vont changer. La période 2000-2005 correspond à la préparation de la DCE. Elle se caractérise par l'abandon de certaines stations, dont des patrimoniales, par la réactivation de certaines stations éphémères et par la création de 172 **stations nouvelles (NV)**, plutôt situées sur les têtes de bassins (ordre de Strahler moyen 3). Elles sont toutes surveillées à une fréquence de 12 analyses/an. On note aussi 254 **stations réactivées (RA)** : ce sont souvent des stations où s'exerçait une surveillance légère (4 analyses/an), qui a été augmentée pour la DCE.

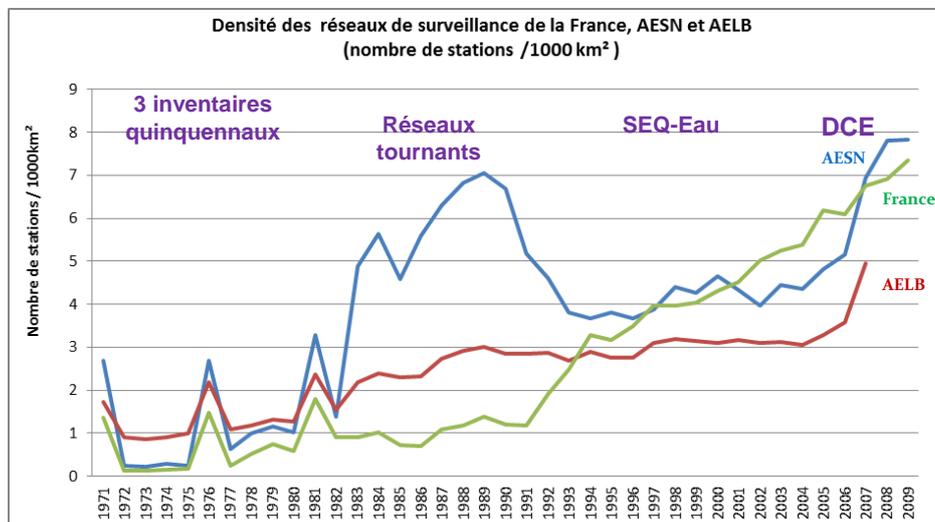


Figure 7: Densité des réseaux de surveillance de la France, AESN et AELB (nombre de stations /1000km<sup>2</sup>).

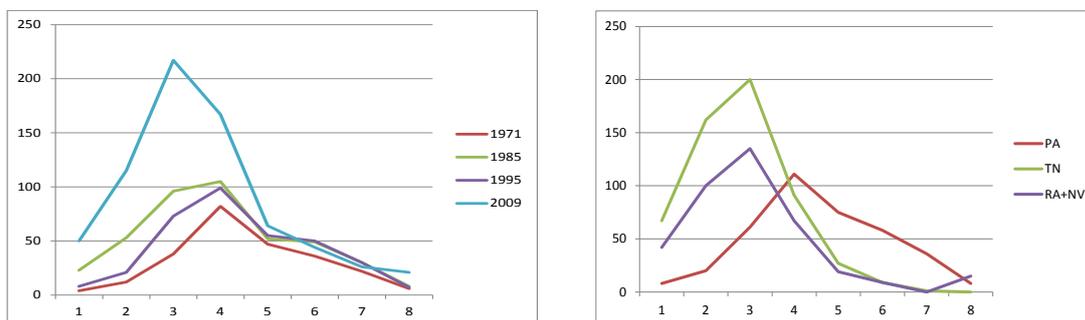


Figure 8: Nombre de stations par ordre de Strahler (A) à 4 dates différentes, (B) selon leur type. PA : patrimoniales. TN : tournantes. RA : réactivées. NV : nouvelles.

### 3.2.3 Répartition spatiale du réseau de mesures (1971-2009).

Les réseaux **RCO**, **RCS** et **RCB** (respectivement réseau de contrôle opérationnel, de surveillance et de bassin) de 2009, mis en place pour la DCE, sont donc très composites, comportant des stations de longueur de suivis très variées, de quelques années à 39 ans, avec des temporalités également variées (pérennes, segmentées, tournantes). En distribution sur le territoire (ici représentée par la taille des bassins versants en amont des stations), ces trois réseaux ne sont pourtant pas fondamentalement différents (Figure 9).

Par contre une analyse fine de la répartition spatiale des stations de mesures en fonction des quatre grandes périodes identifiées et de leur type permet d'identifier des stratégies de surveillance particulières. Ainsi, on voit bien que si l'inventaire de 1971 essayait de couvrir l'ensemble du territoire (tout en privilégiant les cours d'eau d'ordre de Strahler relativement élevé), le réseau pérenne qui subsiste en 1972 est quasiment exclusivement tourné sur les grands cours d'eau (Figure 10). La Figure 11 qui représente le réseau des stations tournantes en 1988 montre bien que des rivières peu surveillées le deviennent de manière dense le temps d'une campagne. Enfin, la Figure 8 montre bien que le réseau a évolué ces dernières années vers une meilleure surveillance des petits cours d'eau.

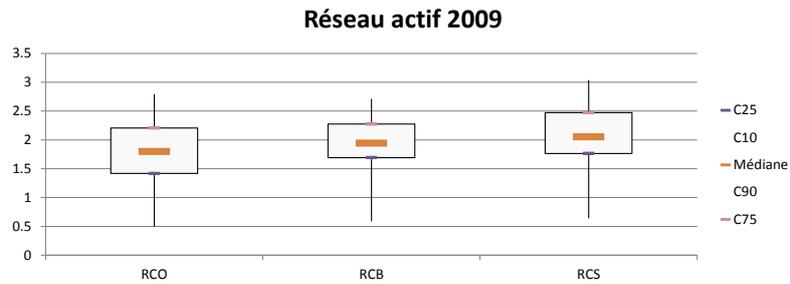


Figure 9 : Distribution des  $\log(\text{superficies})$  pour les différents réseaux RCO, RCS et RCB actifs en 2009



Figure 10 : Conservation des stations de mesure sur les grands cours d'eau entre l'inventaire de 1971 et celui de 1976.

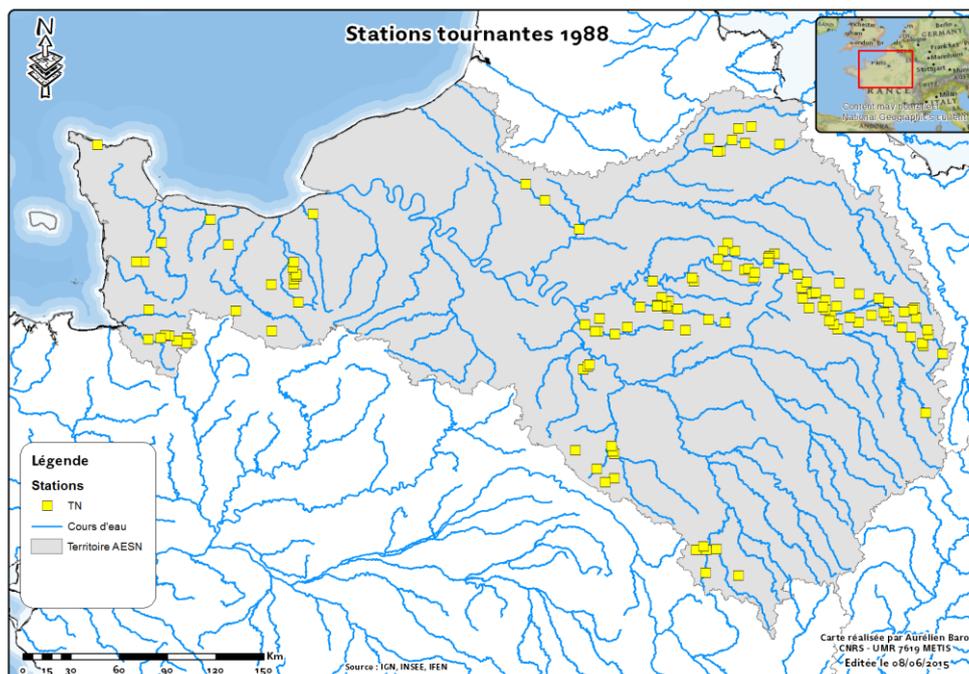


Figure 11 : Emplacement des stations tournantes dans le réseau de l'AESN en 1988

## 4 Synthèse et discussion

L'analyse de ces deux réseaux de mesure a permis de dégager de grandes tendances que nous indiquons ci-dessous.

Les documents existants permettent en général de bien connaître les raisons de la création de ces réseaux. Ils ont été conçus dans un but d'améliorer la connaissance, d'une part du fonctionnement hydrique des cours d'eau du bassin en 1854, d'autre part de l'état des rivières en 1971. Ces premières mesures concertées sur un territoire dans son ensemble et reproduites dans les années suivantes ont conduit à la surveillance systématique de ce territoire.

Mais dans les deux cas, la conception spatiale du réseau ne nous est pas connue. Les choix d'implémentation sont rarement explicités, et n'ont été révélés ici que par l'analyse spatiale qui n'a pu être menée que parce que l'ensemble des stations ont été repérées par leur position géographique dans les bases de données constituées. Par contre, on trouve plus tard des études sur l'optimisation de ces réseaux de mesure où cette question de l'implémentation est posée (*Cahier des charges*, 2003, Andriamanalina, 2014).

Si l'on connaît bien les acteurs de la mise en place de ces réseaux et leurs motivations, nous ne disposons que de très peu de détails pratiques sur leur mise en place effective.

Des inventaires sont régulièrement menés, dans les deux cas, nous donnant une image précise du réseau à une date donnée. Par contre les raisons de l'évolution temporelle du réseau sont rarement explicites ou analysées.

Ces réseaux ont produit une quantité de données astronomique dont seule une partie est accessible. Les récupérer relève du parcours du combattant.

Enfin, l'efficacité de ces réseaux à apporter des réponses aux questions environnementales posées n'est pas interrogée. Les objectifs du réseau peuvent avoir évolué dans le temps, de la connaissance à la surveillance, mais cette évolution n'est pas analysée. Si ces réseaux semblent aptes à soutenir l'action publique à un moment donné, se pose la question de la conservation des stations patrimoniales, nécessaires pour établir des trajectoires temporelles, seules à même de permettre de comprendre l'évolution du territoire du bassin de la Seine.

## Références

- AESN. Agence de l'eau seine-Normandie, 1973. *Les Bassins de la Seine et des cours d'eau normands. Atlas*. Éd. Mission Déléguée de Bassin seine-Normandie, Agence Financière de Bassin Seine-Normandie, 12 Pl.
- AESN. Agence de l'Eau Seine-Normandie, 1975. *Les Bassins de la Seine et des cours d'eau normands. Tome I – Ressources d'eau et données hydrologiques*. Fascicule 5 – eaux superficielles. Mission déléguée de Bassin Seine Normandie et Agence Financière de Bassin Seine Normandie, publication hors-série du bulletin Seine-Normandie. 161 p.
- Andriamanalina M., 2014. *Organisation de la surveillance de la qualité des eaux sur le bassin Seine Normandie : Evolution des réseaux de mesure pour le SDAGE (2016-2021)*, Master 2, UPMC-AESN, 51p.
- Belgrand E., 1853. *Projet d'organisation d'un service hydrométrique dans le bassin de la Seine*. Rapport non publié, Archives Nationales 198601103/65, 16 p. et 2 graphiques.
- Bresse, 1895. *Statistique des jaugeages effectués dans les principaux bassins français*. Rapport non publié, Archives Nationales 19840535/1, 127 p. + graphiques.
- Cahier des charges pour l'évolution des réseaux de surveillance des eaux souterraines en France*, 2003, 116p.
- Cœur D., Lallement C. et Lang M., 2003. L'hydrologie fluviale entre théorie et territoire. La mesure des débits fluviaux sur l'Isère et la Durance (XIXe-XXe siècles). Dans Dalby (dir.) et Bodelet (dir.) *Origines et histoire de l'hydrologie : colloque international OH2, Dijon, 9-11 mai 2001/Origins and history of hydrology : international symposium OH2, Dijon, May, 9-11, 2001*. CD-ROM, éd. Centre de Recherches de Climatologie de l'Université de Bourgogne (Dijon) et Laboratoire de Géologie appliquée de l'Université de Paris VI (Paris). 11 p.

- De Préaudeau M.A., Lefébure de Fourcy C. (dir.), Lemoine G. (dir.), 1884. *Manuel hydrologique du bassin de la Seine*. Éd. Imprimerie Nationale, Paris, 120 p.
- Frolow V., 1950. *Catalogue des échelles utilisées par le service central hydrométrique et d'annonce des crues*, cahier n°12, Commission du bassin de la Seine-Hydrométrie, 23p.
- Laronde S., Petit K., 2010. *Bilan national des efforts de surveillance de la qualité des cours d'eau*, rapport Onema-Office National de l'eau, 330p.
- Lefébure de Fourcy C., Lemoine G., Heude H., 1885. *Bassin de la Seine. Règlements et instructions concernant l'annonce des crues et l'étude du régime des rivières*. Ministère des Travaux Publics, Ponts et Chaussées, Service Hydrométrique et de l'Annonce des Crues. Éd. Imprimerie Nationale, Paris, 621 p.
- Monet et Le Besnerais, 1929. *Bassin de la Seine. Règlements et instructions concernant l'annonce des crues et l'étude du régime des rivières*. Ministère des Travaux Publics, Ponts et Chaussées, Service Hydrométrique et de l'Annonce des Crues. Éd. Imprimerie Nationale, Paris, 518 p.