

COURBES de TARAGE de la SEINE en CRUE à PARIS

Avertissement : les nombres entre [] renvoient aux références bibliographiques .

L'écoulement de la SEINE à la traversée de PARIS a été fortement modifié au cours des âges par deux séries de faits :

- les ouvrages de navigation (barrage de la Mennaie près de Suresnes, etc) ,
- les conséquences de l'urbanisation qui ont progressivement réduit le lit majeur et qui ont rendu nécessaire, après 1910, la réalisation d'un certain nombre de travaux destinés à améliorer l'écoulement et à compenser l'effet de l'urbanisation .

En eaux basses ou moyennes il est devenu délicat de déterminer les débits à Paris, et il est absolument impossible de les calculer à partir de l'observation des cotes à une seule échelle .

Par contre, au-dessus de 800 m³/s environ ⁽¹⁾, les barrages de navigation sont abattus et il devient possible d'estimer les débits à partir d'une échelle .

Je vais essayer de déterminer ainsi les débits de crue de la Seine depuis 1840 .

Il importe toutefois de remarquer

- que les premiers jaugeages de crue ont été faits en 1876 (débit mesuré maximum 1 652 m³/s) ,
- que jusqu'en 1955 on avait seulement mesuré lors des crues les vitesses en surface (à l'aide de flotteurs, de l'hydrotachymètre de RITTER ou de moulinets) .

...../

(1) B. GASPARD indique que le barrage de Suresnes est abattu pour les débits supérieurs à 6 ou 700 m³/s [1]

1 - Courbe de tarage actuelle .

22 mesures ont été exécutées entre 1955 et 1968 par la Circonscription Electrique (14 mesures) , les Services de la Navigation et le Laboratoire de Chateau pour des débits compris entre 800 et 2 100 m³/s et ont permis d'établir avec une excellente précision la relation

$$Q = 301 H - 62 \text{ pour l'échelle d'Austerlitz}$$

Ce sont à ma connaissance les seules mesures de débits de crue au cours desquelles on ait mesuré les vitesses dans la totalité de la section .

On trouvera toute précision utile à ce sujet dans [2] ainsi que pour partie dans [3]

On peut s'étonner du caractère linéaire de cette relation alors qu'habituellement les courbes de tarage présentent une certaine courbure . En particulier, on utilise souvent des formules telles que

$$Q = K (H - H_0)^\alpha$$

α ayant souvent la valeur 1,5 .

Mais on peut constater qu'en pratique une telle courbe est assimilable à une droite lorsque la gamme de débits considérée est relativement limitée , ce qui est le cas ici ($\frac{2\ 100}{800} = 2,6$ seulement) .

Au cours des jaugeages de 1955, on a constaté (cf [3]) que le rapport entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne était un peu supérieur à 0,9 , que les jaugeages soient effectués à partir d'un pont (pont au Double) ou entre 2 ponts (entre le pont de l'Alma et le pont des Invalides) .

Or, jusque là, on avait seulement mesuré la vitesse en surface et on en avait déduit le débit en supposant que ce rapport avait diverses valeurs comprises entre 0,8 et 0,9 ; dans ces conditions il y a lieu de rectifier les estimations de débits faites antérieurement .

En particulier, B.GASPARD avait établi le 3 Février 1953 [1] une courbe de tarage valable entre 700 et 2 200, courbe pouvant très sensiblement se représenter par la relation (pour l'échelle du pont d'Austerlitz)

$$Q = 272 H + 16$$

A cote égale, les débits indiqués par cette relation sont un peu plus faibles que ceux résultant de la relation mentionnée plus haut (1) ; cet écart provient sans doute du fait que M. GASPARD avait utilisé les résultats de jaugeage faits en 1924 - 41 - 44 - 45 et 52 à l'aide de mesures de surface (avec des flotteurs ou des moulinets placés entre 0,2 et 1 m de profondeur) et en retenant des coefficients de correction de vitesse compris entre 0,80 et 0,85 .

...../

(1) de 11 m³/s pour la cote de 3m (débit 830 m³/s) et de 174 m³/s pour la cote de 2 200 m³/s .

En retenant le coefficient 0,9 [3] on constate que les jaugeages de 1944 et 1945 concordent très bien avec la courbe de tarage établie après la crue de 1955 .

2 - Courbe de tarage valable à la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle . -

On a actuellement l'habitude de travailler d'après les cotes relevées à l'échelle du pont d'Austerlitz .

Antérieurement, on parlait surtout des cotes à l'échelle du pont de la Tournelle, située à 1 km environ à l'aval et où avait été installée, en 1732, la première échelle hydrométrique dans la traversée de Paris. On parlait aussi souvent des cotes à l'échelle du pont Royal (cf en annexe le croquis des ponts de Paris) installée quelques années plus tard (1)

BELGRAND [4] attribuait aux zéros de ces échelles les cotes (nivellement BOURDALOUE)

26,24 Austerlitz

26,25 Tournelle

24,48 Royal

Dans les documents du Service de la Navigation de la fin du XIX^{ème} siècle et dans le " Manuel Hydrologique du Bassin de la Seine " les cotes des échelles des ponts de la Tournelle et du pont Royal sont supérieures de 4 cm aux valeurs retenues par BELGRAND .

LALLEMANT
Aujourd'hui, le Service de la Navigation retient, en nivellement LALLEMANT, et pour les échelles de la Tournelle et d'Austerlitz, 25,62 et 25,57 .

2.1 - Courbe de tarage de POIRÉE :

La plus ancienne courbe de tarage dont j'ai connaissance est celle de POIRÉE , Inspecteur Général des Ponts-et-Chaussées ; on en trouve mention en particulier dans " la SEINE " de BELGRAND [4] .

POIRÉE avait rapporté sa courbe aux deux échelles habituellement utilisées à l'époque pour les études hydrologiques de la Seine ; celle du pont Royal et celle du pont de la Tournelle . Cette courbe a été établie avant la construction du barrage du pont Neuf .

Pour les débits supérieurs à 800 m³/s, POIRÉE indique - nous rapporte BELGRAND :

(1) à l'époque où ces échelles ont été posées , ces deux ponts étaient les ouvrages situés le plus à l'amont et le plus à l'aval de l'agglomération .

<u>Cote au pont Royal</u>	<u>Débit</u>	<u>Cote au pont de la Tournelle</u>
4,50	725	{ 3,60 }
5,00	980	{ 4,11 }
5,50	1 075	{ 4,62 }
6,01	1 230	5,14
	1 350	5,52
	1 510	6,01
	1 780	6,82
	1 970	7,36
	2 110	7,80
	2 160	7,91

Je suppose que POIRÉE a établi cette courbe vers 1840. Il semble bien qu'elle résulte uniquement de calculs théoriques car on ne trouve mention dans la littérature de l'époque d'aucun jaugeage. Par ailleurs, ce tableau est donné jusqu'à la cote 7,91 qui était le record atteint (tout au moins le pensait-on à l'époque) par la crue survenue un siècle auparavant, en 1740.

2.2 - jaugages de 1876 à 1883 - formule de PREAUDEAU . -

Entre 1876 et 1882 plusieurs jaugeages ont été exécutés à l'aide de flotteurs entre le pont des Invalides et le pont de l'Alma ; on admettait un rapport 0,8 entre la vitesse moyenne et la vitesse de surface, alors qu'un jaugeage complet effectué en 1955 a indiqué dans cette section une valeur un peu supérieure à 0

Je corrigerai donc les débits admis à l'époque en les majorant de 12,5 % (substitution de 0,8 à 0,9)

On a mesuré :

Date	Cote		Débit	
	Royal	Tournelle	Primitif	rectifié
17 Mars 1876 ⁽²⁾	6,725	6,46	1652	1 858
20 "	6,185	5,775	1 400	1 575
22 "	5,425	5,005	1 292	1 453
24 "	4,545	4,035	1 030	1 159
27 "	3,615	3,035	830	934
7 Janv. 1879 ⁽³⁾	6,08	5,02	1 226	1 379
8 "	6,20	5,15	1 254	1 411
9 "	6,21	5,20	1 186	1 334
10 Déc. 1882	6,35	5,33	1 262	1 420
5 Janv. 1883	6,98	6,00	1 504	1 692

- (1) les 3 valeurs entre parenthèses résultent également d'observations de POIRÉE rapportées par BELGRAND ; j'ai trouvé ces renseignements dans [6] et non dans [4]
- (2) en 1876, les débits ont été mesurés par BROSSELIN et VAUDREY. Dans [8] BELGRAND et LEMOINE donnent les précisions suivantes : " les observations étaient faites entre le pont de l'Alma et le pont des Invalides entre 2 profils en travers espacés de 60 m, dans un emplacement où la Seine a un lit on ne peut plus régulier. La vitesse de l'eau, à la surface, était mesurée au moyen de flotteurs (bouteilles lestées). Le débit a été calculé en multipliant la vitesse moyenne à la surface ainsi mesurée par la section et par le coefficient de correction 0,80 "
- (3) en 1879, les flotteurs ont été gênés par des piles de pont ; les mesures de débit ont peut être été perturbées de ce fait .

En 1876, une mesure a été faite pratiquement au moment du maximum et cette crue n'a pas été dépassée jusqu'en 1910 ; en 1879 et 1883, on a également exécuté une mesure au moment du maximum de la crue .

De ces jaugeages et d'autres, relatifs à des débits inférieurs, de PREAUDEAU a déduit les relations

$$Q = 110 + 180 H + 9 H^2 \quad [3]$$

$$\text{ou} \quad Q = 70 (H + 1,80)^{3/2} \quad [7]$$

valables entre 2 m et 6,7 m à l'échelle de la Tournelle (alors que la première de ces relations était très généralement utilisée, je n'ai rencontré la seconde que dans [7])

Il conviendrait de multiplier les coefficients de ces formules par 1,125 pour tenir compte des rectifications apportées aux jaugeages .

Les relations deviennent alors

$$Q = 124 + 203 H + 10 H^2$$

$$Q = 79,5 (H + 1,80)^{1,5}$$

En fait, entre 3,30 et 6,70 m (800 et 1 720 m³/s) ces deux dernières relations peuvent se remplacer plus simplement par

$$Q = 292 H - 70$$

Je donne, dans le tableau ci-dessous, les écarts entre les débits mesurés et les débits calculés, pour une même cote, d'après ces 3 relations :

Cote au pont de la Tournelle	: 124+203 H+10 H ²			: 79 (H+1,80) ^{1,5}			: 292 H - 60		
	Q mesuré	Q _c	Δ Q/Q	Q _c	Δ Q/Q	Q _c	Δ Q/Q		
6,46	1 858	1 853	0 %	1 860	0 %	1 826	+ 2 %		
6,00	1 692	1 702	- 1 %	1 709	- 1 %	1 692	0 %		
5,775	1 575	1 630	- 3 %	1 636	- 4 %	1 626	- 3 %		
5,33	1 420	1 490	- 5 %	1 495	- 5 %	1 496	- 5 %		
5,20	1 334	1 450	- 8 %	1 455	- 8 %	1 458	- 8 %		
5,15	1 411	1 435	- 2 %	1 439	- 2 %	1 444	- 2 %		
5,005	1 453	1 391	+ 4 %	1 396	+ 4 %	1 401	+ 4 %		
5,02	1 379	1 395	- 1 %	1 400	- 1 %	1 406	- 2 %		
4,035	1 159	1 106	+ 5 %	1 105	+ 5 %	1 118	+ 4 %		
3,035	934	832	+ 12 %	835	+ 12 %	826	+ 13 %		
Ecart moyen			+ 4,1 %		+ 4,2 %		+ 4,3 %		

Les 3 relations sont pratiquement équivalentes et très acceptables compte tenu de la précision des jaugeages. On ne peut retenir l'une de préférence aux autres. La relation linéaire a pour elle l'avantage de la simplicité ; le fait que les écarts soient très légèrement plus importants ne doit pas la faire rejeter, car lorsqu'on augmente le nombre de paramètres de la formule mathématique on obtient une courbe qui coïncide nécessairement un peu mieux avec les résultats expérimentaux sans que pour autant le résultat trouvé soit plus proche de la courbe de tarage réelle que l'on s'efforce de déterminer .

En particulier, les résultats expérimentaux n'impliquent nullement que la courbe de tarage soit concave dans la zone considérée .

On peut noter que, à cote égale, il y a une différence de débit de 10 % environ entre les indications de la courbe de tarage de POIRÉE et celle déduite des jaugeages de 1876-1883 (après rectification) . Il est difficile de penser que l'écoulement se soit amélioré à ce point entre 1840 et 1876 à la traversée de Paris ; je pense plutôt que POIRÉE a commis une erreur, très faible d'ailleurs étant donné les moyens dont il disposait .

2.3 - jaugeages de 1891 - 1892 et 1896 .

RITTER, Ingénieur en Chef des Ponts-et-Chaussées, a rendu compte des jaugeages qu'il a fait effectuer au pont de Selférine en Avril 1891 - Février 1892 et Novembre 1896 [9] et [10].

La section transversale était déterminée d'après des relevés exécutés à l'étiage en 1887 par le Service de la Navigation .

La vitesse était mesurée " à l'aplomb du tympan aval du pont " , sur près de 48 verticales dans chacune des 3 passes (distance entre verticales 2,66 m) à l'aide d'un hydrotachymètre (1).

La vitesse moyenne était supposée égale à 0,9 fois la vitesse de surface .

Les cotes étaient relevées au pont Royal .

RITTER a ainsi obtenu :

...../

(1) Cet appareil était, je pense, un appareil à prise de pression car RITTER précise " toutes ces vitesses ne sont bien entendu qu'approximatives " à cause des oscillations des colonnes manométriques, lesquelles sont la " conséquence tant des variations effectives de la vitesse en chaque point " que du balancement à peu près inévitable de l'instrument lui-même " .

DATE		COTE	DEBIT
30 Avril	1891	2,55	240
24 "	"	2,63	295
22 "	"	2,70	370
20 "	"	2,80	425
16 "	"	3,00	530
15 "	"	3,10	560
12 "	"	3,65	700
27 Février	1892	4,30	810
26 "	"	4,50	830
25 "	"	4,70	930
23 "	"	4,97	1 040
7 Novembre	1896	5,24	1 145
6 "	"	5,34	1 155
5 "	"	5,45	1 230
3 "	"	6,07	1 470

En 1891 et 1896 on a exécuté un jaugeage au moment du maximum de la crue ; en 1892 la cote maximum a atteint 5,00 m .

On pourrait croire, en se limitant aux 8 jaugeages supérieurs à 800 m³/s qu'ils déterminent avec une grande précision la courbe de tarage

$$Q = 382 H - 860 \quad (1)$$

ainsi que le montre le tableau suivant

Cote	:	6,07	5,45	5,34	5,24	4,97	4,70	4,50	4,30
Debit mesuré	:	1 470	1 230	1 155	1 145	1 040	930	830	810
Debit d'après la relation linéaire ...	:	1 459	1 122	1 180	1 142	1 039	935	859	783
Ecart	:	- 1 %	- 1 %	+ 2 %	0 %	0 %	+ 1 %	+ 3 %	- 3 %

En fait, ce résultat est certainement faux .

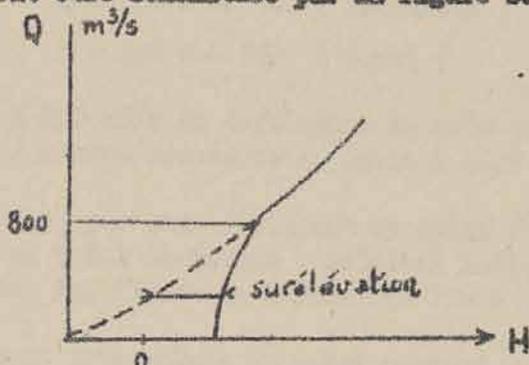
En effet, si le barrage de Suresnes (et éventuellement le barrage situé à l'aval de celui-ci) n'avait pas existé , la courbe de tarage serait une courbe tournant vraisemblablement en concavité vers les Q positifs, confondue en très hautes eaux (les barrages étant effacés) avec la courbe réellement observée et faisant correspondre un débit nul à une cote sans doute inférieure au zéro de l'échelle du pont Royal, compte tenu des travaux en Seine (avant les travaux de navigation, l'étiage conventionnel correspondait à la cote 0,57 m) .

...../

(1) RIPPER préconisait $Q = 405 H - 990$

Pour les débits faibles et moyens à cause du barrage de Suresnes, on observe une surélévation du plan d'eau par rapport à la situation qui serait observée en l'absence de barrages - surélévation qui diminue quand le débit augmente. (En basses eaux, la cote au Pont Royal est d'environ 2,50 m.) .

Ceci peut être schématisé par la figure suivante :



Compte tenu de l'ensemble des résultats des jaugeages de RITTER, on doit donc retenir en très hautes eaux une courbe qui serait à peu près entre 800 et 1 500 m^3/s (cf tableau du paragraphe 2.4) .

$$Q = 290 H - 370$$

2.4 - Courbe de tarage de l'échelle du Pont Royal d'après les jaugeages de 1876 à 1896 .

Le Pont Royal est situé à l'aval du Pont de la Tournelle et les jaugeages étudiés ci-dessus ont tous été exécutés à l'aval du Pont Royal .

Ils peuvent donc servir à définir au moins aussi bien une courbe de tarage pour l'échelle du Pont Royal que pour l'échelle du Pont de la Tournelle.

On constate que les jaugeages de 1879 - 1882 et 1883 correspondent de façon acceptable (compte tenu des erreurs de mesure accidentelles sans doute parfois importantes) avec la courbe $Q = 290 H - 370$ (définie ci-dessus à partir des mesures de RITTER) ainsi que le montre le tableau suivant et la figure 1 .

Date	Cote	Débit mesuré	Débit calculé	Ecart
7 Janvier 1879	6,08	1 379	1 393	- 1 %
8 " "	6,20	1 411	1 428	- 1 %
9 " "	6,21	1 234	1 331	- 7 %
10 Décembre 1882	6,35	1 420	1 471	- 3 %
5 Janvier 1883	6,98	1 692	1 654	+ 2 %

25 Février 1892	4,70	930	993	- 6 %
23 " "	4,97	1 040	1 071	- 3 %
7 Novembre 1896	5,24	1 145	1 150	0 %
6 " "	5,34	1 155	1 179	- 2 %
5 " "	5,45	1 230	1 211	+ 2 %
3 " "	6,07	1 470	1 390	+ 6 %

...../

La comparaison entre les courbes de tarage des échelles du Pont de la Tournelle et du Pont Royal

Q = 292 H = 70 (Tournelle)

Q = 290 H = 370 (Royal)

entre qu'entre 800 et 1 600 m³/s la différence de cote entre les indications des 2 échelles est sensiblement constante et égale à 1,05 m .

Ce résultat n'est pas très différent de celui établi par POIRÉE 40 ou 50 ans avant puisque (cf § 2.1 ci-dessus) celui-ci indiquait que l'écart variait entre 0,87 et 0,90 m pour des débits de l'ordre de 700 à 1 200 m³/s (1) .

Il est également très voisin de celui observé en 1910 : les différences de cote rapportées au zéro du nivellement BOURDALOUE et mesurées à 8 heures , du 4 au 20 Février , aux deux échelles, diffèrent de 0,63 à 0,70 cm (moyenne 0,675 cm) [12] .

Ceci correspond à des différences de 1,07 à 1,14 cm entre les cotes lues aux deux échelles, compte tenu des altitudes différentes des zéros (pour des cotes de l'ordre de 4 à 5 m au Pont de la Tournelle) .

Comme les indications de l'échelle aval sont supérieures à celles de l'échelle amont, l'augmentation des différences de cotes entre 1800 et 1910 correspond à une diminution de la pente entre les deux échelles ; la dénivellation réelle semble être passée de 90 à 70 cm. Cette diminution peut s'expliquer soit par une détérioration des conditions de l'écoulement à l'aval, soit par une amélioration de l'écoulement entre les deux échelles, la première de ces hypothèses étant semble-t-il la seule à retenir (rappelons qu'à l'étiage, avant la canalisation de la Seine, la dénivellation du plan d'eau entre les deux échelles était 120 cm lors des étiages sévères) .

Par contre, les observations relatives à la crue de 1876 sont tout à fait anormales :

...../

(1) par ailleurs, on a observé les différences suivantes entre les cotes des maxima aux deux échelles lors des crues du début du XIX^{ème} siècle :

<u>Date</u>	<u>Cote à la Tournelle</u>	<u>Ecart (cm)</u>
1802	7,32 ou 7,45	34 ou 46 (valeur douteuse)
1807	6,66 ou 6,70	80 ou 84
1850	6,05 ou 6,07	70 ou 72
1861	5,60	82
1866	5,20	100
17/12/1872	5,85	100
24/ 1/1873	3,60	115

au cours des 5 jaugeages exécutés du 17 au 27 mars 1876 (et correspondant à des débits compris entre 930 et 1860 m³/s) on observe des écarts de cote entre les deux échelles qui augmentent de 26 cm (pour 1860 m³/s) à 58 cm (pour 930 m³/s) ; la pente moyenne entre ces deux échelles semble avoir été , pendant cette crue, nettement plus forte que pendant les crues immédiatement antérieures et postérieures. La courbe de tarage de l'échelle du Pont de la Tournelle ne semble pas avoir été modifiée ; par contre, au Pont Royal , la cote est inférieure de 50 à 60 cm, pour un même débit, à ce qu'elle sera 3 ans plus tard et à ce qu'elle était vraisemblablement quelques années plus tôt .

Je ne vois aucune explication valable pour ce phénomène :

il est en effet difficile de croire que les aménagements faits dans le lit de la Seine entre 1876 et 1879 à l'aval du Pont Royal aient eu pour effet de relever de 50 à 60 cm le plan d'eau au droit de ce pont. Quand bien même cela aurait-il été qu'une surélévation aussi importante devrait exercer une certaine influence au droit du Pont de la Tournelle .

Je pense qu'en fait il y a des erreurs dans la série des cotes au Pont Royal que j'ai relevée dans l'étude de BELGRAND et LEMOINE [8] . En effet , dans cette même étude, les auteurs précisent " Cette crue a atteint son maximum " à Paris le 17/18 mars 1876 . Elle a atteint, aux principales échelles, les " hauteurs suivantes :

Pont d'Austerlitz 6,68 le 17/18 mars ,
Pont de la Tournelle... 6,50 le 17 mars, de 15 à 18 heures ;
Pont Royal 7,30 le 17/18 mars .

On retrouve bien pour l'écart entre les maxima une différence de l'ordre de 1 m ; il est aussi très possible qu'au moment du jaugeage fait le 17 mars, la cote à l'échelle du Pont de la Tournelle ait été inférieure de 4 cm au maximum ; il est par contre impensable que la cote au Pont Royal n'ait été que 6,725 m .

2.5 - jaugeages de 1910

En février et mars 1910, une nouvelle série de jaugeages a été exécutée à partir d'un nouveau pont (le Pont des Arts) et les résultats rapportés à une nouvelle échelle (celle fixée à l'aval du Pont des Arts) .

ARANA rend compte des résultats dans les Annales des Ponts-&Chaussées de 1911 [11] .

Les mesures ont été faites à partir du Pont des Arts, qui compte 9 arches ; la section transversale a été déterminée le 14 février ; les vitesses ont été mesurées à 10 reprises en février et mars et les débits calculés en admettant un rapport 0,9 entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne .

Les cotes sont données en valeur absolue .

...../

<u>Date</u>	2/2 ⁽¹⁾	13/2	16/2	17/2	18/2	19/2	20/2	21/2	4/3	10/2
<u>Cote</u>	32,80	31,05	31,18	31,24	31,18	31,04	30,64	30,16	30,86	29,26
<u>Débit mesuré</u> ...	2 030	1 590	1 711	1 696	1 747	1 903	1 546	1 424	1 485	1 396
<u>Débit calculé</u> ..	2 126	1 666	1 700	1 716	1 700	1 664	1 558	1 432	1 616	1 195
<u>Ecart</u>	- 5 %	- 5 %	+ 1 %	+ 1 %	+ 3 %	+ 14 %	- 1 %	- 1 %	- 8 %	+ 17 %

ARANA en déduit, pour l'échelle du pont des Arts, la relation :

$$Q = 263 H - 6 500$$

Le tableau ci-dessus donne les valeurs des débits calculés d'après cette relation et les écarts correspondant avec les débits mesurés (à noter que pour une cote pratiquement identique - 31,05 et 31,04 m, on a mesuré 1590 et 1903 m³/s ; le procédé de mesure était donc loin d'être très précis) .

C'est, semble-t-il la première fois que l'on mesure un débit supérieur à 1860 m³/s à Paris ; malheureusement ces mesures n'ont pas été directement rapportées à l'échelle du pont de la Tournelle ou à celle du pont Royal v

On peut procéder à un raccordement d'après des cotes indiquées par DELACHENAL et LEFORT [12] .

Ceux-ci donnent les cotes BOURDALOUE aux échelles du pont Royal et du pont de la Tournelle, à 8 heures, du 4 au 20 Février . Ils précisent que le zéro de l'échelle du pont Royal est à 24,52 m ; il est vraisemblable qu'ils ont retenu la cote 26,29 m pour le zéro de l'échelle du pont de la Tournelle. On peut ainsi dresser le tableau suivant :

<u>Date</u>	<u>Cotes aux ponts</u>			<u>Différences de cotes</u>	
	Royal	Tournelle	Arts	A-R	T-A
13 Février	30,84	31,54	31,05	0,21	0,49
16 "	30,95	31,64	31,18	0,23	0,46
17 "	31,02	31,70	31,24	0,22	0,46
18 "	30,98	31,67	31,18	0,20	0,49
19 "	30,81	31,49	31,04	0,23	0,45
20 "	30,46	31,10	30,64	0,18	0,46

...../

(1) à cette même date, d'après ARANA, on aurait mesuré 2172 m³/s en faisant le total des débits des deux bras des Iles - ce qui confirmerait la validité de la courbe de tarage proposée pour les débits élevés .

On constate que les différences de cote sont très constantes (de légères variations peuvent s'expliquer par les incertitudes de lectures et par fait que les cotes n'étaient pas relevées à 8 heures au pont des Arts) .

L'ordre de grandeur de ces différences est par ailleurs normal compte tenu des distances qui séparent ces échelles (environ 0,6 km entre le pont Royal et le Pont des Arts, et 1,6 km entre le Pont des Arts et le Pont de la Tournelle) et des légères incertitudes avec lesquelles sont déterminées les cotes des zéros des 3 échelles .

Il est vraisemblable que les écarts, déterminés dans le tableau ci-dessus pour les cotes comprises entre 31,10 et 31,70 (4,81 et 5,41 à l'échelle de la Tournelle) se conservent dans un domaine plus large puisque les autres relevés figurant dans [12] montrent que la dénivellation de 68 cm environ entre les deux échelles du Pont Royal et du Pont de la Tournelle reste sensiblement constante entre 30,62 et 31,94 (4,33 et 5,65 à l'échelle de la Tournelle).

Dans ces conditions, on pourrait admettre que les jaugeages effectués à la passerelle du Pont des Arts déterminent les courbes de tarage :

$$Q = 263 H + 264 \text{ à l'échelle du Pont Royal}$$

$$Q = 263 H + 291 \text{ à l'échelle du Pont de la Tournelle (1)}$$

Ces résultats sont très surprenants. En effet, la graphique joint en annexe indique pour l'échelle du Pont de la Tournelle, d'une part la relation linéaire et la courbe de tarage de De PREAUDEAU que l'on peut toutes deux déduire des jaugeages exécutés de 1876 à 1896, d'autre part la courbe déduite des jaugeages de 1910 .

On constate que, à débit égal, la cote se serait abaissée d'environ 0,8 m pour des débits de l'ordre de 1 500 m³/s (cet abaissement allant en se réduisant lorsque le débit augmente) . Or, il est invraisemblable que les conditions d'écoulement se soient trouvées améliorées de façon aussi spectaculaire entre 1896 et 1910 .

Mais il y a lieu de remarquer que les 10 jaugeages faits en 1910 présentent une dispersion importante ; on pourrait, par exemple, au lieu de la relation préconisée par ARANA, retenir presque aussi valablement la relation :

$$Q = 290 H - 7 310$$

qui serait représentée par une droite parallèle à celle déterminée par les jaugeages antérieurs et qui correspondrait aux écarts suivants :

<u>cote</u>	32,80	31,05	31,18	31,24	31,18	31,04	30,64	30,16	30,86	29,26
<u>débit mesuré</u>	2 030	1 590	1 711	1 696	1 747	1 903	1 546	1 424	1 485	1 396
<u>débit calculé</u>	2 202	1 694	1 732	1 750	1 732	1 692	1 576	1 436	1 639	1 175
<u>écart</u>	-8	-6	-1	-3	+1	+12	-2	-1	-9	+19

...../

(1) ARANA dans [11] indique que les jaugeages du Pont des Arts déterminent pour l'échelle du Pont des Arts la courbe de tarage

$$Q = 263 H - 6 630 \text{ (H étant exprimé en valeurs absolues)}$$

$$\text{soit } Q = 263 H + 284 \text{ (H étant exprimé par rapport à l'échelle) .}$$

L'écart moyen entre les points expérimentaux est 6,2 % (contre 5,6 % avec la relation proposée par ARANA), l'écart quadratique moyen 8,4 % (contre 7,8 % pour la relation d'ARANA) .

On peut par ailleurs mettre en doute l'ensemble des résultats des mesures ; en effet, on a mesuré au cours de chaque jaugeage la vitesse en surface, mais l'on a déterminé la section transversale à partir d'un relevé unique effectué le 14 Février ; alors que le débit était de l'ordre de 1 600 m³/s ; il est à peu près certain que les câbles lestés utilisés pour mesurer les profondeurs ont pris une flèche importante qui a pu être mal corrigée ; d'autre part, les contacts avec le fond ont pu être difficiles à déterminer étant donnée la vitesse du courant et le tirant d'eau important .

Il semble que les conclusions d'ARANA n'aient pas été suivies par les autres auteurs à l'époque ; en effet, ARANA, extrapolant sa courbe de tarage jusqu'à la cote maximum atteinte en 1910 à l'échelle du pont des Arts (34,09 m) estime le débit maximum de cette crue à 2 466 m³/s . Mais BOLENSKY [3] indique " la valeur de 2 330 m³/s qui résulte des études faites " par M. l'ingénieur en Chef PERRIER, sur les jaugeages effectués à cette époque " dans une section installée au pont des Arts, semble être corroborée par celle " obtenue sur le modèle réduit " (1) .

Je ne sais pas d'où provient l'écart de 130 m³/s entre ces deux évaluations faites à partir d'une même série d'observations, mais les estimations de PERRIER ne présenteraient plus un très grand écart avec celles que l'on pourrait déduire des jaugeages antérieurs . En particulier, la courbe de tarage linéaire que j'ai proposée ci-dessus pour la période 1876-1896 fait correspondre à la cote maximum de 1910 à l'échelle de la Tournelle (8,42 m) un débit de 2 369 m³/s .

2.6 - Conclusion pour la fin du XIX^{ème} siècle et le début du XX^{ème} siècle .

Des jaugeages de 1910 je tirerai donc seulement la conclusion que les conditions d'écoulement ne se sont pas sensiblement aggravées de 1896 à 1910 et que la même courbe de tarage est donc valable de 1876 à 1910 .

Je pense que cette courbe peut être également retenue pour les quelques années suivantes, jusqu'aux premiers travaux d'amélioration de l'écoulement apportés au lit de la Seine .

3 - Comparaison de la courbe de tarage actuelle et de la courbe ancienne - période transitoire . -

La courbe de tarage actuelle est établie pour l'échelle du pont d'Austerlitz .

Nous avons retenu, pour la fin du XIX^{ème} siècle, une courbe relative à l'échelle du pont de la Tournelle .

...../

(1) M. BOLENSKY n'a pas pu me fournir la référence des études de M. PERRIER

La distance entre ces deux échelles est de 1,0 km environ .

La cote du zéro de l'échelle du pont d'Austerlitz est inférieure de 5 cm à celle du zéro de l'échelle du pont de la Tournelle ; la différence de cote entre les deux échelles, qui est de quelques centimètres à l'étiage (plan d'eau pratiquement horizontal) augmente quand le débit croît pour atteindre une vingtaine de centimètres .

On peut rapprocher les maxima observés lors des crues suivantes

	<u>TOURNELLE</u>	<u>AUSTERLITZ</u>	<u>Ecart</u>
Décembre 1872	5,85	6,10	25
17 ou 18 Mars 1876	6,50	6,69 ou 6,68	18 ou 19
24 Février 1879	5,05	5,50 ou 5,62	45 ou 57
8 ou 9 Janvier 1879	5,20	5,64	44
23 ou 24 Janvier 1873 } 7 ou 15 Mars 1873 }	3,60	3,80 3,70	20 10
7 ou 8 Décembre 1882	5,84	6,12	28
5 ou 7 Janvier 1883	6,00 ou 6,02	6,24	23
11 Décembre 1885	5,22	5,60 (1)	38
23 Février 1889	5,18	5,40	22
1910	8,42	8,62	20

(les cotes de 1879 sont indiquées dans la note [13] ; cette note indique tantôt 5,50 et tantôt 5,62 pour la cote Austerlitz et précise :

" en 1879 les cotes au pont d'Austerlitz sont, pour une cause artificielle qu'on pourra faire disparaître, trop fortes de 0,25 m environ " .

MAILLET, dans l'étude [14] retient pour ces crues les cotes 5,39 en Janvier et 5,37 en Février ; (sans doute a-t-il tenu compte de la surélévation artificielle) .

L'écart de cote entre les deux échelles semble donc être, en très hautes eaux, de 25 cm (moyennes des 8 valeurs indiquées ci-dessus) au-dessus de la cote 5,0 au pont de la Tournelle (1 400 m³/s environ) .

J'ai trouvé dans le dossier relatif à la crue de 1910 du Service Central Hydrologique une indication manuscrite qui indique que la transposition de la formule de PRAUDEAU (2) à l'échelle d'Austerlitz est

$$Q = 99,5 + 171,5 H + 9,12 H^2$$

Elle a été établie en supposant que la différence de cote n'est pas constante mais varie de 17 cm pour 4 m à la Tournelle à 24 cm pour 6,50 m .

.../

(1) date non précisée

(2) il s'agit évidemment de la formule de PRAUDEAU utilisée à l'époque, c'est-à-dire avant la rectification de 12,5% que j'ai introduite dans cette étude .

On peut supposer que cette transposition a été faite à l'époque après une étude attentive des différences de cotes entre les deux échelles .

Par ailleurs, dans le dossier de la crue de 1910 mentionné ci-dessus, on trouve l'indication de la relation qui était en fait utilisée en 1910 par le Service Central Hydrologique pour l'échelle d'Austerlitz

$$Q = 890 + 250 (H - 4,10) + 9 (H - 4,10)^2 \text{ pour } H < 4,10$$

$$Q = 890 + 250 (H - 4,10) + 20 (H - 4,10)^2 \text{ pour } H > 4,10$$

Pour une même cote ces relations donnent, par rapport à la relation $Q = 99,5 + 171,5 H + 9,12 H^2$ des débits légèrement supérieurs en très hautes eaux (5 m³ d'écart pour 1 600 m³/s), mais des débits nettement moindres pour les petites crues (65 m³/s d'écart pour 900 m³/s et 93 m³/s pour 800 m³/s) .

D'après la figure 1 de l'étude " Note sur la détermination des débits " je pense que cette double relation est une transposition à l'échelle d'Austerlitz de la courbe de POIRÉE ; dans la mesure où les jaugeages exécutés à partir de 1876 n'ont pas totalement confirmé les estimations de POIRÉE, il n'y a évidemment pas lieu de retenir cette double relation .

Par contre, on peut retenir la courbe de PRAUDEAU transposée par les soins du Service d'Année des Crues à la fin du siècle dernier, à condition de majorer ces coefficients, comme expliqué ci-dessus, de 12,5 % ; elle devient :

$$Q = 112 + 193 H + 10,26 H^2$$

Elle peut d'ailleurs se remplacer par la droite

$$Q = 305 H - 170$$

entre 900 et 2 500 m³/s ainsi que le montre le tableau suivant

H	3,5	4,00	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
<u>Courbe</u>	913	1048	1188	1333	1484	1639	1800	1966	2137	2313	2494
<u>Droite</u>	898	1050	1202	1355	1507	1660	1812	1965	2117	2270	2422
<u>Ecart (%)</u>	+2	0	-1	-2	-2	-1	-1	0	+1	+2	+3

alors que nous avons vu ci-dessus (paragraphe 1) que la courbe actuelle peut se représenter par

$$Q = 301 H - 72$$

.../

Ceci signifierait que les travaux d'amélioration de l'écoulement entrepris à la suite des crues de 1910 et 1924 ont conduit à un abaissement du plan d'eau de

28 cm	pour un débit de 1 000 m ³ /s
25 cm	" " " de 1 500 "
23 cm	" " " de 2 000 "
21 cm	" " " de 2 500 "

Je sais que cette valeur est notablement inférieure à celle retenue généralement, laquelle est de l'ordre de 70 cm, mais j'ignore comment on a été conduit à estimer cet abaissement. BABINET - Ingénieur en Chef des Ponts & Chaussées - écrit dans [15] " Si on admet un abaissement de 0,70 du fait des travaux exécutés à la suite des crues de 1910 et 1924 ". B. GASPARD dans [1] déclare " Il résulte des études faites qu'on peut admettre qu'actuellement une crue de même débit que celle de 1910 passerait dans Paris à 0,60 m en moyenne au-dessous des cotes atteintes par les maxima de 1910 " .

Dans [3] OBOLENSKY écrit, à propos de la crue de 1910 " la valeur de 2 330 m³/s qui résulte des études faites par M. l'Ingénieur en Chef PERRIER semble être corroborée par celle obtenue sur le modèle réduit ". L'application de la relation linéaire que je propose pour l'échelle du pont d'Austerlitz conduirait à estimer cette crue à 2 398 m³/s. L'écart de 3 % entre ces deux valeurs est trop faible pour que, 60 ans après on puisse essayer de déterminer la valeur la plus vraisemblable (1). Il faut d'ailleurs avoir présent à la mémoire le fait que la relation que je propose correspond à une transposition de la courbe de PREAUDEAU établie à partir de jaugeages tous inférieurs à 1 900 m³/s et que les jaugeages exécutés en 1910 sont très sujets à caution.

Dans ces conditions, étant donné que la courbe actuelle est bien déterminée, et qu'il est vraisemblable que les travaux d'amélioration de l'écoulement ont conduit à une amélioration supérieure à 25 cm, je proposerais de retenir un abaissement de la cote de 40 cm, ce qui conduirait pour la courbe de tarage à l'échelle d'Austerlitz

depuis 1944 Q = 301 H = 72

de 1870 à 1924 ... Q = 301 H = 192

et d'admettre que le terme constant diminue de 6 m³/s en moyenne par an de 1924 à 1944.

Ceci revient à admettre que les jaugeages ayant servi à établir la courbe de PREAUDEAU étaient sous-estimés de 9 % environ et non de 12,5 %.

...../

(1) Dans [1] B. GASPARD écrit à propos de la crue de 1910 " aucune mesure faite à l'époque ne permet de préciser avec sûreté le maximum de la crue évaluée approximativement à 2 250, 2 300 et même 2 400 m³/s ". Je rappelle qu'en 1954 aucune mesure de crue comportant l'exploration des vitesses dans toute la section n'avait encore eu lieu et qu'un grand nombre des résultats admis pour les jaugeages antérieurs étaient sous-estimés.

4 - Période antérieure à 1870 . -

On admet habituellement que le développement de Paris s'est traduit par un étranglement du lit de la Seine à la traversée de la capitale, et une élévation, à débit égal, de la cote du plan d'eau.

Par exemple, B. GASPARD écrit dans [1] " alors que jusqu'à 1900 " approximativement, le lit se resserrait de plus en plus, un processus inverse " le dégage progressivement, mais on est loin d'être revenu à l'état d'écoulement " de 1750 par exemple " .

" M. DEUTSCH a démontré dans son étude sur l'élargissement du bras de la " Monnaie, à l'aide d'anciens documents et textes, que la Seine était beaucoup " plus large à cette époque. Ainsi l'île St-Louis a été progressivement " surélevée, alors qu'elle était très basse au XIV^{ème} siècle, ses prairies " étaient recouvertes d'eau tous les hivers " .

De pareilles réflexions doivent être accueillies avec prudence et je vais essayer d'examiner l'évolution de la situation depuis 1650 .

En effet, à cette date, les conditions de l'écoulement entre le Pont de la Tournelle et le Pont Royal sont sensiblement analogues aux conditions actuelles, sinon plus médiocres qu'actuellement .

L'île St-Louis a été aménagée et bâtie à partir de 1614 ; les quatre quais (d'Orléans, de Béthune, d'Anjou et de Bourbon) ont été construits de 1614 à 1646 en 47 ; les nombreux hôtels construits à l'époque, et existant actuellement, montrent que l'île, qui ne portait aucune construction avant, a dû être rehaussée d'un seul coup à cette époque. Le Pont de la Tournelle a été construit de 1614 à 1654 (1), il a été moitié emporté lors de la crue de 1651 . Le Pont Marie, de son côté, a été construit de 1614 à 1635 (il a été emporté une première fois en 1641, puis, les deux premières arches du côté de l'île ont été détruites par la crue de 1658 et reconstruites (2) .

De son côté, l'aménagement de la pointe aval de l'île de la Cité (remblaiement des bras entre les deux flots existants; surélévation) avait été exécuté un peu avant pour permettre la création de la Place Dauphine (certains des immeubles actuels datent de cette époque) .

Après la construction du Pont Royal, de 1685 à 1689 (à l'emplacement d'une passerelle plus ancienne), les ponts entre le Pont de la Tournelle et le Pont Royal sont, aux reconstructions et élargissements près, très voisins des ponts actuels ; on a réalisé après cette date : le Pont des ARTS (1803), le Pont LOUIS-PHILIPPE (sous Napoléon III) et le Pont du CARROUSEL .

Par contre, existaient déjà (de l'aval vers l'amont) :

..../

-
- (1) Il existait depuis 1369, une passerelle en bois, plusieurs fois détruite, reliant l'île au Quai de la Tournelle. Le pont de 1654 a été fortement élargi en 1923 - 1928 .
 - (2) sur un autre document, j'ai trouvé indiquée l'année 1664 pour la fin des travaux d'endiguement et de construction des deux ponts .

- le Pont NEUF (dont une passe était encombrée par la pompe de la Samaritaine jusqu'en 1813) réalisé de 1578 à 1604 ,
- le Pont au CHANGE (peut être antérieur à l'An Mille, rebâti en 1647 , refait pour la dernière fois en 1858, et le Pont St-MICHEL (1) ,
- le Pont NOTRE-DAME (refait pour la dernière fois en 1913) et le PETIT PONT (refait pour la dernière fois en 1853) . Sur le plan Turgot de 1735 on constate que la pompe Notre-Dame obstruait l'une des 5 passes du Pont Notre-Dame ,
- le Pont d'ARCOLE (refait en 1888) et le Pont au DOUBLE (refait pour la dernière fois en 1885) ,
- le Pont de l'ARCHEVECHE date de 1828, mais à peu près à son emplacement figurent sur le plan Turgot deux ponts en maçonnerie (comportant deux arches chacun) ,
- la Passerelle de l'ILE St-LOUIS (qui ne comporte actuellement aucune pile en rivière) s'appelait jadis le Pont ROUGE ; c'était une passerelle pour piétons, sans maisons, terminée en 1634, ébranlée en 1709 par la débacle , détruite et reconstruite en 1717, détruite en 1795, reconstruite en 1804 , 4 fois remplacée de 1804 à 1940 .

Compte tenu que la plupart des ponts de XVII^{ème} siècle étaient des ponts sur pilotis avec des travées de faible portée, compte tenu que ces pilotis devaient certainement servir d'amorce à des amoncellements de glace lors des crues de débacles et d'objets divers charriés lors des autres crues, compte tenu enfin de l'existence des pompes de Notre-Dame et de la Samaritaine, je ne pense pas que les ponts actuels présentent un obstacle à l'écoulement supérieur à celui qui pouvait exister à l'époque (2) (il y a certainement une amélioration en ce qui concerne le Pont Neuf et le Pont Rouge) .

En ce qui concerne les quais, on peut remarquer que l'endigement a commencé dès le début du XIV^{ème} siècle : le Quai des GRANDS AUGUSTINS a été réalisé de 1308 à 1313 pour accéder à l'Hôtel de Nesle. Le Quai de la TOURNELLE date de 1380 (page 56 Michelin) ou 1554 (page 195 Hillairet) . Le Quai CONTI , construit sous Philippe le Bel, a été reconstruit de 1655 à 1662, puis de 1851 à 1853 . Sous François Ier on a réalisé un quai le long du Louvre et de la galerie du bord de l'eau. Le Quai de l'HORLOGE a été réalisé de 1580 à 1611 . Le Quai MALAQUAIS a été établi en 1552 sur une levée en des d'âne destinée à protéger le Petit Pré aux Clercs contre les inondations .

Là où les quais n'existent pas encore en 1650, la situation n'était pas meilleure au XVII^{ème} siècle pour l'écoulement car la recherche de la densité maximale pour les habitations (recherche qui se traduisait en particulier par la construction de maisons sur les ponts) avait amené à construire très près des berges des habitations sur pilotis. Ces pilotis étaient noyés en hautes eaux et devaient offrir une résistance importante au passage de l'eau. En 1735, les berges de la Seine et des Iles étaient pratiquement bordées de quais sur toute leur longueur entre le Pont de la Tournelle et le Pont Royal (et même à l'aval de ce pont en rive droite) .

...../

- (1) qui semble avoir été en pierre dès 1658, si l'on en juge d'après une gravure de cette époque .
- (2) jusqu'en 1621 par exemple, le Pont aux Meuniers, un peu à l'aval du Pont au Change, obstruait l'écoulement depuis près de 4 siècles avec ses arches garnies de moulins .

Il est donc assez vraisemblable que depuis 3 siècles les conditions d'écoulement se sont améliorées progressivement en ce qui concerne la section comprise entre le Pont Royal et le Pont de la Tournelle .

Il est non moins vraisemblable, par contre, que l'extension de Paris à l'aval des Tuileries s'est traduit par un resserrement du lit majeur ; mais si les berges ont été rehaussées, si certains bras ont été comblés et certaines îles rattachées à la berge, les remblaiements ont été sans doute effectués à l'aide de matériaux pris dans le lit mineur ; de plus, des dragages ont pu être réalisés dans le lit mineur pour améliorer la navigation .

On peut donc dire que l'échelle de la Tournelle est située en amont d'une section du cours de la Seine dans laquelle l'écoulement a certainement été amélioré entre 1640 et 1870 ; cette section est elle-même située à l'amont d'un tronçon le long duquel les conditions d'écoulement ont été plutôt aggravées . Pour une même cote à l'échelle de la Tournelle, les débits ont sans doute plutôt diminués de 1640 à 1870 mais assez peu (5 à 10 % par exemple) .

Je pense donc que l'on pourrait appliquer la courbe de tarage de 1870 à toutes les cotes relevées au XIXème siècle. Il est par contre sans grand intérêt de chercher à déterminer les débits des crues du XVIIIème siècle étant donné l'incertitude qui pèse sur les transpositions des cotes anciennes (exprimées évidemment en pieds et pouces) en valeurs métriques .

L'INGENIEUR en CHEF

A. GOUBET

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. GASPARD " Les Crues de la Seine à Paris " .
Mémoires et Travaux de la S.H.F. - volume 1 - année 1954 .
- [2] A. GOUBET " Débits de la Seine à Paris en crue "
novembre 1959 et addendum de mars 1968
- [3] S. BOLENSKI... " Jaugeages de la Seine à Paris pendant la crue de janvier 1955 "
Mémoires et Travaux de la S.H.F. - volume 1 - année 1954 .
- [4] E. BELGRAND ... " la Seine : études hydrologiques, régime de la pluie, des sources,
des eaux courantes. Applications à l'Agriculture " 1873
- [5] De PREAUDEAU .. " Manuel hydrologique du Bassin de la Seine "
Paris - Imprimerie Nationale - 1884
- [6] E. BELGRAND ... " Note sur les sécheresses de 1857 et 1858 "
Annuaire de la Société Météorologique de France - 1858
- [7] BRESSE " Etude sur la statistique des jaugeages effectués dans les
principaux bassins français "
Annales des Ponts-et-Chaussées - 3ème Trimestre 1897
- [8] BELGRAND " Etude de la grande crue de la Seine en mars 1876 " .
et LEMOINE
- [9] Ch. RITTER " Jaugeage des eaux courantes "
Annales des Ponts-et-Chaussées - 1892 - tome 1
- [10] Ch. RITTER " Note sur le jaugeage de la Seine à Paris pendant la crue
de novembre 1896 "
Annales des Ponts-et-Chaussées - 1896 - tome 2
- [11] ARANA " Observations faites sur la Seine à Paris pendant la crue de
janvier - février mars 1910 "
Annales des Ponts-et-Chaussées - 1911 - VI
- [12] M. DELACHENAL " Observations de la crue de 1910 "
et R. LEFORT Annales des Ponts-et-Chaussées - 1911 - IV
- [13] LALANNE " Note sur les dernières crues de la Seine "
et LEMOINE C.R. de l'Académie des Sciences de 1879
- [14] MAILLET " Résumé des observations météorologiques et hydrométriques
de 1891 à 1900 " .
Annuaire de la Société Météorologique de France de 1903
- [15] H. BABINET " La crue de la Seine de janvier 1955 "
Mémoires et Travaux de la S.H.F. - volume 1 - année 1955 .